



Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV

Einschätzung der systemischen Potenziale

Studie

**Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV
Einschätzung der systemischen Potenziale**

Frankfurt am Main

Autoren:

Dr. Wolfgang Klebsch

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

Patrick Heininger

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

Jonas Martin

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

Herausgeber:

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e. V.

VDE Technik und Innovation
Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
x-emu@vde.com
www.vde.com

Gestaltung:

Kerstin Gewalt | Medien&Räume

Bildnachweis Titelgrafik:

WK/WK
Bombardier / Alstom

24. Mai 2019

Alternativen zu Dieseltriebzügen im Schienenpersonennahverkehr

Einschätzung der systemischen Potenziale

Inhalt

Executive Summary	6
1 Einleitung und Motivation	4
1.1 Problemstellung	5
1.2 Förderprojekt des BMVI	6
1.3 Anliegen und Struktur der Studie	7
2 Herausforderungen des Schienenpersonennahverkehrs	10
2.1 Reform des regionalen Schienenpersonenverkehrs	11
2.2 Dekarbonisierung des Verkehrs	11
2.3 Aufgabenträger als visionäre Besteller	12
2.4 Eisenbahnverkehrsunternehmen als „carrier-only“?	15
2.5 Hersteller als Innovatoren und Instandhalter	18
2.6 DB-Netze – ein gefesselttes Bundesunternehmen	26
2.7 Verbände und Allianzen als Lobbyisten der Schiene	29
3 Elektrifizierung statt Diesellinien	30
3.1 Status Quo und Bedarf	31
3.2 Lückenschließungen auf Strecken mit Oberleitungen	35
3.3 Teilelektrifizierung oberleitungsfreier Strecken	37
3.4 Vollelektrifizierung oberleitungsfreier Bahnlinien	38
3.5 Vollelektrifizierung als Vision für das gesamte Schienennetz	38

4	Elektrische Antriebe statt Dieselmotoren	40
4.1	Diesel- und Diesel-Hybrid-Triebzüge	41
4.2	Oberleitungs-Elektrotriebzüge	46
4.3	Batterie-Oberleitungs-Hybridtriebzüge	47
4.4	Wasserstoff-Batterie-Hybridtriebzüge	48
5	Nutzwertanalyse für den Vergleich der Alternativen	50
5.1	Methodik und Untersuchungsrahmen	52
5.2	Erfassung der Bewertungskriterien	55
5.3	Benotung der Triebzugkonzepte auf Basiskriterien-Ebene	63
5.4	Gewichtung der Basis- und Mittelkriterien	76
5.5	Potenziale der Triebzugkonzepte	79
5.6	Fazit zur Nutzwertanalyse und Ausblick	83
6	Resümee und Empfehlungen	88
6.1	Rolle der Aufgabenträger	90
6.2	Potenziale für Fahrzeughersteller	91
6.3	Zukunft der Eisenbahnverkehrsunternehmen	92
6.4	Herausforderungen der Infrastruktur	93
6.5	Politische Eckpunkte	94
6.6	Empfehlungen	94
7	Anhang	96
Anhang 7.1.	Teilnehmer der Interviews und des Abschlussworkshops	97
Anhang 7.2.	Aufgabenträger in Deutschland	99
Anhang 7.3.	Eisenbahnverkehrsunternehmen (nach BAG SPNV)	100
	Akronyme	102
	Literaturverzeichnis	103
	Verzeichnis der Abbildungen	105
	Verzeichnis der Tabellen	106

Executive Summary

Executive Summary

Deutschland verfügt über eines der dichtesten Eisenbahnnetze der Welt. Täglich sind tausende Züge im Einsatz, um Millionen Fahrgäste sicher zu befördern. Fernreisende gehen selbstverständlich davon aus, dass ihr ICE elektrisch fährt. Allen Verspätungen und regelmäßig auftretenden technischen Problemen zum Trotz, zweifeln selbst Bahnskeptiker nicht daran, dass das Bahnfahren die umweltfreundlichste Form des Reisens ist. Für den Nahverkehr gilt dies bislang nur bedingt, denn Elektrotriebzüge sind nur auf Bahnlinien einsetzbar, die durchgehend mit Oberleitungen versehen sind. Das ist in vielen Regionen jedoch nicht der Fall.

Vierzig Prozent des deutschen Schienennetzes sind nicht elektrifiziert

Das Schienennetz in Deutschland wird von einem Oberleitungsnetz überspannt, das viele Lücken aufweist. In schwach besiedelten Regionen sind Nahverkehrsstrecken oft gar nicht elektrifiziert. In anderen Landesteilen finden sich Bahnlinien mit Elektrifizierungslücken von zum Teil nur wenigen Kilometern Länge. Elektrotriebzüge benötigen durchgehende Fahrdrähte. Oberleitungslücken einfach zu schließen, läge also nahe. Jedoch setzt der zu erwartende hohe Erhaltungsaufwand für Oberleitungen eine dichte Taktung und hohe Personenverkehrsleistung auf der Bahnlinie voraus, um wirtschaftlich zu sein. Vielfach befinden sich Lücken jedoch gerade in Regionen mit geringer Verkehrserwartung.

Auf vielen Nahverkehrslinien „dieseln“ Triebzüge unter Fahrdraht

Mangels geeigneter Alternativen werden viele Nahverkehrslinien bislang mit Dieseltriebzügen befahren, um vorhandene Oberleitungslücken zu überwinden. So ergibt sich die absurd anmutende Verkehrssituation, dass gut ein Drittel der in Deutschland gefahrenen Zugkilometer von Dieselzügen erbracht werden, deren Verkehrsleistung (in Personenkilometer) oft mangels Fahrgäste gering ist. Damit relativiert sich der Ruf der Eisenbahn, besonders umweltfreundlich zu sein. Ein Großteil der in Deutschland eingesetzten Dieseltriebzüge ist inzwischen älter als 20 Jahre. Für deren Einsatz gibt es kaum Auflagen wegen ihres Luftschadstoffausstoßes.

Die Dekarbonisierung des Verkehrs verbietet die Neubestellung von Dieseltriebzügen

Die für die Ausschreibung und Bestellung von Eisenbahnlinien zuständigen Aufgabenträger sehen sich mit der Erwartung konfrontiert, baldmöglichst eine Lösung für das Dieselproblem im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) zu finden. Die typische Betriebslebensdauer von Triebzügen ist auf 25 bis 30 Jahre angelegt. In den kommenden Jahren als Neufahrzeuge eingesetzte Triebzüge sind also frühestens im Jahr 2050 reif für die Ausmusterung. 2050 ist zugleich das Jahr, in dem der gesamte Verkehr in Deutschland bereits vollständig dekarbonisiert sein soll. Heutzutage neue Dieseltriebzüge zu bestellen, ist also nicht sinnvoll. Der Angebotsmarkt hat sich bereits angepasst: Er fokussiert sich zunehmend auf alternative Antriebe.

Die Suche nach Alternativen zum Diesel ist eine vielfältige Herausforderung

Welches Konzept eignet sich am besten als Ersatz für Dieseltriebzüge? Das herauszufinden, erweist sich als komplexe, übergreifende Herausforderung. Am Entscheidungsprozess sind verschiedene Branchen und Organisationen direkt oder mittelbar beteiligt. Dazu gehören neben Aufgabenträgern, Eisenbahnverkehrsunternehmen und Fahrzeugherstellern auch Infrastruktur- und Energieunternehmen, sowie Vertreter von Wissenschaft und Verbänden.

Der VDE führte im Verlauf des Jahres 2018 strukturierte Interviews mit Vertretern dieser unterschiedlichen Gruppen durch, um die Vielfältigkeit der Entscheidungsaufgabe und in Frage kommende Lösungen zu erfassen. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen sind in der vorliegenden Studie wiedergegeben.

Der Elektromotor ist die Basis jedes in Frage kommenden alternativen Antriebskonzeptes

Kompakte Elektromotoren, die ihre Kraft direkt an den Radachsen eines Triebzuges entfalten, sind effizienter, robuster, leichter und geräuschärmer als jeder Verbrennungsmotor es sein könnte. Sie arbeiten absolut emissionsfrei und zudem klimaneutral, wenn Ökostrom verwendet wird. Die sinnvollste Alternative zum Dieselmotor in Triebzügen ist also der Elektromotor – so wie er in konventionellen Oberleitungstriebzügen bereits seit langem eingesetzt wird.

Eine Vollelektrifizierung des SPNV wäre betriebswirtschaftlich nicht darstellbar

Das Schienennetz des Nahverkehrs vollständig zu elektrifizieren, wäre eine naheliegende energieeffiziente Möglichkeit, das Dieselproblem auf der Schiene zu lösen. Diese Option erweist sich für viele Diesellinien wegen geringer Verkehrsleistung jedoch als betriebswirtschaftlich nicht darstellbar, denn die Kosten für die Erstellung wie auch Wartung der zusätzlichen Oberleitungsinfrastruktur sind hoch, und das vorgeschriebene Planfeststellungsverfahren ist aufwändig. Darüber hinaus sind die Kapazitäten der Infrastruktur-Bauunternehmen zurzeit ausgereizt. Selbst die im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vereinbarte deutliche Erhöhung des Elektrifizierungsgrades bis 2025 erfordert nach Einschätzung von Experten eine spürbare Beschleunigung von Planung und Umsetzung.

Fahrdraht-unabhängige vollelektrische Triebzüge sind eine vorteilhafte Alternative

Für einige Diesellinien mit hoher Verkehrsleistung sind Lückenschlüsse bei der Oberleitung fest eingeplant. Ansonsten fokussieren sich Entscheidungsträger auf vollelektrische Triebzüge mit direktem Achsenantrieb durch Elektromotoren und on-board-Bereitstellung der benötigten Energie. Ein Lösungskonzept ist der Batterietriebzug, bei dem eine große Lithium-Ionen-Batterie den Fahrstrom bereitstellt und unter Oberleitung aufgeladen werden kann. Ein anderes ist der Brennstoffzellen-Triebzug, bei dem die elektrische Energie durch kontrollierte Oxidation des mitgeführten Wasserstoffgases erzeugt wird. Als Abgas entsteht hier lediglich sauberer Wasserdampf.

Emissionsfreiheit und Klimaneutralität sind zentrale Bewertungskriterien für neue Antriebe

Beim Batterie- wie beim Brennstoffzellen-Triebzug ist lokale Schadstoffemission ausgeschlossen. Klimaneutral betrieben werden beide Konzepte erst, wenn die Traktionsbatterie mit Ökostrom geladen bzw. der benötigte Wasserstoff mittels Ökostrom elektrolytisch erzeugt wird. Für die Bewertung der Umweltverträglichkeit sind zudem ihre spezifischen Anforderungen an Infrastruktur, Energieerzeugung und -bereitstellung relevant: Brennstoffzellen-Züge brauchen Wasserstoff-Tankstellen, deren Betrieb eine funktionierende Wasserstofferzeugungsindustrie voraussetzt. Batteriezüge, die ihren Ladestrom an Ladestationen oder aus Oberleitungen beziehen, sind hinsichtlich der Klimabilanz des verwendeten Fahrstroms in der gleichen Situation wie Elektrotriebzüge.

Hybridantriebe werden von einigen als risikoärmere Brückenlösungen favorisiert

Einige Entscheidungsträger bezweifeln den Reifegrad oder die Serientauglichkeit alternativer Antriebe, da Erfahrungen im Realbetrieb noch ausstehen. Sie ziehen verlässliche Lösungen vor, die emissionsärmer sind als dieselmechanische Antriebe und zugleich die Zeit überbrücken, bis die neuen Technologien serienreif sind. Eine mögliche Lösung sind Dieselhybride, die auf bestimmten Strecken Strom aus Batterien oder der Oberleitung beziehen, um rein elektrisch zu fahren. Solche Konzepte erweisen sich fahrzeugseitig in ihrer Umsetzung jedoch als technisch komplex und teuer. Angesichts der beschlossenen Dekarbonisierung des Verkehrs bis 2050 wäre dies eine teure Investition in eine Übergangslösung. Aktuell wird stattdessen die Umrüstung vorhandener Dieselflotten in verschiedenen Ausführungen erprobt.

Synthetischer Kraftstoff überzeugt nur bedingt als schadstoffarme klimaneutrale Alternative

Das hybride Dieseltriebzugkonzept hat grundsätzlich das Potenzial, auch langfristig eine Alternative zu sein, wenn fossiler Diesel gleichwertig durch synthetischen Kraftstoff ersetzt wird, der mit Erneuerbaren Energien und ‚Grünem‘ Wasserstoff erzeugt wurde. In diesem Fall wäre das Konzept – bilanziell bewertet – eine klimaneutrale Lösung. Mit den heute verfügbaren Technologien ist der für die Synthese erforderliche Energieeinsatz jedoch so hoch, dass die Verwendung dieses Kraftstoffs letztlich nur für den Luftverkehr zu rechtfertigen wäre. Lokale Emissionsfreiheit leistet er zudem nicht.

Die „ideale Alternative“ zum Einsatz von Dieseltriebzügen kann es nicht geben

Unabhängig von der Branche oder der spezifischen Interessenlage sind sich alle Interviewpartner darin einig, dass es die eine Alternative zum Dieseltriebzug nicht geben kann. Diese Einschätzung wird auch durch eine neutrale Nutzwertanalyse bestätigt, welche im Rahmen dieser Studie mit Unterstützung der Teilnehmer durchgeführt wurde. Eine Erkenntnis ist, dass die Suche nach der geeigneten Alternative individuelle Analysen der betrachteten Diesellinien erfordert.

Batterietriebzüge überbrücken Oberleitungs-Lücken ohne spätere Elektrifizierungen auszuschließen

Der Batterietriebzug ist die beste Lösung auf schwach befahrenen Bahnlinien mit Oberleitungslücken, die nicht größer sind als 40 bis 80 Kilometer, vorausgesetzt, die Batterie kann auf elektrifizierten Streckenabschnitten über einen Pantografen hinreichend schnell nachgeladen werden. Bei größeren Lücken sind auch Elektrifizierungsinselfen zu rechtfertigen, wenn sich diese als Ausgangspunkte des zukünftigen Elektrifizierungsausbaus nutzen lassen.

Brennstoffzellen-Züge sind eine langfristige Alternative zur Elektrifizierung weitläufiger Schienenwege

Der Brennstoffzellen-Zug ist die beste Lösung auf Bahnlinien, die gänzlich ohne Oberleitung sind oder Lücken von weit über 80 Kilometern aufweisen. Notwendig hierfür ist, dass ein Wasserstoff-Tankstellennetz vorhanden ist und die Tankfahrten nicht aufwändiger sind als im Dieselfall. Ohne Änderung der Rahmenbedingungen muss der Wasserstoffpreis nach Ansicht von Experten deutlich unter 5 Euro pro Kilogramm fallen, damit Brennstoffzellen-Züge wirtschaftlich werden.

Oberleitungs-Triebzüge stellen auch zukünftig die ideale Lösung für elektrifizierte Schienennetze dar

Bei alternativen Antriebskonzepten geht man davon aus, dass sie nur Bahnlinien mit geringer Personenverkehrsleistung bedienen werden. Anderenfalls rechnet sich in der Regel die durchgehende Elektrifizierung und Bedienung der Linien mit Oberleitungs-Triebzügen.

Das heutige Planfeststellungsverfahren behindert die zügige Elektrifizierung von Strecken

Die Verkehrswende erfordert eine intensivere Nutzung des vorhandenen Schienennetzes durch dichtere Taktung. Elektrifizierung ist dafür eine wichtige Voraussetzung. Das gegenwärtig noch sehr aufwändige Planfeststellungsverfahren für Projekte der Elektrifizierung, des Streckenausbaus und der Reaktivierung stillgelegter Strecken sollte auf deutlich unter 4 Jahre reduziert werden. Einen Ansatz bietet das in Umsetzung befindliche Planungsbeschleunigungsgesetz.

1 Einleitung und Motivation

Laut Koalitionsvertrag der Bundesregierung vom März 2018 soll der Verkehr in Deutschland im Jahr 2050 vollständig dekarbonisiert, also klimaneutral sein [1]. Dieses Ziel lässt sich nicht einfach durch Verlagerung oder Vermeidung von Verkehr oder über Effizienzverbesserungen erreichen. Zusätzlich werden Konzepte für Fahrzeuge, Antriebe, Kraftstoffe und Infrastruktur benötigt, die den Weg zur Treibhausgasneutralität bereiten. In einem vom Umweltbundesamt im Jahr 2015 herausgegebenen Bericht heißt es noch sinngemäß [2]: Dem Verkehrsmittel Bahn steht mit der Elektrifizierung und der Nutzung von Erneuerbaren Energien eine klimaneutrale Option zur Verfügung, die lediglich umgesetzt werden muss. Tatsächlich sind Elektrifizierungsprojekte für den Schienenpersonennahverkehr (SPNV) keineswegs einfach umsetzbar. Hier sind daher wie im Straßenverkehr Antriebe mit Batterien oder Brennstoffzellen sinnvolle Alternativen.

Rund die Hälfte der heute im Nahverkehr eingesetzten 5.100 Personentriebzüge sind Dieselfahrzeuge. Von diesen sind rund Zweidrittel älter als 20 Jahre. Im Straßenverkehr würden ihnen wegen Feinstaub und NO_x-Ausstoß bereits Fahrverbote drohen. Da die typische Betriebslebensdauer von Triebzügen 25 bis 30 Jahre beträgt, wird in kommenden Verkehrsausreibungen für Nahverkehrslinien auch die Anschaffung neuer Fahrzeuge als Ersatz für alte Diesel anstehen.

Mit der Regionalisierung des SPNV Mitte der 1990er Jahre hat sich eine Struktur von Zuständigkeiten etabliert, die sich bisher gut bewährt hat: Aufgabenträger bestellen für die in ihren Zuständigkeitsbereich fallenden Nahverkehrsbahnlinien den Betrieb durch Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), die sich im Rahmen auch europaweiter Ausschreibungen im Wettbewerb der Angebote durchsetzen müssen.

In der Vergangenheit kauften oder mieteten EVU die benötigten Triebzüge selbst. Die Verfügbarkeit ihrer Fahrzeuge stellten sie meist in eigenen Instandhaltungswerkstätten sicher. Mit der EU-Verordnung 445/2011 gilt inzwischen verpflichtend, dass jedem Triebzug eine offizielle Instandhaltungsstelle (Entity in Charge of Maintenance, ECM) zuzuweisen ist. Diese kann von Verkehrsunternehmen, Fahrzeugherstellern oder anderen Unternehmen betrieben werden.

1.1 Problemstellung

Als Verkehrsbesteller sorgt der Aufgabenträger im öffentlichen Interesse dafür, dass den Fahrgästen angemessene Fahrpläne geboten werden („Daseinsvorsorge“). Darüber hinaus wird von ihm erwartet, dass er die Rahmenbedingungen für einen möglichst energieeffizienten und umweltfreundlichen Nahverkehr bereitet. Das EVU verpflichtet sich den Vorgaben des Aufgabenträgers entsprechend zu einem sicheren, möglichst störungsfreien und zugleich wirtschaftlichen Betrieb der ihm zugeordneten Eisenbahnlinien. Mit den bewährten Elektro- und Dieseltriebzugmodellen der im harten Wettbewerb stehenden Fahrzeughersteller war diese Aufgabe bislang gut zu bewältigen.

Die Situation ist nun komplizierter geworden. Die Anschaffung neuer Dieseltriebzüge ist nicht nur wegen der Dieselproblematik kritisch. Inzwischen bietet der Fahrzeugmarkt auch nur noch wenige Modelle an. Selbst auf den Verleih von Zügen spezialisierte Unternehmen haben keine Dieseltriebzüge mehr im Angebot. Stattdessen werben alle Fahrzeughersteller nun mit elektrischen Triebzügen, welche ihre Antriebsenergie aus Batterien oder Brennstoffzellen beziehen, also fast ohne Oberleitungen auskommen, und so Dieseltriebzüge ersetzen können.

So attraktiv sich alternative Antriebe technologisch darstellen, sie stellen in den etablierten Entscheidungsstrukturen auch eine erhebliche Herausforderung dar. Die Entscheidung für eine Alternative erfordert ein erweitertes Verständnis ihrer technischen Besonderheiten und Anforderungen an Betrieb und Instandhaltung der Fahrzeuge, und nicht zuletzt ihrer infrastrukturellen Voraussetzungen. Letztlich verfügen weder Aufgabenträger noch EVU über das erforderliche Detailwissen, um Alternativen in Gänze einschätzen zu können, und den Herstellern fehlen noch Rückmeldungen zur Reife ihrer Fahrzeuge im regulären Fahrbetrieb.

Für Aufgabenträger wie auch EVU ist es noch ungewohnt, in Herstellern mehr zu sehen als Fahrzeuglieferanten. Der Trend geht in Richtung eines neuen Verhältnisses zwischen Besteller, Betreiber und Hersteller im SPNV, wie das im Rahmen des bedeutenden Verkehrs- und Infrastrukturprojektes Rhein-Ruhr-Express (RRX) in NRW etablierte Verfügbarkeitsmodell zeigt. In diesem auch Lebenszeitmodell genannten Konzept ist der Hersteller nicht nur für die Lieferung seiner Fahrzeuge, sondern auch für deren Instandhaltung und Verfügbarkeit im Betrieb über 32 Jahre verantwortlich. Die beteiligten EVU nehmen beim Betrieb der ihnen zugeordneten RRX-Linien in erster Linie die Carrier-Funktion wahr, das heißt, ihre Wertschöpfung ist im Vergleich zu bisher wesentlich reduziert. Im Gegenzug übernimmt der Aufgabenträger als Manager und Investor in diesem Dreiecksverhältnis ein erhebliches Maß an Verantwortung für die verbundenen Risiken. Nicht jeder Aufgabenträger ist fachlich oder personell im vollen Umfang in der Lage oder bereit, eine so hohe und risikoreiche Verantwortung zu tragen.

Aufgaben-träger	EVU	Instand-haltung	Hersteller	Infra-struktur	Energie	Organisation/ Hochschule
BEG	Agilis	Agilis				Allianz pro Schiene BAG-SPNV DLR HTW TU Berlin TU Dresden VDV
LNVG	DB Regio	DB Regio		DB Netz	DB Energie	
NAH.SH	BeNEX	BeNEX				
NVR						
NWL- ZVM		Alstom	Alstom			
RMV/Fahma		Bombardier	Bombardier			
VBB	NEB	NEB		NEB		
VMS	SWEG	SWEG		SWEG		
VRR		Siemens Mobility	Siemens Mobility			
VVO		Stadler	Stadler			

Tabelle 1 **Übersicht der befragten Branchen und Organisationen (fett = Hauptfunktion des Interviewpartners)**

Das Ergebnis ist ein breitgefächertes Spektrum von Ansichten, Kritikpunkten, Erwartungen und Empfehlungen aus unterschiedlichen Perspektiven. Diese haben die Autoren in die verschiedenen Kapitel der vorliegenden Studie einfließen lassen. Auf individuelle Zuordnungen von Aussagen zu Themen und Zusammenhängen wurde in Absprache mit den Gesprächspartnern verzichtet. Einverstanden war jeder Teilnehmer mit der Erwähnung seines Namens und dessen Organisation oder Unternehmens. Die alphabetische Zusammenstellung findet sich im → Anhang 7.1.

Zum Projekt: Der VDE begleitet das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderte Entwicklungsvorhaben „X-EMU“ der Siemens Mobility GmbH mit Analysen und Studien zu verschiedenen systemischen Aspekten von technischer, wirtschaftlicher oder gesellschaftlicher Relevanz, welche die Realisierung von Triebzügen mit alternativen, emissionsfreien Antrieben beeinflussen könnten. Die vorliegende Studie ist das Ergebnis des zweiten Teilprojektes eines an den VDE unterbeauftragten Teilvorhabens [3].

1.3 Anliegen und Struktur der Studie

Bei der Suche nach geeigneten Alternativen zum Einsatz von Dieseltriebzügen im SPNV sind Aspekte zu berücksichtigen, die zum einen die technologischen Besonderheiten der in Frage kommenden Konzepte und ihre technische Umsetzung betreffen. Zum anderen sind die unterschiedlichen infrastrukturellen Anforderungen miteinander zu vergleichen. Ressourcenverfügbarkeit, Umweltverträglichkeit und Systemdienlichkeit sind für den gesamtheitlich objektiven Vergleich ebenso wichtige Aspekte wie Wirtschaftlichkeit und Betriebsfreundlichkeit.

Für die Erstellung der Studie führten die Autoren umfangreiche Online-Recherchen durch und analysierten die verfügbaren Veröffentlichungen zu allen für die Studie relevanten Aspekten. Auf dieser Grundlage führten sie zudem Gespräche mit insgesamt 38 Personen aus der Bahnbranche, um deren individuelle Einschätzung und die Betroffenheit ihre Branche zu den verschiedenen Aspekten zu erfragen. Die Ergebnisse sind in die vorliegende Studie eingeflossen.

Kapitel 2 richtet den Blick zunächst auf die historischen Entscheidungen in dem Jahrzehnt nach der Wiedervereinigung und auf die gesetzlichen Grundlagen, welche die heutige Struktur des SPNV bestimmten. Besonderer Fokus wird auf die Rolle der im SPNV direkt oder mittelbar beteiligten Organisationen und Unternehmen gelegt, wenn es um die Suche nach Lösungsalternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV geht. Hier wird insbesondere die Finanzierung durch den Bund und die Rolle der bundeseigenen Unternehmen untersucht.

Das **Kapitel 3** befasst sich mit den Möglichkeiten der Elektrifizierung von Schienenstrecken als Alternative für heutige Dieselnetze. Elektrische Antriebe als energieeffiziente und umweltverträgliche Lösung, ohne elektrifizieren zu müssen, werden in **Kapitel 4** mit Blick auf ihre technologischen Besonderheiten und ihre Umsetzung in Fahrzeugen und Infrastruktur beschrieben, soweit dies für das Verständnis erforderlich ist. Als Beispiele dienen verschiedene Fahrzeugmodelle der relevanten Hersteller.

Die Gespräche mit den Beteiligten offenbarten, dass der Prozess der Entscheidung für eine Alternative zum Dieseltriebzug komplex und zudem von individuellen Präferenzen beeinflusst ist. Aus diesem Grunde bemühten sich die Autoren um die Anwendung einer als Nutzwertanalyse bezeichneten Methodik, die eine objektive Entscheidungsfindung ermöglichen soll. Sie nutzten dafür ein Kriterienschema, das bereits in [4] eingeführt wurde. Dort waren diesem Schema folgend bereits anhand öffentlich zugänglicher Daten Bewertungen der Eigenschaften der verschiedenen Konzepte vorgenommen und eine erste Nutzwertanalyse durchgeführt worden. Für die vorliegende Studie überprüften die Autoren die Bewertungsdaten aus [4] und glichen sie mit Expertenaussagen ab. In einem Workshop mit den Interview-Teilnehmern wurden die Gewichte aller Kriterien im Entscheidungsprozess erfasst, um anhand der überarbeiteten Bewertungsdaten eine verbesserte Nutzwertanalyse zu erhalten.

Kapitel 5 beschreibt die Anwendung dieser Nutzwertanalyse und betrachtet ausführlich die resultierenden Potenziale der verschiedenen Alternativen.

Die Studie schließt in **Kapitel 6** mit einem Resümee, ergänzt um Empfehlungen zum weiteren Vorgehen für die Suche nach Alternativen zu konkreten Diesellinien im SPNV.

2 Herausforderungen des Schienenpersonennahverkehrs

Der seit den 1950er Jahren rapide wachsende Individual- und Lastwagen-Verkehr auf der Straße führte zu einer Erosion der Bedeutung der Eisenbahn als Verkehrsträger im Personen- und Güterverkehr. Seit der Wiedervereinigung weitete sich das Netz der Bundesfernstraßen kontinuierlich auf heute 51.000 Kilometer Gesamtlänge aus. Das Autobahnnetz wuchs dabei um 24 Prozent auf 13.000 Kilometer Länge [5]. Wie sehr die Politik das Transportsystem Schiene vernachlässigte, zeigt sich darin, dass das Schienennetz im gleichen Zeitraum durch Stilllegungen um 14 Prozent von 44.000 Kilometern auf heute 38.500 Kilometer (inkl. NE-Strecken²) schrumpfte. Laut Allianz pro Schiene [6] betrug der Anteil des Schienenpersonenverkehrs im Jahr 2016 mit 96 Mrd. Personenkilometer (Pkm) nur etwa 8,3 Prozent der Gesamtverkehrsleistung, im Vergleich zu 83,8 Prozent, die auf den motorisierten Individualverkehr entfielen.

2.1 Reform des regionalen Schienenpersonenverkehrs

Die Wiedervereinigung im Jahre 1990 machte die hochverschuldete Deutsche Bundesbahn der BRD zur Erbin der mit gewaltigem Investitionsstau belasteten Deutsche Reichsbahn der DDR. Mit dem 1994 in Kraft getretenen Eisenbahnneuordnungsgesetz wurden die beiden Behördenbahnen gesetzlich und organisatorisch restrukturiert. Im Rahmen dieser als Bahnreform in die Geschichte eingegangenen bundespolitischen Entscheidung fusionierten die Deutsche Bundesbahn und die Deutsche Reichsbahn 1994 zur Deutschen Bahn AG als privatrechtlich organisierte Eisenbahngesellschaft des Bundes.

Die Zuständigkeit für Stadt-, Vorort- und Regionalverkehr, kurz Schienenpersonennahverkehr (SPNV)³, wurde vom Bund auf die Länder übertragen. Ein zentraler Bestandteil der Bahnreform ist die Öffnung der Schienenwege und die Gewährung eines diskriminierungsfreien Zugangs für Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) zum Bahnnetz, um durch Wettbewerb die Kosten des Bahnsystems zu reduzieren. Im Jahr 1996 wurde mit dem Regionalisierungsgesetz auch die finanzielle Verantwortung für den SPNV an die 16 Bundesländer übertragen. Um die Regionalisierung operativ umzusetzen, gründeten einige Länder wie Niedersachsen, Schleswig-Holstein oder Bayern privatrechtlich organisierte Landesnahverkehrsgesellschaften. Andere wie Nordrhein-Westfalen, Hessen oder Sachsen übertrugen ihre Zuständigkeit an kommunal organisierte Zweckverbände oder Verkehrsverbünde. Die Unterhaltung und Finanzierung der Schieneninfrastruktur und der Haltestationen liegt weiterhin in der Verantwortung des Bundes und wird über das Bundesunternehmen DB Netze bedient.

Der mit der Bahnreform eingeleitete Wettbewerb hat zu einer Verbesserung der Qualität des SPNV geführt, in dessen Bereich alle Bahnlinien des Typs Interregio-Express (IRE), Regional-Express (RE), Regionalbahn (RB) und S-Bahn fallen. Die Verkehrsleistung⁴ stieg von 1994 bis 2017 um 88 % auf 57 Mrd. Pkm, die Betriebsleistung⁵ um 35 % auf 673 Mio. Zkm. Die Auslastung der Bahnlinien erhöhte sich somit um 50 %. Auch in den kommenden Jahrzehnten geht man von einer zunehmenden Bedeutung des SPNV aus [7].

2.2 Dekarbonisierung des Verkehrs

Der Klimaschutzplan 2050 als Reaktion Deutschlands auf das im Jahr 2015 in Paris getroffene Klimaschutzabkommen umfasst die Selbstverpflichtung, den CO₂-Ausstoß bis 2050 um mindestens 80 Prozent zu reduzieren. Im Verkehrssektor ist dieses Ziel nur erreichbar, wenn es gelingt, Verbrennungsmotoren konsequent durch Elektromotoren zu ersetzen, welche mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen statt mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Während sich die notwendige Wende im Automobilsektor bislang eher gehemmt vollzieht, ist der Schienensektor schon heute wesentlich weiter: Das Standard-Antriebskonzept basiert hier schon seit langem auf dem Elektromotor, dessen Fahrstrom aus der Oberleitung bezogen wird. So überrascht es nicht, dass die Politik ihren Fokus inzwischen wieder auf den umweltfreundlichen Verkehrsträger Schiene gelegt hat. Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vom März 2018 wurde die CO₂-freie Mobilität, also die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs, bis 2050 beschlossen. Dafür soll der Verkehr auf umwelt- und klimafreundliche Verkehrsträger verlagert werden, bevorzugt auf die Schiene.

2 Das Kürzel NE steht für „nichtbundeseigene Eisenbahn“

3 Siehe Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG) §2 Abs. 12

4 Anzahl der Fahrgäste × im Mittel zurückgelegte Entfernungen, i.d.R. bezogen auf ein Jahr [Personenkilometer = Pkm]

5 Anzahl der Züge × im Mittel gefahrene Strecken, i. d. R. bezogen auf ein Jahr [Zugkilometer = Zkm]

Dafür sind Voraussetzungen zu schaffen wie:

- Die Kapazität des Schienennetzes bis 2030 verdoppeln,
- den Elektrifizierungsgrad des deutschen Schienennetzes bis 2025 auf 70 % anheben,
- die elektrisch erbrachte Verkehrsleistung des SPNV bis 2025 auf 90 % erhöhen,
- ab 2025 keine Dieseltriebzüge oder Dieselloks mehr in Dienst stellen.

2.3 Aufgabenträger als visionäre Besteller

Mit der Regionalisierung der Verantwortung für den SPNV wurden auch die Beziehungen zwischen der regionalen politischen Ebene (Aufgabenträger) und den Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) neu geregelt. Es wurde ein „Besteller-Ersteller-System“ eingeführt, bei dem der Aufgabenträger im Auftrag seines Bundeslandes festlegt, welchen Umfang das regionale Schienenverkehrsangebot haben soll. Als Ergebnis einer in der Regel öffentlichen Ausschreibung erteilt er als „Besteller“ Aufträge an ein oder mehrere EVU als „Ersteller“.

Die Einnahmen aus dem Fahrkartenverkauf würden allein nicht ausreichen, um den regionalen Schienenverkehr als Ganzes zu finanzieren. Aus diesem Grunde stellt der Bund seit 1996 den Bundesländern jährlich sogenannte Regionalisierungsmittel zur Verfügung, die im Jahr 2018 rund 8,4 Mrd. Euro betrugen und nach einem festgelegten Schlüssel auf die Länder verteilt werden. Der Gesamtbetrag wird jährlich um 1,8 % angehoben. Das bevölkerungsreichste Bundesland NRW und das Flächenland Bayern beispielsweise beziehen heute Beträge über 1 Mrd. Euro. Die ostdeutschen Bundesländer erhalten noch zusätzliche Regionalisierungsmittel. Die bereitgestellten Mittel werden für den Einkauf von Zugleistungen (sog. „Bestellerentgelt“), für Investitionen in die Schieneninfrastruktur und die Anschaffung neuer Fahrzeuge verwendet.

Die strategische Ausrichtung der im Auftrag ihrer Bundesländer handelnden 27 Aufgabenträger (→ Abbildung 2) ist Aufgabe des Bundes und der zuständigen Ministerien. Mobilitätsziele wie auch Umwelt- und Klimaziele, und die Umsetzung der für die Erreichung dieser Ziele erforderlichen Maßnahmen auf Ebene der Aufgabenträger und EVU zählen dazu. Die Suche nach Alternativen zu Dieseltriebzügen bei der Vorbereitung neuer Verkehrsverträge weicht in seiner Schwierigkeit erheblich von den bisherigen Abläufen ab. Bei der Bestellung von Verkehrsleistungen überließen es Aufgabenträger bisher den zuständigen Eisenbahnverkehrsunternehmen, sich um die Anschaffung neuer Fahrzeuge zu kümmern, deren Verfügbarkeit und Instandhaltung im Falle konventioneller Antriebe selten Probleme bereitete.

Als ein Beispiel für die Vielfältigkeit der Verantwortung, die Aufgabenträger heute wahrzunehmen haben, sei das nordrhein-westfälische Prestige-Projekt Rhein-Ruhr-Express (RRX) erwähnt, an dem fünf verschiedene Aufgabenträger beteiligt sind. Diese sind neben dem hauptverantwortlichen Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR), die Nahverkehrsverbünde Rheinland (NVR) und Westfalen-Lippe (NWL), sowie der SPNV-Nord von Rheinland-Pfalz und der NVV von Nordhessen. Mit dem RRX soll der Regionalverkehr durch engere Takte und höhere Beförderungskapazitäten auf Kernstrecken im dicht besiedelten Nordrhein-Westfalen aufgewertet werden. Die zu verteilende Betriebsleistung von 14,6 Mio. Zugkilometer pro Jahr auf den neuen RRX-Linien wurde nach europaweiter Ausschreibung der Verkehrsverträge an die internationalen Verkehrsunternehmen Abellio und National Express vergeben.

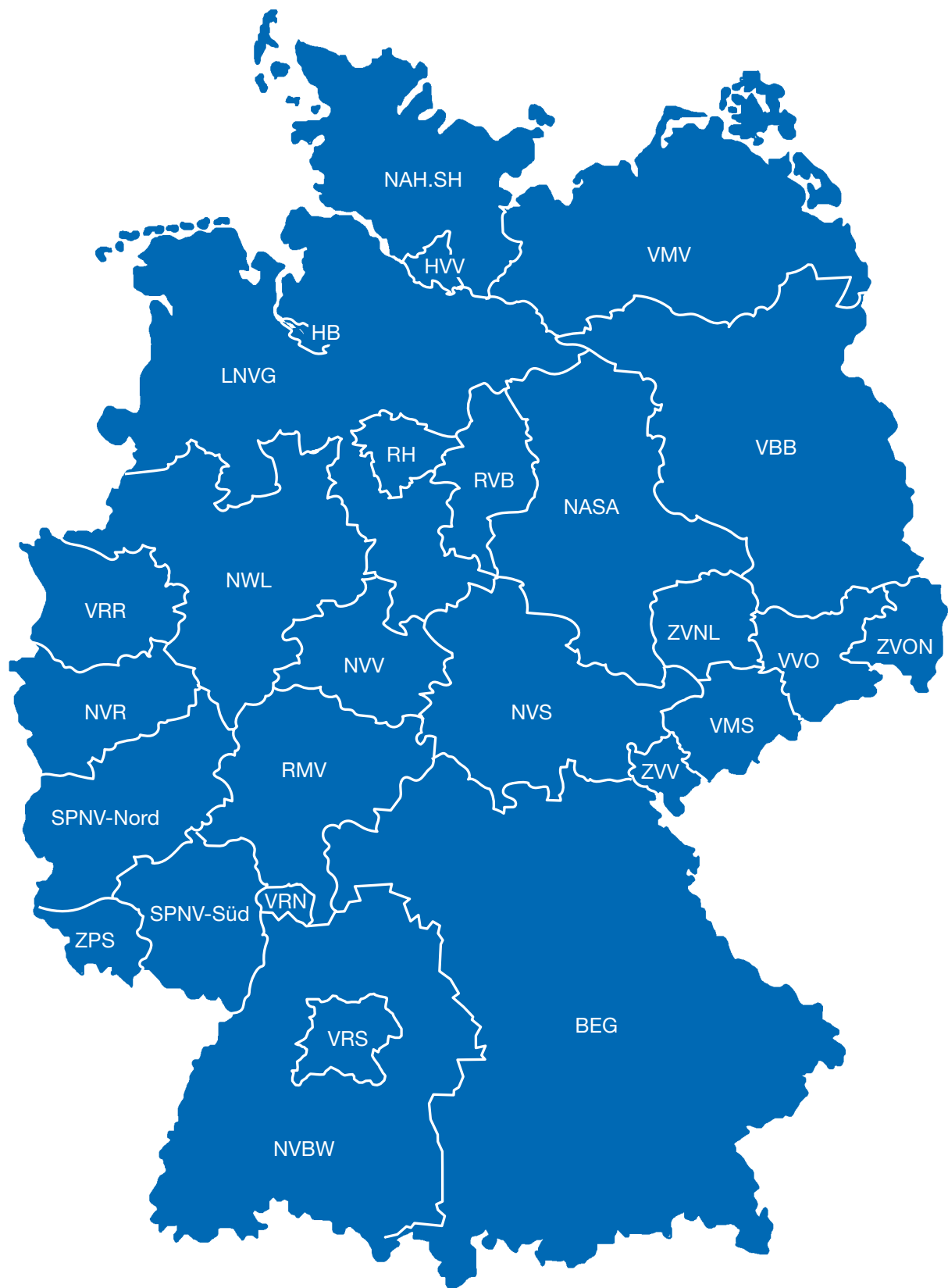


Abbildung 2 Die Aufgabenträger in Deutschland [8]

Die RRX-Strecken sind vielfach bereits elektrifiziert und dicht befahren. An verschiedenen Stellen ist dennoch ein Ausbau der Schieneninfrastruktur erforderlich, da die Züge mit höheren Geschwindigkeiten fahren sollen. Die benötigten leistungsstarken Elektrotriebzüge mit hoher Fahrgastkapazität wurden europaweit ausgeschrieben.



Abbildung 3 **RRX-Doppelstock-Elektrotriebzug Desiro HC in Hamm (Foto: WK)**

Gewinner der Ausschreibung war Siemens Mobility mit dem vierteiligen Doppelstock-Elektrotriebzug des Typs Desiro HC (High Capacity), von denen bis 2020 insgesamt 82 Züge geliefert werden sollen. Erste RRR-Züge verkehren seit Dezember 2018 als Rhein-Hellweg-Express auf der Linie RE 11 zwischen Düsseldorf und Kassel-Wilhelmshöhe – siehe auch → Abbildung 3.

Käufer der RRR-Züge sind die beteiligten Verkehrsverbünde. Sie verpachten die Züge an die beiden EVU. Der Hersteller Siemens Mobility verpflichtete sich, 32 Jahre lang für die Instandhaltung der Fahrzeuge zu sorgen. Er hat dafür eigens ein Betriebswerk in Dortmund eingerichtet und garantiert 99-prozentige Verfügbarkeit.

Dieses als Verfügbarkeitsmodell bekannte Konzept setzen die Aufgabenträger inzwischen auch im Falle von Verkehrsausschreibungen voraus, bei denen die Anschaffung von Triebzügen mit alternativen Antrieben vorgesehen ist. Anders als im Fall RRR sind die den neuen Antrieben zugrunde liegenden Technologien und deren Zusammenspiel mit den übrigen Fahrzeugkomponenten wie auch die Art der Bereitstellung der Antriebsenergie noch nicht erprobt. Im Bahnbetrieb können neuartige Antriebskonzepte daher mit erheblichen betriebswirtschaftlichen Risiken verbunden sein, die insbesondere kleinere Eisenbahnverkehrsunternehmen kaum tragen können. Somit bleibt den Aufgabenträgern nichts anderes übrig, als die Fahrzeuge selbst zu erwerben und diese an die EVU zu verpachten. Den Herstellern langfristig die Instandhaltung ihrer Fahrzeuge zu überlassen, und im Fall der Brennstoffzellenzüge von ihnen zusätzlich auch die Bereitstellung des Wasserstoffs zu verlangen, ist aus Sicht der Aufgabenträger gerechtfertigt. Unklar ist, wie zu verfahren ist, wenn die Wasserstofftankstellen auch von Fahrzeugen anderer Hersteller genutzt werden sollen.

2.4 Eisenbahnverkehrsunternehmen als „carrier-only“?

Ein Grund für die Öffnung der Schienenwege für mehr Wettbewerb im regionalen Schienenpersonenverkehr war, die Kosten des Bahnbetriebs so niedrig wie möglich zu halten. Auch heute dominiert die im Jahr 1999 als 100 %ige Tochter der Deutschen Bahn AG gegründete DB Regio AG als Eisenbahnverkehrsunternehmen mit 67 % Marktanteil den Nahverkehr. Aus ihrer geschichtlichen Monopolstellung heraus betreibt sie eigene Fahrzeugpools und sorgt in ihren Werkstätten auch für die Instandhaltung der Fahrzeuge. Aus Sicht einiger Aufgabenträger ist die DB Regio in dieser Konstellation zu unflexibel und teuer, um der erwarteten signifikanten Zunahme der Betriebs- und Verkehrsleistung im SPNV gerecht zu werden. Sie ziehen flexiblere Verkehrsunternehmen vor, die sich auf ihre eigentliche Aufgabe als „Carrier“ fokussieren und diese Leistung zu niedrigeren Kosten anbieten können.

Viele kleinere EVU betreiben heute Diesellinien in eher abgelegenen Gebieten. Der Betrieb solcher Linien sei an einem Beispiel erläutert: Im Oktober 2008 erteilte die Bayerische Eisenbahngesellschaft (BEG) der Hamburger Beteiligungsgesellschaft BeNEX den Zuschlag für das Dieselnetz Oberfranken. Die BeNEX gründete daraufhin die Agilis Verkehrsgesellschaft, die das Dieselnetz seit Juni 2011 mit 38 Dieseltriebzügen des Typs Regio-Shuttle RS1 betreibt. → Abbildungen 4 und 5

Abbildung 4 **Dieselnetz Oberfranken und
Elektronetz Franken (Stand 2011) [9]**

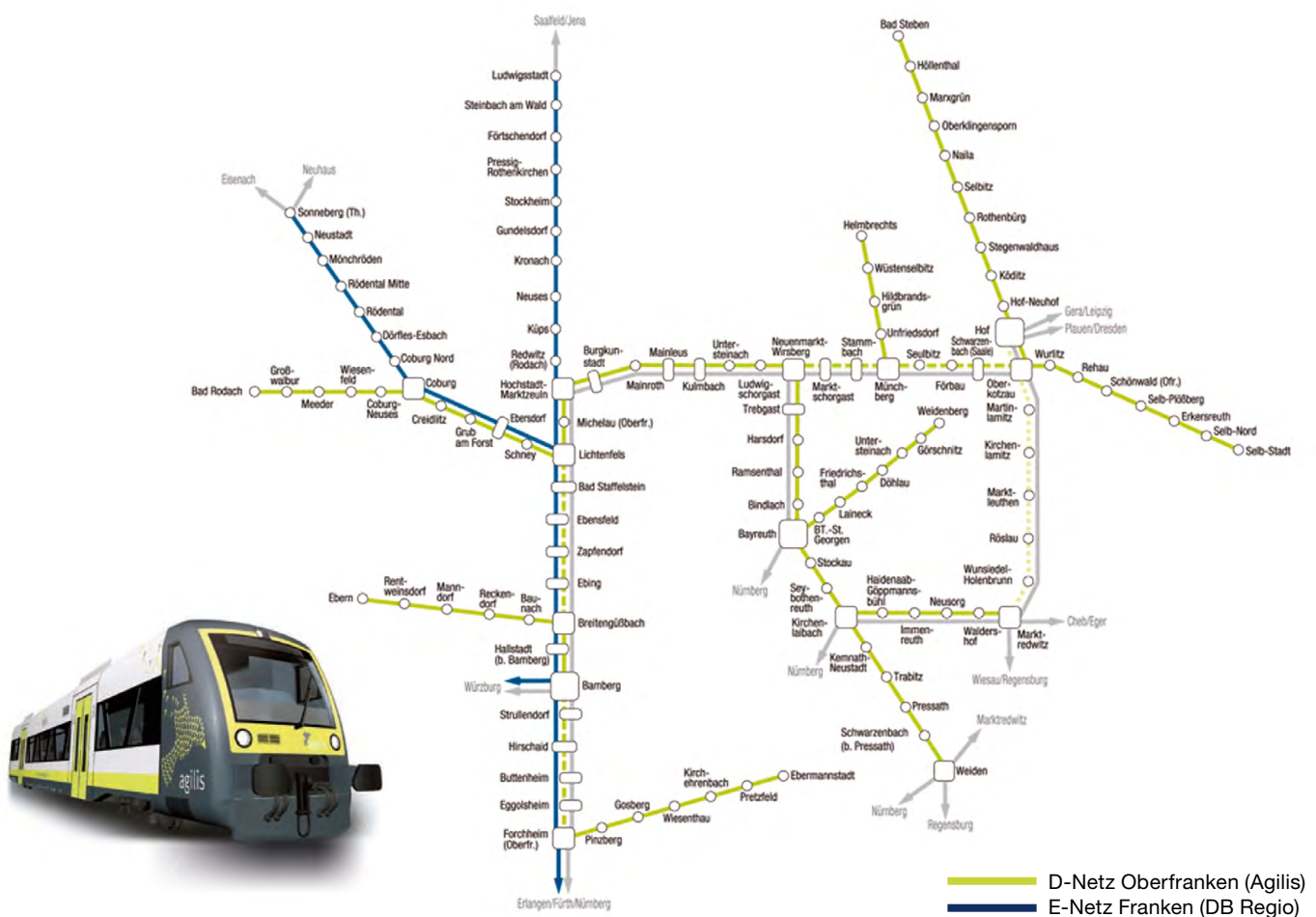




Abbildung 5 **Regio Shuttle RS1 der DB Regio im Einsatz am Bodensee**
(Foto: WK)

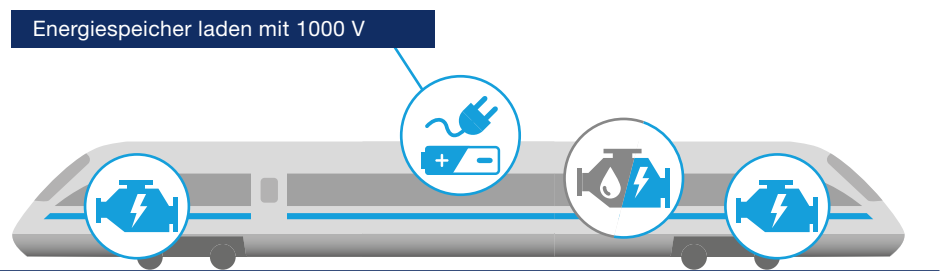
Mit dem wegen seiner besonderen Fahrdynamik bei Fahrgästen wie Betreibern geschätzten Dieselfahrzeugtyp RS1 steuert agilis-V die über eine Streckenlänge von 429 km verteilten 102 Haltestellen des Dieselnetzes Oberfranken an, und erbringt auf diese Weise die von der BEG beauftragte Betriebsleistung von 4,5 Mio. Zkm. Auf fast allen Strecken wird ein durchgängiger Stundentakt gefahren. Die Fahrzeugwerkstatt für das Netz liegt in Marktredwitz. Eigentümerin der Dieseltriebzüge ist die BeNEX GmbH, die sich um deren Bereitstellung, Disposition und Wartung kümmert. Die Instandhaltung erfolgt in eigenen Werkstätten. In dieser Konstellation ist agilis sicherlich kein reiner Carrier, sondern ist ähnlich aufgestellt wie DB Regio.

Die DB Regio mit 6,4 Mrd. Euro Umsatz und 22.000 Mitarbeitern hat in den vergangenen Jahren das eine oder andere Regionalnetz wie das Dieselnetz Oberfranken an kleinere EVU wie agilis-V verloren. Empfindlich traf das Unternehmen die Nichtberücksichtigung beim Prestige-Projekt RRR in Nordrhein-Westfalen, wo die als „reine Carrier“ angetretene Unternehmen Abellio und National Express den Zuschlag der Aufgabenträger erhielten.

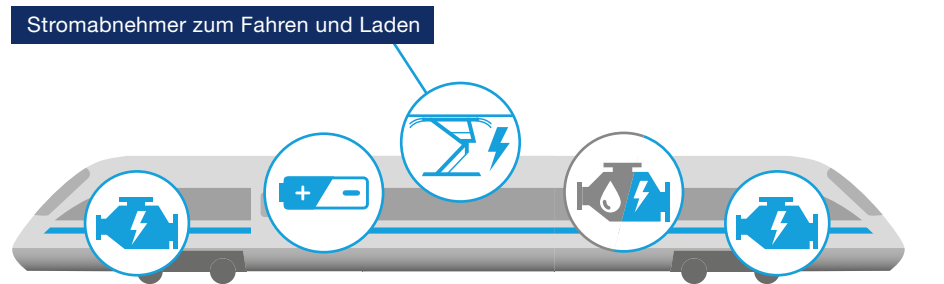
Bei aller Kritik an DB Regio sollte nicht übersehen werden, dass dieses Unternehmen weitaus bessere Möglichkeiten und mehr Erfahrung hat als ihre in der Regel kapitalschwächeren Wettbewerber, wenn es darum geht, die Anforderungen an Fahrzeuge mit alternativen Antrieben genau zu spezifizieren, solche Fahrzeuge einzusetzen und für deren Instandhaltung zu sorgen.

Ihre Leistungsfähigkeit möchte die DB Regio in dem vom BMVI geförderten Projekt EcoTrain unter Beweis stellen. Hintergrund ist hier, dass die DB Regio im SPNV heute rund 1.300 (also mehr als die Hälfte aller) Dieseltriebzüge einsetzt. Diese sind in der Mehrzahl relativ neu und daher noch lange einsetzbar [10]. Idee ist, einen Teil dieser Flotte zu dieselektrischen Hybriden umzurüsten. Diese sollen auf oberleitungsfreien Strecken diesel-elektrisch mit reduziertem Dieselverbrauch und auf Strecken mit Fahrdraht elektrisch mit Strom aus der Oberleitung fahren. Für oberleitungsfreie Haltepunkte soll optional die Möglichkeit geboten werden, die benötigte Energie aus einer großen Lithium-Ionen-Batterie zu beziehen. Siehe → Abbildung 6.

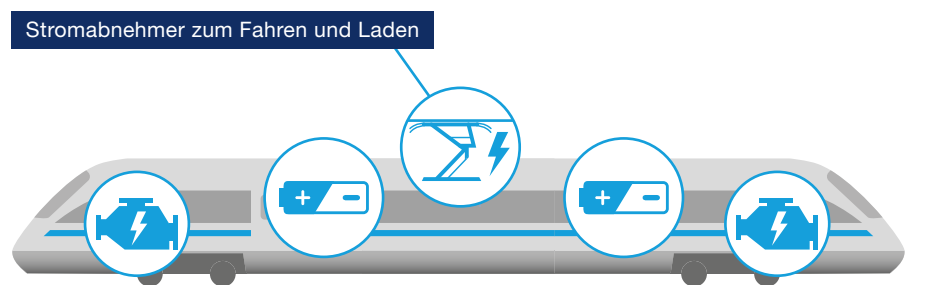
EcoTrain
HybridMode



EcoTrain
DualMode



EcoTrain
eMode



Dieselmechanischer Antrieb



Dieselgenerator



Elektromotor



Stationäre Ladung



Batterie



Stromabnehmer/
Pantograf

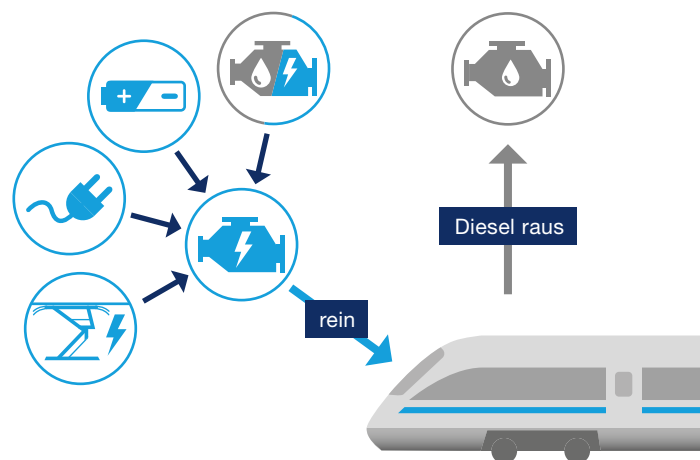


Abbildung 6 EcoTrain-Konzept der DB Regio [nach 11]

2.5 Hersteller als Innovatoren und Instandhalter

Die in Deutschland ansässigen Hersteller sind auch international erfolgreiche Unternehmen. Nachfolgend werden diese in alphabetischer Reihenfolge genannt und ihr Portfolio kurz beschrieben.



Das französische Unternehmen Alstom (Umsatz: 7,9 Mrd. Euro) hat in Deutschland als Alstom Transport Deutschland GmbH (Umsatz: 400 Mio. Euro) seinen Sitz in Salzgitter, dem Standort, der früheren Linke-Hofmann-Busch GmbH (LHB), die 1998 im Alstom-Konzern aufging.

Coradia LINT ist die Dieseltriebzug-Familie von Alstom, die in vier verschiedenen Längen ein-, zwei- und dreiteilig (LINT 27, 41, 54, 81) verfügbar sind. Im deutschen Schienennetz sind insgesamt 750 Züge des Typs LINT im Einsatz. (→ Abbildung 7)

Coradia Continental ist die Elektrotriebzug-Familie von Alstom. Als Baureihe 1440 wird dieser Fahrzeugtyp in verschiedenen Regionen als S-Bahn eingesetzt. (→ Abbildung 8)

Alstom bietet in Braunschweig die Instandhaltung und Modernisierung von Nahverkehrszügen an (→ Abbildung 9) – auch für Baureihen anderer Hersteller. Der Verkehrsverbund Mittelsachsen (VMS) hat für das Elektronez-Mittelsachsen 29 Elektrotriebzüge des Typs Coradia Continental erworben, diese 2016 dem Betreiber Transdev zur Verfügung gestellt und Alstom mit der lebenslangen Instandhaltung dieser Fahrzeuge beauftragt.

Abbildung 7 Alstom Coradia LINT 54
Dieseltriebzug von NWB





Abbildung 8 Alstom Coradia Continental
Elektrotriebzug des Betreibers HLB (Foto: WK)

Abbildung 9 Alstom Servicewerk für Personen-
triebzüge und E-Loks in Braunschweig [12]

Trotz aller Bedenken wegen Dieselantrieben sind Alstom-Dieseltriebzüge weiterhin sehr gefragte Fahrzeuge. So erwarb die Bayerische Regiobahn als von der BEG beauftragter Betreiber des Dieselnetzes Augsburg II zuletzt 28 neue Dieselfahrzeuge des Typs LINT 41, die ab Ende 2022 auf drei Bahnlinien in Oberbayern und Schwaben zum Einsatz kommen [13].



Abbildung 10 **Alstom Coradia iLINT**
Brennstoffzellen-Triebzug (Foto: Alstom)

Fahrzeuge mit alternativen Antrieben kamen hier offenbar nicht in Frage, obwohl Alstom inzwischen auch Triebzüge mit Brennstoffzellen-Antrieb anbietet. Dieser Zugtyp basiert auf der LINT-Plattform und wird mit der Modellbezeichnung **Coradia iLINT** vertrieben (→ Abbildung 10). Alstom entwickelte diesen Zug mit Fördermitteln des BMVI in Deutschland am Standort Salzgitter, um seinen Kunden langfristig eine Alternative anzubieten, welche die Einhaltung der Betriebskonzepte von Dieseltriebzügen hinsichtlich Reichweite und Sitzkapazitäten verspricht. Instandhaltung und Wartung der Fahrzeuge bietet Alstom auch für diesen Zugtyp an.

Alstom präsentierte seinen Brennstoffzellen-Triebzug erstmalig auf der InnoTrans 2016 in Berlin und erhielt dort bereits erste Absichtserklärungen (LoI) von Aufgabenträgern für den Kauf. Anfang 2018 wurde der Coradia iLINT auf der Strecke zwischen Buxtehude und Bremerhaven mit Fahrgästen getestet und erhielt im Juli 2018 die Zulassung des EisenbahnBundesamtes [14]. Die nachfolgende Betriebserprobung wird in diesem Gebiet seit Ende 2018 mit zwei Vorserien-Fahrzeugen durchgeführt.

Trotz sehr positiver medialer Resonanz halten sich die Besteller bislang jedoch zurück. Anstehende Ausschreibungen für Verkehrsleistungen werden im Hinblick auf alternative Antriebe technologieoffen gehalten, da noch Zweifel an der zukünftigen Wirtschaftlichkeit des Brennstoffzellen-basierten Triebzugkonzeptes bestehen. Zudem wird erwartet, dass sich Alstom als bislang einziger Anbieter eines offiziell zugelassenen Brennstoffzellen-Zuges auch um die Bereitstellung des erforderlichen Wasserstoffgases kümmert.

BOMBARDIER

Das kanadische Unternehmen Bombardier Transportation (Umsatz: 16,3 Mrd. USD) hat in Deutschland als Bombardier Transportation GmbH (Umsatz: 10 Mrd. USD) seinen Sitz in Berlin. Fertigungsstandort ist in Hennigsdorf, dem ehemaligen größten Werk von Daimler-Chrysler Rail Systems (ADtranz), der von Bombardier übernommen wurde.



Abbildung 11 **Bombardier TALENT**
Dieseltriebzug des Betreibers NEB [15]



Abbildung 12 **TALENT 2** Elektrotriebzug
des Betreibers National Express
(Foto: WK)

TALENT ist die Dieseltriebzug-Familie von Bombardier, die als zwei-, drei- und vierteilige Fahrzeuge angeboten werden. Im deutschen Schienennetz sind fast 800 Züge dieses Typs im Einsatz. (→ Abbildung 11)

TALENT 2 ist die Elektrotriebzug-Familie von Bombardier. 440 Züge dieses Typs sind im deutschen Schienennetz im Einsatz. (→ Abbildung 12)



Abbildung 13 **Bombardier TALENT 3**
Batterietriebzug (Foto: Bombardier)

Die Bayerische Oberlandbahn (BOB) setzt seit 2004 zur Verstärkung in der Hauptverkehrszeit zusätzlich drei dreiteilige Dieseltriebzüge des Typs TALENT ein. Zum Fahrplanwechsel 2013 hat die BOB sechs weitere Triebzüge bestellt. Fahrzeuge mit emissionsfreiem Antrieb waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar. Inzwischen hat Bombardier mit Fördermitteln des BMVI im Werk Hennigsdorf einen Batterietriebzug entwickelt, der auf der Elektrotriebzug-Plattform TALENT 3 basiert und mit der Modellbezeichnung **TALENT 3 BEMU** beworben wird. (→ Abbildung 13)

Bombardier stellte den BEMU im Jahr 2018 anlässlich der InnoTrans in Berlin auf seinem Werksgelände in Hennigsdorf erstmals der Öffentlichkeit vor. Trotz der technologisch bedingt geringen Reichweite dieses Fahrzeugtyps im Vergleich zu Diesel- oder Brennstoffzellen-Zügen fand der BEMU positives mediales Interesse.

Auch im Fall des Batterietriebzugs halten sich Besteller bislang noch zurück. Aktuelle Verkehrsausschreibungen sind technologieoffen gehalten, und signalisieren damit die noch bestehende Unsicherheit der Entscheider gegenüber Antrieben mit Batterie oder Brennstoffzellen.

SIEMENS

Mobility GmbH

Die Sparte Mobility (Umsatz: 8,8 Mrd. Euro) der Siemens AG wurde im August 2018 anlässlich der zu diesem Zeitpunkt geplanten Verschmelzung mit Alstom als Siemens Mobility GmbH aus dem Konzern ausgegliedert. Anfang 2019 wurde die Fusion jedoch von der EU untersagt.

Desiro Classic ist ein von Siemens Mobility hergestellter zweiteiliger Dieseltriebzug aus der Familie Siemens Desiro. Im deutschen Schienennetz sind 320 Züge dieses Typs im Einsatz. (→ Abbildung 14)

Desiro ML ist der Elektrotriebzug der Desiro-Familie, dessen Nachfolger der 2018 vorgestellte Mireo ist. **Desiro HC** ist der Doppelstock-Elektrotriebzug aus der Desiro-Familie. (→ Abbildung 15; siehe auch → Abbildung 3)

Der Dieseltriebzug Desiro Classic ist in Deutschland noch vielfach im Einsatz, wird aber nicht mehr produziert. Die DB Regio könnte ihrer bestehenden Desiro-Classic-Flotte mit dem Projekt EcoTrain zur Aufrüstung der Triebzüge zu dieselektrischen Hybriden einen „zweiten Frühling“ bescheren.

Abbildung 14 **Siemens Desiro Classic**
Dieseltriebzug des Betreibers DB
Regio (Foto: WK)



Abbildung 15 **Desiro ML**
Elektrotriebzug als CityJet für ÖBB
auf InnoTrans 2016 [16]





Abbildung 16 **Batterietriebzug CityJet-Eco von Siemens/ÖBB als Variante des Desiro-ML [17]**

Siemens Mobility konnte mit Unterstützung der Österreichischen Bundesbahn erfolgreich einen auf Desiro ML basierenden Batterietriebzug-Prototyp (CityJet Eco) auf die Schiene stellen. Dieses Fahrzeug wird ab Sommer 2019 im Verkehrsnetz der ÖBB in den Fahrgastbetrieb gehen. (→ Abbildung 16)

Abbildung 17 **Mireo-Plattform von Siemens Mobility (Computer-Grafik) [18]**

Siemens Mobility hat im Jahr 2018 eine auf Mireo basierende und als Traktionsbaukasten bezeichnete Plattform (→ Abbildung 17) geschaffen, auf der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben entwickelt werden. Im Rahmen eines vom BMVI unterstützten Förderprojektes entwickelt Siemens Mobility einen Brennstoffzellenzug (Mireo Plus H). Die Entwicklung des Batterietriebzugs (Mireo Plus B) auf dieser Plattform ist ein von Siemens selbstständig getriebenes Projekt.

Die Stadler Rail AG (Umsatz: 2,2 Mrd. CHF) ist in Deutschland als Stadler Pankow GmbH (Umsatz: 300 Mio. Euro) auf dem Gelände des ehemaligen Adtranz-Werkes ansässig, in dem der bekannte **Regio-Shuttle RS1** entwickelt und gefertigt wurde. Dieser von Stadler übernommene erfolgreiche Dieseltriebzug (→ Abbildung 5 in 2.4) wird dank seiner „Übermotorisierung“ auch heute noch auf dicht befahrenen Knotenpunkten mit Oberleitungslücken eingesetzt. Insgesamt sind fast 500 Fahrzeuge dieses Typs in Betrieb.

Der **Diesel-GTW** ist ein im Konsortium mit Adtranz und Bombardier generierter zweiteiliger dieselelektrischer Triebzug für die Hessische Landesbahn und Usedomer Bäderbahn. (→ Abbildung 18)

FLIRT ist ein vierteiliger Elektrotriebzug, der zunächst in Deutschland erfolgreich vertrieben wurde und inzwischen weltweit fast 1.700 mal verkauft wurde. (→ Abbildung 19)

Abbildung 18 Stadler Diesel GTW 2/6 des Betreibers Usedomer Bäderbahn [19]



Abbildung 19 Stadler Elektrotriebzug FLIRT des Betreibers Eurobahn (Foto: WK)





Abbildung 20 Stadler Batterietriebzug
FLIRT 3-AKKU (Foto: Stadler)



Abbildung 21 Schmalspur-Brennstoffzellen-Triebzug für das Zillertal
(Computer-Grafik) [20]

Auf der Generation **FLIRT 3** aufsetzend hat Stadler in relativ kurzer Zeit einen Batterietriebzug, den AKKU-FLIRT entwickelt – finanziert aus dem Privatvermögen der Familie Stadler. (→ Abbildung 20)

Im Mai 2018 bestellte der Österreichische Schmalspurbahn-Betreiber Zillertalbahn bei Stadler Rail fünf Brennstoffzellen-Triebzüge, deren Einsatz ab 2022 geplant ist. → Abbildung 21 zeigt eine Visualisierung der Designstudie [20].

2.6 DB-Netze – ein gefesselttes Bundesunternehmen

Das Bundesunternehmen Deutsche Bahn AG ist zum einen ein großes Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), das den Personen-Fernverkehr, Personen-Nahverkehr und Schienengüterverkehr als wichtigste Geschäftsfelder abdeckt. Dem freien Wettbewerb ist die Bahn bislang nur im Nahverkehrsbereich

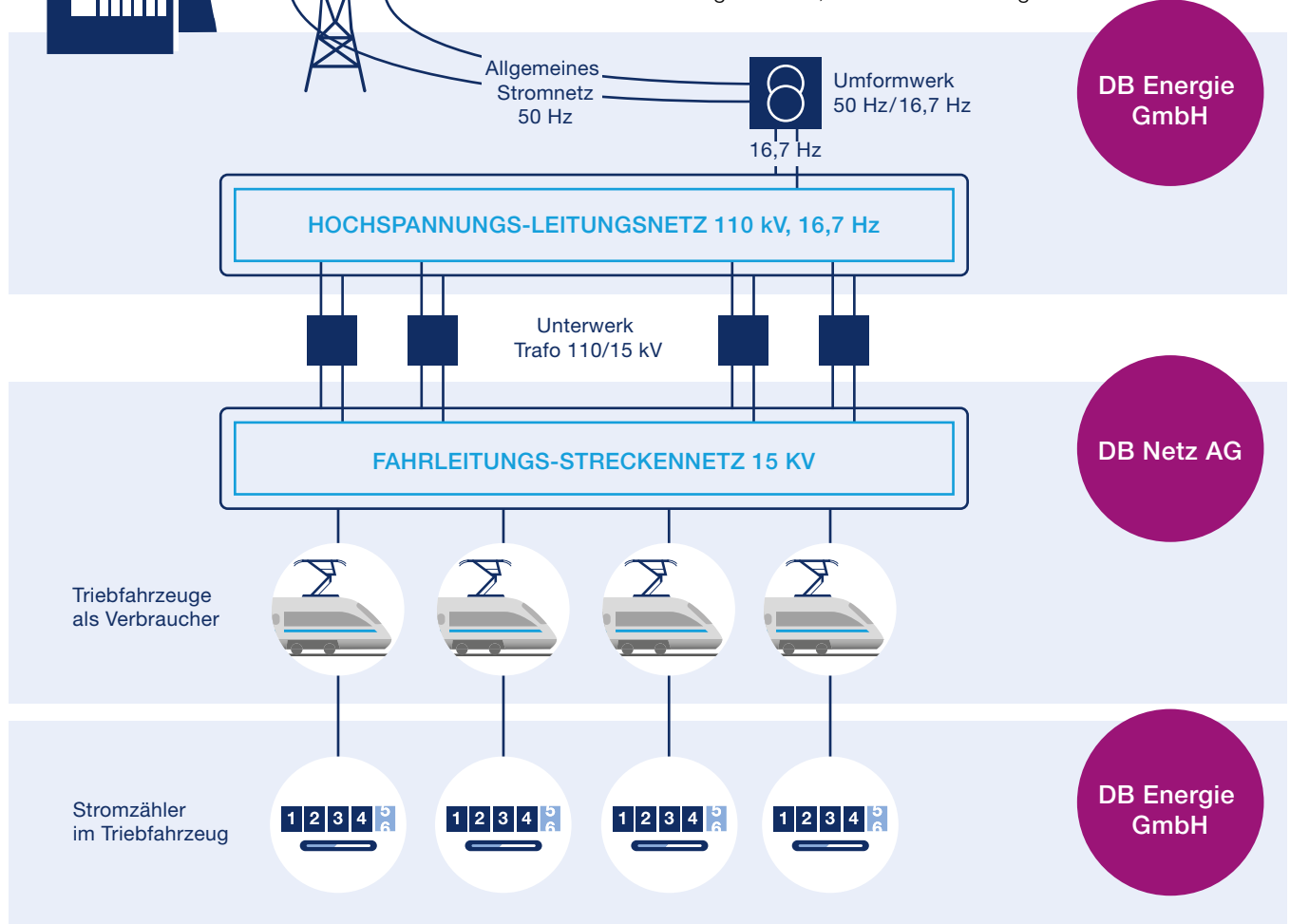
Abbildung 22 **Zusammenwirken innerhalb der DB Netze**
(Darstellung basierend auf [21])

ausgesetzt.

Die zuständige DB Regio AG ist Marktführer, gerät aber zunehmend unter Wettbewerbsdruck durch kleinere flexible Verkehrsunternehmen, die vielfach Töchter großer Bahnunternehmen europäischer Nachbarländer sind.

Zudem ist die Deutsche Bahn ein sehr großes Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU), welches das gesamte Streckennetz der DB mit allen Haltestationen und das Bahnstromnetz sowie die für den sicheren Bahnbetrieb erforderlichen Einrichtungen verantwortet. Dieser Unternehmensbereich (Markenname: DB Netze) gliedert sich entsprechend in die DB Netz AG und die DB Energie GmbH, sowie die DB Station & Service.⁶

DB Netze betreibt im Auftrag des Bundes die Schienenwegeinfrastruktur. Ihre Aufgabe ist es, den DB-Konzerngesellschaften wie auch allen Wettbewerbern einen fairen unparteiischen Zugang zur Infrastruktur zu gewähren. Im Hinblick auf den Bahnstrom sah sich der Bereich DB Energie in der Vergangenheit wegen seiner Preispolitik wiederholt dem Vorwurf der Diskriminierung ausgesetzt [21]. Diese Situation ist auch eine Folge des vorgegebenen Zusammenspiels zwischen DB Netz AG und DB Energie GmbH, wie in → Abbildung 22 visualisiert.



⁶ Zu DB Netze zählt außerdem die Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße (DUSS mbH), die in Deutschland Umschlagbahnhöfe betreibt.

Dem Bahnstrom liegt ein komplettes Versorgungssystem zugrunde, das von der DB Energie GmbH betrieben wird. Es umfasst eigene Kraftwerke und Umformwerke für die Umwandlung von 3-phasigem 50 Hz-Normalstrom in 1-phasigen 16,7 Hz-Bahnstrom, sowie 110 kV Hochspannungsleitungen für die Verbindung der Kraftwerke und Umformwerke mit den Unterwerken, wo die Hochspannung in die benötigte 15 kV-Fahrleitungsspannung umgespannt wird.

Die Fahrleitung für die Stromversorgung der Fahrzeuge fällt vom Ausgang der Unterwerke an in den Zuständigkeitsbereich der DB Netz AG, die somit Eigentümerin und Betreiberin des Oberleitungsnetzes ist, das nicht über den Preis für den bezogenen Bahnstrom, sondern über den Trassenpreis (und entsprechende Bundesmittel) finanziert wird [21]. Erst innerhalb des Fahrzeugs ist die DB Energie wieder zuständig: Hier messen Stromzähler den aufgenommenen und zurückgespeisten Strom.

Im Nahverkehrsbereich fühlten sich Wettbewerber der DB Regio in der Vergangenheit zum Teil diskriminiert, weil sie als kleinere Stromabnehmer einen wesentlich geringeren Rabatt auf den Strompreis erhielten [21]. Zudem wurde die höhere Effizienz ihrer in der Regel moderneren Fahrzeuge bei der Stromrückspeisung nicht angemessen honoriert. Angesichts solcher hier beispielhaft genannten „Querelen“ stellt sich die Frage, was wichtiger ist: Wettbewerb und Wirtschaftlichkeit um jeden Preis oder Daseinsvorsorge, welche die Mobilität der Menschen im Lande diskriminierungsfrei sicherstellt. Auf das genannte Beispiel bezogen sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Regulierung zwischenzeitlich geändert wurde. Seit dem 1. Juli 2014 ist das Bahnstromnetz für die Durchleitung geöffnet. Damit haben alle EVU die Möglichkeit, ihre Bahnstromlieferanten frei zu wählen.

Fragen, wie die der Elektrifizierung von Bahnlinien im SPNV, um Dieselfahrzeuge durch Elektrotriebzüge ersetzen zu können, oder stattdessen Fahrzeuge mit alternativen Antrieben auf die Schiene zu bringen, können in der heutigen Struktur von DB Netze kaum beantwortet werden: Infrastrukturthemen fallen in ihren Zuständigkeitsbereich, Fahrzeugthemen hingegen nicht.

Entsprechend komplex gestaltet sich auch die offizielle Einschätzung der Antriebsalternativen Batterietriebzug und Brennstoffzellen-Triebzug. Müsste die Initiative für die Erzeugung und Bereitstellung von Wasserstoff, oder die Teilelektrifizierung von Strecken, um Lademöglichkeiten für Batterietriebzüge zu schaffen, nicht eigentlich bei DB Netze liegen? Heute gehen solche Initiativen ausschließlich von regional zuständigen Aufgabenträgern und innovativen Fahrzeugstellern aus. Aktuell klären die Bundesnetzagentur und das Eisenbahnbundesamt, ob Ladestationen der Strecke zuzuordnen sind, also die Zuständigkeit bei DB Netze liegt. Eine Grundsatzentscheidung zur rechtlichen Einordnung ist demnächst zu erwarten. Es ist nachvollziehbar, dass sich die DB Netze fragt, wie sie die dafür erforderlichen Investitionen in die Infrastruktur finanzieren sollte. Über höhere Trassengebühren für Fahrzeugkonzepte, deren Wirtschaftlichkeit und Zukunftsfähigkeit bisher noch ungeklärt ist?



2.7 Verbände und Allianzen als Lobbyisten der Schiene

Die **Allianz pro Schiene** sieht sich als notwendiges Gegengewicht zur Autolobby und wurde mit diesem Anspruch im Jahr 2000 gegründet. In der Überzeugung, dass der Schienenverkehr umweltschonend, sicher und volkswirtschaftlich effizient ist, und auch für die gesellschaftliche Teilhabe bezahlbare Mobilität darstellt, engagiert sich dieser Verband mit dem Ziel, wesentlich zur Steigerung des Marktanteils des Personen- und Güterverkehrs beizutragen. Mitglieder dieses Verbandes sind Non-Profit-Organisationen wie Umweltverbände, Verbraucherorganisationen, Gewerkschaften und Hochschulen; Fördermitglieder sind Aufgabenträger, Verkehrsunternehmen, Bahnbauunternehmen und Hersteller.

Die Allianz pro Schiene bemüht sich um einen differenzierten Blick auf geeignete Alternativen zu Dieselszügen. Sie beschränkt sich argumentativ nicht auf Nah-, Fern- oder Güterverkehr. Für sie ist die Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes an sich von zentraler Wichtigkeit. Diese sei nicht nur umweltfreundlich, sondern bewirke auch die langfristig notwendige Steigerung der Kapazität des Schienennetzes. Das Beispiel Raststatt zeige, wie wichtig Elektrifizierung sein kann: 2017 führte die Absenkung einer Bahntrassen-Schiene zu einer Streckensperrung, die den Güterverkehr für Tage lahm legte, weil es keine Umleitungsstrecken mit Oberleitung gab.

Die Allianz pro Schiene hat sich bei der Politik einen besonderen Namen gemacht mit Empfehlungen für ein Beschleunigungsprogramm Elektromobilität Schiene 2025, die weit über die im Bundesverkehrswegeplan BVWP 2030 vorgesehenen Projekte hinausgingen, siehe auch [6]. Auf diese Vorschläge beziehen sich im Kapitel 3 wesentliche Aussagen zur Elektrifizierung.



Der **Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV**, ist ein Branchenverband, der nach eigener Aussage im Dialog mit Politik und Wirtschaft steht. Er organisiert rund 600 Unternehmen des Öffentlichen Personenverkehrs und des Schienengüterverkehrs in Deutschland.

Der VDV sieht Elektromobilität als einen guten Weg, um klimaneutral und lokal emissionsfrei zu werden, und erkennt im ÖPNV viel Potenzial. Mehr Verkehr auf die Schiene zu verlagern sei sinnvoll, solange sich die Schiene als die günstigere Option erweist. Wirtschaftlich gesehen stellen Dieselselbstzüge im Vergleich zu den Alternativen die billigere Lösung dar. Die Frage sei, ob sich für einen fairen Vergleich der CO₂-Ausstoß einpreisen lässt. Die Hybridisierung von Dieselselbstzügen sei eine erste Stufe zur Überwindung des Dieselsproblems.

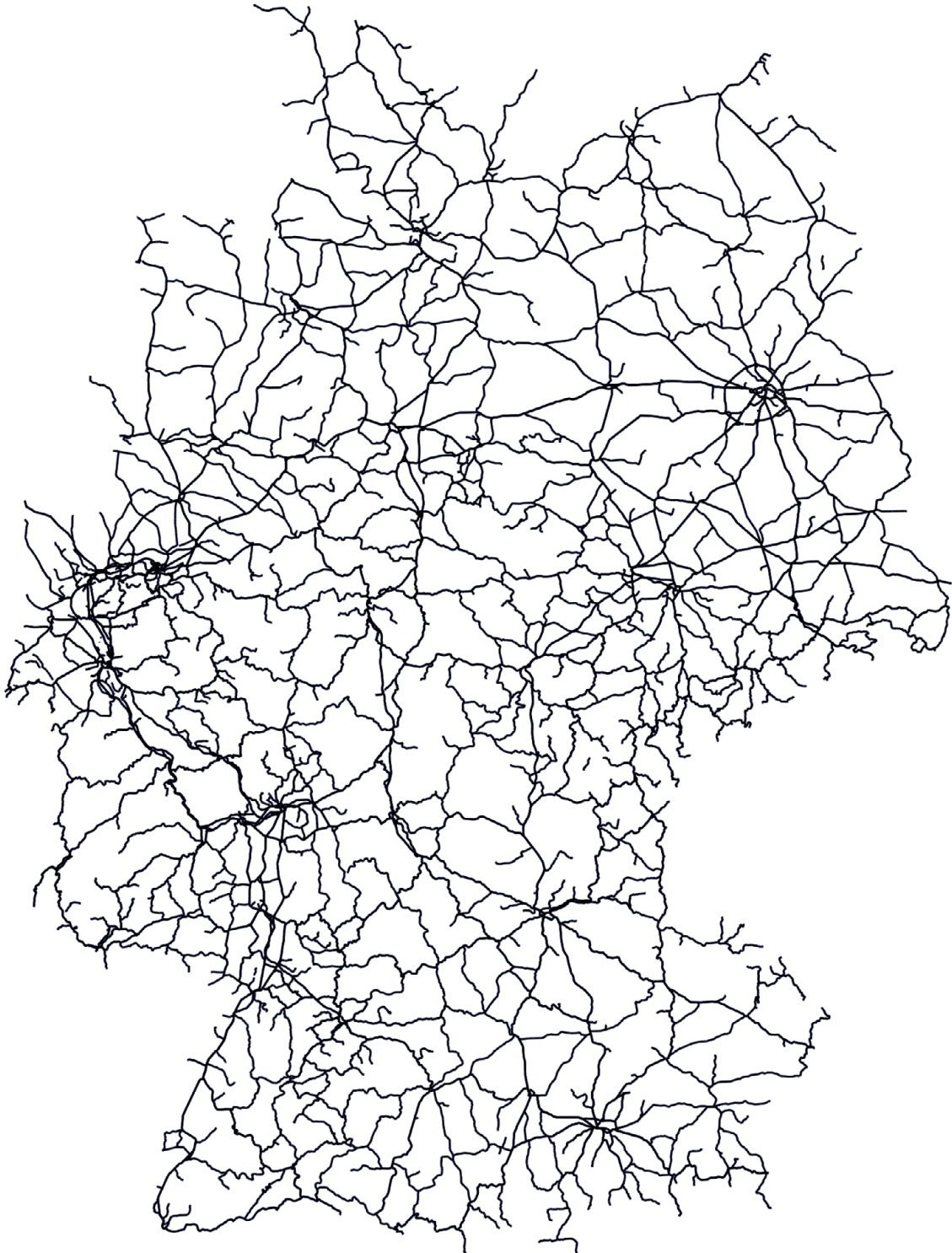
Im Hinblick auf die weitere Elektrifizierung des Schienennetzes steht der VDV auf einer Linie mit der Allianz pro Schiene [22]. Die Einführung alternativer Antriebe müsse sich an den Argumenten für die Elektrifizierung messen lassen. In diesem Sinne passe der Brennstoffzellen-Triebzug mit der erforderlichen Wasserstoff-Infrastruktur eigentlich nicht in die Argumentationskette. Sinnvoller sei es, auf die Steigerung der Energieeffizienz und die Unterstützung des Dieselmotors durch Batterien zu setzen, die Rekuperationsenergie aufnehmen und bei Spitzenlasten einspringen. Synthetischer Kraftstoff ist aus Sicht des VDV sinnvoller als Wasserstoff, da er sich für normale Verbrennungsmotoren eignet und dennoch bilanziell klimaneutral wirkt, wenn er mit regenerativem Strom erzeugt wird.

3 Elektrifizierung statt Diesellinien

3.1 Status Quo und Bedarf

Die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland bis 2050 ist ein erklärtes Ziel der Politik und findet in der Gesellschaft breite Zustimmung. Der Schienenverkehr ist dafür gut gerüstet: Auf Bahnlinien mit durchgehender Elektrifizierung werden Elektrotriebzüge eingesetzt, die ihre Antriebsenergie aus der Fahrleitung beziehen. Der Anteil Erneuerbarer Energien (EE) im deutschen Strommix beträgt heute 40 Prozent. Im Bahnstromnetz lag er 2018 bei 57 Prozent und soll laut DB Energie bis 2030 auf 80 Prozent ansteigen.

Abbildung 23 **Deutsches Schienennetz** [23]



Bundesland	Dieselnetz	Linien	Gesamt-länge	Betriebs-leistung	EVU	Aufgaben-träger
Baden-Württemberg	Ortenau	Netz 8	180 km	2.100 T Zkm ¹	SWEG	NVBW
Bayern	Augsburg II	BRB	250 km	~2.600 T Zkm	Bayer. Regiobahn	BEG
Berlin-Brandenburg	Heidekrautbahn		60 km	~650 T Zkm	NEB	VBB
Hessen	Taunus-Bahnen	RB 12/12/15/16	80 km	~900 T Zkm	HLB	RMV
Mecklenburg-Vorpommern	Warnow		~130 km	1.400 T Zkm	DB Regio	VMV
Niedersachsen	Lüneburger Heide	RB 32/37/38	158 km	~1.600 T Zkm	erixx	LNVG
Nordrhein-Westfalen	Kölner Dieselnetz	RB 23–25/30, RE 12/22, S23	~340 km	7.200 T Zkm	DB Regio	NVR
Rheinland-Pfalz	Südwest, Los 1		292 km	3.000 T Zkm	DB Regio	SPNV-Süd
Sachsen	Erzgebirgsbahn		233 km	2.400 T Zkm	DB Regio	VMS
Sachsen-Anhalt	DISA		~800 km	9.000 T Zkm	Abellio	NASA
Schleswig-Holstein	Marschbahn	RE 6	230 km	2.700 T Zkm	DB Regio	NAH.SH
Thüringen	Südthüringen, Los A	R 41/42/48	170 km	2.000 T Zkm	Südthüring. Bahn	NVS

1 T Zkm = 1.000 Zugkilometer

Tabelle 2 **Beispiele für Dieselnetze in den Bundesländern**

Das Bahnnetz hat eine Betriebsstreckenlänge von ca. 34.000 Kilometern und zählt mit 108 Schienenmetern pro km² zu den dichtesten Netzen der Welt. Der Elektrifizierungsgrad jedoch ist mit 59 Prozent nur Mittelmaß in Europa. Die eingeschränkte Elektrifizierung trifft vor allem den regionalen Schienenpersonenverkehr. In Bundesländern wie Niedersachsen, Bayern oder Schleswig-Holstein finden sich noch weitläufige oberleitungsfreie Schienenwege. In anderen Regionen wird das dicht befahrene regionale Schienennetz von einem lückenhaften Netz von Oberleitungen überspannt. Die Elektrifizierungslücken sind zum Teil Streckenabschnitte, die beim Auf- und Ausbau von S-Bahn-Netzen rund um größere Städte übriggeblieben sind. Diese vielfach nur wenige Kilometer langen oberleitungsfreien Strecken sind ein Grund, warum es selbst in dichtest besiedelten Regionen wie in Nordrhein-Westfalen immer noch von Dieseltriebzügen befahrene Netze gibt. In → Tabelle 2 sind beispielhaft einige Dieselnetze der Bundesländer aufgeführt.

Der deutsche SPNV wurde im Jahr 2017 mit einer Gesamtbetriebsleistung von insgesamt 673 Mio. Zugkilometern (Zkm) gefahren. Damit erbrachte er eine Verkehrsleistung von insgesamt 57 Mrd. Personenkilometern (Pkm). Rund ein Drittel der Betriebsleistung (~225 Mio. Zkm) entfiel auf Diesellinien, die eine Verkehrsleistung von weniger als 6 Mrd. Pkm erbrachten, also nur etwa 10 Prozent, vgl. auch [24].

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin fand im Rahmen einer Studie heraus, dass von den etwa 1.000 SPNV-Bahnlinien in Deutschland (mindestens) 469 von Dieseltriebzügen befahren werden, weil diese oberleitungsfreie Streckenabschnitte enthalten. Die aus Daten von [25] abgeleitete → Abbildung 24 zeigt die Verteilung der Diesellinien, sortiert nach abnehmender Länge in Kilometern. Blaue Säulenelemente stehen für Strecken ohne Oberleitung, grüne für solche mit Oberleitung. Bei detaillierter Analyse stellt man fest, dass die Diesellinien im Mittel einen Elektrifizierungsgrad von 23 Prozent aufweisen. Entsprechend verbreitet sind Dieselfahrten unter der Oberleitung.

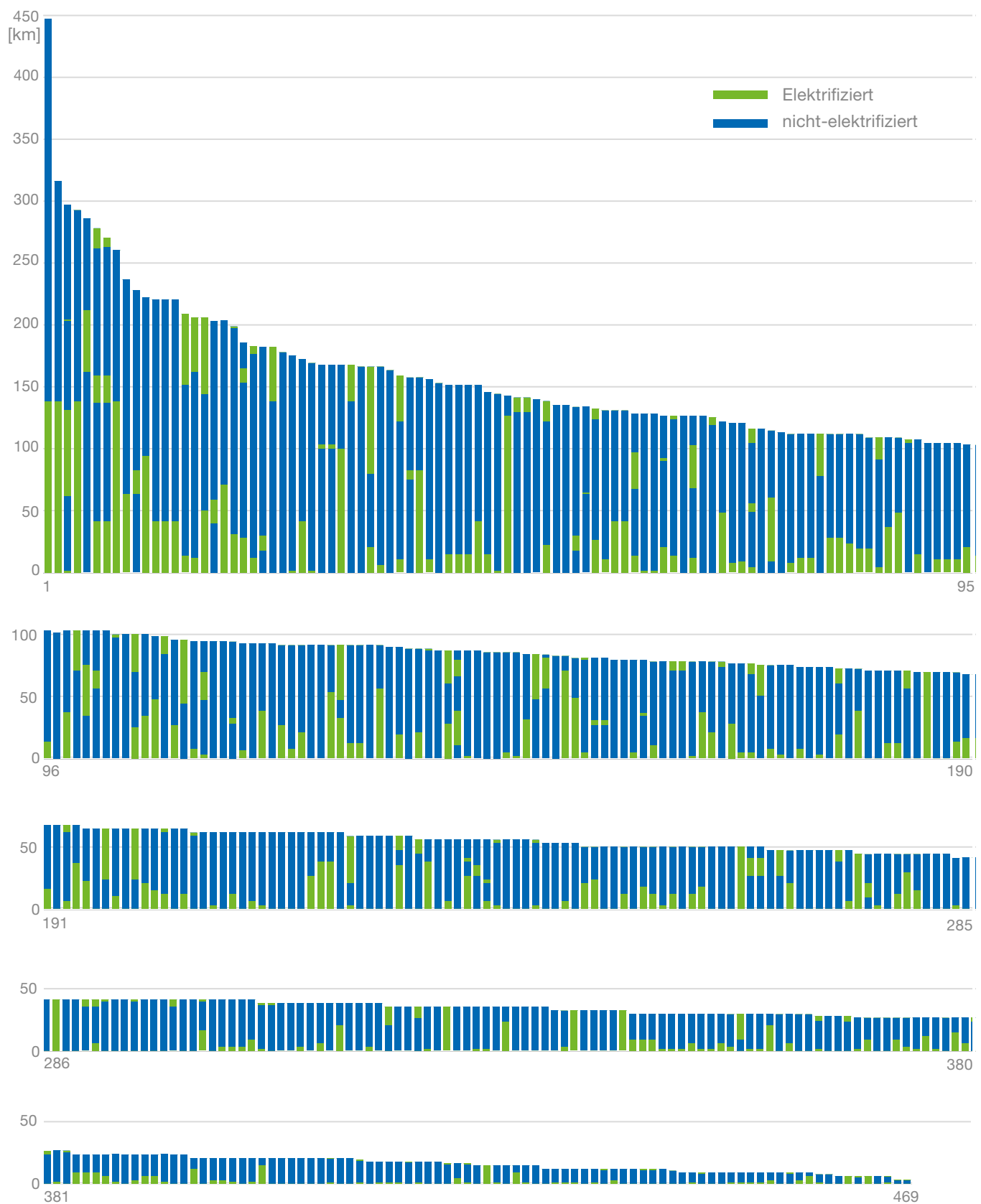


Abbildung 24 Mit Dieseltriebzügen befahrene Bahnlinien im SPNV [25] – auf der x-Achse sind die Diesellinien nummeriert von 1 bis 469

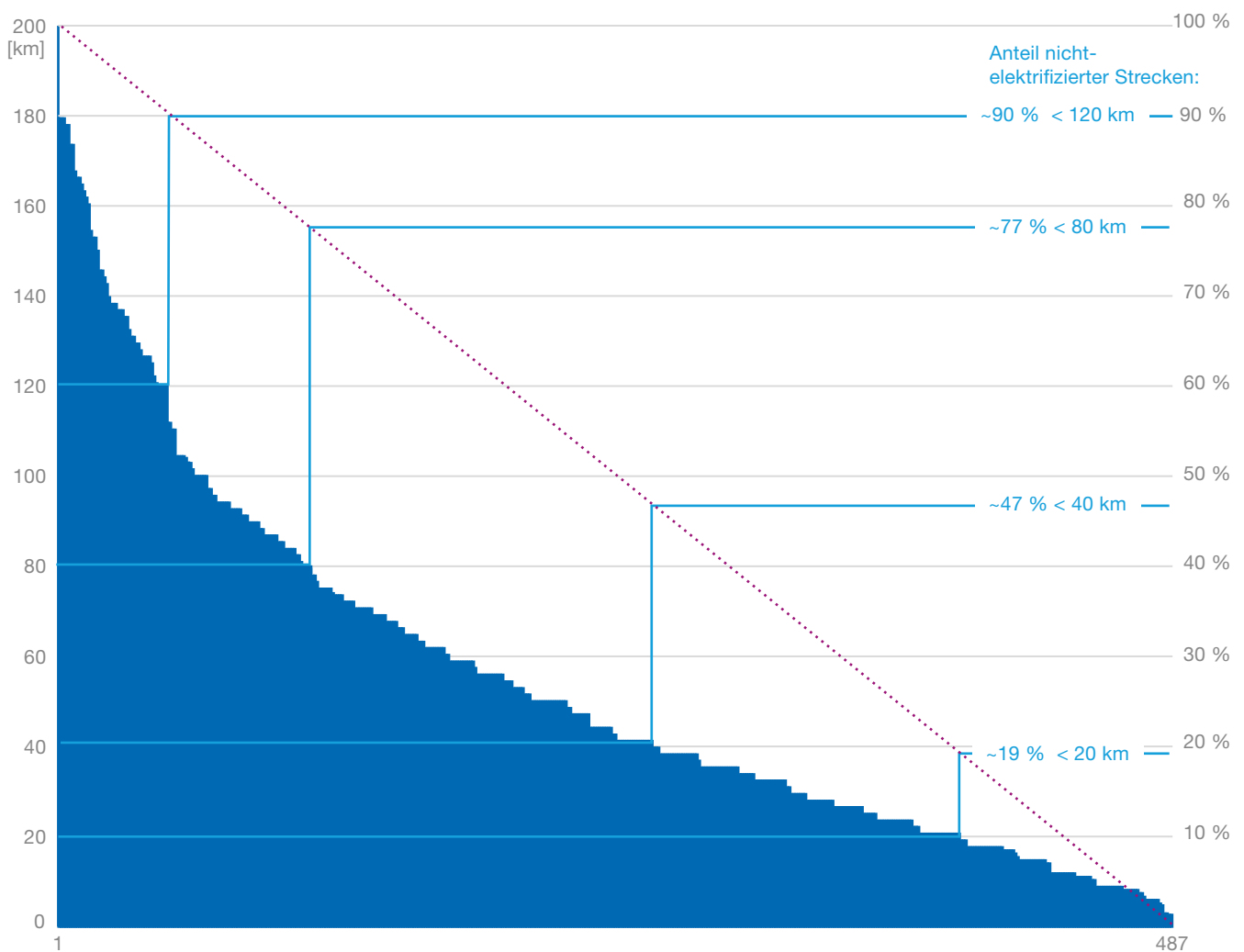


Abbildung 25 **Verteilung der Länge nicht-elektrifizierter Streckenabschnitte im SPNV (nach [25])** – auf der x-Achse sind die Abschnitte durchnummeriert

Die Verteilung der oberleitungsfreien Streckenabschnitte auf SPNV-Bahnlinien, erneut sortiert nach abnehmender Länge in Kilometern, ist in → Abbildung 25 wiedergegeben. Die Darstellung erlaubt eine statistische Aussage darüber, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Streckenabschnitt ohne Oberleitung eine Länge aufweist, die unter einem bestimmten Kilometer-Wert liegt. Hiernach ist etwa die Hälfte aller nicht-elektrifizierten Strecken auf Diesellinien kürzer als 40 Kilometer, und rund Dreiviertel dieser Strecken kürzer als 80 Kilometer.

Mit dem Wissen, wie es um den Grad der Elektrifizierung im Bereich des regionalen Schienenpersonenverkehrs steht und in welchem Umfang Dieselfahrzeuge die Schienenwege nutzen, stehen die Entscheidungsträger vor dem Problem, die richtigen Konsequenzen zu ziehen im Hinblick auf Dekarbonisierung und mehr Verkehr von der Straße auf die Schiene zu bringen.

Elektrifizierungsmaßnahmen sind auf politischer Ebene in begrenztem Umfang ausdrücklich erwünscht, wie dem Koalitionsvertrag vom 14. März 2018 zu entnehmen ist. Hier heißt es auf den Schienenverkehr bezogen unter „4. Verkehr“:

„Bis 2025 wollen wir 70 Prozent des Schienennetzes in Deutschland elektrifizieren. Mit einer Förderinitiative wollen wir regionale Schienenstrecken elektrifizieren. [...]“

Die Umsetzung dieses Versprechens hingegen ist eine große Herausforderung für viele Beteiligte: Die erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen sind aufwändig und teuer, und die Baukapazitäten der Infrastrukturunternehmen sind zurzeit sehr begrenzt. Da es sich um sogenannte ‚raumbedeutsame‘ öffentliche Investitionen handelt, ist zudem die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens vorgeschrieben. Dieses ist mit hohem personellen und zeitlichen Aufwand für das Raumordnungsverfahren sowie für die Ausbauplanung, Umweltprüfung, Gefährdungsbeurteilung, Prüfung der volkswirtschaftlichen Sinnhaftigkeit und Anhörungen verbunden. Die Dauer ab Antragstellung einschließlich Leistungsphasen LP1 bis LP4 (nach HOAI⁷) und Umsetzung kann selbst im Falle kleinerer Elektrifizierungsvorhaben vier bis acht Jahre betragen.

Die Option, Diesellinien mit Hilfe von Elektrifizierungsmaßnahmen zu ersetzen, lässt sich in unterschiedlichen Ausprägungen gestalten – wie in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird.

3.2 Lückenschließungen auf Strecken mit Oberleitungen

Eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung der TU Dresden aus dem Jahr 2017 [26] zeigt, dass bei dicht befahrenen Strecken (Takt ≤ 30 Min) die Elektrifizierung der Königsweg ist, wie die Bayerische Eisenbahngesellschaft (BEG) als Auftraggeber des Berichtes feststellte. Auch im Falle eines 60-Min-Taktes ist hiernach die Schließung einer Elektrifizierungslücke immer noch die sinnvollste Maßnahme, wenn sie höchstens 50 % der Bahnlinie⁸ ausmacht und die Elektrifizierung zum größten Teil (85 %) einfach durchführbar ist [26]. Auf Grundlage der Daten für → Abbildung 24 zeigt sich, dass dies für 7 Prozent der Bahnlinien der Fall sein könnte – abhängig vom Takt.

Im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030, dem Instrument der Verkehrsinfrastrukturplanung des Bundes, sind auch Elektrifizierungsmaßnahmen vorgesehen. Hier werden zum einen solche als ‚laufend und fest disponiert‘ deklarierte Projekte genannt, die bereits in der Umsetzung sind. Zum anderen gibt es ‚vordringliche und potenzielle‘ Elektrifizierungsprojekte, für die der Bedarf festgestellt ist oder die Bewertung läuft. Die von der Politik angepeilte Erhöhung des Elektrifizierungsgrades auf 70 % bis 2025 entspricht einem Ausbau um 3.300 Kilometern (ausgehend von aktuell 20.100 km). Das sind fast 600 Kilometer mehr als im BVWP 2030 vorgesehen sind.

Die Allianz pro Schiene und der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen haben im Jahr 2018 weitere wichtige Projekte außerhalb des BVWP vorgeschlagen [27] [22]. Damit ließe sich bis 2030 der Elektrifizierungsgrad sogar auf 75 % ausbauen, siehe auch → Abbildung 26.

7 Honorarordnung für Architekten und Ingenieure.: LP1–LP3 = Grundlagenermittlung, Entwurfsplanung, Kostenberechnung; LP4 = Genehmigungsplanung

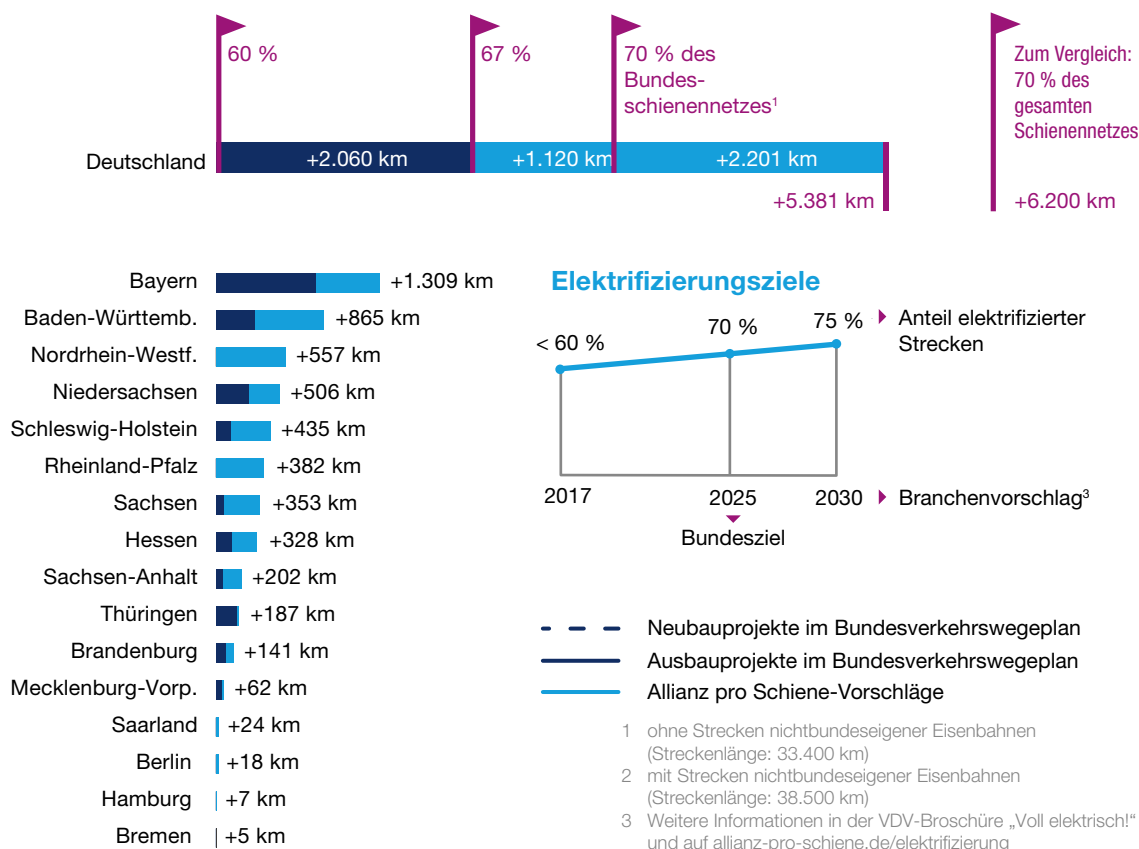
8 Betrachtet wird in dieser Untersuchung eine Standardlänge von 100 km.



Abbildung 26 Lückenschließungsvorschläge für verschiedene Bundesländer (nach [27])

70 Prozent Streckenelektrifizierung bis 2025

Vorschläge zur Zielerreichung



3.3 Teilelektrifizierung oberleitungsfreier Strecken

Solange man nur Elektro- oder Dieseltriebzüge betrachtet, kann die Alternative für eine bislang oberleitungsfreie Bahnstrecke nur ihre durchgehende Elektrifizierung sein. Eine Teilelektrifizierung wäre sinnlos. Für Batterietriebzüge hingegen werden Oberleitungen für das Aufladen der Fahrzeugakkumulatoren benötigt. Auf Strecken, die länger sind als die garantierte Mindestreichweite solcher Züge, ist die Teilelektrifizierung eine Maßnahme, die für den Aufbau der erforderlichen Ladeinfrastruktur benötigt wird.

Auch wenn diese Elektrifizierungsinseln in erster Linie geschaffen werden, um die Batteriezüge zu laden, sollte sich nach Expertenansicht deren technischer Aufbau an der normalen Oberleitungsinfrastruktur orientieren:

Ein Batterietriebzug muss während des Ladens über Pantografen auch durch die Elektrifizierungsinsel hindurchfahren können, denn eine Vorgabe, für das Laden anhalten zu müssen, wäre sehr nachteilig. Sinnvollerweise steht im Bereich der Elektrifizierungsinsel dann auch günstiger Bahnstrom zur Verfügung. Zudem sollte die Möglichkeit berücksichtigt werden, solche Inseln zu späteren Zeitpunkten mit anderen Inseln und auch mit dem Gesamtnetz zu verbinden, ohne sie vollständig umbauen zu müssen. Dafür sollte die Elektrifizierungsinsel zulassungsgerecht ausgelegt sein, so dass in ihrem Bereich zukünftig auch stärkere Elektrotriebzüge beschleunigen, also höhere Ströme ziehen dürfen.

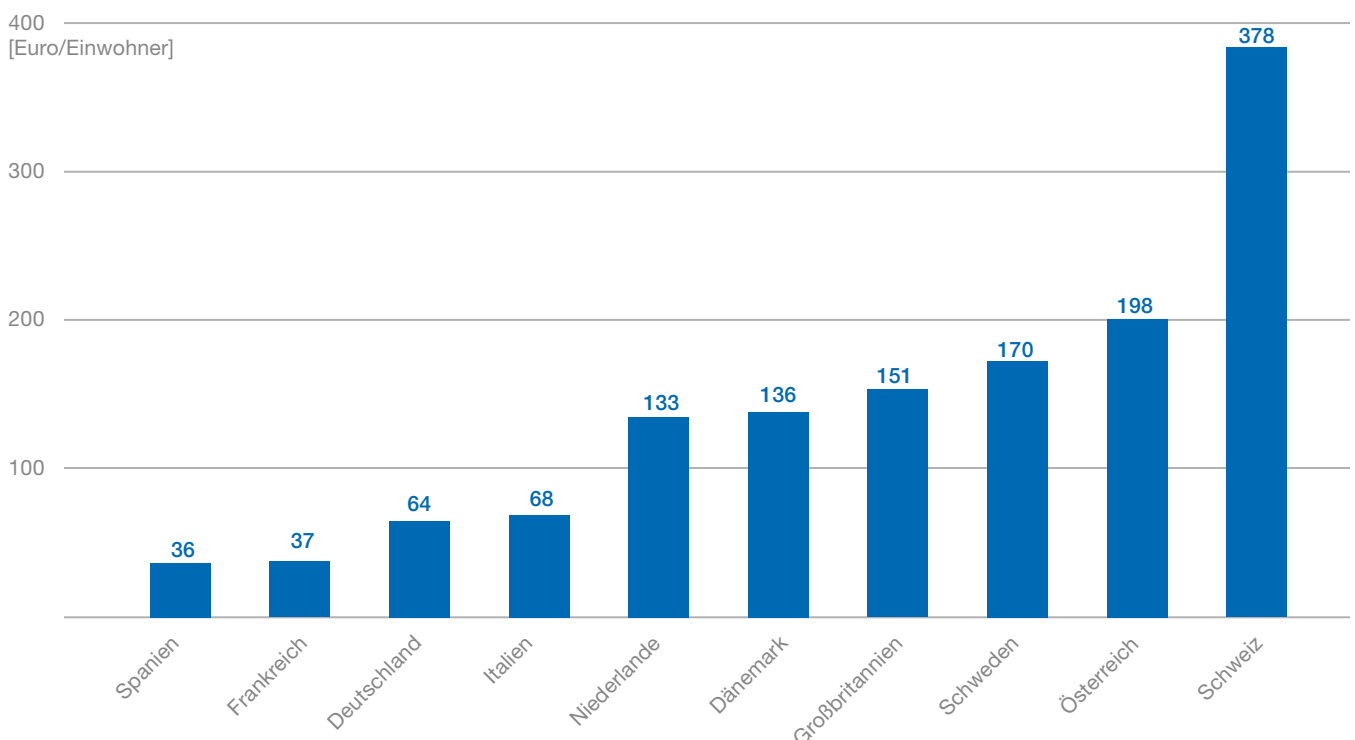
3.4 Vollelektrifizierung oberleitungsfreier Bahnlinien

Statt sich auf Teilelektrifizierungsprojekte zu beschränken, um mit Batterie-triebzügen als Übergangslösung langfristig auf eine vollständige Elektrifizierung hinzuwirken, wäre die Elektrifizierung über die gesamte Länge einer ober-leitungsfreien Bahnlinie eine alternative Option. Sie stellt im eigentlichen Sinne weder eine Lückenschließung noch eine Teilelektrifizierung dar. Aber auch hier gelten letztlich die Aussagen der Untersuchung der TU Dresden: Ist der Takt ≤ 30 Minuten kann die Vollelektrifizierung einer bislang oberleitungsfreien Bahnlinie wirtschaftlich sinnvoll sein.

3.5 Vollelektrifizierung als Vision für das gesamte Schienennetz

Die Vollelektrifizierung des gesamten deutschen Schienennetzes wäre mit Blick auf die eingeleitete Energiewende und die notwendige Verkehrswende eine volkswirtschaftlich sinnvolle Maßnahme. Die Elektrifizierungskosten betragen schätzungsweise 1 bis 2 Millionen Euro pro Kilometer, das heißt, eine Erhöhung des Elektrifizierungsgrades von heute 59 % auf zukünftig 100 % würde bis zu 30 Milliarden Euro kosten. Tatsächlich waren in Deutschland im Jahr 2016 die Ausgaben für den Schienenverkehr mit 64 Euro pro Einwohner im Vergleich zu vielen anderen europäischen Ländern relativ gering (→ siehe Abbildung 27). In der heute vollelektrifizierten Schweiz waren die Ausgaben mit 378 Euro pro Kopf fast sechs Mal so hoch. Es gäbe in Deutschland im europäischen Vergleich also noch viel Luft nach oben, die 30 Mrd. € für die Vollelektrifizierung wären zum Beispiel mit etwa 360 € pro Einwohner erreicht.

Abbildung 27 Investitionen in Schieneninfrastruktur im Jahr 2016 (nach [6])



Letztlich ist Vollelektrifizierung ein politisches Thema. Volkswirtschaftlicher Nutzen ist sicherlich gegeben, betriebswirtschaftlich sinnvoll wäre die Vollelektrifizierung wohl nicht, es sei denn, sie wird vollständig aus öffentlichen Mitteln finanziert.

Die Schweiz hat sich die Vollelektrifizierung innerhalb von 20 Jahren mittels technischer Vereinfachungen wie die Verwendung von Holzmasten und anderen Maßnahmen ermöglicht. Inzwischen ist man jedoch auch in der Schweiz an alternativen Antriebskonzepten interessiert. Auch dort gibt es weniger befahrene Strecken, die wegen ihrer alternden Oberleitungsinfrastruktur steigende Instandhaltungskosten verursachen.

4 Elektrische Antriebe statt Dieselmotoren

In den Interviews des VDE mit Akteuren im Bahnbereich war keine eindeutige Meinung zur Elektrifizierung von Bahnstrecken im SPNV festzustellen. Vieles kann dafür sprechen, kleinere Fahrleitungslücken zu schließen, oder bislang oberleitungsfreie Bahnlinien vollständig zu elektrifizieren, oder Elektrifizierunginseln zu schaffen oder sogar, langfristig das gesamte Schienennetz mit Oberleitungen zu versehen. Einige waren sich hingegen alle Teilnehmer sowohl der Interviews in 2018 als auch des Abschlussworkshops im Februar 2019: Elektromotoren sind im Vergleich zu Dieselmotoren selbst der neuesten Generation wesentlich effizienter, leichter, wartungsärmer und vor allem umweltfreundlicher. Bei der Einschätzung von Alternativen zu Dieseltriebzügen geht es letztlich nicht um die Antriebe selbst, sondern um die konzeptspezifischen Unterschiede in der Bereitstellung und Nutzung der Antriebsenergie und um die Effizienz der Erzeugung ihres Trägers. Hier spielt es dann auch eine Rolle, zu vergleichen, welche Umweltwirkungen die Erzeugung und der Verbrauch der Energie lokal und global haben. Betrachtungen wie diese sind Thema des Kapitels 5.

Im Folgenden werden die verschiedenen Triebzugkonzepte hinsichtlich der Funktion ihrer charakteristischen Technologiekomponenten, des typischen Fahrzeugaufbaus, der wichtigsten Fahrzeugeigenschaften sowie der Bereitstellung und Umsetzung der Energie in Bewegungsenergie beschrieben und verglichen.

4.1 Diesel- und Diesel-Hybrid-Triebzüge

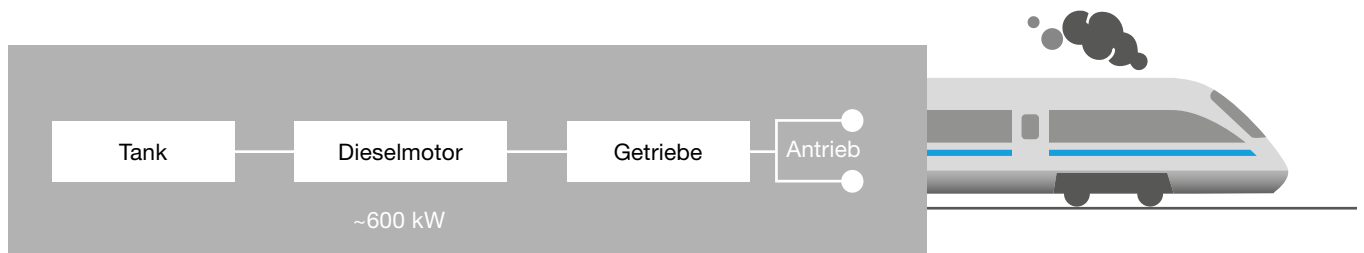
4.1.1 Dieselmechanischer Antrieb

Bei Dieseltriebzügen ist die Antriebsart meist dieselmechanisch, das heißt die Kraft des Motors wird über ein Getriebe auf die Räder übertragen. Ihre Dieselmotoren weisen Leistungsdaten großer LKW oder Busse auf. Motorenhersteller sind Unternehmen wie MAN, Iveco oder MTU.



Abbildung 28 VT 642 Dieseltriebzug mit 2 x 275 kW Leistung (Euro II) (Foto: PH)

Dieseldieselszug



Baureihe	VT 632	VT 642	VT 643	VT 648	VT 650
Typ	LINK II	Desiro Classic	Talent	LINT 41	Regio Shuttle
Hersteller	Pesa (PL)	Siemens	Bombardier	Alstom	Stadler / Adtranz
in Betrieb	?	320 Stck.	780 Stck.	429 Stck.	497 Stck.
Wagenanzahl	2	2	3	2	1
Fahrzeuflänge	43,7 m	41,2 m	48,4 m	41,8 m	25,5 m
Sitz-/Stehplätze	126 / 112	110 / 110	137 / 160	129 / 120	71 / 94
Leistung	2 × 390 kW	2 × 275 kW	2 × 315 kW	2 × 315 kW	2 × 265 kW
Leergewicht	~65 t	68,2 t	57,0 t	63,5 t	37,7 t
LKZ	12,9 kW/t	8,1 kW/t	11,1 kW/t	9,9 kW/t	12,9 kW/t
Beschleunigung	≤0,8 m/s ²	≤1,1 m/s ²	≤1,0 m/s ²	≤0,6 m/s ²	≤1,2 m/s ²
Geschwindigkeit	120–140 km/h	120 km/h	100–140 km/h	120–140 km/h	120 km/h
Tankgröße		2 × 600 l		2 × 800 l	2 × 770 l
Reichweite		800–1.500 km			
Abgasnorm	Euro IIIB	Euro II	Euro II	Euro IIIB	Euro II
Dieselmotor	MTU	MAN/MTU			Iveco/MAN

Der Siemens-Triebzug Desiro Classic beispielsweise (→ Tabelle 3), der bei der Deutschen Bahn seit dem Jahr 2000 als Baureihe VT 642 im Einsatz ist, wird von zwei 6-Zylinder-Dieselmotoren mit Abgasturboaufladung und Ladeluftkühlung angetrieben, die bei 1.900 Umdrehungen jeweils 275 kW leisten [28]. Die auf das Leergewicht von 68,2 Tonnen bezogene Leistungskennziffer (LKZ) dieses Dieselfahrzeugs beträgt 8,1 kW/t und erlaubt eine Beschleunigung von bis zu 1,1 m/s². Das verwendete Getriebe ist eine 5-Gang-Automatik.

Fünf Beispiele für Dieseldieselszüge im Markt sind in → Tabelle 3 aufgeführt.

Wie im Falle von PKW, Bussen und LKW müssen auch Dieseldieselszüge Abgasnormen einhalten. Ihre vergleichsweise sehr lange Betriebslebensdauer von 25 bis 30 Jahren macht die Einhaltung der sich in wesentlich kürzeren Zyklen verschärfenden Abgasvorschriften grundsätzlich schwierig. Für neue Diesel-PKW gilt heute die Euronorm 6, → siehe Abbildung 29.

Tabelle 3 **Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Dieseldieselszügen**

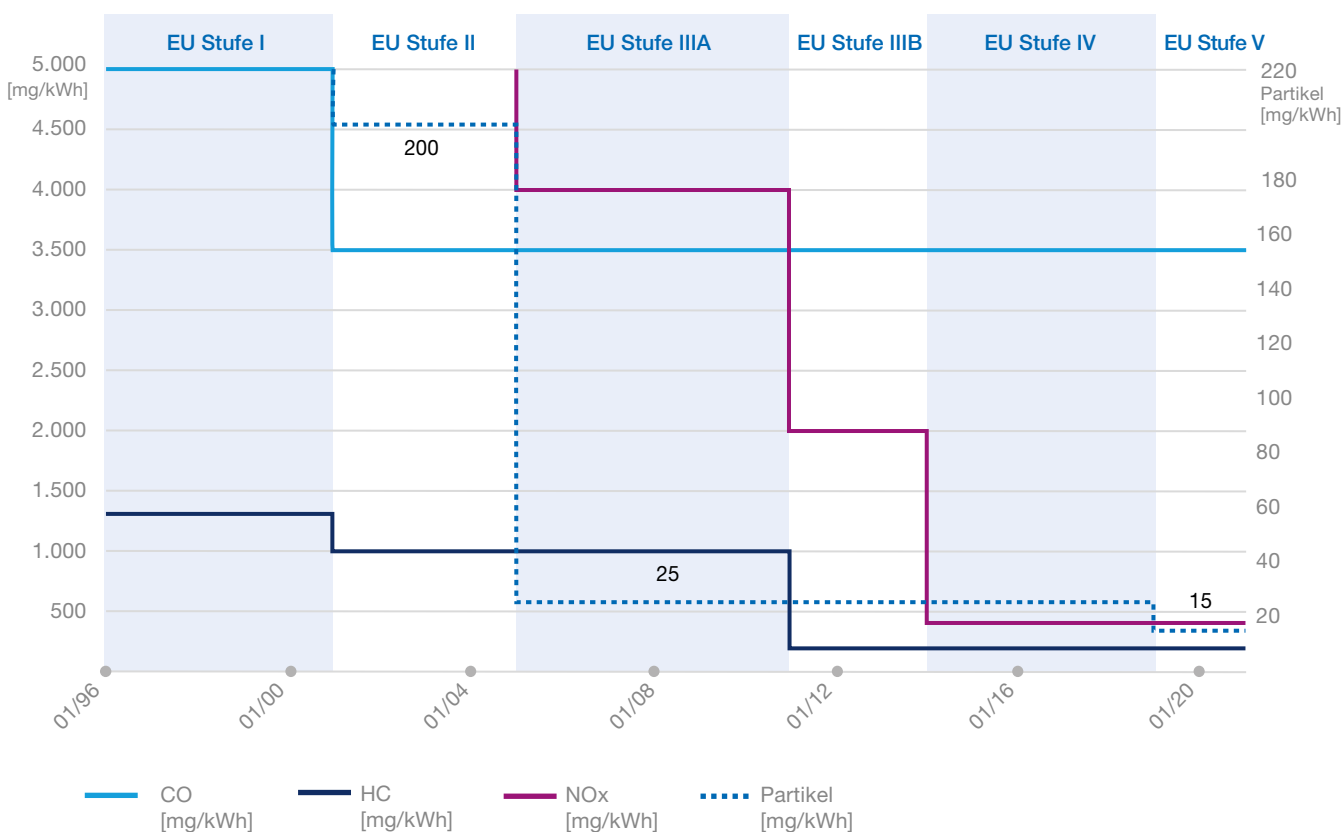
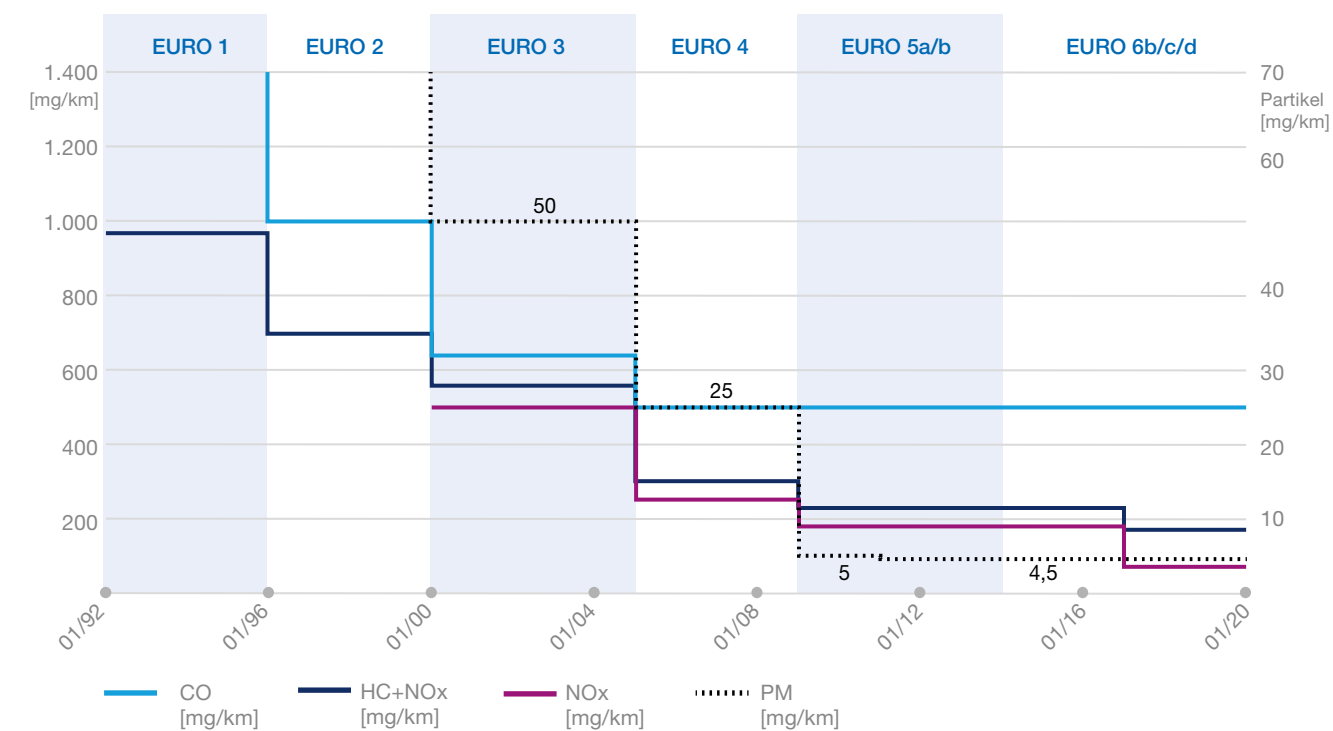


Abbildung 29 (oben) Entwicklung der Grenzwerte für Diesel-PKW (Typgenehmigung)

Abbildung 30 (unten) Entwicklung der Grenzwerte für Dieseltreibzüge (Motorenklasse RLR)

Bei PKW sind die Abgasgrenzwerte fahrstreckenbezogen, daher in mg/km gemessen. Bei Dieseltriebzügen werden sie wie bei LKW und Bussen auf die geleistete Arbeit des Motors bezogen, das heißt in mg/kWh angegeben. → Abbildung 30 gibt einen Überblick zur Entwicklung der Abgasgrenzwerte für Dieseltriebzügen bis heute. Der Triebzug Desiro Classic beispielsweise erfüllt die Euro-Stufe II.

Dieseltriebzüge der neueren Generation erfüllen die Anforderungen nach Euro IIIB. Hier muss ein Rußpartikelgrenzwert von 25 mg/kWh eingehalten werden. Die NO_x-Emission darf maximal 2000 mg/kWh betragen. Eine Nachrüstung beispielsweise des Regio Shuttle RS1, um die neueren Abgaswerte einzuhalten, ist nach Expertenansicht nicht möglich.

Diesel-elektrischer Triebzug

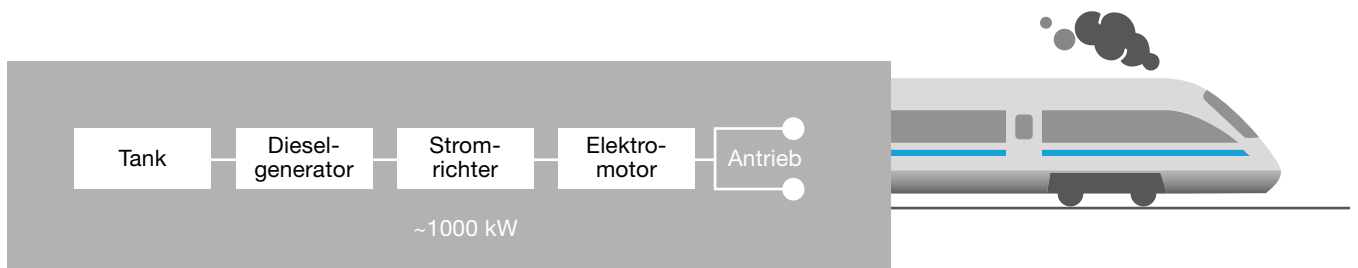


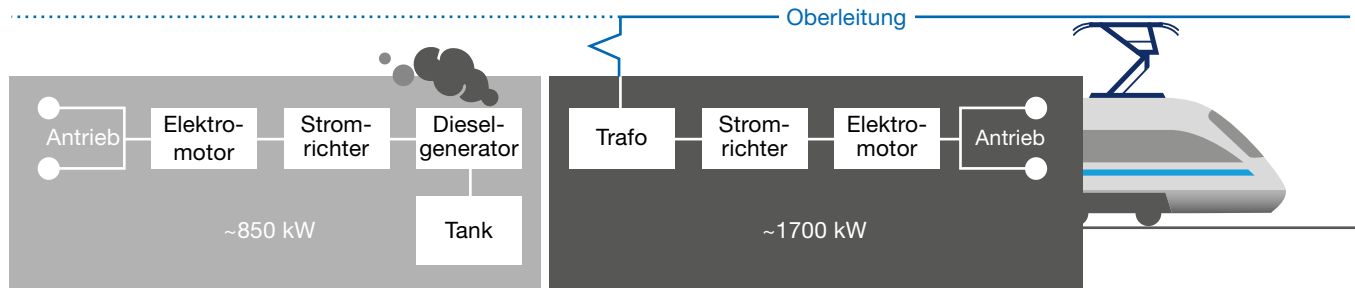
Abbildung 31 **Aufbau diesel-elektrischer Triebzüge**

4.1.2 Deselelektrischer Antrieb

Wie alle Verbrennungsmotoren haben auch Dieselmotoren die Eigenschaft, ihren höchsten Wirkungsgrad in einem engen Drehzahlbereich zu entfalten. Insbesondere um unter Last anfahren zu können, wird ein Getriebe mit mechanischer Kupplung benötigt. Bei höheren Lastanforderungen, wie im Falle schwerer Lokomotiven, ist es üblich, einen Dieselmotor als Generator zu verwenden, der im Fahrzeug den Strom für die Elektromotoren erzeugt, die das Fahrzeug antreiben. In dieser Anordnung lässt sich der Dieselmotor stets im optimalen Bereich und damit Diesel-sparsamer betreiben. (→ Abbildung 31)

Bombardier bietet den Dieseltriebzug Talent auch als dieselelektrische Variante mit deutlich höherer Leistung an. Der Diesel-GTW von Stadler war von vornherein dieselelektrisch und wird seit 2018 nicht mehr gebaut. Tatsächlich finden sich im Markt insbesondere aus Kostengründen nur wenige Triebzugmodelle mit dieselelektrischem Antrieb.

Dual-Mode Triebzug



Dieselhybrid Triebzug

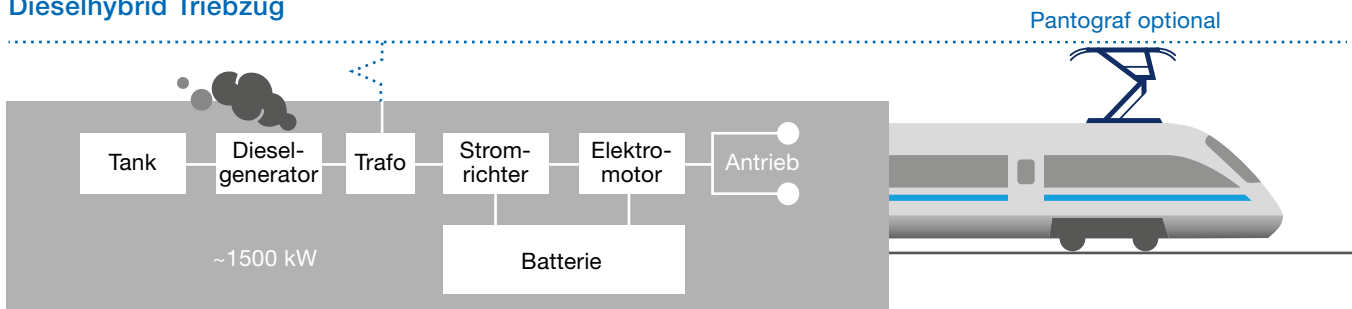


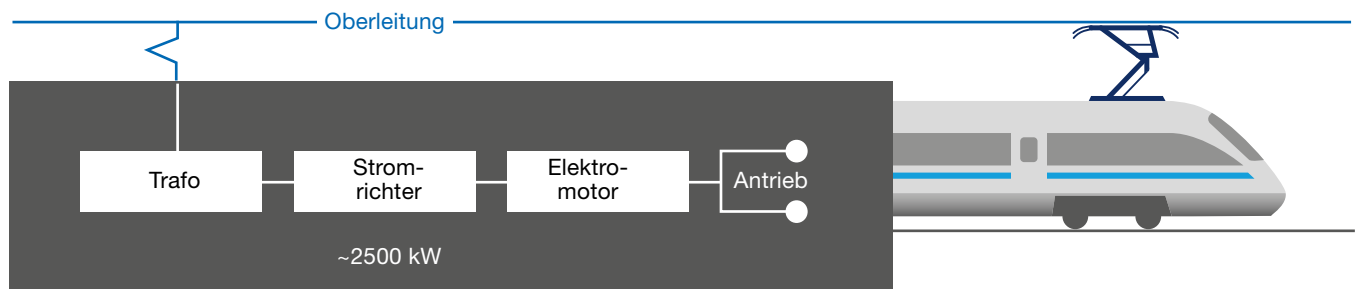
Abbildung 32 **Aufbau von Dual-Mode- und Dieselhybrid-Triebzügen**

4.1.3 Dieselhybrid-Antrieb

Der Coradia Polyvalent von Alstom, der FLIRT bimodal von Stadler und eine Variante des AGC (Autorail à Grande Capacité) von Bombardier sind Beispiele für Triebzüge mit Zweikraft-Antrieb, auch als Dual-Mode bezeichnet. Auf oberleitungsfreien Strecken wird die Leistung dieselektrisch bereitgestellt, das heißt, ein Dieselgenerator erzeugt den Strom für die antreibenden Elektromotoren. Sobald Oberleitungen vorhanden sind, kann das Fahrzeug in den reinen Elektrotriebzug-Modus wechseln. (→ Abbildung 32)

Hybrid wird ein solches Konzept, wenn wie im Fall des EcoTrain zusätzlich ein hinreichend groß dimensionierter Lithium-Ionen-Akkumulator vorgesehen wird, der mit der rückgespeicherten Bremsenergie den Dieselgenerator entlastet und an Haltestationen ohne Fahrdraht erlaubt, den Dieselmotor sogar vorübergehend abzuschalten.

Elektrotriebzug



Baureihe	ET 442	ET 429	ET 430	ET 460	ET 440
Typ	Talent 2	FLIRT 3	(S-Bahn)	Desiro ML	Coradia Continental
Hersteller	Bombardier	Stadler	Alstom/Bomb.	Siemens	Alstom
in Betrieb	400 Stck.	1.694 Stck. ¹	188 Stck.	786 Stck.	218 Stck.
Wagenanzahl	4	4	4	3	4
Fahrzeuglänge	72,7 m	74,7 m	68,3 m	75,2 m	73,3 m
Sitz-/Stehplätze	225 /	219 /	184 / 296	259 /	240 / 186
Leistung	3.030 kW	2.720 kW	2.350 kW	2.600 kW	2.880 kW
Leergewicht	150 t	120 t	119 t	120 t	140 t
LKZ	20,2 kW/t	22,7 kW/t	19,7 kW/t	21,7 kW/t	20,6 kW/t
Beschleunigung	≤ 1,2 m/s ²	≤ 1,2 m/s ²	≤ 1,2 m/s ²	≤ 1,2 m/s ²	≤ 1,2 m/s ²
Geschwindigkeit	160 km/h	120–200 km/h	140 km/h	160 km/h	160 km/h

1 International

Tabelle 4 **Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Elektrotriebzügen**

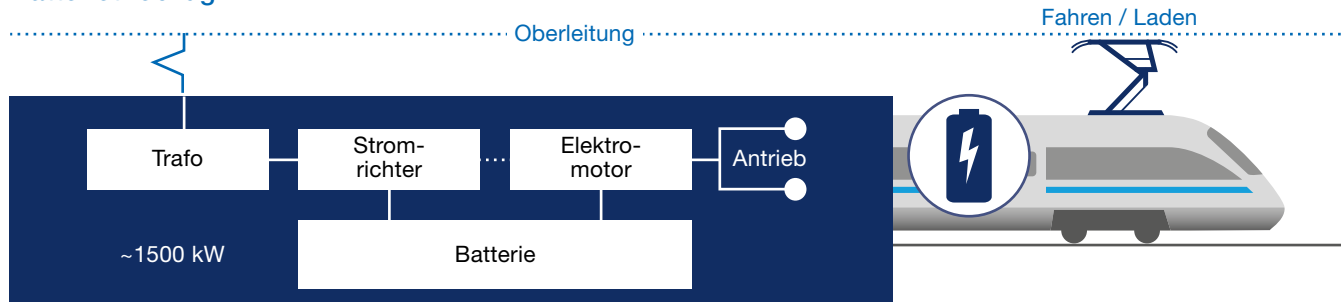
4.2 Oberleitungs-Elektrotriebzüge

Elektrotriebzüge beziehen ihre Antriebsenergie über einen Fahrdrabt, der in den meisten Fällen als Oberleitung ausgeführt ist. Hier liegt elektrische Energie in Form einer einphasig mit 16,7 Hertz pulsierenden Wechselspannung mit 15 kV vor.

Der als Pantograf bezeichnete Stromabnehmerbügel verbindet die Oberleitung mit dem elektrischen System des Fahrzeugs. Die Schiene dient in der Regel als Rückleiter für den Stromkreis. Ein Transformator setzt die 15 kV-Spannung auf das erforderliche niedrigere Spannungsniveau. Die Elektromotoren benötigen 3-Phasen-Drehstrom, der von einer als Stromrichter bezeichneten Kombination aus Gleichrichter und Pulsrichter erzeugt wird. Auch konventionelle Elektrotriebzüge speisen ihre Bremsenergie über die Oberleitung bereits heute wieder ins Netz ein.

Fünf Beispiele für Elektrotriebzüge im Markt sind in → Tabelle 4 aufgeführt.

Batterietriebzug



Typ	Talent 3 BEMU	Mireo Plus B	FLIRT 3 AKKU
Hersteller	Bombardier	Siemens Mobility	Stadler
Wagenanzahl	3	2–3	3
Fahrzeu glänge	56,2 m	47 bzw. 63 m	58,6 m
Leistung	1.520 kW	1.700 kW	~1.500 kW
Reichweite	40–60 km	80–100 km	80 km
Beschleunigung	$\leq 1,0 \text{ m/s}^2$	$\leq 1,1 \text{ m/s}^2$	$\leq 1,0 \text{ m/s}^2$
Geschwindigkeit	140 km/h	160 km/h	140 km/h

Tabelle 5 **Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Batterietriebzügen**

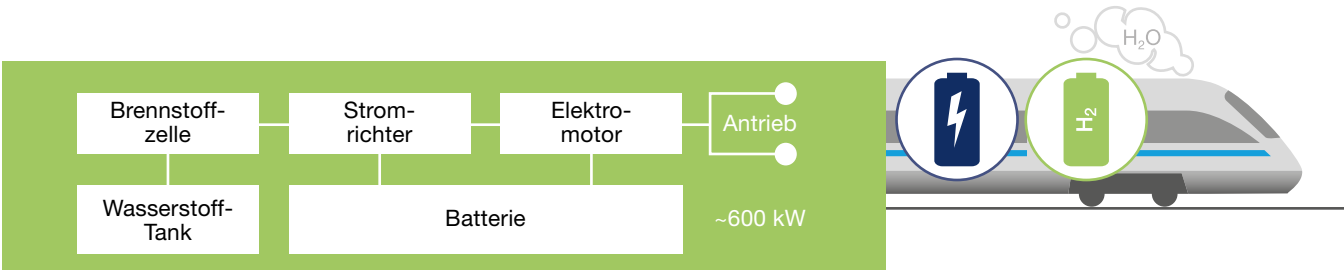
4.3 Batterie-Oberleitungs-Hybridtriebzüge

Batterietriebzüge, wie sie von den Herstellern Bombardier, Siemens Mobility oder Stadler angeboten werden, haben den Aufbau von Elektrotriebzügen, deren Antrieb um eine große Lithium-Ionen-Batterie erweitert wurde. Diese Batterie macht solche Fahrzeuge zu Hybriden und erlaubt ihnen, auch solche Strecken zu fahren, die nicht durchgängig elektrifiziert sind, vorausgesetzt die Batterie ist für die Lücken hinreichend groß dimensioniert.

Das Laden der Batterie erfolgt über den Pantografen des Zuges, der den Kontakt zum Fahrdrabt herstellt, beispielsweise im Stand an elektrifizierten Bahnhöfen oder während der Fahrt auf Teilstrecken mit Oberleitung. Solange der Batterietriebzug unter dem Fahrdrabt fährt, kann die bezogene Energie sowohl zum Nachladen der Batterie als auch direkt für den Antrieb im Elektrotriebzug-Modus verwendet werden. Die beim Bremsen rekuperierte Energie kann in der Batterie gespeichert werden oder wie bei normalen Elektrotriebzügen in das Oberleitungsnetz zurückgespeist werden.

Drei Modellbeispiele für Batterietriebzüge sind in → Tabelle 5 dargestellt.

H2-BZ-Triebzug



Typ	Coradia iLINT	Mireo Plus H	Schmalspur ¹ H ₂ -BZ-Triebzug
Hersteller	Alstom	Siemens Mobility	Stadler Rail
Wagenanzahl	2	2–3	4
Fahrzeuglänge	54,3 m	47 bzw. 63 m	76 m
Leistung	544 kW	1.700 kW	1.400 kW
Reichweite	600–1.000 km	600–1.000 km	ca. 600 km
Beschleunigung	≤ 1,0 m/s ²	≤ 1,1 m/s ²	≤ 1,0 m/s ²
Geschwindigkeit	140 km/h	160 km/h	80 km/h

¹ Daten stellen kundenspezifische Anforderung dar

Tabelle 6 **Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Brennstoffzellen-Triebzüge**

4.4 Wasserstoff-Batterie-Hybridtriebzüge

Während die von den Herstellern vorgestellten neuen Batterietriebzüge letztlich Hybridisierungen bestehender Elektrotriebzüge darstellen, ist der Brennstoffzellenzug in seinem Aufbau einem dieselelektrischen Hybriden mit Batterie ähnlich. An die Stelle des Dieselmotors tritt hier ein Brennstoffzellen-Stack, welcher den in Drucktanks gespeicherten gasförmigen Wasserstoff in kontrollierter chemischer Reaktion mit Luftsauerstoff in Wasserdampf umwandelt und die frei werdende Energie als elektrischen Strom bereitstellt. Diese Energie wird für den Antrieb der Elektromotoren verwendet. Um die im Fahrbetrieb für das Beschleunigen benötigten Leistungsspitzen abzudecken, wird zusätzlich eine Lithium-Ionen-Batterie für die Dynamik eingesetzt. Diese Batterie dient wie bei Batterietriebzügen auch der Zwischenspeicherung von Bremsenergie.

Drei Modellbeispiele für Brennstoffzellenzüge sind in → Tabelle 6 dargestellt.

5 Nutzwertanalyse für den Vergleich der Alternativen

Für jede der in den vorangegangenen Kapiteln betrachteten Alternativen zum Einsatz von Dieseltriebzügen im SPNV lassen sich Vor- und Nachteile nennen. Die Kriterien, welche einer solchen Beurteilung zugrunde liegen, hängen letztlich von der Erwartungshaltung des Betrachters oder von der Perspektive der Interessengruppe ab, die er vertritt. → Abbildung 33

So sind für den Aufgabenträger übergeordnete Aspekte wie die Energieeffizienz, die Vereinbarkeit mit den Zielen der Energiewende, die notwendige Sektorkopplung, die Vermeidung lokaler Emissionen, der Klimaschutz oder der geplante Infrastrukturausbau relevante Kriterien, welche die Rechtfertigung einer Alternative begründen. Welches Gewicht er dem einen oder anderen Kriterium gibt, hängt dabei auch von den persönlichen Erfahrungen und seiner Grundeinstellung ab.

Ein Eisenbahnverkehrsunternehmen wird die Relevanz der vom Aufgabenträger genannten Kriterien als „nice-to-have“ nachvollziehen können, jedoch sind für EVU letztlich Kriterien wie die Verfügbarkeit und Sicherheit der Fahrzeuge, vor allem aber die Wirtschaftlichkeit über den Nutzungszeitraum ausschlaggebend, insbesondere wenn es um Alternativen zu ihren Dieseltriebzügen geht. Umgekehrt sind letztere Kriterien aus Sicht des Aufgabenträgers gerade diejenigen, welche die Grundlage der Bewertung der Performance eines EVU darstellen.

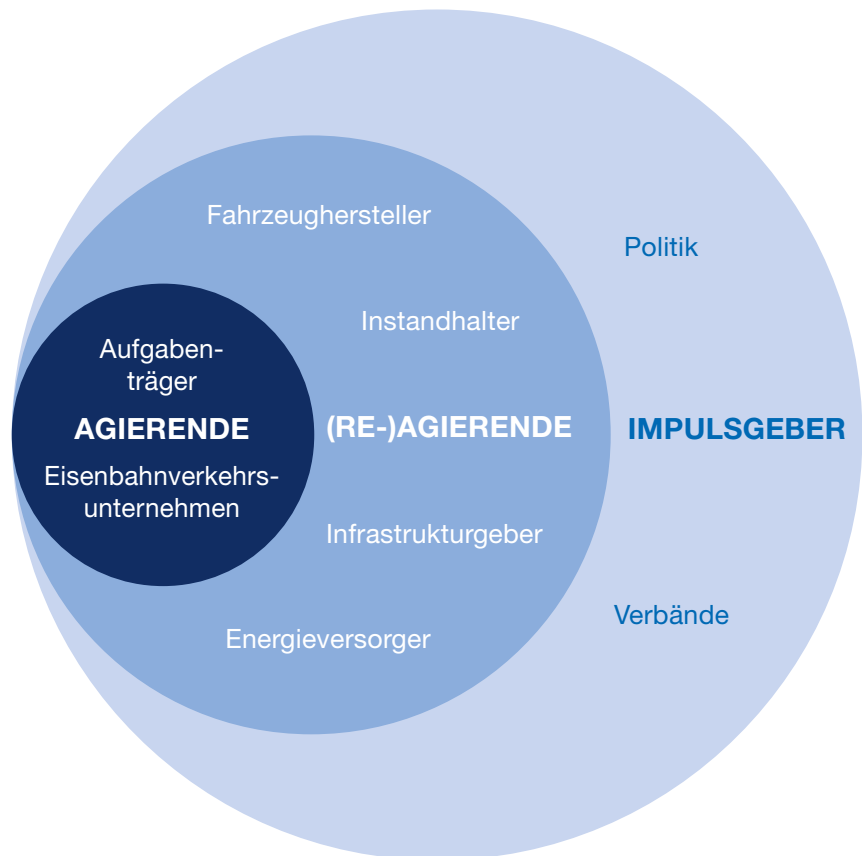


Abbildung 33 Akteure und Rollen im Entscheidungsprozess

Der Bereich DB Netze der Deutschen Bahn AG, der für die Bewirtschaftung und Instandhaltung der Bahntrassen, Oberleitungen und Bahnhöfe, sowie für die Bereitstellung von Bahnstrom oder Diesel zuständig ist, hat wiederum andere Kriterien. Diese umfassen insbesondere die Finanzierbarkeit von Infrastrukturanpassungen, die Verfügbarkeit notwendiger Bau- und Installationskapazitäten oder die Möglichkeit, Trassen- oder Stationspreise anzupassen, die für sie im Hinblick auf mögliche Alternativen entscheidend sind.

Fahrzeughersteller oder Instandhaltungswerkstätten werden dazu tendieren, den genannten Kriterien aufgrund ihrer branchenspezifischen Perspektiven ganz andere Gewichte zu geben.

Kurzfristig und ‚aus dem Bauch heraus‘ eine verbindliche Entscheidung für eine Alternative zu treffen, ist angesichts der zu erwartenden langfristigen Auswirkungen und hohen Kosten kaum zu rechtfertigen. Entsprechend schwer fällt es gegenwärtig vielen Entscheidungsträgern: Sie versuchen, verschiedene Fahrzeugkonzepte projektmäßig im regulären Betrieb zu testen, in der Hoffnung, sich von deren Tauglichkeit und Wirtschaftlichkeit überzeugen und notfalls einen Rückzieher machen zu können. Dabei beobachtet man, was „die anderen“ so machen.

So kann man in der Praxis vorgehen. Statt die Entscheidungen intuitiv zu treffen, besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, sich für die Lösung des Entscheidungsproblems eines in der Praxis seit Jahren bewährten Verfahrens zu bedienen, das in der Entscheidungstheorie als Nutzwertanalyse [29] beschrieben wird.

In den folgenden Abschnitten werden nach einer kurzen Beschreibung der Methodik und des gewählten Untersuchungsrahmens eine Reihe von Kriterien vorgestellt, die geeignet sind, um die Potenziale der in Frage kommenden Alternativen einzuschätzen und eine neutrale objektive Bewertung für ihren möglichen Einsatz im Zeithorizont 2025 und darüber hinaus zu erlangen. Die hier berücksichtigten Kriterien sind noch grundsätzlicher Natur, und die Analyse mündet entsprechend in einer konzeptionellen Einschätzung. Tatsächlich suchen Aufgabenträger und EVU für existierende Diesellinien geeignete Alternativen, die sich im Hinblick auf die entsprechenden Streckenprofile, Fahrpläne, Fahrgastzahlen, Elektrifizierungspläne etc. am besten eignen. Aspekte dieser Art sollen im nächsten Teilprojekt (voraussichtlich im Herbst 2019) berücksichtigt werden, in dem Entscheider Daten zu Diesellinien bereitstellen, um spezifische Nutzwertanalysen durchführen zu lassen. Die Resultate werden sachlich begründete Empfehlungen für linienspezifische Alternativen sein.

5.1 Methodik und Untersuchungsrahmen

Wie eingangs angedeutet, erweist sich die Suche nach einer geeigneten Alternative zu Dieseltriebzügen als mehrdimensionales Entscheidungsproblem. Die Nutzwertanalyse bietet eine Möglichkeit, durch Fragmentierung des Problems in einfacher einzuschätzende Teilprobleme nach Anwendung einfacher Arithmetik schnell zu einer verwertbaren Lösung zu kommen. Das Prinzip ist in → Abbildung 34 veranschaulicht.

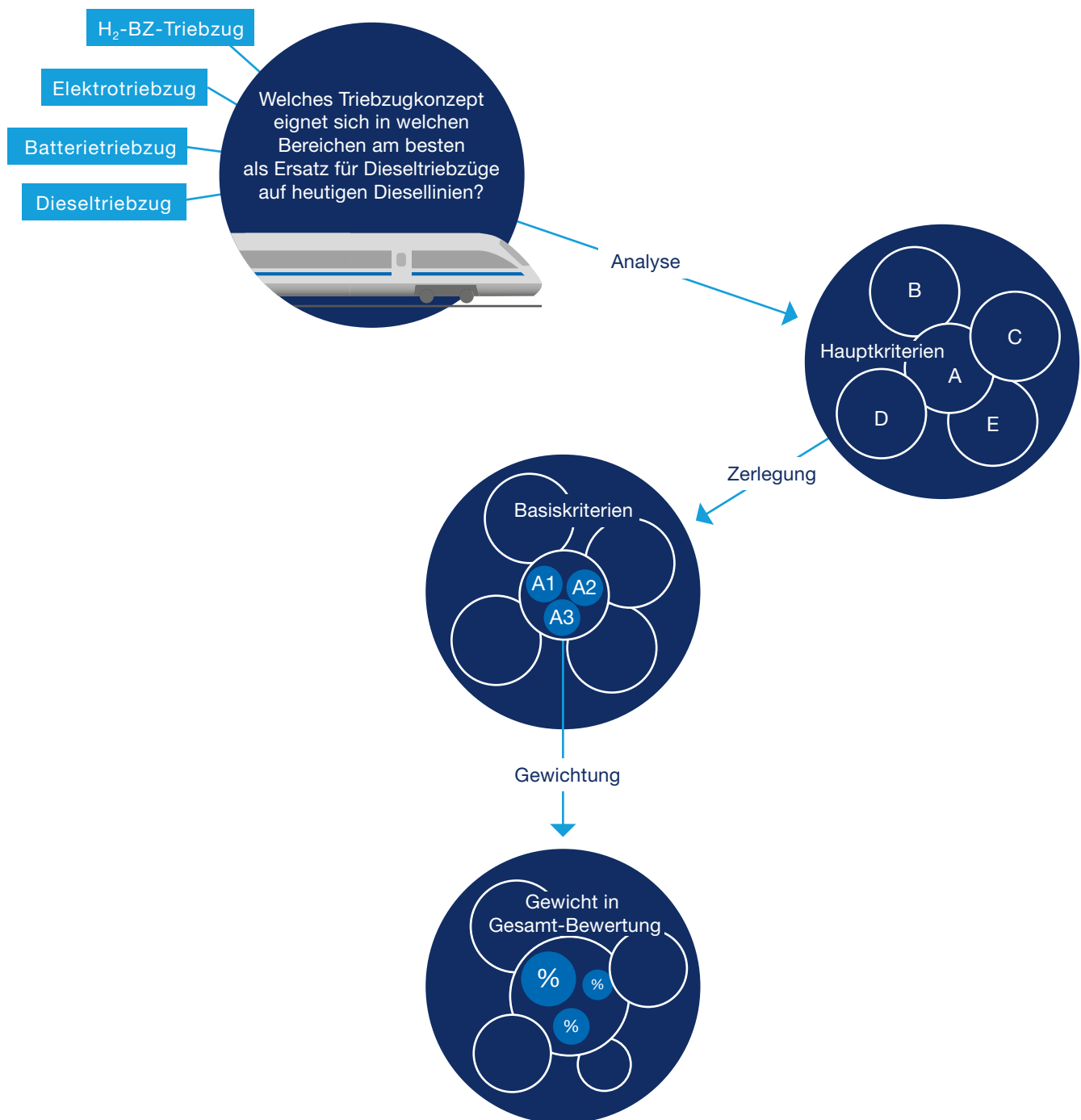


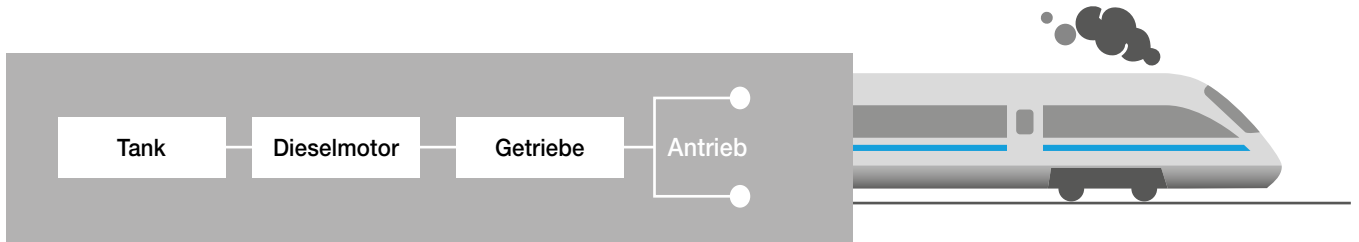
Abbildung 34 **Prinzip der Vorbereitung einer Nutzwertanalyse**

Der Untersuchungsrahmen zur durchgeführten Nutzwertanalyse umfasst neben dem Konzept Dieselmechanischer Triebzug (DM) die folgenden Alternativen:

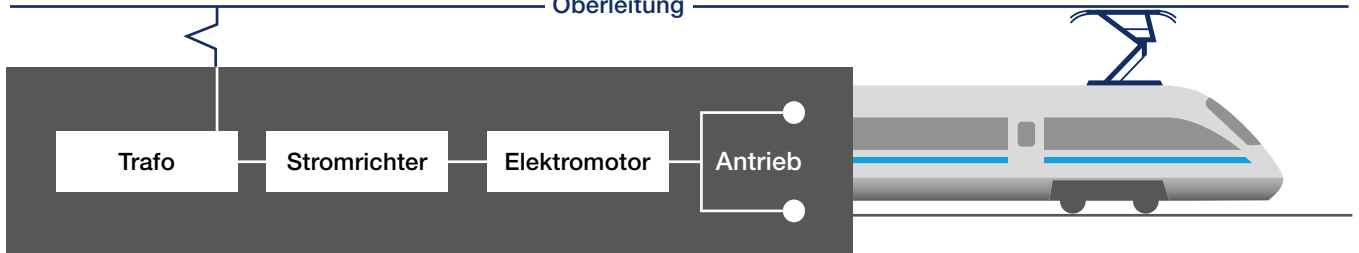
- Elektrifizierung, um konventionelle Oberleitungs-Triebzüge (OL) einsetzen zu können,
- Batterie-Oberleitungs-Hybrid-Triebzug (BOH),
- Wasserstoff-Batterie-Hybrid-Triebzug (WBH).

Dieselvarianten wie solche mit dieselektrischem Antrieb oder hybriden Erweiterungen mittels Pantograf oder Batterie werden hier nicht betrachtet, da sie zwar energieeffizienter und lokal emissionsärmer als Dieseltriebzüge sind, jedoch nur im Falle der Verwendung synthetischer Kraftstoffe klimaneutral sein können.

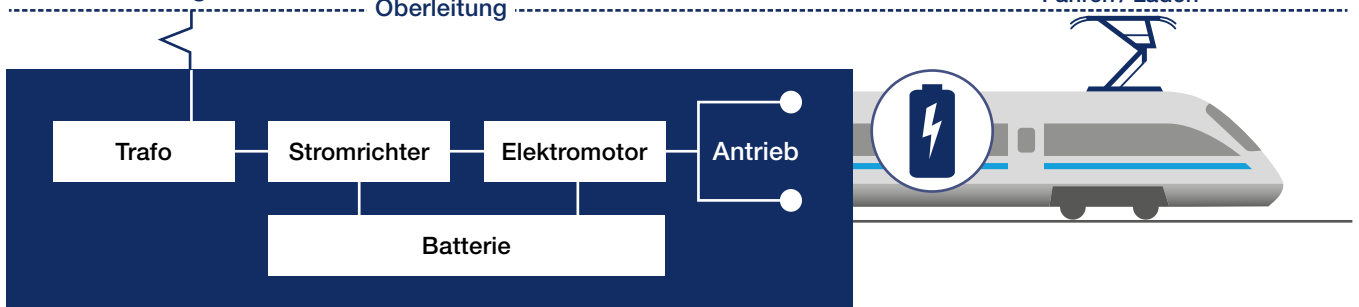
Dieseltriebzug DMU



Elektrotriebzug EMU



Batterietriebzug BEMU



Wasserstoff-Brennstoffzellen-Triebzug HEMU

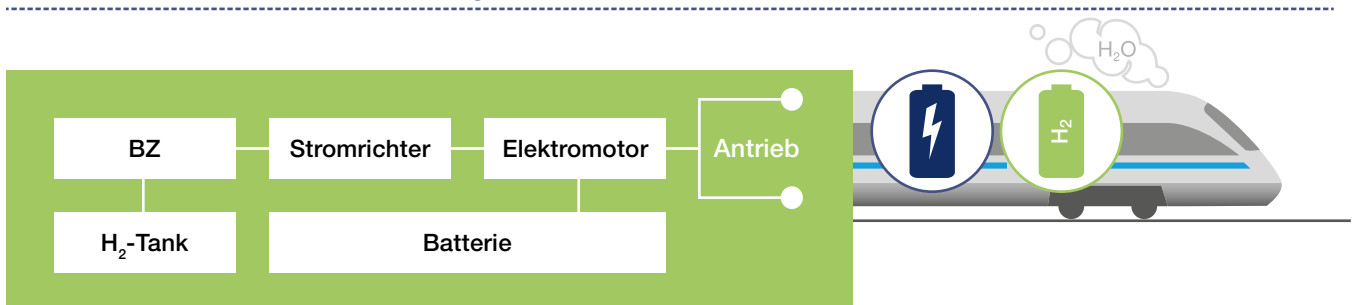


Abbildung 35 In der Nutzwertanalyse betrachtete Modelltypen

Die grundsätzliche Eignung als Ersatz für Dieseltriebzüge wird für alle drei Alternativen implizit vorausgesetzt. Aus Sicht der Autoren sind für deren Bewertung folgende Aspekte maßgeblich:

1. Betriebsfreundlichkeit,
2. Wirtschaftlichkeit,
3. Umweltverträglichkeit,
4. Systemdienlichkeit,
5. Ressourcen-Verfügbarkeit,
6. Infrastrukturfreundlichkeit.

Die vier Modelltypen in → Abbildung 35 erfüllen diese Kriterien aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften und Anforderungen zu unterschiedlichen Graden. Die sechs Hauptkriterien sind jedes für sich vielschichtig-komplex, und es empfiehlt sich, sie in einfacher handzuhabende Unterkriterien herunter zu brechen, wie in → Abbildung 34 veranschaulicht wurde. In der Praxis erweist es sich als zweckmäßig, die Hauptkriterien zweistufig in Unterkriterien zu fragmentieren, also sie in Kriteriengruppen („Mittelkriterien“) aufzugliedern, die jeweils in eine Reihe von Basiskriterien heruntergebrochen werden. Nicht jedes Unterkriterium ist gleich wichtig, beeinflusst also nicht gleichermaßen den Erfüllungsgrad des übergeordneten Kriteriums. Diese Unterschiede werden in Form individueller Gewichtungen berücksichtigt.

5.2 Erfassung der Bewertungskriterien

Im Folgenden werden alle Kriterien so präzise wie möglich definiert und eingehend erläutert. Ihre Eindeutigkeit ist essentiell für die korrekte Einschätzung des Potenzials der jeweils betrachteten Alternative. Die gewählten Bezeichnungen mögen zum Teil etwas umständlich formuliert wirken. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass für die Bewertung Punkte zwischen 0 und 10 vergeben werden, und der Wert 0 für **sehr schlecht** und 10 für **sehr gut** steht.

Wichtiger Hinweis: Dieseltriebzüge werden mit einer typischen Lebensdauer von 25 Jahren betrieben. Da der Schienenverkehr bis 2050 vollständig dekarbonisiert sein soll, ist es nach 2025 nicht mehr sinnvoll, neue Dieseltriebzüge zu kaufen. Für einen fairen Vergleich der verschiedenen Antriebsalternativen wird daher im Folgenden angenommen, dass im Jahr 2025 die spezifischen Technologien ihre notwendige Reife erreicht haben, die Fahrzeuge verfügbar sind und die erforderlichen Energieträger in der benötigten Menge bereitgestellt werden können. Daher wird 2025 als Bezugsjahr für die Bewertung verwendet.

5.2.1 Betriebsfreundlichkeit in 2025

Die Betriebsfreundlichkeit bezeichnet die Eignung des Triebzugkonzeptes für den täglichen Einsatz im SPNV. Für das EVU ist Betriebsfreundlichkeit essentiell, um den Verkehrsvertrag mit dem Aufgabenträger zu erfüllen und den zuverlässigen Betrieb der Bahnlinie zu gewährleisten. → Abbildung 36

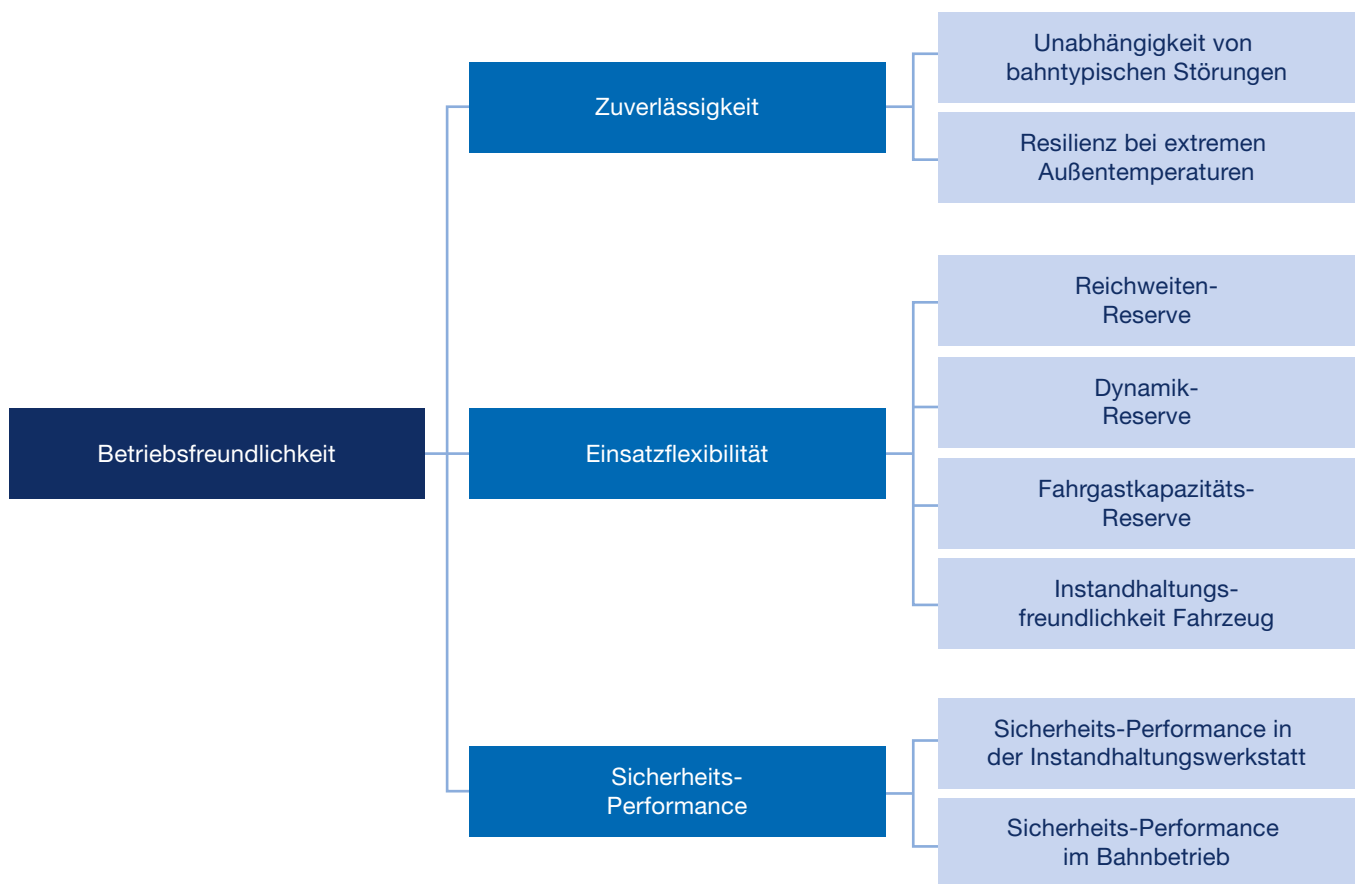


Abbildung 36 **Betriebsfreundlichkeit** und zugehörige Unterkriterien, nach [4]

Der Betriebsfreundlichkeit lassen sich insgesamt acht Basiskriterien zuordnen, die über drei „Mittel“-Kriterien verdichtet werden. Letztere sind die Zuverlässigkeit, die Einsatzflexibilität und die Sicherheits-Performance, die sich wie folgt beschreiben lassen.

Zuverlässigkeit

Das Kriterium Zuverlässigkeit beschreibt den Grad der Unempfindlichkeit des Triebzugkonzeptes gegenüber äußeren Einflüssen, die zu Verspätungen oder betrieblichen Einschränkungen führen können. Eine Analyse der Ursachen realer Verspätungen im Zugbetrieb aus dem Jahr 2012 [30] zeigt, dass technische Störungen am Zug mit 11,5 % relativ häufig, Störungen der Oberleitung mit 1,1 % seltener sind (→ Abbildung 37). Beide Störungstypen haben Verspätungen von im Mittel einer viertel Stunde zur Folge. Bei Zügen mit ausgereifter Antriebstechnik ist davon auszugehen, dass technische Störungen meist von der Antriebsart unabhängig sind. Im Falle einer Oberleitungsstörung hingegen, sind Triebzüge, die ohne Fahrdracht auskommen, im Vorteil.

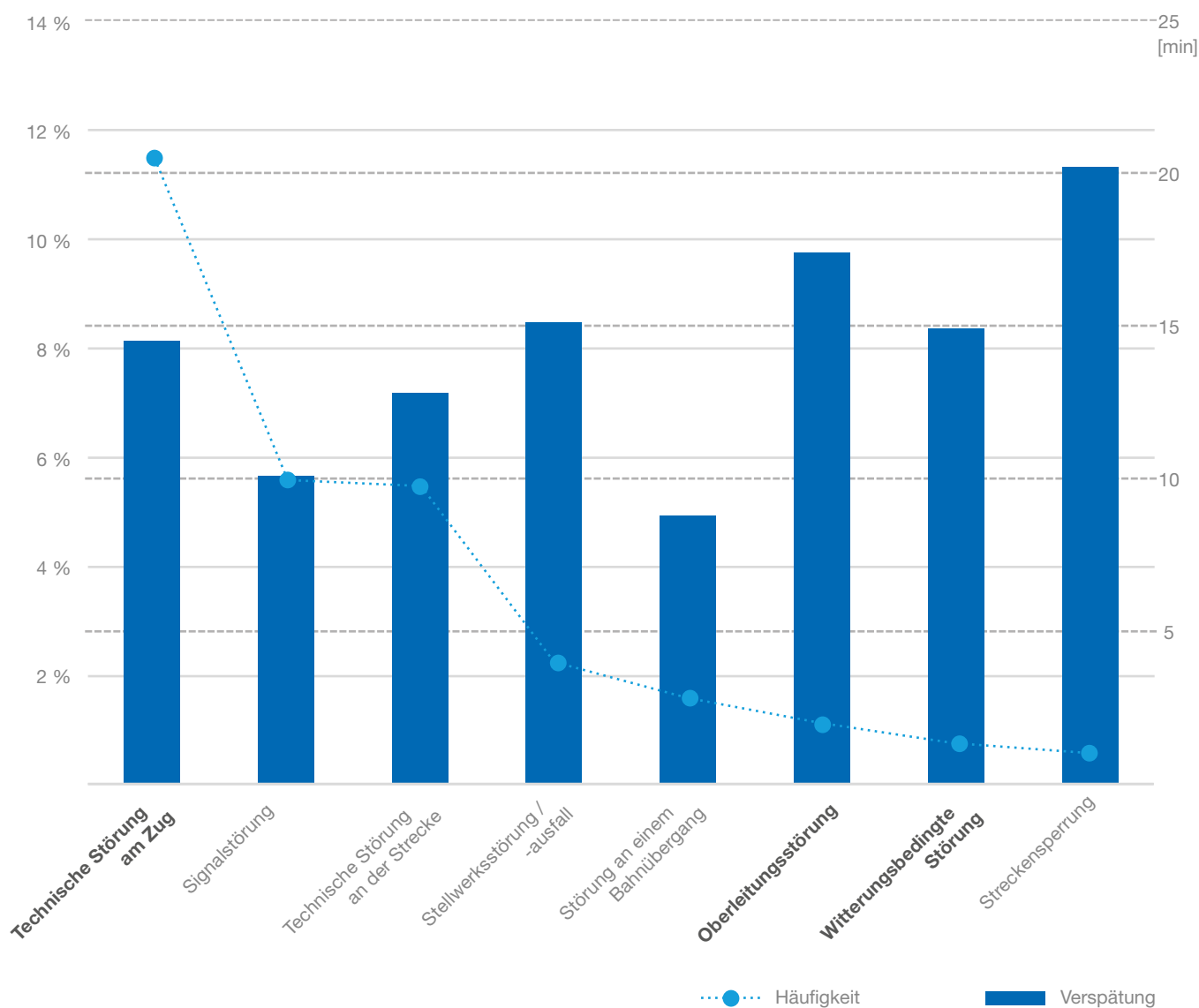


Abbildung 37 **Störungen, die größere Verspätungen im Bahnbetrieb zur Folge hatten, nach [30]**

Witterungsbedingte Störungen sind mit unter 1 % relativ selten. Ihre Verspätungswirkung ist mit im Mittel 15 Minuten jedoch signifikant. Der größte jahreszeitlich bedingte Witterungseinfluss ist die Außentemperatur: im Winter kann es sehr kalt, im Sommer sehr heiß sein. Eine auf extreme Außentemperaturen empfindlich reagierende Antriebstechnik ist nachteilig. Erhöhter Energieverbrauch, der die Reichweite beeinträchtigt, ist ein anderer wesentlicher Nachteil.

Basiskriterien für die Zuverlässigkeit

- Unabhängigkeit von bahntypischen Störungen
- Resilienz bei extremen Außentemperaturen

Einsatzflexibilität

Das Kriterium Einsatzflexibilität beschreibt, in welchem Maße das Triebzugkonzept bei sich ändernden Anforderungen für den Betrieb einer Bahnlinie einsetzbar bleibt, beispielsweise wenn Umleitungen zu fahren, Verspätungen zu kompensieren oder erhöhtes Fahrgastaufkommen zu bewältigen ist. Schnelle Wiedereinsetzbarkeit nach Wartung oder Reparatur zählt ebenso dazu.

Basiskriterien für die Einsatzflexibilität

- Reichweiten-Reserve
- Dynamik-Reserve
- Fahrgastkapazitäts-Reserve
- Instandhaltungsfreundlichkeit Fahrzeug

Sicherheits-Performance

Das Kriterium Sicherheits-Performance beschreibt, in welchem Maße das Triebzugkonzept geeignet ist, den notwendigen Aufwand im Umgang mit spezifischen Gefährdungen wie Hochspannung, Starkstrom, giftigen Substanzen oder anderem gering zu halten. Relevant ist sie sowohl im Fahrbetrieb wie auch während der Reparatur und Instandhaltung in einer Werkstatt.

Basiskriterien für die Sicherheits-Performance

- Sicherheits-Performance in der Instandhaltungswerkstatt
- Sicherheits-Performance im Bahnbetrieb

5.2.2 Wirtschaftlichkeit in 2025

Es lassen sich viele Kriterien nennen, welche die Wirtschaftlichkeit des Triebzugkonzeptes bestimmen werden. Letztlich sind es die zu erwartenden Kosten für die Anschaffung der Fahrzeuge und für deren Betrieb und Instandhaltung bis zum Ende der Laufzeit des Verkehrsvertrages oder der Betriebslebensdauer des Fahrzeugs. Hinzu kommen die Kosten für die Infrastruktur-Installation und deren Wartung, sowie Energiekosten.

Basiskriterium für die Wirtschaftlichkeit

- Kosten-Performance

Die Kosten-Performance beschreibt das Potenzial, das Triebzugkonzept im Bahnbetrieb kostenmäßig so gestalten zu können, dass es sich über die Vertrags- oder Lebensdauer betriebswirtschaftlich positiv rechnet. Wichtig ist hier,

zu beachten, dass die vorliegende Analyse sich auf nicht oder nur teilweise elektrifizierte Linien bezieht, die zudem tendenziell eher schwach befahren sind. Nur in diesem Fall kann sich der Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben betriebswirtschaftlich mit dem von Oberleitungs-Elektrotriebzügen messen.

5.2.3 Umweltverträglichkeit in 2025

Das Triebzugkonzept ist umweltverträglich, wenn sich die Freisetzung giftiger Substanzen und Lärmbelastungen durch Motoren- und Fahrgeräusche vermeiden lassen. Auf globaler Ebene ist das Konzept umweltverträglich, wenn sich bei der Herstellung der Technologiekomponenten und des Energieträgers, wie auch im Fahrbetrieb, die Emission klimaschädigender Gase wie CO₂ vermeiden lassen. Die Effizienz der Herstellung und des Einsatzes der Energie ist ein weiterer Beitrag zur Umweltschonung. Kriterien der Bewertung von Umweltverträglichkeit sind die globale und lokale Emissionsvermeidung sowie die Energieeffizienz (→ Abbildung 38)

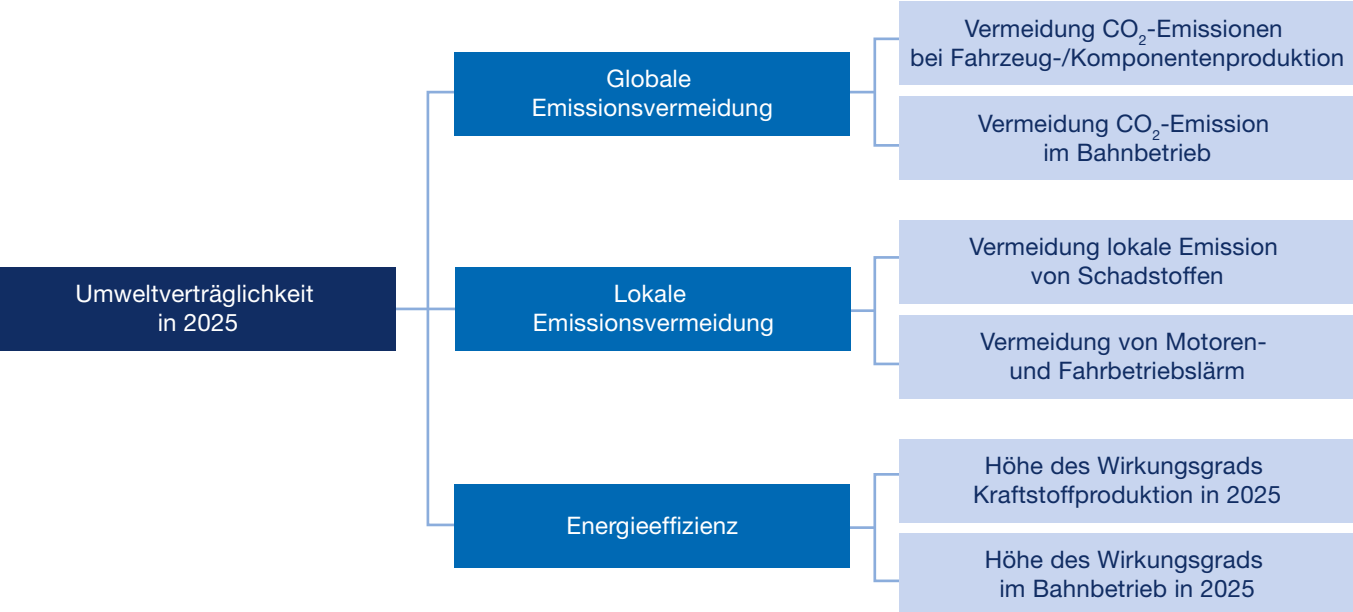


Abbildung 38 **Umweltverträglichkeit und zugehörige Unterkriterien, nach [4]**

Globale Emissionsvermeidung

Das Kriterium Globale Emissionsvermeidung beschreibt, in welchem Umfang bei der Herstellung des Fahrzeugs und seiner spezifischen Technologiekomponenten wie auch bei dessen Betrieb über die Fahrzeuglebensdauer voraussichtlich klimaschädigende Gase ausgestoßen werden (bspw. in tCO₂-Äquivalente pro Jahr).

Basiskriterien Globale Emissionsvermeidung

- Vermeidung von CO₂-Emissionen bei der Fahrzeug- und Komponenten-Produktion
- Vermeidung von CO₂-Emissionen im Bahnbetrieb

Lokale Emissionsvermeidung

Das Kriterium Lokale Emissionsvermeidung beschreibt, in welchem Umfang das Triebzugkonzept im Fahrbetrieb gesundheitsgefährdende Substanzen (z. B. NO_x, Feinstaub) ausstoßen und Lärm als störende Motoren- bzw. Fahrgeräusche verursachen wird.

Basiskriterien Lokale Emissionsvermeidung

- Vermeidung lokaler Emissionen von Schadstoffen
- Vermeidung von Motoren- und Fahrbetriebslärm

Energieeffizienz

Das Kriterium Energieeffizienz beschreibt, mit welchem Wirkungsgrad die für das Triebzugkonzept benötigte Antriebsenergie im Jahr 2025 voraussichtlich erzeugt und im Fahrbetrieb in Bewegungsenergie umgewandelt werden kann.

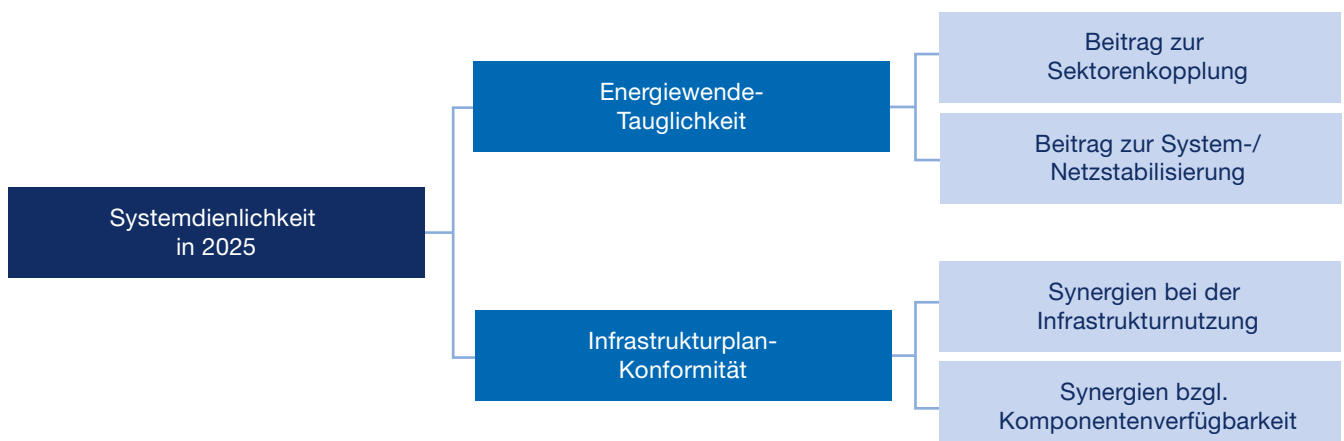
Basiskriterien Energieeffizienz

- Höhe des Wirkungsgrades der Kraftstoffproduktion in 2025
- Höhe des Wirkungsgrades im Bahnbetrieb in 2025

5.2.4 Systemdienlichkeit in 2025

Die Einführung des neuen Triebzugkonzeptes ist kein Selbstzweck, sondern orientiert sich an allgemein akzeptierten übergeordneten Zielen. Hierzu zählen die Energiewende und die Verkehrswende. Damit verbunden ist die Kopplung zwischen dem Sektor Energieerzeugung/-verteilung und dem Verkehrssektor.

Abbildung 39 **Systemdienlichkeit und zugehörige Unterkriterien, nach [4]**



Im Rahmen der Verkehrswende soll ein Teil des Personen- und Güterverkehrs von der Straße zurück auf die Schiene verlagert werden. Der in diesem Zusammenhang erforderliche Ausbau der Infrastruktur hat Einfluss auf die Einschätzung des Triebzugkonzeptes. Zentrale Kriterien für die Bewertung der Systemdienlichkeit sind demnach die Energiewende-Tauglichkeit und die Infrastrukturplan-Konformität.

Energiewende-Tauglichkeit

Das Kriterium Energiewende-Tauglichkeit beschreibt, in welchem Maße das Triebzugkonzept im Jahr 2025 voraussichtlich den Zielen der Energiewende genügt, das heißt Erneuerbare Energien nutzen, die Sektorenkopplung unterstützen und zur Stabilisierung des Energienetzes beitragen wird.

Basiskriterien zur Energiewende-Tauglichkeit

- Beitrag zur Sektorenkopplung
- Beitrag zur System- oder Netzstabilisierung

Infrastrukturplan-Konformität

Das Kriterium Infrastrukturplan-Konformität beschreibt, inwieweit sich die Einführung des Triebzugkonzeptes mit den Plänen von Bund und Ländern für den Ausbau der Verkehrsinfrastruktur deckt. So ist es beispielsweise systemdienlich, wenn die Elektrifizierung einer Schienenstrecke im SPNV auch dem Güterverkehr zugutekommt, oder wenn sie bei Streckensperrungen die Umleitung von Fernverkehrszügen ermöglicht. Systemdienlich wäre zum Beispiel auch eine Wasserstoff-Tankstelle, die für Züge wie für Busse mit Brennstoffzellenantrieben genutzt werden kann. Die Steigerung der Verfügbarkeit von kompatiblen fahrzeug- und infrastrukturseitigen Technologiekomponenten für unterschiedliche Anwendungen ist ein weiteres Kriterium.

Basiskriterien zur Infrastrukturplan-Konformität

- Synergien bei der Infrastrukturnutzung
- Synergien bei Technologiekomponenten für Infrastruktur und Fahrzeuge

5.2.5 Ressourcen-Verfügbarkeit in 2025

Um als Triebzugkonzept in Frage zu kommen, müssen im Jahr 2025 die zugehörigen Technologiekomponenten reif sein und die Fahrzeuge zum Betriebsstart bereitstehen. Zu diesem Zeitpunkt muss der Energieträger für den Antrieb in hinreichender Menge sicher verfügbar sein.

Der Ressourcen-Verfügbarkeit lassen sich insgesamt vier Basiskriterien zuordnen, die über die Mittelkriterien Energie- und Rollmaterialbeschaffung verdichtet werden, siehe → Abbildung 40.

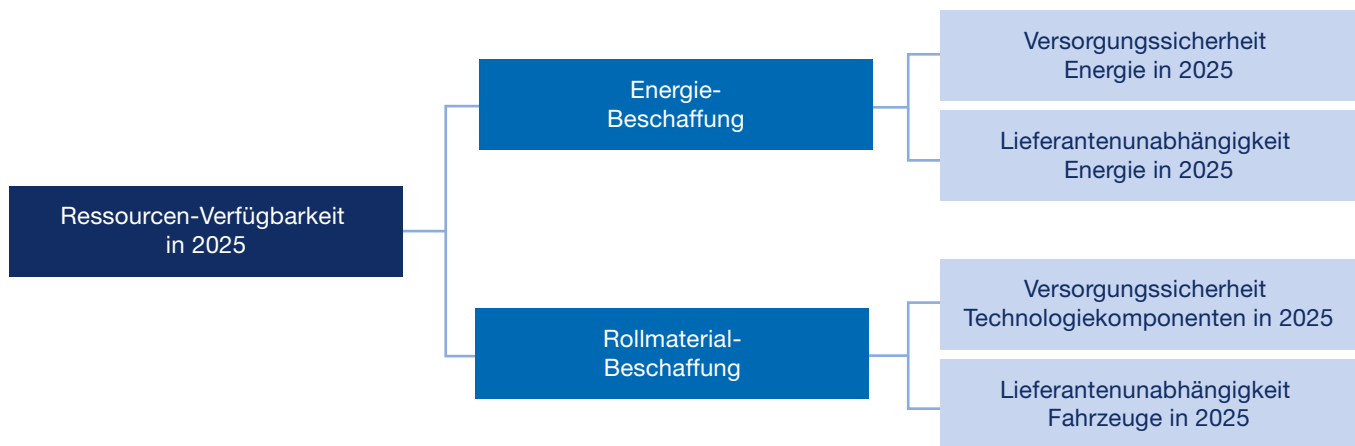


Abbildung 40 Ressourcen-Verfügbarkeit und zugehörige Unterkriterien, nach [4]

Energiebeschaffung

Das Kriterium Energiebeschaffung beschreibt, in welchem Umfang die für das Triebzugkonzept benötigte Energie in 2025 erzeugt und bereitgestellt werden kann, und inwieweit es Wahlmöglichkeiten bzgl. der Energielieferanten geben wird.

Basiskriterien für die Energiebeschaffung

- Versorgungssicherheit Energie in 2025
- Lieferantenunabhängigkeit Energie in 2025

Rollmaterialbeschaffung

Das Kriterium Rollmaterialbeschaffung beschreibt, in welchem Umfang die für das Triebzugkonzept erforderlichen Technologiekomponenten (z. B. Brennstoffzellen) in 2025 verfügbar sein werden und inwieweit es Wahlmöglichkeiten bzgl. der Fahrzeughersteller geben wird.

Basiskriterien für die Rollmaterialbeschaffung

- Versorgungssicherheit Technologiekomponenten in 2025
- Lieferantenunabhängigkeit Fahrzeuge in 2025

5.2.6 Infrastrukturfreundlichkeit in 2025

Es ist in der Regel nicht im Interesse der Allgemeinheit, dass die Einführung des neuen Triebzugkonzeptes eine völlig neue Infrastruktur erforderlich macht. Aus diesem Grunde ist es als Vorteil des Konzeptes anzusehen, wenn der mit dessen Einführung verbundene Aufwand für die Bereitstellung oder Nutzung von Infrastruktur gering gehalten werden kann.

Der Infrastrukturfreundlichkeit lassen sich insgesamt vier Basiskriterien und zwei Mittelkriterien zuordnen. Letztere sind die Infrastruktur-Sparsamkeit und die Infrastruktur-Aufwandsvermeidung. → Abbildung 41

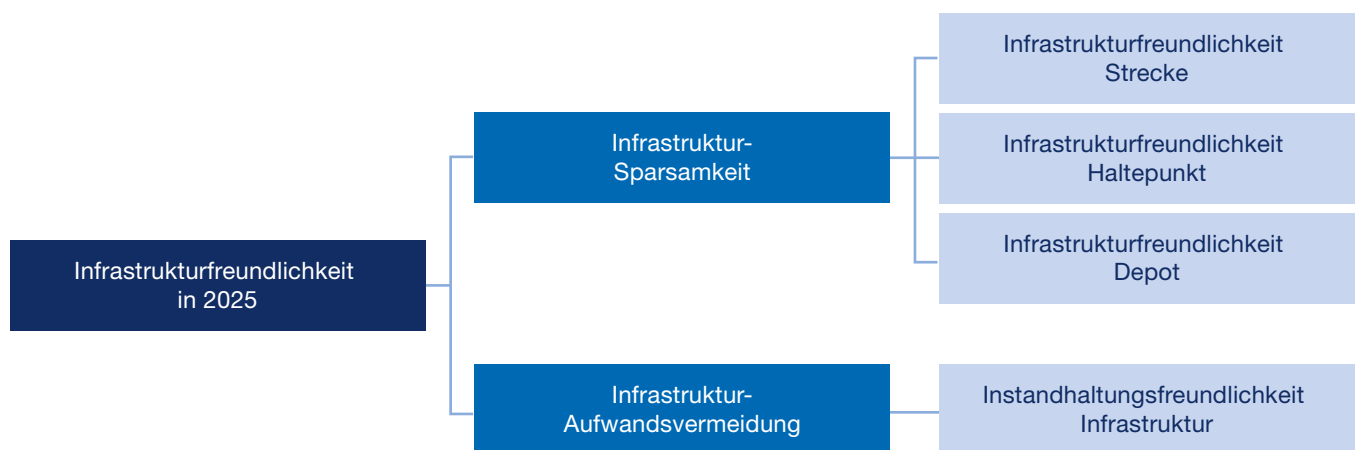


Abbildung 41 Infrastrukturfreundlichkeit und zugehörige Unterkriterien, nach [4]

Infrastruktur-Sparsamkeit

Das Kriterium Infrastruktur-Sparsamkeit beschreibt, in welchem Maße das Triebzugkonzept den weiteren Ausbau der Infrastruktur vermeidet.

Basiskriterien für die Infrastruktur-Sparsamkeit

- Infrastrukturfreundlichkeit Strecke
- Infrastrukturfreundlichkeit Haltepunkt
- Infrastrukturfreundlichkeit Depot

Infrastruktur-Aufwandsvermeidung

Das Kriterium Infrastruktur-Aufwandsvermeidung beschreibt, inwieweit das Triebzugkonzept geeignet ist, regelmäßigen Zusatzaufwand für die Instandhaltung der Infrastruktur zu vermeiden.

Basiskriterium für die Infrastruktur-Aufwandsvermeidung

- Instandhaltungsfreundlichkeit Infrastruktur

5.3 Benotung der Triebzugkonzepte auf Basiskriterien-Ebene

Die nachfolgenden → Abbildungen 42 bis 45 veranschaulichen die vier Triebzugkonzepte in systemischer Darstellung, das heißt mit dem jeweiligen Fahrzeugtyp, der zugehörigen Infrastruktur und den für Betrieb und Wartung erforderlichen Einrichtungen, sowie den Erzeugungsstätten und der Verteilung der benötigten Antriebsenergie. Icons geben einen groben Überblick über zu bewertende Eigenschaften: Mit Pluszeichen sind besondere Stärken, mit Minuszeichen entsprechend Schwächen des Konzeptes gekennzeichnet. Die Darstellungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Diese wird in den → Tabellen 7 bis 14 gewährleistet: Zu jedem der insgesamt 27 Basiskriterien findet sich dort die vergebene Punktzahl (0–10) mit Begründungen.

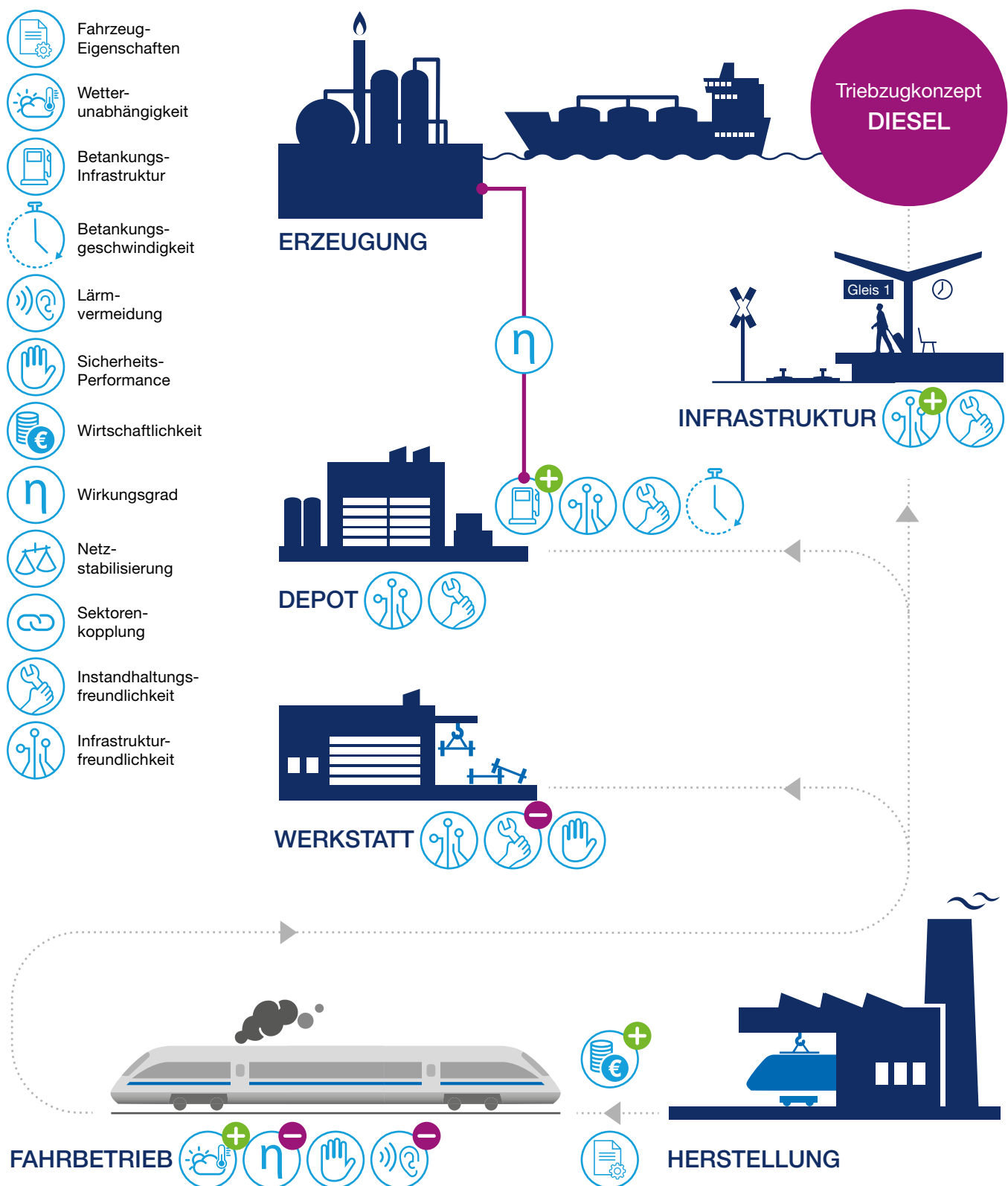


Abbildung 42 Diesel-Triebzugkonzept (DM) dargestellt in Modelllandschaft

Diesellochzug	(1) Betriebsfreundlichkeit (2) Wirtschaftlichkeit in 2025	Punkte
Unabhängigkeit von bahntypischen Störungen	OL-Störungen sind ohne Einfluss auf den Betrieb, Umfahrungen sind möglich. Sonst keine spezifischen Vorteile bzgl. bahntypischer Störungen.	7
Resilienz bei extremen Außentemperaturen	Die Abwärme des Motors unterstützt die Beheizung. Das Kühlsystem ist technisch einfach. Das Fahrzeug ist robust gegen Hitze und Kälte (bis -40 °C).	8
Reichweitenreserve	Die hohe Energiedichte von Diesel und der große Tank erlauben Reichweiten von bis zu 1.600 km. Das Fahrzeug ist auf allen Streckentypen einsetzbar.	8
Dynamikreserve	Eingesetzte Diesel-Motoren sind relativ schwach und erlauben (gewichtsabhängig) meist nur geringe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten.	3
Fahrgastkapazitätsreserve	Das Angebot an Gefäßgrößen ist bei Diesellochzügen relativ gering. Im Falle erhöhten Kapazitätsbedarfs wird Mehrfach-Traktion notwendig.	7
Instandhaltungsfreundlichkeit Fahrzeug	Die hohe mechanische Belastung des Antriebs erfordert Power-Pack-Tausch (Motoreinheit) alle drei Jahre. Öl, Luftfilter etc. sind regelmäßig zu wechseln.	3
Sicherheits-Performance Instandhaltungswerkstatt	Langjährige Erfahrung im Umgang mit der Entzündlichkeit und Toxizität von Diesel erlaubt, die Gefährdung des Werkstatt-Personals gut einzugrenzen.	7
Sicherheits-Performance Bahnbetrieb	Erfahrung mit Diesel hält Gefährdungen im Fahrbetrieb in Grenzen. Brandrisiko, Brandverhalten und Umweltgefährdung sind dennoch kritisch.	6
Kosten-Performance	Kosten für Infrastrukturwartung sind relativ gering. Eignung bei geringer Taktung und fehlender OL. Dieselpreis/Umweltauflagen gefährden Wirtschaftlichkeit.	8

Tabelle 7 **Bewertung des Diesellochzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2), nach [4]**

Diesellochzug	(3) Umweltverträglichkeit in 2025	Punkte
Vermeidung CO ₂ -Emission bei Fahrzeug-/Komp.-Prod.	Die Herstellung von Dieselmotoren ist mit vergleichsweise geringen CO ₂ -Emissionen verbunden. Recycling-Prozesse sind ausgereift.	10
Vermeidung CO ₂ -Emission im Bahnbetrieb	Im Fahrbetrieb führt die Verbrennung von Diesel zu hoher CO ₂ -Emission.	0
Vermeidung lokale Emission von Schadstoffen	Bei der Verbrennung von Diesel für den Fahrzeugantrieb entstehen lokal Schadstoffe mit reizender und umweltschädigender Wirkung.	0
Vermeidung von Motoren- und Fahrbetriebslärm	Im Stillstand und beim Anfahren bewirken Motorengeräusche erhebliche Lärmbelästigung. Während der Fahrt dominieren Rad-Schiene-Geräusche.	2
Höhe des Wirkungsgrads Kraftstoffproduktion in 2025	Der Wirkungsgrad bei Produktion und Bereitstellung von Diesel ist 90 %.	10
Höhe des Wirkungsgrads im Bahnbetrieb in 2025	Der Wirkungsgrad der Umsetzung der im Diesel-Kraftstoff gespeicherten Energie in Bewegungsenergie beträgt nur 33 %.	3

→

Dieseltriebzug	(4) Systemdienlichkeit in 2025	Punkte
Beitrag zur Sektorenkopplung	Es findet keine Kopplung der Sektoren Energie und Verkehr statt.	0
Beitrag zur System-/Netzstabilisierung	Es gibt keine Schnittstelle zur Stabilisierung des wegen Erneuerbarer Energien fluktuierenden Stromnetzes.	0
Synergien bei der Infrastrukturnutzung	Tankanlagen sind über Gleise zugänglich und stehen allen Schienenfahrzeugen zur Verfügung. Synergien zu anderen Sektoren fehlen.	3
Synergien bzgl. Komp.-Verfügbarkeit	Infrastruktur- und Fahrzeug-Komponenten sind ausgereift, in Menge und Qualität verfügbar, jedoch ohne technologisches Verbesserungspotenzial.	5
Dieseltriebzug	(5) Ressourcenverfügbarkeit in 2025	Punkte
Versorgungssicherheit Energie in 2025	Die Auswahl an Raffinerien ist ausreichend. Diesel lässt sich gut lagern und transportieren. Die Dieselpreis-Entwicklung lässt sich kaum beeinflussen.	7
Lieferantenunabhängigkeit Energie in 2025	DB Energie ist flächendeckend einziger Anbieter von Diesel-Kraftstoff. Freie Lieferantenwahl ist im Fall eigener Tankstellen möglich.	8
Versorgungssicherheit Technologiekomp. 2025	Fahrzeuge im Markt nutzen standardisierte Komponenten. Deren Verfügbarkeit ist gesichert und die Lebensdauern sind berechenbar.	10
Lieferantenunabhängigkeit Fahrzeuge in 2025	Etablierte Hersteller bieten breites Portfolio an Dieseltriebzügen. Mittelfristig schwindet der Markt, da sich eine Abkehr von Diesellösungen abzeichnet.	7
Dieseltriebzug	(6) Infrastrukturfreundlichkeit in 2025	Punkte
Infrastrukturfreundlichkeit Trasse	Der Einsatz des Fahrzeugs erfordert keine neuen Infrastrukturmaßnahmen.	10
Infrastrukturfreundlichkeit Haltepunkt	Der Einsatz des Fahrzeugs erfordert keine neuen Infrastrukturmaßnahmen.	10
Infrastrukturfreundlichkeit Depot	Die gesamte Betankungsinfrastruktur ist im Bereich der Depots untergebracht. Investitionskosten bleiben dank Zentralisierung und einfacher Komponenten moderat.	6
Instandhaltungsfreundlichkeit Infrastruktur	Da zentralisiert, ist die Infrastruktur betriebsfreundlich und erfordert wenig Wartung. Betankung ist einfach und ohne Fahrwegbehinderungen möglich.	10

Tabelle 8 **Bewertung des Dieseltriebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (3) bis (6), nach [4]**

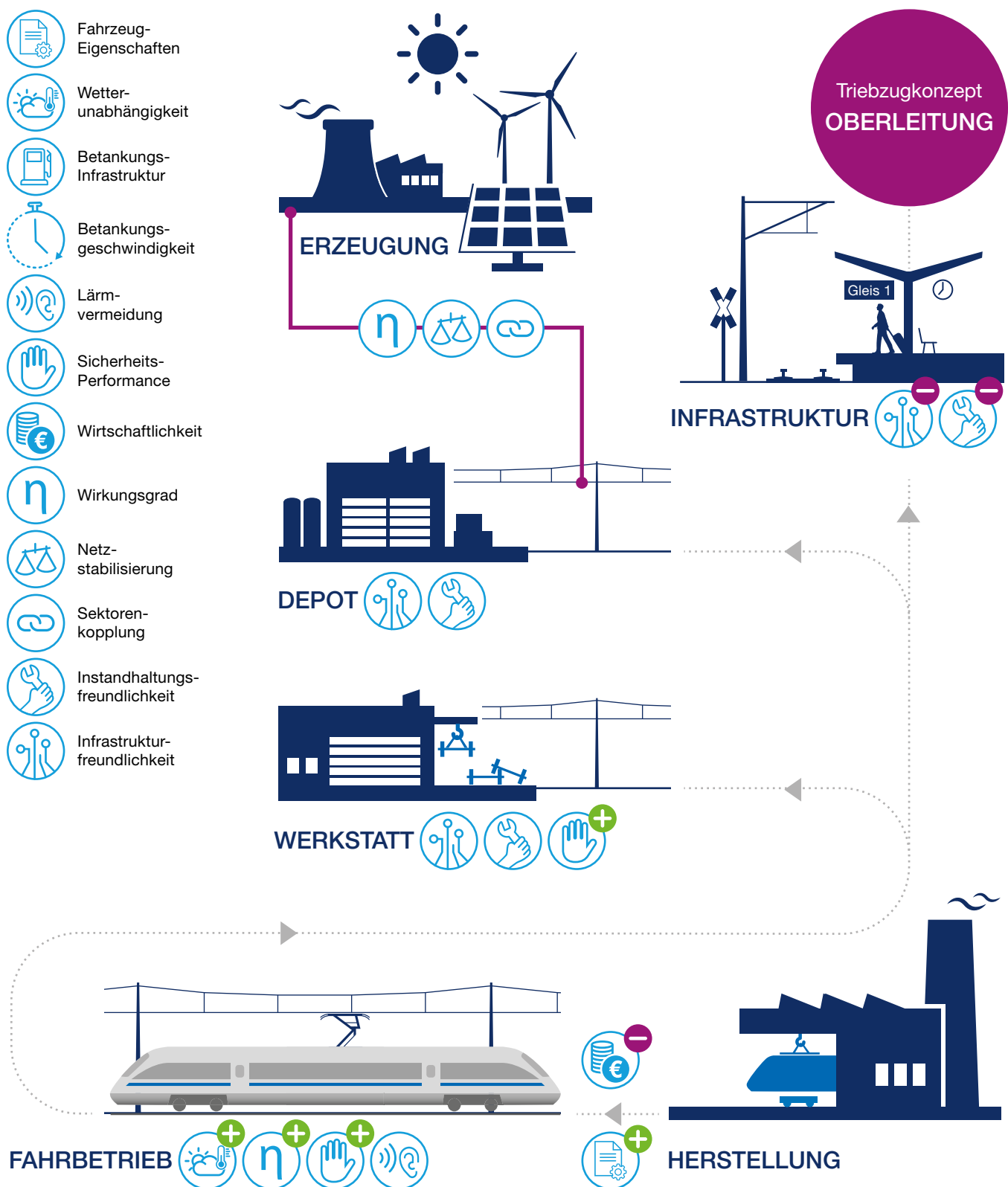


Abbildung 43 Oberleitungs-Triebzugkonzept (OL) dargestellt in Modelllandschaft – Bewertung nach vollständiger Elektrifizierung einer Diesellinie

OL-Triebzug	(1) Betriebsfreundlichkeit (2) Wirtschaftlichkeit in 2025	Punkte
Unabhängigkeit von bahntypischen Störungen	OL-Störungen (Häufigkeit ~1 %) können gravierende Verspätungen verursachen (> 15 min). Umleitungen sind nur über Strecken mit OL möglich.	3
Resilienz bei extremen Außentemperaturen	Energie für Kühlung/Beheizung von Antrieben und Innenräumen wird über OL bezogen, ohne die Leistung der Antriebe zu beeinträchtigen.	10
Reichweitenreserve	Ständige Energiezufuhr über OL bietet unbegrenzte Reichweite, das heißt keine „Tank“-fahrten notwendig. Strecken ohne OL sind nicht befahrbar.	9
Dynamikreserve	Starke Elektromotoren erlauben hohe Beschleunigung u. Geschwindigkeit. Für Leistungsspitzen kann zusätzliche Energie über OL bezogen werden.	10
Fahrgastkapazitätsreserve	Kompakter Fahrzeugaufbau ermöglicht vielfältige Gefäßgrößen und hohe Flexibilität bei der Kaufentscheidung.	10
Instandhaltungs-freundlichkeit Fahrzeug	Elektromotoren müssen über die Lebenszeit nicht ausgetauscht werden. Der relativ einfache Fahrzeugaufbau hält die Instandhaltungskosten gering.	10
Sicherheits-Performance Instandhaltungswerkstatt	Bei der Instandhaltung lässt sich die Energiezufuhr mechanisch abtrennen. Es müssen keine chemischen Gefahrstoffe berücksichtigt werden.	10
Sicherheits-Performance Bahnbetrieb	Bei Störfällen lässt sich die Energiezufuhr mechanisch abtrennen. Es gibt kein erhöhtes Brandrisiko z. B. wegen eines Kraftstoffs.	10
Kosten-Performance	Elektrifizierung ist eine teure Investition mit zusätzlichen Erhaltungskosten. Wirtschaftlichkeit setzt hohe Verkehrsleistung bzw. dichte Taktung voraus, die auf der Mehrzahl der Strecken fraglich ist.	4

Tabelle 9 **Bewertung des OL-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2), nach [4]**

OL-Triebzug	(3) Umweltverträglichkeit in 2025	Punkte
Vermeidung CO ₂ -Emission bei Fahrzeug-/Komp.-Prod.	Das CO ₂ -Äquivalent bei der Herstellung von Triebzug-Elektromotoren ist höher als das im Falle von Dieselmotoren.	8
Vermeidung CO ₂ -Emission im Bahnbetrieb	Mit Strom aus der OL folgt der Bahnbetrieb der Entwicklung der EE, deren Anteil im Bahnstrom-Mix in 2025 etwa 70 % betragen wird.	9
Vermeidung lokale Emission von Schadstoffen	Die über die OL bereitgestellte Energie wird von Elektromotoren in Bewegungsenergie umgesetzt, ohne Schadstoffe auszustoßen.	10
Vermeidung von Motoren- und Fahrbetriebslärm	Bei Stillstand und Anfahren verursachen nur Nebenaggregate Geräuschemissionen. Während der Fahrt dominieren Rad-Schiene-Geräusche.	8
Höhe des Wirkungsgrads Kraftstoffproduktion in 2025	Bis 2025 wird der Wirkungsgrad im DB-Bahnstromnetz auf ~78 % steigen.	9
Höhe des Wirkungsgrads im Bahnbetrieb in 2025	Fahrzeuge setzen Energie mit rund 80 % Wirkungsgrad in Bewegungsenergie um. Rekuperation erhöht den Gesamtwirkungsgrad auf 96 %.	10



OL-Triebzug	(4) Systemdienlichkeit in 2025	Punkte
Beitrag zur Sektorenkopplung	Die OL koppelt Energiesektor und Verkehrssektor und erlaubt so eine flächendeckende Verteilung von Erneuerbaren Energien.	10
Beitrag zur System-/Netzstabilisierung	Fahrzeuge setzen Energie ohne Zwischenspeicherung in Bewegungsenergie um, das heißt sie tragen nicht zur Netzstabilisierung bei.	0
Synergien bei der Infrastrukturnutzung	Ggf. notwendiger OL-Ausbau ist für SPNV und Schienengüterverkehr nützlich. Für bahnfremde Anwendungen ist die OL bislang unzugänglich.	5
Synergien bzgl. Komp.-Verfügbarkeit	Komponenten des OL-Systems und der Fahrzeugtechnologie sind unbeschränkt verfügbar. Synergien mit anderen Sektoren gibt es kaum.	5
OL-Triebzug	(5) Ressourcenverfügbarkeit in 2025	Punkte
Versorgungssicherheit Energie in 2025	Versorgung mit Bahnstrom ist gesichert und unabhängig von Erzeugungsart. Die Rohstoff-Abhängigkeit sinkt mit dem steigendem EE-Anteil im Strommix.	9
Lieferantenunabhängigkeit Energie in 2025	Das Bahnstromnetz ist seit 2014 offen für andere Energielieferanten. Erhöhter Wettbewerb wird die Dominanz von DB Energie mindern.	8
Versorgungssicherheit Technologiekomp. 2025	Fahrzeuge im Markt nutzen standardisierte Komponenten mit gesicherter Verfügbarkeit und berechenbaren Lebensdauern.	10
Lieferantenunabhängigkeit Fahrzeuge in 2025	Der Markt bietet ein breites Portfolio von Elektrotriebzügen von in Deutschland bzw. Europa ansässigen etablierten Herstellern.	10
OL-Triebzug	(6) Infrastrukturfreundlichkeit in 2025	Punkte
Infrastrukturfreundlichkeit Trasse	Der Einsatz des Fahrzeugs erfordert lückenlose Elektrifizierung. Dazu gehören (optisch dominant) Masten, Fahrdrähte und Unterwerke.	3
Infrastrukturfreundlichkeit Haltepunkt	Haltepunkte müssen OL aufweisen, um ansteuerbar zu sein. Die Installation von OL in Bahnhöfen ist vergleichsweise einfach und optisch unkritisch.	4
Infrastrukturfreundlichkeit Depot	Die Ansteuerbarkeit von Depots setzt OL voraus. Die Installation von OL in Depot-Umgebungen ist vergleichsweise einfach und optisch unkritisch.	5
Instandhaltungs-freundlichkeit Infrastruktur	Instandhaltung der OL-Infrastruktur ist relativ teuer und aufwändig. Während OL-Wartungsarbeiten ist der Fahrweg blockiert.	2

Tabelle 10 **Bewertung des OL-Triebzugkonzeptes zu (3) bis (6), nach [4]**

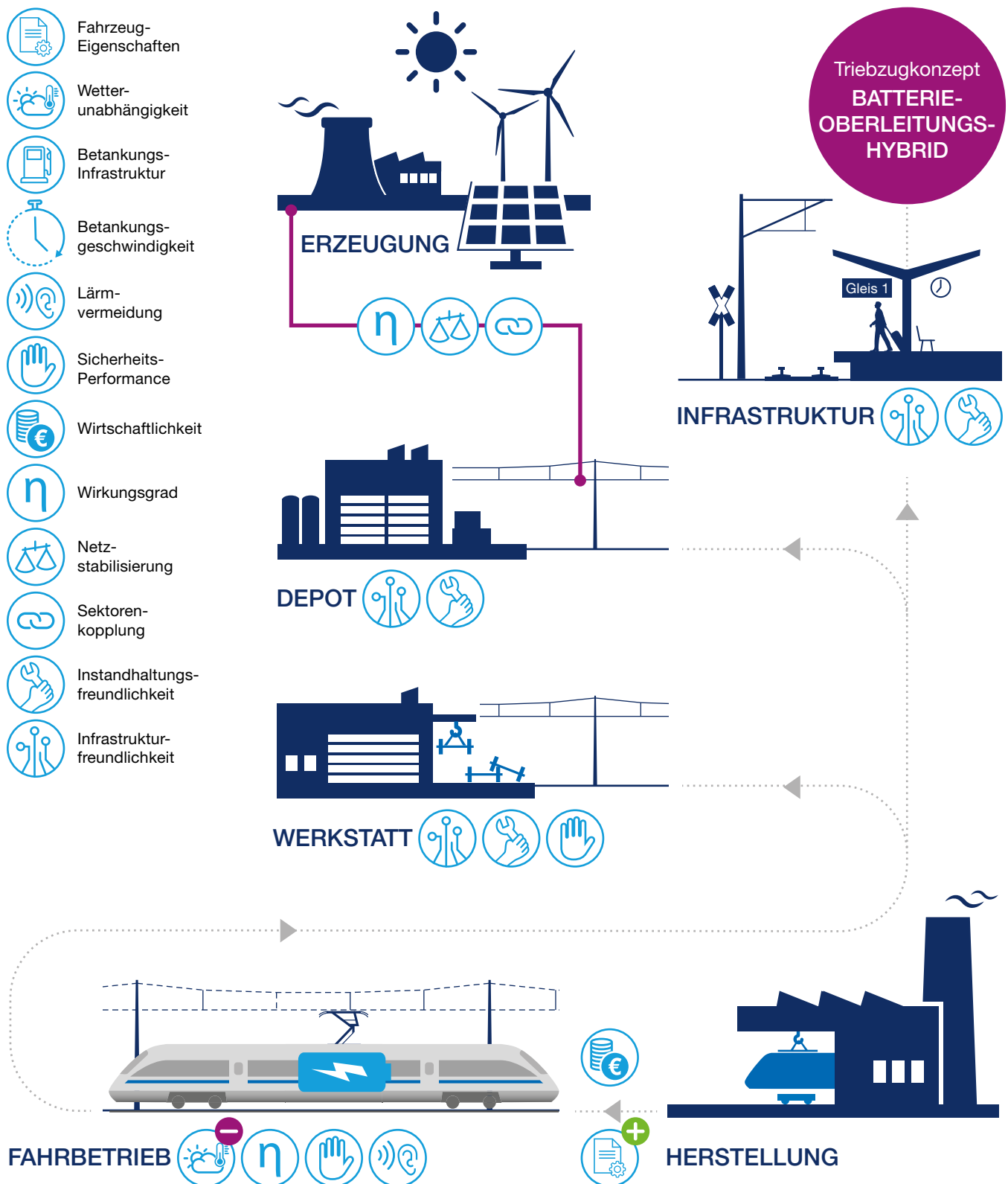


Abbildung 44 Batterie-Triebzugkonzept (BOH) dargestellt in Modelllandschaft

Batterie-Triebzug	(1) Betriebsfreundlichkeit (2) Wirtschaftlichkeit in 2025	Punkte
Unabhängigkeit von bahntypischen Störungen	OL-Störungen lassen sich in begrenztem Umfang kompensieren. Die geringe Reichweite erfordert die Verfügbarkeit intakter Ladepunkte.	5
Resilienz bei extremen Außentemperaturen	Extreme Außentemperaturen erfordern Vorwärmen oder Kühlen der Batterie. Erhöhter Energieverbrauch geht zu Lasten der Reichweite.	4
Reichweitenreserve	Reichweiten bis 80 km möglich; Laden erfolgt über die OL. Enge Kopplung von Fahrzeug und Infrastruktur erschwert den Einsatz auf anderen Strecken.	3
Dynamikreserve	Leistungsstarke Elektromotoren ermöglichen relativ hohe Beschleunigungswerte und Geschwindigkeiten, jedoch stets zu Lasten der Reichweite.	5
Fahrgastkapazitätsreserve	Angebote Gefäßgrößen sind eingeschränkt. Erhöhung der Fahrgast-Kapazität lässt sich mittels Mehrfachtraktion realisieren.	4
Instandhaltungs-freundlichkeit Fahrzeug	Die Batterie ist wartungsfrei. Hohe Beanspruchung verkürzt die Lebenszeit der Batterie. Batterietausch steht nach 8–15 Jahren an.	8
Sicherheits-Performance Instandhaltungswerkstatt	Die Batterie ist wartungsfrei und bleibt ungeöffnet. Batteriebestandteile sind leicht entflammbar. Vollständige Spannungsfreiheit ist nicht möglich.	5
Sicherheits-Performance Bahnbetrieb	Die Batterie lässt sich einfach vom Bordnetz trennen. Brand und Explosion sind im Fall von „Thermal Runaways“ denkbar.	8
Kosten-Performance	Im Falle vorhandener OL fallen für das Laden keine zusätzlichen Infrastrukturkosten an. Das Fahrzeug eignet sich besonders für Strecken mit geringer Taktung und kurzen OL-Lücken.	8

Tabelle 11 Bewertung des Batterie-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2), nach [4]

Batterie-Triebzug	(3) Umweltverträglichkeit in 2025	Punkte
Vermeidung CO ₂ -Emission bei Fahrzeug-/Komp.-Prod.	Bei der Herstellung ist der Materialeinsatz für Traktionsbatterien und Elektromotoren mit erhöhter CO ₂ -Emission verbunden.	2
Vermeidung CO ₂ -Emission im Bahnbetrieb	Ladestrom aus der OL folgt dem steigenden Anteil der EE, der bis 2025 auf etwa 70 % steigt. Wirkungsgrad-Nachteile bei der Batterie-Nutzung führen zu höherem Verbrauch.	8
Vermeidung lokale Emission von Schadstoffen	Lokal entstehen keine Schadstoffe durch den Antrieb, da die chemischen Reaktionen in der Batterie ohne Emission von Schadstoffen abläuft.	10
Vermeidung von Motoren- und Fahrbetriebslärm	Der Bezug von Strom aus der Batterie trägt nicht zur Geräuschentwicklung bei. Ansonsten entspricht der Fahrlärm dem von OL-Triebzügen.	8
Höhe des Wirkungsgrads Kraftstoffproduktion in 2025	Bis 2025 wird der Wirkungsgrad im DB-Bahnstromnetz auf ~78 % steigen.	9
Höhe des Wirkungsgrads im Bahnbetrieb in 2025	Der Wirkungsgrad der Umsetzung elektrischen Energie in Bewegungsenergie erreicht 86–96 % (inkl. Rekuperation).	8



Batterie-Triebzug	(4) Systemdienlichkeit in 2025	Punkte
Beitrag zur Sektorenkopplung	Fahrzeuge erlauben Erneuerbare Energien mit hohem Wirkungsgrad flächendeckend zu verteilen.	9
Beitrag zur System-/Netzstabilisierung	Der Fahrbetrieb reduziert die Leistungsspitzen an OL und Unterwerken. Direkte Nutzung der zur Verfügung gestellten Energie mindert den Beitrag zur Netzstabilisierung.	2
Synergien bei der Infrastrukturnutzung	Ladeeinrichtungen bzw. OL sind für bahnfremde Anwendungen unzugänglich. Die Infrastruktur ist für andere Zuganwendungen nutzbar.	4
Synergien bzgl. Komp.-Verfügbarkeit	Es gibt Synergien bei Komponenten von Batterie und Ladeinfrastruktur mit Bussen und LKW. Verfügbarkeit und Preise verbessern sich ständig.	10
Batterie-Triebzug	(5) Ressourcenverfügbarkeit in 2025	Punkte
Versorgungssicherheit Energie in 2025	Sicherheit der Energieversorgung entspricht der bei OL-Triebzügen. Der steigende EE-Anteil schafft Unabhängigkeit von internationalen Quellen.	9
Lieferantenunabhängigkeit Energie in 2025	Das Bahnstromnetz ist seit 2014 offen für andere Energielieferanten. Erhöhter Wettbewerb wird die Dominanz von DB Energie mindern.	8
Versorgungssicherheit Technologiekomp. 2025	Batterielieferanten nutzen dieselben (meist asiatischen) Zellhersteller. Triebzug- und Autohersteller konkurrieren bei Zell-Lieferanten.	3
Lieferantenunabhängigkeit Fahrzeuge in 2025	Die Anzahl von Anbietern und Fahrzeugmodellen ist heute noch gering. Bis 2025 ist eine breite Markteinführung von Fahrzeugen wahrscheinlich.	3
Batterie-Triebzug	(6) Infrastrukturfreundlichkeit in 2025	Punkte
Infrastrukturfreundlichkeit Trasse	Ggf. ist ein Teilausbau der OL-Infrastruktur nötig, um längere Strecken befahren zu können. Maßnahmen können die Umgebung optisch belasten.	6
Infrastrukturfreundlichkeit Haltepunkt	Vorhandene Haltepunkte sind auch ohne OL wiederverwendbar. Bessere Zugänglichkeit und technische Gegebenheiten vor Ort vereinfachen die ggf. notwendige lokale Elektrifizierung.	7
Infrastrukturfreundlichkeit Depot	Depots benötigen Ladestationen oder Oberleitungen. Die dafür erforderlichen Investitionskosten sind relativ hoch.	4
Instandhaltungs-freundlichkeit Infrastruktur	OL-Stücke bzw. Ladestationen verursachen Wartungsaufwand. Einsatzorte können verstreut sein. Bei OL-Wartungsarbeiten ist der Fahrweg blockiert.	5

Tabelle 12 **Bewertung des Batterie-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (3) bis (6), nach [4]**

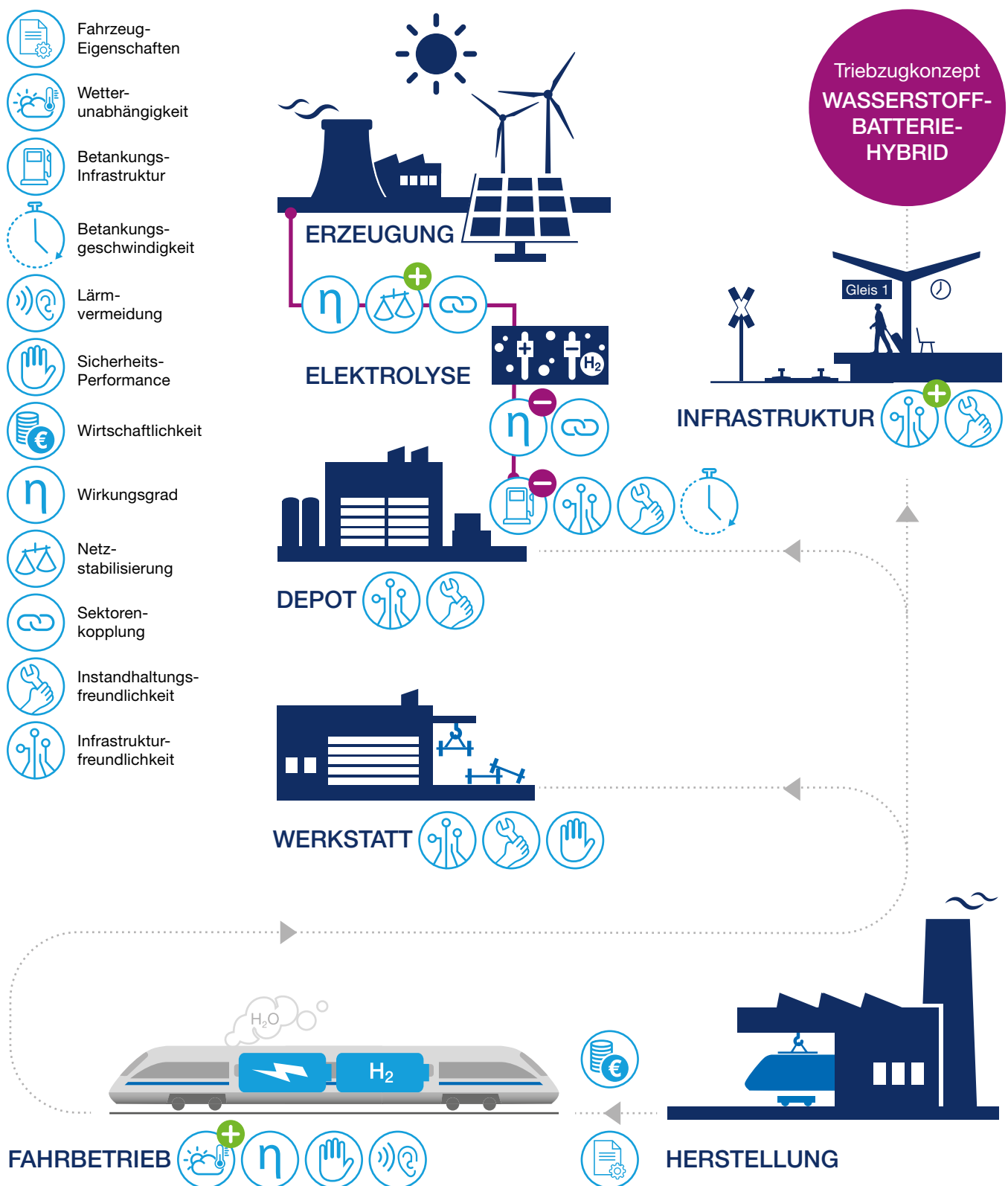


Abbildung 45 Brennstoffzellen-Triebzugkonzept (WBH) dargestellt in Modelllandschaft

Brennstoffzellen-Triebzug	(1) Betriebsfreundlichkeit (2) Wirtschaftlichkeit in 2025	Punkte
Unabhängigkeit von bahntypischen Störungen	OL-Störungen sind ohne Einfluss auf den Betrieb. Umfahrungen sind möglich. Sonst keine Vorteile bzgl. bahntypischer Störungen.	7
Resilienz bei extremen Außentemperaturen	Das Fahrzeug ist robust bei Kälte (bis -20 °C). Kühlung erfordert aufwändiges System. Schwankungen sind mit mehr Kraftstoff kompensierbar.	8
Reichweitenreserve	Abhängig von der Größe der Wasserstoff-Tanks sind Reichweiten um 1.000 km möglich. Das Fahrzeug ist damit auf allen Streckentypen einsetzbar.	7
Dynamikreserve	Leistungsstarke Elektromotoren ermöglichen relativ hohe Beschleunigungswerte und Geschwindigkeiten.	7
Fahrgastkapazitätsreserve	Hohe Reichweiten setzen lange Wagenvarianten/Mehrteiler voraus. Tanks mit höheren Wasserstoff-Druckwerten lassen Verbesserungen erwarten.	4
Instandhaltungs-freundlichkeit Fahrzeug	Der Wartungsaufwand für Brennstoffzellensysteme ist relativ hoch. Brennstoffzellen sind nach 4–8 Jahren, Batterien nach 8–15 Jahren auszutauschen.	5
Sicherheits-Performance Instandhaltungswerkstatt	Wasserstoff ist leicht entzündbar, aber nicht toxisch. Die Energiequelle ist einfach und vollständig abtrennbar. Hoher Gasdruck im Tank ist beherrschbar.	6
Sicherheits-Performance Bahnbetrieb	Im Fahrbetrieb gelten hohe Sicherheitsanforderungen mit vordefinierten Havarie-Abläufen. Wasserstoff ist leicht entzündbar, verflüchtigt sich aber schnell und ist damit sicherer als Diesel.	5
Kosten-Performance	Infrastrukturkosten sind relativ gering, da ohne OL. Kosten für lokale Infrastruktur und der Wasserstoff-Preis müssen bei geringer Linientaktung adäquat sein.	8

Tabelle 13 **Bewertung des Brennstoffzellen-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2), nach [4]**

Brennstoffzellen-Triebzug	(3) Umweltverträglichkeit in 2025	Punkte
Vermeidung CO ₂ -Emission bei Fahrzeug-/Komp.-Prod.	Die Herstellung von Brennstoffzellen, Batterie, Elektromotor und Drucktanks ist mit erhöhten CO ₂ -Emissionen verbunden.	1
Vermeidung CO ₂ -Emission im Bahnbetrieb	Im Fahrbetrieb verwendeter Wasserstoff wird zuvor mit Energieaufwand erzeugt. Elektrolyse mit EE bietet Vorteile trotz mittelmäßigem Wirkungsgrad.	5
Vermeidung lokale Emission von Schadstoffen	Strom für den Fahrbetrieb entsteht in der Brennstoffzelle bei der Reaktion von H ₂ mit Luft-O ₂ . Als Abgas bildet sich lediglich reiner Wasserdampf (H ₂ O)	10
Vermeidung von Motoren- und Fahrbetriebslärm	Brennstoffzellen arbeiten geräuscharm. Beim Anfahren machen Kompressoren und Lüfter Geräusche. Ansonsten dominieren Rad-Schiene-Geräusche.	7
Höhe des Wirkungsgrads Kraftstoffproduktion in 2025	Der Wirkungsgrad der Wasserstoff-Erzeugung mit öffentlichem Netzstrom liegt im Jahr 2025 bei nur 42 %. Bei der Dampfreformierung mit fossilem Erdgas könnte er auf 65 % steigen.	4
Höhe des Wirkungsgrads im Bahnbetrieb in 2025	Der Wirkungsgrad der Umsetzung der im Wasserstoff gespeicherten Energie in Bewegungsenergie erreicht rund 55 % (inkl. Rekuperation).	5



Brennstoffzellen-Triebzug	(4) Systemdienlichkeit in 2025	Punkte
Beitrag zur Sektorenkopplung	Mit Verwendung von EE für die elektrolytische Wasserstoff-Produktion, trägt der Betrieb indirekt zur Sektorenkopplung bei.	5
Beitrag zur System-/Netzstabilisierung	Systemrelevanz von Wasserstoff wächst mit EE-Anteil. Zeitlich entkoppelte Energiespeicherung in Wasserstoff und Verstromung in Fahrzeugen fördern die EE-Integration ins Stromnetz.	10
Synergien bei der Infrastrukturnutzung	Wasserstoff-Bereitstellung hat Synergien mit anderen Nutzungspfaden. Diese vereinfachen den Aufbau redundanter Wasserstoff-Quellen und -Lieferketten.	9
Synergien bzgl. Komp.-Verfügbarkeit	Wasserstoff-Technologiekomponenten finden sich auch bei Busanwendungen. Eine Verbesserung ihrer Verfügbarkeit und Preise ist somit zu erwarten.	10
Brennstoffzellen-Triebzug	(5) Ressourcenverfügbarkeit in 2025	Punkte
Versorgungssicherheit Energie in 2025	Für die Wasserstoff-Herstellung stehen diverse Verfahren zur Verfügung. Wasserstoff-Transportkosten erfordern lokale Versorgungsstrukturen. Redundanzen sind schwierig.	4
Lieferantenunabhängigkeit Energie in 2025	Bereitstellung von Grauem oder Grünem Wasserstoff erfolgt über Fahrzeughersteller/Partner. Freie Lieferantenwahl und ein marktgerechtes Preissystem fehlen noch.	1
Versorgungssicherheit Technologiekomp. 2025	Für Brennstoffzellen gibt es nur wenige Anbieter. Triebzug- und Autohersteller konkurrieren bei den Brennstoffzellen-Lieferanten.	3
Lieferantenunabhängigkeit Fahrzeuge in 2025	Die Anzahl von Anbietern und Fahrzeugmodellen ist noch gering. Bis 2025 ist eine breitere Markteinführung von Fahrzeugen zu erwarten.	3
Brennstoffzellen-Triebzug	(6) Infrastrukturfreundlichkeit in 2025	Punkte
Infrastrukturfreundlichkeit Trasse	Der Einsatz des Fahrzeugs erfordert keine neuen Infrastrukturmaßnahmen.	10
Infrastrukturfreundlichkeit Haltepunkt	Der Einsatz des Fahrzeugs erfordert keine neuen Infrastrukturmaßnahmen.	10
Infrastrukturfreundlichkeit Depot	Es ist eine neue Betankungsinfrastruktur im Depot vorzusehen mit entsprechenden Investitionskosten.	0
Instandhaltungsfreundlichkeit Infrastruktur	Wartung der Infrastruktur ist zentral steuerbar, ohne Fahrwegbehinderung. Erhöhte Fehleranfälligkeit insbesondere der Betankungsanlage schränkt die Infrastrukturfreundlichkeit ein.	7

Tabelle 14 **Bewertung des BZ-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (3) bis (6), nach [4]**

5.4 Gewichtung der Basis- und Mittelkriterien

Das grundsätzliche Vorgehen der Nutzwertanalyse ist in → Tabelle 15 wiedergegeben. Betrachtet werden hier beispielhaft die Erfüllungsgrade zweier Alternativen bezüglich des Hauptkriteriums H1. Notenwerte werden auf der Ebene der Basiskriterien vergeben. Auf der Ebene darüber ergibt sich eine Mittel-Note als Skalarprodukt der Benotungen der Alternative innerhalb der betreffenden Basiskriterien-Gruppe mit den entsprechenden Basisgewichten⁹ (in %). Auf der Ebene der Hauptkriterien resultiert jede Haupt-Note wiederum als Skalarprodukt der Mittel-Noten mit den zugehörigen Mittel-Gewichten. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass jedes Basiskriterium seiner Wichtigkeit entsprechend zur Gesamtnote beiträgt.

Es wird deutlich, dass nicht nur die einzelnen Notenwerte, sondern auch die zugehörigen Gewichtungen mit Sorgfalt ermittelt werden müssen, wenn eine angemessene Einschätzung der verschiedenen Triebzugkonzepte erreicht werden soll. Aus diesem Grunde nutzten die Autoren den Abschlussworkshop mit den Teilnehmern der in 2018 durchgeführten Interviews, um die Relevanz der verschiedenen Basiskriterien abzufragen. Hierfür kam ein Online-Befragungstool zum Einsatz, so dass jeder Teilnehmer während des Workshops individuell an dem Kriterien-Voting teilnehmen konnte.

Tabelle 15 **Prinzip der Gewichtung von Kriterienbenotungen und Beispiel**

Haupt-kriterium	Haupt-Note (HN) zu Alternative 1	Haupt-Note (HN) zu Alternative 2	Mittel-kriterium	Gewicht Mittel	Mittel-Note (MN) zu Alternative 1	Mittel-Note (MN) zu Alternative 2	Basis-kriterium	Gewicht Basis	Note Altern. 1	Note Altern. 2
H1	$A1-HN_1 = \alpha_{H1M1} * A1-MN_{11} + \alpha_{H1M2} * A1-MN_{12} + \alpha_{H1M3} * A1-MN_{13}$	$A2-HN_1 = \alpha_{H1M1} * A2-MN_{11} + \alpha_{H1M2} * A2-MN_{12} + \alpha_{H1M3} * A2-MN_{13}$	H1M1	α_{H1M1}	$A1-MN_{11} = A1-N_{111} * \alpha_{H1M1B1} + A1-N_{112} * \alpha_{H1M1B2}$	$A2-MN_{11} = A2-N_{111} * \alpha_{H1M1B1} + A2-N_{112} * \alpha_{H1M1B2}$	H1M1B1	α_{H1M1B1}	A1-N ₁₁₁	A2-N ₁₁₁
							H1M1B2	α_{H1M1B2}	A1-N ₁₁₂	A2-N ₁₁₂
							H1M2B1	α_{H1M2B1}	A1-N ₁₂₁	A2-N ₁₂₁
			H1M2	α_{H1M2}	$A1-MN_{12} = A1-N_{121} * \alpha_{H1M2B1} + A1-N_{122} * \alpha_{H1M2B2} + A1-N_{123} * \alpha_{H1M2B3} + A1-N_{124} * \alpha_{H1M2B4}$	$A2-MN_{12} = A2-N_{121} * \alpha_{H1M2B1} + A2-N_{122} * \alpha_{H1M2B2} + A2-N_{123} * \alpha_{H1M2B3} + A2-N_{124} * \alpha_{H1M2B4}$	H1M2B2	α_{H1M2B2}	A1-N ₁₂₂	A2-N ₁₂₂
							H1M2B3	α_{H1M2B3}	A1-N ₁₂₃	A2-N ₁₂₃
							H1M2B4	α_{H1M2B4}	A1-N ₁₂₄	A2-N ₁₂₄
			H1M3	α_{H1M3}	$A1-MN_{13} = A1-N_{131} * \alpha_{H1M3B1} + A1-N_{132} * \alpha_{H1M3B2}$	$A2-MN_{13} = A2-N_{131} * \alpha_{H1M3B1} + A1-N_{132} * \alpha_{H1M3B2}$	H1M3B1	α_{H1M3B1}	A1-N ₁₃₁	A2-N ₁₃₁
							H1M3B2	α_{H1M3B2}	A1-N ₁₃₂	A2-N ₁₃₂
Haupt-kriterium	Haupt-Note (HN) zu Alternative 1	Haupt-Note (HN) zu Alternative 2	Mittel-kriterium	Gewicht Mittel	Mittel-Note (MN) zu Alternative 1	Mittel-Note (MN) zu Alternative 2	Basis-kriterium	Gewicht Basis	Note Altern. 1	Note Altern. 2
H1	6,9	5,9	H1M1	27 %	7,4	4,7	H1M1B1	57 %	7	3
							H1M1B2	43 %	8	7
							H1M2B1	33 %	7	9
			H1M2	30 %	6,7	7,2	H1M2B2	33 %	8	7
							H1M2B3	17 %	5	5
							H1M2B4	17 %	5	6
			H1M3	43 %	6,7	5,7	H1M3B1	27 %	6	5
							H1M3B2	73 %	7	6

9 Die Summe der Gewichtungen innerhalb einer Basiskriterien-Gruppe ist 100 %.

Tabelle 16 **Einschätzung der Relevanz der Basiskriterien durch Workshop-Teilnehmer (Teil 1)**

Somit ergeben sich die Gewichtungen der Kriterien ausschließlich aus der Online-Befragung der Beteiligten. Die 21 Teilnehmer des Workshops repräsentieren sechs Aufgabenträger, drei Eisenbahnverkehrsunternehmen und vier Hersteller, sowie Infrastrukturgeber und Energieversorger, Forschung und Beratung, wie auch Verbände und Politik. Abgestimmt wurde schrittweise, das heißt jeweils nach einer Erläuterung der Basiskriterien zu einem Mittelkriterium (z. B. der Einsatzflexibilität unter Betriebsfreundlichkeit) gaben die Teilnehmer die aus ihrer Sicht angemessenen Gewichte (in %) dieser Basiskriterien ein. Die Mittelwerte der Abstimmungsergebnisse (alle Teilnehmer bzw. differenziert nach Branchen) finden sich in → Tabelle 16 und → Tabelle 17. Die gemittelten Gewichte der Mittelkriterien zu den darüber liegenden Hauptkriterien (z. B. der Betriebsfreundlichkeit) sind in → Tabelle 18 wiedergegeben.

Betriebs- freundlichkeit	Zuverlässigkeit		Einsatzflexibilität				Sicherheits-Performance	
	Unabhängigkeit bahntypische Störungen	Resilienz Extrem-Außen- temperaturen	Reichweiten- Reserve	Dynamik- Reserve	Fahrgast- kapazitäts- Reserve	Instand- haltungs- freundlichkeit	Sicherheits- Performance Inst. Werkstatt	Sicherheits- Performance Bahnbetrieb
Alle Teilnehmer	58 %	42 %	34 %	30 %	11 %	25 %	36 %	64 %
Aufgabenträger	62 %	38 %	33 %	36 %	15 %	17 %	29 %	71 %
EVU	50 %	50 %	23 %	33 %	10 %	33 %	43 %	57 %
Hersteller	66 %	34 %	35 %	24 %	6 %	35 %	50 %	50 %
Politik/Verbände	68 %	33 %	28 %	28 %	15 %	30 %	28 %	73 %
Forschung/Beratung	73 %	27 %	30 %	32 %	13 %	25 %	43 %	57 %
Infrastruktur/Energie	25 %	75 %	53 %	22 %	5 %	20 %	23 %	77 %

Umwelt- Verträglichkeit	Globale Emissionsvermeidung		Lokale Emissionsvermeidung		Energieeffizienz in 2025		Wirtschaft- lichkeit	Kostenper- formance
	Vermeidung CO ₂ -Emission Fzg/Kmp-Prod.	Vermeidung CO ₂ -Emission Bahnbetrieb	Vermeidung lok. Emission Schadstoffe	Vermeidung Motoren-/ Fahrlärm	Wirkungsgrad Kraftstoff- Produktion	Wirkungsgrad im Bahnbetrieb		Kosten- Performance
Alle Teilnehmer	25 %	75 %	61 %	39 %	40 %	60 %		100 %
Aufgabenträger	30 %	70 %	69 %	31 %	47 %	53 %		100 %
EVU	18 %	82 %	58 %	42 %	47 %	53 %		100 %
Hersteller	24 %	76 %	55 %	45 %	30 %	70 %		100 %
Politik/Verbände	18 %	83 %	43 %	58 %	19 %	81 %		100 %
Forschung/Beratung	15 %	85 %	58 %	42 %	40 %	60 %		100 %
Infrastruktur/Energie	40 %	60 %	73 %	27 %	50 %	50 %		100 %

Größter Wert ist immer fett markiert

Anmerkung: Die Diskussion der Workshop-Teilnehmer insbesondere im Fall der Basiskriterien zur „Einsatzflexibilität“ veranlasste die Autoren, im Nachgang die Titel einiger Kriterien zu präzisieren, um möglichen Missverständnissen vorzubeugen. So wählten sie beispielsweise „Dynamik-Reserve“ anstelle von „Technische Performance“ bzw. „Reichweiten-Reserve“ statt „Konzeptspezifische Reichweite/Tankfahrten“.

Systemdienlichkeit	Energiewende-Tauglichkeit		Infrastrukturplan-Konformität	
	Beitrag zur Sektoren-Kopplung	Beitrag Syst./Netz-Stabilisierung	Synergien Infrastruktur-Nutzung	Synergien Komp. Verfügbarkeit
Alle Teilnehmer	64 %	36 %	54 %	46 %
Aufgabenträger	63 %	38 %	53 %	47 %
EVU	52 %	48 %	57 %	43 %
Hersteller	76 %	24 %	44 %	56 %
Politik/Verbände	63 %	38 %	68 %	33 %
Forschung/Beratung	55 %	45 %	63 %	37 %
Infrastruktur/Energie	70 %	30 %	50 %	50 %

Ressourcen-Verfügbarkeit	Energiebeschaffung		Rollmaterial-Beschaffung	
	Versorgungssicherheit Energie	Lieferanten-Unabhän. Energie	Versorgungssicherheit Tech.Komp.	Lieferanten-Unabhäng. Fahrzeuge
Alle Teilnehmer	63 %	37 %	55 %	45 %
Aufgabenträger	64 %	36 %	48 %	53 %
EVU	65 %	35 %	63 %	37 %
Hersteller	68 %	33 %	60 %	40 %
Politik/Verbände	73 %	28 %	83 %	18 %
Forschung/Beratung	52 %	48 %	53 %	47 %
Infrastruktur/Energie	55 %	45 %	37 %	63 %

Infrastrukturfreundlichkeit	Infrastruktur-Sparsamkeit			Infrastruktur Aufw.verm.
	Infrastruktur-Freundlichkeit Strecke	Infrastruktur-Freundlichkeit Haltepunkt	Infrastruktur-Freundlichkeit Depot	Inst.Freundl. Infrastruktur
Alle Teilnehmer	45 %	21 %	34 %	100 %
Aufgabenträger	59 %	20 %	21 %	100 %
EVU	42 %	25 %	33 %	100 %
Hersteller	22 %	21 %	57 %	100 %
Politik/Verbände	58 %	3 %	40 %	100 %
Forschung/Beratung	55 %	21 %	24 %	100 %
Infrastruktur/Energie	33 %	35 %	32 %	100 %

Größter Wert ist immer fett markiert

Tabelle 17 **Einschätzung der Relevanz der Basiskriterien durch Workshop-Teilnehmer (Teil 2)**

Ressourcen- Verfügbarkeit	Betriebs- freundlichkeit			Wirt- schaft- lichkeit	Umwelt- verträglichkeit			System- Dienlichkeit		Ressourcen- Verfügbarkeit		Infrastruktur- Freundlichkeit	
	Zuver- lässig- keit	Einsatz- flexibilität	Sicher- heits- Perfor- mance		Globale Emissi- ons- vermei- dung	Lokale Emis- sionsver- meidung	Energie- effizienz in 2025	Energie- wende- Tauglich- keit	Infra- struktur- plan- Konfor- mität	Energie- be- schaffung	Roll- material- Beschaf- fung	Infra- struktur- Spar- samkeit	Infra- struktur- Aufwands- vermeidung
Alle Teilnehmer	42 %	28 %	31 %	100 %	29 %	34 %	37 %	54 %	46 %	45 %	55 %	55 %	45 %
Aufgaben- träger	53 %	23 %	24 %	100 %	27 %	43 %	30 %	57 %	43 %	33 %	68 %	51 %	49 %
EVU	38 %	30 %	32 %	100 %	35 %	40 %	25 %	50 %	50 %	55 %	45 %	62 %	38 %
Hersteller	33 %	33 %	34 %	100 %	26 %	31 %	43 %	56 %	44 %	60 %	40 %	56 %	44 %
Politik/ Verbände	58 %	28 %	15 %	100 %	35 %	30 %	35 %	59 %	42 %	34 %	66 %	70 %	30 %
Forschung/ Beratung	40 %	38 %	22 %	100 %	20 %	27 %	53 %	50 %	50 %	52 %	48 %	53 %	47 %
Infrastruktur/ Energie	24 %	18 %	58 %	100 %	39 %	22 %	39 %	53 %	47 %	43 %	57 %	50 %	50 %

Größter Wert ist immer fett markiert

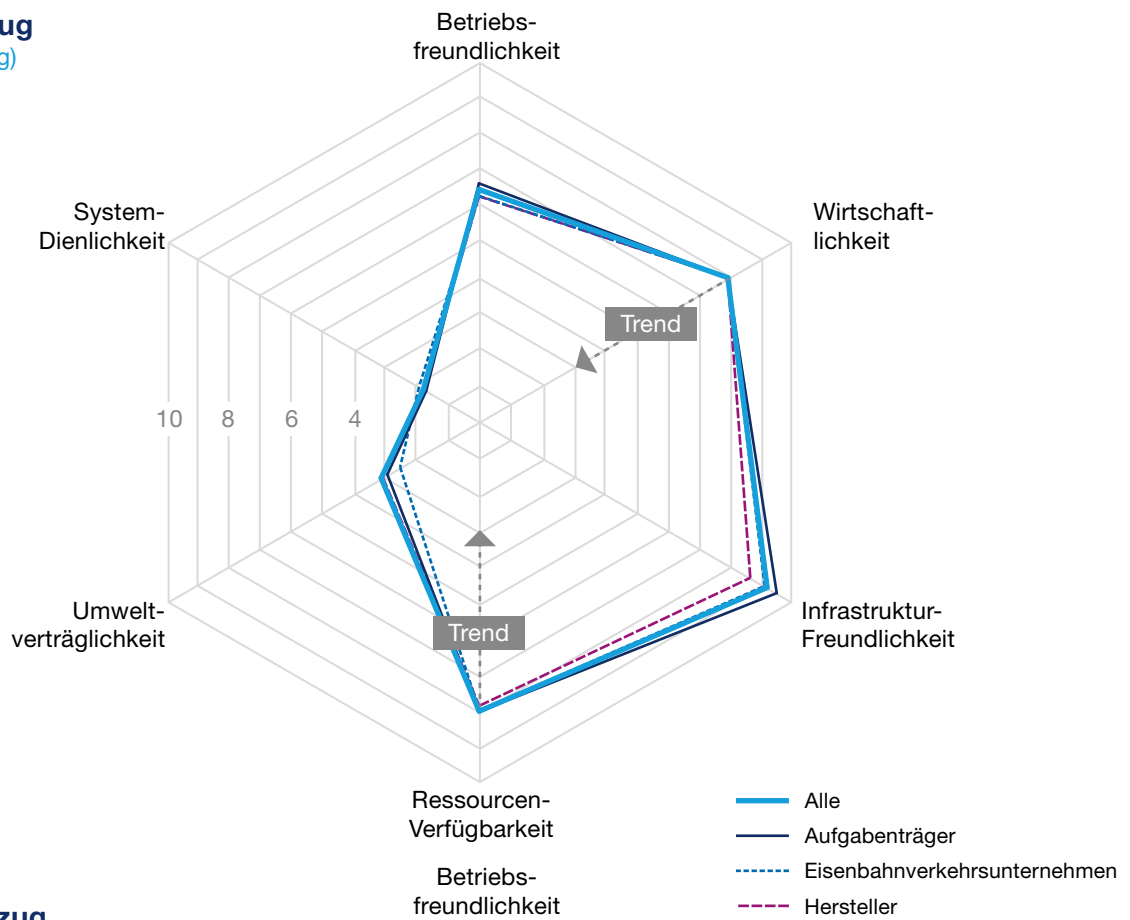
Tabelle 18 **Einschätzung der Relevanz der Mittelkriterien durch Workshop-Teilnehmer**

Die Gewichtungsergebnisse zeigen, dass Basiskriterien, die sich direkt oder indirekt auf den Fahrbetrieb beziehen, durchweg höher eingeschätzt wurden, als solche, welche die Infrastruktur, Energieerzeugung oder Fahrzeugherstellung betreffen. Auf der Ebene der Mittelkriterien wurde Zuverlässigkeit über Einsatzflexibilität, Energieeffizienz über lokaler Emissionsfreiheit, und Verfügbarkeit von Fahrzeugen über Energiebeschaffung gesehen.

5.5 Potenziale der Triebzugkonzepte

Die Zusammenführung der in Abschnitt 5.2.6 vorgestellten Bepunktungen auf Basiskriterien-Ebene mit den in Abschnitt 5.4 zusammengestellten Gewichtungen lässt sich in Form von Netzdiagrammen visualisieren, wie in → Abbildung 46 dargestellt ist. Die Potenziale der vier betrachteten Triebzugkonzepte lassen sich hier deutlich ablesen.

Diesel-Triebzug (keine Oberleitung)



Elektro-Triebzug (nach Elektrifizierung)

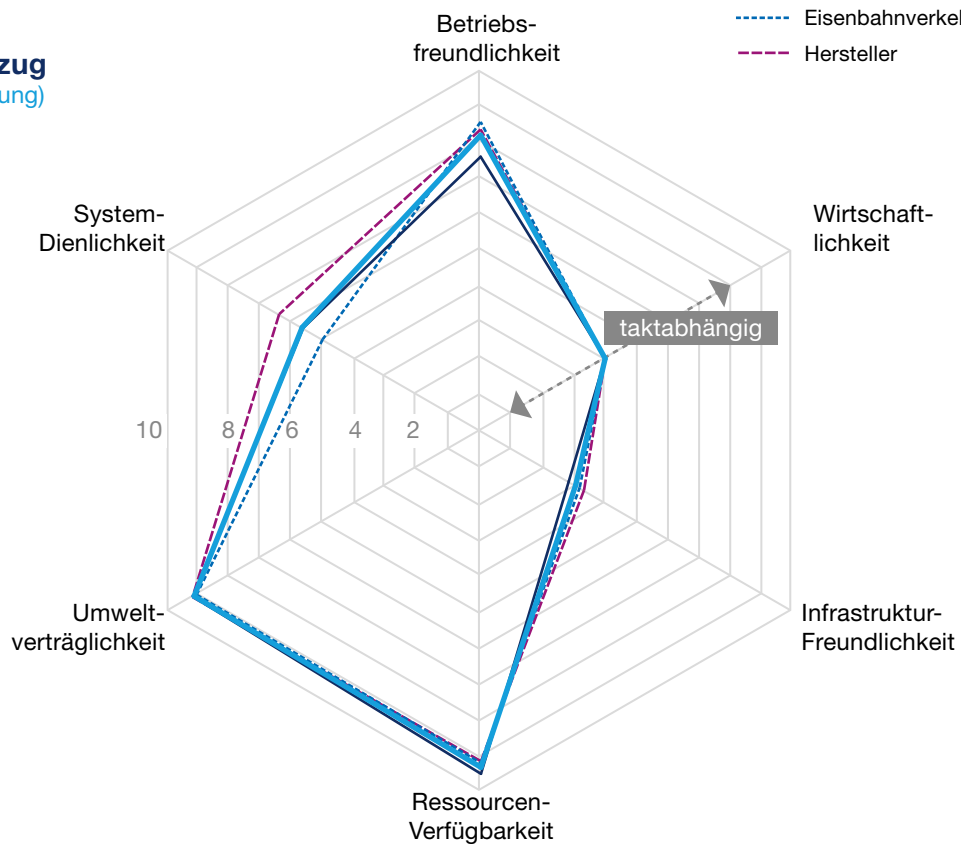
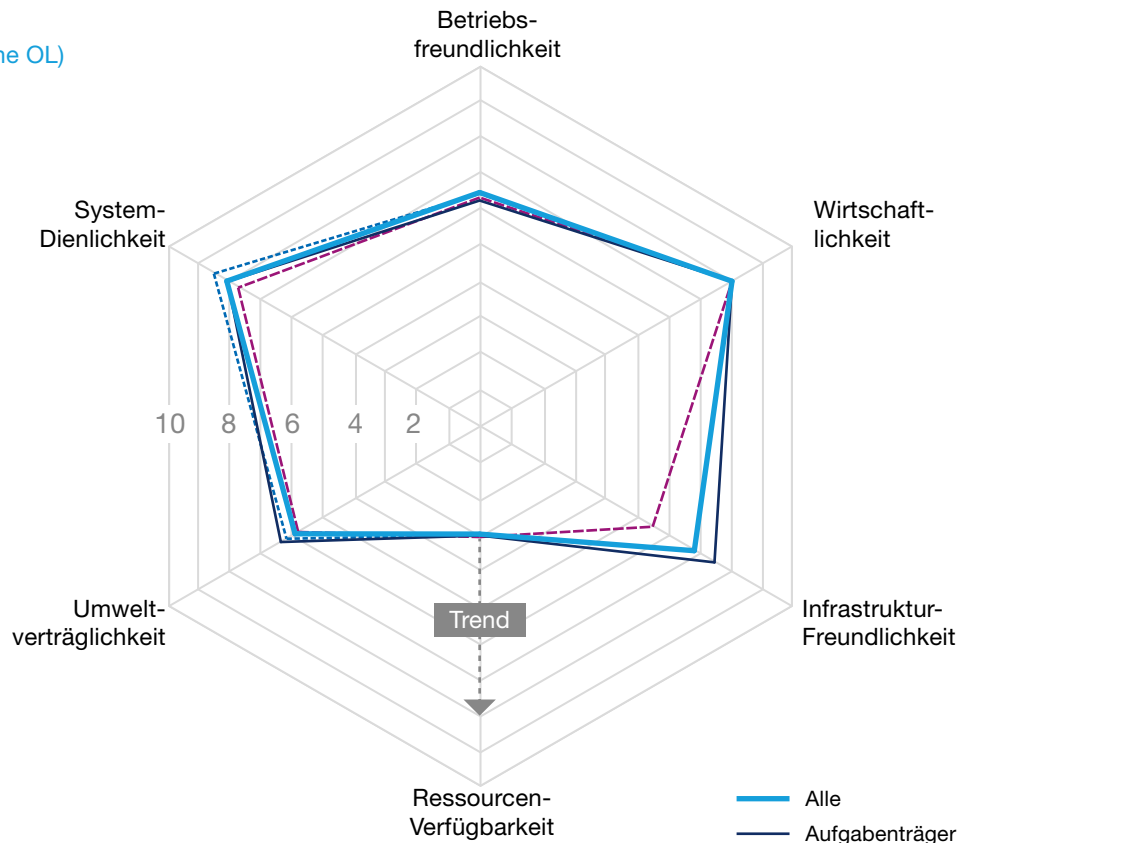


Abbildung 46 Potenziale der vier Triebzugkonzepte (Horizont 2025 und Trends), Darstellung nach [4]

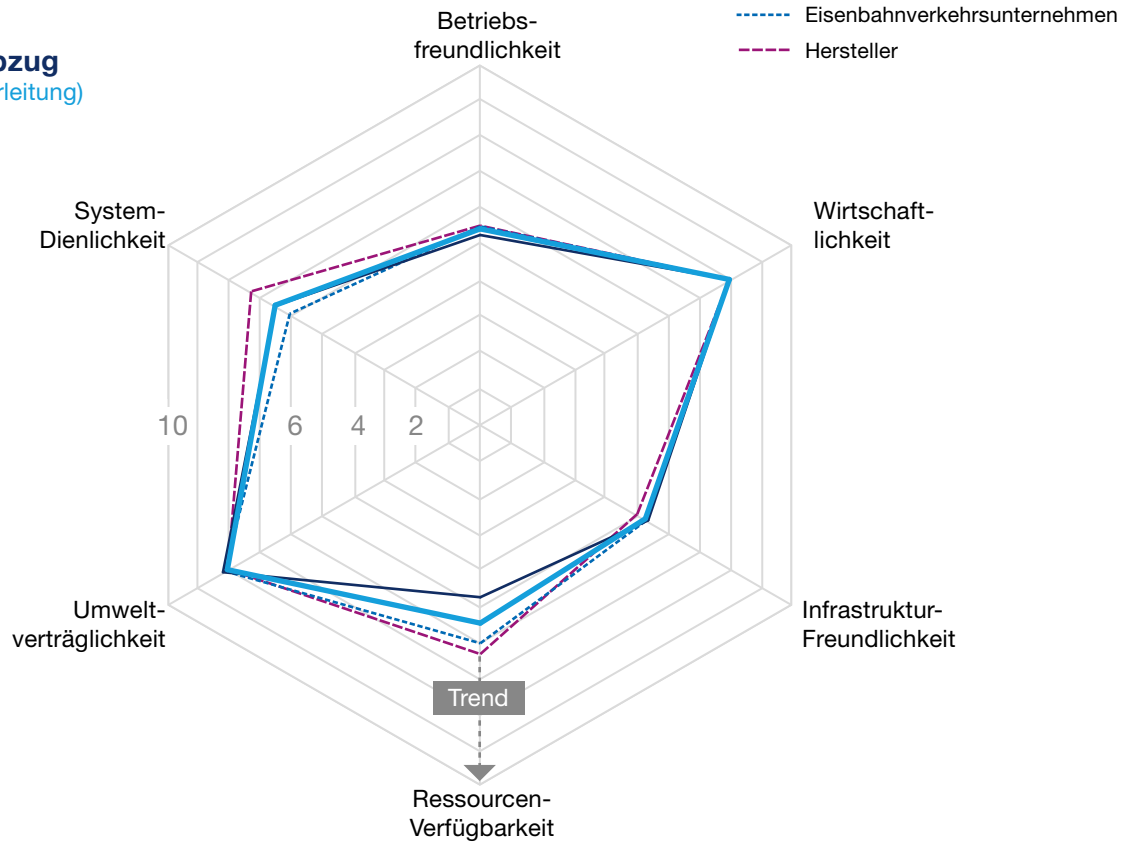
BZ-Triebzug

(Wasserstoff, keine OL)



Batterie-Triebzug

(Laden über Oberleitung)



Vergleicht man das Netzdiagramm zum Dieseltriebzug mit dem des Elektrotriebzugs, so fällt auf, dass die beiden sich in ihrer Gegensätzlichkeit zusammen betrachtet ideal ergänzen – unter den Bedingungen des heutigen SPNV versteht sich, also mit Bahnlinien, die zum Teil nicht elektrifiziert sind. Die Sinnhaftigkeit des Status-Quo ist damit nachvollziehbar. Fahrzeugkonzepte mit alternativen Antrieben müssen sich daran orientieren. Die Netzdiagramme zum Brennstoffzellen- und Batterietriebzug zeigen, dass beide das Potenzial haben, eine Alternative zum Status Quo zu bilden – insbesondere, wenn man sie gemeinsam betrachtet. Die skizzierten Trends für die Zeit nach 2025 unterstützen diesen Eindruck.

Individuell betrachtet lässt sich folgendes feststellen:

Der Einsatz von Dieseltriebzügen auf schwach befahrenen Bahnlinien ist solange sinnvoll, wie übergeordnete Themen wie Umweltverträglichkeit oder Systemdienlichkeit nicht zu Ausschlusskriterien werden. Die in den Medien als Dieselskandal bezeichnete illegale Manipulation von Abgaswerten wird weitere Umweltauflagen und Verbote zur Folge haben. Die Abschaffung der Diesel-Subventionen ist wahrscheinlich und wird den Dieselpreis steigen lassen. Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs von Dieselfahrzeugen wird sich damit verschlechtern, und ein weiterer Rückgang des Dieselfahrzeugmarktes ist denkbar.

Die Schließung von Elektrifizierungslücken auf Bahnlinien des SPNV ist erste Wahl – insbesondere im Hinblick auf Umweltverträglichkeit und Betriebsfreundlichkeit – vorausgesetzt, die in Frage kommenden Linien weisen hinreichend hohe Verkehrsleistungen auf (bei einem Takt unter 1 Stunde) und die erforderlichen Ausbaumaßnahmen sind zügig durchführbar.

Brennstoffzellen-(BZ-)Triebzüge und Batterietriebzüge sind auf Diesellinien im SPNV technisch einsetzbare Alternativen. Vorteil von BZ-Triebzügen ist, dass sie keinerlei Oberleitung benötigen, im Prinzip also Dieseltriebzüge direkt ersetzen können, vorausgesetzt die Betankung mit Wasserstoff ist gesichert. Die Verwendung von (grünem) Wasserstoff ist in hohem Maße systemdienlich, fördert also die Energiewende und die Sektorenkopplung. Nachteilig ist der geringe Wirkungsgrad in Kombination mit anteilig verwendetem „fossilem“ Strom bei der Wasserstoff-Produktion wie auch bei der Umwandlung der im Wasserstoff gespeicherten Energie in Bewegungsenergie. Die Überwindung des bislang bestehenden Nachteils der geringen Auswahl bei Fahrzeugen, sowie fehlender Produktionsstätten und Tankstellen für Wasserstoff ist voraussichtlich nur eine Frage der Zeit (Horizont 2025+).

Die technisch große Ähnlichkeit mit (Oberleitungs-)Elektrotriebzügen und die erforderliche Teilelektrifizierung als Ladeinfrastrukturmaßnahme sind eindeutige Vorteile von Batterietriebzügen, zumal sie der Option der zukünftig durchgehenden Elektrifizierung heutiger Diesellinien nicht im Wege steht. Die effiziente Umsetzung der elektrischen Energie in Bewegungsenergie ohne Umweg über einen anderen Energieträger ist ebenfalls vorteilhaft. Die batteriebedingt eher geringe Reichweite macht den Batterietriebzug zu einem besonderen Konzept, das die Berücksichtigung linienspezifischer Charakteristika erforderlich macht. Die Flexibilität des Einsatzes auf verschiedenen Bahnlinien wird dadurch eingeschränkt.

Dieselvarianten wie solche mit dieselektrischem Antrieb oder hybride Erweiterungen um Pantografen oder Batterien, wurden in der vorliegenden Nutzwertanalyse nicht betrachtet, da sie letztlich nur Zwischenlösungen darstellen. Insbesondere Dieselhybrid-Triebzüge, die durch aufwändige Umrüstungen gebräuchter Dieseltriebzüge entstehen, sind angesichts ihres komplexen technischen Aufbaus, ihrer Kosten und ungewissen Marktnachfrage kaum einschätzbar.

5.6 Fazit zur Nutzwertanalyse und Ausblick

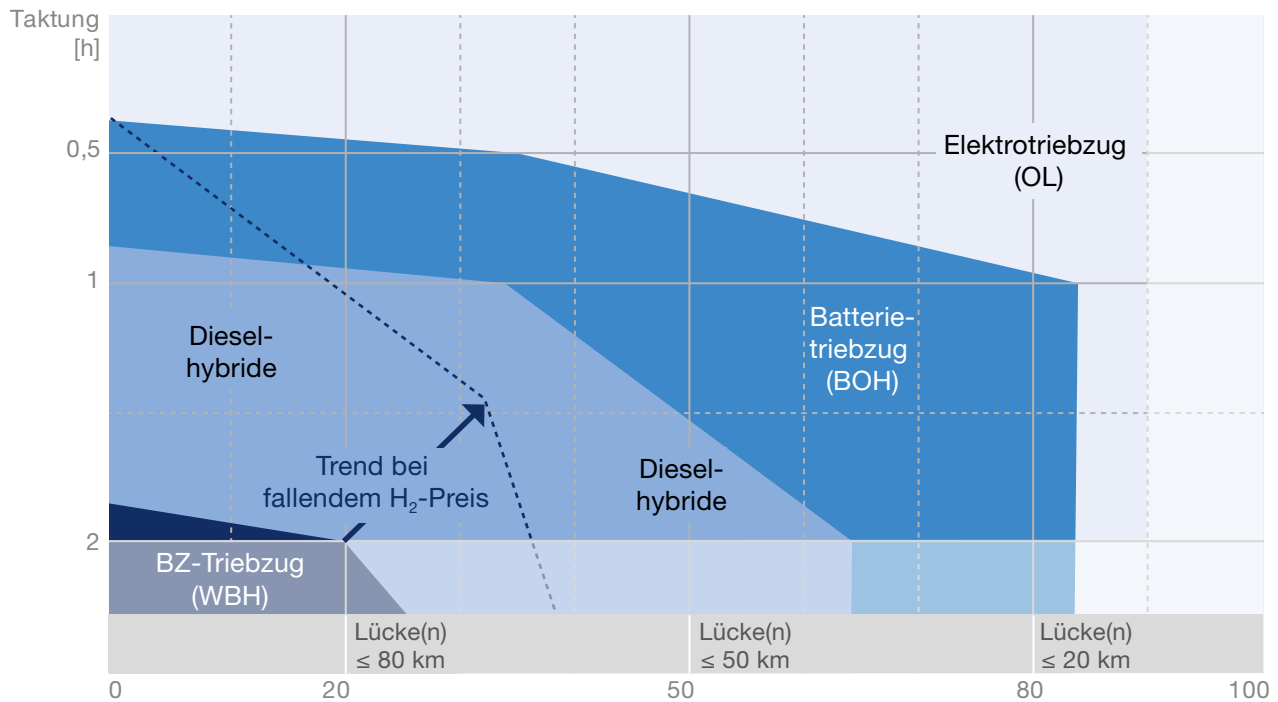
Die Potenzial-Darstellungen in → Abbildung 46 zeigen, dass die Anwendung der Nutzwertanalyse für die Bewertung von Triebzugkonzepten zu plausiblen auswertbaren Ergebnissen führt. Voraussetzung dafür ist, dass den Konzepten hinsichtlich ihrer Erfüllung von Basiskriterien Noten verliehen werden können, und sich die Relevanz der einzelnen Kriterien realistisch einschätzen lässt. Deutlich wurde allerdings auch, dass sich unter den allgemein formulierten Voraussetzungen keine eindeutige Empfehlung für ein bestimmtes Triebzugkonzept ableiten lässt, da sich Vor- und Nachteile der verschiedenen Konzepte letztlich die Waage halten. Um eine betriebswirtschaftliche Bewertung der alternativen Antriebskonzepte (einschließlich Diesel-Hybride) bemühten sich Müller & Stephan in [27]. Dafür führten sie eine Betrachtung der zu erwartenden Kosten über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs (engl. life cycle costs, LCC) durch. Als Modellstrecke wählten sie eine existierende Bahnlinie von circa 100 Kilometern Länge. Ihre Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 19 **Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Untersuchung von Müller & Stephan (qualitativ dargestellt)**

Die betriebswirtschaftliche Bewertung von Alternativen für eine Diesellinie erfordert die Kenntnis (a) ihrer Taktung, (b) des Grades ihrer Vorelektrifizierung und (c) des prozentualen Anteils schwierig zu elektrifizierender Streckenteile.

Takt 0,5 h	70 % leicht zu elektrifizieren					85 % leicht zu elektrifizieren					
bereits elektrifiziert:	0 %	20 %	50	80 %	100 %	0 %	20 %	50 %	80 %	90 %	100 %
1. Wahl	BOH		OL-EMU		OL-EMU	OL-EMU					OL-EMU
2. Wahl	OL-EMU		BOH		OL-EMU	BOH					OL-EMU
Ungünstigste Wahl	WBH					WBH					
Takt 1 h	70 % leicht zu elektrifizieren					85 % leicht zu elektrifizieren					
bereits elektrifiziert:	0 %	20 %	50	80 %	100 %	0 %	20 %	50 %	80 %	90 %	100 %
1. Wahl	Diesel-Hybrid		BOH		OL-EMU	Diesel-Hybrid		BOH	OL-EMU		OL-EMU
2. Wahl	BOH		Dual-Mode	OL-EMU	OL-EMU	BOH		OL-EMU	BOH		OL-EMU
Ungünstigste Wahl	OL-EMU	WBH				WBH					
Takt 2 h	70 % leicht zu elektrifizieren					85 % leicht zu elektrifizieren					
bereits elektrifiziert:	0 %	20 %	50 %	80 %	100 %	0 %	20 %	50 %	80 %	90 %	100 %
1. Wahl	Diesel-Hybrid			BOH	OL-EMU	Diesel-Hybrid			Dual-Mode	BOH	OL-EMU
2. Wahl	Dual-Mode				OL-EMU	Dual-Mode			BOH	OL-EMU	OL-EMU
Ungünstigste Wahl	OL-EMU			WBH		OL-EMU		WBH			

70 % der Bahnlinie sind leicht zu elektrifizieren



85 % der Bahnlinie sind leicht zu elektrifizieren

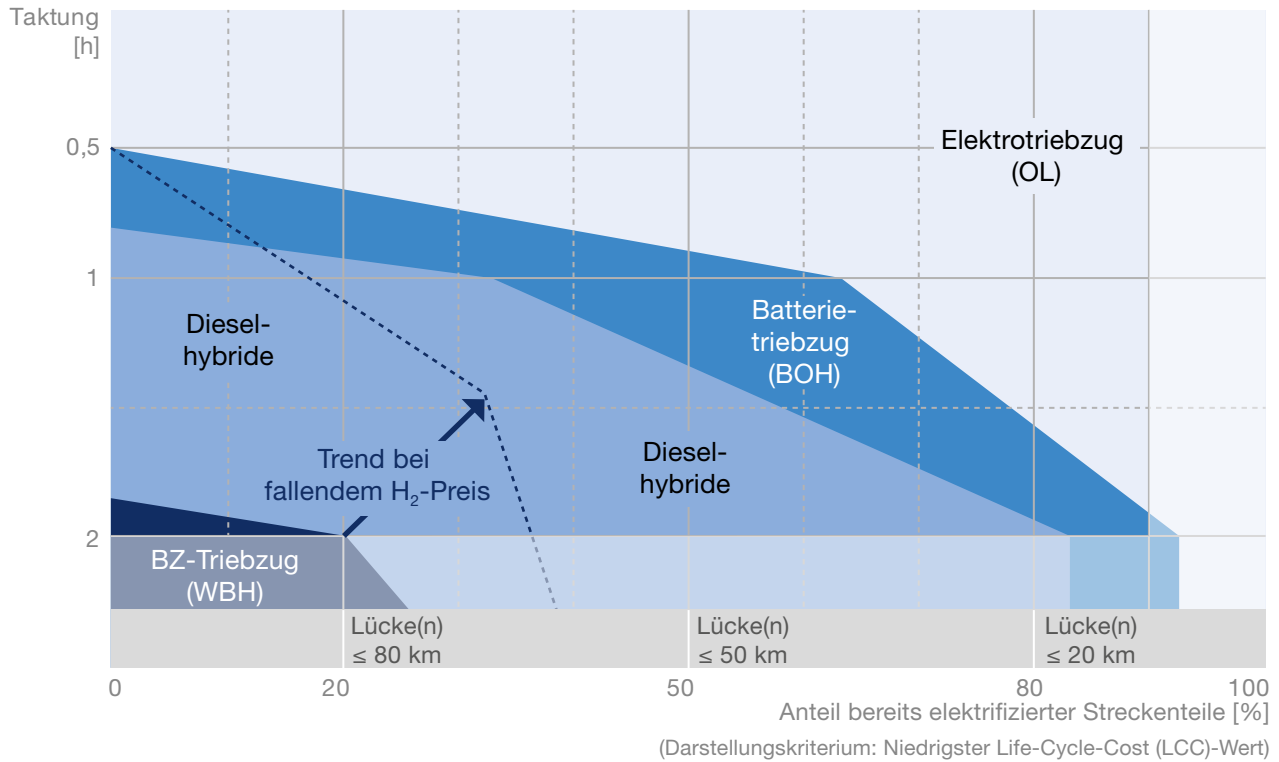


Abbildung 47 Visualisierung der LCC-Betrachtungen zu den Alternativen, nach [4]

Die Taktung ist hierbei der stärkste Hebel: Im Falle dichter Befahrung (Takt $\leq 0,5h$) ist die vollständige Elektrifizierung der Bahnlinie die beste Option. Im Falle eines 1h-Taktes hängt es vom vorhandenen Elektrifizierungsgrad und dem zu erwartenden Aufwand für die Vervollständigung der Elektrifizierung ab, welche Alternative pekuniär die beste ist. Interessanterweise kommt man in der Studie zu der Einschätzung, dass Dieselhybride im Falle eines Elektrifizierungsgrades von weniger als 25 % die günstigste Option darstellen, während der Brennstoffzellenzug in allen Fällen als die unwirtschaftlichste Lösung eingeschätzt wird. Als Gründe für dieses negative Urteil wurden genannt: (1) Elektrolytisch gewonnener Wasserstoff kostet mehr als 5 €/kg; (2) die Lebensdauer der HiTech-Komponenten Brennstoffzelle und Dynamikbatterie ist gering; (3) die neu benötigte Wasserstoff-Tankinfrastruktur ist relativ teuer. Diese Einschätzung berücksichtigt nicht die Möglichkeit signifikanter Fortschritte bei der Weiterentwicklung der Technologiekomponenten in den nächsten Jahren. Auch die Systemdienlichkeit ‚Grünen Wasserstoffs‘ bleibt unberücksichtigt. → Tabelle 19 fasst die Ergebnisse der Untersuchung von Müller & Stephan qualitativ zusammen.

→ Abbildung 47 bemüht sich um eine Visualisierung dieser qualitativen Ergebnisse. Für die Darstellung wurde der Fokus – der Zielsetzung der vorliegenden Studie entsprechend – auf die Einordnung der emissionsfreien Alternativen gelegt, das heißt, die Dieselvarianten sind hier weder als erste noch als zweite Wahl eingeordnet. Damit rückt der Brennstoffzellen-Triebzug (WBH) in die Position einer ersten Wahl und deckt dabei einen großen Teil des Dieseltriebzug-Segments ab. Wichtig ist, darüber hinaus zu beachten, dass die Modellstrecke eine Länge von 100 Kilometern hat: Beträgt der Vor-Elektrifizierungsgrad beispielsweise 60 % kann die zu überbrückende Lücke höchstens 40 Kilometer lang sein. Ein Batterietriebzug müsste auf dieser Strecke sicherlich nicht zwischenladen.

Dieseltriebzüge (DM) sind heute auf schwach befahrenen Bahnlinien mit geringer Vor-Elektrifizierung gut eingesetzt solange Umweltaspekte nicht greifen. Abhängig vom Wasserstoffpreis haben Brennstoffzellenzüge (WBH) grundsätzlich das Potenzial, auf solchen Bahnlinien Dieseltriebzüge direkt zu ersetzen. Durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnener Wasserstoff kostet bereits heute weniger als 2 €/kg [31]. Der Preis elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs wird sich langfristig daran orientieren. Die gestrichelte Linie in → Abbildung 47 signalisiert, dass sich die Kosten-Performance des BZ-Zuges bei fallendem Wasserstoffpreis soweit verbessern ließe, dass er für höher getaktete SPNV-Linien statt Elektro- oder Batterietriebzug als Diesel-Alternative in Frage käme. Der Batterietriebzug wiederum eignet sich umso weniger als Diesel-Alternative, je höher der Vor-Elektrifizierungsgrad der Bahnlinie ist, denn bei hohen Prozentwerten wird der Elektrotriebzug zur ersten Wahl.

Eine rein betriebswirtschaftliche Bewertung der Alternativen führt offenbar auch nicht zu einer universellen Empfehlung für ein bestimmtes Triebzugkonzept. In der Praxis setzt die Empfehlung eines emissionsarmen oder emissionsfreien Konzeptes für eine Bahnlinie voraus, dass bestimmte Informationen über diese Linie vorliegen. Diese sind aus Sicht der Autoren:

- Länge sowie Höhen- und Kurvenprofil der betrachteten Bahnlinie
- Länge der nichtelektrifizierten Streckenteile der Bahnlinie
- Lage und Abstände der Haltestellen
- Fahr- und Umlaufzeiten auf der Bahnlinie
- Linien-Taktung, Tages-/Wochenfahrplan
- Beschleunigungs- und Bremswege, zulässige Geschwindigkeiten auf der Bahnlinie
- Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten für Heizung, Klima, Licht, WLAN etc.
- Haltezeiten in Stationen und Wendezeiten
- Anzahl parallele Gleise (1-/2-/n-gleisig)

Für eine weitergehende Analyse sind zusätzlich folgende Informationen relevant:

- Anzahl der Triebzüge, die auf der Bahnlinie zum Einsatz kommen
- Abstellzeiten der Triebzüge (z. B. über Nacht etc.)
- Notwendige Fahrgastkapazität auf der Bahnlinie (ggf. inkl. Reserve-Puffer)
- Einstiegshöhen an den Bahnsteigen der Haltepunkte entlang der Bahnlinie
- Ggf. Lage der Dieseltankstellen / Lage des nächsten Depots entlang der Bahnlinie
- Ggf. Lage von Wasserstoff-Produktionsstätten (Elektrolyse, Erdgas-reformierung) oder von Wasserstoff-Pipelines

Für den Fall, dass eine vollständige Elektrifizierung der Bahnlinie als Option gesehen wird, sind unter anderem folgende zusätzlichen Informationen von Interesse:

- Vorhandensein eines Elektrifizierungsplans
- Innenhöhe und Länge von Tunneln auf der Bahnlinie
- Anzahl der Bahnübergänge für Sonderfahrzeuge (z. B. Schwertransporte)
- Verkehrstage des Güterverkehrs auf dieser Linie

Anhand der Informationen zu einer Reihe von repräsentativen Diesellinien in verschiedenen Bundesländern, sollen im Rahmen des nächsten (des dritten) Teilprojektes weitergehende, noch spezifischere Nutzwertanalysen durchgeführt werden. Das Ergebnis wird erneut eine Studie sein, deren Gelingen wieder in hohem Maße von der Bereitschaft der direkt oder mittelbar am Entscheidungsprozess beteiligten Parteien abhängen wird, sich an Workshops und individuellen Interviews zu beteiligen.

6 Resümee und Empfehlungen

Alternativen zu Diesellinien müssen individuell betrachtet werden

Es gibt nicht die eine ideale Alternative, welche sich für alle Diesellinien in Deutschland gleichermaßen eignet. Entscheider, für die eine neue Verkehrsausschreibung ihrer Bahnnetze ansteht, kommen nicht umhin, für jede Diesellinie individuell zu prüfen, welche Alternative tatsächlich die beste ist. Ihre Wahl hängt auch davon ab, welche Pläne es für die betrachtete Bahnlinie bereits gibt. Sie werden sich zum Beispiel fragen müssen:

- Ist langfristig mit einer Veränderung des Fahrgastaufkommens zu rechnen?
- Konkurriert die Bahnlinie mit der Straße oder ergänzen sich beide verkehrstechnisch?
- Ist es eine für Touristen oder für Pendler interessante Strecke?
- Gibt es Bedarf, die Taktung der Züge auf der Strecke zu verändern?
- Hat die Bahnlinie das Potenzial, die Entwicklung der Region zu fördern?
- Ist es langfristig sinnvoll, die Bahnlinie durchgehend zu elektrifizieren?
- Gibt es bereits regionale Strukturen für Wasserstoff oder entstehen Synergien durch dessen Nutzung?

Welche Triebzugalternative in der Ausschreibung berücksichtigt wird und in die Verträge mit den Verkehrsunternehmen einfließt, hängt unter anderem davon ab, welche Antworten der Aufgabenträger zu Fragen wie oben findet. Bei seiner Entscheidungsfindung kann er davon ausgehen, dass die alternativen Antriebe ihrem spezifiziertem Anwendungsbereich und den geltenden Qualitätsanforderungen entsprechend funktionieren und die zugrundeliegenden Technologien sich ständig weiterentwickeln werden. Zudem wird sich der entsprechende Fahrzeugmarkt stetig vergrößern.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Analyse einer einzelnen Diesellinie nicht hinreichen wird, eine harte Entscheidung für ein neues Triebzugkonzept zu rechtfertigen, insbesondere wenn es um nur wenige Fahrzeuge geht. Die Entscheidung wird die Belange des gesamten Ausschreibungsnetzes berücksichtigen müssen, also den Einsatz der neuen Fahrzeuge im Flottenverband und ihr wirtschaftlicher Betrieb.

Mobilitäts-, Umwelt- und Klimaziele machen die Entscheidungsfindung komplex

Dennoch ist die Entscheidung für ein neuartiges Triebzugkonzept nicht einfach und eine Herausforderung für alle Beteiligten. Sie steht im Spannungsfeld zwischen politisch und gesellschaftlich vorgegebenen Zielen der Entwicklung der Mobilität, des Umwelt- und Klimaschutzes, wie auch der Sicherstellung des regionalen Schienenverkehrs als Daseinsvorsorge, der Einhaltung von Standards für Service, Komfort und Pünktlichkeit, der Bereitstellung und Instandhaltung der erforderlichen Infrastruktur, der Verfügbarkeit von Fahrzeugflotten und nicht zuletzt des bestimmungsgemäßen Einsatzes der vom Bund bereitgestellten Regionalisierungsmittel.

Das Überforderungspotenzial und die Gefahr einseitig motivierter Einflussnahmen durch Interessengruppen ist gegeben. Umso mehr empfiehlt es sich, die Entscheidungsfindung zu ent-emotionalisieren und mit Hilfe objektiver analytischer Verfahren zu Lösungen zu kommen. Die Nutzwertanalyse erweist sich als geeignete Methodik.

Neben ‚Alternativen Antrieben‘ gibt es weitere ähnlich komplexe Entscheidungsprobleme

Das Thema Alternativen zum Einsatz von Dieseltriebzügen im SPNV ist ein Beispiel für ein komplexes Entscheidungsproblem. Die Digitalisierung der Schiene, der Deutschland-Takt oder die Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene stellen ähnlich komplexe Herausforderungen dar. Auch hier stehen die Entscheider vor dem Problem, aus verschiedenen Optionen die aus heutiger Sicht beste für die Zukunft herausfiltern zu müssen.

6.1 Rolle der Aufgabenträger

Die Neuorganisation der Zuständigkeiten und der Verantwortung im Bereich des SPNV hat nachweislich zu einer Verbesserung des Angebots und auch der Wirtschaftlichkeit ihres Betriebes geführt. Das Besteller-Ersteller-Prinzip (vgl. → Abschnitt 2.3), welches die Trennung zwischen der politischen und unternehmerischen Ebene herstellt, hat sich bewährt. Der Erfolg lässt sich an der gestiegenen Verkehrs- und Betriebsleistung ablesen.

Aufgabenträger müssen heute wesentlich komplexere Entscheidungen treffen als früher

Nebenwirkungen der erfolgreichen Steigerung der Attraktivität des Nahverkehrs sind die zunehmende Überlastung der Hauptstrecken, wachsende Unzufriedenheit der Fahrgäste wegen Qualitätsmängeln und Verspätungen wie auch gesteigerte Erwartungen an den Betrieb von Nebenstrecken. Drohende Dieselfahrverbote auch in Bahnhöfen und die Erwartung, dass vollständig emissionsfreier Schienenverkehr die Dekarbonisierung des gesamten Verkehrs bis 2050 mit einleitet, erhöht den Druck der Verantwortung vor allem der Aufgabenträger.

In der Vergangenheit waren Fahrzeugentscheidungen im SPNV relativ einfach: Auf Bahnlinien mit durchgehender Oberleitung ließen sich leistungsstarke Elektrotriebzüge einsetzen. Fehlte die Oberleitung oder wies sie vereinzelt Lücken auf, kamen nur Dieseletriebzüge in Frage, die überwiegend leistungsschwächer sind und zudem geringere Fahrgast-Transportkapazitäten haben. Dieser Nachteil war unproblematisch, da es sich ohnehin in der Regel um Nebenlinien mit geringem Verkehrsleistungsbedarf handelte. Mit technischen Details von Antriebstechnologien und deren Energieversorgung mussten sich Aufgabenträger selten auseinandersetzen.

Die Komplexität hat sich für Aufgabenträger inzwischen wesentlich erhöht. Es heißt nicht mehr einfach nur: „Diesel oder Elektrisch?“. Zu entscheiden gilt es nun auch:

- Elektrifizieren oder nicht elektrifizieren?
- Deselelektrisch oder Dieselmotorsch?
- Dual-Mode oder Dieselhybrid?
- Dieselmotorkraftstoff oder Synthetischer Kraftstoff?
- Wasserstoff oder Batterie?

Elektrifizierung ist im Allgemeinen eine Angelegenheit des Bundes. Hier stellt sich sofort die Frage, wann der richtige Zeitpunkt ist, mit den Verantwortlichen über den Sinn von Elektrifizierungsmaßnahmen zu sprechen.

Regionale Interessen stehen über intensivem Erfahrungsaustausch von Aufgabenträgern

Die schwierige Suche nach emissionsreduzierten oder emissionsfreien Antriebsalternativen ist ein Beispiel dafür, dass die gegebenen Strukturen im SPNV kaum hinreichen, um komplexe Entscheidungen zu treffen. Insbesondere gilt dies, wenn tiefes technologisches und systemisches Wissen benötigt und weiterhin der Anspruch erhoben wird, die Attraktivität des SPNV und die Wirtschaftlichkeit des Betriebes zu bewahren.

Die Tragweite und das mit der Entscheidung übernommene Risiko überfordern insbesondere kleinere Aufgabenträger, deren Anteil an den Regionalisierungsmitteln gering ist. Das Rad scheint regional ständig neu erfunden werden zu müssen, denn es fehlt der nötige Erfahrungsaustausch zwischen den Aufgabenträgern oder gar ein gemeinsamer Aktionsplan – wie die 27 Interviews mit Akteuren im Bahnsektor zeigten. Die zuständigen Verbände kümmern sich eher um grundsätzliche Themen, wie die Investition in die Schieneninfrastruktur, Digitalisierung und ähnlichem. Sie haben kaum Kapazität, um sich mit technischen Abstimmungsdetails außerhalb der Arbeitskreise, beispielsweise der BAG-SPNV, zu befassen.

Überlastung der Aufgabenträger führt zu veränderten Entscheidungs- und Einflusstrukturen

Aufgabenträger fühlen sich von der Politik und den bundeseigenen Bahnunternehmen oft im Stich gelassen. Insbesondere, wenn sie kommunal in Zweckverbänden und Verkehrsverbünden organisiert sind, fehlt ihnen das Personal, um wichtige Technologieentscheidungen vorantreiben zu können. Tatsächlich sind sie mit der Planung und Verwaltung ihrer Nahverkehrslinien und dem Controlling ihre Partner-EVU bereits vollständig ausgelastet.

Umso mehr hängen Aufgabenträger bei Fahrzeugentscheidungen von der technologischen Expertise der Hersteller ab. Diese Abhängigkeit zeigt sich auch darin, dass die Verantwortung für Instandhaltung und Wartung selbst im Falle von Elektrotriebzügen zunehmend auch an Fahrzeughersteller übertragen wird, obwohl diese Aufgabe zum Kern-Knowhow von Verkehrsunternehmen mit eigenen Werkstätten zählt. Im Falle alternativer Antriebe soll diese als Verfügbarkeitsmodell bezeichnete Verantwortung in erster Linie auf die Hersteller der entsprechenden Fahrzeuge übertragen werden. Beim Brennstoffzellenzug wird zusätzlich auch noch für die Bereitstellung des Wasserstoffs durch den Hersteller erwartet. Sie erhalten damit die vollständige Verantwortung für die Sicherstellung der Verfügbarkeit der Fahrzeuge im Bahnbetrieb.

Langfristig erhöhte Verantwortung setzt erheblich mehr Personal und Expertise beim Aufgabenträger voraus

In der neuen Konstellation mit Verkehrsunternehmen und Herstellern fällt den Aufgabenträgern heute eine außerordentlich hohe Verantwortung zu. Denkbar ist, dass sich die Situation wieder entspannt, sobald sich die neuen Technologien durchgesetzt haben und Fahrzeuge in hinreichender Auswahl und Anzahl zur Verfügung stehen. Spätestens dann wäre es auch angemessen, EVU wieder mit Instandhaltung und Wartung der von ihnen genutzten Fahrzeuge zu betrauen, zumal dann die Fahrzeugkosten und die Geschäftsrisiken wieder geringer sein werden. Sollte die Entspannung hingegen nicht eintreten, wird man nicht umhin kommen, das Personal und die Expertise der Aufgabenträger erheblich und nachhaltig aufzustocken.

6.2 Potenziale für Fahrzeughersteller

Die Firma Alstom zählt zu den wenigen Herstellern, die noch Dieseltriebzüge produzieren und erfolgreich vertreiben. Alle anderen Hersteller haben sich in den letzten Jahren bereits aus diesem Markt verabschiedet und fokussieren sich auf ihre zukunftsicheren Elektrotriebzüge. Dieselhybride als emissionsärmere Alternative zu Triebzügen mit dieselmechanischem oder dieselektrischem Antrieb, erschien den Herstellern bislang nicht zukunftsicher, da ihre Sorge überwog, für Brückenlösungen nicht genügend Abnehmer zu finden.

Hohe systemische Kompetenz und viel Eigeninitiative machen Hersteller zu starken Partnern

Fahrzeuge mit alternativen Antrieben beschränken sich vorerst auf wenige Exemplare. Entwickelt wurden sie mehr oder weniger in Eigeninitiative, zum Teil gefördert mit Mitteln des Bundes. Wichtiger Auslöser dieser Aktivitäten war die Serienverfügbarkeit hinreichend großer Batterien und geeigneter Brennstoffzellen. Vorgaben seitens der Aufgabenträger oder Verkehrsunternehmen gab es kaum, weder zu emissionsärmeren noch zu emissionsfreien Konzepten. So blieb den Herstellern nichts anderes übrig, als eigeninitiativ zu handeln und viele Jahre lang Werbung für ihre neuen zukunftsfähigen Konzepte zu machen.

Als die Zeit auch dank Dieselskandal endlich reif war, musste plötzlich alles sehr schnell gehen – so die Hersteller in den Interviews. Die Erwartungen der Entscheider an die Leistungsfähigkeit der neuen Konzepte waren nun zum Teil völlig überzogen, obwohl es letztlich nur um den Ersatz bislang eher leistungsschwacher Dieseltriebzüge ging.

Die Flexibilität und Leistungsfähigkeit der in Deutschland ansässigen Fahrzeughersteller lässt sich daran ablesen, wie schnell es ihnen gelang, ihre Triebzüge mit alternativen Antrieben zu realisieren. Die Performance der Hersteller offenbart sich auch in ihrer hohen Systemkompetenz, die sie zu einflussreichen Beratern der Aufgabenträger macht. Die Hersteller haben die Fahrzeuge als technisch gleichwertigen Ersatz für gewöhnliche Dieseltriebzüge konzipiert. Viele Aufgabenträger benötigen für die Einhaltung ihrer Fahrpläne jedoch die Performance eines übermotorisierten RegioShuttle RS1, die heute von keiner der angebotenen Alternativen auf oberleitungsfreien Strecken erreicht wird. Hier besteht also noch erweiterter Abstimmungsbedarf.

Die strukturelle Schwäche der Entscheidungsorganisationen zahlt sich für die Hersteller aus

Die Bereitschaft der Hersteller, Verantwortung und Risiken zu übernehmen, zahlt sich für sie aus: Ihnen wird die Instandhaltung und Wartung der Fahrzeuge übertragen, und sie gewinnen so die Möglichkeit, die Erprobung ihrer Züge zu begleiten und Verbesserungspotenziale für deren Weiterentwicklung zu nutzen. Ihre Beteiligung am Infrastrukturaufbau, zum Beispiel im Falle der Wasserstoff-Tankstellen, bietet ihnen eine weitere Chance, ihre Geschäftstätigkeit bei Bedarf in andere Felder auszuweiten. Natürlich besteht die Gefahr, dass die Aufgabenträger zum alten Status-Quo zurückkehren und Hersteller sich zukünftig wieder auf ihre alte Rolle beschränken müssen, als unter großem Wettbewerbsdruck stehende Anbieter von Fahrzeugen aufzutreten.

6.3 Zukunft der Eisenbahnverkehrsunternehmen

Die Öffnung des Schienennetzes für mehr Wettbewerb im Nahverkehr war eines der wichtigsten Ziele der Bahnreform in den 1990er Jahren. In deren Folge war 1999 die DB Regio als Tochter der Deutschen Bahn AG gegründet worden. Die DB Regio AG erbte damals den gesamten Fahrzeugpool, die Instandhaltungswerkstätten und das Fachpersonal. Die neuen Wettbewerber sind wesentlich kleinere, flexible und auf den reinen Fahrbetrieb fokussierte Unternehmen. Damit setzen sie die DB Regio unter Druck, selbst wenn diese heute noch über einen komfortablen Marktanteil von 67 Prozent verfügt.

Die Situation der EVU könnte sich wieder in Richtung mehr Wertschöpfung entwickeln

Es stellt sich die Frage, in welche Richtung sich das Aufgabenspektrum der Eisenbahnverkehrsunternehmen künftig entwickeln wird. Ist das die Hersteller bevorzugende Verfügbarkeitsmodell für die Fahrzeug-Instandhaltung und -Wartung von Dauer? Wird Instandhaltung in dieser Konstellation langfristig den Bedürfnissen und Verfügbarkeitsanforderungen der EVU gerecht? Ist das enge Zusammenwirken von Fahrzeugbetrieb und -Instandhaltung nicht essentiell für die Sicherstellung der Betriebsqualität? Es erscheint wahrscheinlich, dass sich die Wertschöpfung der EVU im Hinblick auf Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zukünftig wieder vertiefen wird, und zwar spätestens, wenn die neuen Technologien etabliert haben und die Vielfalt der Modelle und Hersteller sich dank verstärkter Nachfrage ausgeweitet hat.

Das bedeutet für EVU, ihre Instandhaltungskompetenz aufrecht zu erhalten. So gesehen ist das EcoTrain-Projekt von DB Regio auch ein Vorgehen, das Kompetenz schafft und bewahrt.

Verkehrsunternehmen sehen die aktuellen Entwicklungen skeptischer als die Aufgabenträger

EVU sind bei der Wahl des Fahrzeugkonzeptes für eine Bahnlinie bislang meist außen vor. Sie treten erst mit dem Gewinn der Ausschreibung und dem Abschluss ihres Verkehrsvertrages mit dem Aufgabenträger auf den Plan. Zu diesem Zeitpunkt bleibt ihnen nichts anderes übrig, als die getroffene Entscheidung des Aufgabenträgers umzusetzen. So ist es verständlich, dass Eisenbahnverkehrsunternehmen die aktuellen Entwicklungen eher skeptisch sehen. Mit dem Wegfall ihrer Instandhaltungsfunktion sinkt ihre Wertschöpfung. Dennoch sind sie weiterhin erster Ansprechpartner ihrer Fahrgäste, wenn es Probleme mit der neuen Fahrzeugtechnik gibt. So notwendig und effektiv es ist, dass EVU sich ausschließlich auf den Fahrbetrieb fokussieren, mit dieser Einschränkung können sie sich in der Angebotsphase von ihren Wettbewerbern nur über den Preis und damit über die Personalkosten differenzieren. Es stellt sich die Frage, ob die anstehenden Herausforderungen so bewältigbar sind.

6.4 Herausforderungen der Infrastruktur

Die Elektrifizierung einer Bahnlinie ist betriebswirtschaftlich nur zu rechtfertigen, wenn hohe Beförderungsleistung eine enge Taktung erfordert. Nicht-elektrifizierte SPNV-Linien sind jedoch meist wenig befahrene Nebenstrecken. Der Nutzen, den Elektrifizierung auch dem Fern- und Güterverkehr bringt, lässt sich ökonomisch kaum beziffern und spielt bei der Kosten-Nutzen-Bewertung letztlich keine Rolle. Den Verantwortlichen bleiben damit drei Möglichkeiten:

- Die Strecke ist im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) bereits vorgesehen;
- Die Strecke wird im BVWP höher priorisiert, weil als vordringlich eingestuft;
- Die Elektrifizierung kann aus regionalen Mitteln finanziert werden.

Unwägbarkeiten von Elektrifizierungsprojekten brauchen Abfederung durch einen Plan B

Der Entscheidung für die Elektrifizierung folgt ein Planfeststellungsverfahren, bei dem der Zeitpunkt des Abschlusses nicht fixierbar ist, da er von verschiedenen Faktoren abhängt. Diese Planungsunsicherheit zwingt den Entscheider, stets einen Plan B in der Hinterhand zu haben, falls sich die Elektrifizierung bis zum Auslaufen des aktuellen Verkehrsvertrages nicht rechtzeitig fertigstellen lässt.

Die Ladeinfrastruktur für Batterietriebzüge erfordert vorausschauende Planung

Die Infrastruktur für Batterietriebzüge bedarf genauer Planung und letztlich einen Abgleich der Herstellerdaten mit den vorgegebenen Fahrplänen, denn der Energieverbrauch des Fahrzeugs auf den oberleitungsfreien Streckenteilen hängt in hohem Maße vom Fahrlastprofil ab.

Im Idealfall ist die zu überbrückende Lücke so klein, dass das Laden der Batterien keine zusätzlichen Oberleitungen erforderlich macht. Im Falle größerer Lücken könnten Elektrifizierungsiseln nötig werden. Die hier anfallenden organisatorischen Aufwände unterscheiden sich nicht von denen im Fall einer vollständigen Elektrifizierung der gesamten Strecke. Die Kosten hingegen sind wesentlich geringer, da die zu elektrifizierenden Strecken deutlich kürzer sind.

Die Nutzung von Bahnstrom für das Laden der Batterien ist unter den gegenwärtigen Bedingungen vorzuziehen, da Bahnstrom weitgehend von der EE-Umlage befreit und somit wesentlich günstiger ist als Strom aus dem öffentlichen Netz.

Wasserstoff-Tankstellen für Brennstoffzellenzüge sind langfristige Planungsvorhaben

Auch die für Brennstoffzellenzüge benötigte Infrastruktur erfordert sorgfältige Planung, denn Wasserstoff als Träger der Antriebsenergie lässt sich nicht überall mit vertretbarem Aufwand erzeugen und bereitstellen. Erste Tests dieser neuen Triebzüge erfolgen bislang im Rahmen von Förderprojekten oder in Regionen, wo Wasserstoff in Streckennähe als Industriegas ohnehin anfällt. Bei der Installation der Tankinfrastruktur kann häufig auf unkritischem Gelände gebaut werden, wo vereinfachte, in die Zuständigkeit von Eisenbahn-Landesämtern fallende Genehmigungsverfahren zur Anwendung kommen.

Die Bereitstellung von Wasserstoff durch Fahrzeughersteller ist kein langfristiges Konzept. Stattdessen könnte DB Netze (als DB Energie GmbH) zukünftig beim notwendigen Ausbau der Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur und der Bereitstellung oder auch Erzeugung von Wasserstoff auf den Plan treten. Während die Schaffung von Lademöglichkeiten eine vergleichsweise vertraute Anforderung darstellt, ist die Versorgung mit Wasserstoff eine neuartige Herausforderung. Mit dem Anspruch, netzdienlichen Wasserstoff zu erzeugen, werden in wind- oder sonnenreichen Regionen geeignete Schnittstellen zum öffentlichen Stromnetz grundlegend. Es ist daher denkbar, dass die Wasserstoff-Bereitstellung in der Praxis gänzlich neue, bahnfremde Strukturen erforderlich macht. Es fehlen auch noch genormte Abrechnungssysteme, wie sie für Bahnstrom oder Dieselmotorkraftstoff vorhanden sind. Zudem setzt die Finanzierung der neuen Infrastruktur bilaterale Abstimmungen voraus.

6.5 Politische Eckpunkte

Elektrifizierung von Diesellinien:

Die Mobilitätsanforderungen des 21sten Jahrhunderts lassen sich nicht mit Regulierungen des 20sten Jahrhunderts umsetzen. Die geforderte Verkehrswende und die CO₂-freie Mobilität sind Ziele, die sich nur mit Unterstützung der Politik erreichen lassen. Das vom Bundesrat am Ende 2018 beschlossene Planungsbeschleunigungsgesetz soll der Straffung des vorgeschriebenen Planungs- und Genehmigungsverfahrens dienen [32]. In diesem Sinne gilt es für SPNV-Diesellinien mit hoher Verkehrsleistung hochpriorisiert die Elektrifizierung voranzutreiben.

Batterie- und Brennstoffzellen-Antriebe:

Die Heterogenität der Diesellinien im SPNV macht es erforderlich, den Antrieb mit Batterie oder mit Brennstoffzellen gleichermaßen zu fördern, also nicht nur die Elektrifizierung zügiger voranzubringen. Die Weiterentwicklung der alternativen Antriebskonzepte bis zur Serienreife sollte durch intensive Fördermaßnahmen weiter begleitet werden. Das Risiko ihrer Umsetzung muss mit politischer Unterstützung abgemildert werden.

6.6 Empfehlungen

Individuelle Charakterisierung von Diesellinien als erste systemische Maßnahme

Es ist möglich, anhand geeigneter Bewertungskriterien individuelle Diesellinien objektiv zu charakterisieren und so die beste Alternative ausfindig zu machen. Die Umsetzung lässt sich auf dieser Basis zielführend beschleunigen, da die benötigten Partner frühzeitig einbezogen und die erforderlichen Abstimmungen vorgenommen werden können. Das Planungsbeschleunigungsgesetz kann auf diese Weise zielgerichtet seine Wirkung entfalten.

Bei der vom Aufgabenträger zu initiiierenden Charakterisierung einer Diesellinie über Bewertungskriterien sollte das Verkehrsunternehmen, das diese Linie aktuell betreibt, einbezogen werden, denn niemand kennt die Besonderheiten und Herausforderungen dieser Strecke besser. Zudem sollte auch der Hersteller mit seiner spezifischen Kenntnis aller Eigenschaften des Fahrzeugs (und gegebenenfalls mit seinen Erfahrungen als benannter Instandhalter) bei der individuellen Charakterisierung beteiligt sein. Mögliche Interessenkonflikte sollten dabei vermieden werden.

Es empfiehlt sich, die DB Netze in die Charakterisierungsphase mit einzubeziehen, um die gegebenenfalls erforderlichen individuellen Elektrifizierungsmaßnahmen oder die Bereitstellung von Wasserstoff-Tankstellen bewerten zu lassen. So lässt sich sicherstellen, dass diese Maßnahmen auch rechtzeitig in die übergeordnete Infrastrukturplanung aufgenommen werden.

Nichts ist beständiger als die Gewissheit, dass sich Technologien ständig weiterentwickeln¹⁰

Batterie und Brennstoffzelle sind zwei Technologien, deren weitere Entwicklung wegen ihres hohen Marktpotenzials in den kommenden Jahren rasant voranschreiten wird. Diese Trends dürfen bei der Charakterisierung von Diesellinien nicht aus den Augen verloren werden. Es ist zum Beispiel nicht auszuschließen, dass Batterietriebzüge zukünftig wesentlich höhere Reichweiten erzielen als heute noch für möglich gehalten wird. Damit würde sich der Einsatzbereich von Brennstoffzellen-zügen verkleinern. Auf der anderen Seite könnten sich die Wirkungsgradverhältnisse bei der Produktion von Wasserstoff (und damit der Kosten) oder beim Betrieb von Brennstoffzellen signifikant verbessern. In diesem Fall könnte sogar die Sinnhaftigkeit von Elektrifizierungsmaßnahmen in Frage gestellt sein.

→ Abbildung 48 gibt einen Überblick zu möglichen Trends bei der weiteren Entwicklung der alternativen Triebzugkonzepte.

¹⁰ Frei nach Charles Darwin (1809–1882)

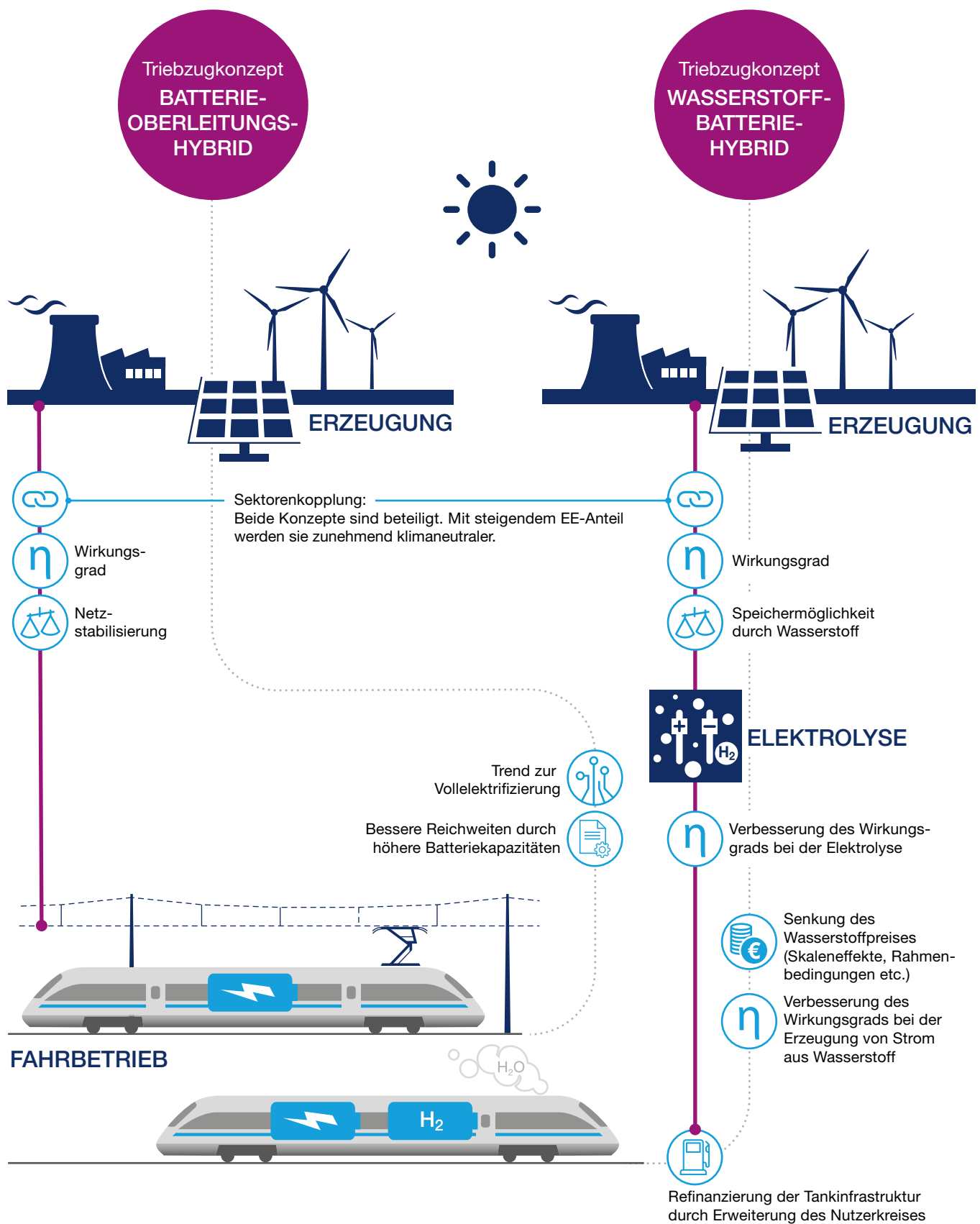


Abbildung 48 Mögliche Trends bei der Weiterentwicklung der CO₂-freien Konzepte ohne durchgehende Elektrifizierung

7 Anhang

Anhang 7.1. Teilnehmer der Interviews und des Abschlussworkshops

Name	Unternehmen	Interview (in 2018)	Workshop (Feb. 2019)
Axel Hennighausen	Agilis, Regensburg	x	x
Dirk Flege	Allianz pro Schiene, Berlin	x	
Dr. Andreas Geißler	Allianz pro Schiene, Berlin	x	x
Peter Schumann	Alstom Transport Deutschland, Salzgitter		x
Michael Ritter	Alstom Transport Deutschland, Salzgitter	x	
Florian Liese	Bayerische Eisenbahngesellschaft (BEG), München	x	x
MR Markus Schell	Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, Referat 53, München	x	x
Dr. Karsten Steinhoff	BeNEX, Hamburg	x	x
Sven Hornschuh	Alstom Transport Deutschland, Salzgitter		x
Stefan von Mach	Bombardier Transportation, Hennigsdorf	x	
Susanne Henckel	Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr (BAG-SPNV), Berlin	x	
Thomas Dill	Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg (VBB), Berlin		x
Verena Löw	Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg (VBB), Berlin	x	
Marcus Kliefoth	DB Energie, Frankfurt am Main	x	
Kai Wittig	DB Energie, Frankfurt am Main		x
Sebastian Zander	DB Energie, Frankfurt am Main	x	x
Burak Yilmaz	DB Netz, Frankfurt am Main		x
Heiko Noll	DB Netz, Frankfurt am Main	x	
Dr. Klaus Vestner	DB Regio, Frankfurt	x	
Johannes Pagenkopf	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin	x	x
Toni Schirmer	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin	x	
Joachim Michels	fahma, Hofheim am Taunus	x	x
Prof. Ronald Pörner	Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), Berlin	x	
Thomas Nawrocki	Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen, Hannover	x	
Dieter Sandmann	Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen, Hannover	x	
Burkhardt Schulze	Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein (NAH.SH), Kiel	x	
Marcus Badow	Niederbarnimer Eisenbahn (NEB), Berlin	x	x
Kai Daubertshäuser	Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV), Hofheim am Taunus	x	x
Christian Engelmann	Siemens Mobility, Erlangen	x	
Cornelia Mager	Siemens Mobility, Erlangen		x
Jochen Steinbauer	Siemens Mobility, Erlangen	x	
Steffen Obst	Stadler Pankow, Berlin	x	x
Timo Jung	Südwestdeutsche Landesverkehrs-AG (SWEG), Stuttgart	x	
Prof. Markus Hecht	TU Berlin, Fakultät V, ILS, Verkehrs- und Maschinensysteme, Fachgebiet Schienenfahrzeuge	x	
Pavel Boev	TU Berlin, Fakultät V, ILS, Fachgebiet Methoden Produktentwicklung und Mechatronik	x	x

Name	Unternehmen	Interview (in 2018)	Workshop (Feb. 2019)
Ulrich Zimmermann	TU Berlin, Fakultät V, ILS, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb	x	x
Carl-Roman Culemann	TU Berlin, Fakultät V, ILS, Fachgebiet Schienenfahrzeuge	x	
Prof. Arnd Stephan	TU Dresden und Institut für Bahntechnik GmbH (Berlin)	x	
Martin Schmitz	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)	x	
Mathias Korda	Verkehrsverbund Mittelsachsen (VMS), Chemnitz	x	
Lutz Auerbach	Verkehrsverbund Oberelbe (VVO)	x	
Peter Krichel	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR)		x
Georg Seifert	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR)	x	
Lutz Oppermann	Zweckverband Nahverkehr Rheinland (ZV NVR)	x	x
Heiko Sedlaczek	Zweckverband Nahverkehr Rheinland (ZV NVR)	x	
Michael Geuckler	Zweckverband SPNV Münsterland, Münster	x	

Anhang 7.2. Aufgabenträger in Deutschland

Kürzel	Aufgabenträger	Sitz
Baden-Württemberg		
VRN	Verkehrsverbund Rhein-Neckar GmbH	Mannheim
NVBW	Nachverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg mbH	Stuttgart
VRS	Verband Region Stuttgart	Stuttgart
Bayern		
BEG	Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH	München
Berlin-Brandenburg		
VBB	Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg GmbH	Berlin
Hansestadt Bremen		
HB	Senator für Umwelt, Bau und Verkehr des Landes Bremen	Bremen
Hansestadt Hamburg		
HVV	Hamburger Verkehrsverbund GmbH	Hamburg
Hessen		
RMV	Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH	Hofheim a.T.
NVV	Nordhessischer Verkehrsverbund GmbH	Kassel
Mecklenburg-Vorpommern		
VMV	Verkehrsgesellschaft Mecklenburg-Vorpommern mbH	Schwerin
Niedersachsen		
LNVG	Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH	Hannover
RH	Region Hannover	Hannover
RVB	Regionalverband Großraum Braunschweig	Braunschweig
Nordrhein-Westfalen		
VRR	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr AöR	Gelsenkirchen
ZV NVR	Zweckverband Nahverkehr Rheinland GmbH	Köln
NWL	Nahverkehr Westfalen-Lippe	Unna
Rheinland-Pfalz		
SPNV-Süd	Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Süd	Kaiserslautern
SPNV-Nord	Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Nord	Koblenz
Saarland		
ZPS	Zweckverband Personennahverkehr Saarland	Saarbrücken
Sachsen		
ZVV	Zweckverband ÖPNV-Vogtland	Auerbach
ZVON	ZV Verkehrsverbund Oberlausitz-Niederschlesien	Bautzen
ZVMS	Zweckverband Verkehrsverbund Mittelsachsen	Chemnitz
VVO	Verkehrsverbund Oberelbe GmbH	Dresden
ZVNL	Zweckverband für den Nahverkehrsraum Leipzig	Leipzig
Sachsen-Anhalt		
NASA	Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH	Magdeburg
Schleswig-Holstein		
NAH.SH	Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein GmbH	Kiel
Thüringen		
NVS	Nahverkehrsservicegesellschaft Thüringen mbH	Erfurt

Anhang 7.3. Eisenbahnverkehrsunternehmen (nach BAG SPNV)

Kürzel	Eisenbahnverkehrsunternehmen	Sitz
Brandenburg		
HANS	Hanseatische Eisenbahn GmbH	Putlitz
NEB	Niederbarnimer Eisenbahn Betriebsgesellschaft mbH	Berlin
Baden-Württemberg		
BOB	Bodensee-Oberschwaben-Bahn GmbH & Co. KG	Friedrichshafen
HZL	Hohenzollerische Landesbahn AG	Hechingen
AVG	Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH	Karlsruhe
SBB	SBB Deutschland GmbH	Konstanz
SWEG	Südwestdeutsche Verkehrs AG	Lahr
RNV	Rhein-Neckar-Verkehr GmbH	Mannheim
WEG	Württembergische Eisenbahn-Gesellschaft mbH	Waiblingen
Bayern		
BLB	Berchtesgadener LandBahn GmbH	Freilassing
BZB	Bayerische Zugspitzbahn Bergbahn AG	Garmisch-Partenkirchen
BOB	Bayerische Oberlandbahn GmbH	Holzkirchen
BRB	Bayerische Regiobahn GmbH	Holzkirchen
AG-E	agilis Eisenbahngesellschaft mbH & Co. KG	Regensburg
AG-V	agilis Verkehrsgesellschaft mbH & Co. KG	Regensburg
DLB	Drei Länderbahn GmbH	Viechtach
Hessen		
DB	DB Regio AG	Frankfurt am Main
HLB	Hessische Landesbahn GmbH	Frankfurt am Main
CAN	cantus Verkehrsgesellschaft mbH	Kassel
RTG	RegioTram Gesellschaft mbH	Kassel
Mecklenburg-Vorpommern		
MBB	Mecklenburgische Bäderbahn Molli GmbH	Bad Doberan
UBB	Usedomer Bäderbahn GmbH	Heringsdorf
ODEG	Ostdeutsche Eisenbahn GmbH	Parchim
Niedersachsen		
WFB	WestfalenBahn GmbH	Bielefeld
NWB	NordWestBahn GmbH	Osnabrück
ERX	Erixx GmbH	Soltau
ME	metronom Eisenbahngesellschaft mbH	Uelzen
EVB	Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser GmbH	Zeven
Nordrhein-Westfalen		
RTB	Rurtalbahn GmbH	Düren
VIAS	VIAS Rail GmbH	Düren
ERB	eurobahn (Keolis Deutschland GmbH & Co. KG)	Düsseldorf
ABR-N	Abellio Rail NRW GmbH	Essen
NX	National Express Rail GmbH	Köln
RBE	Rheinisch-Bergische Eisenbahn GmbH	Mettmann
VEN	Rhenus Veniro GmbH & Co. KG	Moers

Kürzel	Eisenbahnverkehrsunternehmen	Sitz
Rheinland-Pfalz		
TR	trans regio Deutsche Regionalbahn GmbH	Koblenz
VLEXX	Vier-Länder-Express (VLEXX GmbH	Mainz
WEBA	Westerwaldbahn des Kreises Altenkirchen GmbH	Steinebach-Bindweide
Schleswig-Holstein		
AKN	Altona-Kaltenkirchen-Neumünster Eisenbahn AG	Kaltenkirchen
NBE	nordbahn Eisenbahngesellschaft mbH	Kaltenkirchen
NEG	Norddeutsche Eisenbahngesellschaft Niebüll GmbH	Niebüll
SB	Saarbahn GmbH	Saarbrücken
Sachsen		
SDG	Sächsische Dampfeisenbahngesellschaft mbH	Annaberg
CBC	City-Bahn-Chemnitz GmbH	Chemnitz
SBS	Städtebahn Sachsen GmbH	Dresden
FEG	Freiberger Eisenbahngesellschaft mbH	Freiberg
ABR-M	Abellio Rail Mitteldeutschland GmbH	Halle
PRESS	Eisenbahn-Bau- und Betriebsgesellschaft Pressnitztalbahn mbH	Jöhstadt
MRB	Mitteldeutsche Regiobahn (Transdev Regio Ost GmbH)	Leipzig
DBG	Döllnitzbahn GmbH	Mügeln
SOEG	Sächsisch-Oberlausitzer Eisenbahngesellschaft mbH	Zittau
Sachsen-Anhalt		
DVE	Dessauer Verkehrs- und Eisenbahngesellschaft	Dessau
HEX	HarzElbeExpress (Transdev Sachsen-Anhalt GmbH)	Halberstadt
HSB	Harzer Schmalspurbahn GmbH	Wernigerode
Thüringen		
EB	Erfurter Bahn GmbH	Erfurt
STB	SüdThüringen GmbH	Erfurt
SWN	Stadtwerke Nordhausen GmbH	Nordhausen
International		
ÖBB	ÖBB Personenverkehr AG	(A) / Wien
SNCB	Societe nationale des chemins de fer belges, societe de droit public	(B) / Brüssel
KD	Koleje Dolnoslaskie sp.a.	(CS) / Legnica
CD	Ceske drahy, a.s.	(CS) / Prag
ADK	Arriva Danmark A/S	(DK) / Kastrup
DSB	Danske Statsbaner	(DK) / Kopenhagen
SNCF	Societe nationale des chemins de fer francais, EPIC	(F) / Saint-Denis
CFL	Societe nationale des Chemins de fer luxembourgeois	(LUX) / Luxemburg
ANL	Arriva Openbaar Vervoer Nederland	(NL) / Leuwarden
PR	Przewozy Regionalne sp.z.o.o.	(PL) / Warschau

Akronyme

Akronym	Name
BAG-SPNV	Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr
BEMU	Battery Electric Multiple Unit (Batterie-Triebzug)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BOH	Batterie-Oberleitungs-Hybrid
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
BZ	Brennstoffzelle
BZ-Zug	Brennstoffzellen-Triebzug
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DB	Deutsche Bahn
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DM	Diesel-mechanischer Antrieb
DMU	Diesel Multiple Unit
ECM	Entity in Charge of Maintenance (Instandhaltungswerkstatt)
EE	Erneuerbare Energien
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EMU	Electric Multiple Unit
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
GV	Güterverkehr
HEMU	Hydrogen Electric Multiple Unit (Wasserstoff-Brennstoffzellen-Triebzug)
kWh	Kilowattstunde
LKW	Lastkraftwagen
LKZ	Leistungskennziffer
NMHC	Non-methane hydrocarbons
NO _x	Stickstoffoxide NO und NO ₂
NRW	Nordrhein-Westfalen
ÖBB	Österreichische Bundesbahn
OL	Oberleitung
OL-Triebzug	Oberleitungs-Elektrotriebzug
Pkm	Personenkilometer (Maß der Personenverkehrsleistung von Zügen)
PKW	Personenkraftwagen
PV	Personenverkehr
RB	Regionalbahn
RE	Regionalexpress
RRX	Rhein-Ruhr-Express
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
THC	Total hydrocarbons (Kohlenwasserstoff-Verbindungen)
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
WBH	Wasserstoff-Batterie-Hybrid
Zkm	Zugkilometer (Maß der Betriebsleistung von Zügen)

Literaturverzeichnis

- [1] Regierungsparteien, „Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD“, 12.03.2018. [Online]. Available: https://www.cdu.de/system/tdf/media/dokumente/koalitionsvertrag_2018.pdf?file=1. [Zugriff am 26.03.2019].
- [2] Umweltbundesamt, „Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung“, Texte 30/2015. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/post-fossile-energieversorgungsoptionen-fuer-einen>. [Zugriff am 26.03.2019].
- [3] VDE e.V. / T. Becks, „Rahmenbedingungen und Erfolgsfaktoren für die Hybridisierung von Triebzügen“, Frankfurt am Main, 22. September 2017.
- [4] J. Martin, „Bewertung bedeutender Entscheidungskriterien für den Einsatz alternativer Antriebe im Schienenpersonennahverkehr (Master-Thesis)“, Siemens-Erlangen / Europa-Universität Flensburg, 2018.
- [5] BMVI, „Entwicklung der Autobahnen in Deutschland seit der Wiedervereinigung 1990“, 01.01.2016. [Online]. Available: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/entwicklung-der-autobahnen-in-deutschland-seit-der-wiedervereinigung.html>. [Zugriff am 02.04.2019].
- [6] Allianz pro Schiene, „Daten und Fakten zur Schieneninfrastruktur“, 21.02.2018. [Online]. Available: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/>. [Zugriff am 29.03.2019].
- [7] L. Neumann und W. Krippendorf, „Branchenanalyse Bahnindustrie. Industrielle und betriebliche Herausforderungen und Entwicklungskorridore“, Hans Böckler Stiftung, Düsseldorf, 2016.
- [8] Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr, „Mitglieder“, BAG SPNV, 09.10.2017. [Online]. Available: <https://www.bag-spnv.de/mitglieder>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [9] Bayerische Eisenbahngesellschaft, „BEG-Flyer Dieselnetz Oberfranken“, 06.2011. [Online]. Available: <https://beg.bahnland-bayern.de/de/wettbewerb>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [10] DB Regio AG, „Unter Strom – DB Regio rüstet Dieselfahrzeuge mit alternativen Antrieben aus“, DB Regio AG, Frankfurt am Main, 2018.
- [11] regionalBraunschweig.de, „Alstom eröffnet neues Instandhaltungsdepot in Braunschweig“, 03.10.2015. [Online]. Available: <https://regionalbraunschweig.de/alstom-eroeffnet-neues-instandhaltungsdepot-in-braunschweig/>. [Zugriff am 28.03.2019].
- [12] Augsburg StadtZeitung Online, „Go Ahead drängt DB Regio vom Gleis: BEG verspricht mehr Komfort und Platz in den Zügen“, 18.12.2018. [Online]. Available: <https://www.stadtzeitung.de/augsburg-city/politik/go-ahead-draengt-db-regio-vom-gleis-beg-verspricht-mehr-komfort-und-platz-in-den-zuegen-d72875.html>. [Zugriff am 28.03.2019].
- [13] Alstom/Christopher English, „Coradia iLint Wasserstoffzug erhält Zulassung für den Fahrgasteinsatz im deutschen Schienenverkehrsnetz“, 11. Juli 2018. [Online]. Available: <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2018/7/coradia-ilint-wasserstoffzug-erhalt-zulassung-fur-den-fahrgasteinsatz-im-deutschen-schienenverkehrsnetz>. [Zugriff am 31.07.2018].
- [14] ACADEMIC, „Baureihe 643“, 2000–2019. [Online]. Available: <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/146750>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [15] Siemens Mobility GmbH, „Siemens auf Innotrans 2016: Desiro ML ÖBB cityjet“, 20.09.2016. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/press/de/pressebilder/?press=/de/pressebilder/2016/mobility/2016-09-innotrans/im2016091054mode.htm>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [16] Siemens Mobility GmbH, „Datenblatt: Desiro ML ÖNN Cityjet eco“, [Online]. Available: <https://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2018/mobility/2018-09-oebb/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-d.pdf>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [17] Internationale Verkehrswesen, „Brennstoffzellen als Zugantrieb: Siemens erhält Förderzusage“, 27.02.2018. [Online]. Available: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/brennstoffzellen-als-zugantrieb/>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [18] Bahnblogstelle.net, „Usedomer Bäderbahn UBB Dieselmotortriebwagen GTW VT 646 Ausfahrt Trassenheide“, 17.03.2017. [Online]. Available: <https://bahnblogstelle.net/2017/03/17/db-regio-uebernimmt-dieselmotortriebwagen-der-usedomer-baederbahn/ausfahrt-trassenheide/>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [19] Zillertalbahn, „Grüner Wasserstoff von VERBUND für die Zillertalbahn“, 13.07.2018. [Online]. Available: <https://www.zillertalbahn.at/page.cfm?vpath=aktuell/aktuelles&genericpageid=2488>. [Zugriff am 11.04.2019].

- [20] T. G. Kym, „Tagblatt: Weltpremiere im Zillertal – Stadler Rail liefert Wasserstoff-Züge nach Österreich“, 18.05.2018. [Online]. Available: <https://www.tagblatt.ch/wirtschaft/stadler-rail-faehrt-auf-wasserstoff-ab-Id.1021485>. [Zugriff am 04.04.2019].
- [21] Netzwerk Privatbahnen e.V. / mofair e.V., „Wie die Deutsche Bahn Wettbewerber beim Bahnstrom diskriminiert!“, 14.09.2010. [Online]. Available: https://www.netzwerk-bahnen.de/assets/files/veroeffentlichungen/pdf/2010-09-14_Kurzstudie_mofair_und_NP_Bahnstrom.pdf. [Zugriff am 29.03.2019].
- [22] „Voll elektrisch! Sonderprogramm zur Finanzierung von Elektrifizierungsvorhaben“, 2018. [Online]. Available: <https://www.bahn-manager.de/voll-elektrisch-sonderprogramm-zur-finanzierung-von-elektrifizierungsvorhaben/>
- [23] DB Netze, „Infrastrukturregister“, [Online]. Available: Quelle: <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr>. [Zugriff am 05.04.2019].
- [24] Fraunhofer ISI, „Klimapolitisches Potenzial elektrischer Schienenstrecken in Deutschland“, in MKS-Fachworkshop, 08.10.2018, Berlin, 2018.
- [25] J. Pagenkopf und et.al, „Analysis of German diesel operated regional railway lines“, Railways Conference 2018, Sitges, 2018.
- [26] A. Müller, „TU-Dresden – Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV.“, 03.11.2017. [Online]. Available: Online verfügbar unter <https://beg.bahnland-bayern.de/de/aktuelles/gutachten-alternative-antriebe-im-bahnland-bayern?file=files/media/corporate-portal/aktuelles/2018/Technische%20und%20wirtschaftliche%20Bewertung%20alternativer%20Antriebskonzepte%281%29.pdf>. [Zugriff am 03.02.2019].
- [27] Allianz pro Schiene, „Beschleunigungsprogramm Elektromobilität Schiene 2025“, 21.02.2018. [Online]. Available: https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2018/07/180221_Elektrifizierungskarte_AllianzProSchiene.pdf. [Zugriff am 14.02.2019].
- [28] Siemens Verkehrstechnik, „Dieselmechanischer Triebzug DESIRO VT 642 für die Deutsche Bahn AG – Technische Information“, [Online]. Available: https://www.hoellennetz.de/download/141D6180_d.pdf.
- [29] J. Kühnapfel, „Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb“, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- [30] Süddeutsche Zeitung, „Tabellen und API zur Bahn-Verspätung. So kommen Sie an alle Daten.“, SZ.de, 09 03 2012. [Online]. Available: <http://www.sueddeutsche.de/kolumne/tabellen-und-api-zur-bahn-verspaetung-so-kommen-sie-an-alle-Daten-1.1304387>. [Zugriff am 11.04.2019].
- [31] T. Grube und et. al, „Kosten der Wasserstoffbereitstellung in Versorgungssystemen auf Basis erneuerbarer Energien“, in Töpler, Lehmann (Hg.) 2017 – Wasserstoff und Brennstoffzelle, Berlin, Springer Vieweg, 2014, 2017, pp. 225–261.
- [32] Eurailpress, „Bundesrat: Planungsbeschleunigungsgesetz beschlossen“, 26.11.2018. [Online]. Available: <https://www.eurailpress.de/nachrichten/infrastruktur-ausruestung/detail/news/bundesrat-planungsbeschleunigungsgesetz-beschlossen.html>. [Zugriff am 11.04.2019].
- [33] DB Regio, „Eco Train: Grüne (R)evolution bei DB Regio / Dokument: „Unter Strom – DB Regio rüstet Dieselfahrzeuge mit alternativen Antrieben aus“, 08 2018. [Online]. Available: https://www.dbregio.de/db_regio/view/zukunft/hybridantrieb.shtml. [Zugriff am 27.03.2019].

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Mögliche Alternativen zum Einsatz von Dieseltriebzügen im SPNV	6
Abbildung 2	Die Aufgabenträger in Deutschland	13
Abbildung 3	RRX-Doppelstock-Elektrotriebzug Desiro HC in Hamm	14
Abbildung 4	Dieselnetz Oberfranken und Elektonetz Franken (Stand 2011)	15
Abbildung 5	Regio Shuttle RS1 der DB Regio im Einsatz am Bodensee	16
Abbildung 6	EcoTrain-Konzept der DB Regio	17
Abbildung 7	Alstom Coradia LINT 41 Dieseltriebzug von NWB	18
Abbildung 8	Alstom Coradia Continental Elektrotriebzug des Betreibers HLB	19
Abbildung 9	Alstom Servicewerk für Personentriebzüge und E-Loks in Braunschweig	19
Abbildung 10	Alstom Coradia iLINT Brennstoffzellen-Triebzug	20
Abbildung 11	Bombardier TALENT Dieseltriebzug des Betreibers NEB	21
Abbildung 12	TALENT 2 Elektrotriebzug des Betreibers National Express	21
Abbildung 13	Bombardier TALENT 3 Batterietriebzug	22
Abbildung 14	Siemens Desiro Classic Dieseltriebzug des Betreibers DB Regio	23
Abbildung 15	Desiro ML Elektrotriebzug als CityJet für ÖBB auf InnoTrans 2016	23
Abbildung 16	Batterietriebzug CityJet-Eco von Siemens/ÖBB als Variante des Desiro-ML	24
Abbildung 17	Mireo-Plattform von Siemens Mobility (Computer-Grafik)	24
Abbildung 18	Stadler Diesel GTW 2/6 des Betreibers Usedomer Bäderbahn	25
Abbildung 19	Stadler Elektrotriebzug FLIRT des Betreibers Eurobahn	25
Abbildung 21	Schmalspur-Brennstoffzellen-Triebzug für das Zillertal (Computer-Grafik)	26
Abbildung 20	Stadler Batterietriebzug FLIRT 3-AKKU	26
Abbildung 22	Zusammenwirken innerhalb der DB Netze	27
Abbildung 23	Deutsches Schienennetz	31
Abbildung 24	Mit Dieseltriebzügen befahrene Bahnlinien im SPNV	33
Abbildung 25	Verteilung der Länge nicht-elektrifizierter Streckenabschnitte im SPNV	34
Abbildung 26	Lückenschließungsvorschläge für verschiedene Bundesländer	36
Abbildung 27	Investitionen in Schieneninfrastruktur im Jahr 2016	38
Abbildung 28	VT 642 Dieseltriebzug mit 2 x 275 kW Leistung (Euro II)	41
Abbildung 29	Entwicklung der Grenzwerte für Diesel-PKW (Typgenehmigung)	43
Abbildung 30	Entwicklung der Grenzwerte für Dieseltriebzüge (Motorenklasse RLR)	43
Abbildung 31	Aufbau diesel-elektrischer Triebzüge	44
Abbildung 32	Aufbau von Dual-Mode- und Dieselhybrid-Triebzügen	45
Abbildung 33	Akteure und Rollen im Entscheidungsprozess	51
Abbildung 34	Prinzip der Vorbereitung einer Nutzwertanalyse	53
Abbildung 35	In der Nutzwertanalyse betrachtete Modelltypen	54
Abbildung 36	Betriebsfreundlichkeit und zugehörige Unterkriterien	56
Abbildung 37	Störungen, die größere Verspätungen im Bahnbetrieb zur Folge hatten	57
Abbildung 38	Umweltverträglichkeit und zugehörige Unterkriterien	59
Abbildung 39	Systemdienlichkeit und zugehörige Unterkriterien	60
Abbildung 40	Ressourcen-Verfügbarkeit und zugehörige Unterkriterien	62
Abbildung 41	Infrastrukturfreundlichkeit und zugehörige Unterkriterien	63
Abbildung 42	Diesel-Triebzugkonzept (DM) dargestellt in Modelllandschaft	64
Abbildung 43	Oberleitungs-Triebzugkonzept (OL) dargestellt in Modelllandschaft	67
Abbildung 44	Batterie-Triebzugkonzept (BOH) dargestellt in Modelllandschaft	70
Abbildung 45	Brennstoffzellen-Triebzugkonzept (WBH) dargestellt in Modelllandschaft	73
Abbildung 46	Potenziale der vier Triebzugkonzepte (Horizont 2025 und Trends)	80
Abbildung 47	Visualisierung der LCC-Betrachtungen zu den Alternativen	84
Abbildung 48	Mögliche Trends bei der Weiterentwicklung der CO ₂ -freien Konzepte ohne durchgehende Elektrifizierung	95

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Übersicht der befragten Branchen und Organisationen	7
Tabelle 2	Zusammenwirken innerhalb der DB Netze	32
Tabelle 3	Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Dieseltriebzügen	42
Tabelle 4	Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Elektrotriebzügen	46
Tabelle 5	Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Batterietriebzügen	47
Tabelle 6	Aufbau und Überblick zu technischen Daten von Brennstoffzellen-Triebzüge	48
Tabelle 7	Bewertung des Dieseltriebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2)	65
Tabelle 8	Bewertung des Dieseltriebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (3) bis (6)	66
Tabelle 9	Bewertung des OL-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2)	68
Tabelle 10	Bewertung des OL-Triebzugkonzeptes zu (3) bis (6)	69
Tabelle 11	Bewertung des Batterie-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2)	71
Tabelle 12	Bewertung des Batterie-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (3) bis (6)	72
Tabelle 13	Bewertung des Brennstoffzellen-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (1) und (2)	74
Tabelle 14	Bewertung des BZ-Triebzugkonzeptes bzgl. Basiskriterien zu (3) bis (6)	75
Tabelle 15	Prinzip der Gewichtung von Kriterienbenotungen und Beispiel	76
Tabelle 16	Einschätzung der Relevanz der Basiskriterien durch Workshop-Teilnehmer (Teil 1)	77
Tabelle 17	Einschätzung der Relevanz der Basiskriterien durch Workshop-Teilnehmer (Teil 2)	78
Tabelle 18	Einschätzung der Relevanz der Mittelkriterien durch Workshop-Teilnehmer	79
Tabelle 19	Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Untersuchung von Müller & Stephan (qualitativ dargestellt)	83

Für Ihre Notizen

Für Ihre Notizen

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e. V.

Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
Tel. +49 69 6308-0
x-emu@vde.com

