VDE Studie

Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel ›Netz Düren‹

VDE

Studie
Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel ›Netz Düren‹
Frankfurt am Main

Autoren:
Dr. Wolfgang Klebsch
VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Nina Guckes
VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Patrick Heininger
VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. / VDE Renewables GmbH

Herausgeber:
VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e. V.

VDE Neue Technologien und Services
Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
x-emu@vde.com
www.vde.com

Gestaltung:
Kerstin Gewalt | Medien&Räume

Bildnachweis Titelgrafik:
WK | NVR/Smilla Dankert
WK | NG

Juni 2020

Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel ›Netz Düren‹

Inhalt

Executive Summary **1**

1 Einleitung und Motivation **6**

1.1 Problemstellung 7
1.2 Förderprojekt des BMVI 10
1.3 Anliegen und Struktur der Studie 10

2 Liniennetze des SPNV in Deutschland **12**

2.1 Geplante Betriebsleistungen 13
2.2 Dieselnetze heute und in Zukunft 13

3 Aufstellung der Fahrzeugalternativen **18**

3.1 Elektrotriebzug (EMU) 21
3.2 Batterietriebzug (BEMU) 22
3.3 Brennstoffzellentriebzug (HEMU) 27

4 Methodiken der Entscheidungsfindung **32**

4.1 Nutzwertanalyse 33
4.2 Kapitalwertmethode 34

5 Netz Düren – Wirtschaftliche Betrachtung der Alternativen 36

5.1 Hintergrund 37
5.1.1 Rurtalbahn 38
5.1.2 Bördebahn 40
5.1.3 Historische Triebwagen 41
5.1.4 Zweckverband Nahverkehr Rheinland (ZV NVR) 44
5.1.5 Rurtalbahn GmbH (RTB) 45

5.2 Ist-Stand und Pläne 46
5.2.1 ›Netz Düren‹ 46
5.2.2 RB 21 Nord 48
5.2.3 RB 21 Süd 50
5.2.4 RB 28 Eifel-Bördebahn 52

5.3 Energiebedarf der Fahrzeugflotte 53
5.3.1 Simulationsmodell 53
5.3.2 Ergebnisse für BEMU und HEMU 54

5.4 Kapitalwertanalyse 58
5.4.1 Datengrundlage der Kapitalwertmethode 59
5.4.2 Ergebnisse der Kapitalwertanalyse 63
5.4.3 Sensitivitätsanalyse 69

6 Erweiterte Betrachtungen und Fazit 76

6.1 Kostenhebel 77
6.2 Fazit 79

7 Anhang 80

Anhang 7.1 Aufgabenträger in Deutschland 81
Anhang 7.2 Dieselnetze in Deutschland 82
Anhang 7.3 Darstellung aller Simulationsergebnisse 87

Literaturverzeichnis 94
Akronyme 96
Verzeichnis der Abbildungen 97
Verzeichnis der Tabellen 99

Executive Summary

Executive Summary

Der technisch-wissenschaftliche Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e. V. (→ VDE) befasst sich seit Ende 2017 als neutrale Stelle mit der Fragestellung, welche Alternativen sich volkswirtschaftlich sinnvoll als Ersatz für Dieseltriebzüge (→ DMU) auf Nebenstrecken des Schienenpersonennahverkehrs (→ SPNV) anbieten. Dabei beschränkt sich der VDE nicht auf die Analyse technischer Details von Fahrzeugen mit neuen Antrieben, sondern legt seinen Fokus insbesondere auf systemische Anforderungen, die für die Realisierung einer Alternative erfüllt sein müssen. Zudem ist es für den VDE von besonderem Interesse, bei seinen Analysen übergeordnete Ziele von gesellschaftlicher und politischer Bedeutung wie Klima- und Umweltschutz, Energiewende und Sektorenkopplung oder auch Mobilitäts- und Verkehrswende zu berücksichtigen.

Der VDE sieht die Suche nach Alternativen als systemisches Entscheidungsproblem an

Im Rahmen des vom BMVI[1] geförderten Vorhabens X-EMU und im Unterauftrag des Konsortialführers Siemens-Mobility veröffentlicht der VDE mit dem vorliegenden Papier bereits die dritte Studie in Folge. In seiner ersten Untersuchung → [1] geht es um Batterietechnologien, die sich für den Einsatz in Akkumulator-betriebenen Nahverkehrstriebzügen eignen. Hiernach sind im Bahnsektor die Anforderungen an Dynamik und Zuverlässigkeit so extrem, dass nur die LTO-Technologie diese erfüllen könnte. LTO-Batterien sind jedoch teuer und schwer. Die Automobilindustrie setzt auf günstigere Technologien wie NMC, die bei sinkenden Preisen zugleich höhere Reichweiten ermöglichen. Der VDE empfiehlt einen Kompromiss, der die Vorteile beider Technologien nutzt. Die zweite Studie → [2] basiert auf einer ausführlichen Nutzwertanalyse zu Diesel-Alternativen. Diese Untersuchung ergänzte der VDE um strukturierte Interviews mit rund 50 Experten aus der Bahnbranche. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass der Fokus auf vollelektrischen Konzepten liegen sollte, denn Nahverkehrszüge sind 25 bis 30 Jahre lang im Einsatz, und eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs bis zum Jahr 2050 schließt die Einführung hybrider Übergangslösungen letztlich aus.

Die direkte oder indirekte Elektrifizierung von Nebenstrecken sieht der VDE unter bestimmten Voraussetzungen als gleichwertige Alternativen zu Dieseltriebzügen an: *direkt* im Sinne einer durchgehenden Oberleitung für den Betrieb von Elektrotriebzügen (→ EMU) oder *indirek*t im Sinne des Einsatzes von Fahrzeugen mit Elektromotoren, deren Antriebsstrom aus einer Batterie stammt (→ BEMU) oder von einer Brennstoffzelle bereitgestellt wird, die den mitgeführten Wasserstoff mit Luft-Sauerstoff kontrolliert zu Wasserdampf reagieren lässt (→ HEMU).

Der VDE nutzt das ›Netz Düren‹ als Praxisbeispiel für die Wirtschaftlichkeitsanalyse

In der konkreten Entscheidungssituation kommt man nicht umhin, zu untersuchen, ob und unter welchen Voraussetzungen die betrachteten Alternativen BEMU, HEMU oder EMU, wirtschaftlich sind. Das ist das Anliegen der dritten Untersuchung. Hierfür verlässt der VDE die bislang allgemein gehaltene Betrachtung und analysiert ein konkretes Fallbeispiel im Detail.

Der Zweckverband Nahverkehr Rheinland (ZV NVR, Sitz in Köln) ist heute in einer ähnlichen Situation wie viele andere Aufgabenträger auch: Verkehrsverträge für bislang mit Dieselfahrzeugen befahrene Nebenstrecken laufen aus, und es bietet sich die Möglichkeit an, diese durch umwelt- und klimaschützende Alternativen zu ersetzen. So sucht beispielsweise der VRR[2] eine alternative Lösung für sein Netz Niederrhein/Ruhr/Münsterland, der SPNV-Süd[3] eine für sein Pfalznetz oder der ZVMS[4] für die noch nicht elektrifizierte Strecke Leipzig-Chemnitz.

1 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
2 Verkehrsverbund Rhein Ruhr, Sitz in Gelsenkirchen
3 Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Süd, Sitz in Kaiserlautern
4 Zweckverband Verkehrsverbund Mittelsachsen, Sitz in Chemnitz

Der VDE nutzt das ›Netz Düren‹ mit seinen Linien RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 als Praxisbeispiel für seine Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Als Basis dienen die vom NVR als Aufgabenträger und der Rurtalbahn als Eisenbahninfrastrukturunternehmen (→ EIU) bereitgestellten, auf das Fahrplanjahr 2026 bezogenen Daten zum ›Netz Düren‹, also Fahrplan, Flottengröße, Betriebsleistung, Geschwindigkeitsbegrenzungen usw. Diese Informationen ergänzte der VDE um eigene Messungen der Geschwindigkeit sowie von Beschleunigungs- und Abbremswerten einiger Züge und ihrer Haltezeiten an den Stationen.

Den Energiebedarf der Triebzüge auf den Strecken berechnete der VDE auf der Grundlage von Simulationen, die neben realistischen Geschwindigkeitsverläufen individuelle Geländeprofile, Leistungswerte von Nebenaggregaten und Leerlauf-Bedarfe berücksichtigen. Den jeweiligen Kraftstoff- bzw. Stromverbrauch der Fahrzeugtypen ermittelte er anhand ihrer in der Literatur beschriebenen technologiespezifischen Wirkungsgrade.

Die Kosten für Beschaffung und Wartung der Fahrzeuge sowie für den Austausch ihrer Technologiekomponenten wie Power-Pack, Batterie oder Brennstoffzelle einerseits, wie auch die Kosten für Installation und Betrieb der zusätzlich benötigten Infrastrukturanteile wie Oberleitungen, Elektrifizierungsinseln oder Tankstellen leitete der VDE aus den von Fahrzeugherstellern, Instandhaltungswerkstätten oder Infrastrukturbetreibern bereitgestellten Daten ab. Im Falle abweichender Kostenangaben bildete er Mittelwerte. Sonstige als unkritisch angesehene Daten hat er anderen Veröffentlichungen wie → [3] entnommen.

Im Falle des ›Netzes Düren‹ geht es konkret um die Wahl zwischen Brennstoffzellen- oder Batterietriebzug als geeignete Alternativen zum Dieseltriebzug. Der VDE legte daher den Schwerpunkt seiner Analysen auf den Vergleich der Konzepte HEMU und BEMU. Um den Grad ihrer *Vorteilhaftigkeit* einschätzen zu können, bezog er zudem DMU und EMU als (hypothetische) Investitionsprojekte in die Analysen mit ein. Über die Fahrzeuge wird angenommen, dass sie entweder als Zweiteiler oder als Dreiteiler angeboten werden und ansonsten hinsichtlich ihres Gewichtes und ihrer Fahrgastkapazität identisch sind (Referenz: Triebzüge mit rund 165 Sitzplätzen). Vorausgesetzt wird zudem, dass alle Fahrzeuge zum Startzeitpunkt 2026 gleich reif und die erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen rechtzeitig abgeschlossen sind.

Der VDE wählt die Kapitalwertmethode als Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die Investition in ein alternatives Antriebskonzept wie HEMU oder BEMU ist nur dann sinnvoll, wenn dieses eine realistische Chance hat, langfristig ein positives wirtschaftliches Ergebnis zu liefern – gegebenenfalls unterstützt durch geeignete Rahmenbedingungen und Maßnahmen.

Um einzuschätzen, welche der in Frage kommenden Alternativen sich als vorteilhafteste Investition darstellt, wählte der VDE die Kapitalwertmethode als *dynamisches Investitionsrechnungsverfahren* → [4]. Hier werden über den Lebenszyklus der Fahrzeuge und der Infrastruktur nur solche Kosten berücksichtigt, die für die zugrundeliegende Antriebstechnologie spezifisch sind. Nicht berücksichtigt werden demnach Auszahlungen beispielsweise für Personal, Verwaltung oder interne Dienstleistungen. Die jährlich anfallenden relevanten Kosten werden in abgezinster Form über den Betrachtungszeitraum aufaddiert, die Investitionen linear abgeschrieben und deren Restwerte am Ende des Zeitraums eingerechnet. Das Resultat ist ein negativer Kapitalwert (*Gegenwartswert*) in Euro. Das Antriebskonzept mit dem betraglich kleinsten Kapitalwert wird als das vorteilhafteste Investitionsprojekt angesehen.

Die Alternativen lassen sich über ihre spezifischen Kostenbeiträge klar differenzieren

Neben Trassen- und Stationsgebühren bestimmen Kraftstoff- und Strompreise maßgeblich die Wirtschaftlichkeit des Betriebes der Bahnlinien, denn sie verursachen über die Betriebsleistung der Fahrzeugflotte einen dominanten Anteil der Gesamtkosten.

Die Energiekosten wie auch die Kosten für Fahrzeugbeschaffung, Tausch der zentralen Technologie-Komponenten und Installation der spezifisch benötigten Infrastruktur erlauben eine klare Differenzierung der Alternativen.

Die Sensitivitätsanalyse ist ein zentrales Element der Wirtschaftlichkeitsanalyse des VDE

Der in der Zukunft liegende Startzeitpunkt und die Langfristigkeit der Betrachtungen belasten die Verlässlichkeit der Wirtschaftlichkeitsanalyse insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung von Kraftstoff- und Strompreisen, Weiterentwicklung der Technologien oder mögliche neue gesellschaftliche oder politische Vorgaben. Um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Analyseergebnisse abzuschätzen, ergänzen die Autoren ihre Simulationen um eine Reihe von Sensitivitätsanalysen. Dafür variieren sie breitbandig Kraftstoff- und Strompreise, Installationskosten für Oberleitungen, Taktung der Strecken, BEMU-Reichweiten sowie Fahrzeugpreise und -gewichte, wobei sie die Wirkung der einzelnen Parameter individuell untersuchen.

Einen weiteren kritischen Parameter stellt der Betrachtungszeitraum dar. Grund hierfür sind die laufenden Betriebskosten, welche sich kontinuierlich aufaddieren, während sich Anschaffungs- und Installationskosten in der Wirkung über die Zeit relativieren. Durch Einrechnung der Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraums variieren die resultierenden Kapitalwerte der Alternativen bei sich ändernder Länge des Zeitraums in ihren Verhältnissen kaum.

Jede der vollelektrischen Alternativen hat ihre Besonderheiten

Bei der Betrachtung des BEMU ist es wichtig, zu wissen, wieviel Prozent der in den Bremsphasen erzeugten Energie sich in die Batterie zurückspeichern lässt, um in Beschleunigungsphasen genutzt zu werden. Ob die von den Fahrzeugherstellern garantierte Reichweite für das ›Netz Düren‹ genügt, hängt davon ab, wo, wie lange und mit welcher Leistung nachgeladen werden kann. Gegebenenfalls erfordert die Einhaltung der Betriebsvorgaben zusätzliche Fahrzeuge.

Für den Betrieb des HEMU sind die Bereitstellung des Antriebs-Wasserstoffs und die Entwicklung des Preises für elektrolytisch erzeugten *grünen* Wasserstoff sowie insbesondere der Wirkungsgrad und die Lebensdauer der Brennstoffzelle ausschlaggebend. Zudem hängt der Wasserstoff-Verbrauch auch davon ab, in welchem Umfang und wie effizient die vorhandene Dynamikbatterie die Nutzung von rekuperierter Bremsenergie ermöglicht.

Der EMU rekuperiert einen Teil seiner Bremsenergie in die Oberleitung. Diese kann er nicht direkt für den eigenen Antrieb nutzen. Zudem hängt die Menge der in die Oberleitung zurückgespeisten Energie davon ab, in welchem Umfang andere Züge diese im selben Moment abnehmen und tatsächlich nutzen können. In welcher Höhe der Energieversorger dafür Gebühren zurückerstattet, lässt sich so nicht abschätzen. Der VDE lässt die Auswirkung der Rekuperation auf den Kapitalwert des EMU daher unberücksichtigt, ohne sie argumentativ zu ignorieren.

BEMU und EMU stellen für das ›Netz Düren‹ wirtschaftlich vorteilhafteste Investitionen dar

Bei einem Strompreis von 12–14 ct/kWh im Bahnstromnetz → [5] [6] [7] [8] werden die Energiekosten von BEMU und EMU zu einem gewichtigen Wirtschaftlichkeitsvorteil gegenüber dem HEMU-Konzept. Die resultierenden Kapitalwerte für BEMU und EMU liegen im Falle des ›Netzes Düren‹ gleichauf, weil sich die Summe aus Mehrkosten für BEMU-Fahrzeuge, Austausch der Batterien und Infrastrukturkosten für eine Elektrifizierungsinsel zufällig decken mit den Kosten für eine vollständige Elektrifizierung der drei Linien. Hier werden die Elektrifizierungsinsel zu 5 Mio. € und die Oberleitungskosten zu 1 Mio. €/km inklusive Unterwerk angenommen. Ab 1,5 Mio. €/km wird BEMU gegenüber EMU zum vorteilhafteren Investitionsprojekt. Bei 2 Mio. €/km ziehen HEMU und EMU kapitalwertmäßig auf Gleichstand. Die Elektrifizierungskosten stellen somit einen sensiblen Bewertungsparameter dar.

Ähnliches gilt auch für die Taktung der Strecken. Es zeigt sich, dass nur mit dem für das Fahrplanjahr 2026 vorgesehenen Takt von zwei Zügen pro Stunde auf RB 21 Nord und RB 21 Süd und einem Zweistundentakt auf RB 28 die Konzepte EMU und BEMU gleiche Kapitalwerte haben. Sobald auch für RB 28 ein Halbstundentakt vorgesehen würde, wäre EMU bei Elektrifizierungskosten von 1 Mio. €/km das deutlich vorteilhafteste Investitionsprojekt von allen.

Der HEMU ist eine systemdienliche Lösung mit wirkungsgradbedingt erhöhten Kosten

Der Energiebedarf des HEMU ist wegen der Brennstoffzelle im Funktionsstrang zwischen Tank und Rad grundsätzlich höher als im Falle des BEMU oder EMU. Es zeigt sich bei einem angenommenen Preis von 4,50 €/kg-H_2 für Elektrolyse-Wasserstoff, dass HEMU und DMU in den resultierenden Kapitalwerten gleichziehen, wenn der Dieselpreis auf 1,46 €/Liter steigt – was mittelfristig realistisch erscheint.

Bei einem Bahnstrompreis von 12 ct/kWh müsste der Wasserstoffpreis auf unter 1 €/kg-H_2 fallen, damit HEMU und BEMU gleichziehen. Es zeigt sich, dass das eigentliche Problem im Falle des HEMU weniger der Kraftstoffpreis als die hohen Austauschkosten sind. Diese Kosten hängen zum einen mit den Preisen von Brennstoffzellen und Dynamikbatterien zusammen, vor allem aber mit den relativ geringen Betriebslebensdauern heute verfügbarer Brennstoffzellen, die über einen Zeitraum von 30 Jahren rechnerisch bis zu sieben Mal getauscht werden müssen.

Auf die Anforderungen an Infrastruktur und Betrieb bezogen, sind die Konzepte HEMU und DMU eng verwandt. Mit Blick auf die Bedeutung von Elektrolyse-Wasserstoff für die Speicherung von erneuerbarer Energie trägt der HEMU nicht nur zum Klimaschutz, sondern auch zur notwendigen Stabilisierung des Stromnetzes (*Sektorenkopplung*) im Verlauf der Energiewende bei.

1 Einleitung und Motivation

Das Zeitalter von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren neigt sich dem Ende zu. Dies gilt insbesondere für den schienengebundenen Personennahverkehr (SPNV). Hier wird heute über 80 Prozent der Verkehrsleistung[5] von Elektrotriebzügen erbracht, die ihre Antriebsenergie über Oberleitungen oder Stromschienen beziehen.

Somit entfallen bis zu 20 Prozent der Verkehrsleistung auf Dieseltriebzüge, die heute meist auf Nebenlinien eingesetzt werden. Ihre hier erbrachte Fahrleistung[6] ist nicht marginal: Sie entspricht laut BAG-SPNV rund einem Drittel der Gesamtleistung. Im Sinne der Daseinsvorsorge lässt sich dieses Missverhältnis rechtfertigen, auf den Klimaschutz bezogen nicht. So ist der Ausstoß von klimaschädigendem Kohlendioxid pro Kopf umso höher, je geringer die erbrachte Beförderungsleistung ist. Nicht zuletzt war es die zunehmende Sorge vor möglichen Fahrverboten wegen Stickoxid- und Feinstaubbelastungen, dass sich die Verantwortlichen nachhaltig über umweltfreundliche, langfristig klimaneutrale Alternativen zu Dieseltriebzügen Gedanken machen.

1.1 Problemstellung

Das Laufzeitende des Verkehrsvertrages für ein Dieselnetz und die verbleibende Lebensdauer der hier eingesetzten Dieseltriebzüge bestimmen den Zeitrahmen, in dem die Entscheidung für eine geeignete Alternative herbeizuführen ist. Die Laufzeit von Verkehrsverträgen ist in der Regel auf 15 Jahre begrenzt und die Nutzungsdauer von Dieseltriebzügen auf 25 Jahre ausgelegt. Besonderen Handlungsdruck erzeugt die politische Vorgabe, den Verkehr in Deutschland bis zum Jahr 2050 vollständig zu dekarbonisieren. Spätestens ab 2025 sollten daher keine neuen Dieseltriebzüge mehr in Betrieb genommen werden.

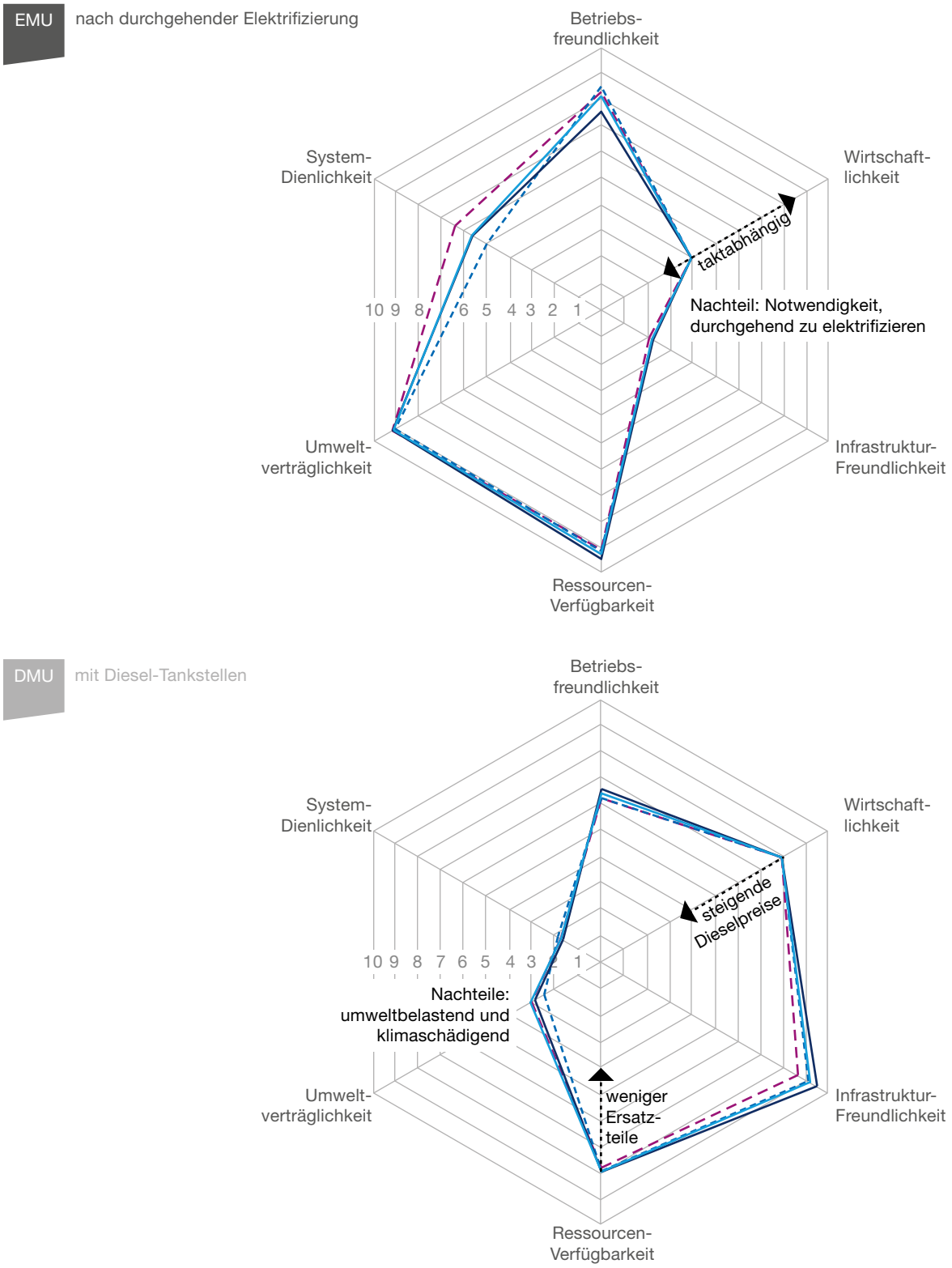
Statt vorhandene Fahrdrahtlücken in einem Bahnliniennetz infrastrukturseitig zu schließen, bietet sich alternativ die Option an, diese künftig mit Batterietriebzügen zu überbrücken und so auf bislang Dieseltriebzügen vorbehaltenen Linien elektrisch zu fahren. Im Rahmen des vom BMVI geförderten Projektes ›X-EMU‹ veröffentlichte der VDE im August 2018 eine Studie → [1], die sich mit den hohen Anforderungen an Traktionsbatterien für Triebzüge auseinandersetzt. Sie untersucht, welche der heute verfügbaren Batterie-Technologien und -zellen sich dafür eignen, und zeigt die wichtigsten Entwicklungstrends auf – bis 2030 und darüber hinaus.[7]

Der Batterietriebzug ist wegen seiner technologisch bedingten Reichweitenbegrenzung nicht überall die beste Alternative. Im Falle größerer Oberleitungslücken oder weitläufig nicht-elektrifizierter Bahnlinien kann sich der mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellentriebzug als bessere Alternative erweisen. Die durchgehende Elektrifizierung bestimmter Bahnlinien wiederum kann die beste Option sein, wenn hier bereits eng getaktet gefahren wird oder in Zukunft eine wesentlich höhere Taktung vorgesehen ist.

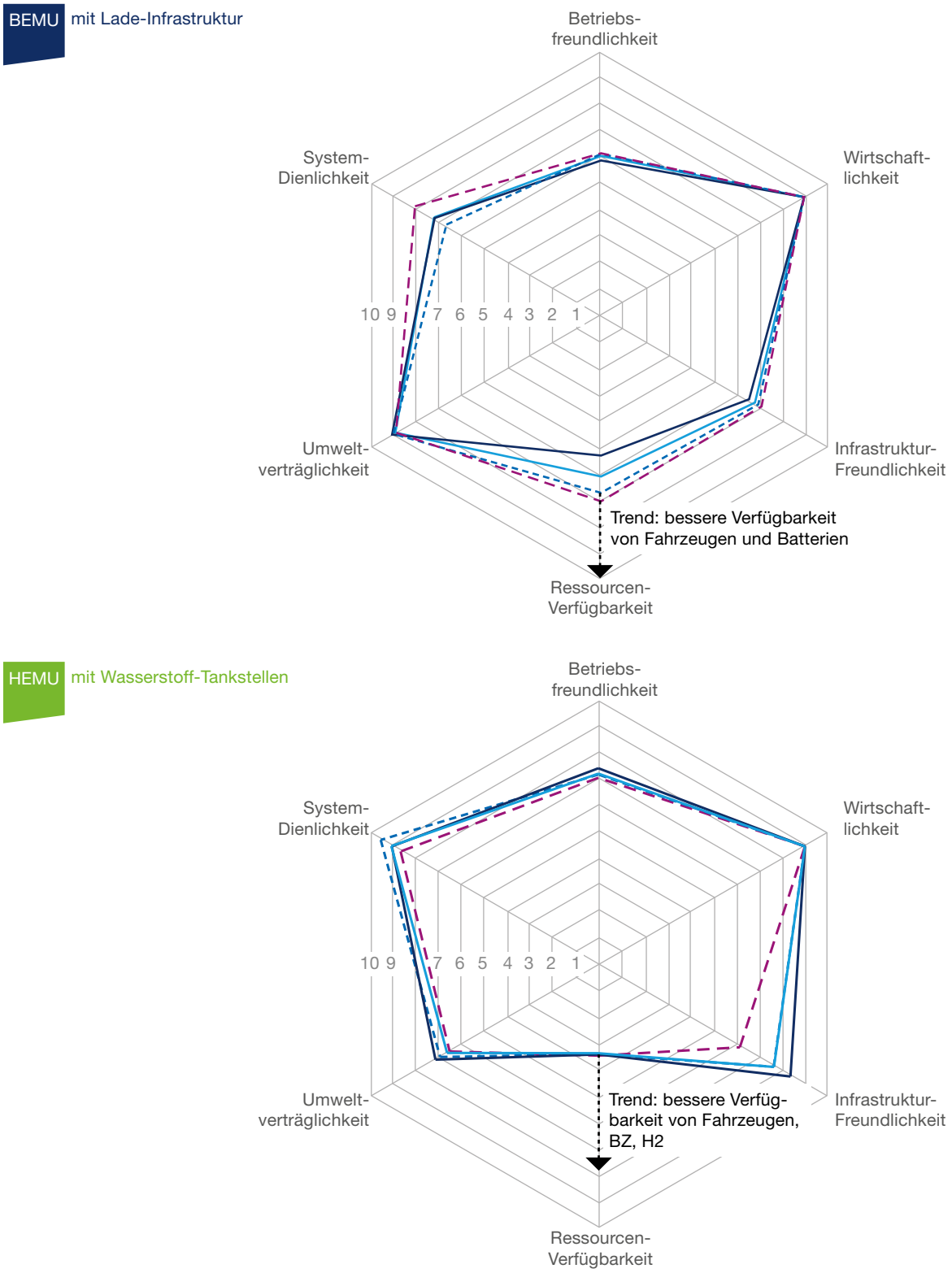
Die genannten alternativen Optionen sind Gegenstand der zweiten Studie, die der VDE im Mai 2019 veröffentlichte → [2]. Sie erfasst die systemischen Potenziale der alternativen Konzepte und bewertet diese qualitativ mit Hilfe einer Nutzwertanalyse. Intensive Literaturrecherchen, eingehende Gespräche mit über 50 Erfahrungsträgern der Bahnbranche wie auch ein produktiver Abschlussworkshop lieferten die der Analyse zugrundeliegenden Informationen und Daten.[8]

Zentrales Ergebnis ist eine Darstellung der Potenziale der alternativen Konzepte als Netzdiagramme, die von sechs übergeordneten Entscheidungskriterien aufgespannt werden. Die Option EMU steht mit ihrem Nachteil, dass eine durchgehende Elektrifizierung erforderlich ist und damit zusätzlicher Aufwand für die Instandhaltung dieser Infrastruktur anfällt, komplementär den Nachteilen des DMU gegenüber, die Umwelt zu belasten und nicht systemdienlich zu sein, also letztlich weder zur Energie- noch zur Verkehrswende beizutragen. Zusammen betrachtet, repräsentieren die beiden Konzepte den bislang akzeptierten Status Quo → Abbildung 1. Die Netzdiagramme für BEMU und HEMU finden sich in → Abbildung 2.

5 Im Folgenden auch Beförderungsleistung genannt
6 Im Folgenden auch Betriebsleistung genannt
7 Die erste Studie ist unter https://shop.vde.com/de/vde-studie-batteriesysteme-fuer-schienentriebzuege kostenlos abrufbar
8 Die zweite Studie ist unter https://shop.vde.com/de/alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-spnv kostenlos abrufbar.



↑ Abbildung 1: Potenziale der verschiedenen Triebzugkonzepte (Horizont 2025 und Trends) – Teil 1



↑ Abbildung 2: Potenziale der verschiedenen Triebzugkonzepte (Horizont 2025 und Trends) – Teil 2

BEMU und HEMU erweisen sich beide als geeignete Diesel-Alternativen – trotz einiger Nachteile hinsichtlich ihrer Betriebsfreundlichkeit und der zu verbessernden Verfügbarkeit ihrer Technologiekomponenten und Energieträger → Abbildung 2. Jeder für sich und auch gemeinsam repräsentieren sie einen vorteilhafteren Zustand als der bisherige Status Quo mit DMU.

Die mittels der Nutzwertanalyse gewonnenen Ergebnisse sind hilfreich aber letztlich nicht hinreichend, um Investitionsentscheidungen für Diesel-Alternativen zu begründen. Bei der Betrachtung in → [2] spielte Wirtschaftlichkeit eine noch eher untergeordnete Rolle: Es wurde vereinfachend angenommen, dass sich die Kosten bei allen Konzepten so steuern lassen, dass wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Lediglich im Falle des EMU wird davon ausgegangen, dass eine durchgehende Elektrifizierung heutiger Diesellinien nur dann sinnvoll ist, wenn sie hinreichend dicht getaktet befahren werden. Im Falle schwach frequentierter Nebenlinien wird das Konzept EMU als betriebswirtschaftlich ungünstig angesehen.

In der Praxis kommt man nicht umhin, die individuellen Merkmale der betrachteten Dieselnetze und ihrer Bahnlinien zu berücksichtigen und diese in eine objektive Analyse und Bewertung der in Frage kommenden Alternativen einfließen zu lassen. Diese differenziertere Betrachtung ist Thema der vorliegenden dritten VDE Studie.

1.2 Förderprojekt des BMVI

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. Die vorliegende Studie ist das Ergebnis des dritten Teilprojektes eines an den VDE unterbeauftragten Teilvorhabens → [9].

1.3 Anliegen und Struktur der Studie

Eine wichtige Erkenntnis aus den Arbeiten der zweiten VDE Studie → [2] ist, dass es ohne Berücksichtigung der individuellen Besonderheiten von Diesellinien nicht möglich sein wird, die beste Alternative zu identifizieren. Die eigentliche Herausforderung ist somit, die spezifischen Charakteristika realer Dieselnetze und ihrer individuellen Bahnlinien mit echten Betriebsdaten zu erfassen und auszuwerten. So wissen die Autoren umso mehr die Bereitschaft des Zweckverbandes Nahverkehr Rheinland (ZV NVR) und der Rurtalbahn als Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) zu schätzen, die notwendigen Informationen und Daten zum ›Netz Düren‹ zur Verfügung zu stellen und so zur erfolgreichen Realisierung der vorliegenden Studie beizutragen.

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die in Deutschland betriebenen Nahverkehrsliniennetze, mit besonderem Fokus auf Dieselnetze. In **Kapitel 3** sind aktualisierte technische Informationen und Daten über Dieseltriebzüge (DMU), Elektrotriebzüge (EMU), Batterietriebzüge (BEMU) und Brennstoffzellentriebzüge (HEMU) zusammengestellt.

In **Kapitel 4** werden die Nutzwertanalyse und die Kapitalwertmethode als Verfahren zur Bewertung alternativer Antriebskonzepte vorgestellt. In **Kapitel 5** dient das ›Netz Düren‹ mit seinen Linien RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 als Praxisbeispiel für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse nach der Kapitalwertmethode. **Kapitel 6** befasst sich mit der Fragestellung, inwieweit sich die anhand des ›Netzes Düren‹ gewonnenen Erkenntnisse auf andere Dieselnetze übertragen lassen und schließt mit einem Fazit.

2 Liniennetze des SPNV in Deutschland

Laut einer Marktuntersuchung der Bundesnetzagentur → [10] erbrachte der Schienenpersonenverkehr in Deutschland im Jahr 2018 eine Verkehrsleistung von 98 Milliarden Personenkilometern (Pkm)[9]. Davon entfielen 57 Mrd. Pkm auf den SPNV. Bei einer mittleren Reiseweite von 21 Kilometern entspricht dies einem Verkehrsaufkommen von 2,7 Mrd. Fahrgästen. Dafür stellte der SPNV eine Betriebsleistung von 691 Millionen Zugkilometern (Zkm)[10] bereit. Der Gesamtumsatz betrug 11,1 Mrd. Euro.

Im SPNV lassen sich insgesamt rund 1.000 z. B. als Regional-, Regionalexpress- oder S-Bahnen ausgewiesene Linien unterscheiden. Rund die Hälfte dieser Nahverkehrslinien werden bislang wegen fehlender oder lückenhafter Elektrifizierung mit Dieseltriebzügen befahren, die z. B. bei der DB Regio mit rund 4.500 Fahrzeugen etwa ein Drittel ihrer Triebzugflotte ausmachen → [11]. Eingesetzt werden Dieseltriebzüge vor allem in ländlichen Regionen mit geringerem Verkehrsaufkommen. Sie tragen hier mit geschätzt 17 Prozent zur Gesamtbeförderungsleistung des SPNV, also etwa 10 Milliarden Pkm bei (abgeleitet aus → [12]). Auf die einzelne Diesellinie bezogen entspricht dies einer mittleren Beförderungsleistung von 20 Millionen Pkm – bei einer über alle Nahverkehrslinien gemittelten Betriebsleistung von 0,69 Millionen Zkm.

In den folgenden Abschnitten werden die gemäß aktuellem Wettbewerbsfahrplan in den Bundesländern bis zum Jahr 2033 vorgesehenen Betriebsleistungswerte vorgestellt. Darüber hinaus wird ein Blick auf die Zukunft heutiger Dieselnetze geworfen, für die zum Teil bereits verbindliche Entscheidungen zugunsten von Brennstoffzellen- oder Batterietriebzügen getroffen wurden.

2.1 Geplante Betriebsleistungen

Laut Wettbewerbsfahrplan 2019 → [13] erwartet die Bundesarbeitsgemeinschaft (BAG) SPNV Beauftragungen von Betriebsleistungen, die sich im Zeitraum von 2019 bis 2033 auf über 750 Mio. Zkm summieren. Davon werden 179 Mio. Zkm – also fast 25 Prozent – weiterhin mit Diesel oder Diesel + Elektro[11] beauftragt. Batteriefahrzeuge (BEMU) sollen mit 31 Mio. Zkm, Brennstoffzellenfahrzeuge (HEMU) mit 5 Mio. Zkm beitragen. Für insgesamt 54 Mio. Zkm ist noch offen, ob zukünftig BEMUs, HEMUs oder Hybride vorgesehen werden, oder – nach einer durchgehenden Elektrifizierung – die Entscheidung zugunsten von EMUs fällt. → Tabelle 1.

2.2 Dieselnetze heute und in Zukunft

Aktuell scheinen Aufgabenträger und Länder bei ihrer Wahl zwischen Batterie- oder Brennstoffzellen-Antrieb das BEMU-Konzept zu favorisieren. Angesichts des hohen Anteils offener Entscheidungen ist damit jedoch noch keine Vorzugsrichtung festgelegt.

Vorreiter bei der Entscheidung zugunsten des BEMU-Konzeptes sind der NAH.SH in Schleswig-Holstein, der VRR in Nordrhein-Westfalen und der SPNV-Süd in Rheinland-Pfalz. Das HEMU-Konzept findet Zustimmung bei der LNVG in Niedersachsen und dem RMV in Hessen. Gegenüber alternativen Antrieben zurückhaltend zeigen sich die BEG in Bayern und das Land Thüringen.[12]

Der bei weitem größte Teil der Vergaben von SPNV-Leistungen betrifft mit 484 Mio. Zkm den Betrieb mit Oberleitungs-Elektrotriebzügen. Die größten Auftragssummen über alle Traktionsarten weisen die als Landesgesellschaften organisierten Aufgabenträger BEG mit 161 Mio. Zkm und NVBW in Baden-Württemberg mit 113 Mio. Zkm auf, gefolgt von Berlin-Brandenburg mit 78 Mio. Zkm und dem VRR mit 77 Mio. Zkm.

Nachfolgend geben → Tabelle 2, → Tabelle 3 und → Tabelle 4 einen Überblick über alle relevanten mit Dieselfahrzeugen befahrenen Netze – einschließlich der zugehörigen Betriebsleistungen und Vertragslaufzeiten. Eine Übersicht der Linien, die zu diesen Netzen zählen, findet sich im → Anhang 7.2.

9 Verkehrsleistung = Beförderungsleistung = Anzahl der Fahrgäste × im Mittel zurückgelegte Entfernungen, i. d. R. bezogen auf ein Jahr

10 Betriebsleistung = Fahrleistung = Anzahl der Züge x im Mittel gefahrene Strecken, i. d. R. bezogen auf ein Jahr

11 Zwischen München und Hof setzt die BEG (Bayern) Züge mit Elektroloks ein, die ab Regensburg durch Dieselloks ersetzt werden. Der VRR (Hessen) verwendet sogenannte RT-Züge, die im Stadtgebiet Kassel als Straßenbahn und außerhalb als Dieselfahrzeuge fahren. In Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg sind im Rahmen einer deutsch-französischen Ausschreibung Diesel-elektrische-Triebzüge geplant → [31].

12 Eine Erklärung aller Akronyme findet sich im im Anhang unter → Akronyme.

2019–2033	EMU	DMU	Diesel/ Elektro	BEMU	HEMU	offen	Summe
NVBW (BW)	95,0 Mio. Zkm	15,1 Mio. Zkm		2,0 Mio. Zkm		1,3 Mio. Zkm	**113,5 Mio. Zkm**
Verband Region Stuttgart			12,5 Mio. Zkm			13,5 Mio. Zkm	**26,0 Mio. Zkm**
BEG (BY)	91,0 Mio. Zkm	59,2 Mio. Zkm	10,8 Mio. Zkm				**161,0 Mio. Zkm**
VBB (BE/BB)							**0,0 Mio. Zkm**
Berlin und Brandenburg	72,2 Mio. Zkm	5,0 Mio. Zkm			0,7 Mio. Zkm	0,2 Mio. Zkm	**78,1 Mio. Zkm**
RMV (HE)	26,2 Mio. Zkm	7,8 Mio. Zkm			1,8 Mio. Zkm		**35,9 Mio. Zkm**
NVV (HE)	4,4 Mio. Zkm		2,3 Mio. Zkm			2,3 Mio. Zkm	**9,0 Mio. Zkm**
LNVG (NI)	28,8 Mio. Zkm	22,9 Mio. Zkm			2,7 Mio. Zkm		**54,5 Mio. Zkm**
Provinz Groningen		0,3 Mio. Zkm					**0,3 Mio. Zkm**
NVR (NW)	13,0 Mio. Zkm	9,1 Mio. Zkm					**22,1 Mio. Zkm**
NWL (NW)	14,4 Mio. Zkm					13,5 Mio. Zkm	**27,9 Mio. Zkm**
VRR (NW)	66,6 Mio. Zkm	1,5 Mio. Zkm		6,1 Mio. Zkm		2,4 Mio. Zkm	**76,6 Mio. Zkm**
SPNV-Nord (RP)	12,9 Mio. Zkm					6,5 Mio. Zkm	**19,4 Mio. Zkm**
SPNV-Süd (RP)	1,2 Mio. Zkm	1,2 Mio. Zkm	3,7 Mio. Zkm	4,6 Mio. Zkm			**10,6 Mio. Zkm**
ZPS (SL)	2,9 Mio. Zkm		2,3 Mio. Zkm	0,5 Mio. Zkm			**5,7 Mio. Zkm**
VVO (SN)	5,1 Mio. Zkm	4,1 Mio. Zkm					**9,1 Mio. Zkm**
ZVMS (SN)	7,5 Mio. Zkm	0,3 Mio. Zkm	1,8 Mio. Zkm			2,2 Mio. Zkm	**11,8 Mio. Zkm**
ZVNL (SN)	15,2 Mio. Zkm					2,5 Mio. Zkm	**17,7 Mio. Zkm**
ZVON (SN)		3,3 Mio. Zkm					**3,3 Mio. Zkm**
ZVV (SN)		3,0 Mio. Zkm					**3,0 Mio. Zkm**
NASA (ST)							**0,0 Mio. Zkm**
Sachsen-Anhalt	21,2 Mio. Zkm	1,1 Mio. Zkm				9,4 Mio. Zkm	**31,7 Mio. Zkm**
NAH.SH (SH)	7,0 Mio. Zkm	7,8 Mio. Zkm		18,0 Mio. Zkm			**32,8 Mio. Zkm**
TLBV (TH)		0,3 Mio. Zkm					**0,3 Mio. Zkm**
Thüringen		10,6 Mio. Zkm	0,4 Mio. Zkm				**10,9 Mio. Zkm**
GESAMT	**484,5 Mio. Zkm**	**145,3 Mio. Zkm**	**33,7 Mio. Zkm**	**31,2 Mio. Zkm**	**5,2 Mio. Zkm**	**53,9 Mio. Zkm**	**753,8 Mio. Zkm**

↑ Tabelle 1: Bis 2033 geplante SPNV-Betriebsleistungen (in Klammern: Bundesland) [13]/[14]

NVBW (BW)	Netze (Auswahl)		
Diesel	Netz 11 Hohenlohe – Franken-Untermain	3,4 Mio. Zkm	12/19 – 12/31
	Netz 11 Hohenlohe – Franken-Untermain	3,6 Mio. Zkm	12/31 – 12/44
	Netz 12 Ulmer Stern	1,7 Mio. Zkm	12/19 – 12/32
	Netz 12 Ulmer Stern	1,7 Mio. Zkm	12/32 – 12/44
	Zollern-Alb-Bahn	1,4 Mio. Zkm	12/21 – 12/33
	D-Netz Bodensee	1,3 Mio. Zkm	12/23 – 12/30
	Nordschwarzwald	1,7 Mio. Zkm	12/25 – 12/37
BEMU	Netz 8 Ortenau	2,0 Mio. Zkm	12/23 – 12/35
offen	Ringzug Schwarzwald-Baar-Heuberg	1,3 Mio. Zkm	12/27 – 12/39
BEG (BY)	**Netze (Auswahl)**		
Diesel	Augsburger Netze – Los 2	3,4 Mio. Zkm	12/22 – 12/33
	Expressverkehr Nordostbayern*	8,3 Mio. Zkm	12/23 – 12/30
	Regionalverkehr Oberfranken*	5,3 Mio. Zkm	12/23 – 12/35
	Regionalverkehr Ostbayern Übergang*	4,7 Mio. Zkm	12/23 – 12/25
	Regionalverkehr Ostbayern Übergang – Los 2*	1,9 Mio. Zkm	12/23 – 12/26
	Regionalverkehr Ostbayern	4,7 Mio. Zkm	12/25 – 12/35
	Linienstern Mühldorf 2025+*	7,5 Mio. Zkm	12/24 – 12/30
	Romantische Schiene*	7,5 Mio. Zkm	12/24 – 12/36
	Franken-Südhessen	6,5 Mio. Zkm	12/27 – offen
	Allgäu-Schwaben	7,1 Mio. Zkm	12/29 – 12/30
D-/E-Lok	IR25 Interimsvertrag*	2,8 Mio. Zkm	12/22 – 12/23
	Expressverkehr Ostbayern Übergang – Los 1*	2,1 Mio. Zkm	12/23 – 12/26
	Expressverkehr Ostbayern	4,0 Mio. Zkm	07/28 – offen
VBB (BB)	**Netze**		
offen	Netz Ostbrandenburg 2*	6,3 Mio. Zkm	12/24 – 12/34
Berlin und Brandenburg	**Netze (Auswahl)**		
Diesel	Netz Nordwestbrandenburg	2,4 Mio. Zkm	12/28 – 12/40
	Netz Spree-Neiße	1,9 Mio. Zkm	12/30 – 12/42
	Heidekrautbahn	0,7 Mio. Zkm	12/20 – 12/23
HEMU	Heidekrautbahn	0,7 Mio. Zkm	12/23 – 12/38
offen	Netz Prignitz	0,2 Mio. Zkm	12/20 – offen

* Stand 2/2020

→

↑ Tabelle 2: Übersicht Dieselnetze und Alternativen [13] – Teil 1

RMV (HE)	**Netze**		
Diesel	Wetterau West-Ost	1,6 Mio. Zkm	12/22 – 12/32
	Ländchesbahn*	0,6 Mio. Zkm	12/22 – offen
	Lahntal/Vogelsberg/Rhön*	2,4 Mio. Zkm	12/23 – offen
	Odenwald	2,1 Mio. Zkm	12/27 – offen
	Niddertal	0,7 Mio. Zkm	12/27 – offen
	Dreieich	0,5 Mio. Zkm	12/27 – offen
HEMU	Taunus*	1,8 Mio. Zkm	12/22 – 12/32
NVV (HE)	**Netze**		
RT-Fahrzeuge	RT-Netz	2,3 Mio. Zkm	12/23 – 12/33
LNVG (NI)	**Netze**		
Diesel	Dieselnetz Niedersachsen-Mitte	4,5 Mio. Zkm	12/21 – 12/29
	Dieselnetz Niedersachsen-Mitte	4,5 Mio. Zkm	12/29 – offen
	Weser-Ems	4,9 Mio. Zkm	12/26 – offen
	DINSO I	4,1 Mio. Zkm	12/29 – offen
	DINSO II	3,1 Mio. Zkm	12/29 – offen
	RE 5 Cuxhaven-Hamburg	1,6 Mio. Zkm	12/27 – offen
HEMU	Weser-Elbe	1,4 Mio. Zkm	12/21 – 12/23
	Weser-Elbe	1,4 Mio. Zkm	12/25 – offen
NVR (NW)	**Netze (Auswahl)**		
Diesel	euregiobahn (RB 20)	1,5 Mio. Zkm	12/21 – 12/25
Diesel	Kölner Dieselnetz	7,2 Mio. Zkm	12/13 – 12/33
offen	Nordast Rurtalbahn (RB 21 Nord)**	0,6 Mio. Zkm	12/25 – offen
	Südast Rurtalbahn (RB 21 Süd)**	0,5 Mio. Zkm	12/25 – offen
	Eifel-Bördebahn (RB 28)**	0,3 Mio. Zkm	12/25 – offen
NWL (NW)	**Netze**		
offen	Netz OWL	5,4 Mio. Zkm	12/25 – offen
	Netz westliches Münsterland	3,0 Mio. Zkm	12/26 – offen
	Sauerlandnetz	5,1 Mio. Zkm	12/28 – offen
VRR (NW)	**Netze**		
Diesel	Emscher-Münsterland-Netz 2021	1,5 Mio. Zkm	12/21 – 12/28
BEMU	Niederrhein-Münsterland-Netz	6,1 Mio. Zkm	12/25 – 12/40
offen	S7	1,5 Mio. Zkm	12/28 – offen
	Erft-Schwalm-Netz	0,9 Mio. Zkm	12/29 – offen

* Stand 2/2020 ** Auskunft NVR

→

↑ Tabelle 3: Übersicht Dieselnetze und Alternativen [13] – Teil 2

SPNV-Nord (RP)	**Netze**		
offen	Hunsrück (Steilstrecke)	0,2 Mio. Zkm	12/29 – offen
	Moselweinbahn	0,2 Mio. Zkm	12/29 – offen
	Daadetalbahn	0,1 Mio. Zkm	12/29 – offen
	Eifel-Westerwald-Sieg-Netz	6,1 Mio. Zkm	12/30 – offen
SPNV-Süd (RP)	**Netze**		
Diesel	Pfalznetz Los 2	1,2 Mio. Zkm	12/23 – offen
Diesel-Elektrisch	Südwest-Grand Est	3,7 Mio. Zkm	12/24 – offen
BEMU	Pfalznetz Los 1	4,6 Mio. Zkm	12/24 – offen
VVO (SN)	**Netze**		
Diesel	VVO Dieselnetz	2,3 Mio. Zkm	12/21 – 12/31
ZVMS (SN)	**Netze**		
Diesel	Freiberg-Holzhau	0,3 Mio. Zkm	12/19 – 12/24
Diesel-Elektrisch	Chemnitzer-Modell-Netz	1,8 Mio. Zkm	12/20 – offen
offen	SPNV-Netz Erzgebirge	2,2 Mio. Zkm	12/21 – offen
ZVNL (SN)	**Netze**		
offen	DNWS (RB 110)	1,0 Mio. Zkm	12/25 – 12/37
	DNWS (RB 113)	0,5 Mio. Zkm	12/25 – offen
Sachsen-Anhalt	**Netze**		
Diesel	Elster-Geiseltal	0,8 Mio. Zkm	12/19 – 12/32
offen	Dieselnetz Sachsen-Anhalt	9,4 Mio. Zkm	12/32 – offen
NAH.SH (SH)	**Netze**		
Diesel	Netz West	5,1 Mio. Zkm	12/25 – 12/34
	Netz Süd	2,7 Mio. Zkm	12/27 – 12/37
BEMU	XMU Ost	4,0 Mio. Zkm	12/22 – offen
	XMU Nord	5,0 Mio. Zkm	12/23 – offen
	XMU Nord/Ost	9,0 Mio. Zkm	12/32 – offen
Thüringen	**Netze**		
Diesel	NeiTec-Netz Thüringen	4,6 Mio. Zkm	12/21 – 12/28
	Ebx 13 Zeulenroda-Hof	0,4 Mio. Zkm	12/22 – 12/24
	Dieselnetz Ostthüringen	5,4 Mio. Zkm	12/24 – 12/36
Diesel-Elektrisch	OBS	0,4 Mio. Zkm	01/21 – 12/31

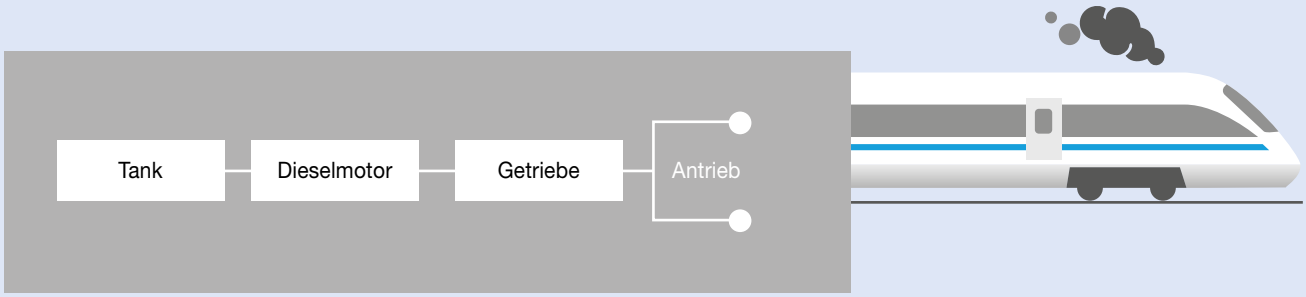
↑ Tabelle 4: Übersicht Dieselnetze und Alternativen [13] – Teil 3

3 Aufstellung der Fahrzeugalternativen

In der Vergangenheit war es für Aufgabenträger und Eisenbahnverkehrsunternehmen vergleichsweise einfach, für ihre Linien die Antriebsart der einzusetzenden Triebfahrzeuge festzulegen: Auf durchgehend elektrifizierten Strecken kamen stets Elektrotriebzüge zum Einsatz. Fehlte eine Oberleitung oder war diese lückenhaft, benötigte man Dieselfahrzeuge. Erforderte der Betriebsplan trotz fehlender Elektrifizierung besonders spurtstarke Fahrzeuge, wählte man in den 1990er Jahren z. B. Dieseltriebwagen des Typs Regio-Sprinter von Siemens-DUEWAG oder später in den 2000er Jahren den Regio-Shuttle von Stadler. Diese ließen sich im Falle höherer Verkehrsaufkommen auch in Mehrfach-Traktion einsetzen. Bei entspannteren Dynamikanforderungen setzte man auf modernere Dieseltriebzüge wie Coradia LINT 54 von Alstom. Für den technischen Vergleich der Fahrzeuge siehe → Abbildung 3.

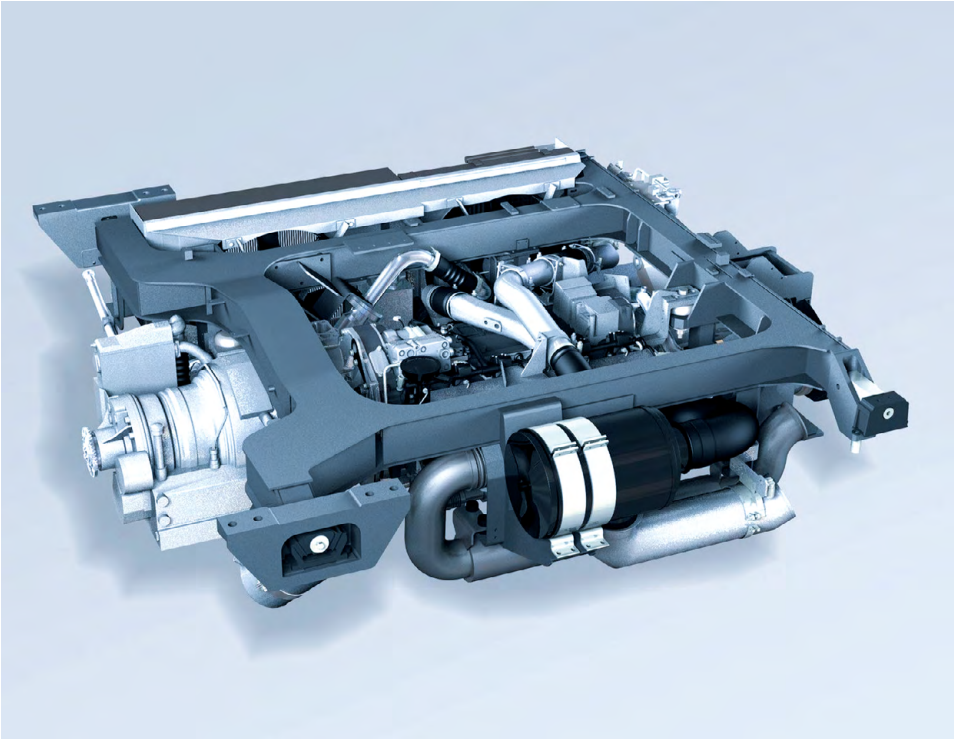
DMU

Dieseltriebzug DMU	Regio-Sprinter	Regio-Shuttle RS1	Coradia LINT 54
	1-teilig	1-teilig	2-teilig
Länge über Kupplung	24.800 mm	25.000 mm	54.270 mm
Sitzplätze	84 Plätze	79 Plätze	165 Plätze
Stehplätze	100 Plätze	85 Plätze	184 Plätze
Eigengewicht	49.200 kg	42.000 kg	98.000 kg
Antriebsleistung	2 × 198 kW	2 × 265 kW	3 × 390 kW
Höchstgeschwindigkeit	120 km/h	120 km/h	140 km/h
Max. Beschleunigung	1,10 m/s²	1,20 m/s²	0,60 m/s²
Hersteller	Siemens/DUEWAG	Stadler Pankow	Alstom



Fotos: NVR/Smilla Dankert · WK · WK (v.l.n.r.)

↑ Abbildung 3: Technische Daten zu Dieselfahrzeugen im Nahverkehr (Quelle: Rurtalbahn GmbH)



Quelle: Rolls-Royce Power Systems

← Abbildung 4: MTU-Power-Pack Baureihe 1800 für LINT-Triebwagen (EU Stufe IIIB, 2016)

Fahrzeuge mit diesel-mechanischem Antrieb benötigen ein Getriebe, um die Leistung des Verbrennungsmotors auf die Schiene oder Straße zu bringen. Bei Schienenfahrzeugen wird der Antriebsstrang mit Dieselmotor auch als Power-Pack bezeichnet. Davon sind in typischen Dieseltriebwagen und -zügen zwei bis drei Stück verbaut. Ihre Abgase werden über das Dach abgeleitet. Steigende Anforderungen an Energieeffizienz und Fahrzeugstabilität wie auch verschärfte Abgasnormen trieben die Weiterentwicklung dieser Antriebstechnik stetig voran. Die neueste Generation der Dieseltriebzüge von Alstom erfüllt die *EU Stufe V Abgasnorm* → [15]. Solche wichtigen Verbesserungen setzen sich jedoch angesichts der überaus langen Betriebslebensdauern im Vergleich zu Lastkraftwagen im Straßenverkehr nur langsam durch.

Mit der politischen und gesellschaftlich befürworteten Vorgabe, baldmöglichst auf den Einsatz von Schienenfahrzeugen mit klimaschädigenden Antrieben zu verzichten, ist die Entscheidungssituation der Verantwortlichen des SPNV deutlich komplexer geworden: Die Wahl einer Alternative erweist sich als Systementscheidung mit langfristigen Konsequenzen. Aus Sicht der Autoren sind nur solche Fahrzeugkonzepte echte Alternativen, bei denen der Antrieb durch Elektromotoren erfolgt, also vollständig auf Verbrennungsmotoren verzichtet wird. Ein Grund ist, dass hybride Alternativen das Ziel der vollständigen Dekarbonisierung bis 2050 nicht erfüllen und damit nur Übergangslösungen darstellen. Die somit in Frage kommenden Alternativen lassen sich als direkte oder indirekte Elektrifizierung charakterisieren: *Direkt* im Sinne einer durchgehenden Oberleitung, so dass klassische Elektrotriebzüge eingesetzt werden können; *indirekt* im Sinne von Fahrzeugen, deren Antriebsstrom von Batterien oder Brennstoffzellen bereitgestellt wird.

Die Aufstellung der relevanten Alternativen umfasst somit:

- Oberleitungs-Elektrotriebzug (EMU = Electric Multiple Unit)
- Batterie-Oberleitungs-Hybrid-Triebzug (BEMU = Battery EMU)
- Wasserstoff-Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid-Triebzug (HEMU = Hydrogene EMU)

Deren technische Besonderheiten werden im Folgenden am Beispiel von Fahrzeugen erläutert, die auf dem Markt bereits angeboten oder in Kürze verfügbar sein werden.

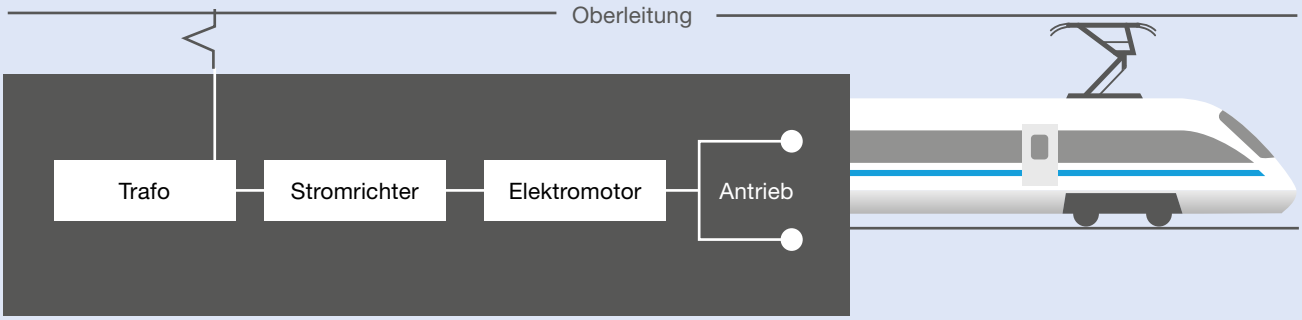
3.1 Elektrotriebzug (EMU)

Elektrotriebzüge (EMU) beziehen den Antriebsstrom aus der Oberleitung. Ihre Elektromotoren sind in Drehgestellen untergebracht, wo sie direkt über die Achse je ein Radpaar antreiben → Abbildung 6. Die Umsetzung des Stroms in Bewegungsenergie erfolgt mit einem Wirkungsgrad von über 90 Prozent. Beim Bremsen wechseln die Elektromotoren in den Generatorbetrieb. Die so rekuperierte Energie kann in die Oberleitung zurückgespeist werden, sofern andere Elektrotriebzüge diese im selben Moment für ihre Beschleunigung nutzen können.

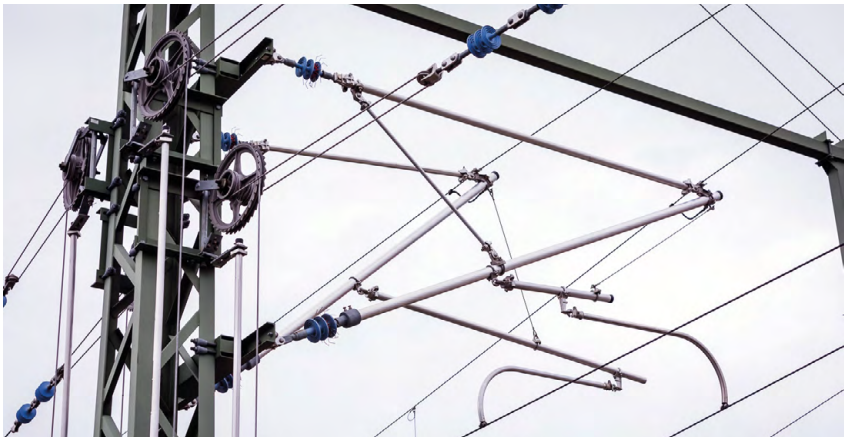
Fotos: WK

EMU

Elektrotriebzug EMU	TALENT 2	FLIRT 1	Desiro HC RRX
	3-teilig	3-teilig	4-teilig
Länge über Kupplung	56.200 mm	58.166 mm	105.252 mm
Sitzplätze	160 Plätze	181 Plätze	400 Plätze
Stehplätze	k. A.	k. A.	k. A.
Betriebsmasse	114.000 kg	105.200 kg	200.000 kg
Antriebsleistung	2.020 kW	2.600 kW	4.000 kW
Höchstgeschwindigkeit	160 km/h	160 km/h	160 km/h
Max.Beschleunigung	1,10 m/s²	1,10 m/s²	1,10 m/s²
Hersteller	Bombardier	Stadler Rail	Siemens-Mobility
	Quelle: Bombardier	Quelle: Stadler	Quelle: Siemens-Mobility



↑ Abbildung 5: Technische Daten für Oberleitungs-Elektrotriebzüge im Nahverkehr (Beispiele)



← Abbildung 6: Oberleitung (oben) und Jakobs-Drehgestell (unten)

Fotos: NVR/Smilla Dankert (oben) · WK (unten)

3.2 Batterietriebzug (BEMU)

Die heute von Fahrzeugherstellern angebotenen oder verbindlich angekündigten Batterietriebzüge (BEMU) sind von ihrem Aufbau her wie klassische EMU konzipiert. Sie verfügen zusätzlich über große Traktionsbatterien, die es ermöglichen, Oberleitungslücken von – Stand heute – 80 bis 120 Kilometern Länge zu überbrücken. Dank Pantografen auf dem Dach agiert ein BEMU auf elektrifizierten Strecken wie ein EMU und kann zugleich seine Batterie mit einer Leistung von einem Megawatt und mehr zügig nachladen.

Die tatsächliche Reichweite eines BEMU auf oberleitungsfreien Strecken hängt maßgeblich von der installierten Kapazität und dem Grad der Ladungsnutzung ab. Verschärfte Fahranforderungen oder klimatische Besonderheiten erhöhen den Energiebedarf und schränken die für den Fahrbetrieb nutzbare Batteriekapazität und somit die Reichweite ein. Um den Einfluss solcher Parameter auf den Betrieb mit Akku einschätzen zu können, fehlt den Herstellern zum heutigen Zeitpunkt die notwendige Langzeiterfahrung. So kommen sie nicht umhin, die Batterie streckenspezifisch auf der Basis von Simulationen der gegebenen Fahrprofile auszulegen. Die nutzbare Kapazität einer Batterie entspricht nicht der im Datenblatt angegebenen nominalen Kapazität. Für ihre bestmögliche Lebensdauer sollte im Fahrbetrieb ein SoC-Fenster (state of charge = Ladezustand) von 20 bis 80 Prozent eingehalten werden. Die Kapazität ist daher so auszulegen, dass die Batterie im Normalfall in einem SoC-Fenster von 40 bis 80 Prozent betrieben wird. Störfälle, extreme Klimabedingungen oder sonstige Abweichungen lassen sich abfangen, indem die Batterie vorübergehend stärker als normal beansprucht wird, ohne sie damit langfristig zu schädigen. Das vielfach befürchtete Liegenbleiben von Batterietriebzügen wegen erschöpfter Akkus wird so unwahrscheinlich.

Die Rekuperation der Bremsenergie ist eine die Energieeffizienz des BEMU signifikant steigernde Option, da sie nicht davon abhängt, ob es in der Umgebung einen anderen Zug gibt, der die rekuperierte Energie im selben Moment für seine Beschleunigung nutzen kann. Stattdessen kann diese Energie unmittelbar genutzt werden, um die Traktionsbatterie nachzuladen.

Foto: Bombardier

↑ Abbildung 7: Batterietriebzug TALENT 3

Nachteilig ist, dass der BEMU wegen des hohen Batteriegewichtes um bis zu 10 Prozent schwerer ist als der EMU gleicher Bauart. Die Notwendigkeit, die Batterie über den Tag regelmäßig nachladen zu müssen, ist ein weiterer Nachteil, weil sie eine Änderung des ursprünglichen Betriebskonzeptes mit DMU erfordern kann. Zudem können zusätzliche Maßnahmen wie die Einrichtung von Elektrifizierungsinseln für das Nachladen der Batterie erforderlich werden.

Aus systemischer Sicht ist das BEMU-Konzept vorteilhaft, da es im gleichen Maße wie beim EMU den kontinuierlich ansteigenden Anteil an erneuerbarer Energie nutzen wird und damit ohne Zusatzaufwand immer *grüner* wird. Zudem ist es auf dem Weg zur vollständigen Elektrifizierung eine sinnvolle Zwischenlösung bis zur möglichen Fertigstellung durchgehender Oberleitungen.

In → Abbildung 8 sind beispielhaft Daten zu folgenden aktuellen BEMU-Modellen aufgeführt:

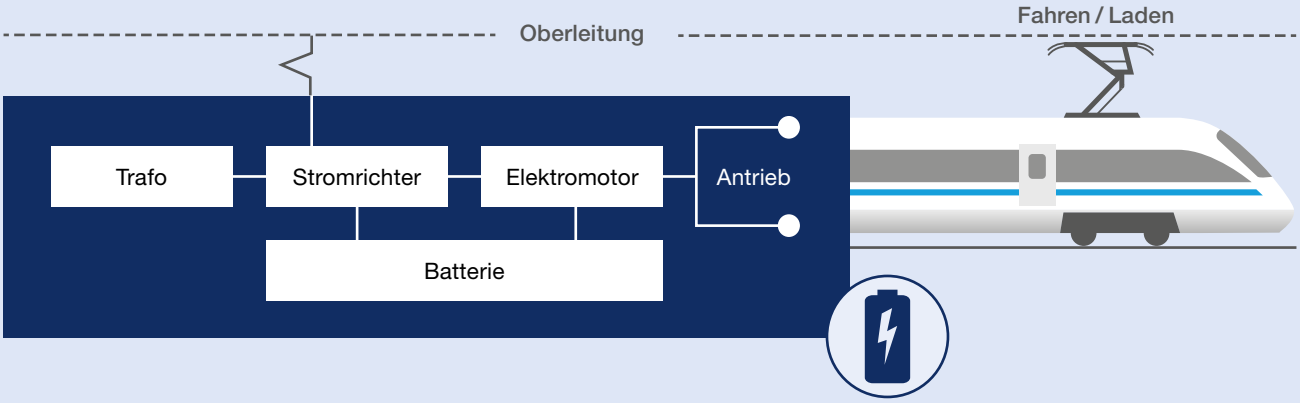
- der TALENT 3 BEMU von Bombardier → Abbildung 7 und → Abbildung 8 links, der als erster Batterietriebzug im Jahre 2018 auf der Messe InnoTrans in Berlin der Öffentlichkeit vorgestellt wurde;

- der CityJet Eco → Abbildung 8 Mitte und → Abbildung 10, den Siemens-Mobility für die Österreichische Bundesbahn (ÖBB) auf Basis des Elektrotriebzugs Desiro ML entwickelt hat und in Österreich auf der Strecke Linz nach Sankt Nikola-Struden bereits im regulären Fahrgastbetrieb getestet wird;

- der Mireo Plus B, der als 2- und 3-teilige Variante vorgesehen ist. Grundlage ist die Plattform Mireo Plus → Abbildung 8 rechts und → Abbildung 9, welche mit kürzeren Wagenlängen aus dem Mireo-EMU abgeleitet wurde. NVBW hat im August 2019 Siemens-Mobility den Auftrag für die Lieferung von 20 Fahrzeugen dieses Typs für das NETZ 8 Ortenau erteilt, mit der Vorgabe, diese über 29,5 Jahre hinweg auch zu warten und instand zu halten → [14].

BEMU

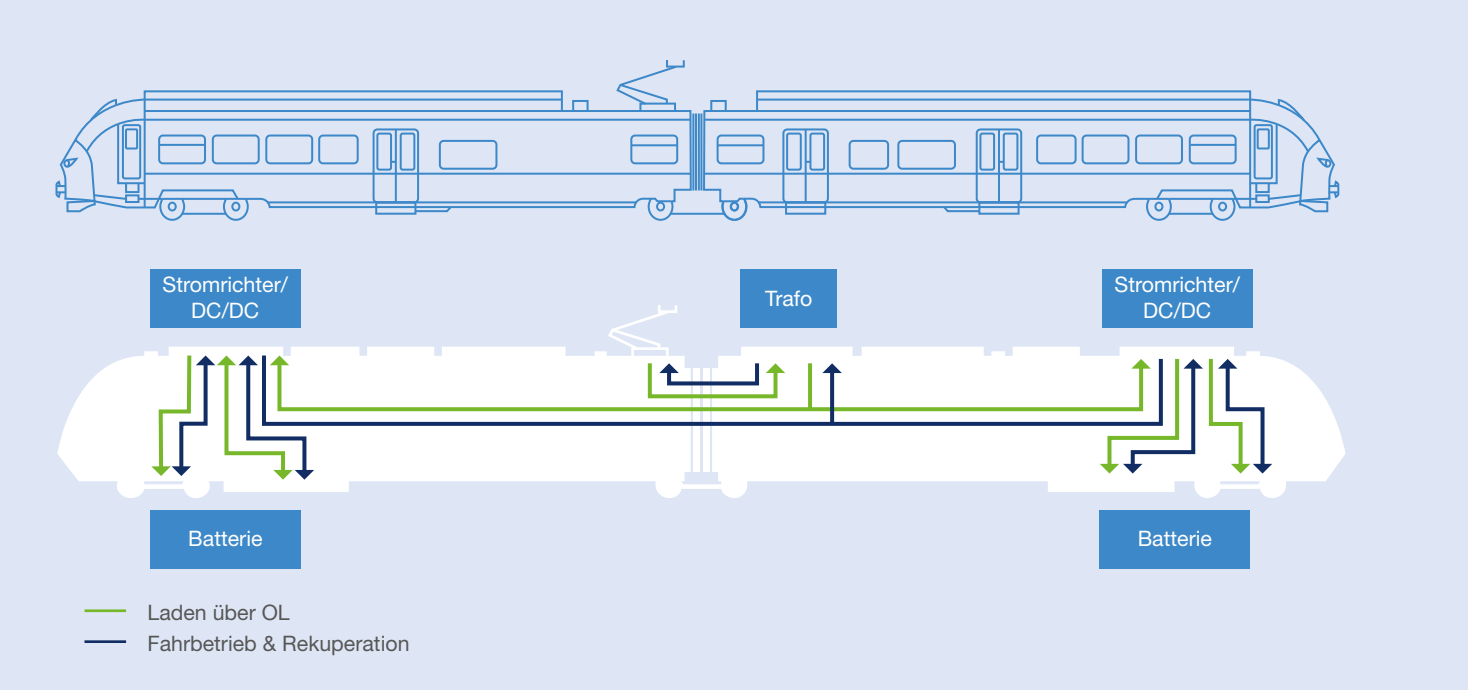
Batterietriebzug BEMU	TALENT 3 BEMU	CityJet Eco	Mireo Plus B	Mireo Plus B
	3-teilig	3-teilig	3-teilig	2-teilig
Länge über Kupplung	56.200 mm	75.125 mm	62.900 mm	46.560 mm
Sitzplätze	165 Plätze	244 Plätze	155 – 194 Plätze	105 – 139 Plätze
Stehplätze	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Betriebsmasse	> 100.000 kg	> 130.000 kg	124.500 kg	96.500 kg
Antriebsleistung	1.800 kW	bis 2.600 kW	2 × 850 kW	2 × 850 kW
Höchstgeschwindigkeit	140 km/h	140 km/h	140 km/h	140 km/h *
im Batteriemodus	k. A.	100 km/h	k. A.	k. A.
Max.Beschleunigung	1,10 m/s²	1,00 m/s²	1,00 m/s²	1,10 m/s²
im Batteriemodus	k. A.	0,77 m/s²	k. A.	k. A.
Batteriekapazität	k. A.	528 kWh	700 kWh	580 kWh
Reichweite Batterie	100 km	80 km	120 km	80 km
Hersteller	Bombardier	Siemens-Mobility	Siemens-Mobility	Siemens-Mobility
	Quelle: Bombardier	Quelle: Siemens-Mobility	Quelle: Siemens-Mobility	* 160 km/h mit Magnetbremsen



↑ Abbildung 8: Technische Daten zu Batterietriebzügen
(Verfügbare Daten Stand 02/2020)

Fotos: Bombardier · Siemens · Siemens (v.l.n.r.)

Abbildung: eigene Darstellung nach Siemens-Mobility · Foto: WK



↑ Abbildung 9: 2-teiliger Mireo Plus B –
Plattform und Energiefluss-Diagramm im BEMU

↑ Abbildung 10: BEMU CityJet Eco der ÖBB
auf der Strecke Linz – St.Nikola-Struden (Oktober 2019)

← Abbildung 11: Batterietriebzüge FLIRT 3 Akku (oben) und Coradia Continental BEMU (Computer-Grafik unten)

Foto: Stadler (oben) · Computer-Grafik: Alstom (unten)

Keine verwertbaren technischen Daten lagen dem VDE vor zu:

- FLIRT Akku – dem auf dem FLIRT-3-EMU basierenden BEMU von Stadler → Abbildung 11 oben. Im Oktober 2019 unterzeichneten der Hersteller und der NAH.SH in Schleswig-Holstein einen Liefervertrag über 55 Fahrzeuge für die Netze XMU Nord und XMU Ost → [16]. Hiernach ist Stadler für die Instandhaltung dieser Fahrzeuge über einen Zeitraum von 30 Jahren verantwortlich.

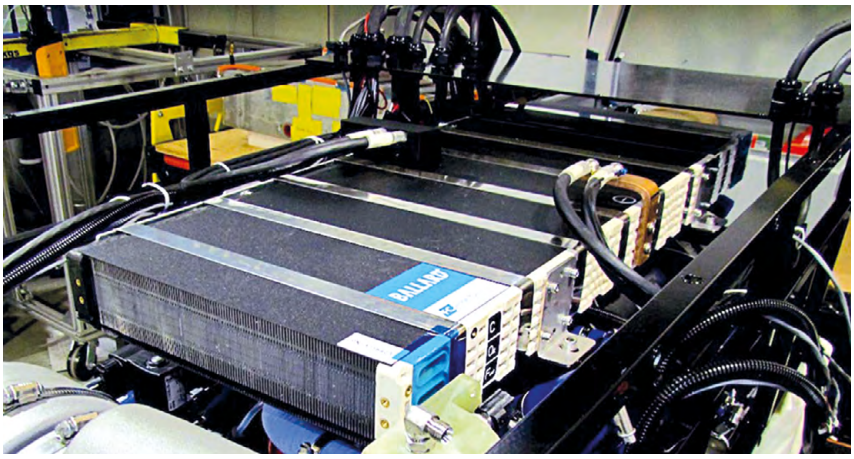
- dem auf Coradia Continental-EMU basierenden BEMU von Alstom → Abbildung 11 unten. Der Verkehrsverbund Mittelsachsen ZVMS beschloss im Februar 2020, elf Fahrzeuge dieses Typs anzuschaffen. Diese sollen ab 2023 bis 2028 auf der Strecke Leipzig–Chemnitz zum Einsatz kommen und nach Fertigstellung der durchgehenden Elektrifizierung als EMU betrieben zu werden. → [17]

3.3 Brennstoffzellentriebzug (HEMU)

Technisch ist der HEMU ebenso wie der BEMU ein Triebzug mit elektromotorischem Antrieb. Konzeptionell scheint sich bei Bestellern wie Herstellern die Vorstellung durchgesetzt zu haben, dass Brennstoffzellentriebzüge grundsätzlich auf weitläufig oberleitungsfreien Strecken eingesetzt werden, also kein Pantograf auf dem Dach benötigt wird. Damit entfällt beim HEMU von vornherein die Option eines EMU-Modus auf Strecken unter Oberleitung.

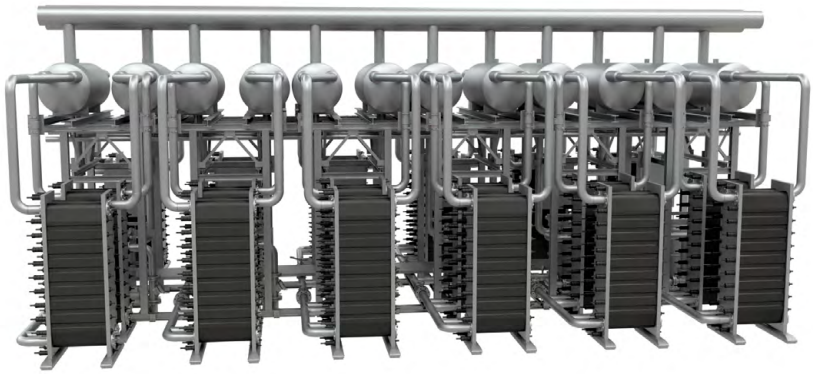
Der von Alstom angebotene HEMU, → Abbildung 15 links und → Abbildung 16, entspricht in seinem Wagenaufbau dem Coradia LINT 54, einem erfolgreichen zweiteiligen DMU von Alstom. Bei der Konzeption dieses Fahrzeugs war es ein Anliegen von Alstom, das Betriebskonzept der bislang eingesetzten DMU zu übernehmen. Entsprechend lag der besondere Fokus auf großer Reichweite, um mit wenigen an geeigneten Standorten platzierten Wasserstoff-Tankstellen auszukommen. Selbst die im Vergleich zum EMU schwache Motorisierung eines DMU diente als Vorbild. Inzwischen wird jedoch gerade dieser Punkt vielfach als Argument gegen das HEMU-Konzept angeführt, obwohl die Stärke der Motorisierung keine technologische Vorgabe ist. Aus diesem Grunde hat Siemens-Mobility für seine HEMU-Variante Mireo Plus H, → Abbildung 15 rechts, eine wesentlich höhere Antriebsleistung vorgesehen.

Für den dynamischen Betrieb eines HEMU genügt es nicht, den Strom ausschließlich von Brennstoffzellen bereitstellen zu lassen, denn diese sind nicht in der Lage, die für zügige Beschleunigungen benötigten hohen Ströme zu liefern. Aus diesem Grunde muss der Brennstoffzellen-Stack → Abbildung 12 um eine Dynamikbatterie ergänzt werden, die kleiner ist als im Falle eines BEMU und nicht ständig genutzt wird. Damit offenbart sich ein technologischer Nachteil: Das HEMU-Konzept erfordert zwei Technologiekomponenten, nämlich Brennstoffzelle und Batterie – mit entsprechenden Auswirkungen auf Fahrzeug-Anschaffungs- und -Instandhaltungskosten. Ein weiterer Nachteil ist der Wirkungsgrad, mit dem die im Wasserstoff gespeicherte Energie in Antriebsstrom umgewandelt wird, denn damit ist der Energiebedarf des HEMU grundsätzlich höher als der eines BEMU oder EMU. Auch in umgekehrter Richtung ist die Erzeugung des Wasserstoffs durch Elektrolyse, → Abbildung 13, nachteilig für die Energiebilanz.



← Abbildung 12: Brennstoffzellen-Stack (Ballard Power)

↓ Abbildung 13: Elektrolyseur (Siemens Silyzer 300)



Dank der konzeptionell notwendigen Dynamikbatterie hat auch der HEMU den Vorzug, seine Bremsenergie zwischenspeichern zu können, um sie in Beschleunigungsphasen zu nutzen und damit Wasserstoff zu sparen → Abbildung 14. Die allgemeine Diskussion zu *grünem Wasserstoff* als ideale Speichermöglichkeit für erneuerbare Energien weist darauf hin, dass das HEMU-Konzept trotz seiner wirkungsgradbedingten Nachteile systemisch vorteilhaft ist, weil es wie das BEMU-Konzept die Energiewende begleitet und darüber hinaus die notwendige Sektorenkopplung unterstützt.

In → Abbildung 15 sind beispielhaft Daten zu zwei aktuellen HEMU-Modellen aufgeführt. Diese sind:

- der Coradia iLINT → Abbildung 15 links, den Alstom erstmalig auf der InnoTrans 2016 in Berlin vorstellte. Dieser Brennstoffzellentriebzug wird ab 2022 im Netz Weser-Elbe der niedersächsischen Landesnahverkehrsgesellschaft LNVG, ab 2023 im Netz Taunus des Rhein-Main-Verkehrsverbundes RMV und ab 2024 auf der Heidekrautbahn nördlich von Berlin zum Einsatz kommen.

- der Mireo Plus H, der wie Mireo Plus B als 2- und 3-teilige Variante vorgesehen ist.

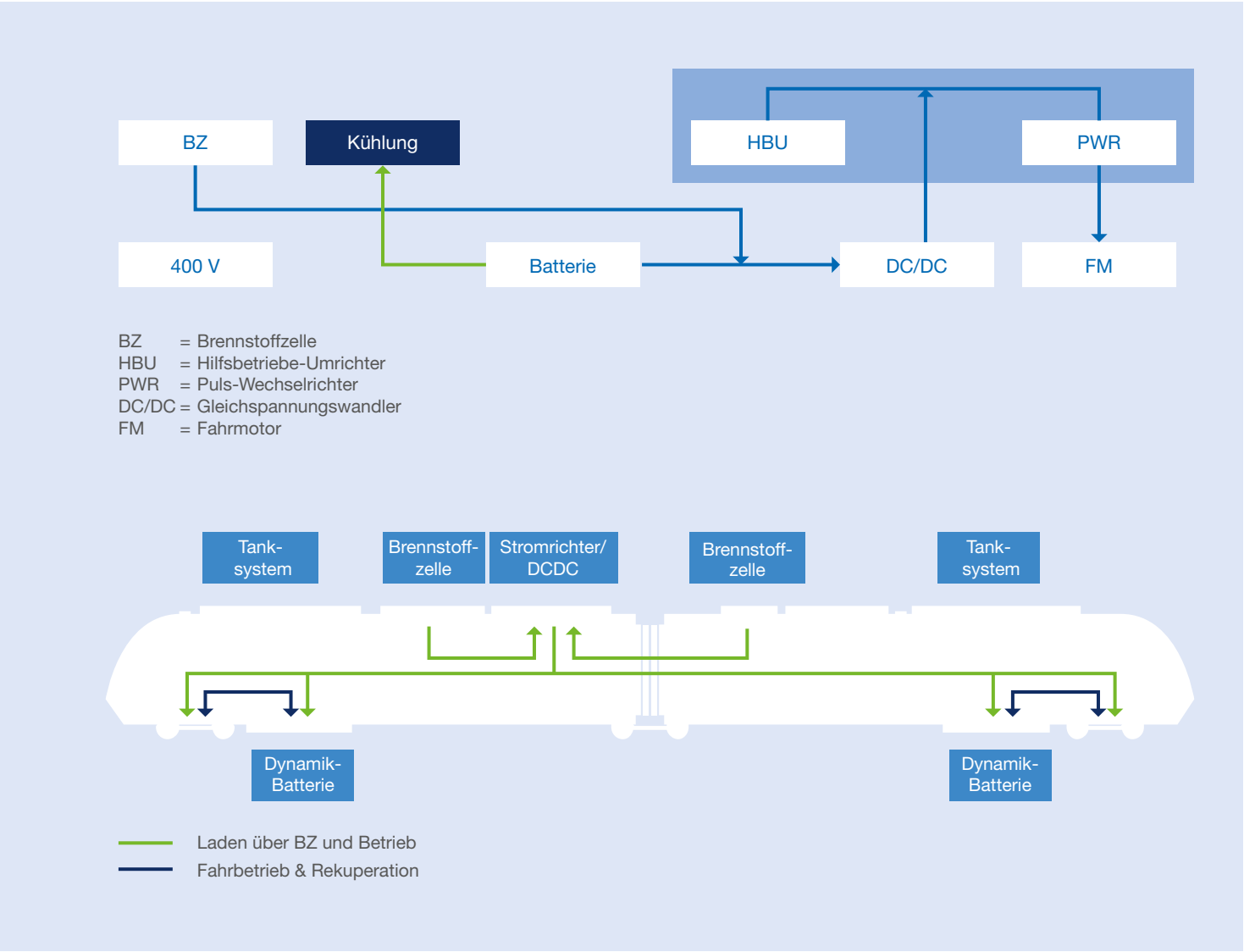


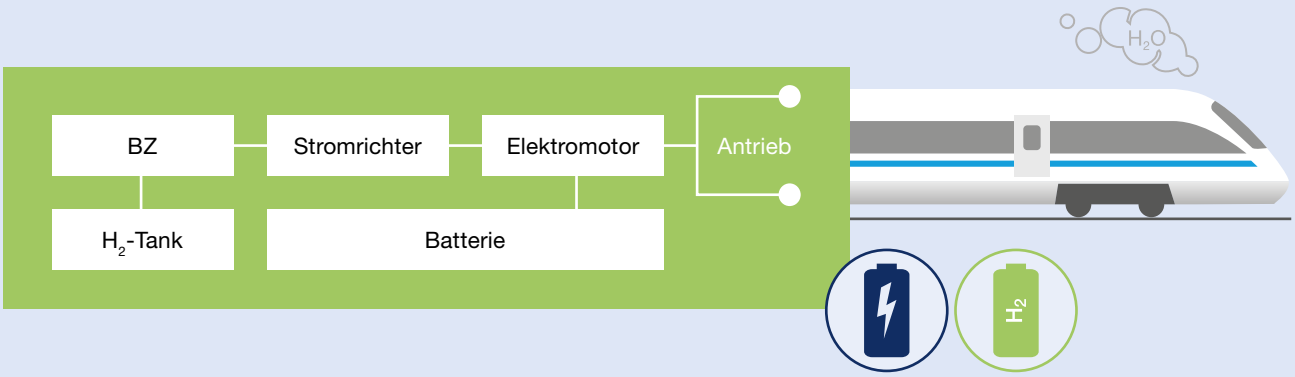
Abbildung: eigene Darstellung nach Siemens-Mobility

↑ Abbildung 14: 2-teiliger Mireo Plus H – Antriebssystem und Energiefluss-Diagramm im HEMU

Fotos: Bombardier · WK · Siemens (v.l.n.r.)

HEMU

Wasserstoff-Brennstoffzellen-Triebzug HEMU	Coradia iLINT 54 Typ I [Typ II]	Mireo Plus H	Mireo Plus H
	2-teilig	3-teilig	2-teilig
Länge über Kupplung	54.270 mm	62.900 mm	46.560 mm
Sitzplätze	153 [160] Plätze	155 – 194 Plätze	105 – 139 Plätze
Stehplätze	k. A.	k. A.	k. A.
Betriebsmasse	106.900 kg	> 120.000 kg	> 95.000 kg
Antriebsleistung	2 × 277 kW [2 × 367 kW]	2 × 850 kW	2 × 850 kW
Höchstgeschwindigkeit	140 km/h	140 km/h	140 km/h *
Max.Beschleunigung	1,10 m/s²	1,00 m/s²	1,10 m/s²
Brennstoffzellen-Leistung	2 × 200 kW	2 × 200 kW	2 × 200 kW
Größe Wasserstoff-Tanks	260 kg	250 kg	130 kg
Fahrzeug-Reichweite	1.000 km	900 km	550 km
Kapazität Dynamik-Batterie	k. A.	2 × 175 kWh	2 × 175 kWh
Hersteller	Alstom	Siemens-Mobility	Siemens-Mobility
	Quelle: Alstom	Quelle: Siemens Mobility	* 160 km/h mit Magnetbremsen



↑ Abbildung 15: Technische Daten zu Brennstoffzellentriebzügen (Verfügbare Daten Stand 02/2020)

Foto: WK

↑ Abbildung 16: Alstom Coradia iLINT in Obermaubach an der Strecke RB 21 Süd (Februar 2020)

4 Methodiken der Entscheidungsfindung

Politik und Gesellschaft sind sich einig: Selbst auf schwach befahrenen Nebenstrecken sollen künftig keine Dieseltriebzüge oder -wagen mehr eingesetzt werden. Aufgabenträger und Eisenbahnverkehrsunternehmen stehen damit vor einer systemischen Entscheidung mit unklarer Auswirkung auf den wirtschaftlichen Betrieb der bislang Dieselbefahrenen Strecken. Die Verantwortlichen sehen sich mit einer Fragestellung konfrontiert, deren Einschätzung technologisches und systemisches Wissen voraussetzt, also das Wissen über Wirkungsgrade, technische Reifegrade und Verfügbarkeiten. Zudem sind die aktuellen Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Energien, langfristige Pläne zur systemischen Kopplung von Stromnetz, Mobilität, Industrie und Wärme relevant und die Bedeutung von Wasserstoff als *grünem* Energieträger und dessen Erzeugung durch Elektrolyse zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass es heute noch wenig Erfahrung mit BEMU- oder HEMU-Fahrzeugen im regulären Betrieb gibt. Unter diesen Voraussetzungen ist es kaum möglich, *aus dem Bauch heraus* eine beste Alternative für ein Dieselnetz zu finden und auszuwählen.

Der VDE setzt sich im Rahmen seiner zweiten Studie → [2] mit dieser komplexen Thematik auseinander und demonstriert, dass die Nutzwertanalyse ein geeignetes Verfahren für die betriebliche und volkswirtschaftliche Einschätzung und den Vergleich der Alternativen darstellt. Das Prinzip dieser Methodik wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Da sich die direkte oder indirekte Elektrifizierung heutiger Dieselstrecken unter jeweils verschiedenen spezifischen Rahmenbedingungen letztlich als gleichwertig erweist, braucht es ein weiteres Verfahren, um die Alternativen im Sinne langfristiger Investitionen über ihre Kapitalwerte einzuschätzen und zu vergleichen. Dafür erweist sich die Kapitalwertanalyse als geeignete Bewertungsmethodik. Deren Prinzip wird im zweiten Abschnitt dieses Kapitels beschrieben.

4.1 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein Verfahren aus der Entscheidungstheorie → [18], welches immer dann sinnvoll anwendbar ist, wenn in einem Kreis von Verantwortlichen und Betroffenen eine Systementscheidung herbeizuführen ist und verschiedene komplexe Alternativen zur Wahl stehen. Ihre Resultate sind qualitativer Natur, und ihre Aussagekraft und Allgemeingültigkeit hängt vom Erfahrungshintergrund und der statistischen Relevanz der befragten Personen ab. Einer Entscheidung zugunsten einer Alternative liegen in der Regel eine Reihe von Kriterien zu Grunde, deren Nicht-Erfüllung zum Ausschluss der betreffenden Option führen würde. Damit kommen grundsätzlich nur solche Alternativen in Betracht, die alle Muss-Kriterien erfüllen. An den jeweiligen Erfüllungsgraden orientiert, wird es möglich, die verschiedenen Alternativen zu vergleichen und qualitativ zu bewerten.[13] Die *Wirtschaftlichkeit* ist eines der grundlegenden Entscheidungskriterien. In der Nutzwertanalyse des VDE wird sie allerdings nur qualitativ betrachtet, das heißt, es wird das Potenzial eingeschätzt, dass sich die Alternative langfristig wirtschaftlich rechnen wird. Für eine Investitionsentscheidung wäre die so gewonnene Aussage zu schwach, zumal die Wirtschaftlichkeit im Falle einer Bahnstrecke auch davon abhängt, durch welches Gelände sie führt und unter welchen betrieblichen Bedingungen die Fahrzeuge dort eingesetzt werden.

13 Zu den Ergebnissen siehe Studie → [2] Diese ist kostenlos als Download verfügbar.

4.2 Kapitalwertmethode

Die Investition in ein alternatives System als Ersatz für ein bestehendes, das sich – wie im Falle von Dieselfahrzeugen auf Nebenstrecken – bislang als wirtschaftliche Lösung bewährt hat, erscheint nur dann sinnvoll, wenn es – gegebenenfalls gestützt durch geeignete Rahmenbedingungen und Maßnahmen – langfristig ein positives wirtschaftliches Ergebnis liefern kann.

Eine Möglichkeit, für eine bestimmte Alternative eine Investitionsentscheidung herbeizuführen, bietet die vergleichende *dynamische Investitionsrechnung*. Grundlage hierfür ist die in → [4] beschriebene Formel zur Berechnung des Kapitalwertes:

$$C_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{R_t}{q^t} \pm \frac{L_n}{q^n} \qquad \text{Formel 4.1}$$

C_0 [€] = Kapitalwert = Gegenwartswert der Zahlungsströme einer Investition

$-I_0$ [€] = Investitionsbetrag zu Beginn des Betrachtungszeitraums

t [Jahr] = Jahr t innerhalb der Zeitspanne 0 bis n Jahre

n [Jahr] = Nutzungsdauer des Investitionsobjekts bzw. Länge des Betrachtungszeitraums

R_t [€] = Rückfluss im Jahr t (= Einzahlungen minus Auszahlungen)

$\frac{1}{q^t} = \frac{1}{(1+i)^t}$ = Abzinsungsfaktor falls $t > 0$ bzw. Aufzinsungsfaktor falls $t < 0$

$q = 1 + i$ [%] = Kalkulationszinssatz

L_n [€] = Liquidationserlös bzw. -aufwand im Jahr n am Ende des Betrachtungszeitraums

Ausgangspunkt der vergleichenden Untersuchung ist, dass für jede der in Betracht gezogenen Investitionsalternativen angenommen wird – absolut gesehen – vorteilhaft zu sein. In anderen Worten: Über die Lebenszyklusdauern der neuen Fahrzeuge und zusätzlichen Infrastruktur-Elemente hinweg betrachtet, wird die Summe aller Einnahmen und Kosten (= Auszahlungen; negative Werte) positiv ausfallen. Für den Vergleich der Alternativen erweist sich die Einnahmenseite als relativ unwichtig, da diese technologieunabhängig ist. Auf der Kostenseite entfallen zudem Auszahlungen, die für jede Investitionsalternative gleich hoch sind, wie beispielsweise für Personal, Verwaltung oder interne Dienstleistungen, aber auch für Trassen- und Stationsgebühren. Für den objektiven Vergleich relevant sind somit nur die spezifischen Kosten der Beschaffung und des Betriebes der Fahrzeuge sowie der spezifisch erforderlichen Infrastruktur.

Die erfolgreiche Anwendung dieses auch als Kapitalwertmethode bezeichneten Vorgehens wird in → [3] und → [19] demonstriert und bestätigt damit ihre Eignung insbesondere für Untersuchungen mit übergeordnetem volks- und betriebswirtschaftlichem Anliegen. Das Prinzip der Methode ist, den nur auf die relevanten Kosten bezogenen (negativen) Kapitalwert zu ermitteln, der sich über einen definierten Zeitraum ergibt. Bei seiner Berechnung geht man davon aus, dass der Entscheider als *rational handelnder Investor mit ökonomischer Zielsetzung* handelt, das heißt, er wird sich nur dann für die Investition entscheiden, wenn sie ebenso vorteilhaft ist, wie eine entsprechende Anlage auf dem Kapitalmarkt. In diesem Fall sind die im Betrachtungszeitraum anfallenden Auszahlungen entsprechend ihrer Eintrittszeitpunkte wie auch die zu erwartenden Restwerte mit dem angesetzten Kalkulationszinssatz zu diskontieren und damit als Barwerte auf das Gegenwartsjahr 0 des Betrachtungszeitraums zu beziehen.

Der Kalkulationszinssatz ist für die Genauigkeit der Investitionsrechnung maßgeblich. Allerdings lässt er sich selbst wegen des langen Betrachtungszeitraums nicht exakt vorhersagen. Finanz-mathematisch wird er durch den sogenannten Nominalzinssatz i_n und die Preissteigerungsrate r bestimmt. Für die vorliegende Studie wurde angenommen, dass sich der Nominalzinssatz abschätzen lässt als Mittelwert der Umlaufrendite festverzinslicher Wertpapiere über die vergangenen 15 Jahre, → [20]. Hiernach würde er 2 Prozent betragen. Als Preissteigerungsrate wurde der aktuelle Wert von 1,5 Prozent angenommen. Damit ergibt sich entsprechend der Formel

$$i = \frac{100}{100 + r} \times (i_n - r)$$

ein Kalkulationszinssatz von 0,49 Prozent.

An dieser Stelle sei angemerkt: Da bei allen Alternativen derselbe Kalkulationszinssatz anzusetzen ist, würde eine Änderung dieses Zinssatzes zwar die Höhe der resultierenden Kapitalwerte der Alternativen beeinflussen, nicht jedoch deren Verhältnisse untereinander.

Im Vergleich der so ermittelten negativen Kapitalwerte lässt sich feststellen, welche der Alternativen das (relativ) vorteilhafteste Investitionsprojekt wäre: Je geringer der Kapitalwert einer Alternative im Betrachtungszeitraum betraglich ausfällt, desto vorteilhafter ist sie.

Eine Herausforderung dieses als Kapitalwertanalyse bezeichneten Vorgehens ist die Notwendigkeit, bestimmte Parameter wie Kraftstoff- und Strompreise, streckenspezifische Energiebedarfe pro Kilometer, Austauschkosten für Hochtechnologiekomponenten etc. exakt anzugeben. Wie entscheidend die Werte solcher Parameter für das Ergebnis sind, wird im nächsten Kapitel am Beispiel des ›Netzes Düren‹ anhand einer Sensitivitätsanalyse demonstriert.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Analysen sind die anzusetzenden Lebens- und Abschreibungsdauern der verschiedenen Investitionsgüter wie auch der zu wählende Betrachtungszeitraum. Laut AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)“ von 1998 → [21] wird für Triebzüge eine Abschreibungsdauer von (mindestens) 20 Jahren angesetzt, während deren Nutzungsdauer im Falle elektrischer Antriebe bis zu 35 Jahre beträgt. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde angenommen, dass Neufahrzeuge und zusätzliche Infrastrukturen über ihre jeweils angenommenen Lebensdauern linear abgeschrieben werden. Die am Ende des Betrachtungszeitraums verbleibenden betriebswirtschaftlichen Restwerte werden in abgezinster Form zum resultierenden Kapitalwert addiert. Als Betrachtungsdauern bieten sich die maximale *Verkehrsvertragslaufzeit* von 22,5 Jahren[14], die *Fahrzeuglebensdauer* von 30 Jahren oder die *Lebensdauer langlebiger Investitionsgüter* wie beispielsweise von Oberleitungsmasten mit 76 Jahren an.

14 das entspricht 15 Jahre plus maximal 50 Prozent ohne Neuausschreibung; siehe auch Fußnote zu → Abschnitt 5.4.2

5 Netz Düren – Wirtschaftliche Betrachtung der Alternativen

Das vorliegende Kapitel 5 gibt umfassend Auskunft über Anliegen, Durchführung und Auswertung der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das ›Netz Düren‹. → Abschnitt 5.1 befasst sich mit der Historie der Rurtalbahn und der Bördebahn, auf denen bereits in den 1980ger Jahren Akku-betriebene Schienenbusse im Einsatz waren, und stellt den ZV NVR und die Rurtalbahn GmbH als Verantwortliche des heutigen Betriebes vor. → Abschnitt 5.2 gibt einen Überblick über die aktuellen und ab Fahrplan 2026 geplanten Betriebsprogramme der Linien RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28. In → Abschnitt 5.3 werden nach der Vorstellung des VDE Simulationsmodells zur Berechnung des Energiebedarfs auf den drei Linien die resultierenden Kraftstoff- bzw. Stromverbräuche der verschiedenen Fahrzeugkonzepte erläutert.

Auf dieser Informationsbasis aufbauend, beschreibt → Abschnitt 5.4 schließlich die Anwendung der Kapitalwertmethode, um zu ermitteln, welches der Konzepte HEMU, BEMU oder EMU sich als das für das ›Netz Düren‹ vorteilhafteste Investitionsprojekt darstellt.

5.1 Hintergrund

Die Ursprünge der drei Bahnlinien → [22], die heute das ›Netz Düren‹ bilden, fallen in die zweite Hälfte des 19ten Jahrhunderts, der Zeit der einsetzenden Industrialisierung der Rheinprovinz, die zum Königreich Preußen gehörte → Abbildung 17 und → Abbildung 18. Für die Erschließung dieser Region wie auch des Ruhrgebietes waren 1836 drei Eisenbahn-Gesellschaften gegründet worden: die Rheinische, die Bergisch-Märkische und die Köln-Mindener. 1856 erwarb die Rheinische Eisenbahn-Gesellschaft die Konzession für den Bau einer Bahnstrecke entlang des Rurtals von Düren nach Schleiden in der Eifel, die der Hüttenindustrie den Transport geförderter Erze und das Heranschaffen von Steinkohle für die Verhüttung erleichtern sollte. 1864 wurde die *Bördebahn* Düren–Euskirchen für den Personentransport eingeweiht. 1873 folgte die Strecke Düren–Jülich, 1892 der erste Streckenabschnitt Düren–Lendersdorf–Maubach und 1903 schließlich das Restteilstück bis Heimbach.

→ Abbildung 17: Die Ursprünge des Netzes Düren in der Preußischen Provinz Rheinland (Teil 1)

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Deutscher_Bund

← Abbildung 18: Die Ursprünge des Netzes Düren in der Preußischen Provinz Rheinland (Teil 2)

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Rheinland_Regierungsbezirke_1905.png

5.1.1 Rurtalbahn

Die Rurtalbahn erschließt den Kreis Düren entlang der Rur. Ihre Strecke umfasst 29 dicht aufeinanderfolgende Haltepunkte, von denen sieben im Stadtgebiet Düren liegen → Abbildung 20. Der Nordast (RB 21 Nord) der Bahn verbindet Düren über Jülich mit der am Nordende des Kreises gelegenen Stadt Linnich → Abbildung 19. Die Stadt Heimbach am südlichen Ende des Kreises ist über den Südast (RB 21 Süd) mit Düren verbunden. Diese Strecke folgt von Untermaubach-Schlagstein an vielen engen Windungen der Rur bis Heimbach – durch touristisch reizvolle Wald- und Wiesenlandschaften.

Karten-Ausschnitte: Schweers + Wall / NVR · Fotos: WK

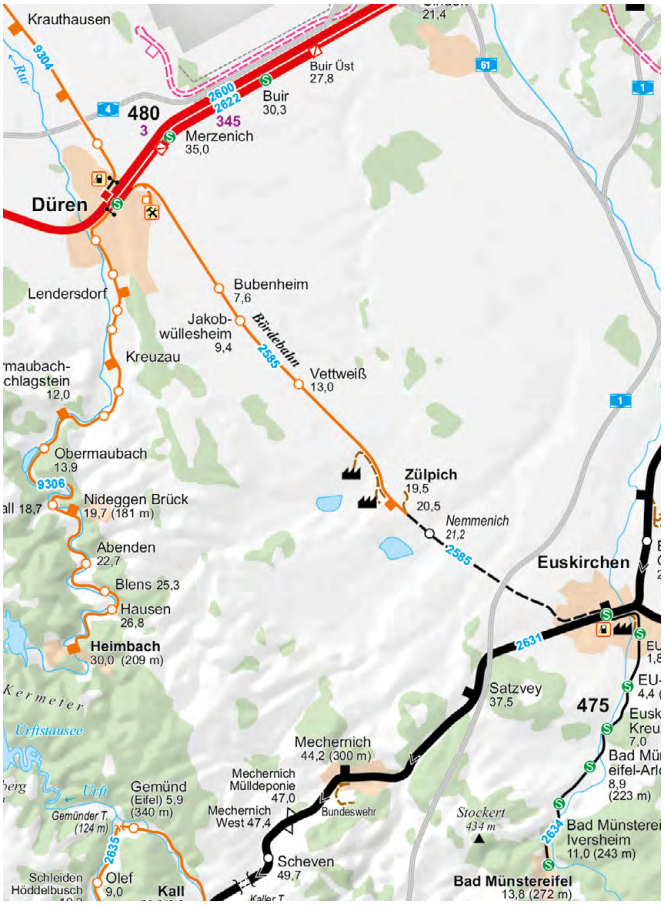
↑ Abbildung 19: RB 21
mit Nord- und Südast

← Abbildung 20: RegioShuttle RS1
im Bahnhof Düren

5.1.2 Bördebahn

Die Bördebahn der heutigen Zeit entstand im Jahr 1979 durch Teilung der Verbindung Düren–Bonn und Umwandlung der Strecke Düren–Euskirchen in eine Nebenbahn, deren fahrplanmäßiger Betrieb im Jahr 1983 eingestellt wurde. Von 2008 an wurde anlässlich der geplanten *Landesgartenschau 2014* in Zülpich die Reaktivierung der Strecke für den Personennahverkehr vorangetrieben. Angesichts der überraschend starken Nachfrage auch bei regulären Fahrgästen wurde schließlich ein nachhaltiger Reaktivierungsplan beschlossen.

Seit 2015 trägt die Linie den Namen RB 28 Eifel-Bördebahn und wird offiziell durch den NVR bestellt. Sie verbindet die Stadt Düren mit der im Südosten gelegenen 30 Kilometer entfernten Stadt Euskirchen, → Abbildung 21. Diese Bahnlinie läuft zumeist schnurgerade durch ländliches Gebiet, unterbrochen nur durch das Gelände des Papierherstellers Smurfit Kappa Zülpich, in dessen Kraftwerk Braunkohle-Briketts verheizt werden, die an Werktagen von Güterzügen zum Bahnhof Zülpich Kappa geliefert werden. An Wochenenden und Feiertagen findet auf der RB 28 seitdem auch Personenverkehr statt. Seit Dezember 2019 wird diese Strecke täglich im Zweistunden-Takt befahren → Abbildung 22. Ein weiterer Ausbau der Taktung ist vorgesehen.



← Abbildung 21:
RB 28 Eifel-Bördebahn

Karten-Ausschnitt: Schweers + Wall / NVR · Foto: WK

Pressfoto NVR

↑ Abbildung 22: Gäste der RB 28-Eröffnungsfahrt am Montag, den 16. Dezember 2019:
G. Rosenke, Landrat Kreis Euskirchen (1), Dr. P. Peill, MdL (2), W. Spelthahn, Landrat Kreis Düren (3), K. Voussem, MdL (4), Dr. R. Nolten, MdL (5), H. Kolvenbach, Verbandsvorstand NVR (6), Dr. N. Reinkober, Geschäftsführer NVR (7)

5.1.3 Historische Triebwagen

Der Wiederaufbau der im Verlauf des zweiten Weltkriegs zerstörten Bahnanlagen entlang der Strecke Düren–Heimbach (heute RB 21 Süd) zog sich über Jahre hin. Erst im Oktober 1950 war die Strecke wieder vollständig befahrbar. Angesichts des wachsenden Individualverkehrs auf der Straße verlor sie jedoch zunehmend an Bedeutung. Die Deutsche Bahn vereinfachte ab 1956 den Bahnbetrieb und setzte anstelle von lokbespannten Zügen zunächst auf Dieselbetriebene Schienenbusse des Typs VT 95 (BR 796), → Abbildung 23.

Später ersetzte die Deutsche Bahn ihre VT 95-Fahrzeuge vielfach durch akkubetriebene Schienenbusse der Bauart ETA 150.1 (BR 515), → Abbildung 24, von denen sie in den Jahren zwischen 1953 und 1965 insgesamt 232 Stück angeschafft hatte.

Diese Fahrzeuge sind technische Nachfolger der sogenannten Speicher-Triebwagen des Typs Wittfeld, welche die Königlich Preußische Eisenbahn-Verwaltung bereits seit 1907 einsetzte. Die ETA 150-Fahrzeuge waren mit Bleiakkus ausgestattet, die eine Gesamtkapazität von 548 kWh aufwiesen und damit Reichweiten von bis zu 400 Kilometern erzielten – und das bei einer Batterie-Ladezeit von drei Stunden → [23]. Sie erreichten Spitzengeschwindigkeiten von 100 km/h. In den 1980ger Jahren wurden Akkutriebwagen dieses Typs auch bei Düren eingesetzt, beispielsweise auf der Strecke nach Heimbach, wie → Abbildung 25 zeigt. 24 Jahre später, im Februar 2020, präsentierte Alstom auf dieser Strecke seinen Brennstoffzellenzug iLINT 54 → Abbildung 26.

Quellen: Eisenbahnarchiv.de

← Abbildung 23: Diesel-Schienenbus VT 95 im Bahnbetriebswerk Landau (1978)

↓ Abbildung 24: Akku-Triebwagen ET 150 im Bahnbetriebswerk Düren (1982)

Quellen: Eisenbahnarchiv.de · Foto unten: WK

← Abbildung 25: Batterietriebwagen ETA 150 auf RB 21 Süd: Heimbach 1986, Nideggen 1984, Obermaubach 1986 (v.o.n.u.)

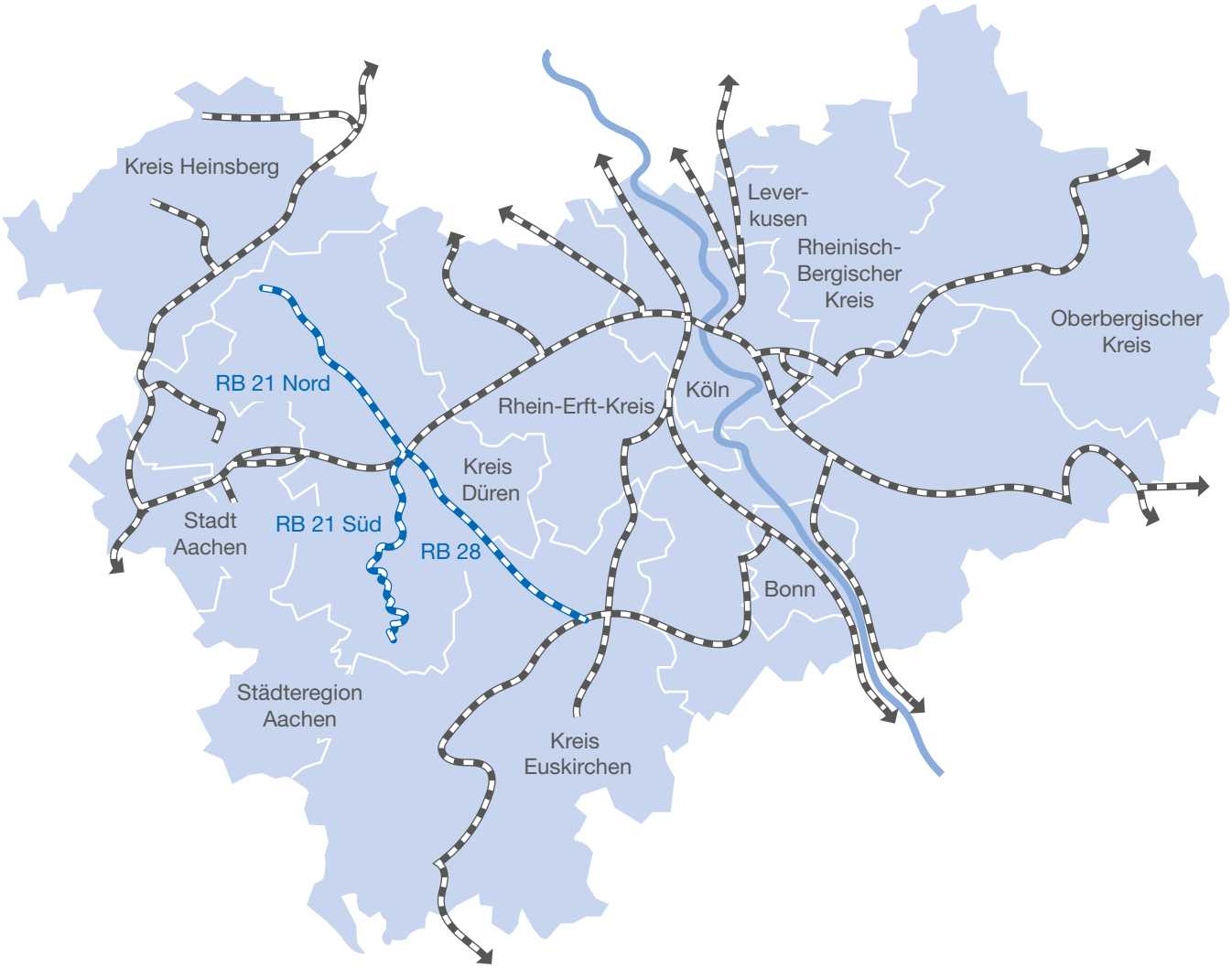
↓ Abbildung 26: iLINT 54 in Obermaubach

5.1.4 Zweckverband Nahverkehr Rheinland (ZV NVR)

Das Gebiet des in Köln ansässigen Zweckverbandes Nahverkehr Rheinland (ZV NVR) umfasst den rheinischen Teil Nordrhein-Westfalens und ist deckungsgleich mit dem Regierungsbezirk Köln → Abbildung 27. Hierzu zählen die Städte Aachen, Bonn, Köln und Leverkusen sowie die Kreise Düren, Euskirchen, Heinsberg, Oberbergischer Kreis, Rhein-Erft-Kreis, Rhein-Sieg-Kreis, Rheinisch Bergischer Kreis und die Städte-Region Aachen. In diesem etwa 7.400 km² großen Gebiet mit 4,5 Millionen Einwohnern verkehren 28 Nahverkehrslinien auf einer Gesamtlänge von rund 1.550 Kilometern und mit einer Betriebsleistung von 26,8 Millionen Zugkilometern pro Jahr, → [24].

Der NVR sucht für das in seinen Zuständigkeitsbereich fallende ›Netz Düren‹ eine geeignete technische Alternative zu den heute auf den Bahnlinien RB 21 Nord (Düren–Linnich), RB 21 Süd (Düren–Heimbach) und RB 28 (Düren–Euskirchen) eingesetzten Dieseltriebzügen. Anlass sind die anstehenden Neuausschreibungen für den Betrieb dieser Linien. Aktueller Betreiber als Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) ist die Rurtalbahn GmbH (RTB).

Die Beteiligten im ›Netz Düren‹ – also der NVR, die Rurtalbahn und der Kreis Düren – haben sich viel vorgenommen mit Projekten der Reaktivierung und des Ausbaus von Streckenabschnitten, zusätzlichen Haltepunkten, größerem Fahrzeugpool mit gänzlich neuen Fahrzeugen sowie deutlich höherer Betriebsleistung für wesentlich mehr Fahrgäste.



↑ Abbildung 27: Gebiet des ZV NVR
(blau markiert sind die relevanten Strecken des Netzes Düren)

Quelle: Eigene Darstellung nach www.nvr.de

5.1.5 Rurtalbahn GmbH (RTB)

Die Dürener Kreisbahn hatte im Jahre 1993 den Betrieb der Bahnstrecken Jülich–Düren (später *RB 21 Nord*) und Düren–Heimbach (später *RB 21 Süd*) von der Deutschen Bahn übernommen und betrieb die nun *Rurtalbahn* genannten Strecken im Stundentakt – zunächst mit modernisierten Uerdinger Schienenbussen. 1995 stattete die Dürener Kreisbahn den Rurtalbahn-Fuhrpark mit 17 spurtstarken Regio-Sprinter-Triebzügen von Siemens/DUEWAG (BR 654) aus → Abbildung 28. Deren Anzahl war wesentlich höher als vor Ort benötigt, so dass einige der Fahrzeuge an andere Verkehrsunternehmen vermietet wurden. Im Jahre 2002 wurde der Personenverkehr zwischen Jülich und Linnich reaktiviert, um Züge von Düren nach Linnich durchbinden zu können. → [22]

Das in der Kreisstadt Düren ansässige mittelständische Unternehmen Rurtalbahn GmbH, → [25], wurde im Jahr 2003 gegründet, nachdem die Dürener Kreisbahn 74,9 Prozent seiner Anteile an der Rurtalbahn an die R.A.T.H. GmbH veräußert und damit privatisiert hatte. Die heutige Beteiligungsgesellschaft Kreis Düren besitzt die restlichen 25,1 Prozent der Anteile.

Die Rurtalbahn GmbH (RTB) agiert als mittelständisches nicht-bundeseigenes Eisenbahnverkehrs- und Eisenbahninfrastruktur-Unternehmen (EVU|EIU) mit eigenem Fahrzeug-Fuhrpark, Depot und Instandhaltungswerkstatt. Sie ist zudem Eigentümerin der Gleisanlagen im ›Netz Düren‹. Die RTB ist nicht Mitglied im Tarifverband der Bundeseigenen und Nichtbundeseigenen Eisenbahnen in Deutschland (TBNE).

Im Jahre 2011 erwarb die Rurtalbahn GmbH für 8,8 Millionen Euro fünf Stadler Regio-Shuttle RS1, damit diese einige der nicht mehr zeitgemäßen Regio-Sprinter ablösen konnte. 2016 übernahm die RTB drei gebrauchte RS1 von der Ostdeutschen Eisenbahn, und erwarb zudem für zwölf Millionen Euro drei Dieseltriebzüge des Typs Alstom Coradia LINT 54. Im Februar 2019 verkaufte die RTB ihre letzten Regio Sprinter nach Tschechien. Heute setzt die RTB mit acht RS1 und drei LINT 54 ihre Fahrpläne um.

↑ Abbildung 28: RTB Regio Sprinter (in Heimbach), seit Februar 2019 nicht mehr im Einsatz

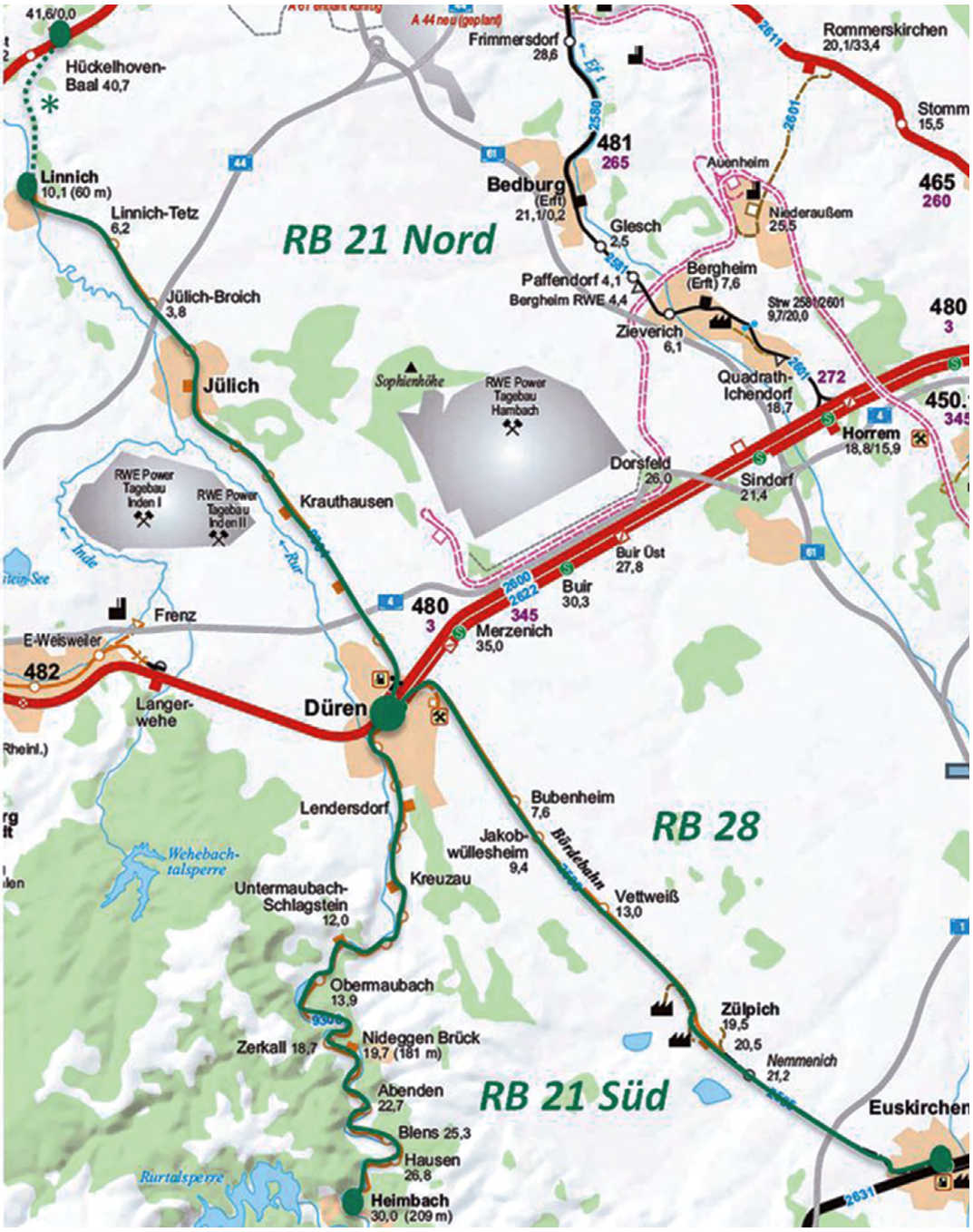
Foto: NVR/Smilla Dankert

5.2 Ist-Stand und Pläne

5.2.1 ›Netz Düren‹

RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 bilden gemeinsam das heute vom NVR verantwortete und von der Rurtalbahn GmbH (RTB) betriebene ›Netz Düren‹, siehe Karte → Abbildung 29.

RB 21 Nord soll zum Fahrplanjahr 2026 um eine 5,8 Kilometer lange Strecke zwischen Linnich und Hückelhoven-Baal auf 31,5 Kilometer verlängert werden. Die dafür vorgesehenen Reaktivierungs- und Neubau-Aktivitäten sollen im Jahr 2025 abgeschlossen sein. Für RB 28 wird aktuell auf der Strecke zwischen Düren und Euskirchen die Infrastruktur für höhere Zuggeschwindigkeiten und dichtere Taktung ausgebaut.



← Abbildung 29: Übersichtsplan zu den Linien des ›Netzes Düren‹

Quelle: Schweers + Wall / NVR

Fotos: WK

↑↑ Abbildung 30: Bahnhof Düren – elektrifiziertes Gleis 4/4a (links) und nicht-elektrifiziertes Gleis 23 (rechts)

↑ Abbildung 31: RTB Regio Shuttle RS1 in Heimbach (links) und RTB Coradia LINT 54 in Jülich (rechts)

Die drei Linien sind auf ihren jeweils rund 30 Kilometer langen Strecken durchgehend oberleitungsfrei. Nur das den Linien RB 21 Süd und RB 28 zugeordnete Gleis 4/4a im Bahnhof Düren ist elektrifiziert. Für den RE- und S-Bahnverkehr durch den Bahnhof Düren gibt es eigene Oberleitungen. Die Linie RB 21 Nord startet in Düren heute auf dem nicht elektrifizierten Gleis 23 → Abbildung 30.

Der Bahnhof Euskirchen am Ende der Linie RB 28 soll bis zum Jahr 2028 im Zuge der Elektrifizierung der Strecken Bonn–Euskirchen–Kall/Bad Münstereifel vollständig elektrifiziert werden.

Die Flotte der RTB umfasst aktuell drei Triebzüge des Typs Alstom Coradia LINT 54 (BR 622) mit 165 Sitzplätzen und acht teilweise in Doppeltraktion eingesetzte Triebwagen des Typs Regio Shuttle RS1 (BR 650) mit jeweils 79 Sitzplätzen, → Abbildung 31.

Mit dieser Fahrzeugflotte erbrachte die RTB bislang auf dem ›Netz Düren‹ eine Betriebsleistung von 904.385 Zugkilometern pro Jahr. Laut NVR soll diese Leistung bis 2026 durch Verdichtung um 44 Prozent und Hinzufügen der Strecke Linnich–Baal um weitere zwölf Prozent auf 1.460.310 Zugkilometer anwachsen. Zudem ist vorgesehen, die Flotte durch Neufahrzeuge mit klimaneutralen Antrieben zu ersetzen, also durch Batterie- oder Brennstoffzellenzüge, deren Gewicht, Größe und Sitzplatz-Kapazität sich an den Daten des LINT 54 orientieren sollen.

Laut NVR sollen die Verkehrsverträge für RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 im Dezember 2025 synchron auslaufen und mit dem Fahrplanjahr 2026 zusammen neu ausgeschrieben werden.

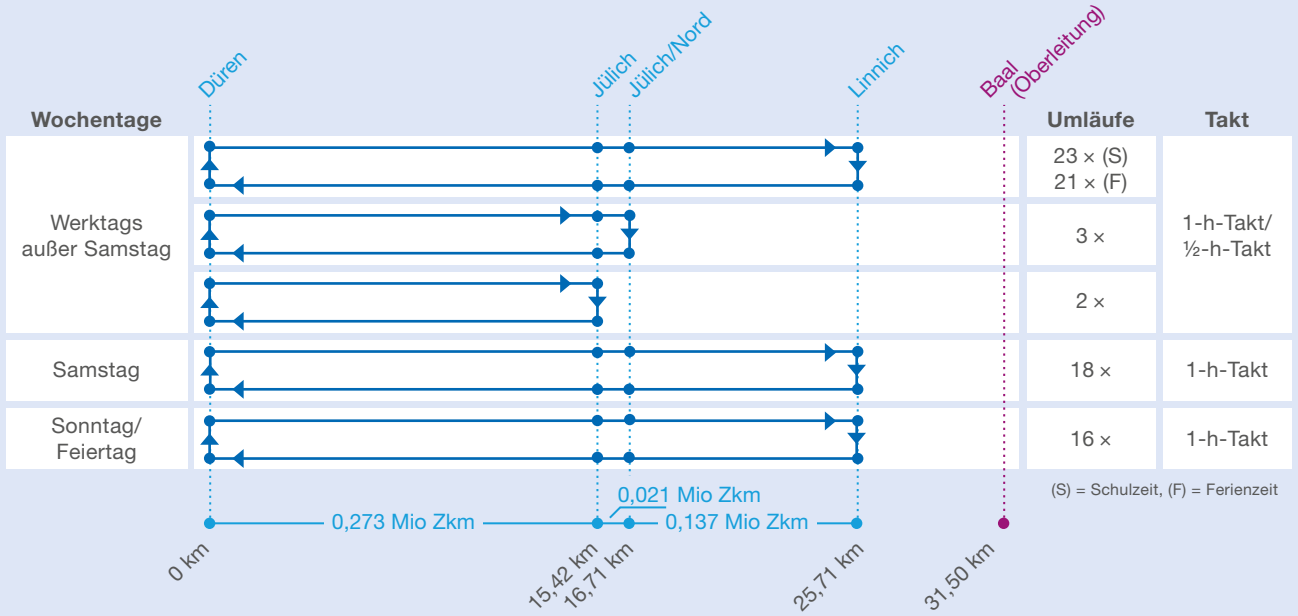
5.2.2 RB 21 Nord

Die Linie RB 21 Nord verbindet den Bahnhof Düren über Jülich mit dem 25,71 Kilometer entfernten Bahnhof Linnich. Die Strecke umfasst insgesamt dreizehn Stationen, die im Mittel 2,1 Kilometer auseinanderliegen. Zwischen Düren und Jülich gibt es sechs Haltepunkte; an vier von ihnen wird nur bei Bedarf gehalten. Zwischen Jülich/Nord und Linnich liegen drei Bedarfshalte. Die folgenden drei Abbildungen geben einen Überblick über das heutige und das für 2026 und darüber hinaus geplante Betriebsprogramm von RB 21 Nord.

Auf RB 21 Nord werden heute drei Züge des Typs RegioShuttle RS1 oder Coradia LINT 54 eingesetzt, die zeitlich um eine Stunde versetzt umlaufen. Die Fahrplanzeiten sind so eng gesetzt, dass die Fahrzeuge vielfach mit über 1 m/s^2 beschleunigen müssen, um den Plan einzuhalten. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke beträgt 80 km/h. Für die kurzen Strecken Düren–Jülich und Düren–Jülich/Nord beträgt die Umlaufdauer eines Zuges einschließlich Wende- und Wartezeiten 1 bis 1,5 Stunden; für die lange Strecke Düren–Linnich sind es 2 Stunden.

An Werktagen wird auf den Strecken Düren–Jülich bzw. Düren–Jülich/Nord morgens und nachmittags im Halbstunden-Takt gefahren, in der restlichen Zeit im Einstunden-Takt. Auf der Strecke bis Linnich wird morgens, mittags und abends im Einstunden-Takt und in der übrigen Zeit im Halbstunden-Takt gefahren. An Wochenenden und Feiertagen entfallen alle kurzen Umläufe, und Linnich wird durchgehend im Einstunden-Takt angefahren. Auf das Normjahr[15] bezogen ergibt sich so eine Betriebsleistung von insgesamt 430.881 Zkm. Das entspricht pro Zug einer Fahrleistung von 143.627 Kilometern pro Jahr. Auf die Teilstrecken Düren–Jülich, Düren–Jülich/Nord und Jülich/Nord–Linnich entfallen Betriebsleistungen von 272.811 Zkm, 21.522 Zkm bzw. 136.548 Zkm, → Abbildung 32.

↓ Abbildung 32: Betriebsprogramm von RB 21 Nord, Ist 2019



Eigene Darstellung nach Quelle NVR

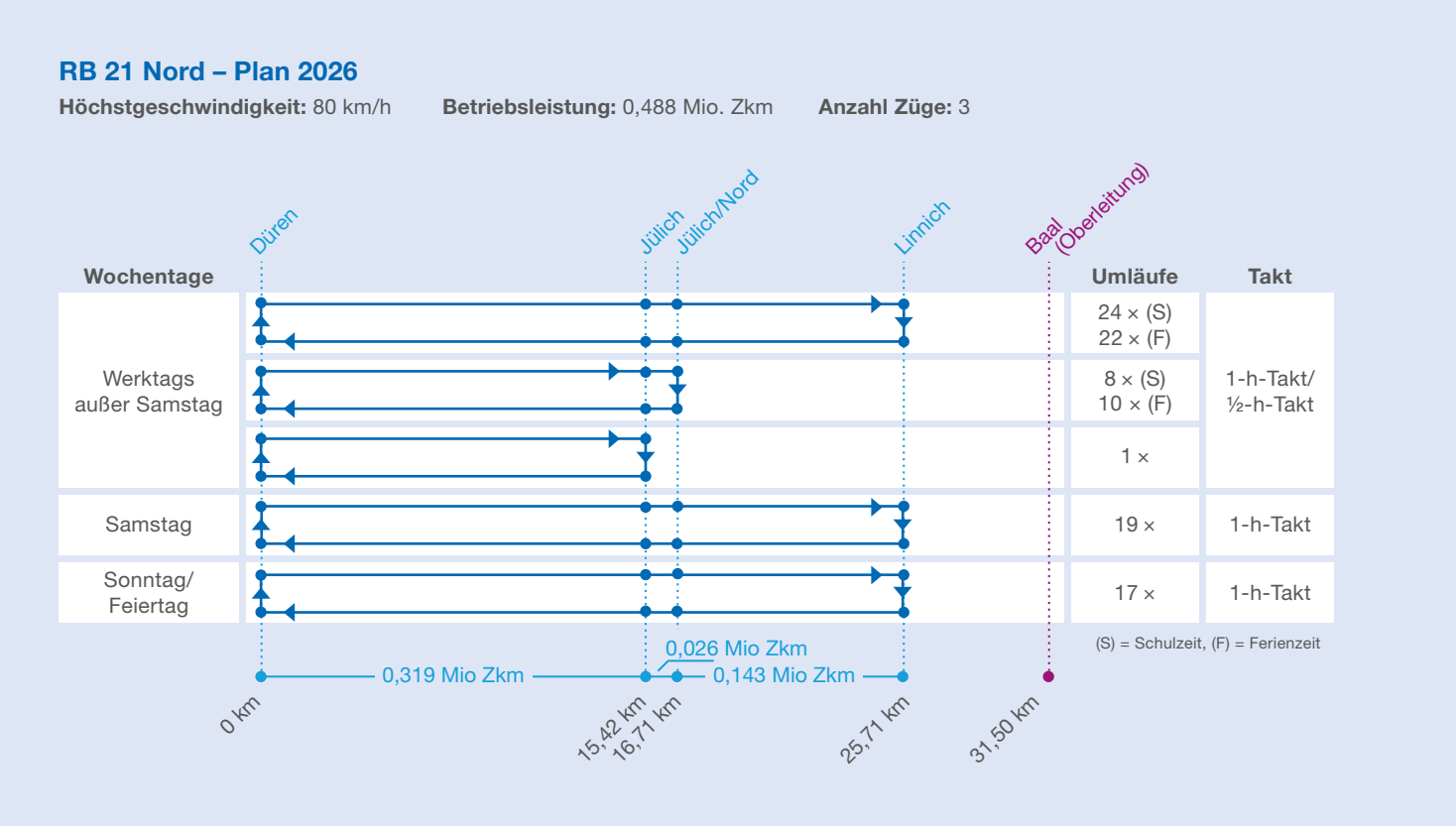
15 Das Normjahr umfasst 252 Werktage, 52 Samstage und 61 Sonn- und Feiertage

Als ausgewiesene Nebenstrecke erweist sich RB 21 Nord als gut ausgelastet. Nach Auskunft der Rurtalbahn GmbH werden an Hauptverkehrstagen mehr als 5000 Fahrgäste gezählt.

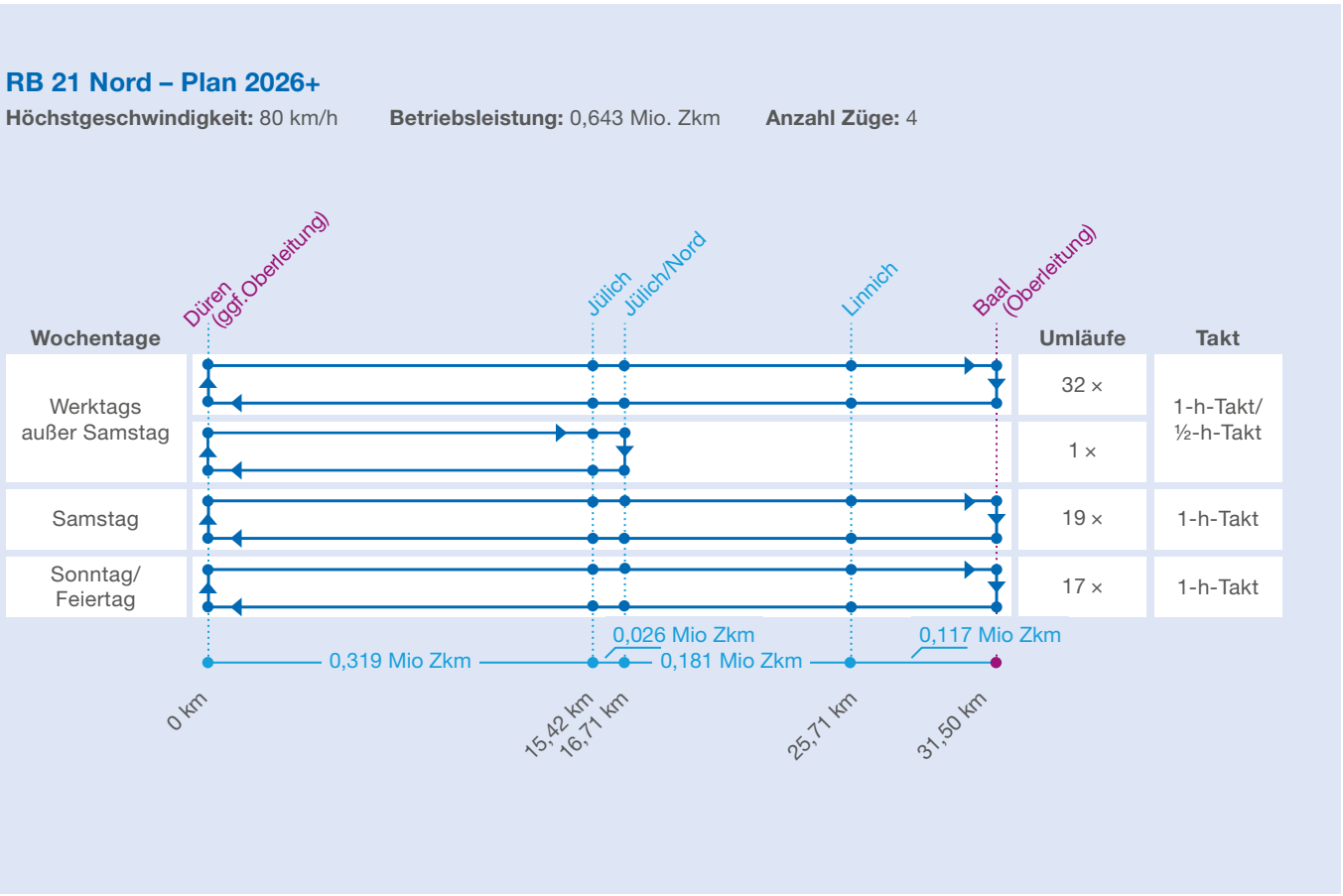
Ab dem Fahrplanjahr 2026 ist eine Verdichtung des Verkehrs ohne zusätzliche Züge vorgesehen, → Abbildung 33, mit an Werktagen fünf weiteren kleinen Umläufen Düren–Jülich/N.–Düren. An allen Tagen ist ein zusätzlicher großer Umlauf Düren–Linnich–Düren geplant. Damit steigert sich die Betriebsleistung um dreizehn Prozent auf insgesamt 488.064 Zkm. Auf die einzelnen Fahrzeuge bezogen erhöht sich die mittlere jährliche Fahrleistung auf 162.688 Kilometer.

Wie erwähnt, soll bis Ende 2026 die Strecke von Linnich bis zum 5,79 Kilometer entfernten Bahnhof Baal reaktiviert und ausgebaut werden. An Werktagen sind 32 große Umläufe Düren–Baal–Düren und ein kleiner Umlauf Düren–Jülich/N.–Düren vorgesehen, → Abbildung 34. An Wochenenden und Feiertagen wird es ebenso viele Umläufe geben wie zuvor, allerdings stets bis Baal. Für diese Ausweitung wird ein weiterer Zug erforderlich. Durch die zusätzliche Verdichtung und Ausweitung des Verkehrs erhöht sich die Betriebsleistung um 32 Prozent auf 643.379 Zkm – bei einer jährlichen Fahrleistung von 160.845 Kilometern pro Fahrzeug.

↓ Abbildung 33: Betriebsprogramm von RB 21 Nord, Plan 2026



Eigene Darstellung nach Quelle NVR



Eigene Darstellung nach Quelle NVR

↑ Abbildung 34: Betriebsprogramm von RB 21 Nord, Plan 2026+

5.2.3 RB 21 Süd

Die Linie RB 21 Süd führt vom Bahnhof Düren über Untermaubach-Schlagstein bis zum 29,86 Kilometer entfernten Bahnhof Heimbach. Die Strecke umfasst insgesamt 17 Stationen, die im Mittel 1,9 Kilometer auseinanderliegen. Auf der Strecke Düren–Untermaubach liegen acht Haltepunkte; davon sind fünf Bedarfshalte. Auf der restlichen Strecke bis Heimbach liegen sechs Haltepunkte mit vier Bedarfshalten. Die folgenden beiden Abbildungen geben einen Überblick über das heutige und für 2026 geplante Betriebsprogramm dieser Linie.

Auf RB 21 Süd werden heute insgesamt drei Züge des Typs RegioShuttle RS1 oder Coradia LINT 54 eingesetzt, die zeitlich um eine halbe Stunde versetzt umlaufen. Für die kurze Strecke Düren–Untermaubach beträgt die Umlaufdauer eines Zuges einschließlich Wende- und Wartezeiten eine Stunde; für die lange Strecke Düren–Heimbach sind es zwei Stunden. Die Fahrplanzeiten sind auch hier so eng gesetzt, dass die Fahrzeuge vielfach mit über 1 m/s^2 beschleunigen, um den Plan einhalten zu können. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke beträgt aktuell 70 km/h.

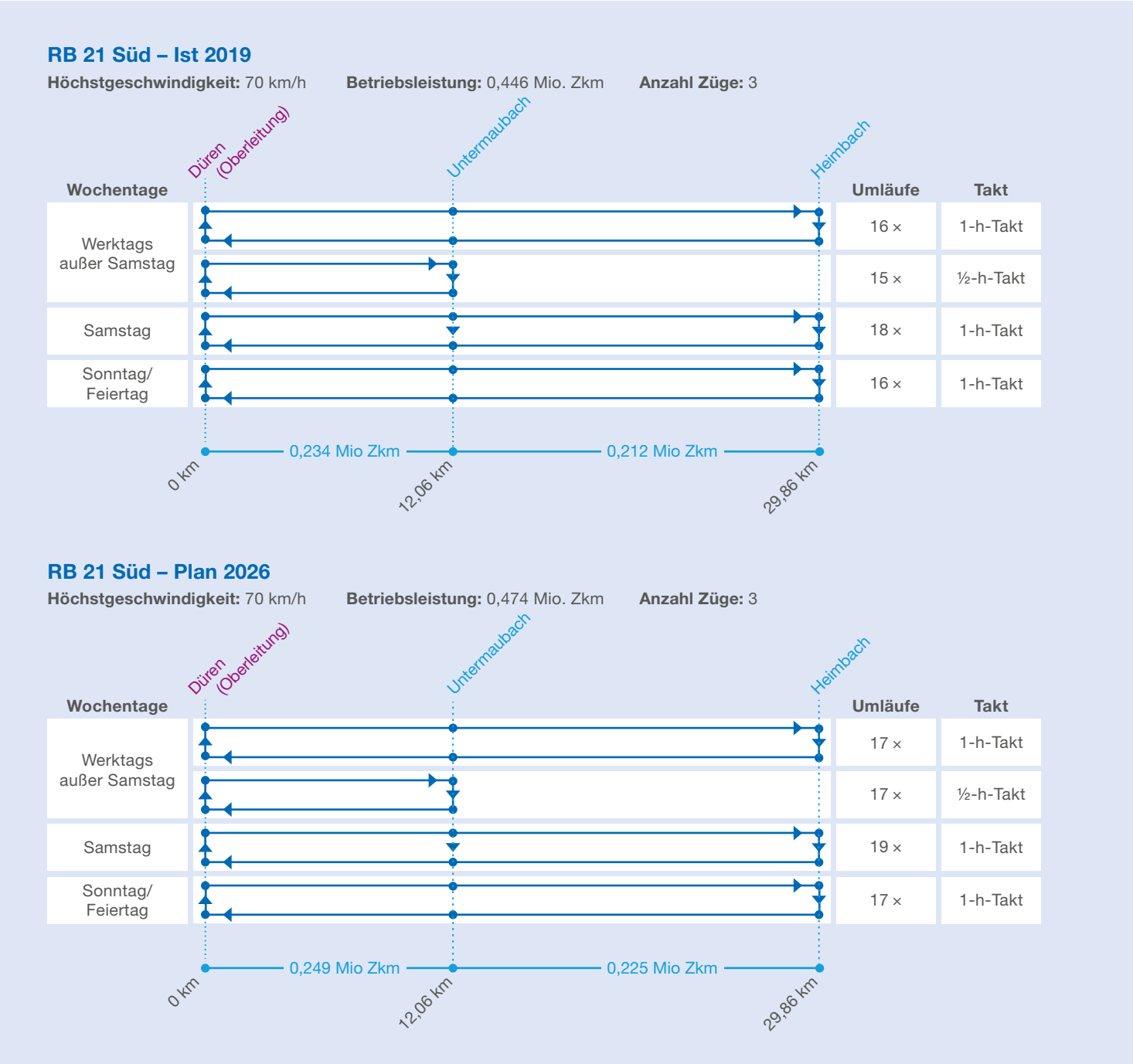
An Werktagen wird die 12,06 Kilometer lange Teilstrecke Düren–Untermauchbach im Halbstunden-Takt bedient, die Strecke Düren–Heimbach durchgehend im Einstunden-Takt, → Abbildung 35. An Wochenenden und Feiertagen entfallen die kurzen Umläufe und Heimbach wird im Einstunden-Takt angefahren. Auf das Normjahr bezogen ergibt sich für RB 21 Süd eine Betriebsleistung von 446.149 Zugkilometern. Das entspricht pro Zug einer mittleren Fahrleistung von 148.700 Kilometern pro Jahr. Auf den Teilstrecken Düren–Untermaubach und Untermaubach–Heimbach werden Betriebsleistungen von 234.543 Zkm bzw. 211.606 Zkm erbracht.

Ab Fahrplanjahr 2026 ist eine Verdichtung des Verkehrs vorgesehen → Abbildung 36, mit an Werktagen zwei zusätzlichen Umläufen Düren–Untermaubach–Düren und einem weiteren großen Umlauf Düren–Heimbach–Düren, ohne zusätzliche Züge einzusetzen. Auf das Normjahr bezogen, entspricht dies einer Erhöhung der Betriebsleistung um sechs Prozent auf 474.025 Zugkilometer. Die mittlere Fahrleistung jedes Fahrzeugs steigt auf 158.008 Kilometer pro Jahr.

Als Nebenstrecke ist auch RB 21 Süd offenbar gut ausgelastet. Nach Auskunft der Rurtalbahn GmbH werden an Hauptverkehrstagen über 3.000 Fahrgäste gezählt.

↓ Abbildung 35: Betriebsprogramm von RB 21 Süd, Ist 2019

↓↓ Abbildung 36: Betriebsprogramm von RB 21 Süd, Plan 2026



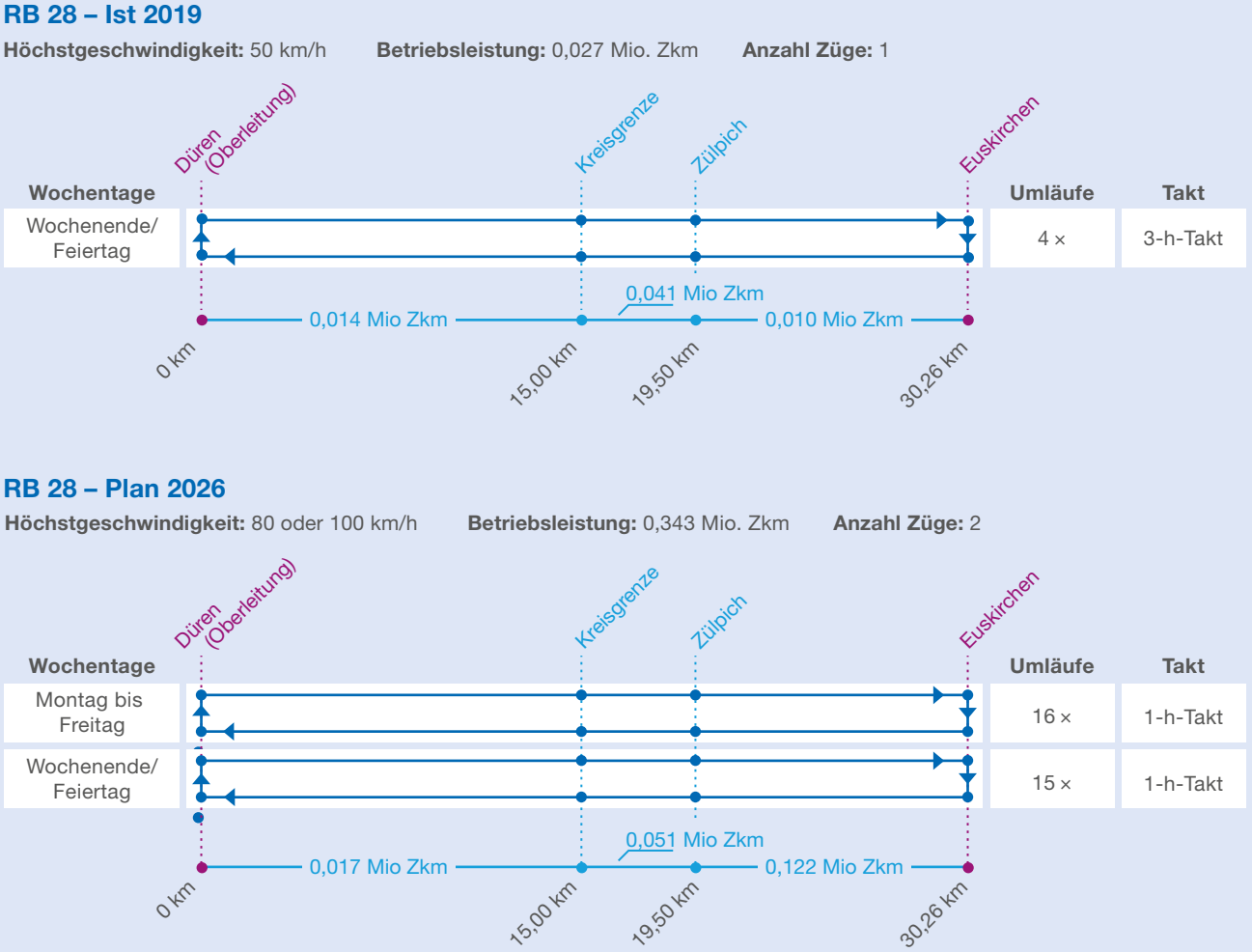
Eigene Darstellung nach Quelle NVR

5.2.4 RB 28 Eifel-Bördebahn

Die Linie RB 28 führt vom Bahnhof Düren über Zülpich bis zum 30,26 Kilometer entfernten Bahnhof Euskirchen. Die Strecke umfasst insgesamt acht Stationen, die im Mittel 4,3 Kilometer auseinanderliegen. Die RB 28 wurde bis November 2019 ausschließlich an Samstagen, Sonn- und Feiertagen im Dreistunden-Takt viermal pro Tag befahren. Für den Betrieb stand ein Fahrzeug des Typs RegioShuttle RS1 zur Verfügung. Die Geschwindigkeit war auf 50 km/h begrenzt. Die Züge mussten bis dahin wegen fehlender Sicherungstechnik an allen Bahnübergängen für den kreuzenden Verkehr anhalten. Die Umlaufdauer eines Wagens betrug mit Wende- und Wartezeiten genau drei Stunden. Bei vier Umläufen pro Tag ergab sich so eine Betriebsleistung von 27.355 Zkm.

Seit Dezember 2019 ist der Fahrgastbetrieb zusätzlich auf alle Werktage ausgedehnt, mit zunächst sechs Umläufen pro Tag. Zum Fahrplanjahr 2026 ist dank moderner Sicherungstechnik eine erhebliche Verdichtung und Ausweitung des Verkehrs vorgesehen: an Samstagen finden zusätzlich zwölf und an Sonn-/Feiertagen zusätzlich zehn Umläufe statt. Zudem sind an allen Werktagen weitere 10 Umläufe vorgesehen. Damit steigert sich die Betriebsleistung um einen Faktor zwölf auf 342.906 Zkm. Dafür werden weiterhin nur zwei Züge benötigt. Als Höchstgeschwindigkeit sind aktuell 80 oder 100 km/h im Gespräch. → Abbildung 37 gibt einen Überblick.

↓ Abbildung 37: Betriebsprogramm RB 28, Ist 2019 und Plan 2026(+)



Eigene Darstellung nach Quelle NVR

5.3 Energiebedarf der Fahrzeugflotte

Der Energiebedarf eines Triebzuges entlang einer Bahnstrecke hängt von seinem Gewicht einschließlich Fahrgästen sowie von Steigungen und Kurvenradien, von Beschleunigungs- und Bremsphasen zwischen den Haltepunkten, Geschwindigkeitsvorgaben, der Windrichtung oder gegebenenfalls von Tunnelpassagen ab. Für die Berechnung des Kraftstoff- bzw. Stromverbrauchs der Fahrzeugflotte im ›Netz Düren‹ erstellte der VDE ein Simulationsmodell, das im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Berücksichtigt wird hier auch der Energiebedarf von Nebenaggregaten z. B. für Heizung, Klima, Lüftung, Beleuchtung etc., der mit den Jahreszeiten und der Klimaregion variieren kann. Auch in Phasen ohne Bewegung gibt es Bedarf an Energie, solange der Antriebsmotor im Leerlaufbetrieb gehalten wird.

5.3.1 Simulationsmodell

Der technologieunabhängige streckenspezifische Bedarf an Bewegungsenergie (kinetische Energie) lässt sich berechnen anhand der in der Literatur → [26] beschriebenen Formeln für die Widerstandskräfte, die ein Schienenfahrzeug zu überwinden hat. Eine praxistaugliche Darstellung ist die *Synthetische Formel* für die Berechnung der Zugkraft:

$$Z_{Fzg} = W_B + (W_{St} + W_K) + W_{Luft} + W_{Stoß}) + W_R \qquad \text{Formel 5.1}$$

Mit den Bestimmungsgleichungen

$W_B = m \cdot b \cdot \lambda$	Formel 5.2	Beschleunigungswiderstand [N]
$W_{St} = m \cdot g \cdot \sin\alpha$	Formel 5.3	Steigungswiderstand [N]
$W_K = m \cdot g \cdot f\left(\frac{1}{R}\right)$	Formel 5.4	Kurvenwiderstand [N]
$W_{Luft} = \frac{\varrho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v^2$	Formel 5.5	Luftwiderstand [N]
$W_{Stoß} = c_d \cdot m \cdot v$	Formel 5.6	Stoßwiderstand [N]
$W_R = f_R \cdot m \cdot g$	Formel 5.7	Lagerreibungs- und Rollwiderstand [N]

Darin sind

m = Dienstmasse der Fahrzeugs inkl. Fahrgäste [kg]

b = Momentanbeschleunigung [m/s^2]

λ = Drehmassenzuschlagsfaktor [ ]

g = Erdbeschleunigung [= 9,81 m/s^2]

$\sin\alpha$ = Steigung [z. B. in ‰]

$f\left(\frac{1}{R}\right)$ = Überschlagsformel von RÖCKL

c_w = Luftwiderstandsbeiwert [ ]

A = Fahrzeugquerschnittsfläche [m^2]

ϱ = Luftdichte ≈ 1,25 [Ns^2/m^4]

v = Momentangeschwindigkeit [m/s]

c_d = Stoßwiderstandsbeiwert [ ]

f_R = Rollwiderstandsbeiwert [ ]

Für die Vergleichbarkeit der Konzepte BEMU, HEMU und EMU, wird angenommen, dass ihre Fahrzeuge entweder als Zweiteiler *(Wagenzug)* oder als Dreiteiler *(Gliederzug)* angeboten werden und ansonsten hinsichtlich ihres Gewichtes und ihrer Fahrgastplätze identisch sind (Referenz: Coradia LINT 54 mit 165 Sitzplätzen). Ebenso wird angenommen, dass sie alle gleich windschnittig sind, also einen Luftwiderstandsbeiwert von c_w = 0,5 aufweisen. Damit ist sichergestellt, dass sich die Fahrzeuge nur in ihren Wirkungsgraden, Leistungsbedarfen ihrer Nebenaggregate und gegebenenfalls in ihren Leerlauf-Energieverbräuchen unterscheiden.

Der VDE hat die → Fahrwiderstandsformeln 5.1 bis 5.7 in ein Simulationsmodell für die drei betrachteten Linien RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 übertragen, zu denen der NVR als Aufgabenträger und die Rurtalbahn als Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) Fahrpläne und Strecken-spezifische Daten zu Steigungen, Haltepunkten, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Maximalwerten für Beschleunigung und Abbremsung bereitgestellt haben. Anhand dieser Informationen

erstellte der VDE zu jeder der drei Linien ein Geschwindigkeitsprofil für die Hin- und Rückstrecke mit einer Streckenauflösung von 100 Metern. Anhand eigener Geschwindigkeitsmessungen bei Probefahrten ließen sich die berechneten Profile verifizieren. Damit war es möglich, den Bedarf an Bewegungsenergie entlang der Strecken wie folgt zu berechnen:

Auf dem Streckenelement Δl (= 100 Meter) wird zur Überwindung der auf das Fahrzeug einwirkenden momentanen Fahrwiderstandskräfte $W(v,l)$ eine Teilarbeit von ΔA geleistet, $\Delta A = W \cdot \Delta l$. Über die gesamte Streckenlänge aufsummiert, ergibt sich für die Überwindung der entlang der Strecke auftretenden Widerstandskräfte eine Gesamtarbeit von $A = \sum(W \cdot \Delta l)$. Um diese Arbeit verrichten zu können, wird Energie aufgewendet, die das Fahrzeug einer Energiequelle entzieht und mit spezifischen Wirkungsgraden in Bewegung umsetzt.

In der Literatur finden sich folgende Werte zu den Wirkungsgraden von Antrieben:

DMU: Dieselmotoren erreichen einen Wirkungsgrad von bis zu 40 Prozent → [27].

EMU: Der Antriebsstrangs eines EMU erreicht wegen Transformator- und Umrichter-Verlusten einen Wirkungsgrad von 85 Prozent → [26]. Ein Teil der rekuperierten Bremsenergie wird in die Oberleitung zurückgespeist, kann aber nicht direkt für den eigenen Antrieb genutzt werden. Da sich die Simulation nur auf das Fahrzeug bezieht, berücksichtigt sie die Rekuperation nicht.

BEMU: Ein BEMU hat unter der Oberleitung den Wirkungsgrad eines EMU mit 85 Prozent. Im Batteriemodus wird dieser gemindert mit einem Wirkungsgrad von 90 Prozent für die Zwischenspeicherung des Stroms in der Batterie → [28]. Der resultierende Wirkungsgrad beträgt im Batteriemodus somit mindestens 0,9 · 85 %, also rund 77 Prozent. Im Gegensatz zum EMU kann die bei elektrischen Bremsvorgängen rekuperierte Energie in der Batterie zwischengespeichert und für den eigenen Antrieb verwendet werden. Diese Besonderheit steigert die Energieeffizienz des Fahrzeugs. Der Vorgang der Rekuperation und die Nutzung der wiedergewonnenen Energie wird in der Simulation mit einberechnet.

HEMU: Ein HEMU bezieht seine Antriebsenergie aus einer Brennstoffzelle. Diese generiert den Antriebsstrom durch *Verbrauch* des mitgeführten Wasserstoffs mit einem Wirkungsgrad von rund 60 Prozent → [29]. Ein Teil der Energie wird in einer Dynamikbatterie zwischengespeichert, welche die hohen Ströme bereitstellt, die für das Anfahren und Beschleunigen benötigt werden. Der resultierende Wirkungsgrad vom Tank bis zum Rad beträgt somit mindestens 0,6 · 0,9 · 85 %, also rund 46 Prozent. Die Batterie dient zugleich der Zwischenspeicherung der rekuperierten Bremsenergie, deren Nutzung wie im Falle des BEMU die Energieeffizienz des Fahrzeugs steigert. Die Simulation berücksichtigt die Einsparung an Wasserstoff durch Nutzung der in der Batterie gespeicherten Bremsenergie.

5.3.2 Ergebnisse für BEMU und HEMU

Anhand des in → Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Simulationsmodells ermittelte der VDE für jede der drei Strecken die Momentanwert-Verläufe von Geschwindigkeit, Fahrwiderstand und resultierendem Energiebedarf eines Fahrzeugs, das fahrplangemäß vom Startbahnhof ausgehend alle Haltepunkte anfährt, am Zielbahnhof wartet und wendet, und schließlich zum Startbahnhof zurückfährt. Anhand der in der Literatur beschriebenen Wirkungsgrade bestimmte der VDE so den zu erwartenden spezifischen Strom- bzw. Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges. → Abbildung 38 visualisiert den über den Streckenverlauf von RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 variierenden Bedarf an Energie. Dieser nimmt während der Bremsphasen negative Werte an.

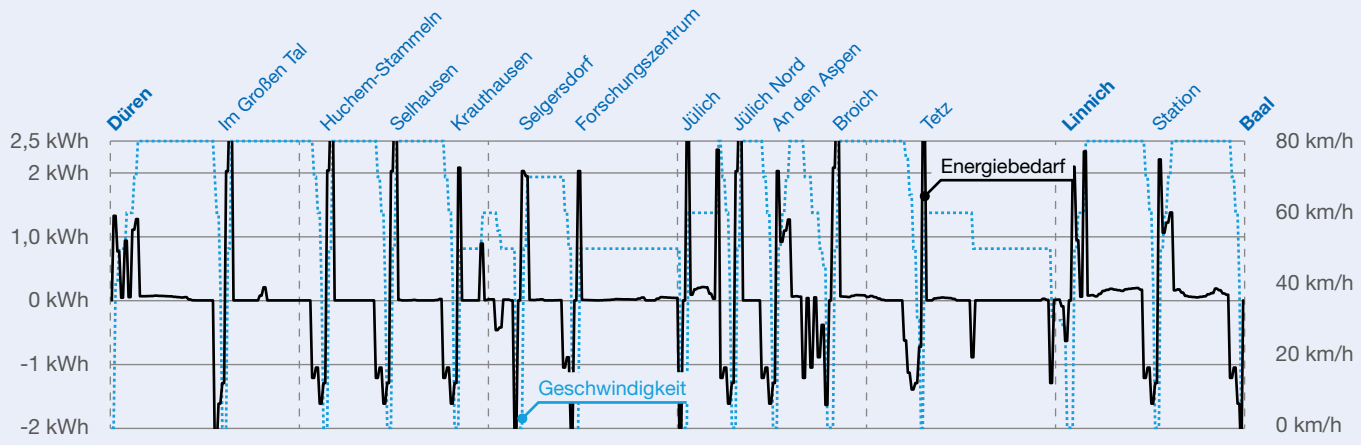
Hinweis: Eine Darstellung sämtlicher Simulationsergebnisse zu BEMU, HEMU, EMU und DMU auf den drei Bahnlinien RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 findet sich im → Anhang 7.3.

In → Abbildung 39 ist dargestellt, wieviel elektrische Energie das BEMU-Fahrzeug über den Verlauf der Strecken des ›Netzes Düren‹ verbraucht und rekuperiert. In der Simulation wird sowohl die Nutzung der rekuperierten Energie also auch der geschätzte Leistungsbedarf von Nebenaggregaten berücksichtigt.

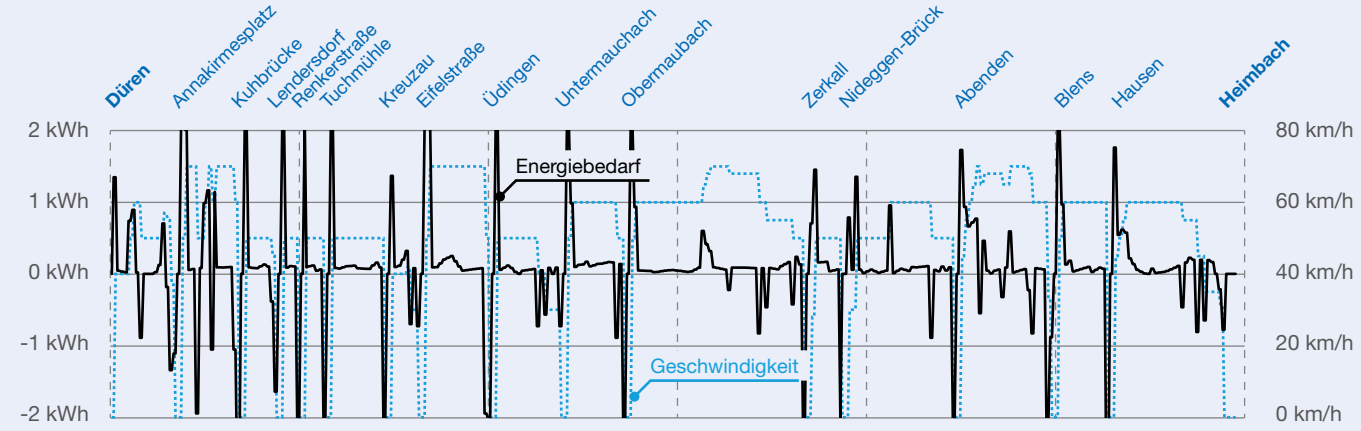
→ Abbildung 40 gibt den zu erwartenden Wasserstoffverbrauch des HEMU-Fahrzeuges auf den Strecken des ›Netzes Düren‹ wieder. Die Minderung des Wasserstoffbedarfs durch Nutzung der in die Dynamikbatterie rekuperierten elektrischen Energie ist hier ebenso eingerechnet wie der geschätzte Leistungsbedarf der Nebenaggregate.

Die graphischen Darstellungen der Diesel- bzw. Strombedarfe von DMU- und EMU-Fahrzeugen finden sich im → Anhang 7.3.

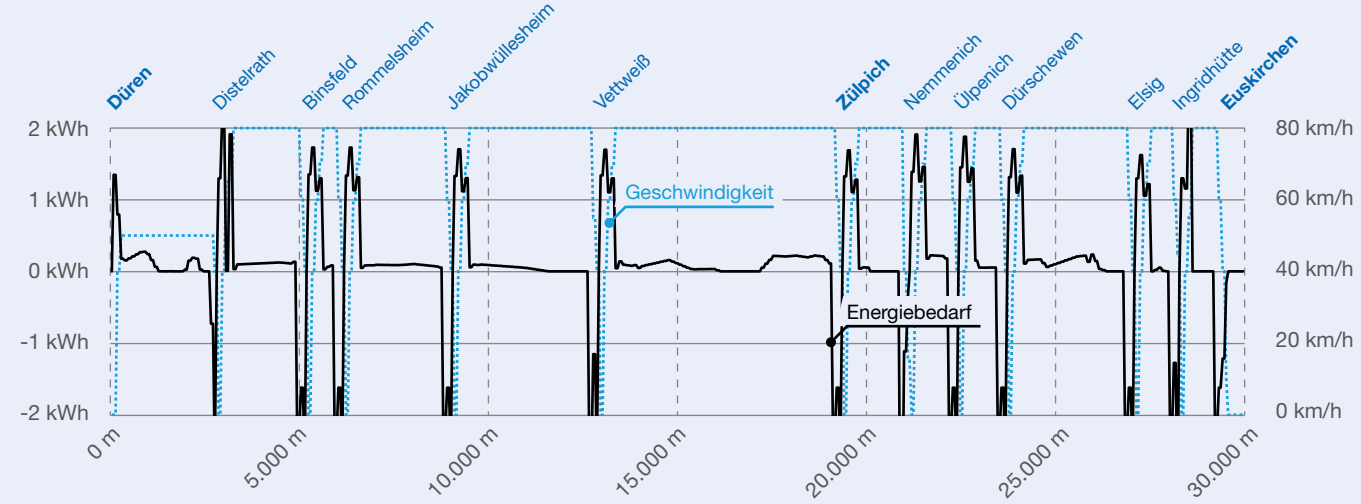
RB 21 Nord



RB 21 Süd

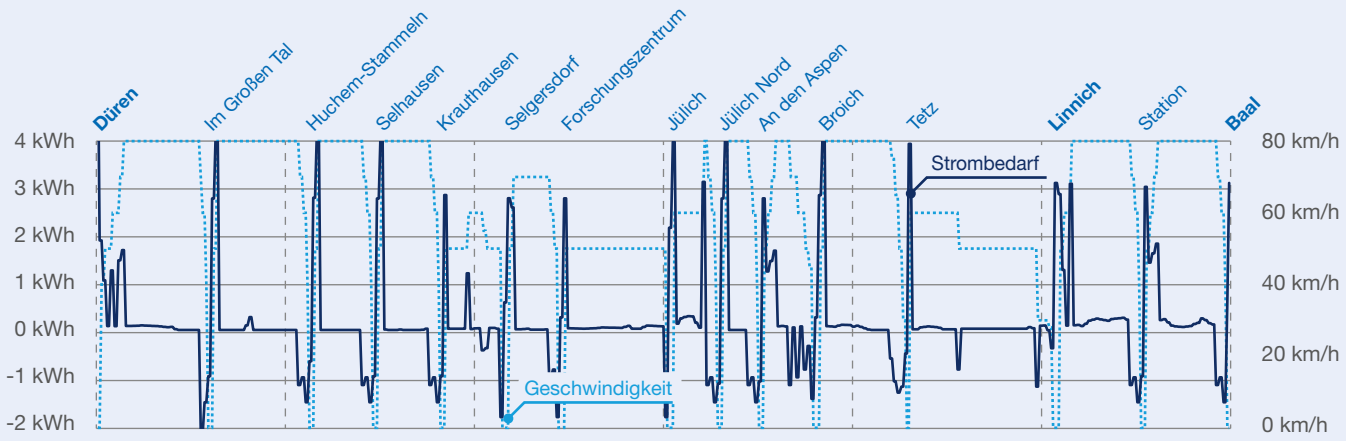


RB 28

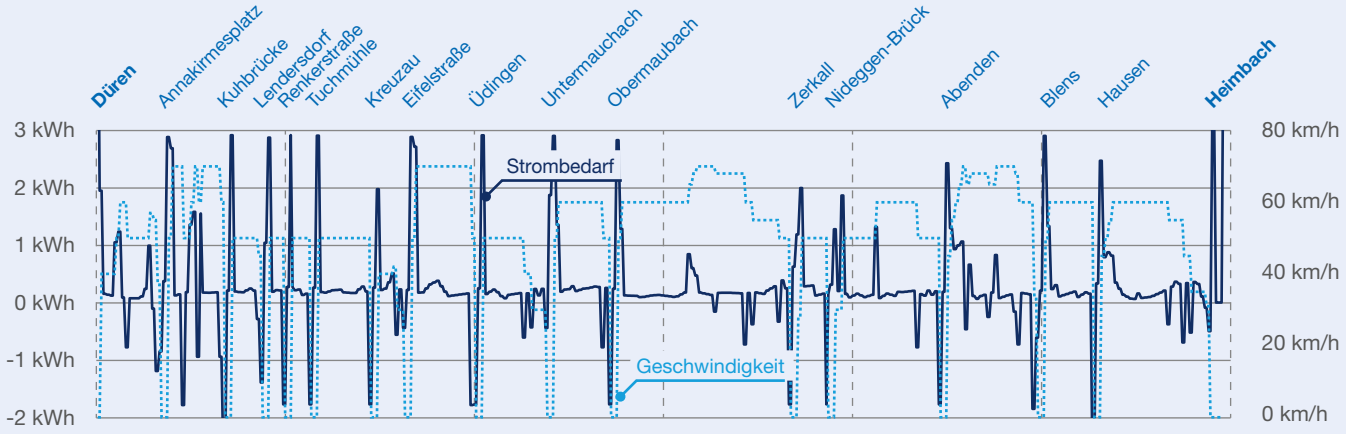


↑ Abbildung 38: Simulierter Energiebedarf auf den Strecken des ›Netzes Düren‹ (2026+)

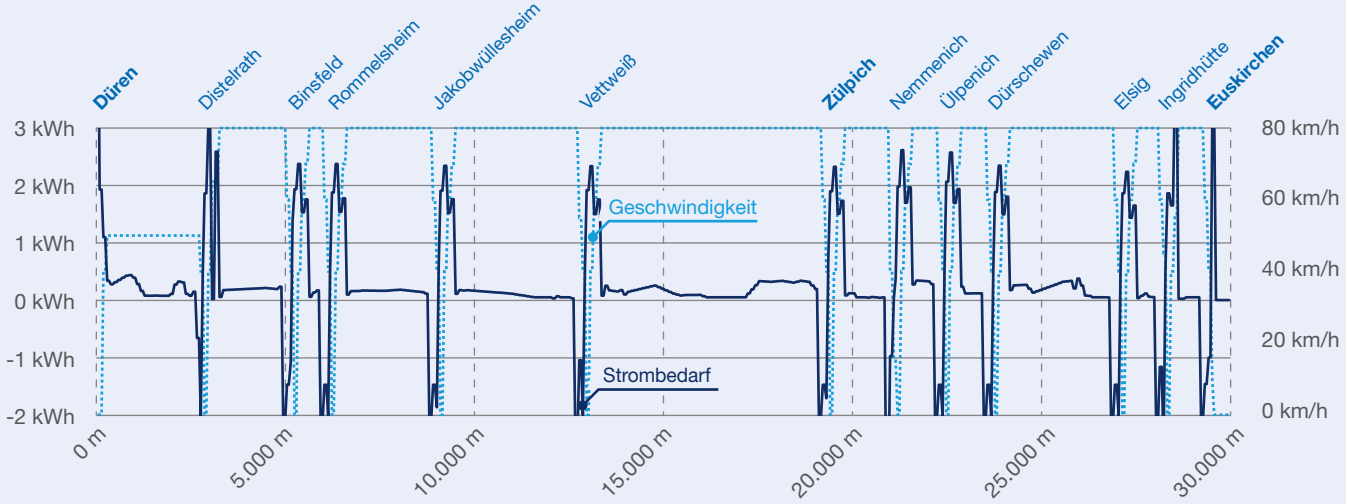
RB 21 Nord Strom-Bedarf Ø 4,57 kWh/km inkl. Rekuperation



RB 21 Süd Strom-Bedarf Ø 5,24 kWh/km inkl. Rekuperation

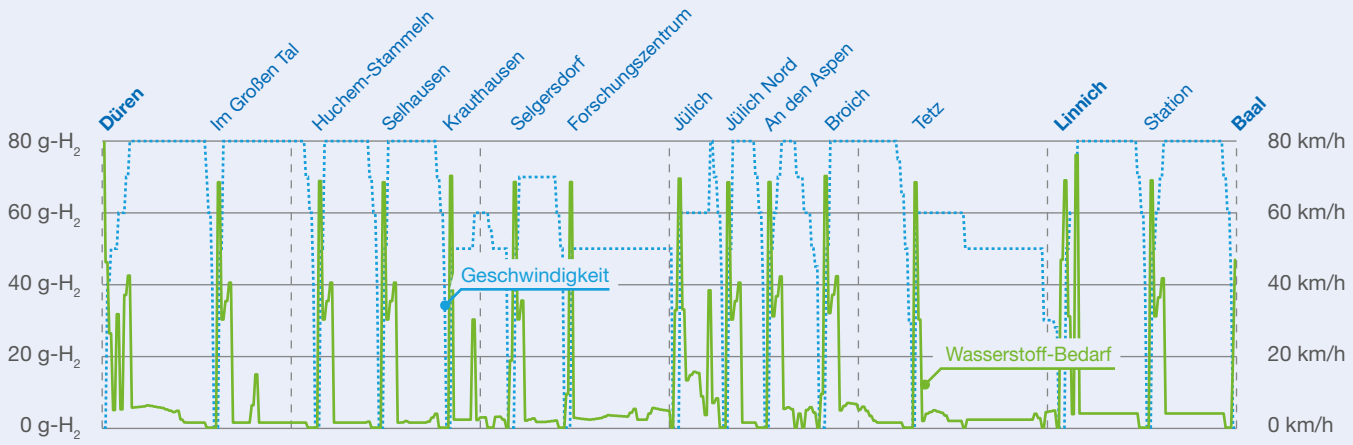


RB 28 Strom-Bedarf Ø 5,27 kWh/km inkl. Rekuperation

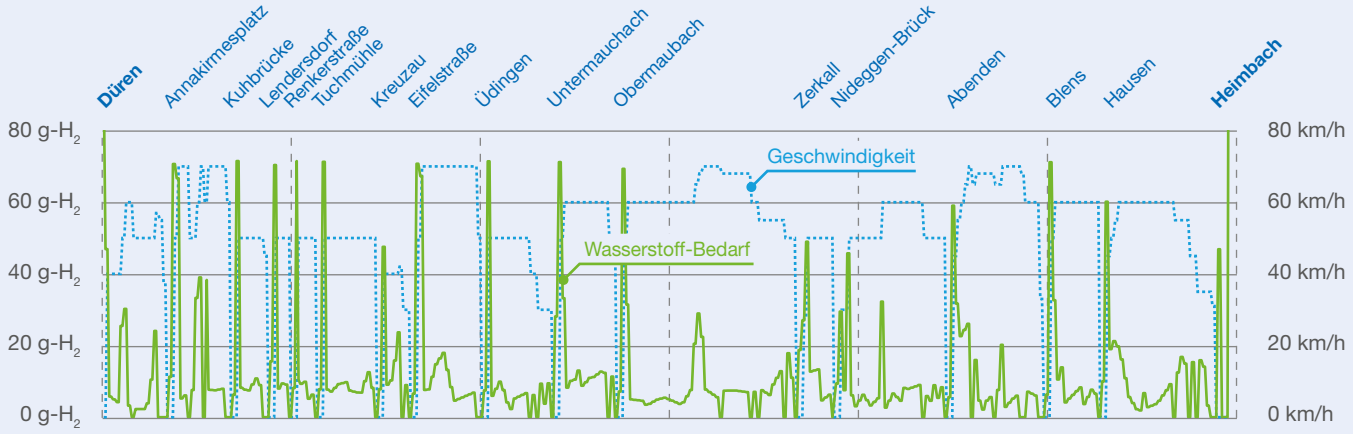


↑ Abbildung 39: Strombedarf des BEMU auf den Bahnlinien des ›Netzes Düren‹ (2026+)

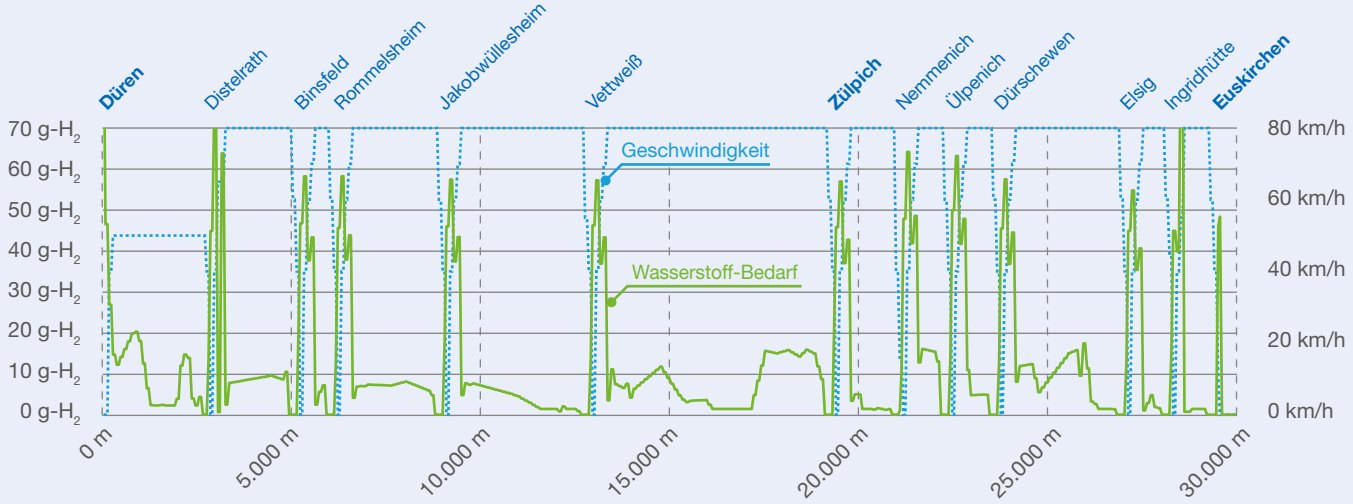
RB 21 Nord Wasserstoff-Bedarf Ø 202 g-H_2/km inkl. Rekuperation



RB 21 Süd Wasserstoff-Bedarf Ø 234 g-H_2/km inkl. Rekuperation



RB 28 Wasserstoff-Bedarf Ø 253 g-H_2/km inkl. Rekuperation



↑ Abbildung 40: Wasserstoff-Bedarf des HEMU auf den Bahnlinien des ›Netzes Düren‹ (2026+)

5.4 Kapitalwertanalyse

Die Wirtschaftlichkeit der Bahnlinien im ›Netz Düren‹ wird wesentlich durch die Fahrgastnachfrage und die erzielbaren Erlöse aus Ticketverkäufen bestimmt sein. Die Kosten für Anschaffung, Betrieb, Wartung und Instandhaltung der Fahrzeuge und für die Bereitstellung ihrer Antriebsenergie, wie auch die Kosten für die Einrichtung und Wartung der betriebsspezifischen Infrastruktur müssen dazu in einem angemessenen Verhältnis stehen. Der VDE geht in seiner Wirtschaftlichkeitsbetrachtung daher davon aus, dass die Rurtalbahn GmbH als Betreiber in der Lage ist, das ›Netz Düren‹ heute mit acht Dieseltriebwagen des Typs Stadler RegioShuttle RS1 und drei Dieseltriebzügen des Typs Alstom Coradia LINT 54 wirtschaftlich zu betreiben – auch dank der mit dem Aufgabenträger vereinbarten Zuschüsse (Bestellerentgelt[16]).

Eine zentrale Kostenposition sind die Energiekosten der Fahrzeugflotte. Der Energiebedarf des einzelnen Triebzuges hängt wie in → Abschnitt 5.3 beschrieben von fahrzeug- und streckenspezifischen Eigenschaften wie auch von den Verbräuchen der Nebenaggregate ab. Die Umrechnung in den Verbrauch von elektrischem Strom, Wasserstoff oder Diesel setzt die Kenntnis aller antriebsspezifischen Wirkungsgrade voraus. In → Tabelle 5 sind die Mittelwerte der auf den Linien des ›Netzes Düren‹ erwarteten Strom- bzw. Kraftstoffbedarfe pro Fahrzeug zusammengestellt.

	BEMU mit Rekuperation	**HEMU** mit Rekuperation	**EMU** ohne Rekuperation	**DMU**
	Ø Strombedarf	Ø H_2-Bedarf	Ø Strombedarf	Ø Dieselbedarf
RB 21 Nord	4,57 kWh/km	202 g-H_2/km	7,48 kWh/km	1,68 l/km
RB 21 Süd	5,24 kWh/km	234 g-H_2/km	7,36 kWh/km	1,59 l/km
RB 28	5,27 kWh/km	253 g-H_2/km	7,96 kWh/km	1,74 l/km
Netz Düren	**5,03 kWh/km**	**230 g-H_2/km**	**7,60 kWh/km**	**1,67 l/km**

↑ Tabelle 5: Mittlere Energie- und Kraftstoffbedarfe auf den Linien des ›Netzes Düren‹

Unabhängig davon, dass politisch und gesellschaftlich die Entscheidung bereits feststeht, den Dieselbetrieb durch eine umweltfreundliche und baldmöglichst klimaneutrale Lösung zu ersetzen, wird sich jede Alternative wirtschaftlich am Status Quo mit DMU messen lassen müssen. Im Falle des ›Netzes Düren‹ geht es laut NVR konkret um die Entscheidung, hier zukünftig Brennstoffzellen- oder Batterietriebzüge einzusetzen. Der Schwerpunkt der Wirtschaftlichkeitsanalysen soll also auf den Konzepten HEMU und BEMU liegen. Um den Grad der Vorteilhaftigkeit einer Alternative einschätzen zu können, bezieht der VDE die Konzepte EMU und DMU als (hypothetische) Investitionsprojekte in seine Analysen mit ein.

Für die vergleichende dynamische Investitionsrechnung geht der VDE von der in → Abschnitt 4.2 genannten allgemeinen → Formel 4.1 zur Berechnung des Kapitalwertes aus. Einzahlungen E_t (= Einnahmen) werden in der Formel auf Null gesetzt, ebenso alle Auszahlungen A_t (= Kosten), die eindeutig technologieunabhängig sind. Zudem wird davon ausgegangen, dass die buchhalterischen Restwerte der Investitionsgüter am Ende des Betrachtungszeitraums der Länge n größer oder gleich Null sind, also positive Liquidationserlöse L_n darstellen. Somit konkretisiert sich die → Formel 4.1 zu → Formel 5.8 für die Beschreibung des Kapitalwertes der Technologiealternative TA_i im Betrachtungszeitraum $t = 1$ bis n mit den diskontierten Auszahlungsflüssen $-A_t/q^t$ und den Restwerten L_n/q^n der Investitionsgüter.

16 Das Bestellerentgelt ist ein aus Regionalisierungsmitteln abgeleiteter Zuschuss, den der Aufgabenträger an das beauftragte EVU auszahlt. Die Höhe dieses Zuschusses ist proportional zur vereinbarten Fahrleistung und lag laut BAG-SPNV im Jahr 2016 bei 12,18 €/Zkm.

$$C_0(\mathrm{TA_i}) = -I_0^{\text{Fahrzeug}} + \frac{L_n^{\text{Fahrzeug}}}{q^n}$$ Formel 5.8

$$+\sum_{t=1}^{n} \frac{-A_t^{\text{Energie}}}{q^t} + \sum_{t=1}^{n} \frac{-A_t^{\text{Inst. Fzg}}}{q^t} + \sum_{t=1}^{n} \frac{-A_t^{\text{Austausch}}}{q^t}$$

$$+ -I_0^{\text{Infrastruktur}} + \sum_{t=1}^{n} \frac{-A_t^{\text{Infrastr. Betr.}}}{q^t} + \frac{L_n^{\text{Infrastruktur}}}{q^n}$$

$$+ \sum_{t=1}^{n} \frac{-A_t^{\text{Trassen}}}{q^t} + \sum_{t=1}^{n} \frac{-A_t^{\text{Stationen}}}{q^t}$$

C_0 = Kapitalwert

$\mathrm{TA_i}$ = betrachtete technologische Alternative (DMU, EMU, BEMU oder HEMU)

I_0^{abc} = Investitionsbeträge für Güter abc zu Beginn des Betrachtungszeitraums der Länge n

L_n^{abc} = Restwerte der Güter abc am Ende des Betrachtungszeitraums

A_t^{xyz} = Kosten des Typs xyz im Jahr t

$1/q^t$ = Abzinsungsfaktor, mit $q = 1 + i$ und i = Kalkulationszinsatz, → Abschnitt 4.2

→ Formel 5.8 setzt sich aus drei Termfolgen zusammen. Die Termfolge in den ersten beiden Zeilen umfasst die technologiespezifischen Beiträge zum Kapitalwert, die für das Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) als Betreiber der Bahnlinien relevant sind. Die zweite Termfolge in der dritten Zeile betrifft das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) als Investor und Betreiber der Infrastruktur. Zusammen repräsentieren sie eine übergeordnete volkswirtschaftliche Sicht. Die unterste Zeile in blauer Schrift betrifft die für den wirtschaftlichen Betrieb der Linien relevanten Kosten für die Nutzung von Trassen und Stationen. Angesichts der besonderen Größenordnung ihres Beitrags zu den Gesamtkosten haben sich die Autoren erlaubt, diese in die Kapitalwertanalyse mit aufzunehmen, obwohl sie aktuell noch unabhängig von der betrachteten Alternative sind. Damit wird die Option in Betracht gezogen, dass Trassen- und Stationsgebühren zukünftig technologiespezifisch gestaffelt werden könnten.

Für den Vergleich der in Frage kommenden Investitionsalternativen für das ›Netz Düren‹ wählte der VDE nach Rücksprache mit dem NVR das Fahrplanjahr 2026 als Startzeitpunkt des Betrachtungszeitraums – mit allen ab diesem Jahr geltenden Betriebsdaten. Dabei wurde angenommen, dass die Bereitstellung der verschiedenen Fahrzeuge und die Installation von Oberleitungen, Elektrifizierungsinseln oder Wasserstoff-Tankstellen bis zum Jahr 2025 möglich sind.

5.4.1 Datengrundlage der Kapitalwertmethode

Orientiert an → Formel 5.8 zur Berechnung des Kapitalwertes, sind im Folgenden alle Kostenpositionen mit Sätzen und Eintrittszeitpunkten zusammengestellt. Diese wurden in Gesprächen mit verschiedenen Fahrzeugherstellern, EVUs, Instandhaltungswerkstätten und Infrastrukturunternehmen gesammelt. Wenn sich zu gleichen Positionen unterschiedliche Werte ergaben, wurden Mittelwerte gebildet.

In → Tabelle 6 sind die wichtigsten Basisdaten zu Fahrzeugen und Infrastruktur zusammengestellt.

Fahrzeugpool	DMU	EMU	BEMU	HEMU	Anmerkung
Beschaffungskosten Nutzungsdauer	3,50 Mio. €/Fzg 25 Jahre	4,30 Mio. €/Fzg 30 Jahre	6,20 Mio. €/Fzg 30 Jahre	6,90 Mio. €/Fzg 30 Jahre	3-Teiler
Instandhaltungskosten	1,20 €/Zkm	0,80 €/Zkm	0,85 €/Zkm	0,95 €/Zkm	bezogen auf Fahrleistung
Revisionszyklus RZ Revisionskosten	8 Jahre 260.000 €/RZ	8 Jahre 230.000 €/RZ	8 Jahre 230.000 €/RZ	8 Jahre 245.000 €/RZ	
Austausch: Komponente 1 Austausch-Kosten Austausch-Zyklus	PowerPack 166.000 € 3 Jahre	entfällt entfällt entfällt	Akku 1.300 €/kWh 8 Jahre	Akku 1.300 €/kWh 8 Jahre	Größe Anw.-spezifisch
Austausch: Komponente 2 Austausch-Kosten Austauschzyklus	entfällt	entfällt	entfällt	Brennstoffzelle 2.000 €/kW 5 Jahre	Größe Anw.-spezifisch
Energiepreis	1,20 €/l-Diesel 0,50 €/l-AdBlue	12,00 ct/kWh	12,00 ct/kWh	4,50 €/kg-H_2	ab 2026 (Annahme)
Infrastruktur	**für DMU**	**für EMU**	**für BEMU**	**für HEMU**	**Anmerkung**
Beschaffungskosten Nutzungsdauer	350 T€/Tankstelle 30 Jahre	1 Mio. €/OL-km 76 Jahre	5 Mio. €/E-Insel 76 Jahre	1 Mio. €/TStelle 30 Jahre	 Lebensdauer
Betriebskosten	20.000 €/Jahr	250.000 €/Jahr	~50.000 €/Jahr	30.000 €/Jahr	
Trassengebühr (TPS 2020) Stationsgebühr – Haltepunkt Stationsgebühr – Bahnhof	4,48 €/km 3,00 €/Halt 5,00 €/Halt	4,48 €/km 3,00 €/Halt 5,00 €/Halt	4,48 €/km 3,00 €/Halt 5,00 €/Halt	4,48 €/km 3,00 €/Halt 5,00 €/Halt	Technologie-unabhängig Technologie-unabhängig Technologie-unabhängig

↑ Tabelle 6: Basisdaten zu Fahrzeugen und Infrastruktur

BEMU und HEMU sind von ihrem Aufbau her eng mit dem EMU verwandt. Dennoch sind ihre Anschaffungskosten grundsätzlich höher, da sie zusätzlich teure Technologiekomponenten benötigen. Im Falle des BEMU ist es eine große Traktionsbatterie mit über 500 kWh Kapazität. Beim HEMU sind es ein großer Brennstoffzellenstack mit über 400 kW Leistung, eine zusätzlich erforderliche Dynamikbatterie sowie große Wasserstofftanks. Abhängig von den spezifizierten Betriebsdauern dieser Komponenten sind die erwarteten Austauschkosten entsprechend hoch.

Die Instandhaltungskosten des DMU sind im Vergleich zu den Alternativen am höchsten, da die Dieselmotoren aufwändig zu warten sind und über die Nutzungsdauer von 25 Jahren regelmäßig ein kompletter Tausch der Motoren anfällt.

Auf die Infrastruktur bezogen, stellen die in → Tabelle 6 genannten Daten Mittelwerte dar – außer im Falle der Tankstelle für den DMU: Die heute am Bahnhof Düren gelegene Dieseltankstelle muss aufgrund geänderter Anforderungen um einen Kilometer versetzt werden. Dafür werden Kosten von 300 T€ angesetzt. Im Falle des BEMU wird angenommen, dass nur im Bahnhof Düren eine Elektrifizierungsinsel zum Aufladen vorgesehen wird.

Die in → Tabelle 6 aufgeführten Trassen- und Stationsgebühren gelten laut Preissystem 2020 der Rurtalbahn. Sie liegen in der gleichen Größenordnung wie bei DB Netze und finanzieren den Betrieb und die Instandhaltung der Infrastruktur. Sie werden technologieunabhängig erhoben.

→ Tabelle 7 und → Tabelle 8 erfassen alle Kostenpositionen, die sich auf den Betrieb der Linien des ›Netzes Düren‹ mit verschiedenen Fahrzeugkonzepten beziehen. Die jeweils angegebene Anzahl der Fahrzeuge und die Betriebsleistungswerte entsprechen den Aussagen in → Abschnitt 5.2 zum Fahrplanjahr 2026 mit der bis Baal ausgebauten Linie RB 21 Nord.

Allgemein	RB 21 Nord (2026+)	RB 21 Süd (2026+)	RB 28 (2026+)	Netz Düren
Streckenlänge	31,50 km	29,86 km	30,26 km	91,62 km
Fuhrpark-Anteil	4 Fahrzeuge	3 Fahrzeuge	2 Fahrzeuge	9 Fahrzeuge
Fzg.-Reserve	1 Fahrzeuge	1 Fahrzeuge		2 Fahrzeuge
Beförderungsleistung	0,643 Mio. Zkm/Jahr	0,474 Mio. Zkm/Jahr	0,343 Mio. Zkm/Jahr	1,460 Mio. Zkm/Jahr
Fahrleistung pro Fzg	0,161 Mio. Zkm/Jahr	0,119 Mio. Zkm/Jahr	0,171 Mio. Zkm/Jahr	0,133 Mio. Zkm/Jahr
DMU				
Fzg.-Beschaffung	17,500 Mio. €/30J	14,000 Mio. €/30J	7,000 Mio. €/30J	38,500 Mio. €/30J
Fzg.-Instandhaltung	0,772 Mio. €/Jahr	0,569 Mio. €/Jahr	0,411 Mio. €/Jahr	1,752 Mio. €/Jahr
Fahrzeug-Revision	1,300 Mio. €/8J	1,040 Mio. €/8J	0,520 Mio. €/8J	2,860 Mio. €/8J
Trakt.energie-Kosten	1,452 Mio. €/Jahr	0,909 Mio. €/Jahr	0,858 Mio. €/Jahr	3,219 Mio. €/Jahr
Trassenkosten	2,882 Mio. €/Jahr	2,124 Mio. €/Jahr	1,536 Mio. €/Jahr	6,542 Mio. €/Jahr
Stationskosten	1,124 Mio. €/Jahr	0,869 Mio. €/Jahr	0,510 Mio. €/Jahr	2,503 Mio. €/Jahr
Tausch Technologie	0,268 Mio. €/Jahr	0,198 Mio. €/Jahr	0,143 Mio. €/Jahr	0,609 Mio. €/Jahr
Infrastruktur-Invest	0,159 Mio. €/30J	0,127 Mio. €/30J	0,064 Mio. €/30J	0,350 Mio. €/30J
Infrastruktur-Betrieb	0,009 Mio. €/Jahr	0,006 Mio. €/Jahr	0,005 Mio. €/Jahr	0,020 Mio. €/Jahr
Tankfahrten-Kosten	0,001 Mio. €/Jahr	0,001 Mio. €/Jahr	0,001 Mio. €/Jahr	0,003 Mio. €/Jahr
EMU				
Fzg.-Beschaffung	21,500 Mio. €/30J	17,200 Mio. €/30J	8,600 Mio. €/30J	47,300 Mio. €/30J
Fzg.-Instandhaltung	0,515 Mio. €/Jahr	0,379 Mio. €/Jahr	0,274 Mio. €/Jahr	1,168 Mio. €/Jahr
Fahrzeug-Revision	1,150 Mio. €/8J	0,920 Mio. €/8J	0,460 Mio. €/8J	2,530 Mio. €/8J
Trakt.energie-Kosten	0,654 Mio. €/Jahr	0,414 Mio. €/Jahr	0,316 Mio. €/Jahr	1,384 Mio. €/Jahr
Trassenkosten	2,882 Mio. €/Jahr	2,124 Mio. €/Jahr	1,536 Mio. €/Jahr	6,542 Mio. €/Jahr
Stationskosten	1,124 Mio. €/Jahr	0,869 Mio. €/Jahr	0,510 Mio. €/Jahr	2,503 Mio. €/Jahr
Infrastruktur-Invest	31,500 Mio. €/76J	149,300 Mio. €/76J	30,260 Mio. €/76J	211,060 Mio. €/76J
Infrastruktur-Betrieb	0,110 Mio. €/Jahr	0,081 Mio. €/Jahr	0,059 Mio. €/Jahr	0,250 Mio. €/Jahr

↑ Tabelle 7: Linien-spezifische Kostenpositionen zu DMU und EMU inkl. Infrastruktur

Allgemein	RB 21 Nord (2026+)	RB 21 Süd (2026+)	RB 28 (2026+)	Netz Düren
Streckenlänge	31,50 km	29,86 km	30,26 km	91,62 km
Fuhrpark-Anteil	4 Fahrzeuge	3 Fahrzeuge	2 Fahrzeuge	9 Fahrzeuge
Fzg-Reserve	1 Fahrzeuge	1 Fahrzeuge		2 Fahrzeuge
Beförderungsleistung	0,643 Mio. Zkm/Jahr	0,474 Mio. Zkm/Jahr	0,343 Mio. Zkm/Jahr	1,460 Mio. Zkm/Jahr
Fahrleistung pro Fzg	0,161 Mio. Zkm/Jahr	0,119 Mio. Zkm/Jahr	0,171 Mio. Zkm/Jahr	0,133 Mio. Zkm/Jahr
BEMU				
Fzg.-Beschaffung	31,000 Mio. €/30J	24,800 Mio. €/30J	12,400 Mio. €/30J	68,200 Mio. €/30J
Fzg.-Instandhaltung	0,547 Mio. €/Jahr	0,403 Mio. €/Jahr	0,291 Mio. €/Jahr	1,241 Mio. €/Jahr
Fahrzeug-Revision	1,150 Mio. €/8J	0,920 Mio. €/8J	0,460 Mio. €/8J	2,530 Mio. €/8J
Trakt.energie-Kosten	0,426 Mio. €/Jahr	0,277 Mio. €/Jahr	0,192 Mio. €/Jahr	0,894 Mio. €/Jahr
Trassenkosten	2,882 Mio. €/Jahr	2,124 Mio. €/Jahr	1,536 Mio. €/Jahr	6,542 Mio. €/Jahr
Stationskosten	1,124 Mio. €/Jahr	0,869 Mio. €/Jahr	0,510 Mio. €/Jahr	2,503 Mio. €/Jahr
Tausch Technologie	0,481 Mio. €/Jahr	0,354 Mio. €/Jahr	0,256 Mio. €/Jahr	1,092 Mio. €/Jahr
Infrastruktur-Invest	2,203 Mio. €/76J	1,623 Mio. €/76J	1,174 Mio. €/76J	5,000 Mio. €/76J
Infrastruktur-Betrieb	0,022 Mio. €/Jahr	0,016 Mio. €/Jahr	0,012 Mio. €/Jahr	0,050 Mio. €/Jahr
HEMU				
Fzg.-Beschaffung	34,500 Mio. €/30J	27,600 Mio. €/30J	13,800 Mio. €/30J	75,900 Mio. €/30J
Fzg.-Instandhaltung	0,611 Mio. €/Jahr	0,450 Mio. €/Jahr	0,326 Mio. €/Jahr	1,387 Mio. €/Jahr
Fahrzeug-Revision	1,225 Mio. €/8J	0,980 Mio. €/8J	0,490 Mio. €/8J	2,695 Mio. €/8J
Trakt.energie-Kosten	0,770 Mio. €/Jahr	0,467 Mio. €/Jahr	0,357 Mio. €/Jahr	1,595 Mio. €/Jahr
Trassenkosten	2,882 Mio. €/Jahr	2,124 Mio. €/Jahr	1,536 Mio. €/Jahr	6,542 Mio. €/Jahr
Stationskosten	1,124 Mio. €/Jahr	0,869 Mio. €/Jahr	0,510 Mio. €/Jahr	2,503 Mio. €/Jahr
Tausch Technologie	0,913 Mio. €/Jahr	0,673 Mio. €/Jahr	0,487 Mio. €/Jahr	2,072 Mio. €/Jahr
Infrastruktur-Invest	0,455 Mio. €/30J	0,364 Mio. €/30J	0,182 Mio. €/30J	1,000 Mio. €/76J
Infrastruktur-Betrieb	0,013 Mio. €/Jahr	0,010 Mio. €/Jahr	0,007 Mio. €/Jahr	0,030 Mio. €/Jahr
Tankfahrten-Kosten	0,001 Mio. €/Jahr	0,001 Mio. €/Jahr	0,001 Mio. €/Jahr	0,003 Mio. €/Jahr
Laden Dyn.-Batterie	0,021 Mio. €/Jahr	0,015 Mio. €/Jahr	0,011 Mio. €/Jahr	0,047 Mio. €/Jahr

↑ Tabelle 8: Linienspezifische Kostenpositionen zu BEMU und HEMU inkl. Infrastruktur

5.4.2 Ergebnisse der Kapitalwertanalyse

Zu jeder der drei Linien des ›Netzes Düren‹ führte der VDE separat eine Kapitalwertanalyse durch, um die vier Technologiekonzepte DMU, BEMU, HEMU und EMU miteinander zu vergleichen und zu bewerten. In Absprache mit NVR wählte der VDE vier verschiedene Betrachtungszeiträume:

15 Jahre	Maximaldauer von Verkehrsverträgen mit EVUs
22,5 Jahre	Maximaldauer als Ausnahme gemäß Art. 4 Abs. 4 VO EG 1370/2007[17]
30 Jahre	Typische Nutzungsdauer von Triebzügen mit elektromotorischen Antrieben
70 Jahre	als Orientierung dienen Nutzungsdauern von Investitionsgütern wie OL-Masten

In → Tabelle 9 sind – nach der Länge des Betrachtungszeitraums geordnet – die resultierenden Kapitalwerte aufgeführt. In der linken Spalte mit den Summenwerten für das Netz sind jeweils die betraglich kleinsten Kapitalwerte fett hervorgehoben. Damit wird das je nach Länge des Betrachtungszeitraums jeweils vorteilhafteste Investitionsprojekt gekennzeichnet. Hiernach erweisen sich BEMU und EMU als ähnlich vorteilhaft. Linien-individuell setzt sich wechselnd das eine oder andere Konzept durch. Auf das Gesamtnetz bezogen wird EMU umso vorteilhafter, je größer der Betrachtungszeitraum ist, allerdings mit einer nur geringen Variationsbreite. Die Berücksichtigung der Restwerte von Fahrzeugen und Infrastruktur bewirkt offenbar, dass die Kapitalwerte für DMU, EMU, BEMU und HEMU bei unterschiedlichen Betrachtungsdauern in ihren Verhältnissen kaum variieren. Der VDE beschränkt sich bei den weiteren Untersuchungen daher auf den Zeitraum von 30 Jahren.

→ Tabelle 10 gibt die resultierenden Kapitalwerte nach Kostenarten sortiert wieder. Unter der Zeile mit den Gesamt-Kapitalwerten geben jeweils zwei weitere Zeilen Auskunft darüber, wie groß der Kapitalwert nach Abzug der Trassen- und Stationskosten ist und was nach zusätzlichem Abzug der Kosten für Infrastruktur-Investition und -Betrieb übrigbleibt. Letztere Kapitalwerte sind die technologiespezifischen Kosten, die nur das EVU als Betreiber der Bahnlinien betreffen.

15 Jahre	**Netz Düren**	**RB 21 Nord**	**RB 21 Süd**	**RB 28**
DMU	-238,4 Mio. €	-106,2 Mio. €	-77,3 Mio. €	-54,9 Mio. €
EMU	-222,0 Mio. €	-96,9 Mio. €	-73,5 Mio. €	-51,6 Mio. €
BEMU	**-218,0 Mio. €**	-97,3 Mio. €	-72,9 Mio. €	-47,7 Mio. €
HEMU	-248,3 Mio. €	-111,3 Mio. €	-82,4 Mio. €	-54,6 Mio. €
22,5 Jahre	**Netz Düren**	**RB 21 Nord**	**RB 21 Süd**	**RB 28**
DMU	-352,0 Mio. €	-156,8 Mio. €	-114,2 Mio. €	-81,0 Mio. €
EMU	-327,1 Mio. €	-142,8 Mio. €	-108,3 Mio. €	-76,0 Mio. €
BEMU	**-321,4 Mio. €**	-143,5 Mio. €	-107,5 Mio. €	-70,4 Mio. €
HEMU	-366,0 Mio €	-164,1 Mio. €	-121,5 Mio. €	-80,5 Mio. €
30 Jahre	**Netz Düren**	**RB 21 Nord**	**RB 21 Süd**	**RB 28**
DMU	-461,9 Mio. €	-205,8 Mio. €	-149,8 Mio. €	-106,3 Mio. €
EMU	-428,4 Mio. €	-187,3 Mio. €	-141,6 Mio. €	-99,5 Mio. €
BEMU	**-421,4 Mio. €**	-188,4 Mio. €	-140,6 Mio. €	-92,3 Mio. €
HEMU	-480,0 Mio. €	-215,4 Mio. €	-158,9 Mio. €	-105,6 Mio. €
70 Jahre	**Netz Düren**	**RB 21 Nord**	**RB 21 Süd**	**RB 28**
DMU	-982,7 Mio. €	-437,8 Mio. €	-318,9 Mio. €	-226,0 Mio. €
EMU	-906,3 Mio. €	-396,9 Mio. €	-299,6 Mio. €	-209,8 Mio. €
BEMU	**-898,0 Mio. €**	-401,7 Mio. €	-299,6 Mio. €	-196,7 Mio. €
HEMU	-1022,8 Mio. €	-459,2 Mio. €	-338,5 Mio. €	-225,0 Mio. €

↑ Tabelle 9: Gesamt-Kapitalwerte bei verschiedenen Betrachtungszeiträumen

17 NVR 5.2.2020: „Eine Verlängerung der Laufzeit um […] 50 Prozent ist möglich, wenn dies unter Berücksichtigung der Amortisationsdauer der Wirtschaftsgüter erforderlich ist. Das ist dann der Fall, wenn die Kosten für die eingesetzten Wirtschaftsgüter so hoch sind, dass innerhalb der normalen Laufzeit für den Auftraggeber oder Auftragnehmer […] ein wirtschaftlich sinnvoller Betrieb nicht möglich ist.“

30 Jahre	Kapitalwert	Netz Düren	RB 21 Nord	RB 21 Süd	RB 28
DMU	**Gesamt**	**-461,9 Mio. €**	**-205,8 Mio. €**	**-149,8 Mio. €**	**-106,3 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S	**-210,2 Mio. €**	**-94,3 Mio. €**	**-66,6 Mio. €**	**-49,3 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S + I	**-209,3 Mio. €**	**-93,9 Mio. €**	**-66,2 Mio. €**	**-49,1 Mio. €**
	Fahrzeuge	-46,0 Mio. €	-20,9 Mio. €	-16,7 Mio. €	-8,4 Mio. €
	Instandhaltung	-56,7 Mio. €	-25,1 Mio. €	-18,7 Mio. €	-12,9 Mio. €
	Energie	-89,6 Mio. €	-40,4 Mio. €	-25,3 Mio. €	-23,9 Mio. €
	Austausch Tech.-Komp.	-16,9 Mio. €	-7,5 Mio. €	-5,5 Mio. €	-4,0 Mio. €
	Tanken	-0,10 Mio. €	-0,03 Mio. €	-0,03 Mio. €	-0,03 Mio. €
	Trassen (T)	-182,0 Mio. €	-80,2 Mio. €	-59,1 Mio. €	-42,7 Mio. €
	Stationen (S)	-69,7 Mio. €	-31,3 Mio. €	-24,2 Mio. €	-14,2 Mio. €
	Infrastruktur (I)	-0,91 Mio. €	-0,40 Mio. €	-0,31 Mio. €	-0,19 Mio. €
EMU	**Gesamt**	**-428,4 Mio. €**	**-187,3 Mio. €**	**-141,6 Mio. €**	**-99,5 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S	**-176,7 Mio. €**	**-75,8 Mio. €**	**-58,4 Mio. €**	**-42,6 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S + I	**-126,0 Mio. €**	**-57,7 Mio. €**	**-41,8 Mio. €**	**-26,5 Mio. €**
	Fahrzeuge	-47,9 Mio. €	-22,0 Mio. €	-17,2 Mio. €	-8,8 Mio. €
	Instandhaltung	-39,5 Mio. €	-17,5 Mio. €	-13,1 Mio. €	-8,9 Mio. €
	Energie	-38,5 Mio. €	-18,2 Mio. €	-11,5 Mio. €	-8,8 Mio. €
	Austausch Tech.-Komp.	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €
	Trassen (T)	-182,0 Mio. €	-80,2 Mio. €	-59,1 Mio. €	-42,7 Mio. €
	Stationen (S)	-69,7 Mio. €	-31,3 Mio. €	-24,2 Mio. €	-14,2 Mio. €
	Infrastruktur (I)	-50,7 Mio. €	-18,1 Mio. €	-16,5 Mio. €	-16,1 Mio. €
BEMU	**Gesamt**	**-421,4 Mio. €**	**-188,4 Mio. €**	**-140,6 Mio. €**	**-92,3 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S	**-169,7 Mio. €**	**-77,0 Mio. €**	**-57,4 Mio. €**	**-35,4 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S + I	**-166,0 Mio. €**	**-75,3 Mio. €**	**-56,1 Mio. €**	**-34,5 Mio. €**
	Fahrzeuge	-69,1 Mio. €	-31,7 Mio. €	-24,8 Mio. €	-12,7 Mio. €
	Instandhaltung	-41,6 Mio. €	-18,4 Mio. €	-13,8 Mio. €	-9,4 Mio. €
	Energie	-24,9 Mio. €	-11,8 Mio. €	-7,7 Mio. €	-5,3 Mio. €
	Austausch Tech.-Komp.	-30,4 Mio. €	-13,4 Mio. €	-9,9 Mio. €	-7,1 Mio. €
	Trassen (T)	-182,0 Mio. €	-80,2 Mio. €	-59,1 Mio. €	-42,7 Mio. €
	Stationen (S)	-69,7 Mio. €	-31,3 Mio. €	-24,2 Mio. €	-14,2 Mio. €
	Infrastruktur (I)	-3,8 Mio. €	-1,7 Mio. €	-1,2 Mio. €	-0,9 Mio. €
HEMU	**Gesamt**	**-480,0 Mio. €**	**-215,4 Mio. €**	**-158,9 Mio. €**	**-105,6 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S	**-228,3 Mio. €**	**-103,9 Mio. €**	**-75,6 Mio. €**	**-48,7 Mio. €**
	Gesamt ohne T + S + I	**-226,4 Mio. €**	**-103,1 Mio. €**	**-75,0 Mio. €**	**-48,3 Mio. €**
	Fahrzeuge	-76,9 Mio. €	-35,2 Mio. €	-27,6 Mio. €	-14,1 Mio. €
	Instandhaltung	-46,1 Mio. €	-20,4 Mio. €	-15,2 Mio. €	-10,4 Mio. €
	Energie	-44,4 Mio. €	-21,4 Mio. €	-13,0 Mio. €	-9,9 Mio. €
	Austausch Tech.-Komp.	-57,7 Mio. €	-25,4 Mio. €	-18,7 Mio. €	-13,5 Mio. €
	Tanken/Laden	-1,38 Mio. €	-0,60 Mio. €	-0,45 Mio. €	-0,33 Mio. €
	Trassen (T)	-182,0 Mio. €	-80,2 Mio. €	-59,1 Mio. €	-42,7 Mio. €
	Stationen (S)	-69,7 Mio. €	-31,3 Mio. €	-24,2 Mio. €	-14,2 Mio. €
	Infrastruktur (I)	-1,83 Mio. €	-0,82 Mio. €	-0,63 Mio. €	-0,38 Mio. €

↑ Tabelle 10: Kapitalwerte nach Kostenarten für Alternativen (Betrachtungszeitraum 30J)

In den nachfolgenden Abbildungen entsprechen die verschiedenen Diagrammdurchmesser den Verhältnissen der Kapitalwertsummen.

→ Abbildung 41 zeigt zusammenfassend für das ›Netz Düren‹, mit welchen Anteilen die verschiedenen Kostenpositionen zum Kapitalwert beitragen. Trassen- und Stationskosten sind an sich technologieunabhängig, das heißt, ihr Anteil ist in absoluten Zahlen immer gleich groß. Wie an anderer Stelle bereits erläutert, nahm der VDE diese Kosten dennoch in die Betrachtung mit auf, da sie dominante Kostenpositionen darstellen und sich in Zukunft die Möglichkeit ergeben könnte, durch Subvention beispielsweise der Trassengebühr die Vorteilhaftigkeit eines alternativen Konzeptes gezielt zu verbessern.

→ Abbildung 42 zeigt graphisch die aufgeschlüsselten Kapitalwerte ohne Trassen- und Stationskosten.

In → Abbildung 43 sind die aufgeschlüsselten Kapitalwerte zusätzlich ohne Investitions- und Betriebskosten für die Infrastruktur dargestellt.

Der Vergleich der verschiedenen Tortendiagramme zeigt, dass die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit letztlich eine Frage der Perspektive und der gegebenen Rahmenbedingungen ist.

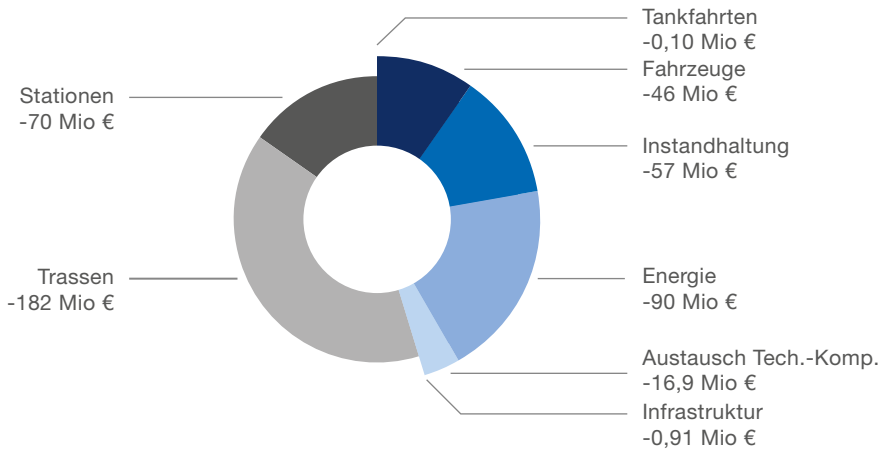
→ Abbildung 41 deckt auf, dass die Wirtschaftlichkeit des Betriebes der Bahnlinien ganz wesentlich durch die technologieunabhängigen Kosten der Trassen- und Stationsnutzung bestimmt wird. Sieht man von diesen großen Kostenblöcken ab, dominieren je nach Technologie andere Kosten, wie in → Abbildung 42 deutlich wird: Beim DMU bestimmen vor allem die Energiekosten den resultierenden Kapitalwert. Beim EMU sind es die Kosten für die Investition in durchgehende Elektrifizierung. Bei BEMU und HEMU stellen die Fahrzeugbeschaffungskosten und die Kosten für den Austausch ihrer Hochtechnologiekomponenten einen signifikanten Anteil ihres Kapitalwertes dar. Die Kosten für die Installation von Elektrifizierungsinseln im Falle des BEMU hingegen sind relevant, aber nicht dominant.

Im Falle des HEMU lassen insbesondere die Kosten für den Tausch der hochpreisigen Komponenten Brennstoffzelle und Dynamikbatterie sowie die Energiekosten den resultierenden Kapitalwert besonders negativ werden. Die Tauschkosten hängen letztlich von der Qualität und Lebensdauer der Brennstoffzelle und der Batterie ab. Die Energiekosten werden durch die ungünstigen Wirkungsgrade und den Wasserstoffpreis bestimmt. Letzterer wird vorteilhaft zu 4,50 €/kg-H_2 für ›grünen‹ Wasserstoff angenommen. Der heutige Preis für diesen Elektrolyse-Wasserstoff liegt deutlich höher. Somit gilt: Eine signifikante Verbesserung der Lebensdauer der eingesetzten Brennstoffzellen und ein günstigerer Wasserstoffpreis würden den resultierenden Kapitalwert wesentlich positiver ausfallen lassen.

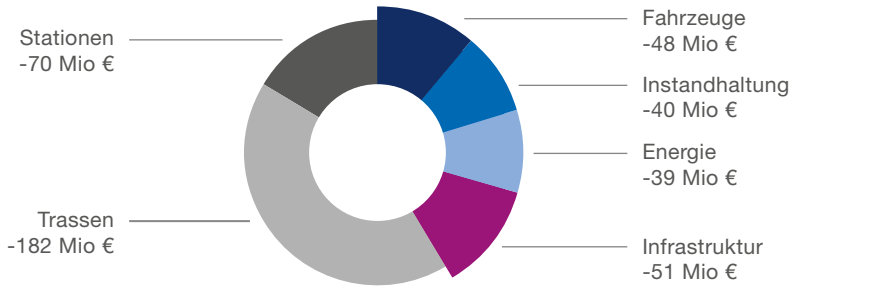
Interessant ist die Tatsache, dass BEMU und EMU trotz ihrer Unterschiede in den verschiedenen Kostenpositionen im Falle des ›Netzes Düren‹ nah beieinanderliegende resultierende Kapitalwerte aufweisen: Fahrzeug- plus Infrastrukturkosten beim EMU decken sich mit Fahrzeug- plus Tauschkosten im Falle des BEMU. Zu beachten ist, dass die Energiekosten des EMU effektiv – unter dem Strich – geringer sind als die des BEMU. In der Simulation kann jedoch die Kostenwirkung der Rekuperation des EMU in die Oberleitung nicht dargestellt werden, denn die Rückspeisung setzt voraus, dass es in der Nähe einen anderen Zug gibt, der die Energie aufnimmt. Der Betrag der Rückvergütung durch den Energieanbieter bleibt so eine Unbekannte.

→ Abbildung 43 zeigt, dass, wenn die Infrastruktur durch *Andere* finanziert und gestellt wird und daher in der Kapitalwertanalyse unberücksichtigt bleibt, die Größenverhältnisse der resultierenden Kapitalwerte noch weiter auseinanderlaufen. In diesem Fall erweist sich der EMU als unschlagbar vorteilhaftes Investitionsprojekt. Und auch der BEMU ist sehr vorteilhaft. Der HEMU entspricht hinsichtlich seines resultierenden Kapitalwertes dem einer Investition in DMU, wobei anzumerken ist, dass hier ein Dieselpreis von 1,20 €/Liter angenommen wird.

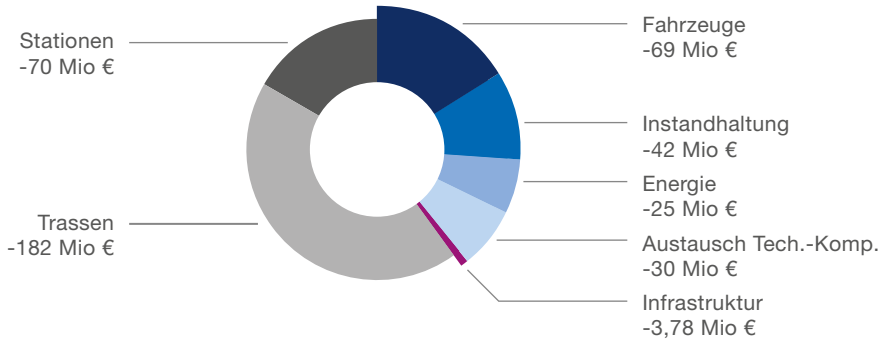
DMU **KW = -461,9 Mio €**



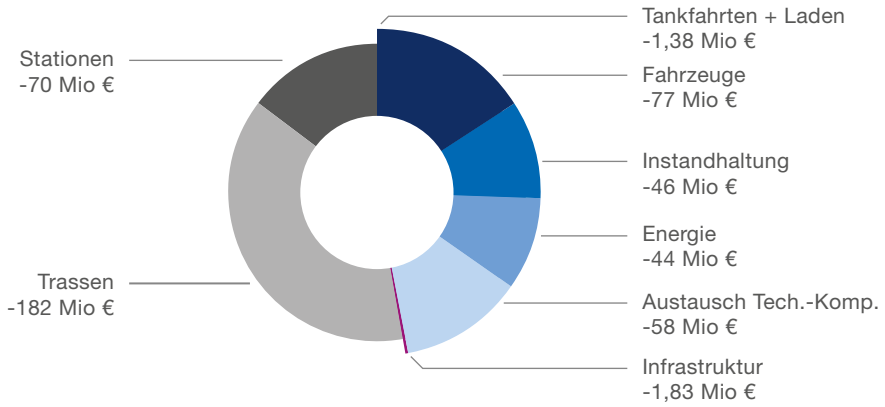
EMU **KW = -428,4 Mio €**
(ohne Rekuperation)



BEMU **KW = -421,4 Mio €**
(mit Rekuperation)

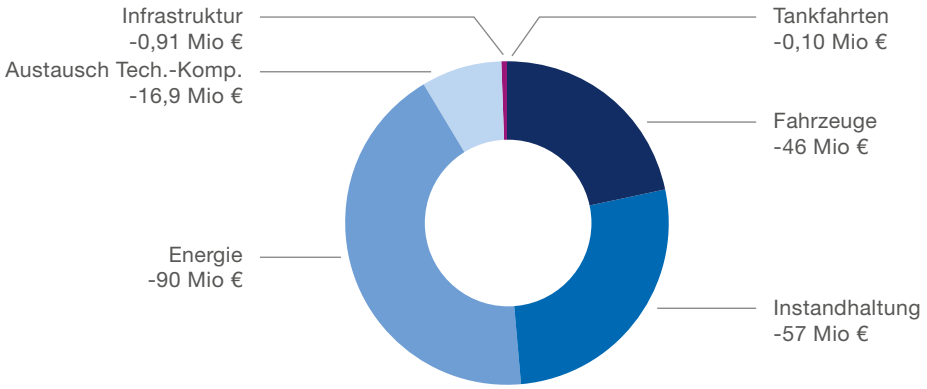


HEMU **KW = -480,0 Mio €**
(mit Rekuperation)

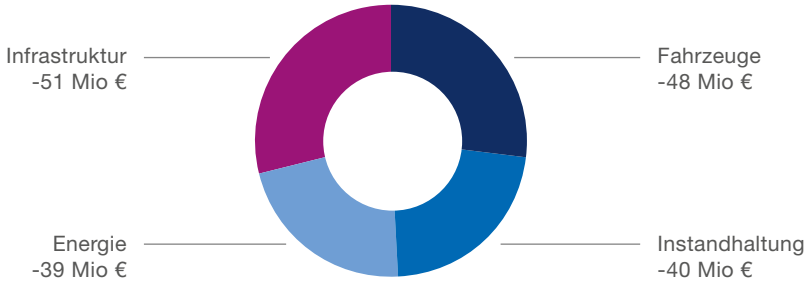


↑ Abbildung 41: Nach Kostenarten differenzierte Kapitalwerte für das ›Netz Düren‹

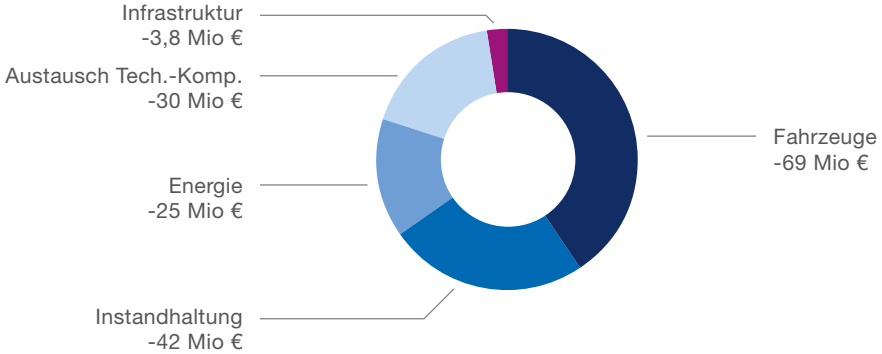
DMU **KW = -210,2 Mio €**



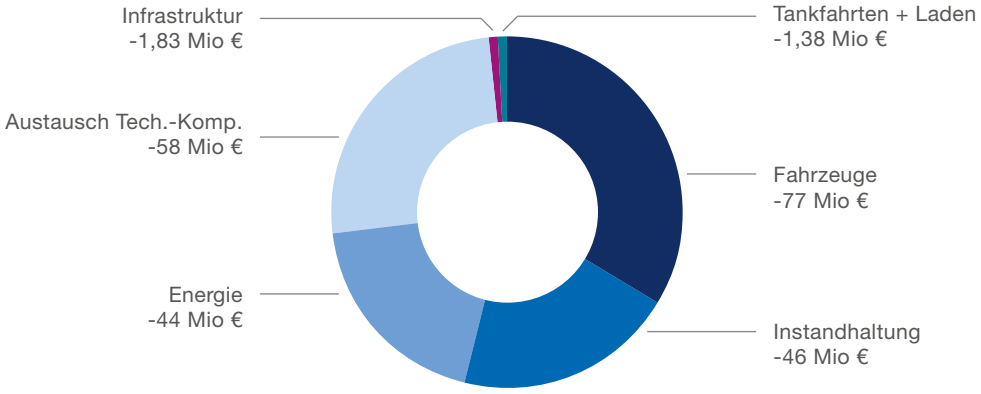
EMU **KW = -176,7 Mio €**
(ohne Rekuperation)



BEMU **KW = -169,7 Mio €**
(mit Rekuperation)

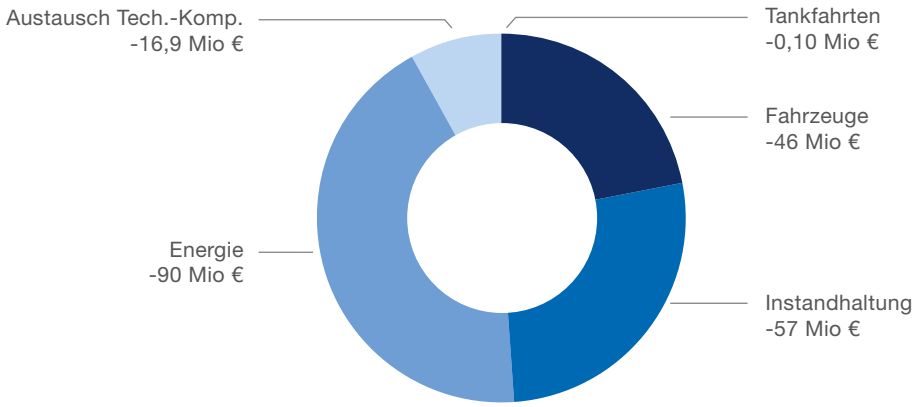


HEMU **KW = -228,3 Mio €**
(ohne Rekuperation)

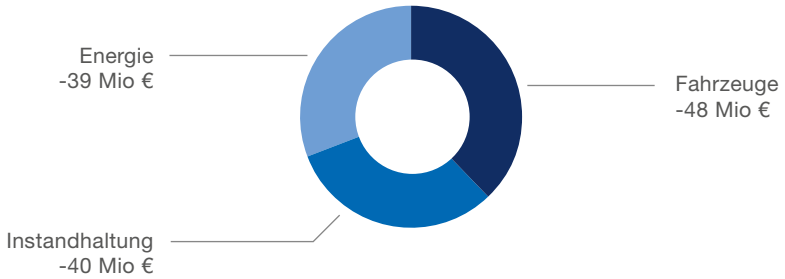


↑ Abbildung 42: Aufgeschlüsselte Kapitalwerte ohne Trassen- und Stationskosten

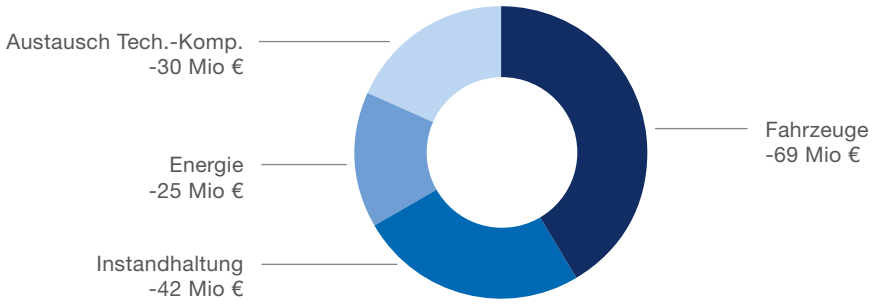
DMU **KW = -209,3 Mio €**



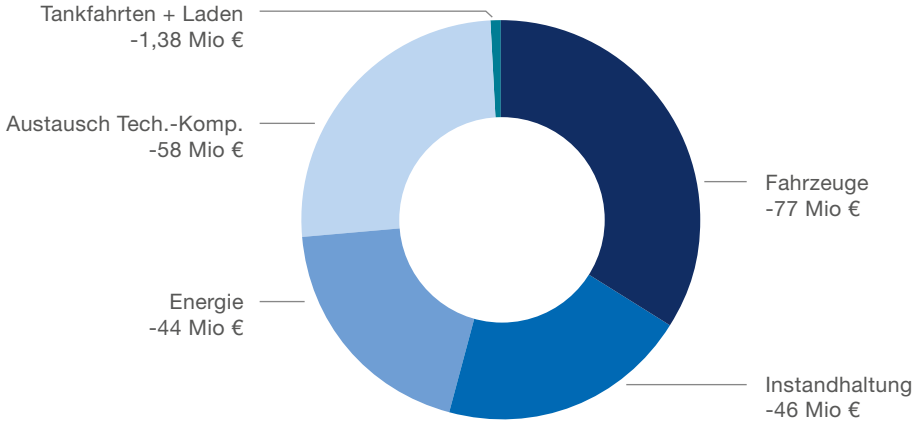
EMU **KW = -126,0 Mio €**
(ohne Rekuperation)



BEMU **KW = -166,0 Mio €**
(mit Rekuperation)



HEMU **KW = -226,4 Mio €**
(mit Rekuperation)



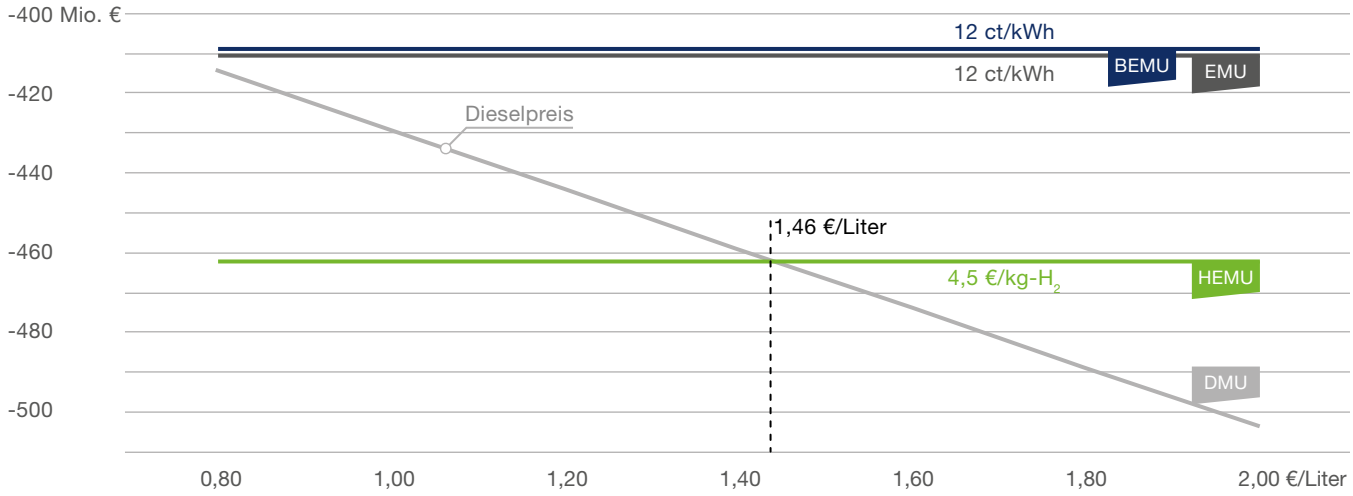
↑ Abbildung 43: Aufgeschlüsselte Kapitalwerte ohne Trassen-, Stations- und Infrastrukturkosten

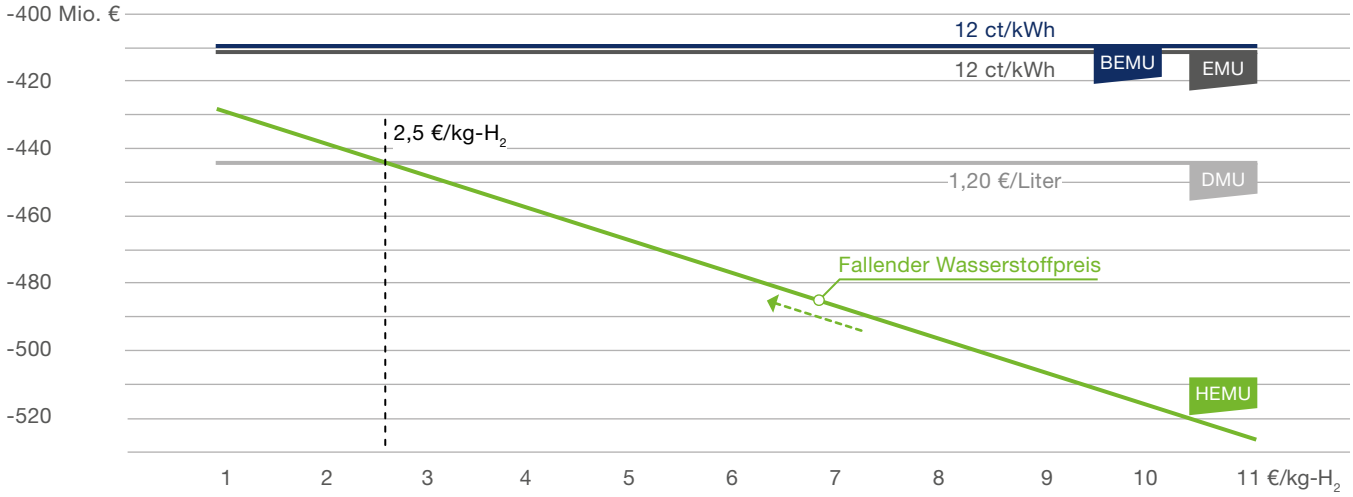
5.4.3 Sensitivitätsanalyse

Die in → Abschnitt 5.4.2 zusammengestellten Erkenntnisse basieren auf Annahmen beispielsweise hinsichtlich der geltenden Energiepreise und Elektrifizierungskosten. Zudem sind die Aussagen streng genommen nur für das Beispiel ›Netz Düren‹ mit seinen spezifischen Streckeneigenschaften und Betriebsbedingungen zutreffend. Für andere Netze und abweichende Parameterwerte könnten sich andere Erkenntnisse hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit einer Alternative ergeben. Wie empfindlich die resultierenden Kapitalwerte von den verschiedenen Parametern abhängen, hat der VDE mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Die Bandbreiten, mit denen die verschiedenen Parameter variiert wurden, sind in → Tabelle 11 aufgeführt.

Parameter	von	bis
Preis Diesel	0,80 €/Liter	2,00 €/Liter
Preis Strom	10 ct/kWh	40 ct/kWh
Preis Wasserstoff	1,00 €/kg-H_2	11,00 €/kg-H_2
Kosten Elektrifizierug	0,5 Mio. €/km	2,0 Mio. €/km
Umfang BEMU-Flotte	+ 0 Fahrzeuge	+ 9 Fahrzeuge
Preis HEMU-Fahrzeug	EMU-Preis + 0 %	EMU-Preis + 100 %
Preis BEMU-Fahrzeug	EMU-Preis + 0 %	EMU-Preis + 100 %
Gewicht BEMU	EMU-Gewicht + 0 %	EMU-Gewicht + 50 %
Gewicht HEMU	EMU-Gewicht + 0 %	EMU-Gewicht + 50 %
Takt im ›Netz Düren‹	1 Zug / 2h	3 Züge / 1h

↑ Tabelle 11: Für die Sensitivitätsanalyse variierte Parameter (Betrachtungszeitraum 30J)



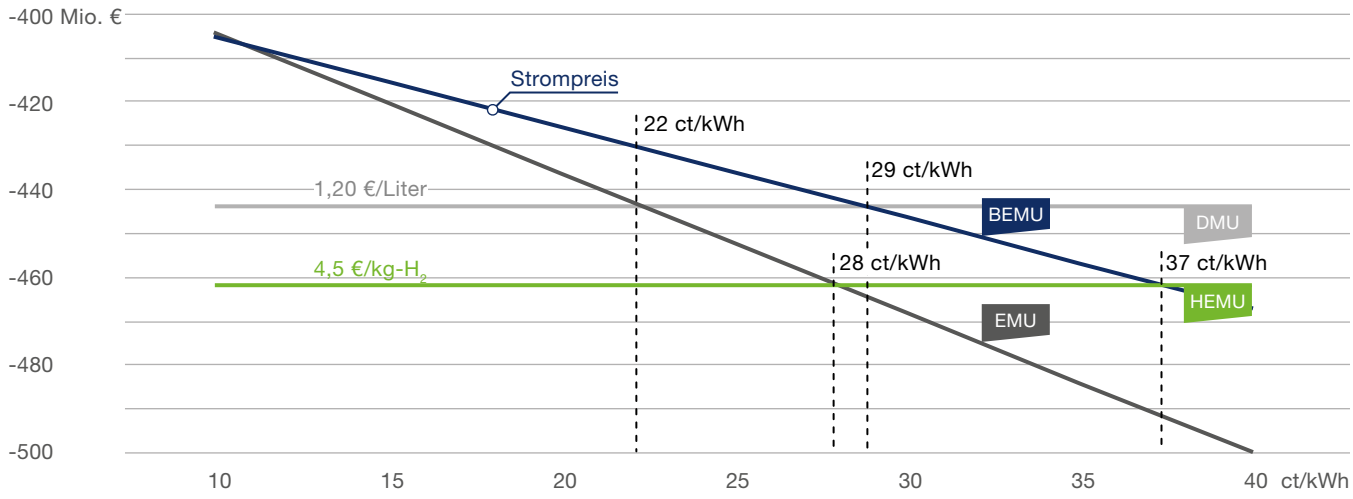


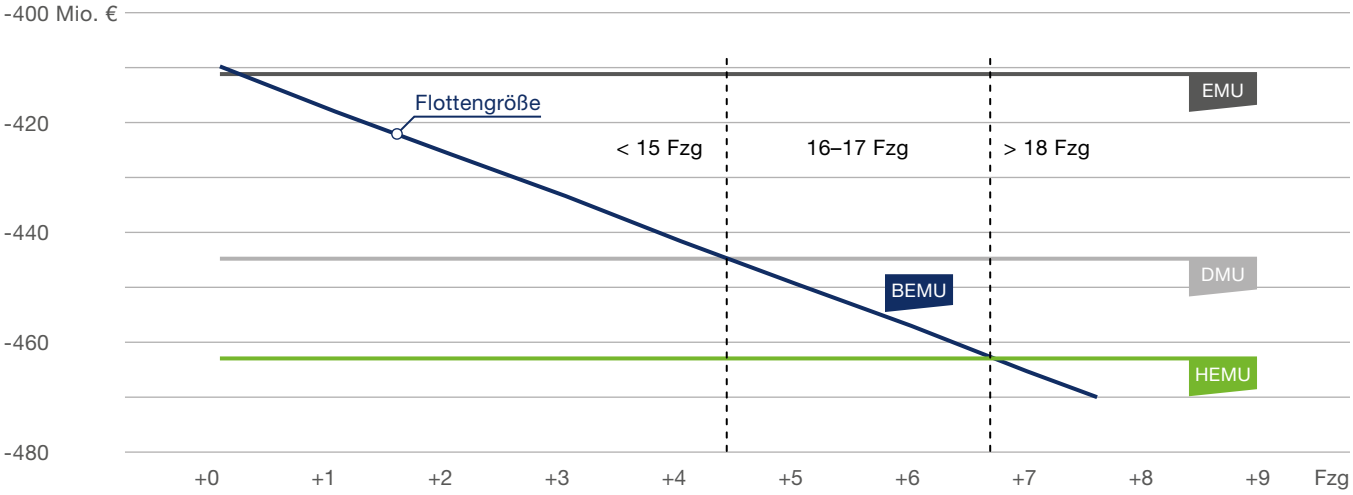
↑↑ Abbildung 44: Sensitivitätsanalyse zum Dieselpreis (Referenz: Gesamtkapitalwert)

↑ Abbildung 45: Sensitivitätsanalyse zum Wasserstoffpreis (Referenz: Gesamtkapitalwert)

→ Abbildung 44 zeigt, wie sich die Variation des Dieselpreises zwischen 0,80 und 2,00 €/Liter ohne Änderung der übrigen Energiepreise auf den resultierenden Gesamtkapitalwert der möglichen Investition in eine neue DMU-Flotte auswirken würde. Hiernach lägen DMU und HEMU auf Gleichstand bei einem Dieselpreis von 1,46 €/Liter – allerdings unter der Annahme eines heute noch nicht realisierten Preises für ›grünen‹ Wasserstoff von 4,50 €/kg-H_2.

→ Abbildung 45 verdeutlicht wiederum, dass unter Berücksichtigung aller Kostenpositionen in der Kapitalwertformel, der Wasserstoffpreis auf unter 2,50 €/kg-H_2 fallen müsste, damit die Investition in die HEMU-Lösung vorteilhafter würde als die DMU-Lösung (bei einem Dieselpreis von 1,20 €/Liter). Auf das ›Netz Düren‹ bezogen, wäre es hiernach unrealistisch, über eine weitere Senkung des Wasserstoffpreises auf Gleichstand mit EMU oder BEMU kommen zu wollen.





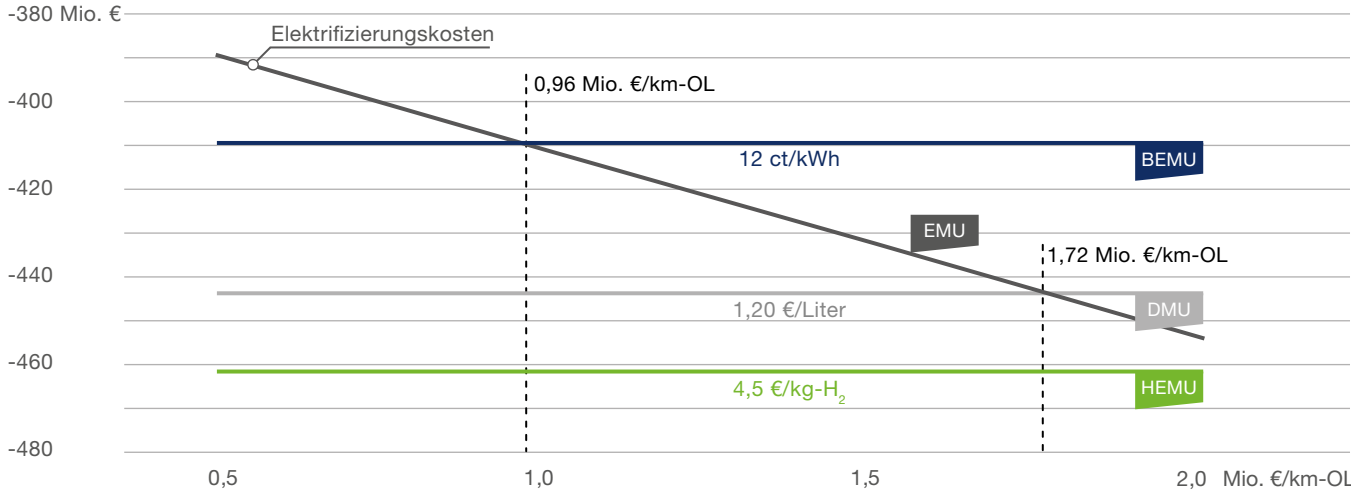
↑↑ Abbildung 46: Sensitivitätsanalyse zum Strompreis (Referenz: Gesamt-Kapitalwert)

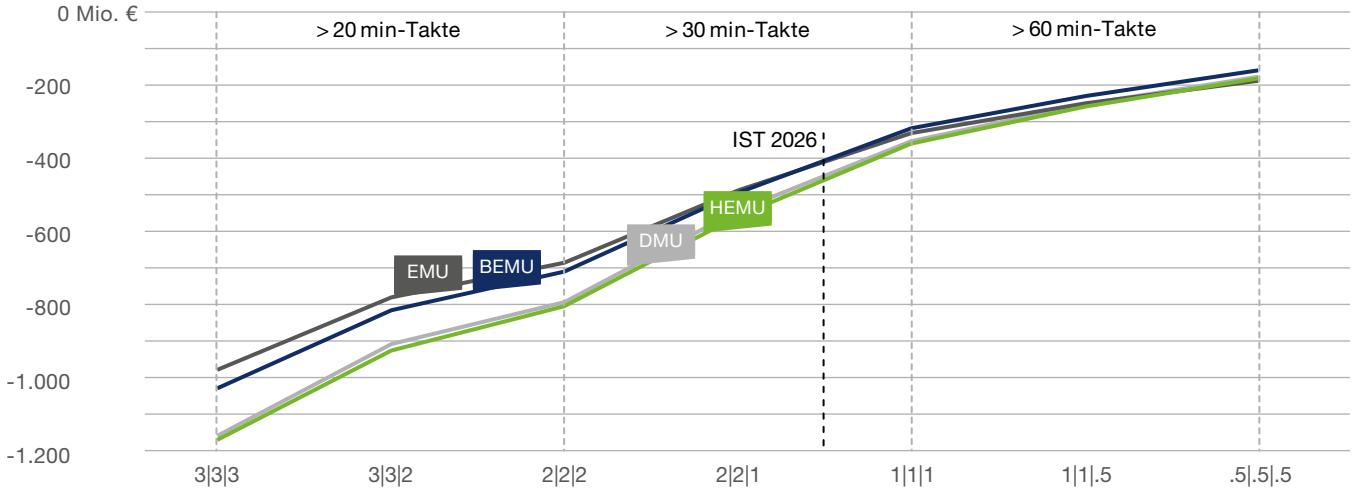
↑ Abbildung 47: Sensitivitätsanalyse zur BEMU-Flottengröße wegen begrenzter Reichweite

Wie vorteilhaft sich die Konzepte EMU und BEMU darstellen, lässt sich an den Ergebnissen der Variation des Strompreises in → Abbildung 46 ablesen. Hiernach könnte im Falle des EMU selbst ohne Rekuperation der Bahnstrompreis von 12 auf 28 ct/kWh steigen, ohne dass die Investition nachteiliger würde als das HEMU-Konzept (bei 4,50 €/kg-H_2). Im Falle des BEMU sind die Verhältnisse bei Berücksichtigung der Rekuperation noch günstiger: Hier könnte der Strompreis auf 37 ct/kWh steigen, ohne gegenüber der HEMU-Lösung nachteilig zu werden.

Die Aussagekraft der Kapitalwertanalyse hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit der Konzepte BEMU und EMU ist offenbar derart signifikant, dass sich selbst bei breitbandiger Variation der Kraftstoff- und Strompreise daran nichts ändern würde.

Wie gut sich eine BEMU-Flotte im ›Netz Düren‹ einsetzen lässt, hängt vor allem davon ab, wo sich ihre Ladeinfrastruktur befindet, wie schnell sich Fahrzeuge dort aufladen lassen und wieviel Zeit dafür im Betriebsablauf zur Verfügung steht. Im Grenzfall kann es für den Betreiber erforderlich sein, mehr Fahrzeuge einzusetzen, als es bislang im Falle des DMU nötig war. → Abbildung 47 zeigt, dass die BEMU-Lösung als Investitionsprojekt schon bei nur einem zusätzlichen Fahrzeug gegenüber der EMU-Lösung signifikant nachteilig wird. Erst ab sieben zusätzlichen BEMU-Fahrzeugen würde es im Vergleich zum HEMU-Konzept wirtschaftlich schlechter dastehen.





↑↑ Abbildung 48: Sensitivitätsanalyse zu Kosten der Elektrifizierung für eine EMU-Flotte

↑ Abbildung 49: Sensitivitätsanalyse zur Taktung der Linien des ›Netzes Düren‹

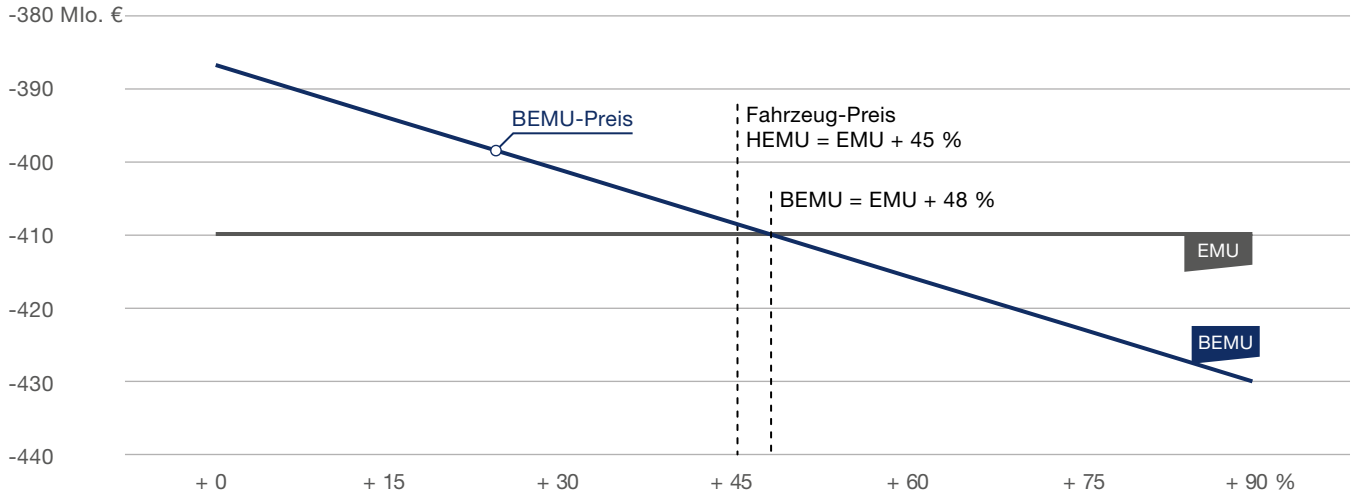
Die besondere Vorteilhaftigkeit des EMU hängt maßgeblich von den angenommenen Elektrifizierungskosten von 1 Mio. €/km-OL (inklusive Unterwerk) ab. Hier stellt sich die Frage, wie sich die Verhältnisse ändern, wenn die Erstellungskosten signifikant darüber oder darunter lägen. Die Antwort lässt sich in → Abbildung 48 ablesen. EMU und BEMU liegen hiernach bei 1 Mio. €/km eher zufällig gleichauf. Liegen die Kosten wesentlich höher, wird das BEMU-Konzept zum mit Abstand vorteilhaftesten Investitionsprojekt. Ab 2 Mio. €/km würde das EMU-Konzept auf Gleichstand mit dem HEMU-Konzept fallen. Bei Elektrifizierungskosten deutlich unter 1 Mio. €/km wiederum würde die Vorteilhaftigkeit der EMU-Investition noch signifikanter.

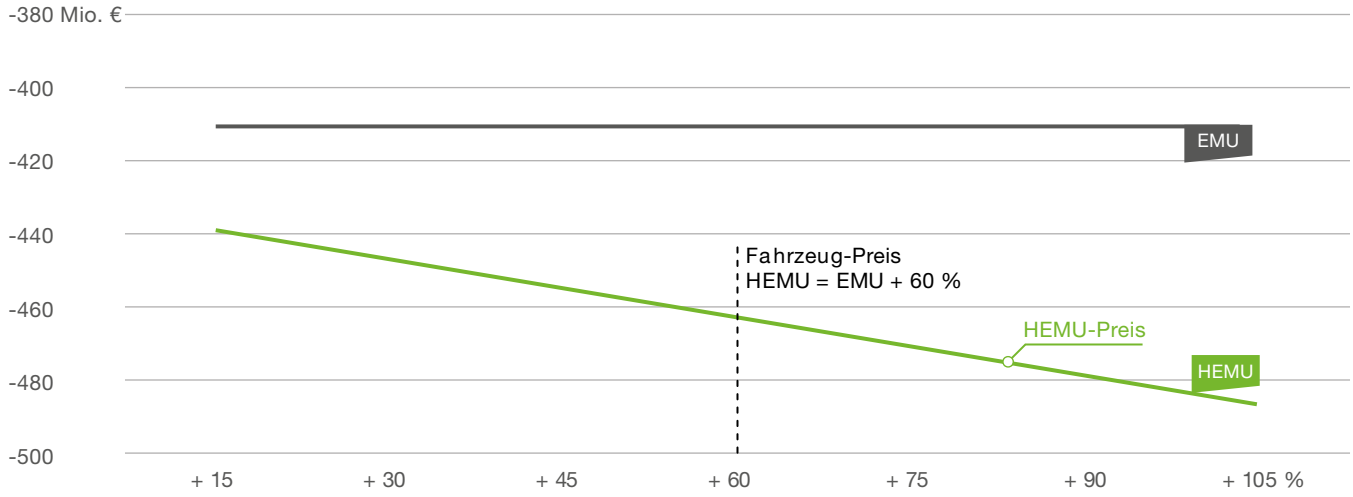
Eine verbleibende wichtige Frage ist, welchen Einfluss die Taktung der Linien im ›Netz Düren‹auf die Vorteilhaftigkeit, also den resultierenden Kapitalwert hat. Die Analyse ging bis hierher davon aus, dass die ab dem Fahrplanjahr 2026 pro Stunde eingesetzte Zahl von Zügen gleichbleibt, also in den nächsten 30 Jahren keine Takt-Änderungen vorgenommen werden. → Abbildung 49 demonstriert, welchen Einfluss unterschiedliche Takte auf den Kapitalwert der jeweiligen Alternative hat. Hier steht das Kürzel x|y|z für die Anzahl der Züge, die pro Stunde auf RB 21 Süd (x), RB 21 Nord (y) und RB 28 (z) eingesetzt werden – aktuell sind es 2|2|.5 – der Takt liegt somit im Mittel zwischen einer halben und einer ganzen Stunde.

Hier bestätigt sich die beispielsweise in → [3] getroffene Feststellung, dass sich ab einem Halbstundentakt die Vollelektrifizierung für den Einsatz von Oberleitungs-Elektrotriebzügen rentiert. Diese Aussage trifft offenbar auch für das ›Netz Düren‹ zu.

↑ Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse zu Gewichten von BEMU und HEMU-Fahrzeugen

Mögliche Einwände könnten auch das Gewicht der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben und deren Beschaffungspreise betreffen. Tatsächlich wird in den Analysen des VDE vereinfachend angenommen, dass die Fahrzeuge alle das gleiche Gewicht haben, obwohl im BEMU zusätzlich eine schwere Batterie und im HEMU große Brennstoffzellen-Stacks und eine Dynamik-Batterie verbaut sind. Die tatsächlichen Gewichte von BEMU und HEMU dürften demnach mindestens 10 Prozent über dem des EMU-Vergleichsmodells liegen, so dass von entsprechend höheren Energiebedarfen auszugehen ist. → Abbildung 50 zeigt, dass das BEMU-Konzept unter ansonsten gleichen Randbedingungen ab einem Mehrgewicht von 13 Prozent den Rang des vorteilhaftigsten Investitionsprojektes an das EMU-Konzept verlieren würde.





↑ Abbildung 51: Sensitivitätsanalyse zu BEMU- und HEMU-Fahrzeugen-Preisen

Die für BEMU und HEMU angenommenen Preise sind Schätzungen, hochgerechnet anhand der bekannten Preise für EMU- und DMU-Fahrzeuge und unter Berücksichtigung der Preise von Batterien pro kWh-Kapazität und Brennstoffzellen pro kW-Leistung. In den VDE Analysen wird angenommen, dass BEMU-Fahrzeuge bei gleicher Größe 45 Prozent und HEMU-Fahrzeuge 60 Prozent teurer sind als EMU-Fahrzeuge. → Abbildung 51 zeigt, dass ab 48 Prozent die BEMU-Lösung trotz Rekuperation gegenüber der EMU-Lösung nachteilig würde.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Falle des ›Netzes Düren‹ BEMU und EMU zwei praktisch gleichwertige Investitionsprojekte darstellen. Eine Entscheidung für die eine oder andere Richtung ist strategisch zu treffen: Soll das ›Netz Düren‹ langfristig vollständig elektrifiziert sein, weil beispielsweise höhere Takte geplant sind? Oder soll zum Schutz der zum Teil sehr reizvollen Landschaft auch langfristig auf Oberleitungen verzichtet werden?

6 Erweiterte Betrachtungen und Fazit

6.1 Kostenhebel

Das aus den Linien RB 21 Nord, RB 21 Süd und RB 28 bestehende ›Netz Düren‹ zählt mit seiner Gesamtstreckenlänge von knapp 90 Kilometern nicht zu den großen Dieselnetzen in Deutschland. Es ist jedoch angesichts seiner bis zum Jahr 2026 auf 1,46 Mio. Zkm anwachsenden Betriebsleistung und laut Rurtalbahn überdurchschnittlich hohen Beförderungsleistung für den VDE ein sehr interessantes Modell. An diesem lassen sich wegen der guten Datenlage die alternativen Optionen eingehend untersuchen und bewerten. Es ist zulässig, die gewonnenen detailreichen Erkenntnisse vorsichtig zu verallgemeinern und auf andere Dieselnetze zu übertragen.

Die Kapitalwertanalyse des VDE für das ›Netz Düren‹ zeigt, dass sich das Konzept Oberleitungs-Elektrotriebzug (EMU) als außerordentlich vorteilhaftes Investitionsprojekt darstellt, selbst wenn dafür eine durchgehende Elektrifizierung erforderlich ist – vorausgesetzt, sie ist mit vertretbarem technischen Aufwand im gegebenen Zeitrahmen durchführbar und wird von den *Betroffenen* akzeptiert. Die Annahme von Oberleitungs-Installationskosten in der Größenordnung von 1 Mio. €/km-OL einschließlich anteiliger Kosten für ein zusätzliches Unterwerk ist nach Aussage des NVR im Falle des ›Netzes Düren‹ realistisch. Unklar ist, wie die Bevölkerung reagiert, wenn beispielsweise die reizvolle und unter Naturschutz stehende Strecke der RB 21 Süd mit Oberleitungen versehen wird.

Findet diese *direkte* Form der Elektrifizierung keine Zustimmung, stellen der Batterietriebzug (BEMU) und der Brennstoffzellentriebzug (HEMU) als klimaneutrale Ausprägungen der *indirekten* Elektrifizierung zwei weitere grundsätzlich vorteilhafte Investitionsalternativen dar. Bei der Bewertung des Grades ihrer Vorteilhaftigkeit mittels Kapitalwertmethode zeigt sich, dass es einige starke Hebel zu beachten gilt, welche den resultierenden Kapitalwert – also den Grad der Vorteilhaftigkeit – maßgeblich beeinflussen. Diese wirken unabhängig davon, ob es sich um Linien des ›Netzes Düren‹ oder anderer Dieselnetze handelt. Im Folgenden sind zu jedem der übergeordneten Punkte (1.–3.) je bis zu drei Hebel genannt, die nach der Stärke ihres Einflusses auf den Kapitalwert sortiert sind. Differenziert nach Bahnlinien- und Infrastrukturbetrieb, lauten sie:

1. ***Technologiespezifische* Kosten bezogen auf Fahrzeugpool und Betrieb der Linien:**
   - **Hebel 1.1** Austausch der verschiedenen Hochtechnologie-Komponenten
   - **Hebel 1.2** Preis und Verbrauch der Energie für die Realisierung der Betriebsleistung
   - **Hebel 1.3** Anschaffung und Ersatz der Flotten-Fahrzeuge
2. ***Technologiespezifische* Kosten bezogen auf Einrichtung und Betrieb der Infrastruktur:**
   - **Hebel 2.1** Installation und Wartung der durchgehenden Oberleitung
   - **Hebel 2.2** Installation und Wartung der Ladeinfrastruktur mit Oberleitung
   - **Hebel 2.3** Einrichtung, Belieferung und Wartung der Tankstellen-Infrastruktur
3. ***Technologieunabhängige* Kosten bezogen auf den Betrieb der Bahnlinien:**
   - **Hebel 3.1** Nutzung der Trassen
   - **Hebel 3.2** Nutzung der Stationen

Zu Hebel 1.1 Austausch der verschiedenen Hochtechnologie-Komponenten:

Batterien und Brennstoffzellen für den Einsatz in Fahrzeugen basieren auf Hochtechnologien, die ständig weiterentwickelt werden.

Bei der Wahl der Batterie stehen die Fahrzeughersteller vor der Herausforderung, sich frühzeitig für eine Zelltechnologie zu entscheiden, die zu ihrer Anwendung passt – wie in der VDE Studie von 2018 → [1] erläutert wird. Entweder setzen sie wie die Automobilindustrie auf die NMC/C-Technologie, die den Vorteil steigender Energiedichten bei fallenden Zellpreisen bietet. Oder sie wählen die NMC/LTO-Technologie, die vordergründig den Nachteil geringerer (gravimetrischer) Energiedichten und höherer Zellpreise hat. Sie ist jedoch äußerst robust und eignet sich

insbesondere für Anwendungen in Triebzügen mit langen Lebensdauern, denn die Batterie ist trotz hoher Belastung besonders langlebig und muss im Idealfall über die Fahrzeuglebensdauer nur einmal ausgetauscht werden. Die wegen der Batterie deutlich höheren Fahrzeug-Anschaffungskosten sind mit Blick auf deren relativ geringe Hebelwirkung, H.1.3, als unkritisch anzusehen.

Brennstoffzellen erfordern im Gegensatz zu Batterien regelmäßige Wartung, bei der einzelne defekte Stacks ausgetauscht werden. Ihre Herstellung setzt so viel Erfahrung voraus, dass es nur wenige Unternehmen wie Ballard oder Hydrogenics schaffen, diese Technologie zu beherrschen und weiterzuentwickeln. Über die tatsächliche Lebensdauer von Brennstoffzellen in Triebzügen ist heute noch wenig bekannt. In HEMU-Anwendungen sorgt die Brennstoffzelle für eine Reichweite, die weit über der von BEMUs liegt. Zusätzlich wird eine Batterie benötigt, die beim Anfahren und Beschleunigen für die notwendige Fahrdynamik sorgt. Beim Bremsen soll sie zudem eine hinreichende Menge an rekuperiertem Strom aufnehmen, um in Beschleunigungsphasen Wasserstoff zu sparen. Eine Kapazität von über 200 kWh scheint heute üblich zu sein. Somit bestimmen beim HEMU-Konzept gleich zwei teure Technologiekomponenten die Tauschkosten. Um diese langfristig zu senken, muss der Preis der Brennstoffzelle pro Kilowatt Leistung fallen und zugleich deren Einsatzdauer steigen. Nur so wird sich der Kapitalwert und damit die relative Vorteilhaftigkeit der Investition in das HEMU-Konzept in einem Umfang verbessern, dass es langfristig mit dem BEMU-Konzept gleichziehen kann.

Zu Hebel 1.2: Preis und Verbrauch der Energie für die Realisierung der Betriebsleistung

Die Energiekosten sind ein weiterer zentraler Hebel, der den Grad der relativen Vorteilhaftigkeit des betrachteten Investitionsprojektes mitbestimmt. Neben dem Energiepreis, der über die Jahre veränderlich sein wird, ist die Energieeffizienz, die Nutzung rekuperierter Bremsenergie und vor allem die intelligente Verknüpfung technologiebedingter Wirkungsgrade entscheidend. Technologische Verbesserungen in den nächsten Jahren können die Einschätzung der Vorteilhaftigkeit des HEMU- und auch des BEMU-Konzeptes signifikant verschieben.

Zu Hebel 1.3: Anschaffung und Ersatz der Flotten-Fahrzeuge

Fahrzeuge werden durch den Einbau von Hochtechnologie-Komponenten in jedem Fall teurer. Interessanterweise ist der Einfluss der deutlich höheren Fahrzeugbeschaffungskosten im Vergleich zu den anderen Kostenpositionen deutlich weniger kritisch, weil sie über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nur einmal anfallen und sich dadurch relativieren.

Zu Hebel 2.1: Installation und Wartung der durchgehenden Oberleitung

Die Elektrifizierung ist eine sehr teure Investition. Allerdings haben Oberleitungen eine sehr lange Nutzungsdauer. Damit relativiert sich ihr Einfluss auf den Kapitalwert der Investition. Einen etwas schwierig einzuschätzenden Kostenanteil stellt das unter bestimmten Voraussetzungen zusätzlich erforderliche Unterwerk dar, dessen Einrichtung weitere Millionen von Euro kosten kann. Besondere Hebelwirkung ist dann zu erwarten, wenn sich die Installationskosten pro Kilometer Oberleitung beispielsweise durch Vereinfachung senken und zudem zusätzliche Unterwerke vermeiden lassen. Eine wichtige Voraussetzung für die Entscheidung zugunsten der Elektrifizierung einer Strecke ist, dass das vorgeschriebene Planfeststellungsverfahren in dem gegebenen Zeitrahmen und mit dem vorhandenen Personal des Entscheiders durchführbar ist.

Zu Hebel 2.2: Installation und Wartung der Ladeinfrastruktur mit Oberleitung

Die Installation von Elektrifizierungsinseln als Teil der Ladeinfrastruktur für Batterietriebzüge ist gleichfalls eine teure Investition, deren Kosten allerdings weit unter der einer durchgehenden Elektrifizierung liegen. Ihre Hebelwirkung lässt sich durch Vereinfachung ihrer technischen Realisierung und durch Vermeidung zusätzlicher Unterwerke unterstützen. Das auch hier gegebenenfalls anzuwendende Planfeststellungsverfahren fällt weniger aufwändig aus.

Zu Hebel 2.3: Einrichtung, Belieferung und Wartung der Tankstellen-Infrastruktur

Auch wenn die Lage von Diesel- oder Wasserstoff-Tankstellen und deren Belieferung mit Kraftstoff für den effizienten Betriebsablaufs äußerst wichtig sind, beeinflussen ihre Kosten die Höhe des resultierenden Kapitalwertes nur geringfügig. Somit beeinträchtigt die Notwendigkeit einer Tankinfrastruktur die Vorteilhaftigkeit der Investition in ein HEMU-Projekt nur unwesentlich.

Zu Hebel 3.1: Nutzung der Trassen

Die Trassengebühr pro Kilometer beträgt im privaten ›Netz Düren‹ aktuell 4,48 €/km. Im SPNV-Netz der DB liegt die Gebühr laut TPS 2020 → [30] im Mittel bei 5,38 €/km. Damit summieren sich die Trassenkosten als Produkt der gefahrenen Zugkilometer mit dieser Gebühr zu einem Wert auf, der größer ist als die resultierenden Austausch-, Energie- und Instandhaltungskosten zusammen. Somit läge es nahe, eine alternative Antriebstechnologie dadurch zu fördern, dass die Trassengebühr gezielt um einen moderaten Prozentsatz gesenkt wird.

Zu Hebel 3.2: Nutzung der Stationen

Die pro angefahrenem Haltepunkt und Bahnhof fälligen Stationsgebühren machen einen weiteren signifikanten Anteil der Gesamtkosten aus. Auch hier wäre es denkbar, über eine geringfügige Senkung der Gebühr eine bestimmte Antriebstechnologie gezielt zu fördern.

6.2 Fazit

Mit Blick auf die beschriebenen Hebel der Kapitalwertanalyse → Abschnitt 6.1 ist es möglich, allgemein gültige Aussagen zu formulieren, die einer Bewertung der Alternativen für Dieselnetze über das ›Netz Düren‹ hinaus zugrunde gelegt werden können. Dieselnetze unterscheiden sich letztlich in ihren individuellen Streckenlängen, Flottengrößen, Betriebs- und Beförderungsleistungen, Takten, Graden der Elektrifizierung, möglichen Hindernissen wie Streckenkreuzungen, Tunnel, Brücken, Bahnübergänge, Steigungen, Kurven oder klimatischen Bedingungen wie extreme Witterung oder Kälte.

Streckenlänge und Elektrifizierungsgrad beeinflussen die Kosten der Einrichtung und des Betriebes der Infrastruktur, betreffen also die beschriebenen Hebel 2.1 (Installation und Wartung der durchgehenden Oberleitung) und 2.2 (Installation und Wartung der Ladeinfrastruktur mit Oberleitung). Je länger die oberleitungsfreien Strecken sind, umso dominanter wird der Einfluss dieser Hebel auf den resultierenden Kapitalwert, das heißt, um so nachteiliger werden die Konzepte EMU und BEMU. Dieser negative Einfluss ist umso gravierender, je größer die technischen Schwierigkeiten sind, die bei der Elektrifizierung oder Einrichtung einer Oberleitungsinsel zu überwinden sind. Entsprechend werden sich die Scheren zwischen EMU, BEMU und HEMU zugunsten BEMU und vor allem HEMU öffnen. Im Falle von Strecken mit besonderem Energiebedarf, beispielsweise wegen zu überwindender Steigungen oder extremer Klimabedingungen, eignet sich das BEMU-Konzept weit weniger als EMU oder HEMU, da diese über vergleichsweise unbegrenzte Energiereserven verfügen.

Alle weiteren vergleichenden und bewertenden Aussagen lassen sich im Prinzip anhand der über das ›Netz Düren‹ gewonnenen Erkenntnisse ableiten und auf andere Netze übertragen. Der VDE ist dazu in der Lage und bietet diese Dienstleistung zukünftig gern auch anderen Aufgabenträgern, Eisenbahnverkehrs- oder -infrastrukturunternehmen an.

7 Anhang

Anhang 7.1 Aufgabenträger in Deutschland

Kürzel	Aufgabenträger	Bundesland / Sitz
VRN	Verkehrsverbund Rhein-Neckar GmbH	BW / Mannheim
NVBW	Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg mbH	BW / Stuttgart
VRS	Verband Region Stuttgart	BW / Stuttgart
BEG	Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH	BY / München
VBB	Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg GmbH	BE-BB / Berlin
HB	Senator für Umwelt, Bau und Verkehr des Landes Bremen	HB / Bremen
HVV	Hamburger Verkehrsverbund GmbH	HH / Hamburg
RMV	Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH	HE / Hofheim a.T.
NVV	Nordhessischer Verkehrsverbund GmbH	HE / Kassel
VMV	Verkehrsgesellschaft Mecklenburg-Vorpommern mbH	MV / Schwerin
LNVG	Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH	NI / Hannover
RH	Region Hannover	NI / Hannover
RVB	Regionalverband Großraum Braunschweig	NI / Braunschweig
VRR	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr AöR	NW / Gelsenkirchen
ZV NVR	Zweckverband Nahverkehr Rheinland GmbH	NW / Köln
NWL	Nahverkehr Westfalen-Lippe	NW / Unna
SPNV-Süd	Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Süd	RP / Kaiserslautern
SPNV-Nord	Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Nord	RP / Koblenz
SL	MS für Wirtschaft, Arbeit, Energie, Verkehr des Saarlandes	SL / Saarbrücken
ZVV	Zweckverband ÖPNV-Vogtland	SN / Auerbach
ZVON	ZV Verkehrsverbund Oberlausitz-Niederschlesien	SN / Bautzen
ZVMS	Zweckverband Verkehrsverbund Mittelsachsen	SN / Chemnitz
VVO	Verkehrsverbund Oberelbe GmbH	SN / Dresden
ZVNL	Zweckverband für den Nahverkehrsraum Leipzig	SN / Leipzig
NASA	Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH	ST / Magdeburg
NAH.SH	Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein GmbH	SH / Kiel
NVS	Nahverkehrsservicegesellschaft Thüringen mbH	TH / Erfurt

↑ Tabelle 12: Für den SPNV in Deutschland zuständige Aufgabenträger

Kürzel	Bundesland
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
BE-BB	Berlin-Brandenburg
HB	Hansestadt Bremen
HH	Hansestadt Hamburg
MV	Mecklenburg-Vorpommern
NI	Niedersachsen

Kürzel	Bundesland
NW	Nordrhein-Westfalen
RP	Rheinland-Pfalz
SL	Saarland
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
SH	Schleswig-Holstein
TH	Thüringen

↑ Tabelle 13: Verwendete Kürzel für die Namen der Bundesländer

Anhang 7.2 Dieselnetze in Deutschland

Bezeichnung Netz	Streckenabschnitt
Netz 11 Hohenlohe – Franken-Untermain	Würzburg – Lauda Aschaffenburg – Miltenberg – Wertheim Wertheim – Lauda – Crailsheim Crailsheim – Schwäbisch Hall – Hessental – Heilbronn Miltenberg – Walldürn – Seckach, Seckach – Osterburken
Netz 12 Ulmer Stern	Aalen – Ulm Munderkringen – Ehringen – Ulm
Zollern-Alb-Bahn	Tübingen – Albstadt-Ebingen – Sigmaringen Hechingen – Gammertingen – Sigmaringen
Nordschwarzwald	Pforzheim – Nagold – Horb Tübingen – Horb Pforzheim – Maulbronn Stadt
Netz 8 Ortenau	Offenburg – Freudenstadt/Hornberg Offenburg – Bad Griesbach Offenburg – Achern Achern – Ottenhöfen Biberach (Baden) – Oberharmersbach-Riersbach
Ringzug Schwarzwald – Baar – Heuberg	Schwarzwald–Baar–Heuberg
Augsburger Netze – Los 2	Langenneufach – Augsburg – Weilheim – Schongau – Augsburg – Eichstätt Stadt
Expressverkehr Nordostbayern	Nürnberg – Bayreuth/Hof Nürnberg – Weiden – Neustadt/Furth im Wald/Regensburg Schwandorf – Marktredwitz Coburg/Bamberg – Hof/Bayreuth
Regionalverkehr Oberfranken	Hof – Bad Steben Hof Mitte – Hof – Selb–Stadt mit Flügel Selb-Plößberg – Asch – Cheb – Marktredwitz Bamberg – Ebern Forchheim – Ebermannstadt Coburg – Bad Rodach Coburg – Lichtenfels – Bayreuth Bayreuth – Weiden Bayreuth – Marktredwitz Marktredwitz – Hof – Gutenfürst Hof – Münchberg
Regionalverkehr Ostbayern	Plattling – Bayrisch Eisenstein (– Klatovy) Zwiesel – Grafenau Zwiesel – Bodenmais Schwandorf – Furth i. Wald (– Domazlice) Cham – Waldmünchen Cham – Bad Kötztin – Lam Regensburg – Marktredwitz Marktredwitz – Schirnding (– Cheb)
Linienstern Mühldorf 2025+	Mühldorf (Obb.) – Simbach Mühldorf (Obb.) – Passau/Landshut/München Mühldorf (Obb.) – Burghausen Mühldorf (Obb.) – Salzburg Mühldorf (Obb.) – Rosenheim Mühldorf (Obb.) – Traunstein Traunstein – Traunreut München – Wasserburg Traunstein – Waging Prien – Aschau Neufahrn – Bogen

→

↑ Tabelle 14: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 1 – Quelle [13]

Bezeichnung Netz	Streckenabschnitt
Romantische Schiene	Dombühl – Dinkelsbühl – Wilburgstetten
Franken-Südhessen	Frankfurt – Würzburg – Bamberg Würzburg – Fulda/Lauda/Marktbreit/Nürnberg
Allgäu-Schwaben	Augsburg – Kempten (Allg) – Immenstadt – Oberstdorf/Lindau Augsburg – Memmingen – Bad Wörishofen Kempten (Allg) – Pfronten-Steinach Ulm – Kempten (Allg)
IR25 Interimvertrag	München – Furth – Prag München – Hof
Expressverkehr Ostbayern Übergang – Los 1	RE 2: (München –) Regensburg – Hof
Expressverkehr Ostbayern	München – Hof München – Furth im Wald – Praha
Netz Ostbrandenburg 2	RB 12: Berlin Ostkreuz – Templin RB 26: Berlin Ostkreuz – Werneuchen RB 26: Berlin Ostkreuz – Grenze DE/PL RB 35: Fürstenwalde – Bad Saarow RB 36: Frankfurt (O.) – König-Wusterhausen RB 54: (Berlin-Gesundbrunnen/Lichtenberg –)Rheinsberg RB 60: Eberswalde – Frankfurt (O.) RB 61: Schwedt – Angermund RB 62: Angermund – Prenzlau RB 63: Eberswalde – Templin
Netz Nordwestbrandenburg	Berlin – Neuruppin – Wittenberge
Netz Spree-Neiße	Cottbus – Forst (Lausitz) Cottbus – Görlitz – Zittau
Heidekrautbahn	Berlin Gesundbrunnen Berlin-Karow – Groß Schönebeck Schmachtenhagen
Netz Prignitz	RB 74: Pritzwalk – Meyenburg RB 73: Neustadt (Dosse) – Pritzwalk
Wetterau West – Ost	RB 46: Gießen – Gelnhausen RB 47: Friedberg – Wölfersheim-Södel – Hungen/Lich RB 48: Nidda – Friedberg (– Frankfurt) Lumbdatalbahn: Gießen – Lollar – Londorf
Ländchesbahn	RB 21: Limburg – Wiesbaden
Lahntal – Vogelsberg – Rhön	RB 45: Limburg – Fulda RB 52: Gersfeld – Fulda
Odenwald	RB 66: Darmstadt – Pfungstadt RE 80: Erbach – Darmstadt RB 81: Eberbach – Darmstadt RB 82: Eberbach – Frankfurt RE 85: Erbach – Frankfurt RB 86: Groß-Umstadt Wiebelsbach – Hanau RB 61: Dieburg – Frankfurt [Einzelf.]
Niddertal	RB 34: Glauburg-Stockheim – Frankfurt RB 48: Nidda – Frankfurt [Einzelf.]
Dreieich	RB 61: Dieburg – Frankfurt

→

↑ Tabelle 15: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 2 – Quelle [13]

Bezeichnung Netz	Streckenabschnitt
Taunus	RB 11: Bad Soden – Frankfurt.Höchst; RB 11: Kelkheim – Frankfurt.Höchst (Einzelf.) RB 12: Königstein – Frankfurt RB 15: Brandoberndorf – Frankfurt RB 16: Bad Homburg – Friedberg
RT-Netz	RT1: Hofgeismar-Hümme – Kassel Hbf – Holländische Str. RT4: Wolfhagen – Zierenberg – Kassel Hbf – Holländische Str. RT5: Melsungen – Kassel-Wilhelmshöhe – Kassel Hbf – Auestadion
Dieselnetz Niedersachsen – Mitte	Bünde/Herford – Löhne – Hameln – Hildesheim – Bodenburg Buchholz/N. – Hannover Bremen – Soltau – Uelzen
Weser-Ems	Osnabrück – Oldenburg – Wilhelmshaven Esens – Sande – Wilhelmshaven Osnabrück – Vechta – Delmenhorst – Bremen
DINSO I	Braunschweig – Schöppenstedt Northeim – Herzberg – Nordhausen Braunschweig – Salzgitter – Lebenstedt Braunschweig – Seesen – Herzberg Göttingen – Kreiensen – Bad Harzburg Bodenfelde – Northeim Einbeck-Mitte – Einbeck Salzderhelden – Göttingen
DINSO II	Braunschweig – Gifhorn – Uelzen Hannover – Goslar – Bad Harzburg Braunschweig – Vienenburg – Goslar / Bad Harzburg
RE 5 Cuxhaven – Hamburg	Hamburg – Cuxhaven
Weser – Elbe	Cuxhaven – Bremerhaven Bremerhaven – Buxtehude
die euregiobahn (RB 20)	Stolberg Hbf – Alsdorf – Herzogenrath – Aachen Stolberg Hbf – Eschweiler-Weisweiler – Langerwehe/Düren
Nordast Rurtalbahn	RB 21 Nord: Düren – Jülich – Linnich (– Baal)
Südast Rurtalbahn	RB 21 Süd: Düren – Untermaubach – Heimbach
Eifel-Bördebahn	RB 28: Düren – Zülpich – Euskirchen
Kölner Dieselnetz	RE 12/22 Köln – Gerolstein – Trier RB 23 Bonn – Euskirchen – Bad Münstereifel RB 24 Köln – Kall (– Gerolstein) RB 25 Köln – Marienheide – Lüdenscheid RB 30 Bonn – Remagen – Ahrbrück
Netz OWL	RE 82: Bielefeld – Detmold RB 67: Bielefeld – Warendorf – Münster RB 71: Bielefeld – Rahden RB 73: Bielefeld – Lemgo-Lüttfeld RB 74: Bielefeld – Paderborn RB 75: Bielefeld – Halle – Osnabrück RB 84: Paderborn – Kreiensen RB 85: Ottbergen – Göttingen
Netz westliches Münsterland	RB 51: Dortmund – Enschede RB 63: Münster-Zentrum Nord – Coesfeld RB 64: Münster – Enschede – Zwolle
Sauerlandnetz	RE 17: Hagen – Warburg – Kassel RE 57: Dortmund – Winterberg/Brilon Stadt RB 52: Dortmund – Lüdenscheid RB 53: Dortmund – Iserlohn RB RB 54: Unna – Neuenrade

→

↑ Tabelle 16: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 3 – Quelle [13]

Bezeichnung Netz	Streckenabschnitt
Emscher–Münsterland–Netz 2021	RE 14: Essen-Steele–Borken/Coesfeld
Niederhein–Münsterland–Netz	RE 10: Kleve–Krefeld–Düsseldorf RE 14: Essen-Steele–Borken/Coesfeld RE 44: Kamp-Lintfort–Duisburg–Bottrop RB 31: Xanten–Moers–Duisburg RB 36: Oberhausen–DU-Ruhrort RB 41: Geldern–Krefeld–Neuss RB 43: Dortmund–Wanne.Eickel–Dorsten (optional)
S7	S7: Wuppertal–Solingen
Hunsrückbahn (Steilstrecke)	Boppard–Emmelshausen
Moselweinbahn	Bullay–Traben-Trarbach
Daadetalbahn	Betzdorf–Daaden
Eifel–Westerwald–Sieg–Netz	(1) Gießen–Limburg–Koblenz (2) Limburg–Koblenz–Andernach–Mayen (3) Zollhaus–Diez–Limburg (4) Andernach–Mayen–Kaisersesch (5) Limburg–Altenkirchen–Au–Betzdorf–Siegen–Kreuztal (6) Betzdorf–Siegen–Erndtebrück–Bad Berleburg (7) Limburg–Montabaur–Siershahn (8) Finnentrop–Olpe (9) Dillenburg–Slegen (10) Betzdorf–Herdorf–Haiger–Dillenburg
Pfalznetz Los 2	Kaiserlautern–Bad Kreuznach–Bingen Hinterwiedenthal–Bundenthal Kaiserlautern–Münchweiler–Landmeil–Monsheim
Südwest–Grand Est	Neustadt–Landau–Wissembourg–Straßbourg Mannheim/Karlsruhe–Wörth–Lauterbourg–Straßbourg Straßbourg–Kehl–Offenburg, Mulhouse–Mühlheim Metz–Forbach–Saarbrücken Straßbourg–Saargemünd–Saarbrücken Metz–Thionville–Trier
Pfalznetz Los 1	Kaiserslautern–Lauterecken Kaiserslautern–Kusel Kaiserslautern–Pirmasens Saarbrücken–Pirmasens Landau–Pirmasens Neustadt–Landau–Karlsruhe Winden–Bad Bergzabern Neustadt–Wissembourg Wörth–Lauterbourg Dillingen–Niedaltdorf Münchweiler–Monsheim (SP Ausflugsverkehr) Hinterweidenthal–Ost-Bundenthal (SP Ausflugsverkehr)
VVO-Dieselnetz	Dresden–Kamenz, Dresden–Königsbrück Heidenau–Altenberg Pirna–Sebnitz
Freiberg-Holzhau	Freiberg (Sachs)–Holzhau
Chemnitzer-Modell-Netz	C 1: Oelsnitz (Ezgeb.)-Stollberg-Chemnitz-Limbach-Oberfrohna C 2: Chemnitz–Burgstädt C 3: Chemnitz - Mittweida C 4: Chemnitz - Hainichen
SPNV-Netz Erzgebirge	(R 80 bzw. CM 5) Chemnitz–Annaberg-Buchholz–Cranzahl (R 81 bzw. CM 6) Chemnitz–Olbernhau (R 95) Zwickau–Aue–Johanngeorgenstadt

→

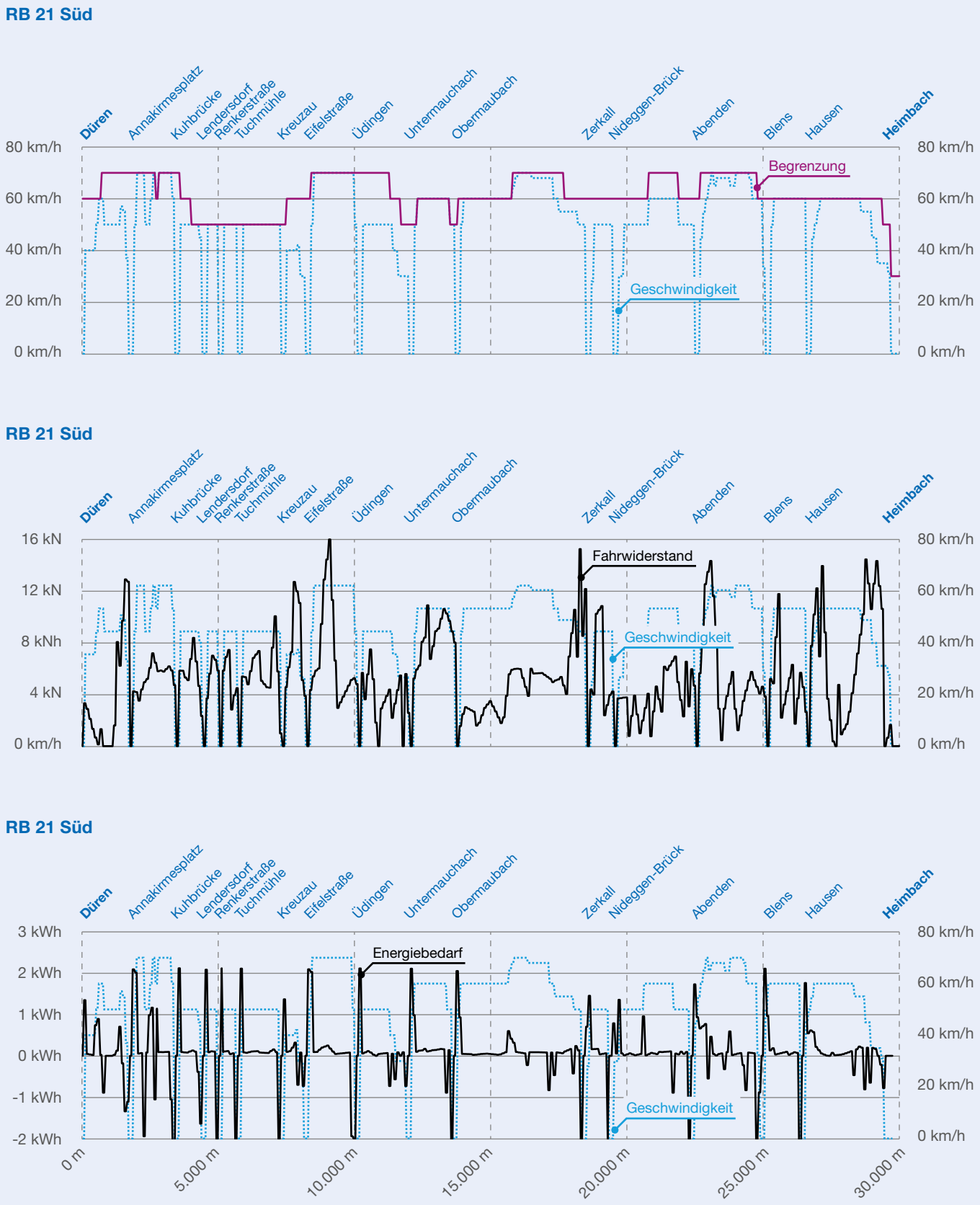
↑ Tabelle 17: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 4 – Quelle [13]

Bezeichnung Netz	Streckenabschnitt
DNWS	RB 110: Leipzig – Döbeln RB 113: Leipzig – Geithain
Elster-Geiseltal	RB 76: Weißenfels – Zeitz RB 78: Merseburg – Querfurt
Dieselnetz Sachsen-Anhalt	RE 4: Halle (Saale) – Halberstadt – Goslar RE 10: Magdeburg – Sangerhausen – Erfurt RE 11: Magdeburg – Halbertsadt – Thale RE 21: Magdeburg – Halberstadt – Goslar RE 31: Magdeburg – Halberstadt – Blankenburg RE 24: Halle (Saale) – Halberstadt RB 35: Wolfsburg – Stendal RB 36/RE 6: Wolfsburg – Magdeburg RB 41: Magdeburg – Aschersleben RB 43: Magdeburg – Oschersleben RB 44: Aschersleben – Halberstadt RB 47: Halle (Saale) – Bernburg RB 48: Magdeburg – Bernburg RB 50: Aschersleben – Dessau RB 77: Naumburg – Wangen RB 78: Merseburg – Querfurt
Netz West	Hamburg – Westerland (Sylt) Niebüll – Dagebüll
Netz Süd	Neumünster – Hamburg-Eidelstedt Ulzburg Süd – Norderstedt Mitte Elmshorn – Ulzburg Süd
XMU Ost	Lübeck Hbf – Kiel Hbf Lübeck Hbf – Lüneburg Kiel Hbf – Schönberger Strand
XMU Nord	Neumünster – Heide – Büsum Kiel Hbf – Husum Husum – Bad St. Peter-Ording Neumünster – Bad Oldesloe Kiel Hbf – Flensburg
XMU Nord/Ost	Lübeck Hbf – Kiel Hbf Lübeck Hbf – Lüneburg Kiel Hbf – Schönberger Strand Neumünster – Heide – Büsum Kiel Hbf – Husum Husum – Bad St. Peter-Ording Neumünster – Bad Oldesloe Kiel Hbf – Flensburg
NeiTec – Netz – Thüringen	Göttingen – Leinefelde – Erfurt – Jena – Gera – Glauchau Erfurt – Jena – Gera – Altenburg/Greiz Erfurt – Grimmenthal – Würzburg – Bad Kissingen
Ebx 13 Zeulenroda – Hof	Zeulenroda – Hof
Dieselnetz Ostthüringen	Leipzig – Gera – Saalfeld Gera – Greiz – Weischlitz Gera – Zeulenroda – Hof Saafeld – Hockeroda – Bad Lobenstein – Blankenstein Erfurt – Weimar – Jena – Gera Jena Saalbf – Orlamünde – Pößneck unt Bf (Apolda –) Weimar – Kranichfeld optional: Zeitz – Weißenfels
OBS	Rottenbach – Katzhütte Obstfelderschmiede – Lichtenhain – Cursdorf

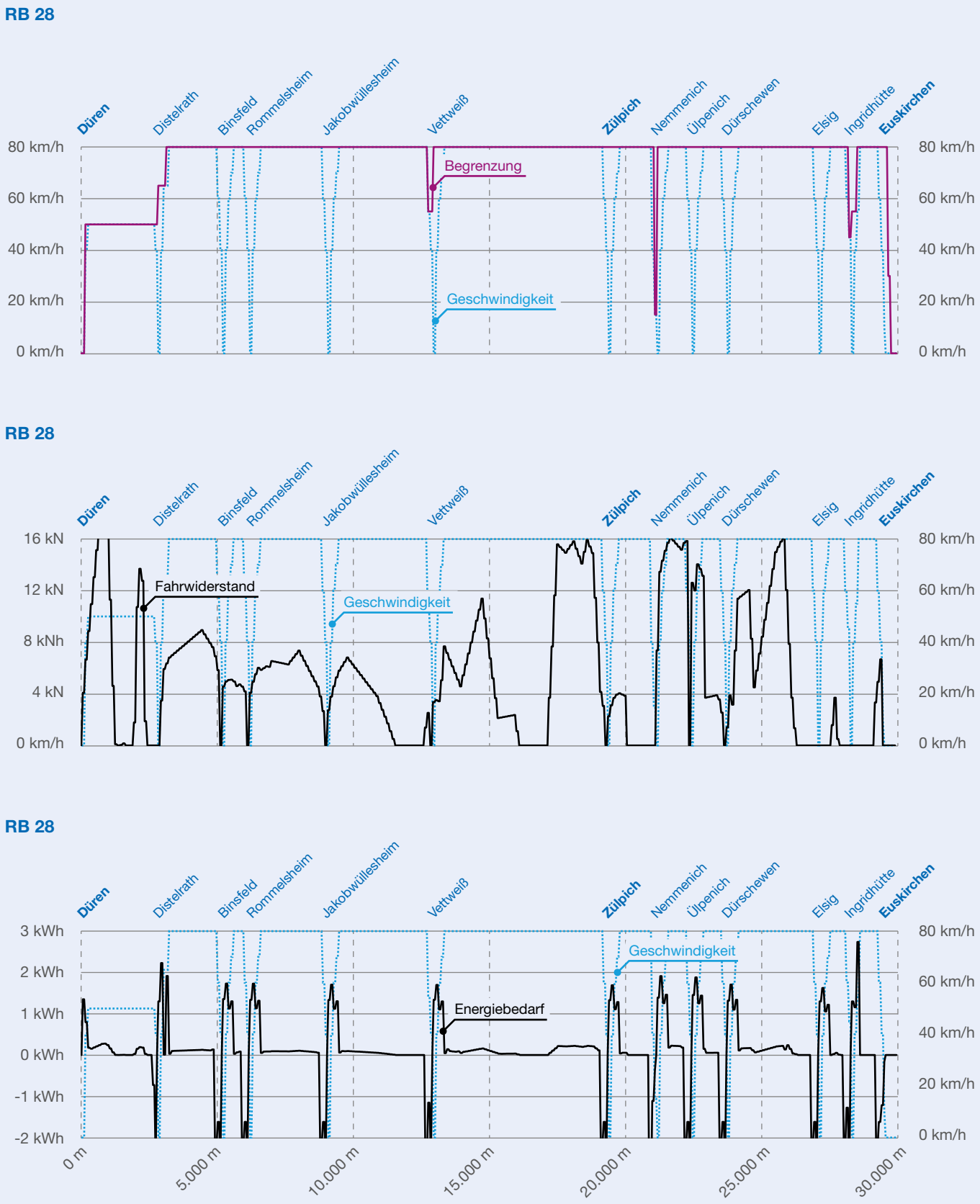
↑ Tabelle 18: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 5 – Quelle [13]

Anhang 7.3 Darstellung aller Simulationsergebnisse

↑ Abbildung 52: RB 21 Nord –
Strecke, Geschwindigkeit, Fahrwiderstand, Energiebedarf (2026+)

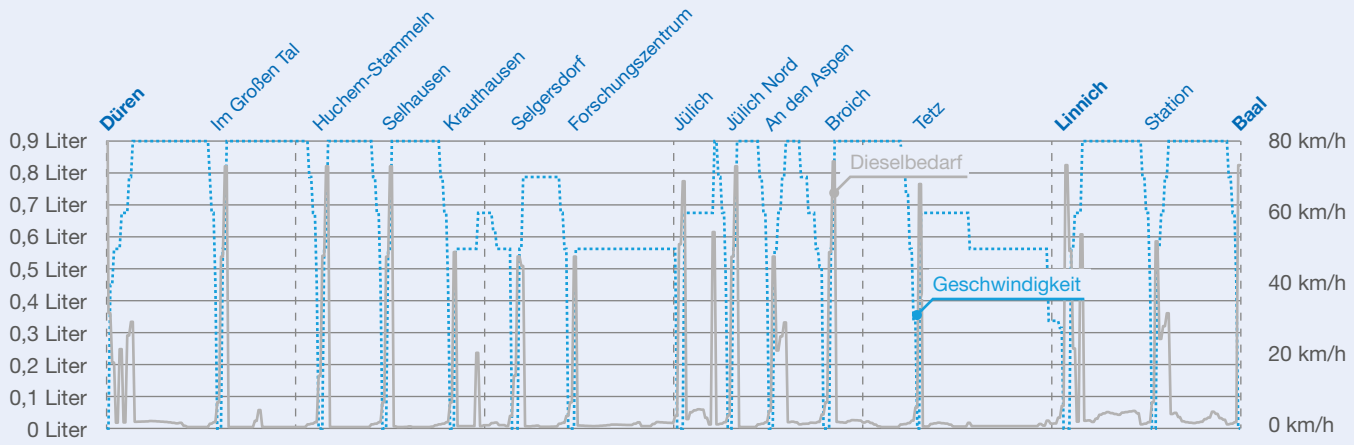


↑ Abbildung 53: RB 21 Süd –
Strecke, Geschwindigkeit, Fahrwiderstand, Energiebedarf (2026+)

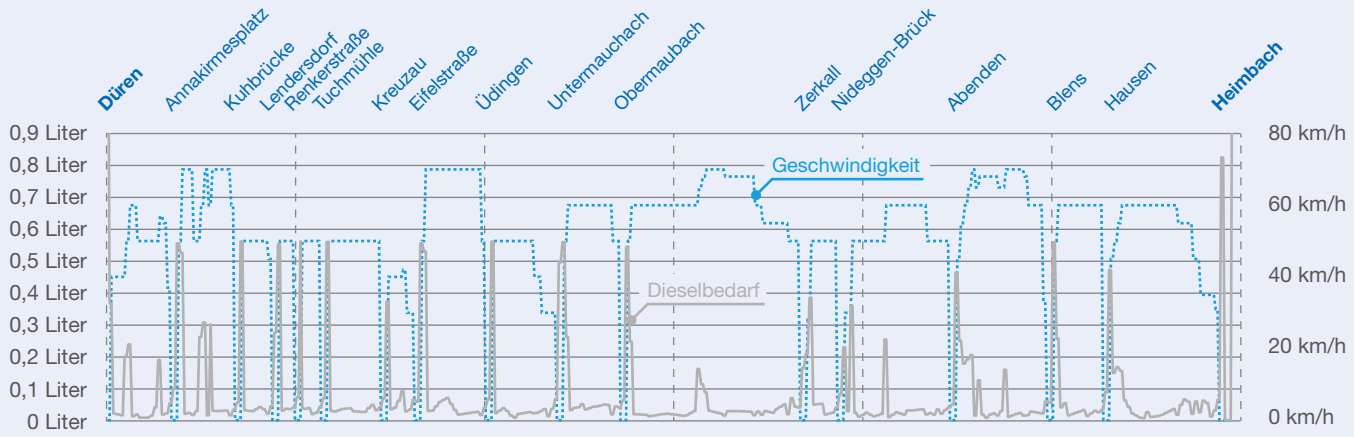


↑ Abbildung 54: RB 28 –
Strecke, Geschwindigkeit, Fahrwiderstand, Energiebedarf (2026+)

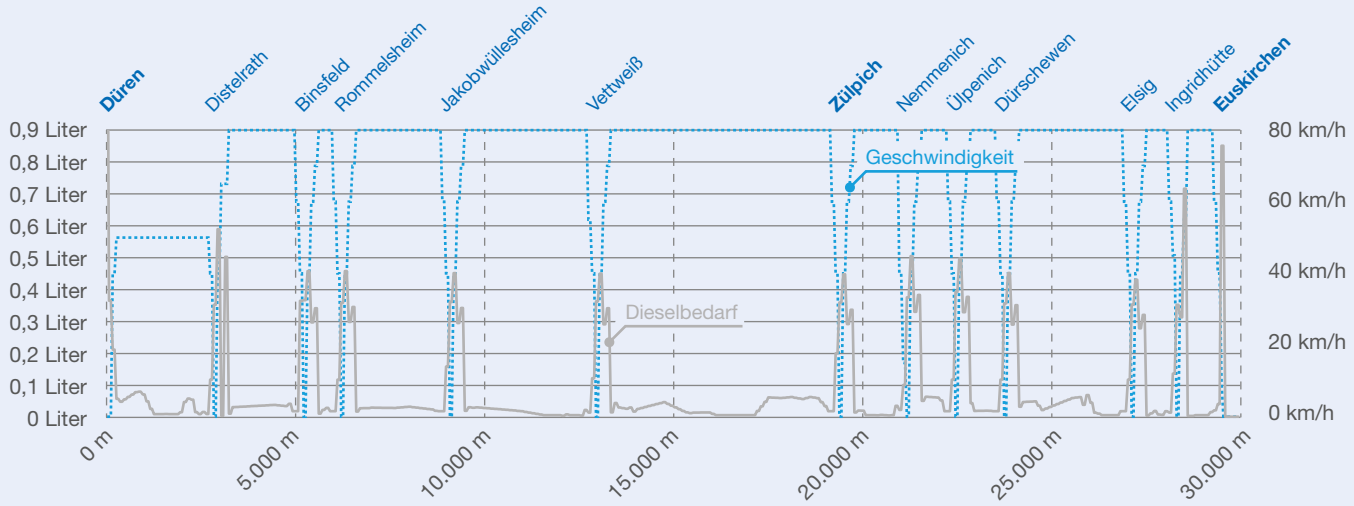
RB 21 Nord Diesel-Bedarf Ø 1,68 Liter/km



RB 21 Süd Diesel-Bedarf Ø 1,59 Liter/km

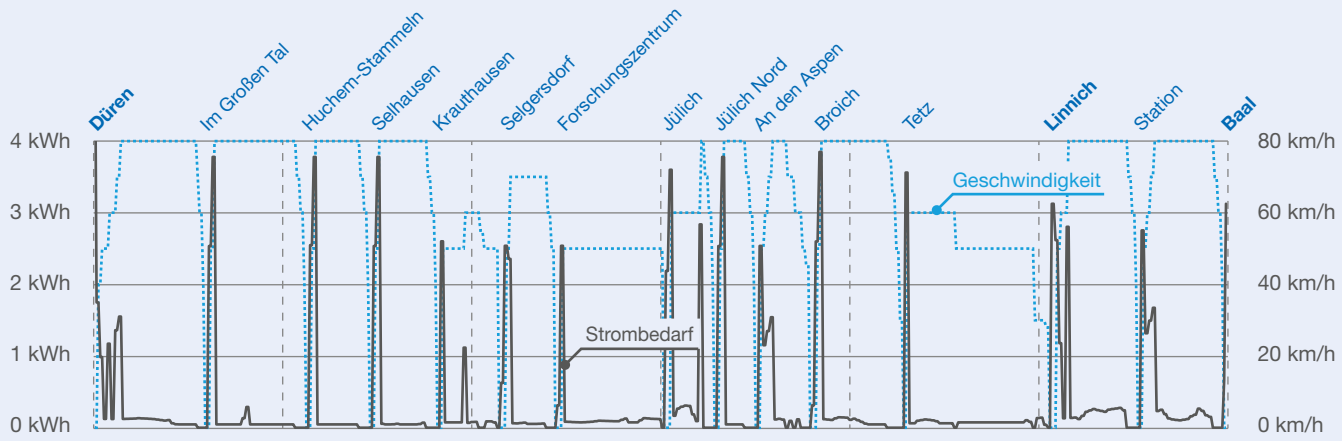


RB 28 Diesel-Bedarf Ø 1,74 Liter/km

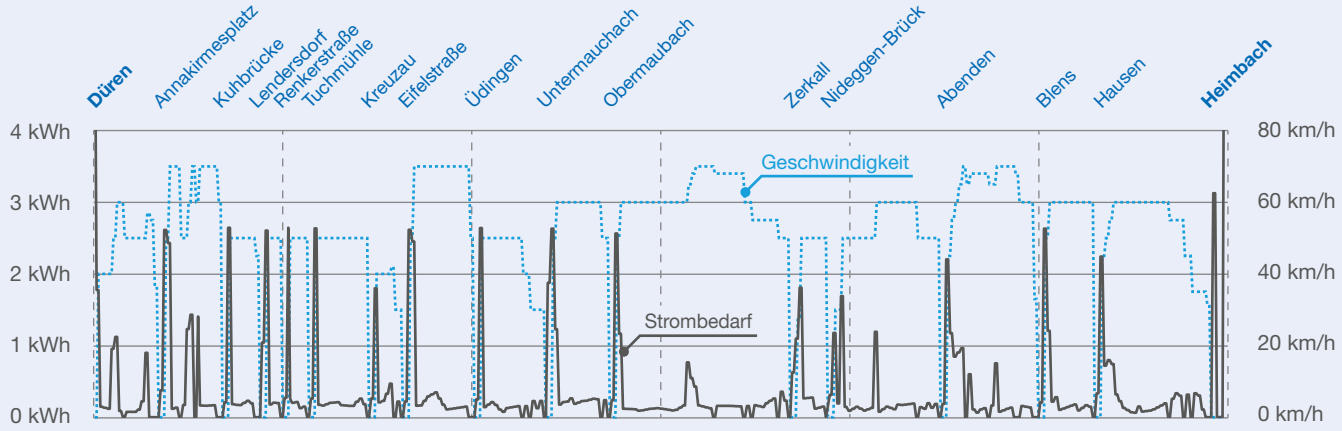


↑ Abbildung 55: DMU – Diesel-Bedarf im ›Netz Düren‹ (2026+)

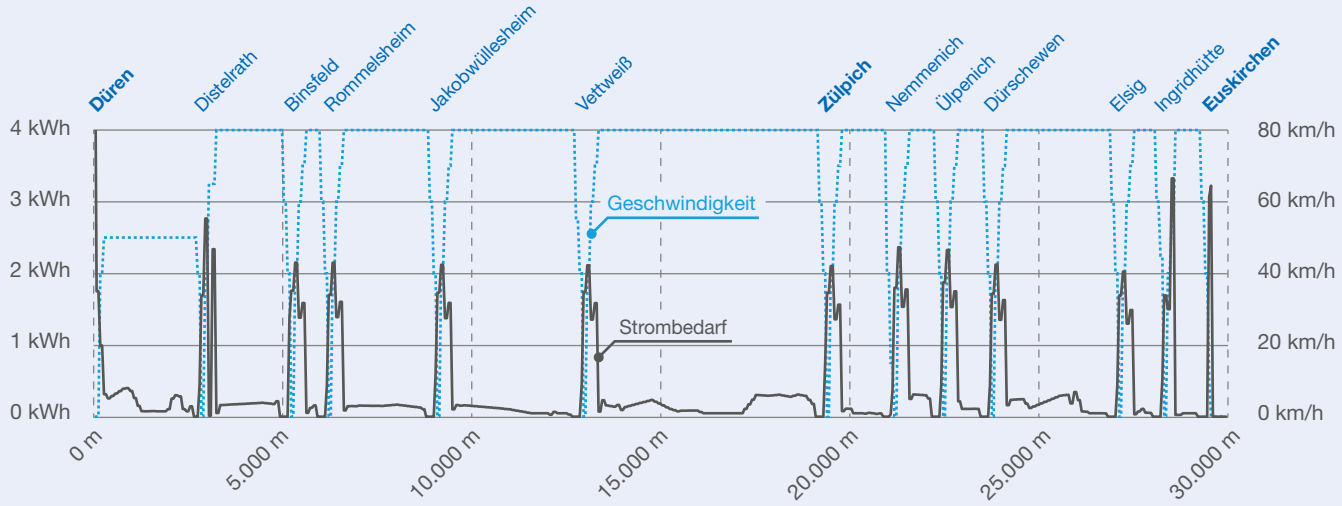
RB 21 Nord Strom-Bedarf Ø 7,48 kWh/km ohne Rekuperation



RB 21 Süd Strom-Bedarf Ø 7,36 kWh/km ohne Rekuperation

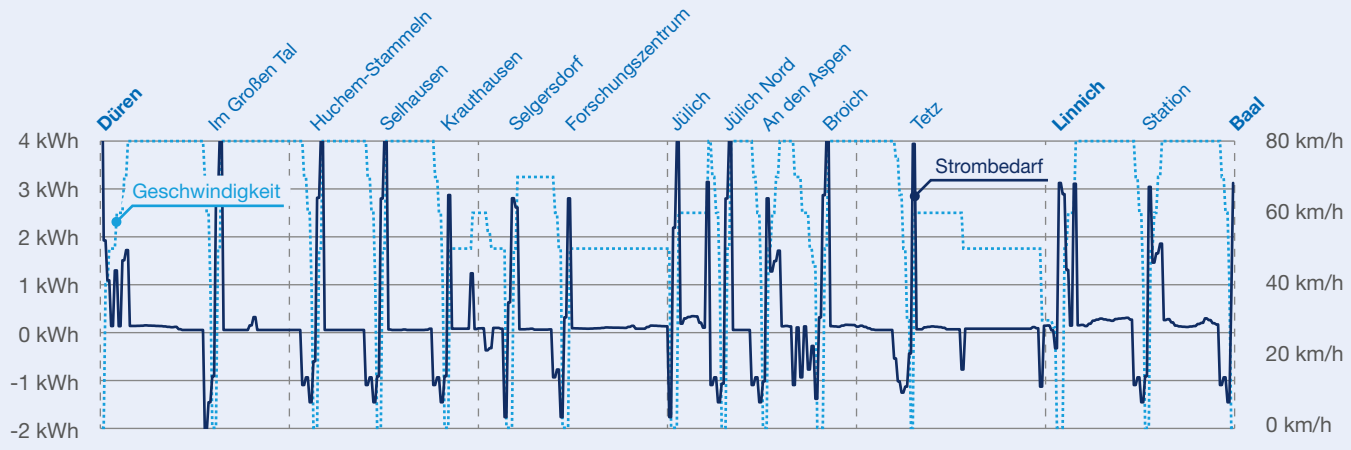


RB 28 Strom-Bedarf Ø 7,96 kWh/km ohne Rekuperation

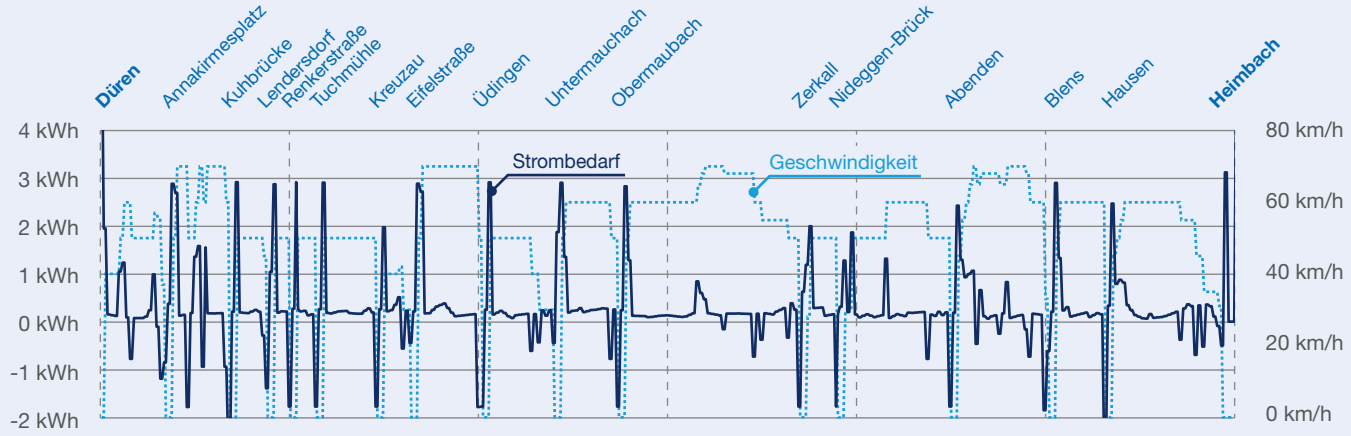


↑ Abbildung 56: EMU – Strom-Bedarf im ›Netz Düren‹ ohne Rekuperation in OL (2026+)

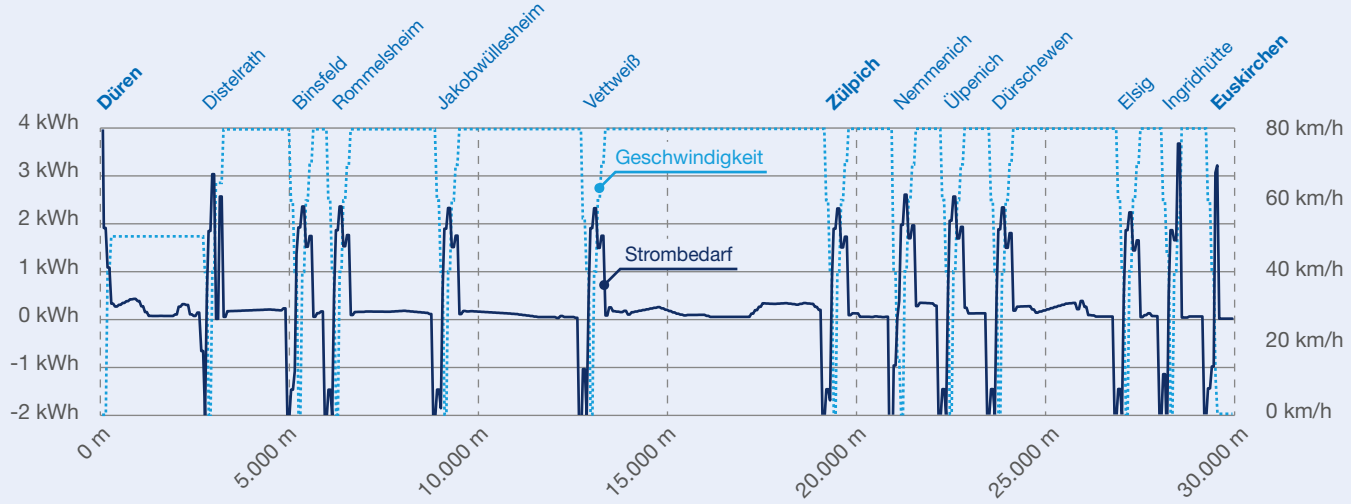
RB 21 Nord Strom-Bedarf Ø 4,57 kWh/km inkl. Rekuperation



RB 21 Süd Strom-Bedarf Ø 5,24 kWh/km inkl. Rekuperation

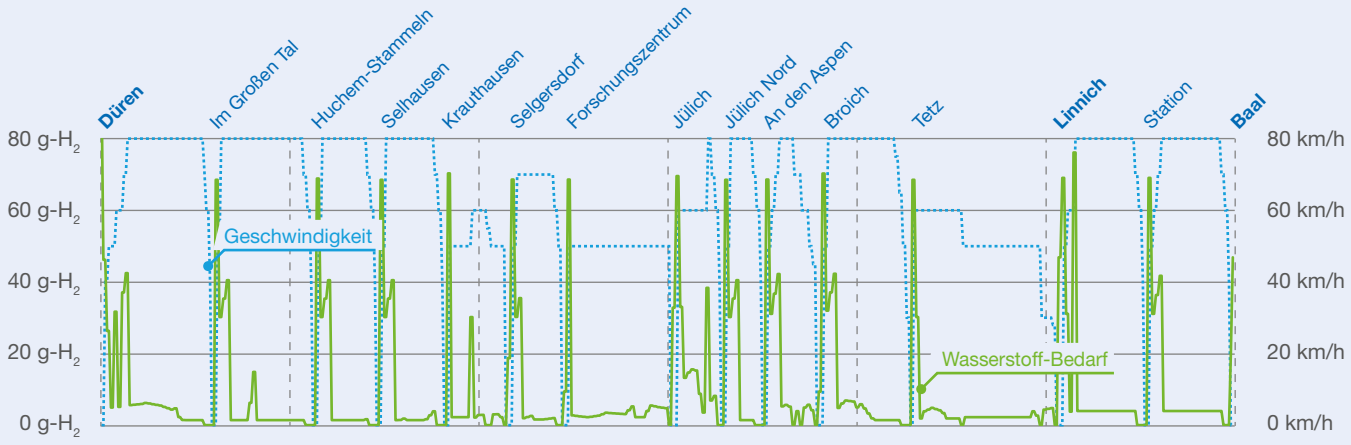


RB 28 Strom-Bedarf Ø 5,27 kWh/km inkl. Rekuperation

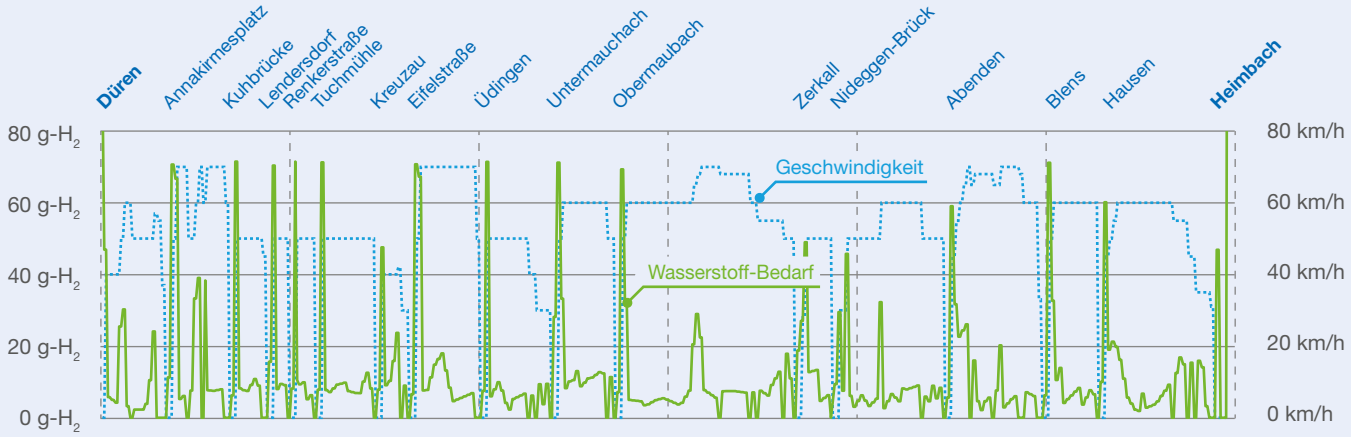


↑ Abbildung 57: BEMU – Strom-Bedarf im ›Netz Düren‹ mit Rekuperation in Akku (2026+)

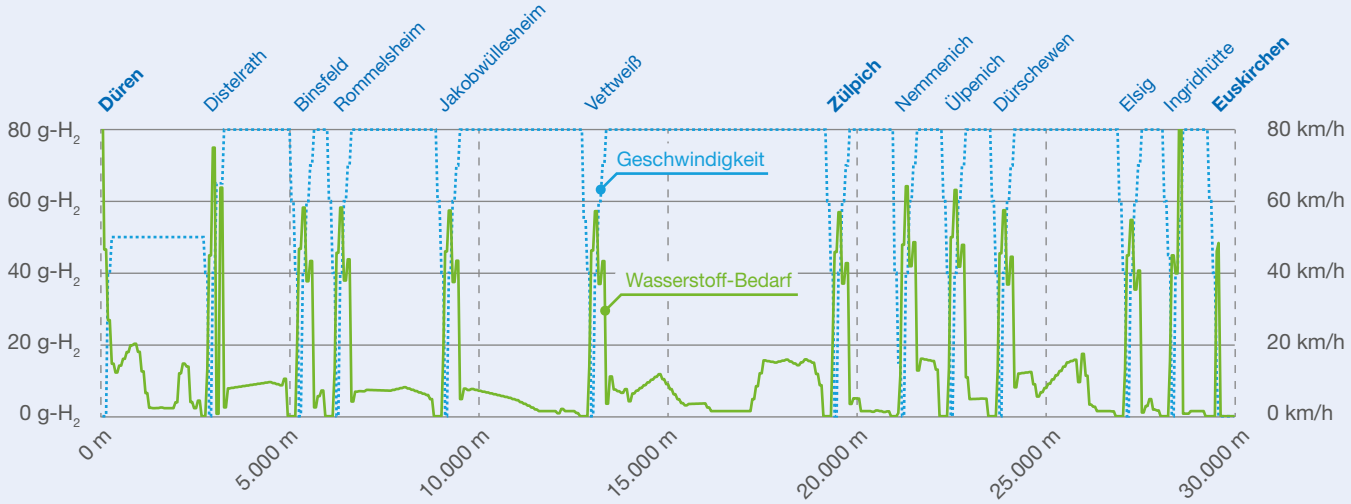
RB 21 Nord Wasserstoff-Bedarf Ø 202 g-H_2/km inkl. Rekuperation



RB 21 Süd Wasserstoff-Bedarf Ø 234 g-H_2/km inkl. Rekuperation



RB 28 Wasserstoff-Bedarf Ø 253 g-H_2/km inkl. Rekuperation



↑ Abbildung 58: HEMU – Wasserstoff-Bedarf im ›Netz Düren‹ mit Rekuperation (2026+)

Literaturverzeichnis

[1] W. Klebsch, P. Heininger, J. Geder und A. Hauser, VDE Studie: Batteriesysteme für Schienentriebzüge – Emissionsfreier Antrieb mit Lithium-Ionen-Zellen, Frankfurt am Main: VDE e. V., 21.08.2018.

[2] W. Klebsch, P. Heininger und J. Martin, VDE Studie: Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV – Einschätzung der systemischen Potenziale, Frankfurt am Main: VDE e. V., 24.05.2019.

[3] A. Müller, „Technische und wirtschaftliche Bewertung alternativer Antriebskonzepte (Kurztitel)“, Technische Universität Dresden, Dresden, 2017.

[4] J. Wöltje, Betriebswirtschaftliche Formelsammlung; Abschnitt 7.4 Dynamische Investitionsrechenverfahren, Freiburg: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, 2012.

[5] DB Netze, „Bahnstrompreisregelung ab 01.01.2017 für die Rückfallversorgung“, 13.10.2016. [Online]. Available: https://www.dbenergie.de/resource/blob/1344072/dab1162a0d3f42627e95a0f36164f6b9/Bahnstrom-PB-Rueckfallversorgung-2017-data.pdf. [Zugriff am 08.04.2020].

[6] DB Netze, „Preisblatt für die Nutzung des 16,7-Hz-Bahnstromnetzes“, 01.01.2017. [Online]. Available: https://www.dbenergie.de/resource/blob/1344556/439d3579dc47f4e409428938399ca8cf/Preisblatt-Netznutzung-2017-data.pdf. [Zugriff am 08.04.2020].

[7] DB Netze, „Bahnstrompreisregelung ab 01.01.2020 für die Rückfallversorgung“, 24.10.2019. [Online]. Available: https://www.dbenergie.de/resource/blob/4617140/7cac268bb5adc192bcb29f0e905bae30/Bahnstrom-PB-Rueckfallversorgung-2020-data.pdf. [Zugriff am 08.04.2020].

[8] DB Netze, „Preisblatt für die Nutzung des 16,7-Hz-Bahnstromnetzes (Bahnstromnetz) gültig ab 01.01.2020“, 01.01.2020. [Online]. Available: https://www.dbenergie.de/resource/blob/4526718/ea88f2f258a4dbd0e1269f6055284f55/Preisblatt-Netznutzung-2020-vorlaeufig--data.pdf. [Zugriff am 08.04.2020].

[9] VDE e. V. / Dr. Becks, „Rahmenbedingungen und Erfolgsfaktoren für die Hybridisierung von Triebzügen“, Frankfurt am Main, 22.09.2017.

[10] Bundesnetzagentur, „Marktuntersuchung Eisenbahnen 2019“, Dezember 2019. [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 20.02.2020].

[11] Deutsche Bahn, „Deutsche Bahn Daten & Fakten 2018“, 14. März 2019. [Online]. Available: https://www.deutschebahn.com/resource/blob/3992278/1d136e983334750ef4f24072d49c7cdf/20190325_bpk_2019_daten_fakten-data.pdf. [Zugriff am 20.02.2020].

[12] Deutsche Bahn AG, „Wettbewerbskennzahlen“, Oktober 2019. [Online]. Available: https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4593160/52024c17f17fd809cd4c9c9a58de1954/Wettbewerbskennzahlen-2018_19-data.pdf. [Zugriff am 18.03.2020].

[13] BAG SPNV, „Wettbewerbsfahrplan der Aufgabenträger des SPNV“, 13. September 2019. [Online]. Available: https://bag-spnv.de/files/bagspnv/downloads/2019_13092019%20Wettbewerbsfahrplan.pdf. [Zugriff am 20.02.2020].

[14] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „Batterie-elektrifizierte Züge zukünftig im Ortenau-NETZ“, 02.08.2019. [Online]. Available: https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/batterie-elektrifizierte-zuege-zukuenftig-im-ortenau-netz/. [Zugriff am 28.02.2020].

[15] Alstom, „Alstom liefert acht Coradia LINT Regionalzüge an die ODEG“, 20.06.2019. [Online]. Available: https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2019/6/alstom-liefert-acht-coradia-lint-regionalzuege-die-odeg#_ftn1. [Zugriff am 05.11.2019].

[16] Verkehrsverbund Mittelsachsen, „Letzte Hürde für Batterietriebzüge genommen – Verbandsversammlung des ZVMS stopft Finanzierungslücke“, 04.02.2020. [Online]. Available: https://www.vms.de/aktuelles/news/v/a/letzte-huerde-fuer-batteriezuege-genommen/2/. [Zugriff am 28.02.2020].

[17] Alstom, „Alstom unterzeichnet ersten Vertrag über Batterietriebzüge für den deutschen Regionalverkehr“, Alstom, 05.02.2020. [Online]. Available: https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2020/2/alstom-unterzeichnet-ersten-vertrag-ueber-batteriezuege-fuer-den. [Zugriff am 02.04.2020].

[18] J. Kühnapfel, „Nutzwertanalysen in Vertrieb und Marketing“, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014.

[19] N. T. Wittemann und F. Meinelt, „Alternative Antriebskonzepte Pfalznetz (Kurztitel)“, Technische Universität Dresden, Dresden, 2019.

[20] statista, „Entwicklung der durchschnittlichen Rendite festverzinslicher Wertpapiere in Deutschland von 2000 bis zum Dezember 2019“, statista, 2020. [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/192860/umfrage/entwicklung-der-renditen-festverzinslicher-wertpapiere-in-deutschland-seit-2000/. [Zugriff am 04.03.2020].

[21] Juris – Fachportal Recht / Bundesministerium der Finanzen, „AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig ‚Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)'", 26.01.1998. [Online]. Available: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Personen-und-Gueterbefoerderung.html. [Zugriff am 03.03.2020].

[22] Rath Gruppe, „Historie: Die Rurtalbahn –- Verbindung zwischen der Börde-Region und der Nordeifel", Rurtalbahn GmbH, [Online]. Available: https://www.rurtalbahn.de/unternehmen/historie. [Zugriff am 04.03.2020].

[23] Deutsche Bahn AG (Möller, Lange, Müller, Lankes), „Innovative Antriebstechnik bei Schienenfahrzeugen aus Sicht der Beschaffung der Deutschen Bahn AG", 09.09.2014. [Online]. Available: https://www.zevrail.de/artikel/innovative-antriebstechnik-bei-schienenfahrzeugen-aus-sicht-der-beschaffung-der-deutschen. [Zugriff am 04.03.2020].

[24] Nahverkehr Rheinland, „SPNV – Nahverkehrsplan 2016", März 2016. [Online]. Available: https://docplayer.org/22797691-Spnv-nahverkehrsplan-2016.html. [Zugriff am 22.11.2019].

[25] Rath Gruppe, „Willkommen zu Hause", Unternehmen: Rurtalbahn GmbH, [Online]. Available: https://www.rurtalbahn.de/unternehmen. [Zugriff am 04.03.2020].

[26] J. Ihme, Schienenfahrzeugtechnik (2. Auflage), Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

[27] J. Lehmann und T. Luschtinetz, „Wasserstoff und Brennstoffzelle. Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff", in Technik im Fokus, 2, Heidelberg, Springer Vieweg, 2014.

[28] B. Ketterer, U. Karl, D. Möst und S. Ulrich, „Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial im Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen (Forschungszentrum Karlsruhe)", Oktober 2009. [Online]. Available: https://publikationen.bibliothek.kit.edu/270081162/3815780. [Zugriff am 06.03.2020].

[29] M. Sterner, M. Thema, F. Eckert, T. Lenck und P. Götz, „Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland (Greenpeace Energy eG, Berlin)", 08 2015. [Online]. Available: https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/04-2015-FENES-EBP-GPE-Windgas-Studie.pdf. [Zugriff am 05.03.2020].

[30] DB Netze, „Das Trassenpreissystem 2020 der DB Netz AG", März 2019. [Online]. Available: https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/leistungen/trassen/uebersich_tps/tps_2020-4459826. [Zugriff am 03.04.2020].

[31] L. Oppermann, Interviewee, Auskunft NVR. [Interview]. 25.02.2020.

Akronyme

Akronym	Name
BAG-SPNV	Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr
BEMU	Battery Electric Multiple Unit (Batterie-Triebzug)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BR	Baureihe
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DB	Deutsche Bahn
DMU	Diesel Multiple Unit (Dieseltriebzug)
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EMU	Electric Multiple Unit (Oberleitungs-Elektrotriebzug)
ETA	Elektrotriebwagen mit Akku
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
HEMU	Hydrogene Electric Multiple Unit (Wasserstoff-Brennstoffzellen-Triebzug)
kWh	Kilowattstunde
OL	Oberleitung
Pkm	Personenkilometer (Maß der Personenbeförderungsleistung von Zügen)
RB	Regionalbahn
RE	Regional-Express
RTB	Rurtalbahn
SoC	State of Charge = Ladezustand (einer Batterie)
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VT	Triebwagen mit Verbrennungsmotor
X-EMU	Kürzel für BEMU oder HEMU
Zkm	Zugkilometer (Maß der Betriebsleistung von Zügen)

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Potenziale der verschiedenen Triebzugkonzepte (Horizont 2025 und Trends) – Teil 1 8

Abbildung 2: Potenziale der verschiedenen Triebzugkonzepte (Horizont 2025 und Trends) – Teil 2 9

Abbildung 3: Technische Daten zu Dieselfahrzeugen im Nahverkehr 19

Abbildung 4: MTU-Power-Pack Baureihe 1800 für LINT-Triebwagen 20

Abbildung 5: Technische Daten für Oberleitungs-Elektrotriebzüge im Nahverkehr (Beispiele) 21

Abbildung 6: Oberleitung und Jakobs-Drehgestell 22

Abbildung 7: Batterietriebzug TALENT 3 23

Abbildung 8: Technische Daten zu Batterietriebzügen 24

Abbildung 10: BEMU CityJet Eco der ÖBB auf der Strecke Linz – St.Nikola-Struden (Oktpber 2019) 25

Abbildung 9: 2-teiliger Mireo Plus B – Plattform und Energiefluss-Diagramm im BEMU 25

Abbildung 11: Batterietriebzüge FLIRT 3 Akku und Coradia Continental BEMU 26

Abbildung 12: Brennstoffzellen-Stack (Ballard Power) 27

Abbildung 13: Elektrolyseur (Siemens Silyzer 300) 27

Abbildung 14: 2-teiliger Mireo Plus H – Antriebssystem und Energiefluss-Diagramm im HEMU 28

Abbildung 15: Technische Daten zu Brennstoffzellentriebzügen 29

Abbildung 16: Alstom Coradia iLINT in Obermaubach an der Strecke RB 21 Süd (Februar 2020) 30

Abbildung 17: Die Ursprünge des Netzes Düren in der Preußischen Provinz Rheinland (Teil 1) 37

Abbildung 18: Die Ursprünge des Netzes Düren in der Preußischen Provinz Rheinland (Teil 2) 38

Abbildung 19: RB 21 mit Nord- und Südast 39

Abbildung 20: RegioShuttle RS1 im Bahnhof Düren 39

Abbildung 21: RB 28 Eifel-Bördebahn 40

Abbildung 22: Gäste der RB 28-Eröffnungsfahrt am Montag, den 16. Dezember 2019 41

Abbildung 23: Diesel-Schienenbus VT 95 im Bahnbetriebswerk Landau (1978) 42

Abbildung 24: Akku-Triebwagen ET 150 im Bahnbetriebswerk Düren (1982) 42

Abbildung 25: Batterietriebwagen ETA 150 auf RB 21 Süd: Heimbach 1986, Nideggen 1984, Obermaubach 1986 43

Abbildung 26: iLINT 54 in Obermaubach 43

Abbildung 27: Gebiet des ZV NVR 44

Abbildung 28: RTB Regio Sprinter (in Heimbach), seit Februar 2019 nicht mehr im Einsatz 45

Abbildung 29: Übersichtsplan zu den Linien des ›Netzes Düren‹ 46

Abbildung 30: Bahnhof Düren – elektrifiziertes Gleis 4/4a und nicht-elektrifiziertes Gleis 23 47

Abbildung 31: RTB Regio Shuttle RS1 in Heimbach und RTB Coradia LINT 54 in Jülich 47

Abbildung 32: Betriebsprogramm von RB 21 Nord, Ist 2019 48

Abbildung 33: Betriebsprogramm von RB 21 Nord, Plan 2026 49

Abbildung 34: Betriebsprogramm von RB 21 Nord, Plan 2026+ 50

→

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 35: Betriebsprogramm von RB 21 Süd, Ist 2019 51

Abbildung 36: Betriebsprogramm von RB 21 Süd, Plan 2026 51

Abbildung 37: Betriebsprogramm RB 28, Ist 2019 und Plan 2026(+) 52

Abbildung 38: Simulierter Energiebedarf auf den Strecken des ›Netzes Düren‹ (2026+) 55

Abbildung 39: Strombedarf des BEMU auf den Bahnlinien des ›Netzes Düren‹ (2026+) 56

Abbildung 40: Wasserstoff-Bedarf des HEMU auf den Bahnlinien des ›Netzes Düren‹ (2026+) 57

Abbildung 41: Nach Kostenarten differenzierte Kapitalwerte für das ›Netz Düren‹ 66

Abbildung 42: Aufgeschlüsselte Kapitalwerte ohne Trassen- und Stationskosten 67

Abbildung 43: Aufgeschlüsselte Kapitalwerte ohne Trassen-, Stations- und Infrastrukturkosten 68

Abbildung 44: Sensitivitätsanalyse zum Dieselpreis (Referenz: Gesamtkapitalwert) 70

Abbildung 45: Sensitivitätsanalyse zum Wasserstoffpreis (Referenz: Gesamtkapitalwert) 70

Abbildung 46: Sensitivitätsanalyse zum Strompreis (Referenz: Gesamt-Kapitalwert) 71

Abbildung 47: Sensitivitätsanalyse zur BEMU-Flottengröße wegen begrenzter Reichweite 71

Abbildung 48: Sensitivitätsanalyse zu Kosten der Elektrifizierung für eine EMU-Flotte 72

Abbildung 49: Sensitivitätsanalyse zur Taktung der Linien des ›Netzes Düren‹ 72

Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse zu Gewichten von BEMU und HEMU-Fahrzeugen 73

Abbildung 51: Sensitivitätsanalyse zu BEMU- und HEMU-Fahrzeugen-Preisen 74

Abbildung 52: RB 21 Nord – Strecke, Geschwindigkeit, Fahrwiderstand, Energiebedarf (2026+) 87

Abbildung 53: RB 21 Süd – Strecke, Geschwindigkeit, Fahrwiderstand, Energiebedarf (2026+) 88

Abbildung 54: RB 28 – Strecke, Geschwindigkeit, Fahrwiderstand, Energiebedarf (2026+) 89

Abbildung 55: DMU – Diesel-Bedarf auf den Bahnlinien des ›Netzes Düren‹ (2026+) 90

Abbildung 56: EMU – Strom-Bedarf im ›Netz Düren‹ ohne Rekuperation in OL (2026+) 91

Abbildung 57: BEMU – Strom-Bedarf im ›Netz Düren‹ mit Rekuperation in Akku (2026+) 92

Abbildung 58: HEMU – Wasserstoff-Bedarf im ›Netz Düren‹ mit Rekuperation (2026+) 93

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Bis 2033 geplante SPNV-Betriebsleistungen 14

Tabelle 2: Übersicht Dieselnetze und Alternativen – Teil 1 15

Tabelle 3: Übersicht Dieselnetze und Alternativen – Teil 2 16

Tabelle 4: Übersicht Dieselnetze und Alternativen – Teil 3 17

Tabelle 5: Mittlere Energie- und Kraftstoffbedarfe auf den Linien des ›Netzes Düren‹ 58

Tabelle 6: Basisdaten zu Fahrzeugen und Infrastruktur 60

Tabelle 7: Linien-spezifische Kostenpositionen zu DMU und EMU inkl. Infrastruktur 61

Tabelle 8: Linienspezifische Kostenpositionen zu BEMU und HEMU inkl. Infrastruktur 62

Tabelle 9: Gesamt-Kapitalwerte bei verschiedenen Betrachtungszeiträumen 63

Tabelle 10: Kapitalwerte nach Kostenarten für Alternativen (Betrachtungszeitraum 30J) 64

Tabelle 11: Für die Sensitivitätsanalyse variierte Parameter (Betrachtungszeitraum 30J) 69

Tabelle 12: Für den SPNV in Deutschland zuständige Aufgabenträger 81

Tabelle 13: Verwendete Kürzel für die Namen der Bundesländer 81

Tabelle 14: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 1 82

Tabelle 15: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 2 83

Tabelle 16: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 3 84

Tabelle 17: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 4 85

Tabelle 18: Zuordnung Netze und Strecken im SPNV – Teil 5 86

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
service@vde.com
www.vde.com

VDE