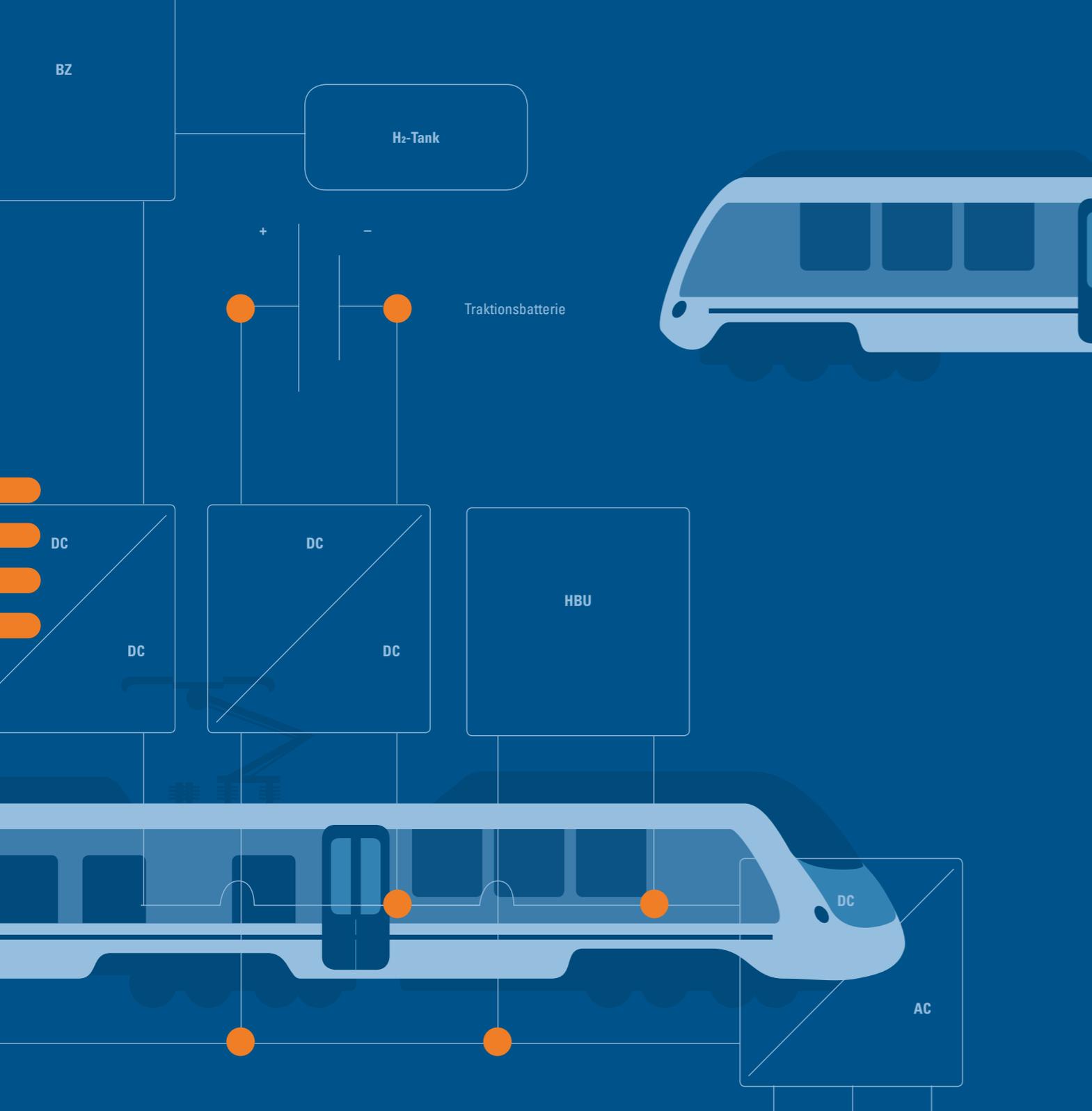




Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienen- personennahverkehr

NOW
NOW-GMBH.DE



Zielsetzung der Studie

- Im Auftrag der NOW GmbH wurde durch das Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. das Marktpotenzial alternativer Antriebe für Fahrzeuge im deutschen Schienenpersonennahverkehr (SPNV) analysiert. Als Ersatz für dieselbetriebene Triebzüge (engl.: Diesel Multiple Unit – DMU) werden dafür schwerpunktmäßig die Potenziale von Batterie-Oberleitungshybridtriebzügen (BEMU) und von Brennstoffzellenhybridtriebzügen (FCEMU) beschrieben. Schließlich wird das Marktpotenzial von BEMU und FCEMU für sämtliche anstehenden SPNV-Wettbewerbsnetze, in denen heute DMU eingesetzt werden, untersucht.
- Diese Broschüre fasst die wesentlichen Ergebnisse der Studie zusammen.

Anmerkung zu den Fahrzeugbezeichnungen

Für Brennstoffzellenhybridtriebzüge haben sich mehrere Notationen im deutschsprachigen und internationalen Bereich etabliert. Synonym werden FCEMU (Fuel Cell Electric Multiple Unit), HEMU oder H₂MU (Hydrogen Multiple Unit), H₂BZ-Triebzug sowie WBH (Wasserstoff-Brennstoffzellenhybrid oder Wasserstoff-Batteriehybrid) verwendet.

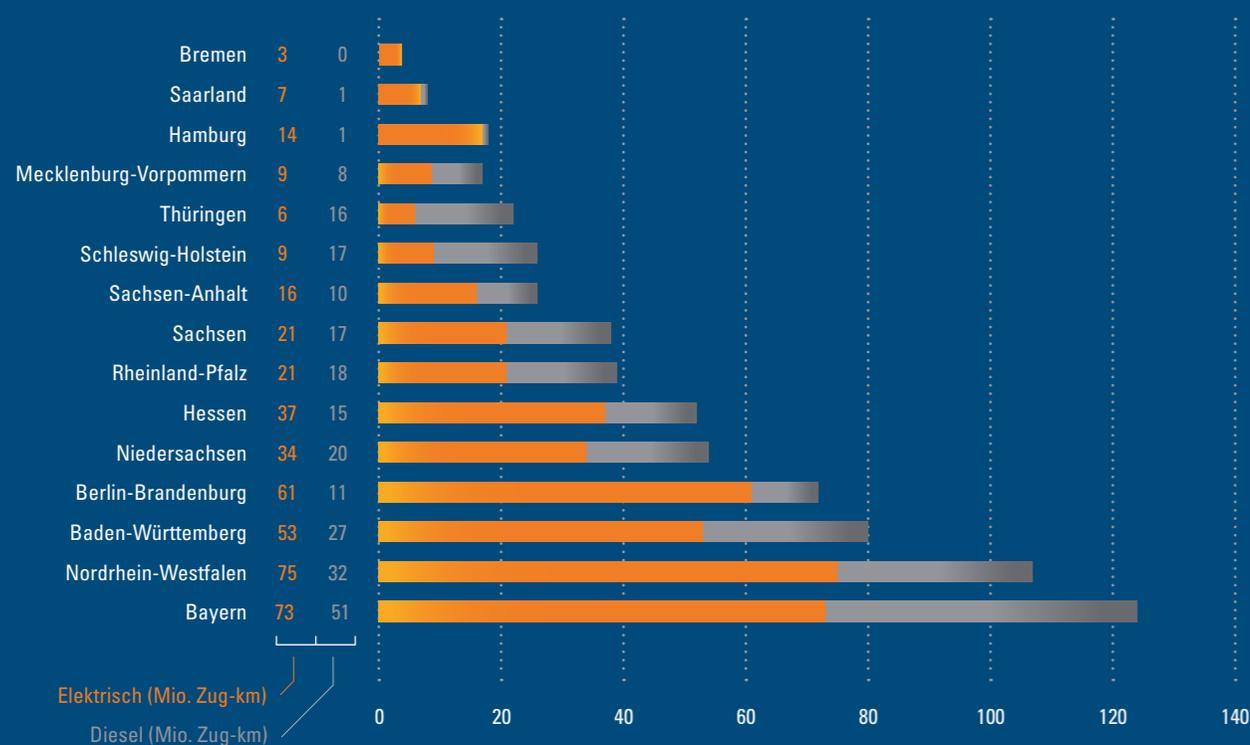
Für Batterie-Oberleitungshybridtriebzüge werden überwiegend die Abkürzungen BEMU (Battery Electric Multiple Unit), OBH (Oberleitungsbatteriehybrid) und BET (Batterieelektrischer Triebzug) genutzt.

In diesem Bericht werden einheitlich die Abkürzungen BEMU, FCEMU, EMU (Oberleitungselektrischer Triebzug), DMU (Dieseltriebzug) und DHEMU (Dieselhybridtriebzug) verwendet. Als Sammelbezeichnung für Hybridtriebzüge wird das Kürzel XEMU genutzt.

Statt „Akkumulator“ wird in diesem Bericht synonym der Begriff „Batterie“ verwendet.

1	Ausgangslage: Dieselbetrieb im deutschen SPNV	7
2	Lokal emissionsfreie Technologieoptionen für nicht- und teilelektrifizierte Linien	13
	Technologieüberblick und Marktsituation	13
	Kostenbetrachtung	19
	Beitrag zum Klimaschutz (CO ₂ -Emissionen)	22
	Bewertung der Eignung der Antriebsoptionen	24
	Wettbewerbsverfahren und bereits bestellte Fahrzeuge	25
3	Marktpotential hybrider Antriebe im deutschen SPNV	27
4	Ausblick / Weiterer Forschungsbedarf	32
	Abbildungen	33
	Tabellen	34

ABBILDUNG 1 Betriebsleistungen im SPNV mit Elektro- und Dieseltraktion



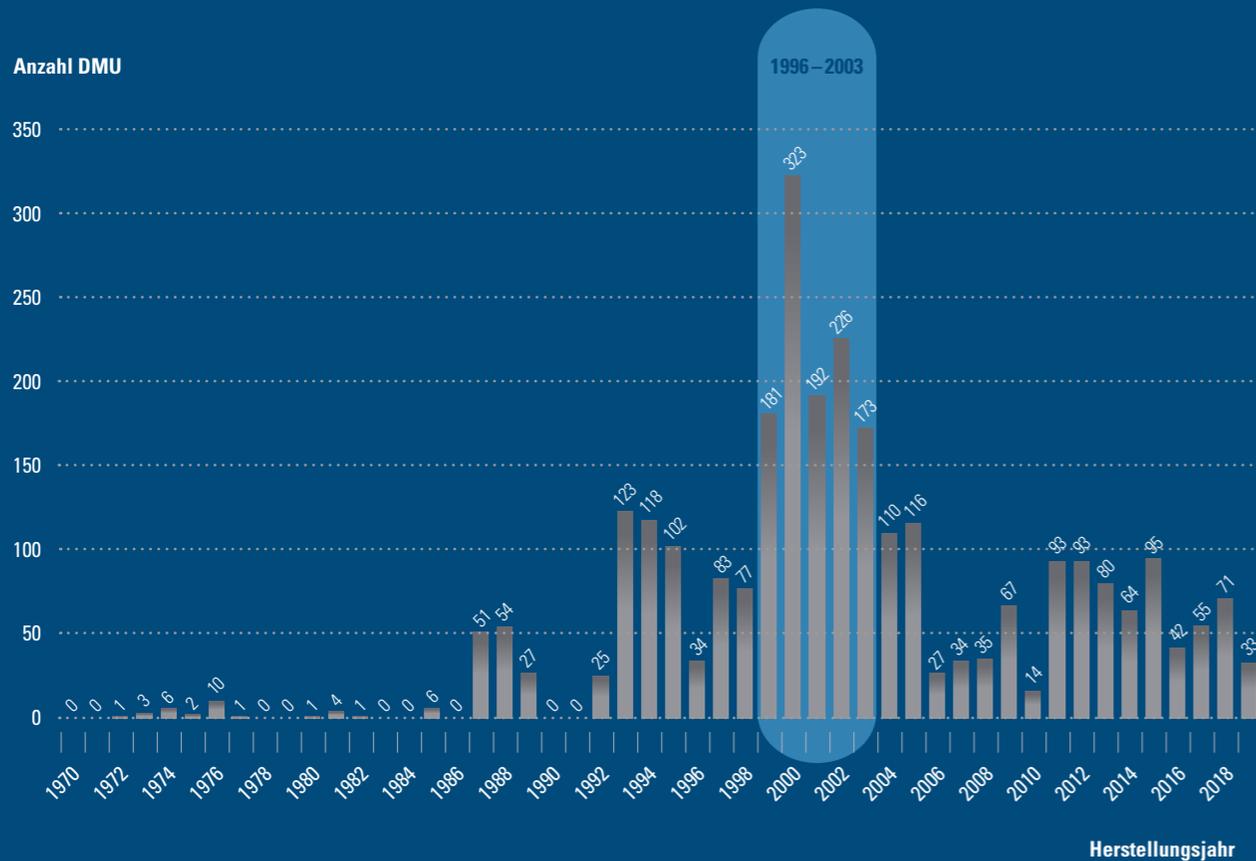
Datenquelle: BAG-SPNV 2018¹

1 Ausgangslage: Dieselbetrieb im deutschen SPNV

- Das deutsche **Schiennetz** (Schienenwege der DB Netz AG sowie nicht-bundeseigene Schienenwege zusammen) **ist zu 54 %** elektrifiziert (Stand 2015), die bundeseigenen Schienenwege allein sind (Stand 2020) zu 61 % elektrifiziert.
- Nach Daten der Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr (BAG-SPNV) wurden im Jahr 2017 **242,5 Millionen Zug-km** und damit **36 %** der gesamten im deutschen SPNV erbrachten Betriebsleistung mit **Dieseltriebzügen bzw. diesellokbespannten Zügen** erbracht. Der größte Anteil davon entfällt auf die großen Flächenländer wie Bayern, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg. In Abbildung 1 ist die Betriebsleistung nach Bundesländern aufgeschlüsselt dargestellt.
- Im Jahr 2019 waren laut Fahrzeugeinstellungsregister des Eisenbahnbundesamts **2.824 Triebwagen und Triebzüge mit Dieselantrieb** in Deutschland gemeldet (aus insgesamt 34 Bau-reihen). Hinzu kamen 123 Diesellokomotiven der DB AG sowie einige zusätzliche Diesellokomotiven von privaten Eisenbahnverkehrsunternehmen.

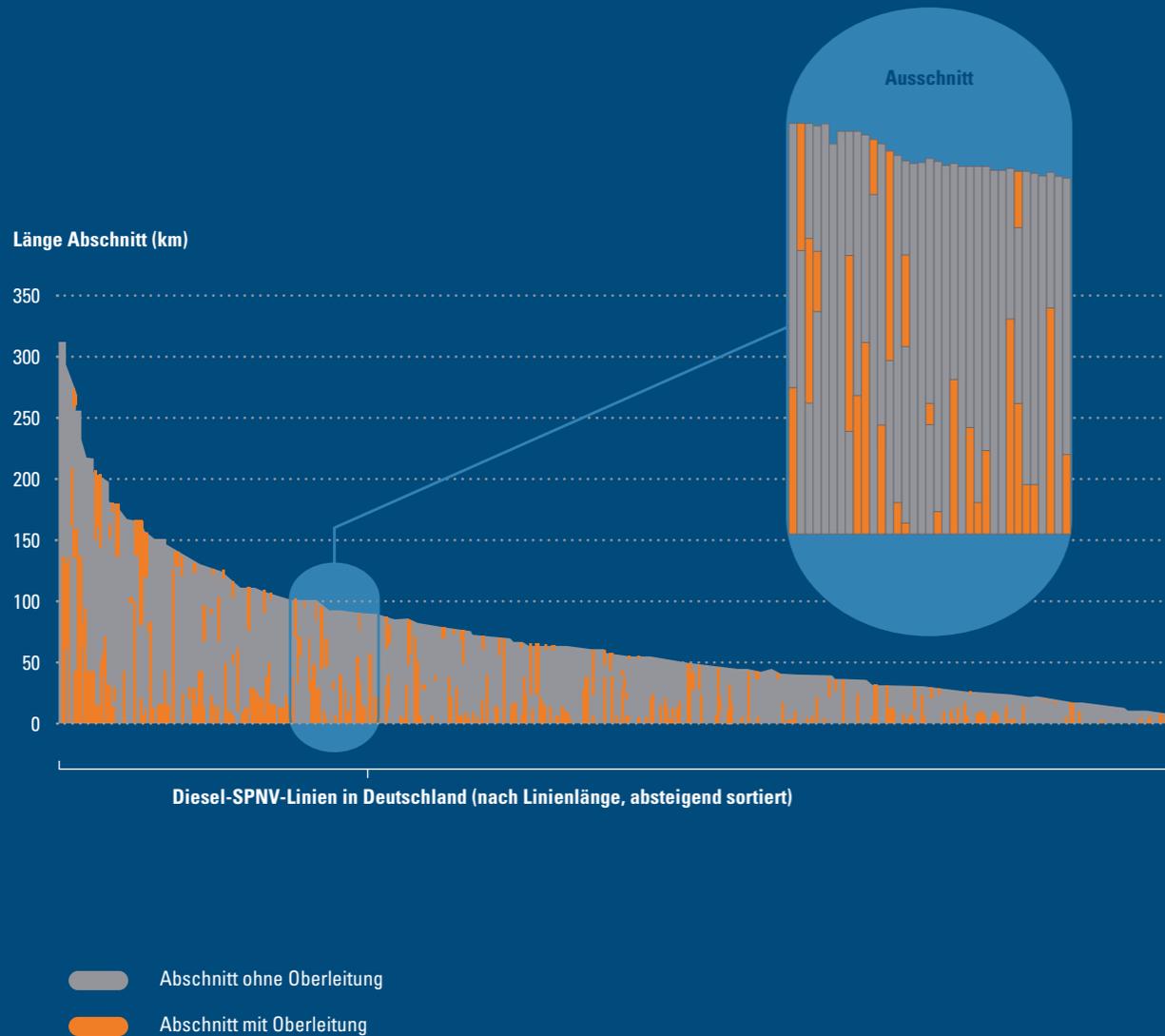
¹ BAG-SPNV (2018): Dossier Verteilung der Traktionsart im SPNV 2017. Online unter: <https://bag-spnv.de/files/bag-spnv/downloads/Dossier%20Verteilung%20Traktion%20BL%20final.pdf>

ABBILDUNG 2 Anzahl aktiver Dieseltriebzüge nach Herstellungsjahr (ab 1970), Datenauswertung auf Basis Fahrzeugeinstellungsregister Eisenbahnbundesamt (ohne Diesellokomotiven)



- Das **Durchschnittsalter** der in Deutschland eingesetzten Dieseltriebfahrzeuge betrug 2019 **16,5 Jahre** (vgl. Abbildung 2). Viele der heute im Einsatz befindlichen Fahrzeuge sind nach der Regionalisierung des SPNV 1996 in den Jahren 1999 bis 2003 gebaut worden (hellblau unterlegter Bereich in der Abbildung). Bei einer typischen Fahrzeugnutzungsdauer von 25 bis 30 Jahren ergibt sich allein auf Grund der Altersstruktur der Bestandsfahrzeuge in den nächsten 5 bis 10 Jahren ein deutlicher Flottenerneuerungsbedarf.
- Die dieselbetriebenen Triebfahrzeuge werden heute auf etwa 500 SPNV-Linien eingesetzt. Eine Analyse des DLR aus dem Jahr 2018 hat ergeben, dass etwa 57 % der untersuchten Linien auf weniger als einem Zehntel der gesamten Streckenlänge elektrifiziert sind und die Hälfte der Linien kürzer als 58 km ist (vgl. Abbildung 3). Grundsätzlich gilt dabei, dass Strecken mit einem hohen Elektrifizierungsgrad und kurzen Elektrifizierungslücken für den Einsatz von Batterietriebzügen und langlaufende Strecken mit geringem Elektrifizierungsgrad eher für Brennstoffzellenhybridtriebzüge geeignet sind. Eine verallgemeinerbare Regel für oder gegen eine bestimmte Antriebsart lässt sich daraus jedoch nicht ableiten, da das Einsatzspektrum von Batterietriebzügen durch Nachelektrifizierungen erweitert werden kann.

ABBILDUNG 3 Elektrifizierungsmuster dieselbetriebener SPNV-Linien in Deutschland²



Das geplante Elektrifizierungsprogramm des Bundes sieht eine Erhöhung des Elektrifizierungsgrades des bundeseigenen Schienennetzes von 60 % auf 70 % innerhalb der nächsten Jahre bis 2025 vor, wobei diese Elektrifizierungsvorhaben in der Regel langwierigen Genehmigungs- und Planungsprozessen unterliegen und vor diesem Hintergrund und auf Grund knapper Kapazitäten der Bauwirtschaft die Erreichbarkeit des 70 %-Ziels innerhalb der nächsten fünf Jahre kaum umsetzbar erscheint. Dennoch hat die Bundesregierung eine milliardenschwere Modernisierungsoffensive eingeleitet und stellt bis 2030 weitere 11 Mrd. € für Infrastrukturmaßnahmen bereit.³

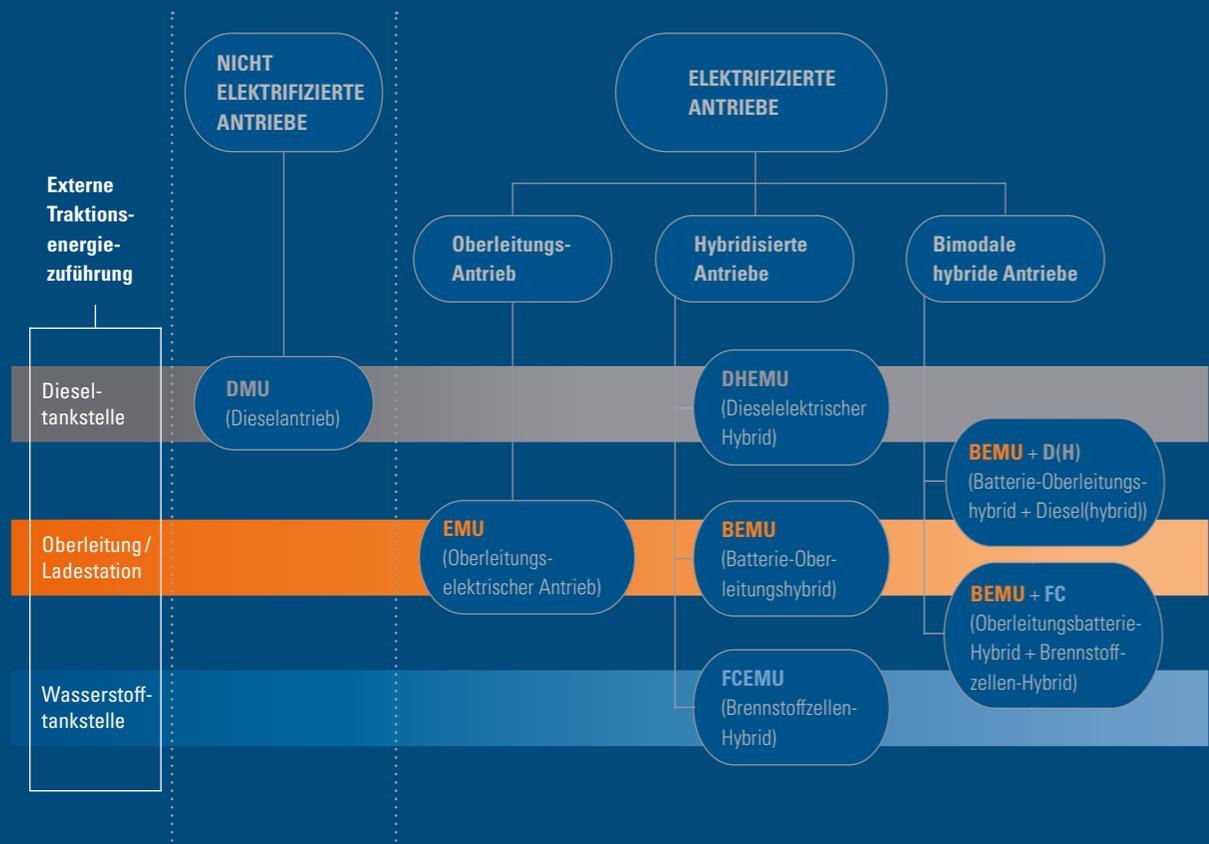
Im europäischen Ausland haben Großbritannien und Frankreich einen ähnlichen Anteil von nicht elektrifizierten Strecken und Bestandsflotten aus Triebfahrzeugen mit Dieselantrieb und mit Zweikraftantrieb (Dieselmotor sowie elektrischer Oberleitungsbetrieb). In beiden Ländern gibt es umfangreiche Planungen für den Einsatz von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenhybridantrieben (Brennstoffzelle und Akkumulator als Leistungspuffer und Rekuperationsspeicher) und Batterie-Oberleitungshybridtriebzügen sowie von Triebfahrzeugen mit Zweikraftantrieben (Bi-mode), die neben einem oberleitungselektrischen Antrieb auch Brennstoffzellen und Batterien nutzen sollen. In Großbritannien zeichnet sich ab, dass die Umrüstung bestehender Triebwagen von Diesel auf Hybridtechnik zukünftig eine wesentliche Rolle spielen wird.

² Pagenkopf, J.; Böhm, M.; Haas, J.; Friedrich, H. (2018): Analysis of German diesel operated regional railway lines' patterns with regard to the application of battery and fuel cell electric trains. The Fourth International Conference on Railway Technology – Railways

2018, 3.–7. Sept. 2018, Sitges, Spanien. Online unter: <https://elib.dlr.de/121661>

³ Quelle BMVI: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2020/003-scheuer-bund-staerkt-schiene.html>

ABBILDUNG 4 Antrieboptionen im SPNV



2 Lokal emissionsfreie Technologieoptionen für nicht und teilelektrifizierte Linien

Technologieüberblick und Marktsituation

- Die Antrieboptionen im SPNV lassen sich grob den nicht elektrifizierten Antrieben (hier der klassische Dieselantrieb⁴) und den elektrifizierten Antrieben zuordnen (vgl. Abbildung 4). Als lokal emissionsfreie Antriebsalternativen zu DMU im SPNV etablieren sich derzeit hybridisierte elektrische Triebzüge in Form von Brennstoffzellenhybrid- oder Batterie-Oberleitungshybridtriebzügen. Dieselhybridtriebzüge als Umrüstung bestehender Dieseltriebzüge sind ebenfalls in Planung, stellen aufgrund ihrer nur teilweisen lokalen Emissionsfreiheit jedoch eher eine Übergangslösung dar. Die in England und Frankreich verbreiteten Zweikraft- und Dreikraftantriebe (bimodal bzw. trimodal) haben zwei bzw. drei voneinander unabhängige Antriebssysteme (z. B. Batterie-Oberleitungshybridantrieb mit zusätzlicher Brennstoffzelle), werden in Deutschland aber bisher nicht eingesetzt.
- Brennstoffzellenhybridtriebzüge für den deutschen Markt sind bereits zugelassen (Alstom Coradia iLint) oder in der Entwicklung (z. B. Siemens Mireo Plus H). BEMU verschiedener Hersteller (Bombardier Talent 3 BEMU, Siemens Mireo Plus B, Stadler FLIRT Akku) sind entweder im Zulassungsprozess oder haben diese teilweise bereits erhalten. Die DB Regio baut Bestands-DMU vom Typ Siemens Desiro auf Dieselhybridantrieb um.

⁴ Grundsätzlich können auch Dieseltriebzüge über eine elektrische Leistungsübertragung (Generatoren) verfügen, überwiegend kommen bei SPNV jedoch hydrodynamische, hydromechanische und mechanische Getriebe zum Einsatz.

ABBILDUNG 5 Hybridtriebzüge im deutschen SPNV in der Zulassung oder bereits im Fahrgasteinsatz (siehe auch Tabelle 1)



BEMU
Stadler FLIRT Akku BR 427
(© Stadler)



BEMU
Siemens Cityjet eco
(Prototypumbau eines EMU Desiro ML)
(© ÖBB, Christopher Seif)



BEMU
Bombardier Talent 3 BEMU BR 442
(© Bombardier)



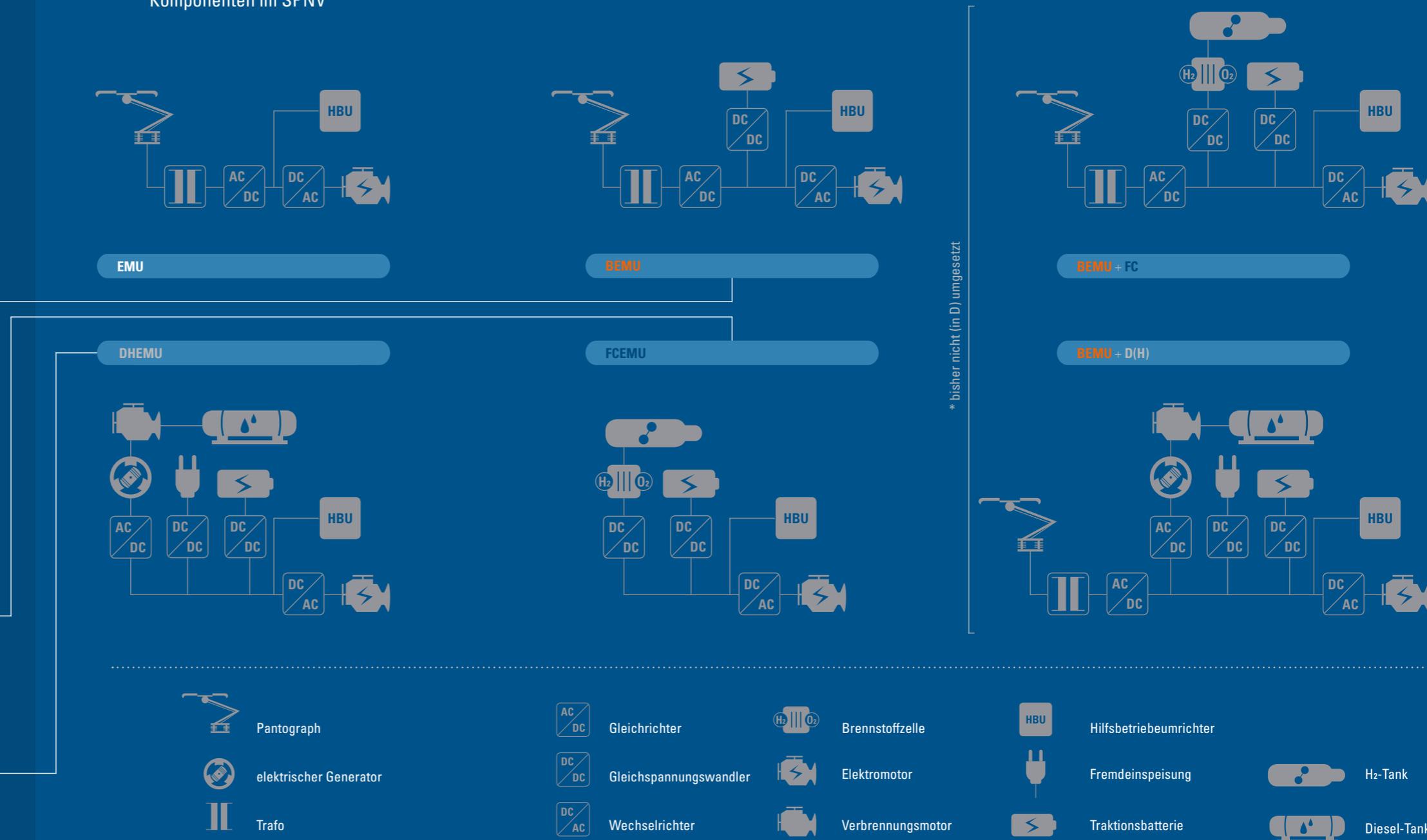
FCEMU
Alstom iLINT BR 654
(© R. Frampe)



DHEMU
Siemens Desiro Eco-train Hybrid BR 642
(© Andreas Schaarschmidt)

ABBILDUNG 6 Antriebsoptionen und ihre Komponenten im SPNV

Weitere Antriebskonzepte sind denkbar. Topologien der Fahrzeuge weichen ggf. von den dargestellten Topologien ab.



- Abbildung 6 zeigt mögliche Antriebstopologien und Umsetzungsbeispiele der Fahrzeughersteller, bei denen die Leistungsübertragung elektrisch erfolgt.

Ein zentrales Differenzierungsmerkmal der Fahrzeuge mit hybriden Antrieben stellt die erzielbare Reichweite dar, die die Fahrzeuge ohne externe Energiezuführung während der Fahrt zurücklegen können, bevor sie wieder betankt bzw. die Batterien nachgeladen werden müssen (vgl. Abbildung 7).

- Die Hersteller von Batterietriebzügen geben Reichweiten von von 40 bis 80 km, teilweise auch über 100 km auf oberleitungsfreien Abschnitten an. Die konkrete Reichweite hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, die durch den Streckenzuschnitt, das Betriebsprogramm, die Witterungsbedingungen und natürlich die installierte Akkukapazität bestimmt werden. Durch betrieblich optimal eingebundene Nachelektrifizierungen an der Strecke sowie die Erhöhung der installierten Batteriekapazitäten kann der Streckenelektrifizierungsaufwand verringert werden – insbesondere bei schwer elektrifizierbaren Abschnitten (wie Tunnel,

Brücken). Die Reichweite der Batterietriebzüge kann einerseits durch eine Erhöhung der installierten Batteriekapazitäten erreicht werden. Weitere reichweitenerhöhende Maßnahmen stellt beispielsweise optimierte Energiemanagementstrategien und Fahrweisen sowie der Einsatz energieeffizienter Nebenaggregate wie Wärmepumpen dar. Für Brennstoffzellenhybridtriebzüge werden Reichweiten bis 1.000 km erwartet.

- Legt man die typischen täglichen Fahrleistungen im SPNV darüber, so zeigt sich, dass DMU für die meisten Verkehrsaufgaben im SPNV über eine genügend hohe Reichweite verfügen und FCEMU zumindest einen großen Teil der derzeitigen Fahrzeugumläufe ohne untertägige Betankung absolvieren können. Für BEMU ist (in Abhängigkeit von der nicht elektrifizierten Streckenlänge) eine in der Regel mehrfache Nachladung der Traktionsbatterien innerhalb des Fahrzeugumlaufs erforderlich.

ABBILDUNG 7 Reichweiten von BEMU, FCEMU und DMU vor dem Nachladen bzw. Nachtanken sowie typische tägliche Fahrleistungen im SPNV

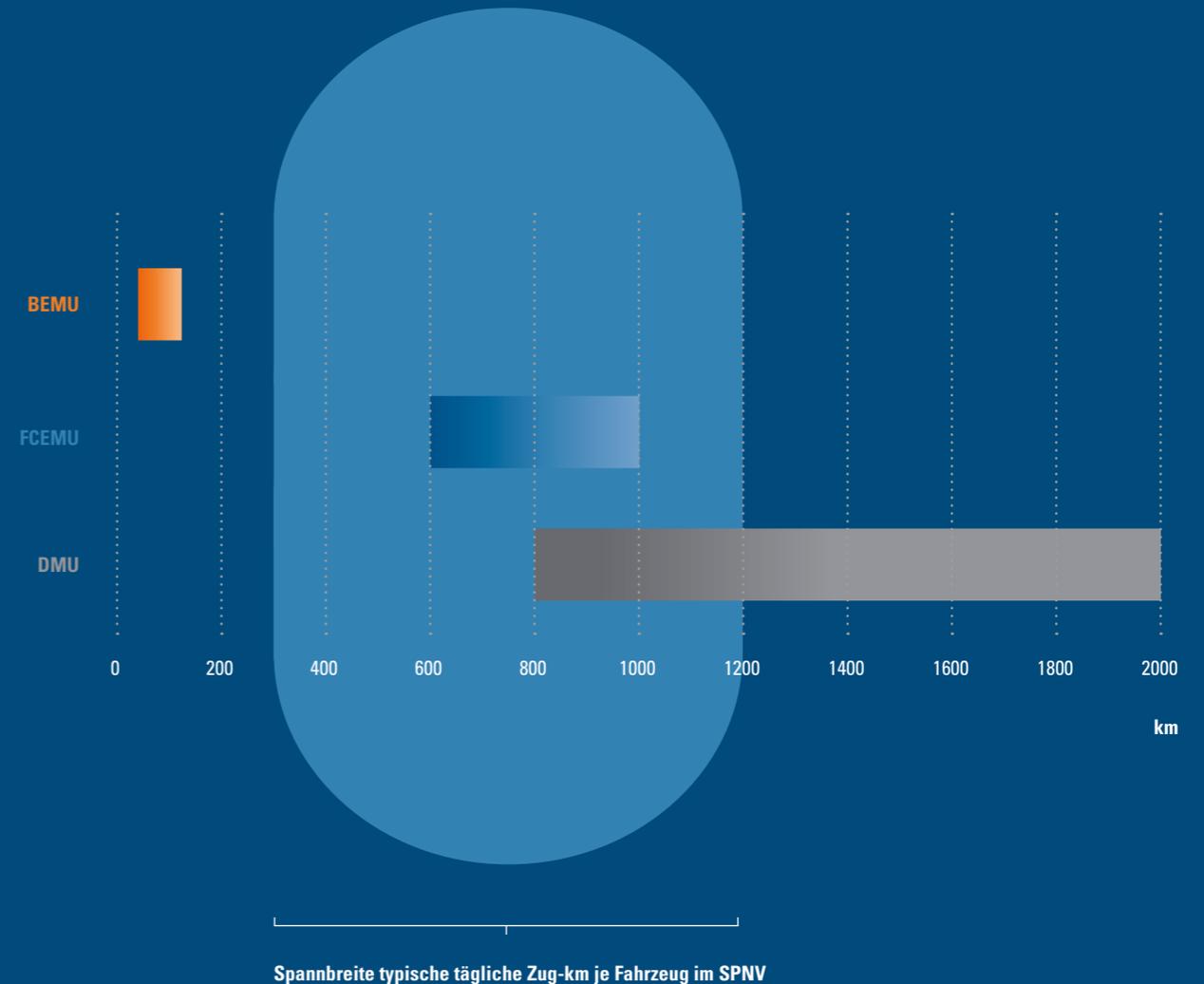


TABELLE 1 SPNV-Fahrzeuge mit Hybridantrieben. Teilweise Angaben für Prototypen, spätere Serienfahrzeuge können davon kundenspezifisch abweichen (DLR-Fahrzeugdatenbank)

		Bombardier Talent 3 BEMU BR 442	Siemens Mireo Plus B BR 463	Stadler FLIRT Akku BR 427	Alstom Coradia Continental batterie-elektrisch	Alstom iLINT BR 654	Siemens Mireo Plus H BR 463
Antriebskonzept		BEMU	BEMU	BEMU	BEMU	FCEMU	FCEMU
Anzahl Wagen		3	2 (3)	2 (3)	3	2	2 (3)
Fahrzeuglänge	m	56	52 (71)	xx (59)	56,9	54	52 (71)
Sitzplätze			120 (165)	124 (154)	150	156	
Leistung elektrisch (H ₂ -bzw. BAT-Betrieb/ OL-Betrieb)	kW	1010 / 2020		xxxx (1000)		740	400 (nur BZ)
Max. Beschleunigung (im BAT/OL/H ₂ -Betrieb)	m/s ²	1,0	1,1 – 1,25				
Höchstgeschwindigkeit	km/h	160 (140 im Batterie- betrieb)	160 (140 im Batterie- betrieb)	160 (140 im Batterie- betrieb)	160	140	140
Speicherkapazität H ₂ -Tank	kg H ₂	–	–	–		180 bis 260	
Speicherkapazität Batterie (installiert)	kWh	300 – 440	~ 700			220	~ 200
Betankungszeit minimal	min					15	
Nachladezeit minimal (Schnellladung)	min	7 – 10	12				
Reichweite	km	35 – 40 (derzeit) 80 – 100 (perspektivisch)	40 – 80 (60 – 120)	ca. 80 (150 km unter opti- malen Bedingungen)	70 – 120	600 – 1000	500 – 600 (800 – 1000)
Batterie		3 Module à 73,5 kWh (300 kWh) NMC/C	2-4 Module (4-6 Module) NMC/LTO			2 Module à 110 kWh (220 kWh) NMC/C	2 Module NMC/LTO
Lebensdauer Batterie	a	5 – 10	15				15
Erster Fahrgastregelbetrieb			2023 (Ortenau)	2022 (NAH.SH)	2023 (ZVMS/ZVNL)	2018/2021 (Elbe-Weser)	

Kostenbetrachtung

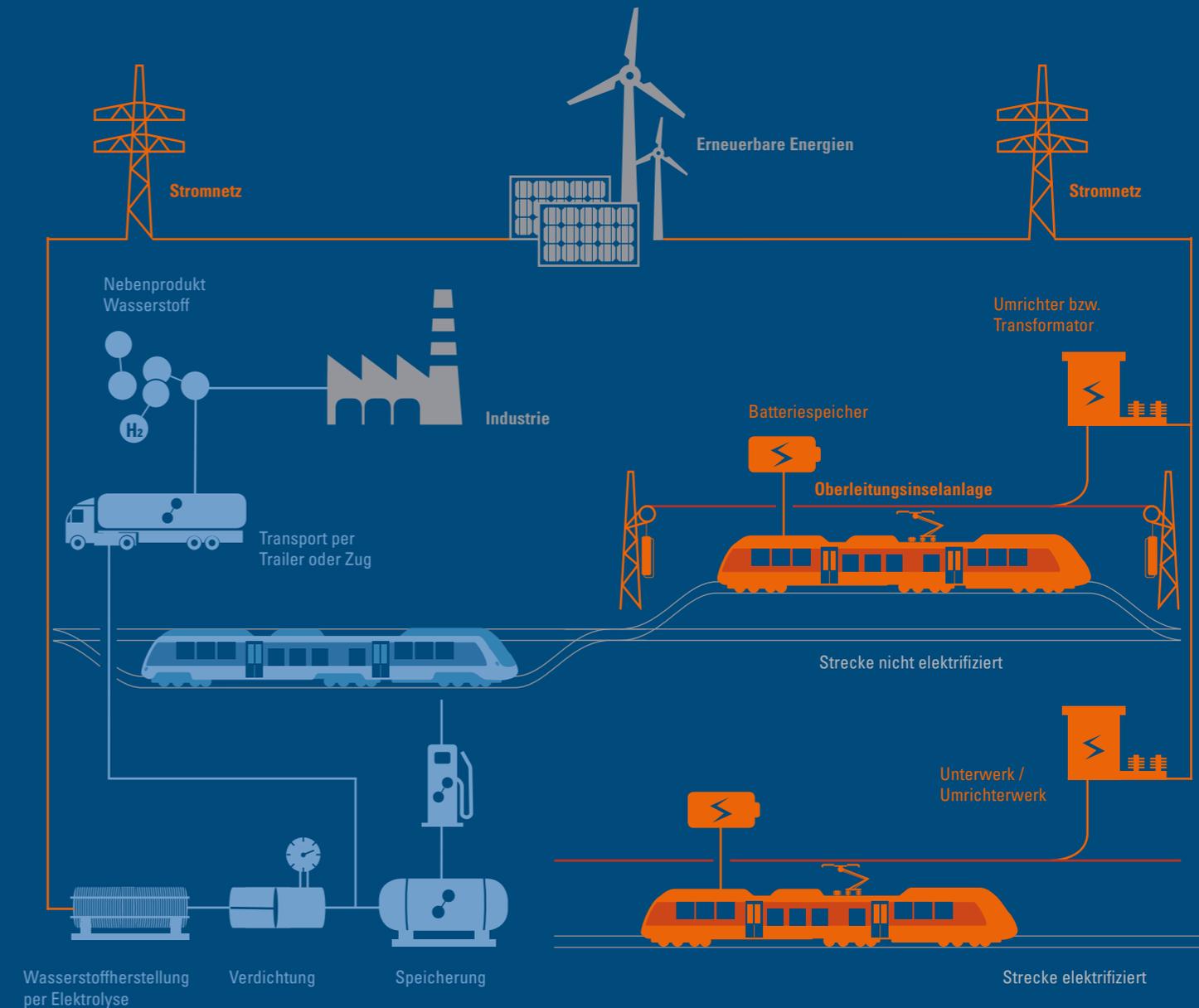
- Die Preise von BEMU und FCEMU bewegen sich derzeit etwa in einem Bereich von 5,5 bis 6,5 Mio. €. Dieseltriebzüge (DMU) und Oberleitungstriebzüge (EMU) mit der gleichen Sitzplatzkapazität kosten etwa 4 bis 5 Mio. €. Ausgehend von den daraus resultierenden etwa 1,5 Mio. € Mehrkosten der Hybridtriebzüge können sich jedoch auch deutliche Abweichungen nach oben bzw. unten ergeben können, abhängig beispielsweise von der Antriebsart, der installierten Speicherkapazität, den Losgrößen und inkludierten Vertragsbestandteilen. So dürften die Mehrkosten eines BEMU mit einer vergleichsweise kleinen installierten Batteriekapazität gegenüber einem reinen Oberleitungstriebzug eher gering sein.
- Hinzu kommen die für die Nachladung erforderlichen Infrastrukturkosten, die im Rahmen einer Gesamtkostenbetrachtung berücksichtigt werden müssen, also Oberleitungsanlagen und Einspeiseanlagen bei BEMU bzw. Wasserstofftankstellen für FCEMU. Die Kosten für die Nachelektrifizierung hängen von der Charakteristik der bestehenden Streckenelektrifizierung ab, bei einem hohen Ausstattungsgrad mit Oberleitungen sind gegebenenfalls auch nur punktuelle oder auch gar keine Nachelektrifizierungen erforderlich.

- Unterschiede entstehen auch in den Betriebskosten der beiden Antriebssysteme. FCEMU haben aufgrund der verlustbehafteten Energiewandlung in der Brennstoffzelle eine geringere Antriebs-effizienz als BEMU. Damit einhergehend sind im Fall, dass der Wasserstoff elektrolytisch auf Basis von abgaben- und steuerbelastetem Strom erzeugt wird, auch die Traktionsförderkosten höher als die von BEMU mit einer Direktstromnutzung. Bei einer Nutzung von preisgünstigem Prozesswasserstoff aus der chemischen Industrie hingegen können die Energiekosten gegebenenfalls sehr gering sein. Zusätzlich entstehen Kosten für die Aufbereitung bzw. den Austausch von Komponenten bedingt durch die Alterung der Batterien, der Brennstoffzellen und der Wasserstofftanks. Der Kostenvergleich zwischen BEMU und FCEMU ist also stark einzelfallspezifisch von den jeweiligen Randbedingungen abhängig und war nicht Gegenstand der Untersuchung.

- Eine vollständige Streckenelektrifizierung mit Einsatz von Oberleitungstriebzügen ist bei einer hohen Taktfrequenz, das heißt Halbstunden- und teilweise Stundentakt, in der Regel die wirtschaftlichste Option⁵ und ist ferner geboten bei einer hohen betrieblichen Relevanz der Strecke, zum Beispiel für Umleiter- und Entlastungsverkehre.

⁵ Vgl. dazu auch Müller, André; Stephan, Arnd (2017): Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV. Gutachten für die Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH (BEG). Berichtsnummer 2017-EB-008-1

ABBILDUNG 8 Mögliche Fahrzeug- und Infrastrukturkonzepte FCEMU und BEMU

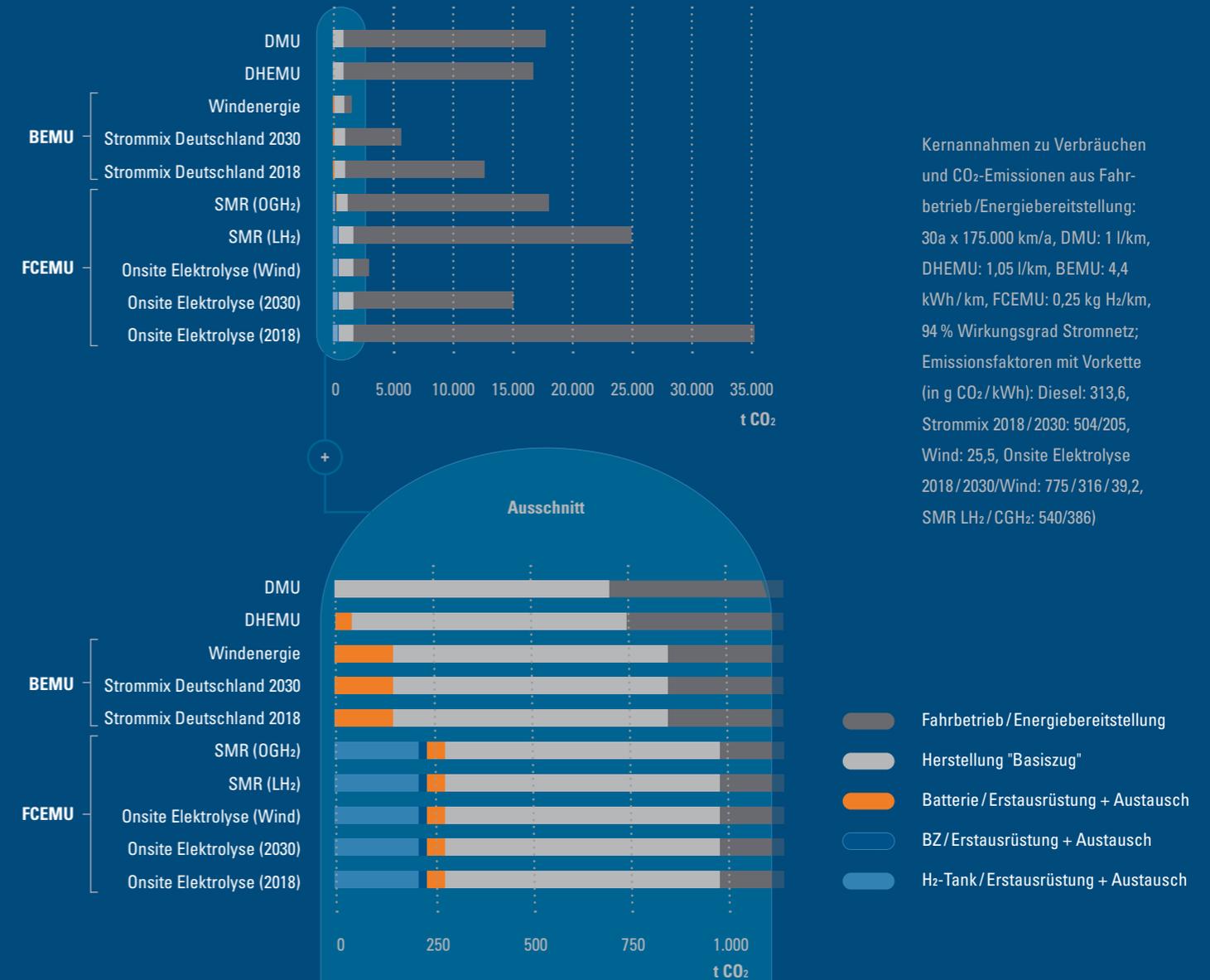


Beitrag zum Klimaschutz (CO₂-Emissionen)

- Anders als bei Pkw spielen bei Triebzügen die CO₂-Emissionen der Herstellung von Fahrzeug und Komponenten im Vergleich zu den CO₂-Emissionen der Energiebereitstellung und -nutzung im Fahrzeug nur eine untergeordnete Rolle und nehmen erst bei weitgehend dekarbonisierter Energieerzeugungskette einen relevanten Anteil ein (vgl. Abbildung 7). Der Grund dafür liegt in den sehr hohen Kilometerleistungen und langen Einsatzdauern von Triebzügen über 30 und mehr Jahre, selbst wenn die erforderlichen Austauschintervalle von Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftanks einbezogen werden.
- BEMU emittieren bei Betrachtung der gesamten Energieerzeugungskette aufgrund der hohen Antriebseffizienz auch unter dem heutigen Strommix deutlich weniger CO₂ als DMU. Die mit der Herstellung des Wasserstoffs verbundenen CO₂-Emissionen sind für den Fall von FCEMU über den Lebenszyklus nur dann geringer als die Emissionen von Dieseltriebzügen, wenn es sich um Elektrolysewasserstoff mit sehr hohen

Anteilen an erneuerbaren Energien handelt. Der Grund hierfür liegt in den technologisch bedingten Energiewandlungsverlusten (Elektrolyse, Verdichtung und Speicherung über Brennstoffzelle bis Fahrmotor). Bei einer Umstellung auf eine wasserstoffbasierte Wirtschaft müssen bei einer Bilanzierung der CO₂-Emissionen jedoch weitere, den Einsatz von FCEMU begünstigende Aspekte (z. B. Nutzung von Überschussstrom, Netzdienlichkeit) berücksichtigt werden. Insofern ist auch die Direktnutzung von Strom aus Erneuerbare-Energien-Anlagen (Variante „Windenergie“) zur Nachladung von BEMU auf die zeitliche und örtliche Parallelisierung von Stromangebot und Stromnachfrage (Nachladung) beschränkt. Die üblicherweise mindestens partielle stationäre Ein- und Ausspeicherung verringert damit den CO₂-Vorteil von BEMU gegenüber FCEMU.

ABBILDUNG 9 Beispielhafte CO₂-Emissionen je Fahrzeug bei 30 Jahre Einsatzdauer inkl. Fahrzeugherstellung in Abhängigkeit der CO₂-Intensitäten der Energiebereitstellung



Bewertung der Eignung der Antriebsoptionen

- Die Eignungspotenziale von BEMU und FCEMU lassen sich anhand konkreter Streckeneigenschaften bestimmen. Maßgeblich sind dabei unter anderem die bestehende Elektrifizierung einer Strecke bzw. der Strecken in einem Linienbündel sowie ferner die Anforderungen an die betriebliche Flexibilität der Fahrzeuge.
- Dieselhybridantriebe (DHEMU) bieten Vorteile aufgrund sehr hoher Reichweiten und der Möglichkeit zur Umrüstung und Weiternutzung von Bestands-DMU. Allerdings sind hier in der Regel nur eine partielle Emissionsfreiheit und eine Reduzierung des Dieselkraftstoffbedarfs im einstelligen bis unteren zweistelligen Prozentbereich möglich.
- Bimodale und trimodale Antriebe (BEMU + D(H) oder BEMU + FC) können die Vorteile der hohen Energieeffizienz von BEMU-Fahrzeugen mit der hohen Energiedichte von Dieselkraftstoff oder Wasserstoff verbinden und somit die Einsatzreichweite und -flexibilität von batteriebetriebenen Fahrzeugen deutlich erhöhen. Nachteilig sind die hohe technische Komplexität des Antriebsstrangs und damit einhergehend hohe Investitions- und Betriebskosten.
- Verbesserungen bei Einzeltechnologien und -systemen werden in den nächsten Jahren dazu beitragen, die Fahrzeugreichweiten zu erhöhen und die Lebensdauerkosten der Hybridantriebskonzepte zu verringern. Kernaspekte sind hier Entwicklungen bei der Lithium-Ionen-Technologie, Wasserstofftanks und Brennstoffzellen in Bezug auf Leistungs- und Energiedichte, Lebensdauer und Kosten. Weitere wichtige Stellhebel sind bedarfs- und wirkungsgradoptimierte Hilfs- und Komfortverbraucher und leichtbauoptimierte Fahrzeug- und Komponentenstrukturen.

Wettbewerbsverfahren und bereits bestellte Fahrzeuge

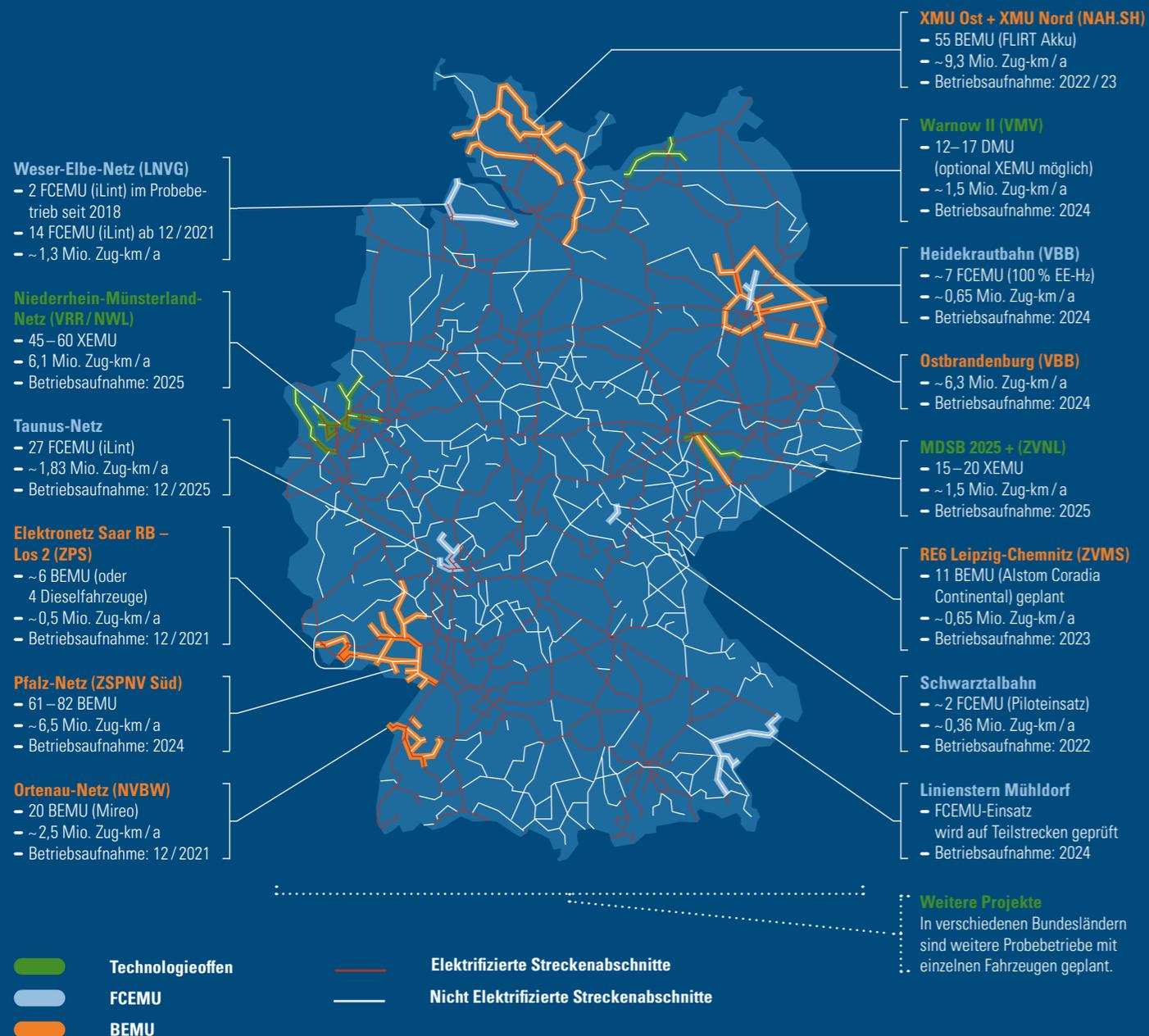
- Bisher wurden in Deutschland 41 FCEMU und 86 BEMU durch fünf Landesgesellschaften bestellt (vgl. Tabelle 2). Weitere Vergabeverfahren für die

Beschaffung hybrider Fahrzeuge laufen entweder noch oder sind in Vorbereitung. Die Aufgabenträger erarbeiten für ihre Wettbewerbsnetze die Antriebs- und Energieversorgungsstrategie selbstständig in Abstimmung mit dem Bund sowie der DB Netz AG.

TABELLE 2 Von den Bundesländern bis 12/2019 bestellte Fahrzeuge mit hybriden Antrieben

Netz & Aufgabenträger	Typ	Fahrzeug	Baureihe	Anzahl	Betriebsaufnahme
Elbe-Weser-Netz (LNVG)	FCEMU	Alstom Coradia iLINT	654	14	2021
Taunus-Netz (RMV)	FCEMU	Alstom Coradia iLINT	654	27	2022
Netze Nord und Ost (NAH.SH)	BEMU	Stadler Flirt Akku	427	55	2022/23
Ortenau-Netz (NVBW/SFBW)	BEMU	Siemens Mireo Plus B	463	20	2023
RE 6 Chemnitz-Leipzig (ZVMS)	BEMU	Alstom Coradia BEMU	440	11	2023
			Summe	127	

ABBILDUNG 10 Aktuelle Wettbewerbsnetze und Pilotprojekte mit Hybridtriebzügen
inkl. bereits bestellter Fahrzeuge



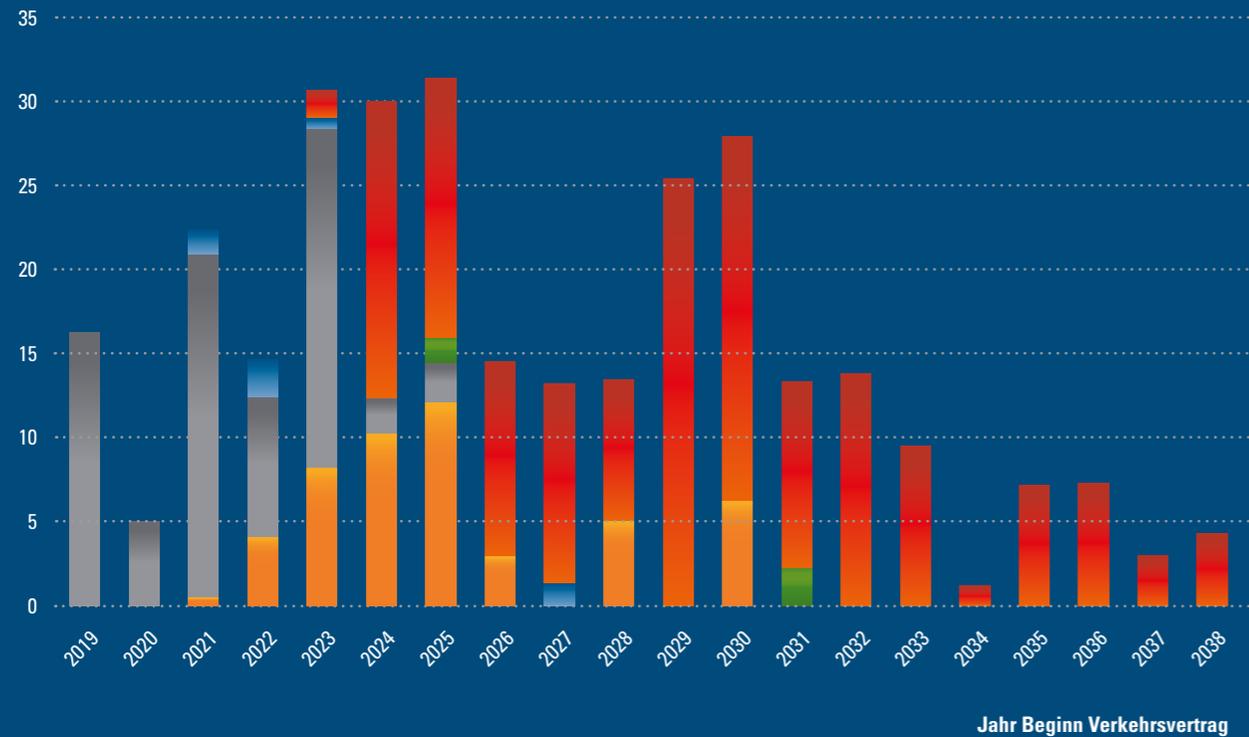
Stand: 12/2019 (kein Anspruch auf Richtigkeit und Vollständigkeit)

3 Marktpotenzial hybrider Antriebe im deutschen SPNV

- Die Ableitung des Marktpotenzials der heute mit Dieseltriebzügen bedienten SPNV-Linien erfolgte im Kontext der zugehörigen Wettbewerbsnetze, um für Gesamtdeutschland eine konsistente Fahrzeugantriebsstrategie ableiten zu können.
- Für den Zeitraum von 2019 bis 2038 wurden im Rahmen der Studie insgesamt 132 Betriebsaufnahmen neuer SPNV-Vergabenetze identifiziert, die für den Betrieb mit Hybridtriebzügen in Frage kommen, da sie zum Zeitpunkt der Betriebsaufnahmen nicht komplett elektrifiziert sein werden. Während bei den Betriebsaufnahmen in den Jahren bis 2023 noch überwiegend DMU zum Einsatz kommen, steht die Art der Traktion bei Betriebsaufnahmen ab 2024 oft noch nicht fest (in Abbildung 10 mit *offen* bezeichnet) und ist damit perspektivisch für Fahrzeuge mit Hybridantrieben geeignet. Nicht betrachtet werden reine E-Netze (EMU), wobei zukünftige sichere Elektrifizierungen von Strecken berücksichtigt wurden.
- In den Jahren 2019 bis 2038 werden über alle neu anlaufenden Verkehrsverträge hinweg in Summe voraussichtlich 305 Mio. Zug-km in den heute mit Dieseltriebfahrzeugen bedienten Netzen in die Betriebsaufnahme gehen (vgl. Abbildung 10). Davon werden 74 Mio. sicher durch DMU bedient werden. Von den restlichen 231 Mio. verteilt sich ein Teil bereits heute fest auf BEMU (49,8 Mio.) bzw. FCEMU (5,6 Mio.) sowie auf BEMU oder FCEMU (3,8 Mio.). Der große Rest ist hinsichtlich der zukünftigen Antriebsart noch offen (171 Mio.). In der Tendenz sind also derzeit mehr Batterie-Oberleitungshybridtriebzüge als Brennstoffzellen-hybridtriebzüge vorgesehen.

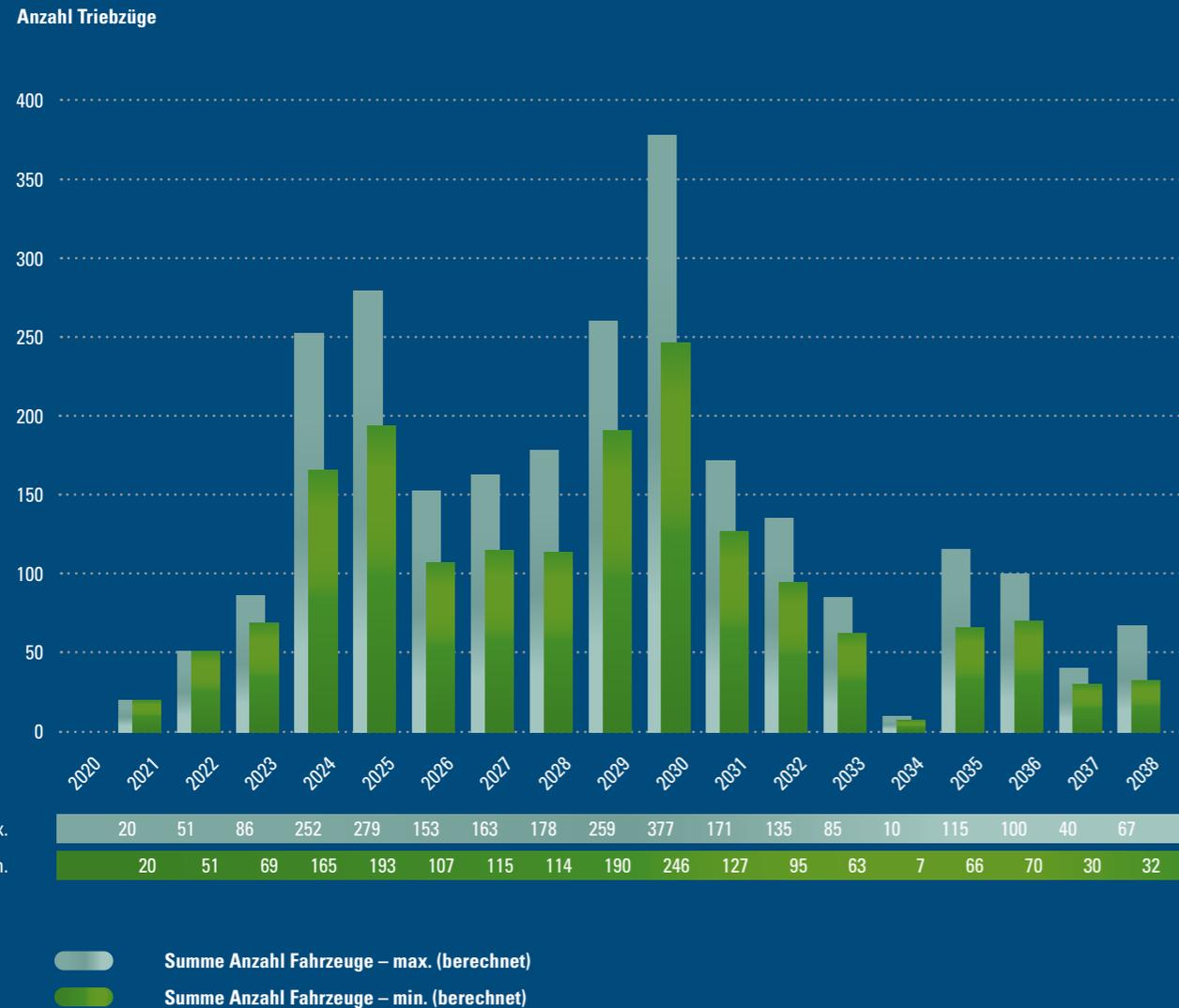
ABBILDUNG 11 Neue Verkehrsverträge (Zeitpunkte der Betriebsaufnahmen) nach Art der Traktion in diesel- und hybridfahrzeugrelevanten Netzen bis 2038

Mio Zug-km neu startender Verkehrsverträge



- Nachfolgend wird das Potenzial für BEMU und FCEMU nicht getrennt nach Antriebstechnologie, sondern integriert als gesamtes Potenzial für lokal emissionsfreie Hybridfahrzeuge ausgewiesen.
- Ob und inwiefern in den noch nicht feststehenden Netzen letztlich BEMU oder FCEMU zum Einsatz kommen, hängt von sehr vielen Faktoren ab und muss Gegenstand weiterführender netz- und linienspezifischer Detailuntersuchungen sein.
- Grundsätzlich lassen sich auch topografisch und betrieblich herausfordernde Strecken mit BEMU befahren, das Vorhandensein einer hinreichenden Nachladeinfrastruktur vorausgesetzt. Ferner gilt sowohl für FCEMU als auch für BEMU, dass die Antriebsleistung ausreichend dimensioniert sein muss, insbesondere wenn Fahrpläne spurtstarker Dieselfahrzeuge, wie zum Beispiel der weitverbreiteten Baureihe 650 (RegioShuttle), vorgegeben werden.
- Bei einer konsequenten Umstellung von Diesel- auf hybride Antriebe im Zuge des Beginns eines neuen Verkehrsvertrags (d. h., gegebenenfalls vorgesehene Weiternutzung von Bestandsfahrzeugen bliebe unberücksichtigt) wurde ein bundesweites Neufahrzeugpotenzial zwischen 1.759 (min.) und 2.539 (max.) Fahrzeugen bis 2038 abgeleitet (vgl. Abbildung 11). Die Spannweite ergibt sich aus der Unsicherheit, wie viele Fahrzeuge konkret für die zukünftigen Netze benötigt werden.
- Der abgeschätzte Neufahrzeugbedarf unterstellt, dass bei Betriebsaufnahmen ab 2023/2024 systematisch tatsächlich Hybridneufahrzeuge zum Einsatz kommen und keine Dieselfahrzeuge beschafft oder DMU-Bestandsfahrzeuge weitergenutzt werden.
- Infolge der hohen Dynamik im SPNV-Sektor unterliegen die hier ermittelten Zahlen einem kontinuierlichen Wandel, das heißt, die Werte ändern sich aufgrund neuer Informationen aus den Bundesländern regelmäßig.

ABBILDUNG 12 Jährliches Hybrid-Neufahrzeugpotential (nach Jahr des Beginns des Verkehrsvertrags)



- Insgesamt resultieren damit antriebskonzeptbedingte Investitionsmehrkosten bis 2038 von 2,6 Mrd. € (min.) bis 3,8 Mrd. € (max.) unter Zugrundelegung von durchschnittlich 1,5 Mio. € Mehrkosten je Hybridfahrzeug gegenüber der Bemessungsgrundlage DMU bzw. EMU (Preisstand konstant 2019). Bei einer zu erwartenden Verringerung der Mehrkosten gegenüber der Referenztechnologie infolge unter anderem von technologisch und marktlich getriebenen Skaleneffekten verringert sich die Spannbreite entsprechend. Bei nur 0,5 Mio. € Preisaufschlag je Hybridtriebzug gegenüber dem konventionellen Triebzugpendant betragen die kumulierten Mehrkosten entsprechend 0,9 Mrd. € (min.) bis 1,3 Mrd. € (max.).
- Zusätzlich entstehen Kosten (und damit Finanzierungsbedarf) für notwendige Ergänzungs elektrifizierungen, für Oberleitungsinselanlagen (für BEMU) inklusive Einspeiseanlagen bzw. Wasserstofftankstellen (für FCEMU) sowie für sonstige Anpassungen an den Bahnbetriebsanlagen wie zum Beispiel Werkstätten und Abstellanlagen, die den Fahrzeugkosten hinzugerechnet werden müssen. Die Höhe der entstehenden Kosten hängt von der konkreten Zusammensetzung der zukünftigen BEMU/FCEMU-Flotte ab.
- Um eine Wettbewerbsfähigkeit alternativer Antriebe im ÖPNV mit bestehenden konventionellen Technologien zu gewährleisten und um den Markthochlauf dieser Technologien im SPNV zu unterstützen, sind in den kommenden Jahren entsprechende Bundesförderprogramme notwendig.

4 Ausblick / Weiterer Forschungsbedarf

- Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich im Bereich der Fahrzeugtechnik sowie im Bereich von Systemanalysen, die die konkreten infrastrukturellen Randbedingungen für Hybridtriebzüge betrachten und auch die Kopplung mit Erneuerbare-Energien-Anlagen berücksichtigen:
 - Auswirkungen des Einsatzes weiterentwickelter und neuer Speichertechnologien auf die Einsatzpotenziale von Hybridtriebzügen im SPNV
 - Einsatzmöglichkeiten weiterer Hybridantriebskonfigurationen wie zum Beispiel BEMU mit Brennstoffzellen als Range-Extender und Umrüstungsoptionen von DMU und EMU auf Hybridantriebe
 - Potenzial für Hybridantriebe bei Streckenreaktivierungen
 - Detaillierte Ausbauszenarien der Ladeinfrastruktur und der Wasserstofftankstellen unter Berücksichtigung der Potenziale der Sektorkopplung, also beispielsweise der Einbindung von Erneuerbare-Energien-Anlagen für die Wasserstofferzeugung

Abbildungen

ABBILDUNG 1	Betriebsleistungen im SPNV mit Elektro- und Dieseltraktion	6
ABBILDUNG 2	Anzahl aktiver Dieseltriebzüge nach Herstellungsjahr (ab 1970), Datenauswertung auf Basis Fahrzeugeinstellungsregister Eisenbahnbundesaamt (ohne Diesellokomotiven)	8
ABBILDUNG 3	Elektrifizierungsmuster dieselbetriebener SPNV-Linien in Deutschland	10
ABBILDUNG 4	Antriebsoptionen im SPNV	12
ABBILDUNG 5	Hybridtriebzüge im deutschen SPNV in der Zulassung oder bereits im Fahrgasteinsatz	14
ABBILDUNG 6	Antriebsoptionen und ihre Komponenten im SPNV	14 / 15
ABBILDUNG 7	Reichweiten von BEMU, FCEMU und DMU vor dem Nachladen bzw. Nachtanken sowie typische tägliche Fahrleistungen im SPNV	17
ABBILDUNG 8	Mögliche Fahrzeug- und Infrastrukturkonzepte FCEMU und BEMU	21
ABBILDUNG 9	Beispielhafte CO ₂ -Emissionen je Fahrzeug bei 30 Jahre Einsatzdauer inkl. Fahrzeugherstellung in Abhängigkeit der CO ₂ -Intensitäten der Energiebereitstellung	23

ABBILDUNG 10	Aktuelle Wettbewerbsnetze und Pilotprojekte mit Hybridtriebzügen inkl. bereits bestellter Fahrzeuge	26
ABBILDUNG 11	Neue Verkehrsverträge (Zeitpunkte der Betriebsaufnahmen) nach Art der Traktion in diesel- und hybridfahrzeugrelevanten Netzen bis 2038	28
ABBILDUNG 12	Jährliches Hybrid-Neufahrzeugpotenzial (nach Jahr des Beginns des Verkehrsvertrags)	30

Tabellen

TABELLE 1	SPNV-Fahrzeuge mit Hybridantrieben. Teilweise Angaben für Prototypen, spätere Serienfahrzeuge können davon kundenspezifisch abweichen (DLR-Fahrzeugkonzeptdatenbank)	18 / 19
TABELLE 2	Von den Bundesländern bis 12 / 2019 bestellte Fahrzeuge mit hybriden Antrieben	25

Auftraggeber

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

Ansprechpartner / Redaktion

Oliver Hoch
Programm Manager Elektromobilität
+49 (0)30 311 61 16 – 38
oliver.hoch@now-gmbh.de

Verfasser

Johannes Pagenkopf, Toni Schirmer,
Mathias Böhm, Christoph Streuling,
Sebastian Herwartz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
(DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte

Gestaltung

kursiv Kommunikationsdesign
Peter Frey

Erscheinungsjahr 2020

