



Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften

Fakultät Verkehr-Sport-Tourismus-Medien
Institut für Verkehrsmanagement (IfVM)

Vortrag: Elektromobilität Schiene

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Marco Brey





Ostfalia

Hochschule für angewandte
Wissenschaften

Die Ostfalia – 12 Fakultäten, 4 Standorte, über 13.000 Studierende

Die Fakultäten der Ostfalia





Ostfalia

Hochschule für angewandte
Wissenschaften

Die Ostfalia – 12 Fakultäten, 4 Standorte, über 13.000 Studierende

Die Fakultäten der Ostfalia



Fakultät Karl-Scharfenberg

- Verkehr
- Sport
- Tourismus
- Medien



Die Ostfalia – 12 Fakultäten, 4 Standorte, über 13.000 Studierende



Verkehr-Sport-Tourismus-Medien

Studiengänge im Bereich Verkehr-Logistik

Bachelorstudiengänge

- Wirtschaftsingenieurwesen Mobilität und Verkehr (WMV)
- Mobilität und Personenverkehrsmanagement (MPM)
- Digital Technologies (Kooperation Ostfalia HaW und TU Clausthal)
- Logistik und Informationsmanagement im Praxisverbund (LIP)
- Logistikmanagement im Praxisverbund (LOP) (dual)
- Logistik und Informationsmanagement (LIM)
- Logistikmanagement (LOM)

Masterstudiengänge

- Verkehr und Logistik (MVL)

Elektromobilität Schiene

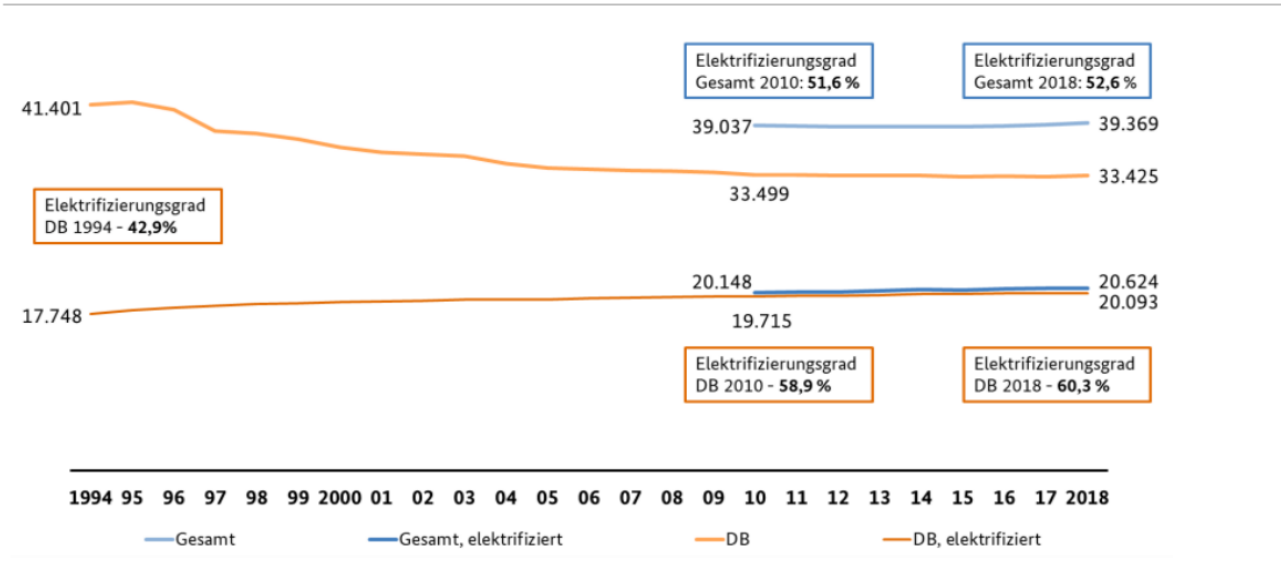
Inhaltsübersicht

- *Infrastrukturelle Situation*
- *Betriebliche Situation*
- *Infrastrukturelle Maßnahmen*
- *Betriebliche Situation SPNV*
- *Betriebliche Strategien*
- *Elektromobilität Schiene*

Infrastrukturelle Situation

Elektrifizierung in Deutschland

Entwicklungen des Streckennetzes und Elektrifizierungsgrad des Streckennetzes (1994-2018; Länge in km; Anteile in Prozent)



Quelle:

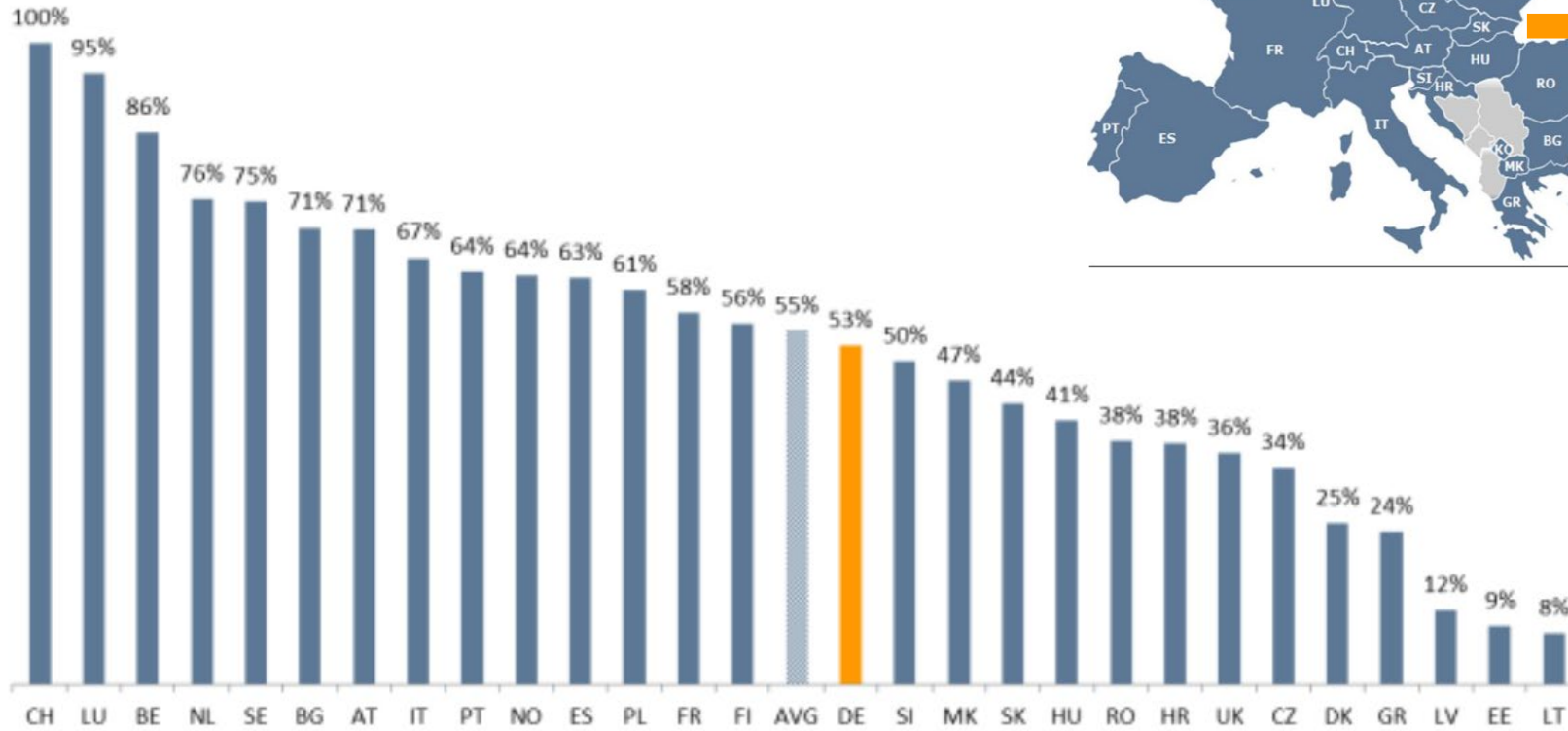
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (26.02.2022)



Quelle: <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr> (26.04.2022)

Infrastrukturelle Situation

Elektrifizierung in Deutschland und Europa



Streckenlänge pro Land in km

1	AT	Austria	5.648	15	LV	Latvia	2.217	
2	BE	Belgium	3.605	16	LT	Lithuania	1.911	
3	BG	Bulgaria	4.030	17	LU	Luxembourg	275	
4	HR	Croatia	2.605	18	MK	FYR Macedonia	683	
neu	5	CZ	Czech Republic	9.567	19	NL	Netherlands	3.055
	6	DK	Denmark	2.560	20	NO	Norway	3.856
	7	EE	Estonia	1.453	21	PL	Poland	19.251
	8	FI	Finland	5.926	22	PT	Portugal	2.546
	9	FR	France	28.747	23	RO	Romania	10.628
	10	DE	Germany	39.219	24	SK	Slovakia	3.626
	11	GR	Greece	2.240	25	SI	Slovenia	1.207
	12	HU	Hungary	7.441	26	ES	Spain	15.356
	13	IT	Italy	19.982	27	SE	Sweden	10.874
	14	KO	Kosovo	437	28	CH	Switzerland	5.323
				29	UK	United Kingdom	16.320	

Quelle:

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (26.02.2022)

Infrastrukturelle Situation

Elektrifizierung in Deutschland und Europa

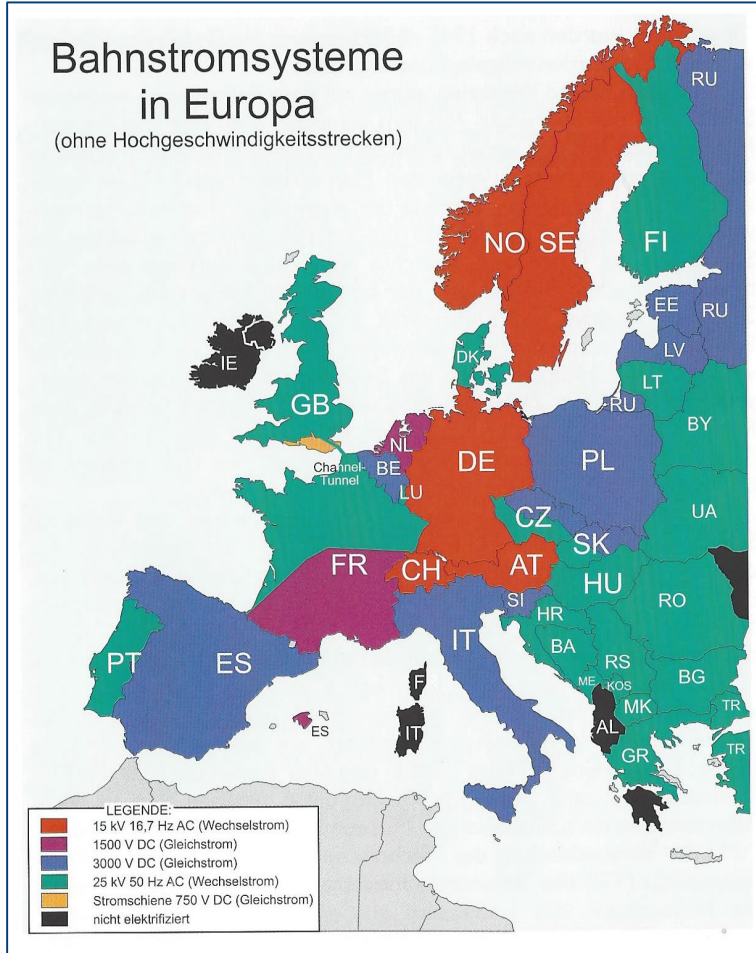
Was würde eine vollständige Ausrüstung mit Fahrdrabt in den genannten europäischen Staaten kosten?

			Streckenlänge [km]	Elektrifizierungsgrad im Berichtsjahr 2018	noch zu elektrifizierende Streckenkilometer [km]	geschätzte Kosten für Vollelektrifizierung [k€]
1	AT	Austria	5.648	71%	1638	2.456.880
2	BE	Belgium	3.605	86%	505	757.050
3	BG	Bulgaria	4.030	71%	1169	1.753.050
4	HR	Croatia	2.605	38%	1615	2.422.650
5	CZ	Czech Republic	9.567	34%	6314	9.471.330
6	DK	Denmark	2.560	25%	1920	2.880.000
7	EE	Estonia	1.453	9%	1322	1.983.345
8	FI	Finnland	5.926	56%	2607	3.911.160
9	FR	France	28.747	58%	12074	18.110.610
10	DE	Germany	39.219	53%	18433	27.649.395
11	GR	Greece	2.240	24%	1702	2.553.600
12	HU	Hungary	7.441	41%	4390	6.585.285
13	IT	Italy	19.962	67%	6587	9.881.190
14	KO	Kosovo	437	0%	437	655.500
15	LV	Latvia	2.217	12%	1951	2.926.440
16	LT	Lithuania	1.911	8%	1758	2.637.180
17	LU	Luxembourg	275	95%	14	20.625
18	MK	FYR Macedonia	683	47%	362	542.985
19	NL	Netherlands	3.055	76%	733	1.099.800
20	NO	Norway	3.856	64%	1388	2.082.240
21	PL	Poland	19.251	61%	7508	11.261.835
22	PT	Portugal	2.546	64%	917	1.374.840
23	RO	Romania	10.628	38%	6589	9.884.040
24	SK	Slovakia	3.626	44%	2031	3.045.840
25	SI	Slowenia	1.207	50%	604	905.250
26	ES	Spain	15.356	63%	5682	8.522.580
27	SE	Sweden	10.874	75%	2719	4.077.750
28	CH	Switzerland	5.323	100%	0	-
29	UK	United Kingdom	16.320	36%	10445	15.667.200
						155.119.650



Quelle:
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (26.02.2022)

Infrastrukturelle Situation *Grenzüberschreitender Verkehr*



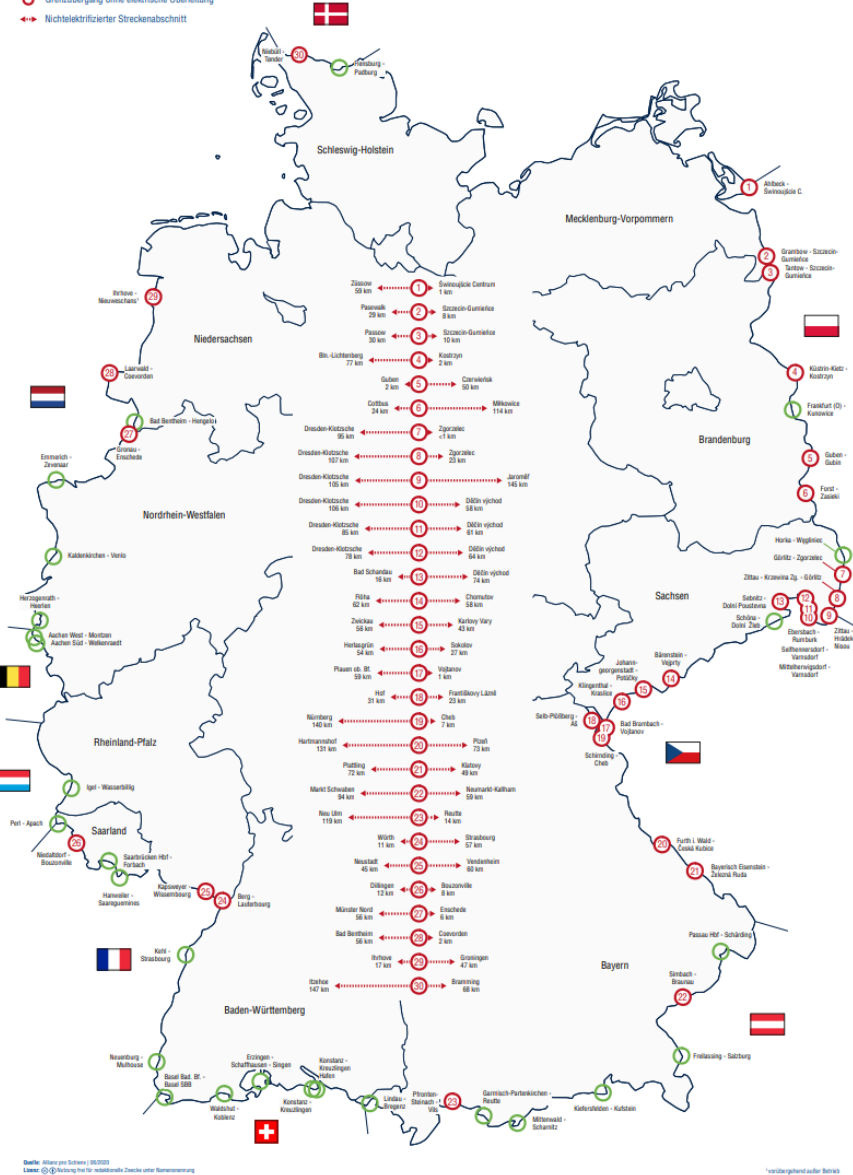
26.04.2022

Quelle: Eisenbahnatlas EU (2017), ISBN 978-3-89494-147-5, Verlag Schweers + Wall GmbH

Grenzüberschreitende Eisenbahnstrecken

Nur 27 von 57 Grenzübergängen elektrifiziert

- Grenzübergang mit elektrischer Oberleitung
- Grenzübergang ohne elektrische Oberleitung
- ↔ Nichtelektrifizierter Streckenabschnitt



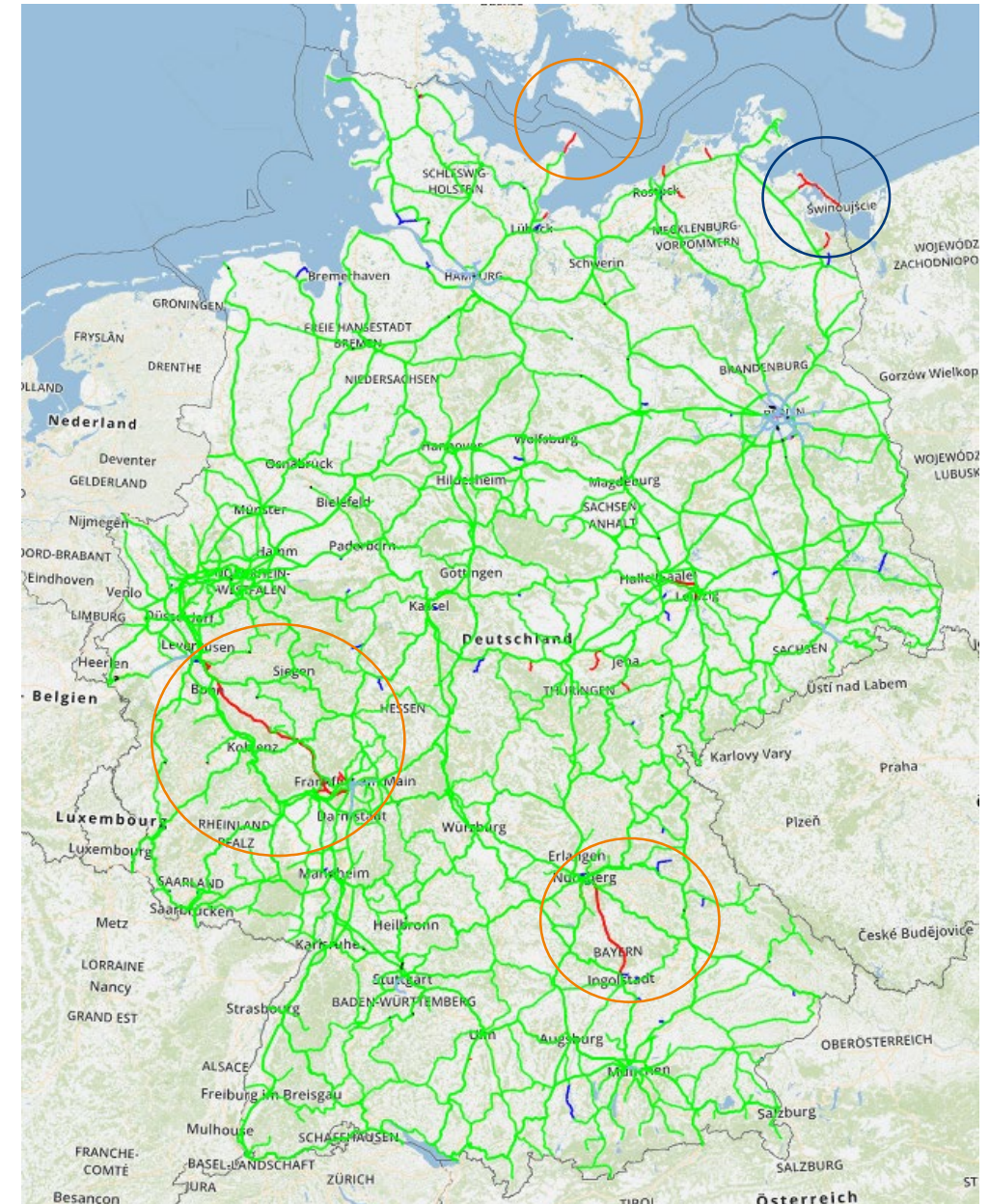
Infrastrukturelle Situation

Strecken nach Verkehrsarten

- Die überwiegende Zahl der Strecken in Deutschland wird sowohl für den Personenzugverkehr (Pz) als auch den Güterzugverkehr (Gz) genutzt.
- Relativ wenige Strecke sind nur dem Güterverkehr vorbehalten.
- Bei den für den reinen Personenverkehr ausgewiesenen Strecken handelt es sich vorwiegend um HGV-Strecken (z. B. Köln – Frankfurt/Main oder Nürnberg – Ingolstadt) oder Strecken mit hohem touristischem Verkehr (z. B. Usedomer Bäderbahn).
- **ABS/NBS Fehmarnbelt-Tunnel (DE/DK): Teil des TEN-T Korridors Nr. 5 Scan-Med., geplante Eröffnung 2029, Elektrifizierung 25 kV 50 Hz**

Verkehrsart

- Pz
- Gz
- Pz/Gz
- S-Bahn



Quelle: <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr> (26.04.2022)

Infrastrukturelle Situation

Elektrifizierung in Deutschland

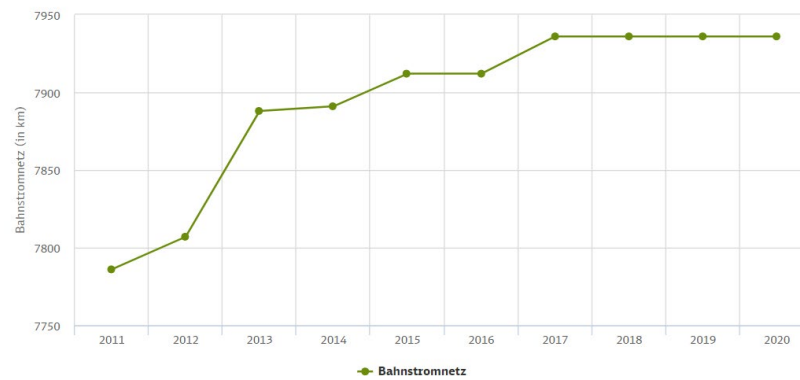
DB Interaktiver Kennzahlenvergleich



Betriebslänge (in km)

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
DB Netze Fahrweg	33.378	33.319	33.288	33.281	33.193	33.241	33.348	33.299	33.291	33.286

110 kV
Verteilnetz



Bahnstromnetz (in km)

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Bahnstromnetz	7.786	7.807	7.888	7.891	7.912	7.912	7.936	7.936	7.936	7.936



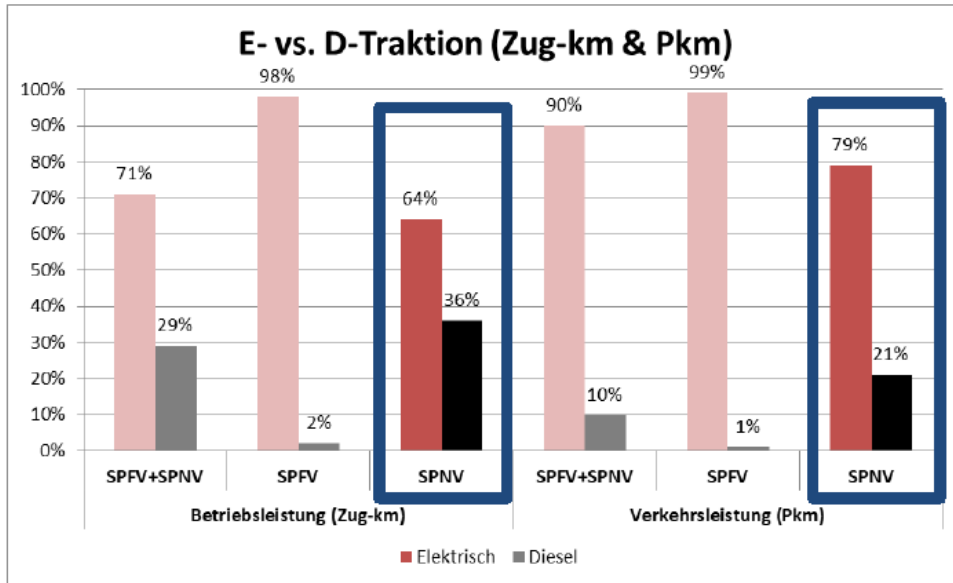
	2020	2019	± absolut	± %
INFRASTRUKTUR¹⁾				
Betriebslänge in km	33.399	33.423	- 24	- 0,1
davon elektrisch betrieben	20.367	20.348	+ 19	+ 0,1

Elektrifiziert  – rd. 61 %
Nicht elektrifiziert – rd. 39 %

Quellen: <https://kpi.deutschebahn.com/de/flotte-und-infrastruktur> (27.02.2022)
<https://inside.bahn.de/bahnstromnetz/> (27.02.2022)
<https://geovdbn.deutschebahn.com/isr> (26.02.2022)
https://kpi.deutschebahn.com/fileadmin/Downloads/2020/DB20_DuF_d_web_01.pdf (27.02.2022)

Betriebliche Situation

Worauf liegt also der Fokus? SPFV, SGV, SPNV



SPNV

Diesel im SPNV

Betriebsleistung: ²⁾

D-Traktion: 36 % (243 Mio. Zug-km)

E-Traktion: 64 % (438 Mio. Zug-km)

Verkehrsleistung: ³⁾

D-Traktion: 21 % (12 Mrd. Pkm)

E-Traktion: 79 % (45 Mrd. Pkm)

¹⁾ Destatis (2019): Betriebsdaten des Schienenverkehrs. Fachserie 8 Reihe 2.1

²⁾ Daten für 2017; Quelle: BAG-SPNV

³⁾ Bundesnetzagentur, Marktuntersuchung Eisenbahnen 2019

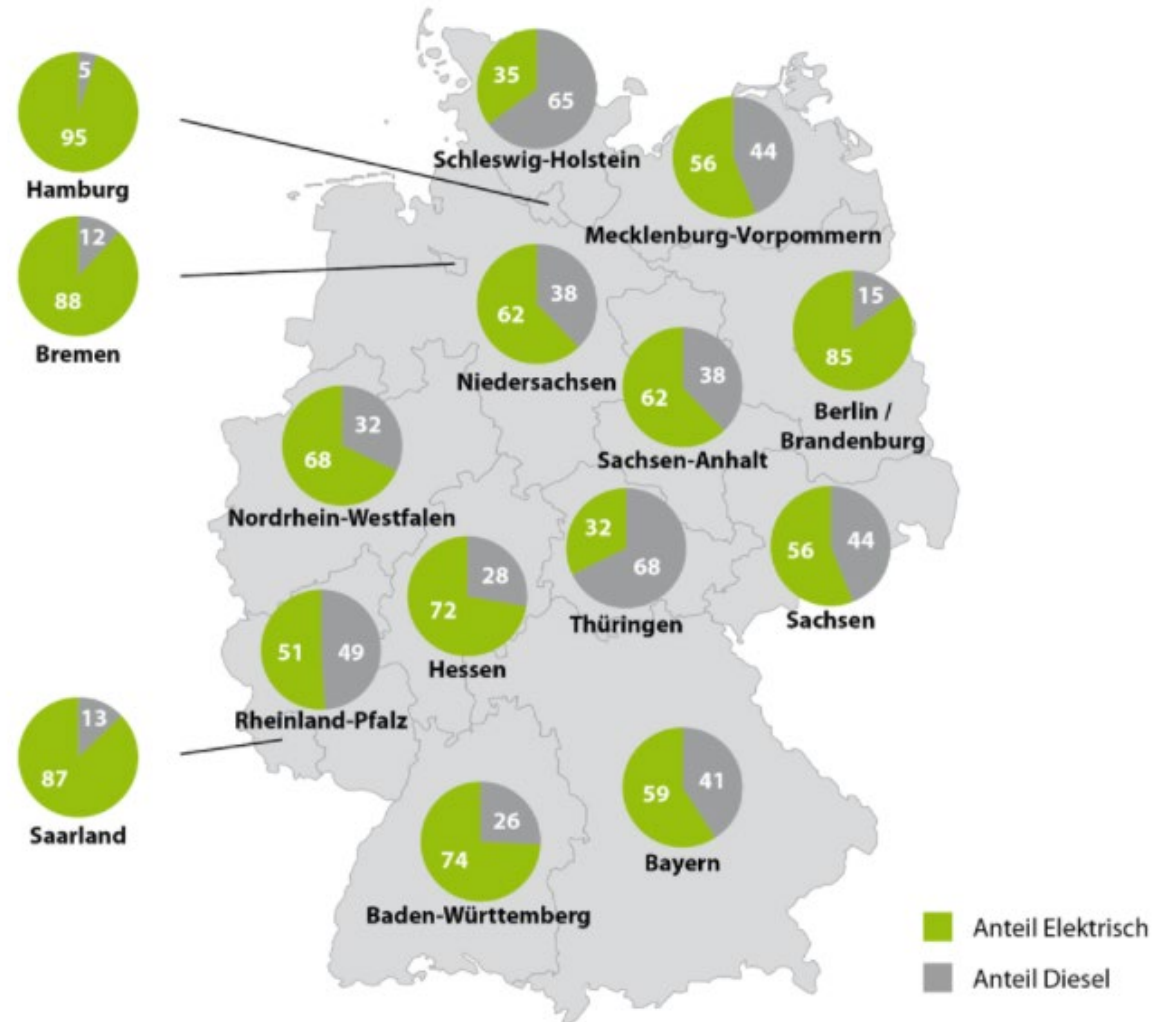
Quellen: Vortrag Johannes Pagenkopf (DLR) – Tagung: Elektromobilität Schiene, DVV-Veranstaltung September 2020

<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/elektromobilitaet/> (27.02.2022)

Betriebliche Situation SPNV

Regionale Unterschiede

Zugkm-Anteile Elektrisch und Diesel nach Bundesländern (2020)

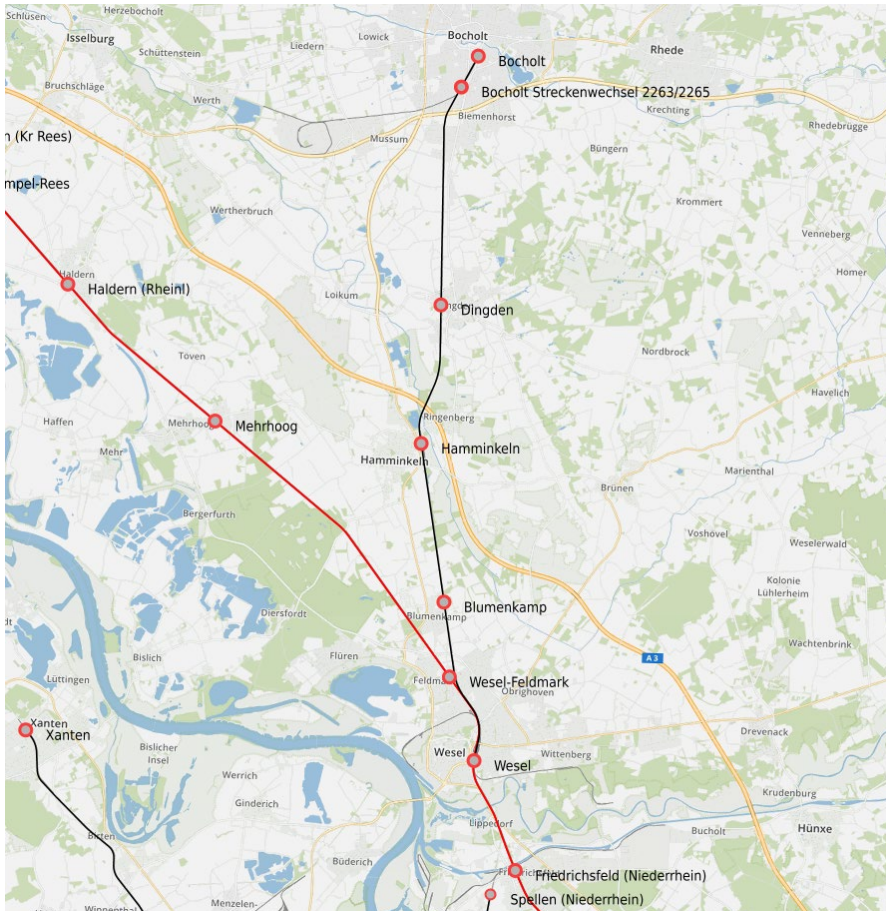


Quelle: BAG-SPNV

© Bundesverband SchienenNahverkehr, erstellt durch 

Infrastrukturelle Maßnahmen

Projekte zur Elektrifizierung



Quellen:
<https://geovdbn.deutschebahn.com/isr> (27.02.2022)
https://kpi.deutschebahn.com/fileadmin/Downloads/2020/DB20_DuF_d_web_01.pdf (27.02.2022)

Wesel – Bocholt Elektrifizierung

Der rund 22 Kilometer lange Abschnitt zwischen Wesel und Bocholt wurde zur besseren Anbindung der Region an das Ruhrgebiet elektrifiziert und mit Elektronischer Stellwerkstechnik ausgerüstet. Zudem fanden Modernisierungsarbeiten in den Bahnhöfen Hamminkeln, Blumenkamp, Dingden und Bocholt statt. Die Bauarbeiten begannen im April 2021 und wurden im Januar 2022 abgeschlossen.



Für eine bessere Anbindung zum Ruhrgebiet wird der Streckenabschnitt Wesel – Bocholt elektrifiziert und mit Elektronischer Stellwerkstechnik (ESTW-Technik) ausgerüstet [Quelle: Symbolbild, Deutsche Bahn AG/Claus Weber]

Projekt

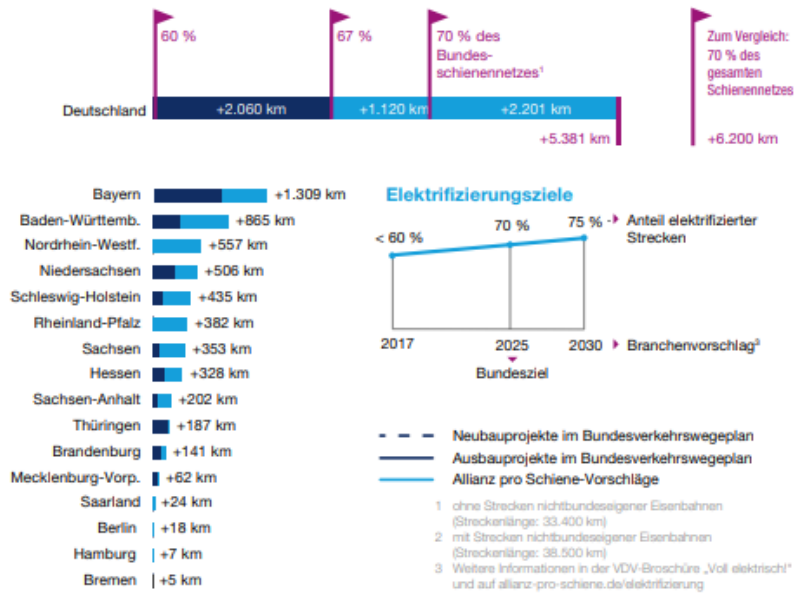
Von Wesel am Niederrhein nach Bocholt im Münsterland führt die rund 22 Kilometer lange eingleisige Strecke der „Bocholter Bahn“. Für eine umsteigefreie Verbindung zum Ruhrgebiet wurde die Strecke elektrifiziert und mit Elektronischer Stellwerkstechnik (ESTW-Technik) ausgerüstet.

Der „Rhein-Issel-Express“ (RE 19) kann über Wesel hinaus bis Bocholt fahren. Dies ist mit zwei Zugteilen ab Düsseldorf möglich. In Wesel können diese getrennt werden und weiter bis Bocholt bzw. nach Arnhem fahren. Zudem wurde der Streckenabschnitt größtenteils für Geschwindigkeiten bis 100 km/h ausgebaut.

Im Rahmen des Projekts wurden Oberleitungsmasten errichtet und mit einer Oberleitung ausgestattet. Dafür mussten rund 3.300 Meter Bahnenergieleitung verlegt werden. Zudem wurden 19 Bahnübergänge (BÜ) modernisiert bzw. angepasst.

Infrastrukturelle Maßnahmen

Quo vadis? Infrastruktur Vision



Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV

Einschätzung der systemischen Potenziale

VDE



Quelle:

<https://www.vde.com/resource/blob/1889656/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/pressemitteilung---studie-alternative-antriebssysteme-im-spnv--1--data.pdf> (19.03.2021)

Betriebliche Situation SPNV

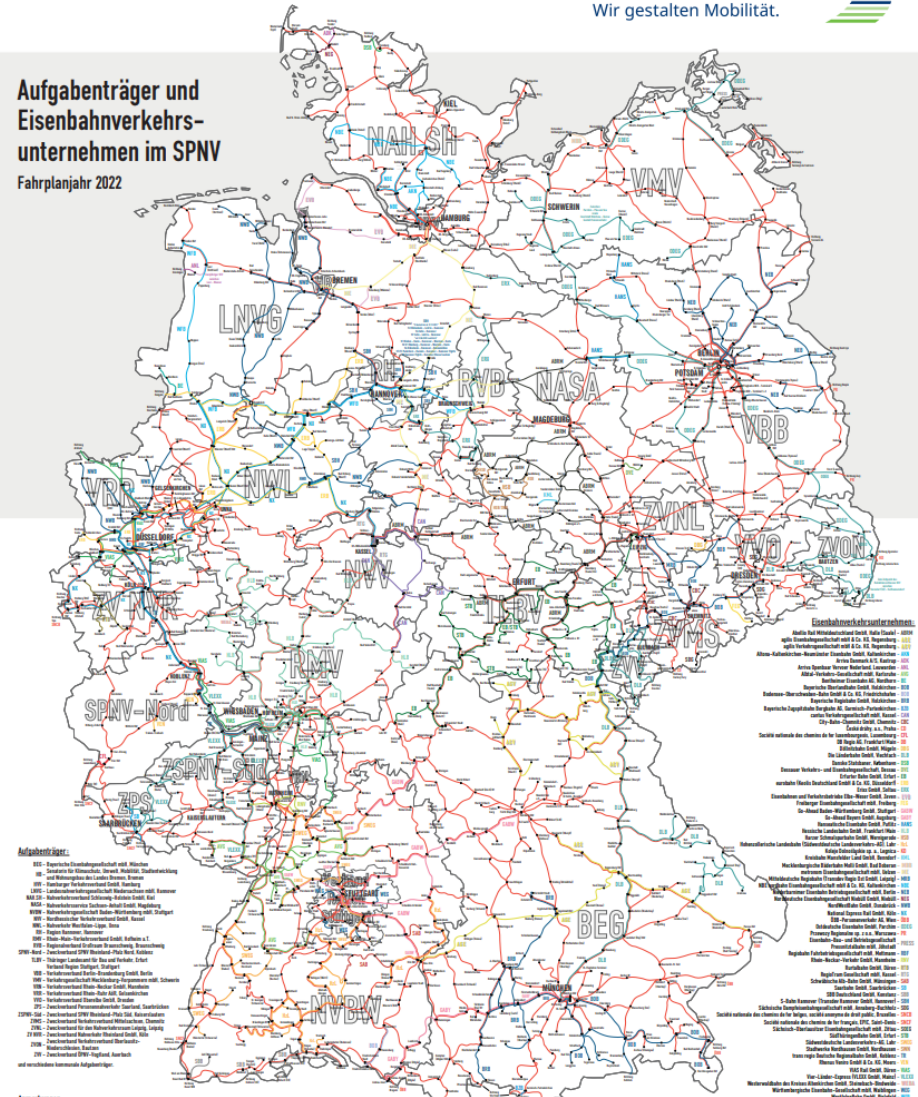
SPNV Aufgabenträger

Aufgabenträger:

- BEG - Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH, München
- HB - Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau des Landes Bremen, Bremen
- HVV - Hamburger Verkehrsverbund GmbH, Hamburg
- LNVG - Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH, Hannover
- NAH.SH - Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein GmbH, Kiel
- NASA - Nahverkehrservice Sachsen-Anhalt GmbH, Magdeburg
- NVBW - Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg mbH, Stuttgart
- NVV - Nordhessischer Verkehrsverbund GmbH, Kassel
- NWL - Nahverkehr Westfalen-Lippe, Unna
- RH - Region Hannover, Hannover
- RMV - Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH, Hofheim a.T.
- RVB - Regionalverband Großraum Braunschweig, Braunschweig
- SPNV-Nord - Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Nord, Koblenz
- TLBV - Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr, Erfurt
- Verband Region Stuttgart, Stuttgart
- VBB - Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg GmbH, Berlin
- VMV - Verkehrsgesellschaft Mecklenburg-Vorpommern mbH, Schwerin
- VRN - Verkehrsverbund Rhein-Neckar GmbH, Mannheim
- VRR - Verkehrsverbund Rhein-Ruhr AöR, Gelsenkirchen
- VVO - Verkehrsverbund Oberelbe GmbH, Dresden
- ZPS - Zweckverband Personennahverkehr Saarland, Saarbrücken
- ZPSNV-Süd - Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Süd, Kaiserslautern
- ZVMS - Zweckverband Verkehrsverbund Mittelsachsen, Chemnitz
- ZVNL - Zweckverband für den Nahverkehrsraum Leipzig, Leipzig
- ZVNR - Zweckverband Nahverkehr Rheinland GmbH, Köln
- ZVON - Zweckverband Verkehrsverbund Oberlausitz-Niederschlesien, Bautzen
- ZVV - Zweckverband ÖPNV-Vogtland, Auerbach

und verschiedene kommunale Aufgabenträger.

Aufgabenträger und Eisenbahnverkehrs- unternehmen im SPNV Fahrplanjahr 2022



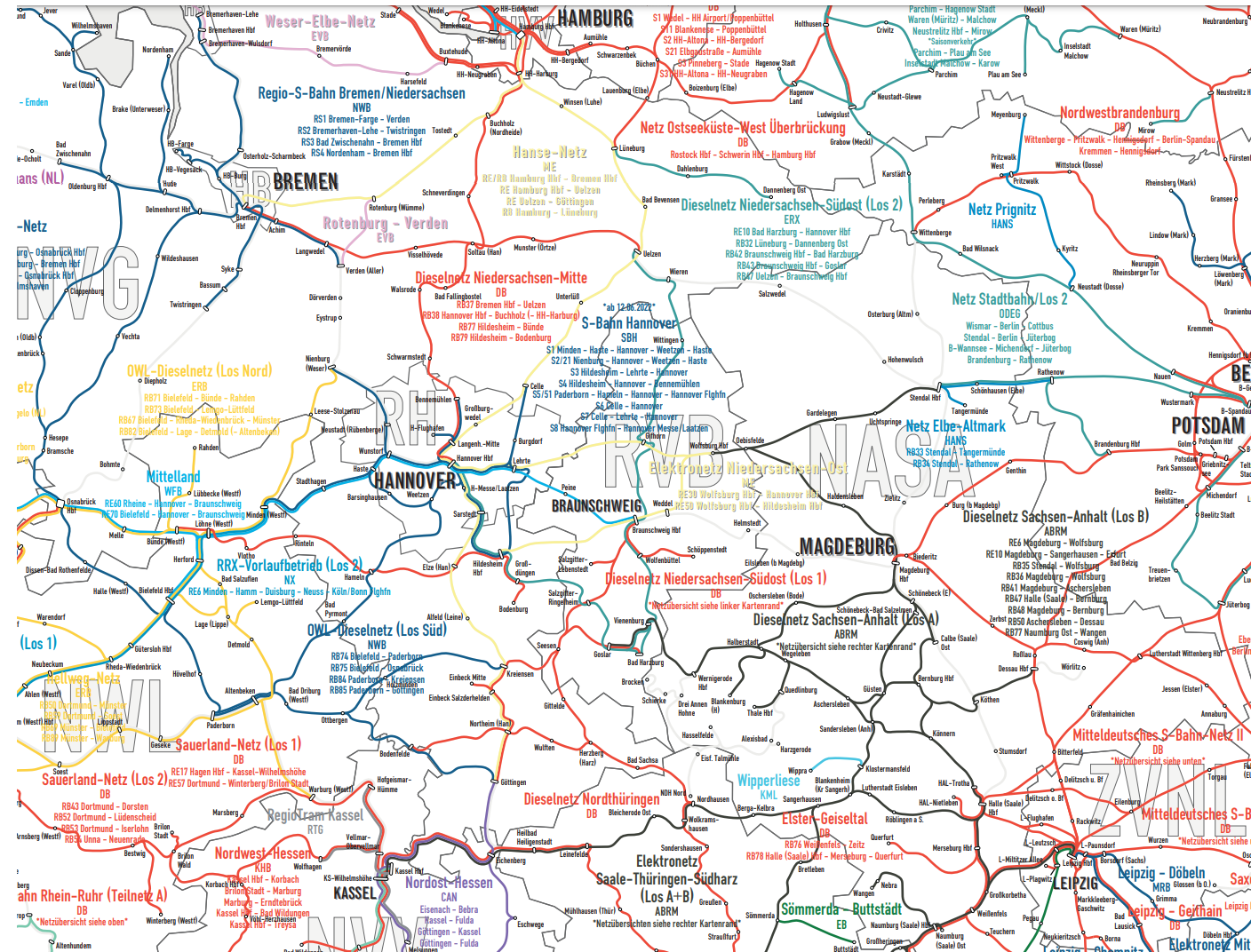
Quelle: <https://www.schienenahverkehr.de/wp-content/uploads/2022/01/2021-12-15-Aufgabentraeger-Eisenbahnverkehrsunternehmen-2022.pdf> (27.02.2022)



Betriebliche Situation SPNV

SPNV Aufgabenträger

- Zuschnitte der Wettbewerbsnetze
- Verkehrsangebote
- Strategische Festlegungen



Quelle: <https://www.schiennahverkehr.de/wp-content/uploads/2022/01/2021-12-15-Aufgabentraeger-Eisenbahnverkehrsunternehmen-2022.pdf> (27.02.2022)

Betriebliche Situation SPNV

SPNV – Aufgabenträger

- Zuschnitte der Wettbewerbsnetze



Netze der Eisenbahnverkehrsunternehmen im Großraum Braunschweig



Quelle: https://www.regionalverband-braunschweig.de/fileadmin/user_upload/05_Veroeffentlichungen/Regionalverkehr/NVP_2020/NVP2020_ANSICHT.pdf (26.04.2022)
https://www.regionalverband-braunschweig.de/fileadmin/user_upload/00_Grundlagen/Logos/Logo-Regionalverband_RGB-300dpi.png (26.04.2022)

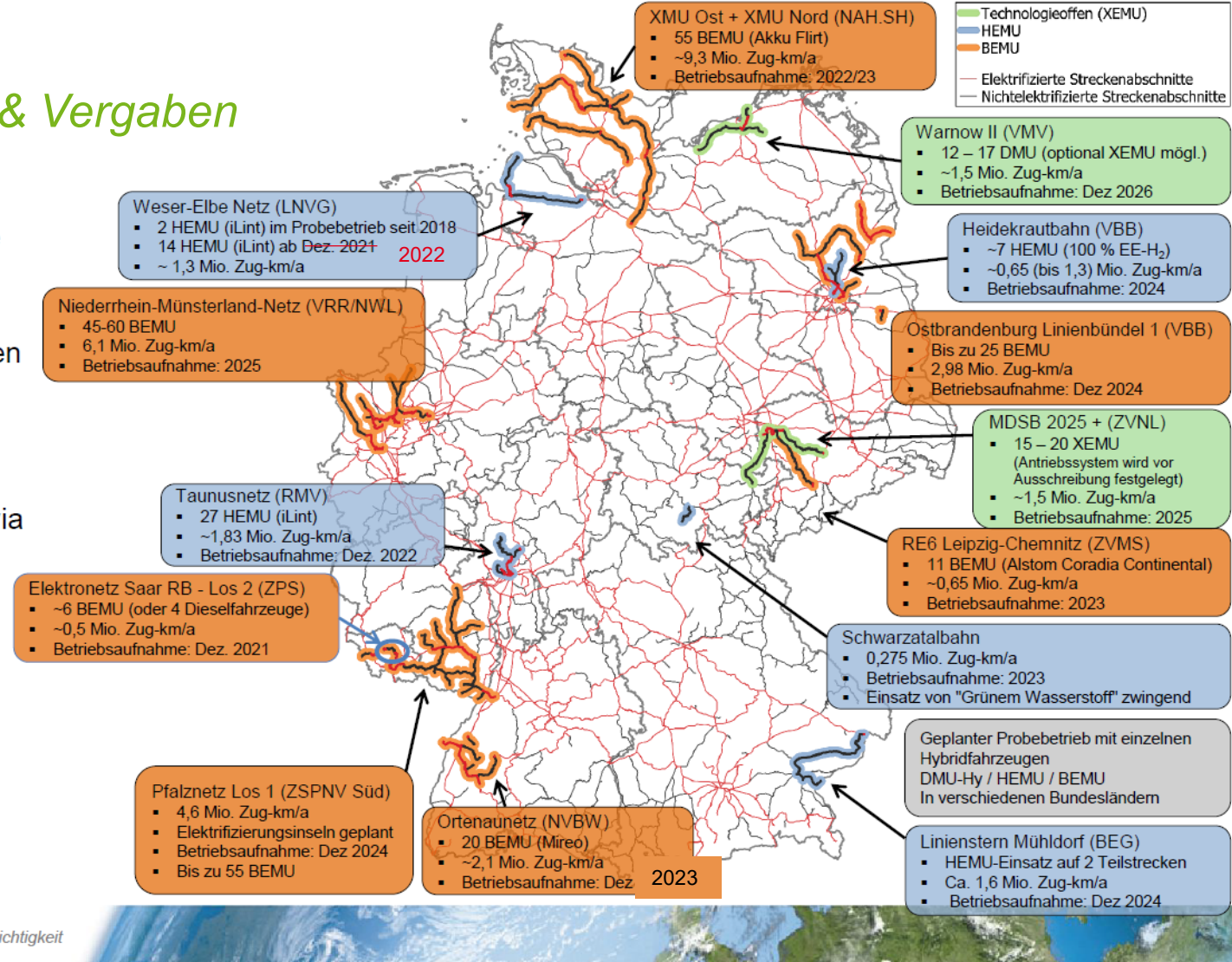
Betriebliche Strategien

SPNV Wettbewerbsverfahren & Vergaben

- Erste BEMU- und HEMU-Netze bereits festgelegt
- Weitere Vergabeverfahren laufen oder in Vorbereitung

Trends:

- Vorfestlegung Antriebssystem via Machbarkeitsuntersuchungen
- Vergabemodelle Lebenszyklus bis tlw. 30a



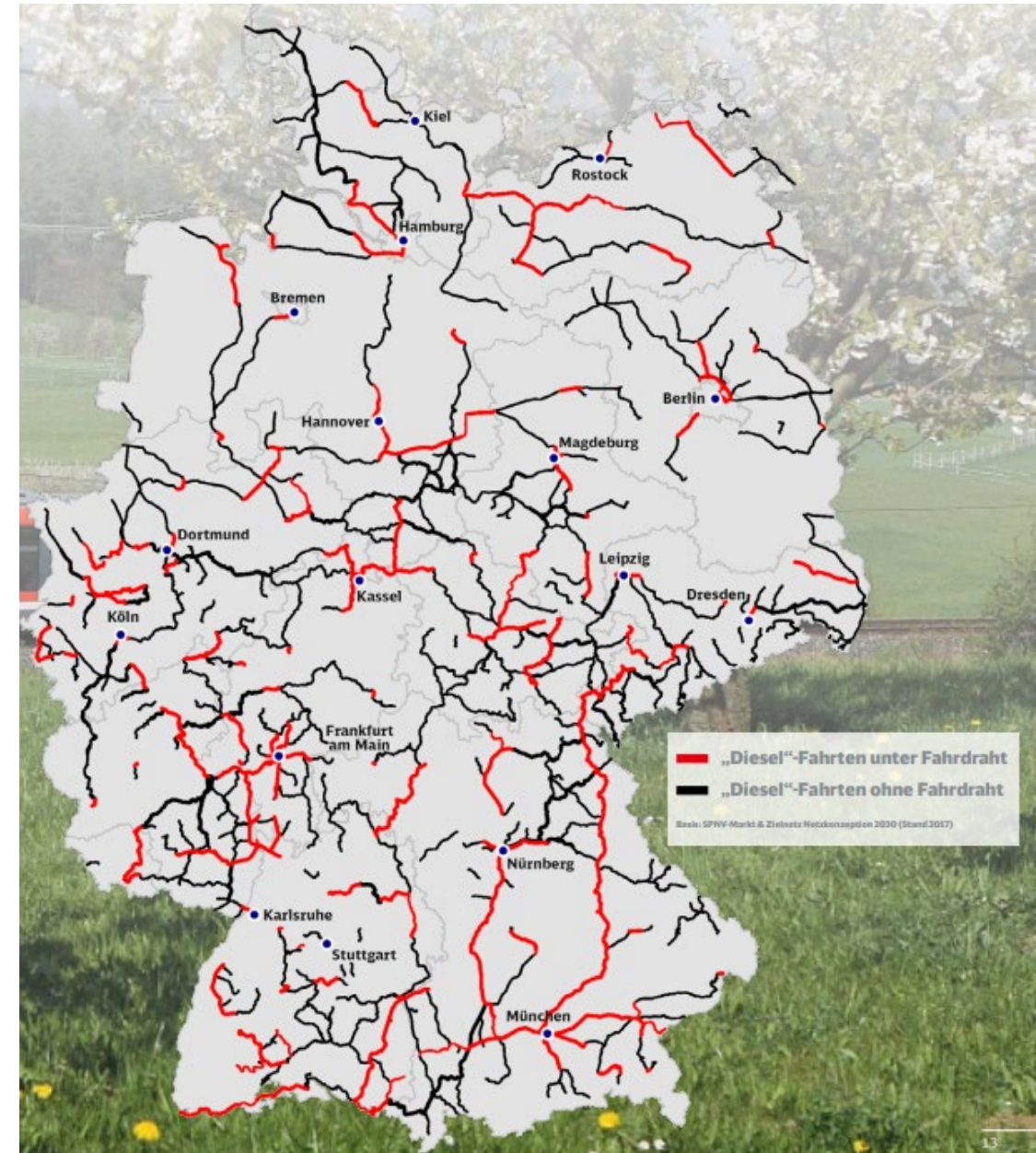


Betriebliche Strategien

„Diesel“-Fahrten unter Fahrdraht



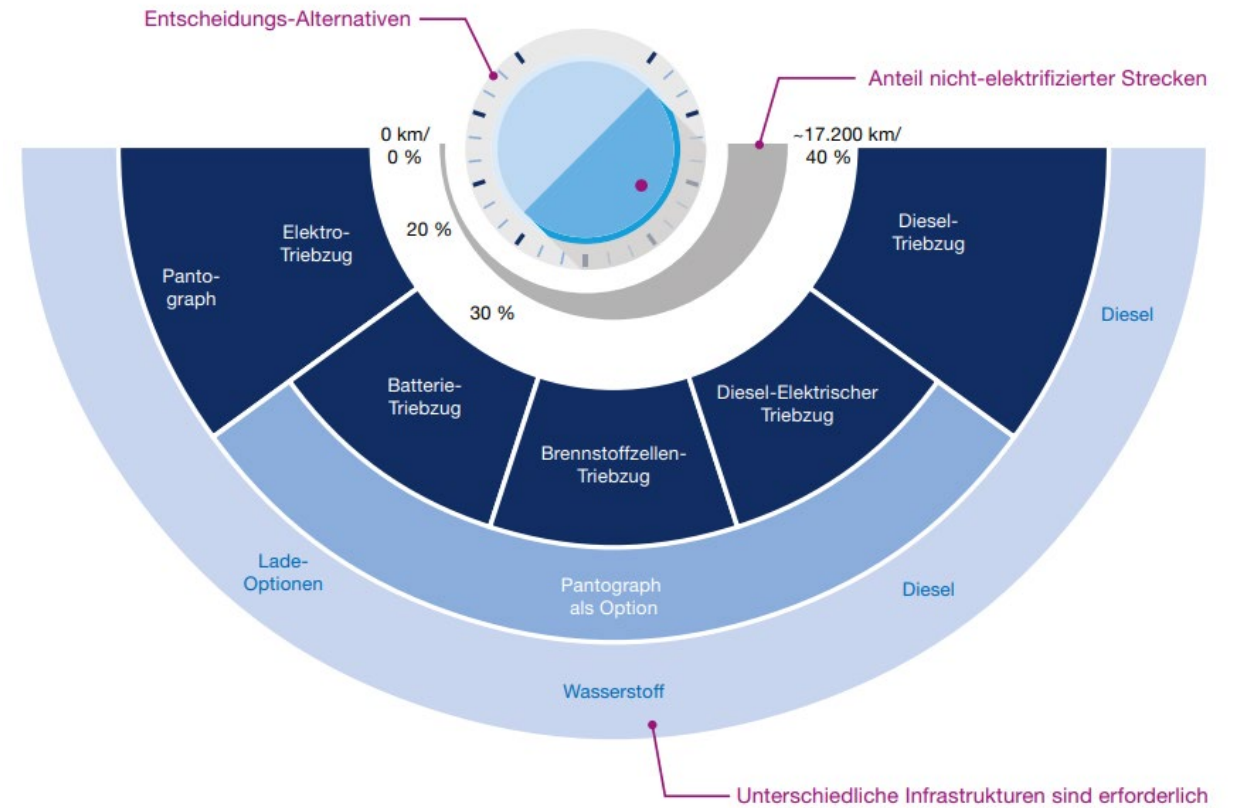
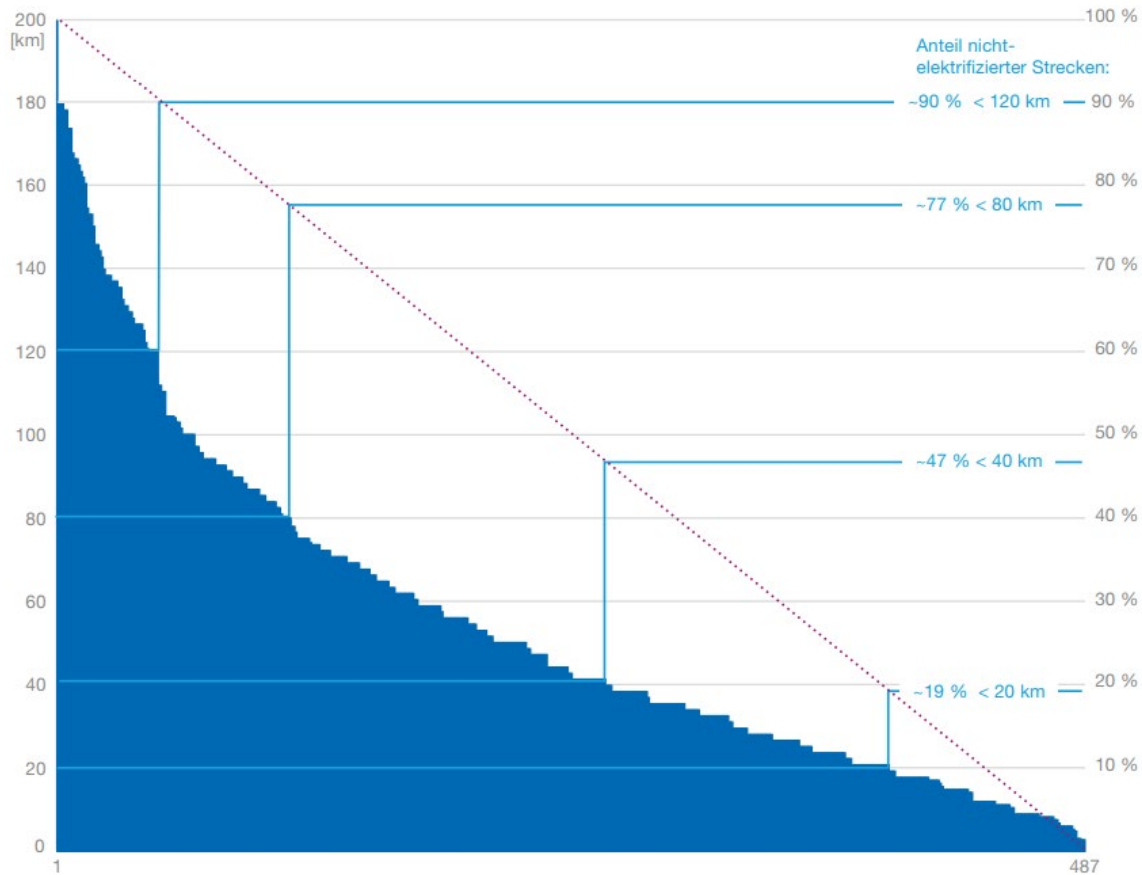
Fotos: M. Brey



Quelle: https://www.bahn.de/db_regio/view/mdb/db_regio/zukunftswerkstatt/mdb_278211_unter_strom.pdf (19.03.2021)

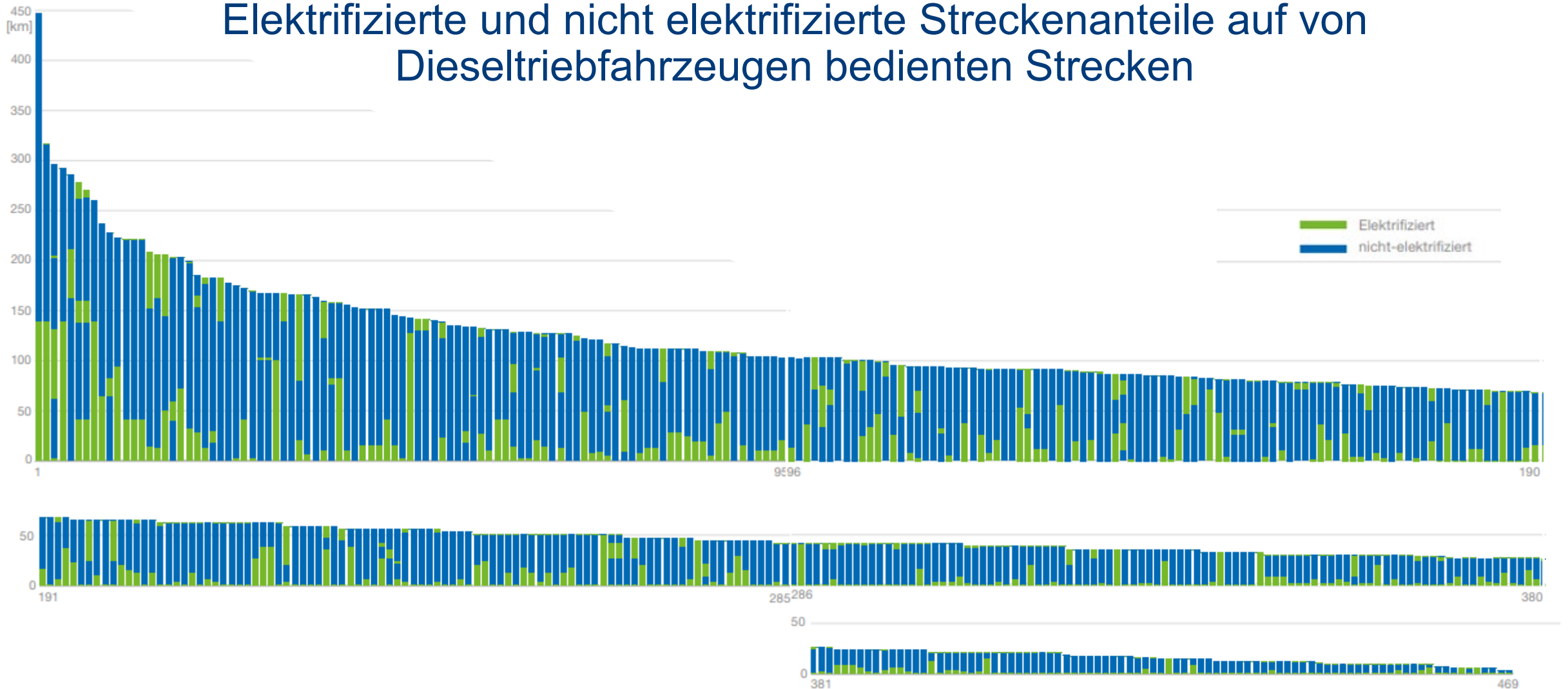
Elektromobilität Schiene

Aktuelle Situation – Anteil nicht elektrifizierter Strecken(abschnitte)



Quelle: <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)

Elektrifizierte und nicht elektrifizierte Streckenanteile auf von Dieseltriebfahrzeugen bedienten Strecken

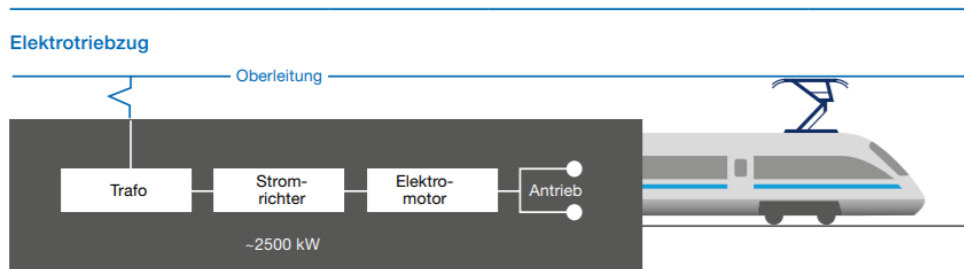


Quelle: <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)

Elektromobilität Schiene

Lösungsalternativen Fahrzeuge

Elektrotriebzüge (EMU)



Vorteile:

- lokal emissionsfrei
- max. Rückgewinnung der Bremsenergie (Rückspeisung Oberleitung)
- niedriger Instandhaltungsaufwand (EMU)
- hohe Beschleunigungswerte realisierbar
- hohe Geschwindigkeiten (üblich bis v_{max} 160 km/h im SPNV)
- große Kapazitäten (üblich 3 bis 6 Teiler) (Single oder Double Deck, Mixed)
- Mehr-/Mischtraktionsfähigkeit

Nachteile:

- nur unter Oberleitung einsetzbar
- vollständige Elektrifizierung des gesamten Einsatzstreckennetzes erforderlich

Bild: <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)

Symbol: <http://www.finanzkontor-nrw.de/pages/finanzierungsformen/leasing/vor-und-nachteile.php> (20.03.2022)

Elektromobilität Schiene

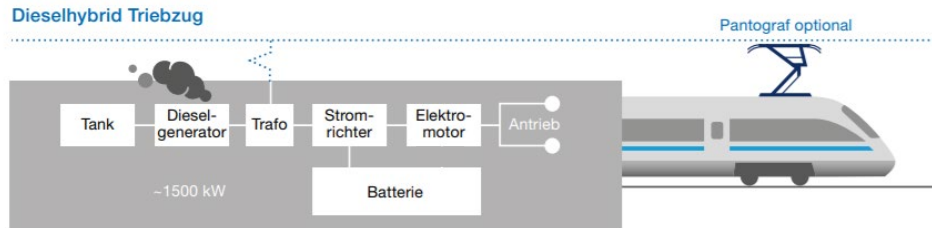
Lösungsalternativen Fahrzeuge



Vorteile:

- unter Oberleitung emissionsfrei
- Rückgewinnung der Bremsenergie (Batterie u. ggf. Oberleitung)
- nur teilweise Elektrifizierung notwendig
- mittlere Antriebsleistung
- je nach Energieinhalt der Batterie teilweiser emissionsfreier Betrieb (z. B. bei Beharrungsfahrt) möglich.

Dieselhybrid-Triebzug



Nachteile:

- lokale Emissionen im Dieselbetrieb
- erhöhter Instandhaltungsaufwand
- Tankinfrastruktur erforderlich
- ggf. nur kleiner Batteriespeicher
- begrenzte Lade-/Entladezyklen der Batterie
- hohe Betriebsmasse (Antriebs- und Tankausrüstung)
- aufwändiges Gewichtsmanagement

Beispiel:
Stadler Flirt
Hybridtriebzug

140 km/h

ohne Pantograf



Bild: In Anlehnung an <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schiennenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)
<https://www.stadlerail.com/media/pdf/fszdmu0819d.pdf> (20.03.2022) Symbol: <http://www.finanzkontor-nrw.de/pages/finanzierungsformen/leasing/vor--und-nachteile.php> (20.03.2022)

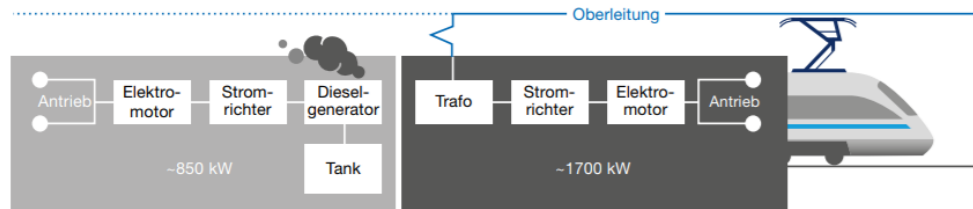
Elektromobilität Schiene

Lösungsalternativen Fahrzeuge



Dual-Mode Triebzug

Dual-Mode Triebzug



Beispiel:
Newag Impuls 2
Hybridtriebzug

E-Mode (3 kV): 160 km/h

D-Mode: 120 km/h



Vorteile:

- unter Oberleitung emissionsfrei
- Rückgewinnung der Bremsenergie nur unter Oberleitung
- nur teilweise Elektrifizierung der Strecke notwendig

Nachteile:

- lokale Emissionen im Dieselbetrieb
- geringe Antriebsleistung im Dieselbetrieb
- erhöhter Instandhaltungsaufwand
- Tankinfrastruktur erforderlich
- hohe Betriebsmasse (Antriebs- und Tankausrüstung)
- keine Rückgewinnung der Bremsenergie im D-Mode

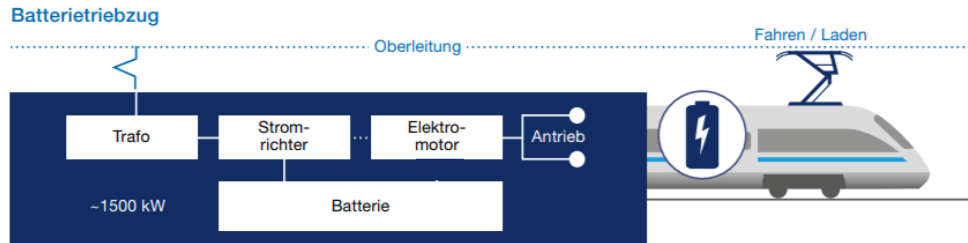
Bild: <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)
<https://www.newag.pl/en/offer/hybrydowy-zespol-trakcyjny-2/#gallery-1> (20.03.2022)

Symbol: <http://www.finanzkontor-nrw.de/pages/finanzierungsformen/leasing/vor-und-nachteile.php>
(20.03.2022)

Elektromobilität Schiene

Lösungsalternativen Fahrzeuge

Batterietriebzug (BEMU)



Beispiel:
Siemens Mireo Plus B



vmax. 160 km/h
Durchschnittl. Reichweite ca. 100 km
streckenabhängig
(Erprobung lt. Siemens durchgeführt)



Vorteile:

- lokal emissionsfrei
- Rückgewinnung der Bremsenergie (Oberleitung, Batterie)
- nur teilweise Elektrifizierung der Strecke notwendig
- mittlere bis hohe Antriebsleistung

Nachteile:

- begrenzte Lade-/Entladezyklen der Batterie
- strecken-/netzspezifische Auslegung der Batteriesystems bzw. fahrzeugspezifische Gestaltung des Oberleitungsversorgungsnetzes
- ggf. längere Ladezeiten sind im Betriebsablauf zu berücksichtigen

Ausblick:

- durch neue Batterietechnologien höhere Energie- und Leistungsdichten sowie höhere Zyklenwerte absehbar ►

Reichweitenerhöhung

Bild: In Anlehnung an <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)
<https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/schiene/stories/absolut-zukunftsfaehig-der-mireo-plus-b.html> (20.03.2022) Symbol: <http://www.finanzkontor-nrw.de/pages/finanzierungsformen/leasing/vor-und-nachteile.php> (20.03.2022)

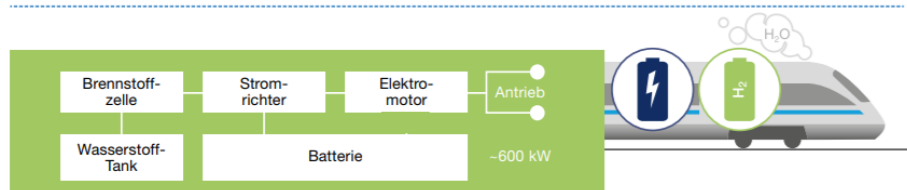
Elektromobilität Schiene

Lösungsalternativen Fahrzeuge



Brennstoffzellen-Batterietriebzug (FCEMU / HMU)

H2-BZ-Triebzug



Vorteile:

- lokal emissionsfrei (nur H₂O)
- Nutzbremse (Batterie)
- niedrige Geräuschemission

Nachteile:

- mittlere Antriebsleistung
- begrenzte Lade-/Entladezyklen der Batterie
- begrenzte Lebensdauer der Brennstoffzelle
- begrenzte Lebensdauer der Tanks
- höherer Instandhaltungsaufwand
- spezielle H₂-Tankinfrastruktur notwendig

Beispiel:
Alstom Coradia iLint 54

vmax. 140 km/h

Antriebsleistung 2 x 390 kW



Symbol: <http://www.finanzkontor-nrw.de/pages/finanzierungsformen/leasing/vor--und-nachteile.php>
(20.03.2022)

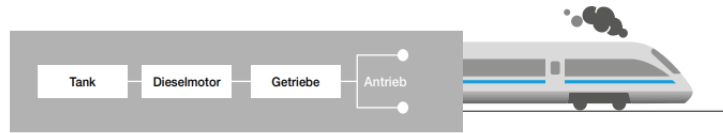
Bild: In Anlehnung an <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltreibzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)

Foto – Quelle: Marco Brey

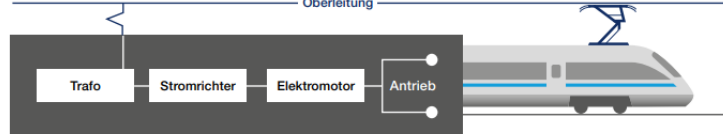
Elektromobilität Schiene

Bewertungsverfahren

Dieseltriebzug DMU



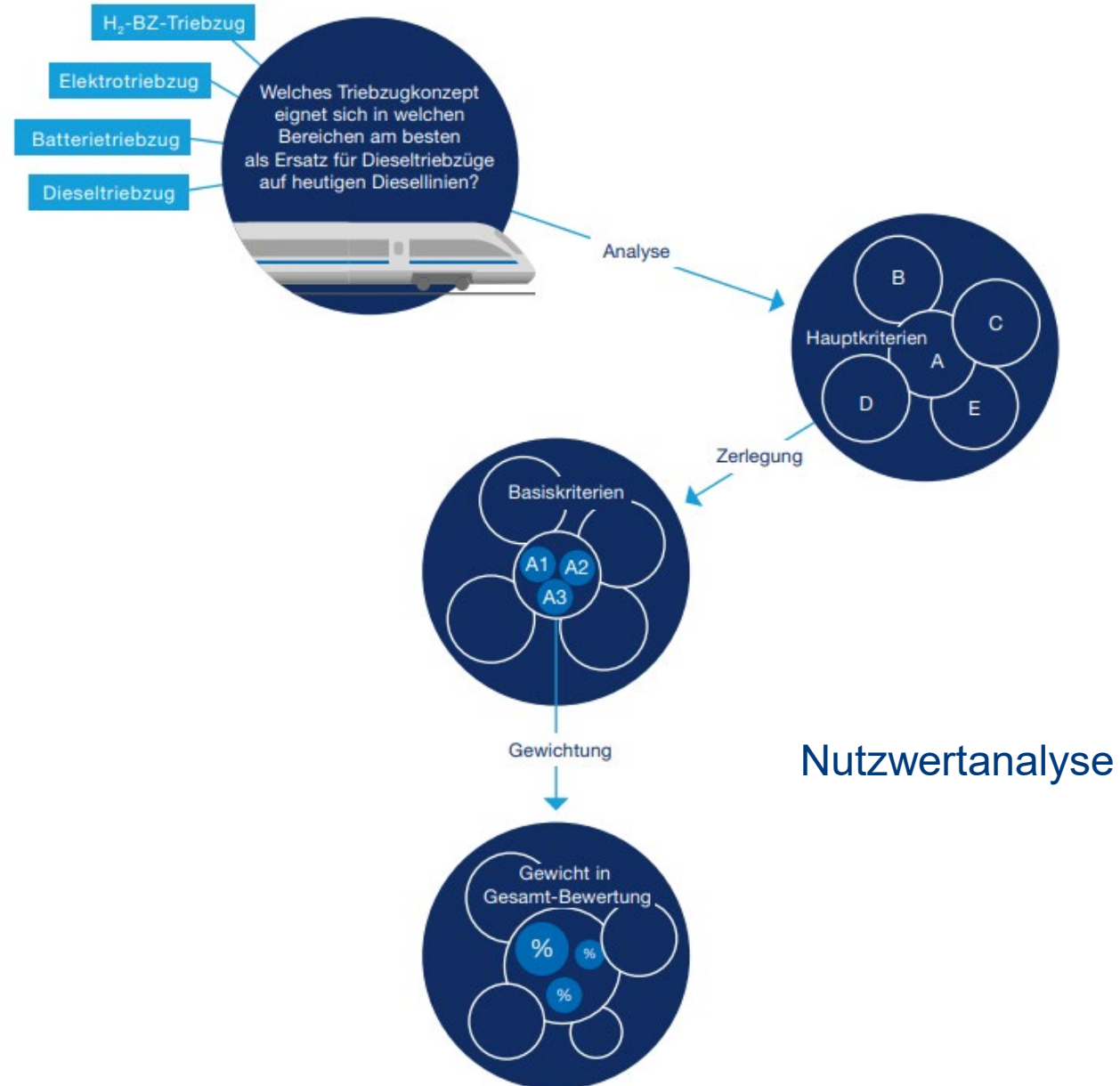
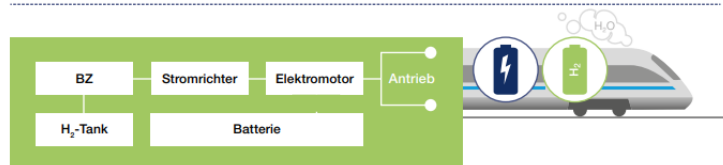
Elektrotriebzug EMU



Batterietriebzug BEMU



Wasserstoff-Brennstoffzellen-Triebzug HEMU



Nutzwertanalyse

Quelle: In Anlehnung an <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (28.02.2022)

Elektromobilität Schiene

Untersuchung generischer Betriebskonzepte für Triebzüge

Personenverkehr

- RB 0: Regionalverkehr ohne Elektrifizierung (EG 0)
- RB 10: Regionalverkehr mit Elektrifizierung im Bereich eines Bahnhofs (EG 10)
- RB 50: Regionalverkehr mit Teilelektrifizierung auf der Strecke (EG 50)
- RB 80: Regionalverkehr mit Elektrifizierungslücken (EG 80)
- RE 0: Regionalexpress ohne Elektrifizierung (EG 0)
- RE 10: Regionalexpress mit Elektrifizierung im Bereich eines Bahnhofs (EG 10)
- RE 50: Regionalexpress mit Teilelektrifizierung auf der Strecke (EG 50)
- RE 80: Regionalexpress mit Elektrifizierungslücken (EG 80)
- IC 80: Intercityverkehr mit Elektrifizierungslücken (EG 80)



Betriebsszenario & Elektrifizierungsgrad	BDMU	HMU	BEMU	DEMU	Wspeicher/ kWh
	Diesel-Vollhybrid	Wasserstoff	Batterie+OL	Diesel+OL	Basis BEMU
RB 0	2	3	1	0	366
RB 10	2	2	3	0	329
RB 50	2	2	3	1	183
RB 80	2	2	3	1	73
RE 0	2	3	0	0	2270
RE 10	2	3	0	2	2043
RE 50	2	3	1	2	1135
RE 80	2	1	3	2	454
IC 80	2	3	2	2	852

Abbildung 40: Kompatibilitätsmatrix innovative Technologien für Personenverkehrsprofile

0	Ungeeignet
1	Bedingt geeignet
2	Geeignet
3	Vorzugslösung

Innovatives Triebfahrzeug - Abschlussbericht „Identifizierung von Forschungsansätzen und technischen Grundlagen zur Entwicklung eines leiseren, umweltfreundlicheren und betriebswirtschaftlich darstellbaren innovativen Triebfahrzeugs für bislang nicht elektrifizierte Netze“ (2020)

Bild: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/innovatives-triebfahrzeug-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile (28.02.2022)

Elektromobilität Schiene

TCO Bewertung BEMU / HMU

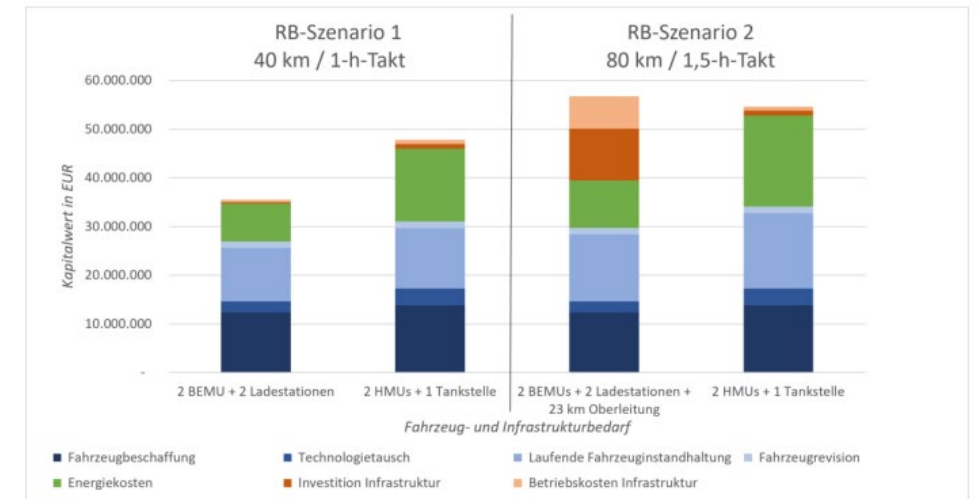
	Einheit	BEMU	HMU
Anfangsinvestitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur			
Investition je beschafftes Fahrzeug	€	6.200.000	6.900.000
Investition je elektrifizierter Kilometer	€	950.000	–
Investition je Ladestation/Tankstelle	€	250.000	1.000.000
Zyklische Fahrzeugkosten			
Revisionskosten (alle 8 Jahre)	€	230.000	245.000
Austauschkosten Batterie (alle 12 Jahre)	€	600.000	350.000
Austauschkosten Brennstoffzelle (alle 8 Jahre)	€	–	400.000
Jährliche Infrastrukturbetriebskosten			
Betriebskosten p. a. Strecken elektrifizierung	€/km	9.500	–
Betriebskosten p. a. je Ladestation/Tankstelle	€	10.000	100.000
Fahrleistungsspezifische Kosten			
Laufende Fahrzeuginstandhaltungskosten	€/km	0,85	0,95
Spezifische Traktionsenergiekosten	€/km	0,60	1,15

Alternative Antriebe im Schienenverkehr – Fraunhofer-Institut (2022)

Bild: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2022/WP01-2022_Alternative_Antriebe_im_Schienenverkehr_Frank_Gnann.pdf (20.03.2022)

Anwendungsfall	Szenario 1: 40 km / 1-h-Takt		Szenario 2: 80 km / 1,5-h-Takt	
Antriebsoption	BEMU	HMU	BEMU	HMU
Benötigte Fahrzeuge	2	2	2	2
Benötigte Infrastruktur	2 Ladestationen	1 Tankstelle	2 Ladestationen, 23 km Oberleitung	1 Tankstelle
Anfangsinvestitionen				
Fahrzeugbeschaffung	12.400	13.800	12.400	13.800
Infrastruktur	500	1.000	22.350	1.000
Kosten im Betrachtungszeitraum				
Technologietausch	2.199	3.503	2.199	3.503
Laufende Instandhaltung	11.054	12.355	13.818	15.443
Revision	1.277	1.360	1.277	1.360
Energie	7.803	14.956	9.754	18.695
Betrieb der Infrastruktur	557	835	6.639	835
Restwerte nach Betrachtungszeitraum				
Infrastruktur	261	–	11.683	–
Kapitalwerte gesamt	35.528	47.809	56.753	54.636

BEMU und HMU im TCO-Vergleich. Kapitalwerte in Tausend € über Fahrzeugnutzungsdauer von 30 Jahren, Basisjahr 2020, Kalkulationszins von 0,49 %



Elektromobilität Schiene

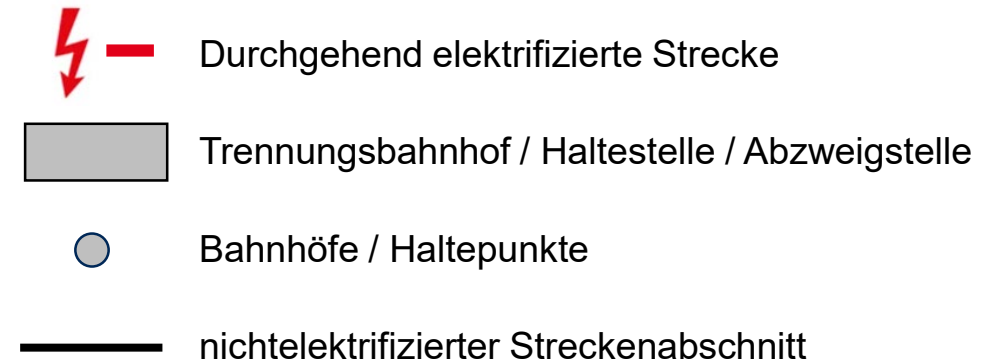
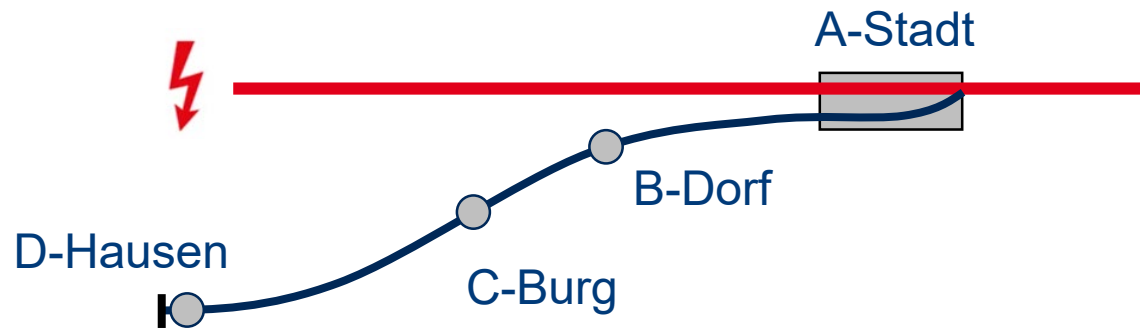
Benötigte Infrastruktur HMU: H₂Tankstelle



Quelle: eigene Bilder

Elektromobilität Schiene

Lösungsvarianten für BEMU



Szenario 0 (Ausgangssituation):

Das BEMU-Fahrzeug muss eine ausreichende Batteriekapazität für den Hin- und Rückweg haben.

Was kann getan werden, wenn

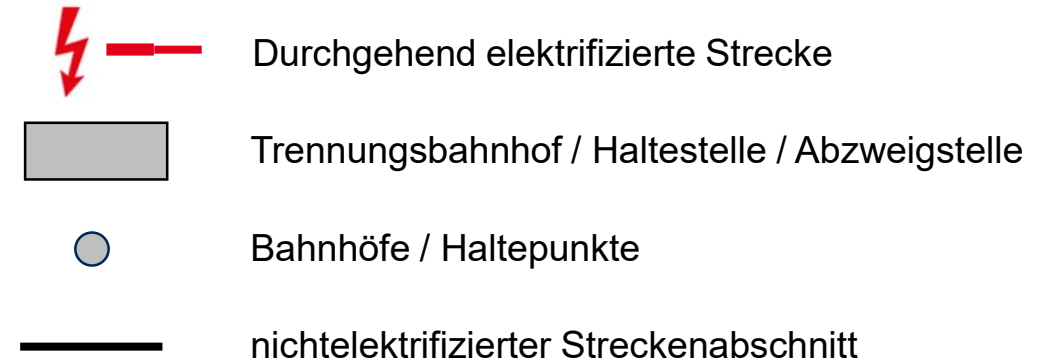
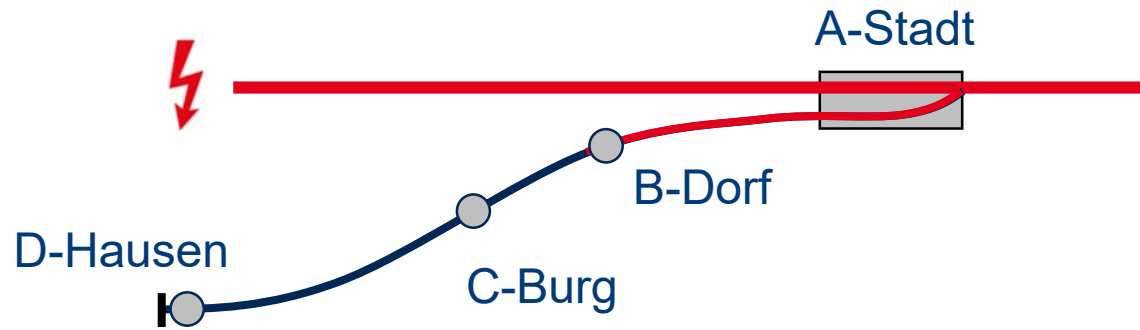
- die Reichweite nicht ausreicht?
- das Fahrzeuggewicht zu hoch wird?



Voll- oder Teilelektrifizierung der Strecke oder
HMU Fahrzeugeinsatz

Elektromobilität Schiene

Lösungsvarianten für BEMU

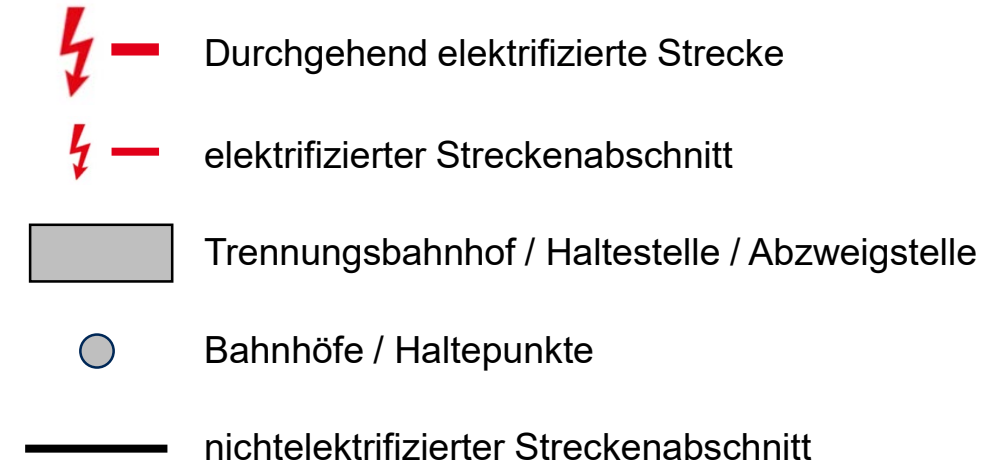
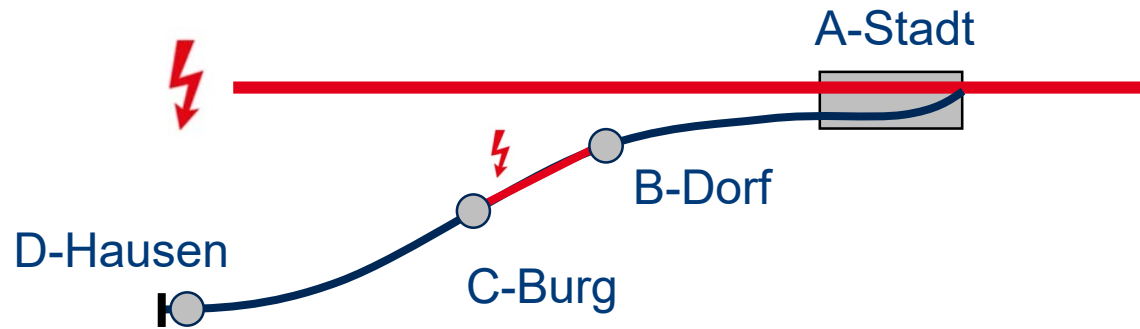


Szenario 1: Verlängerung der Oberleitung

- a) Elektrische Triebfahrzeuge ohne Batterie können die Stichstrecke bis zum Ende der Fahrleitung befahren.
- b) Verkürzung der Distanz für BEMU zum Endbahnhof/Endhaltehaltepunkt.

Elektromobilität Schiene

Lösungsvarianten für BEMU

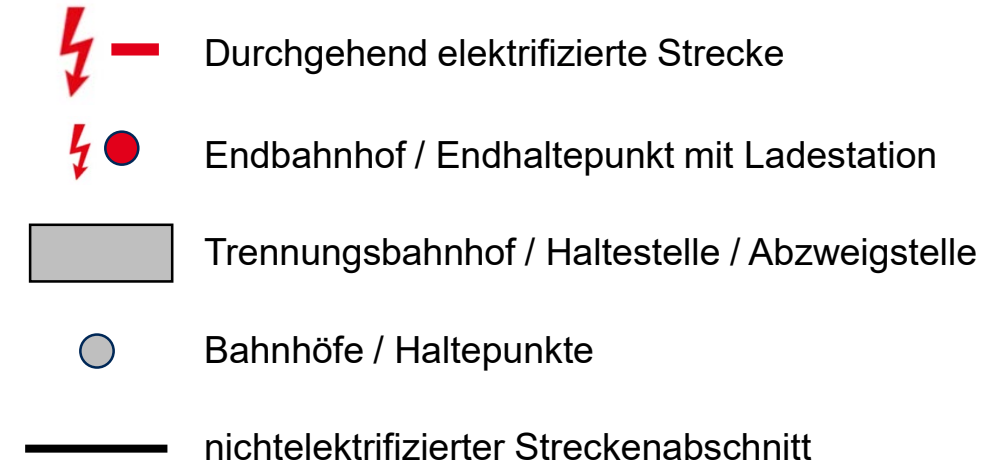
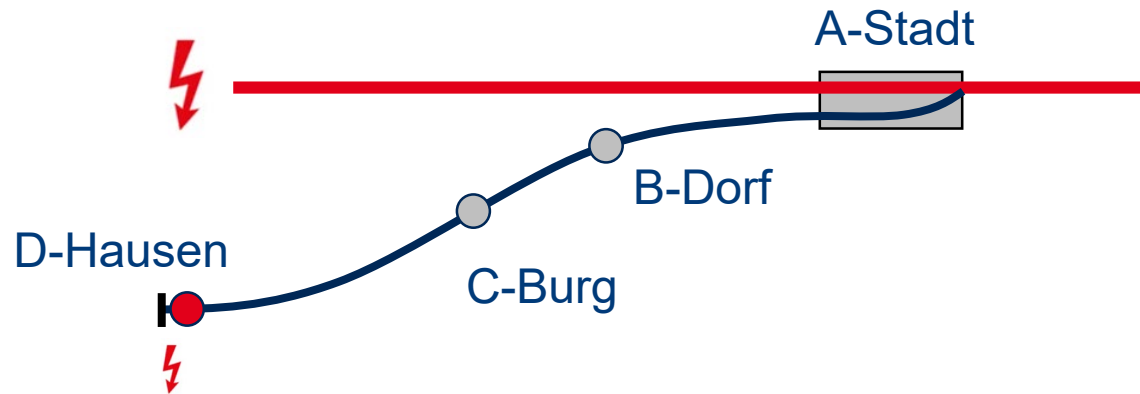


Szenario 2: Oberleitungs-Inselanlage (OLIA)

- a) OLIA kann nur von BEMU erreicht werden.
- b) Laden der Batterien während des Fahrgastwechsels und der Fahrt im Oberleitungsabschnitt möglich.
- c) Zusätzliche Einspeisung seitens der Infrastruktur zwingend erforderlich.
- d) Besondere betriebliche Regelungen erforderlich (Mehrkrafttriebfahrzeug)

Elektromobilität Schiene

Lösungsvarianten für BEMU



Szenario 3: Ladestation für stationäres Aufladen

- Laden der Batterien nur während des Aufenthalts am Endbahnhof/Endhaltepunkt
- Einspeisung kann unterschiedlich realisiert werden (Oberleitung, Stromtankstelle),
Umrichter nicht zwingend erforderlich.

Elektromobilität Schiene

Dimensionierung und Betrieb der Ladeinfrastruktur

Quelle: Vortrag Dr. Felix Dschung (Furrer+Frey / SWT) Tagung: Elektromobilität Schiene, DVV-Veranstaltung September 2020

Fiktives Beispiel

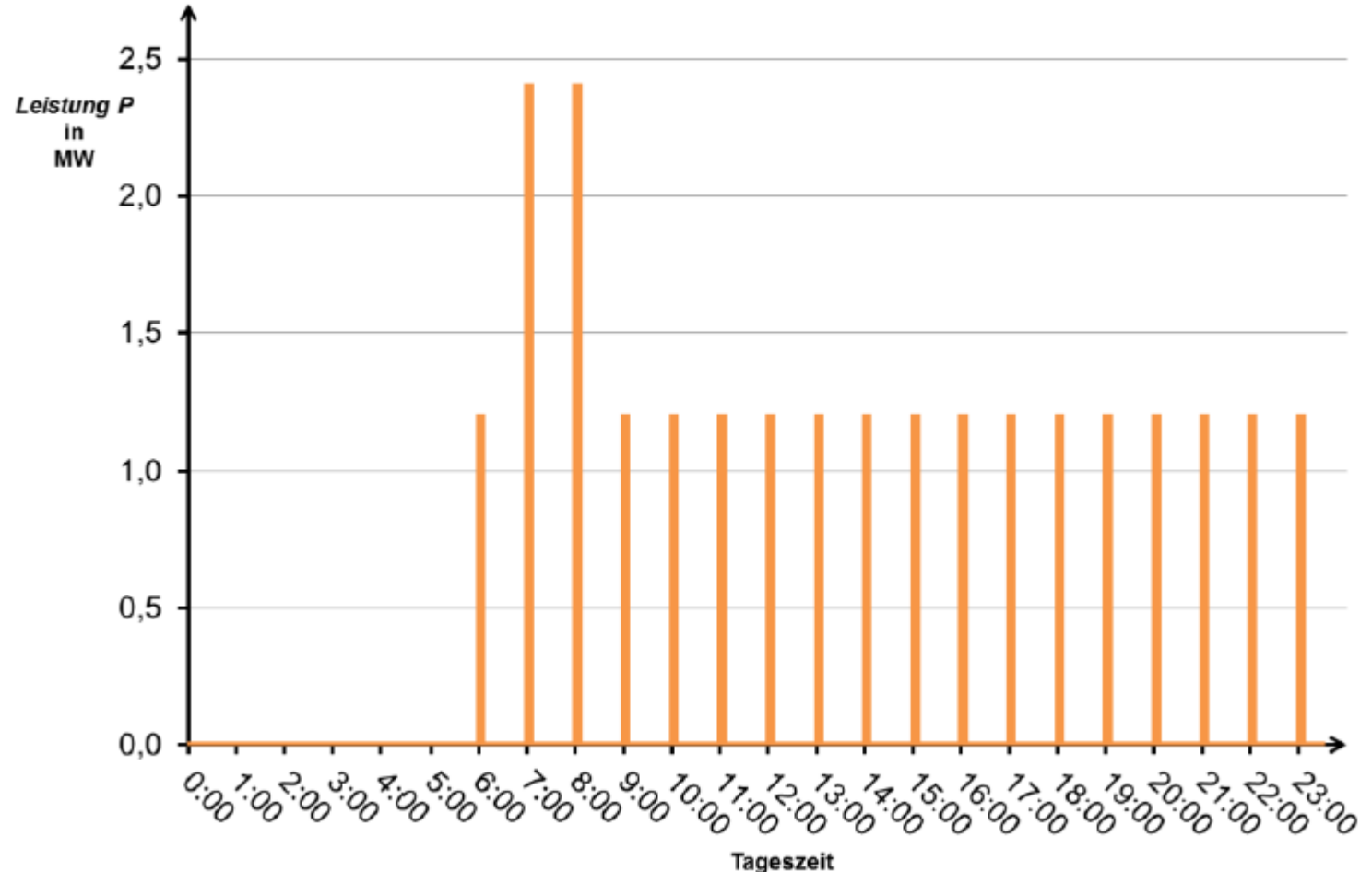
- Stundentakt
- in der HVZ Doppeltraktion
- 5 min Ladezeit
- Leistungsaufnahme
 - Einfachtraktion: 1,2 MW
 - Doppeltraktion: 2,4 MW

Erkenntnisse

- Einspeisestelle für Spitzenleistung auszulegen
- Deterministisches Verhalten
- Schlecht ausgenutzter Netzanschluss (< 2500 h/a)



Leerlaufzeit > 90%



Elektromobilität Schiene

Neue Möglichkeiten - Ladeinfrastruktur

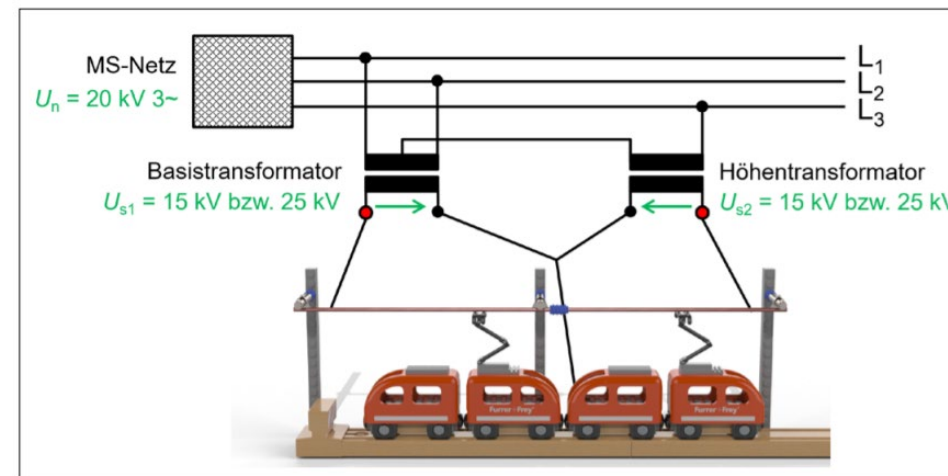
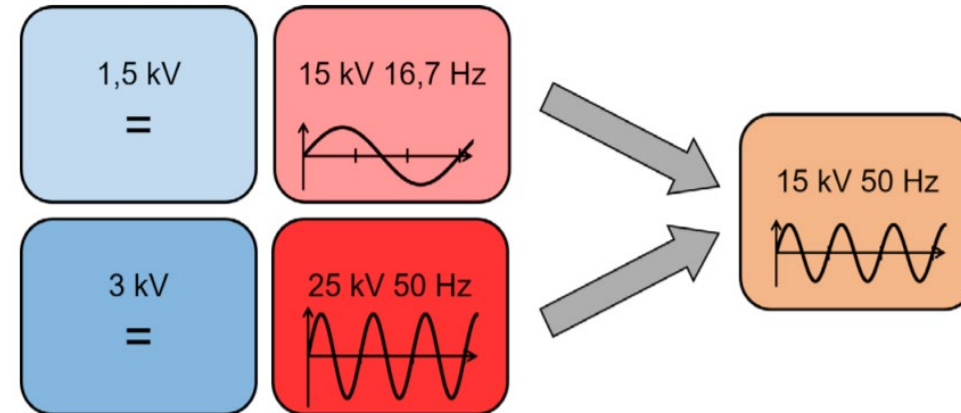
50-Hz-Schnellladestation für Batterietriebzüge

Ladung direkt aus dem 50-Hz-MS-Netz



Schnellladestation „VOLTAP“ der
Furrer + Frey AG und den Stadtwerken Tübingen

Quelle: Dr. Felix Dschung, Furrer + Frey AG
Fachartikel im **EI-Der Eisenbahningenieur** Heft 02/2022
50-Hz-Schnellladestation für Batterietriebzüge



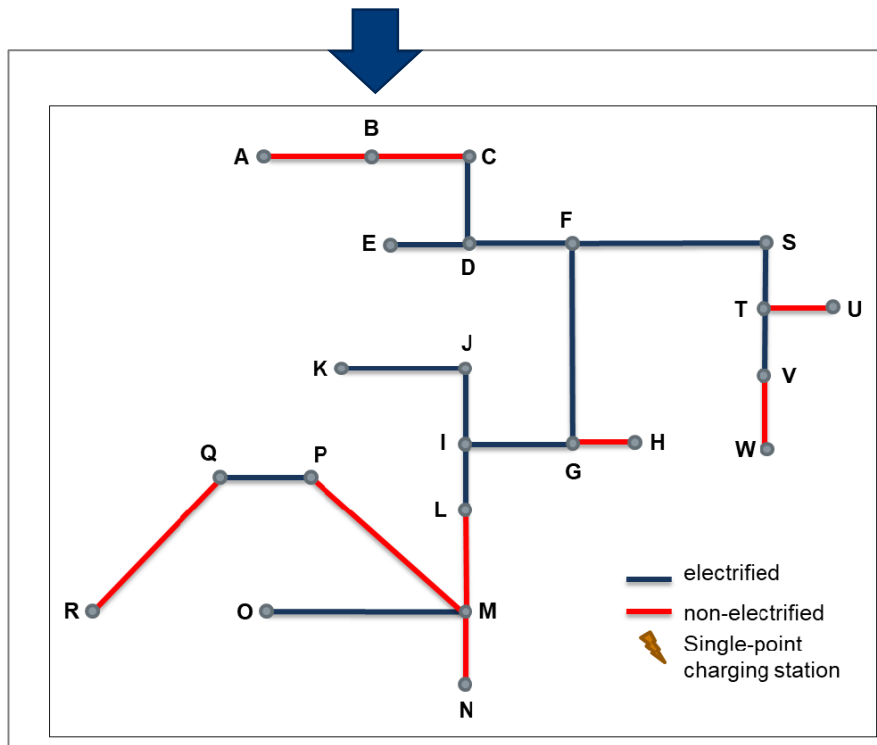
Transformator in
Scott-Schaltung



Elektromobilität Schiene

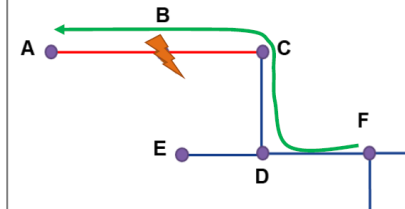
Spezifische Netzsimulation

Längster nicht-elektrifizierter Abschnitt zwischen A und C ca. 60 km



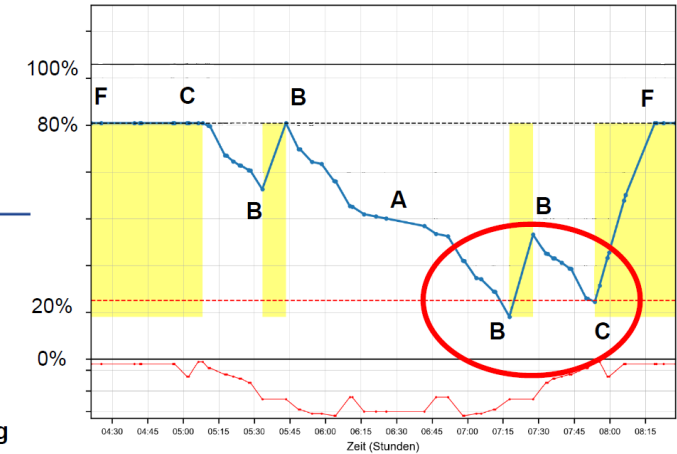
Quelle: Vortrag Stefan v. Mach, Augustin Hennion (BOMBARDIER) –
Tagung: Elektromobilität Schiene, DVV-Veranstaltung September 2020 mit Korrekturen M. Brey

Linie 5 Elektrifizierung in B

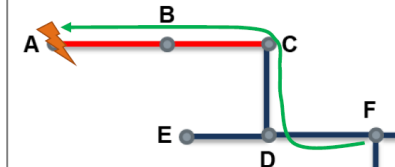


— Betrieb von Linie 5 ist trotz Elektrifizierung in B energetisch nicht machbar.

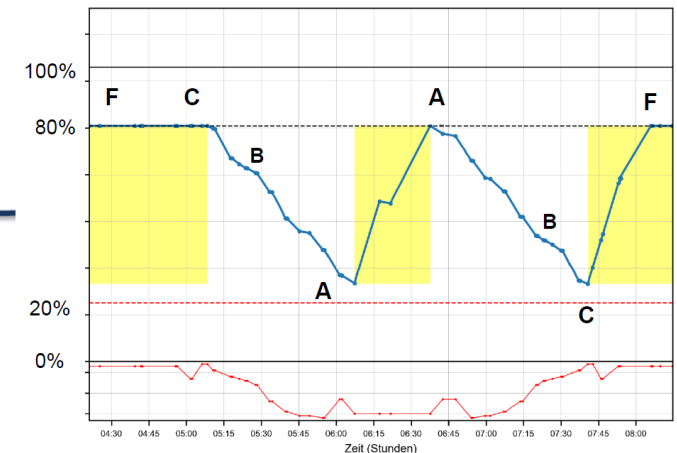
→ Elektrifizierung in A notwendig



Linie 5 Elektrifizierung in A



— Betrieb von Linie 5 ist mit Elektrifizierung in A energetisch machbar



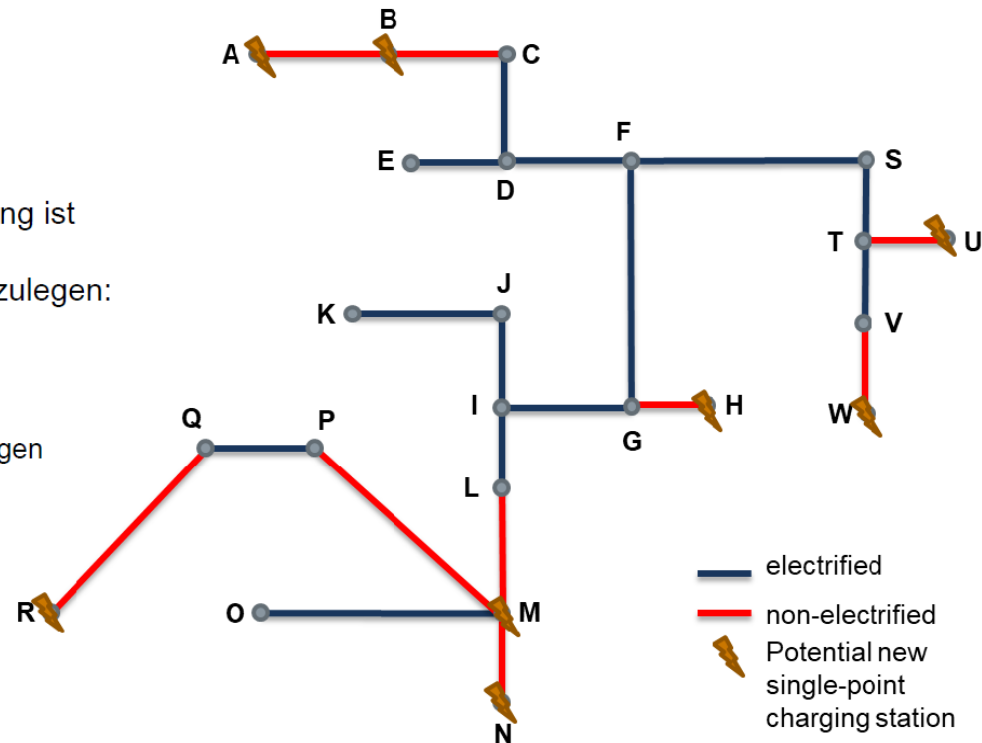
Elektromobilität Schiene

Spezifische Netzsimulation

Zielsetzung

Ziel ist:

- Zu zeigen, dass Teilelektrifizierung mit Ladestationen die wirtschaftlichste Lösung ist
- Optimale Szenarien zu suchen und festzulegen:
 - Wo elektrifiziert werden muss
 - Mit welcher Batteriekapazität
 - Mit welchen eventuellen Fahrplanänderungen



Quelle: Vortrag Stefan v. Mach, Augustin Hennion (BOMBARDIER) – Tagung: Elektromobilität Schiene, DVV-Veranstaltung September 2020

Entscheidend: **Strecken- und fahrplanbezogene Machbarkeitsuntersuchungen**, dabei sind vor allem die Batteriegröße und Positionierung von Ladeinfrastruktur für jedes Netz zu optimieren.

Elektromobilität Schiene

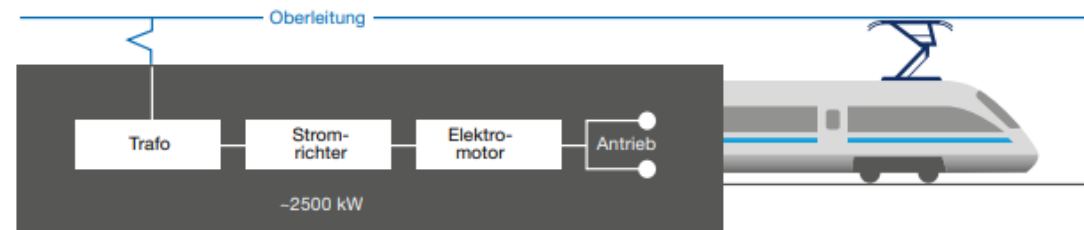
Fahrzeugtechnische Entwicklungen für Neufahrzeuge

Elektrotriebzüge (EMU)



Bildquelle: Eigenes Bild

Elektrotriebzug



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

Quelle: https://www.bahn.de/db_regio/view/mdb/db_regio/zukunftswerkstatt/mdb_278211_unter_strom.pdf (19.03.2021)

Elektromobilität Schiene

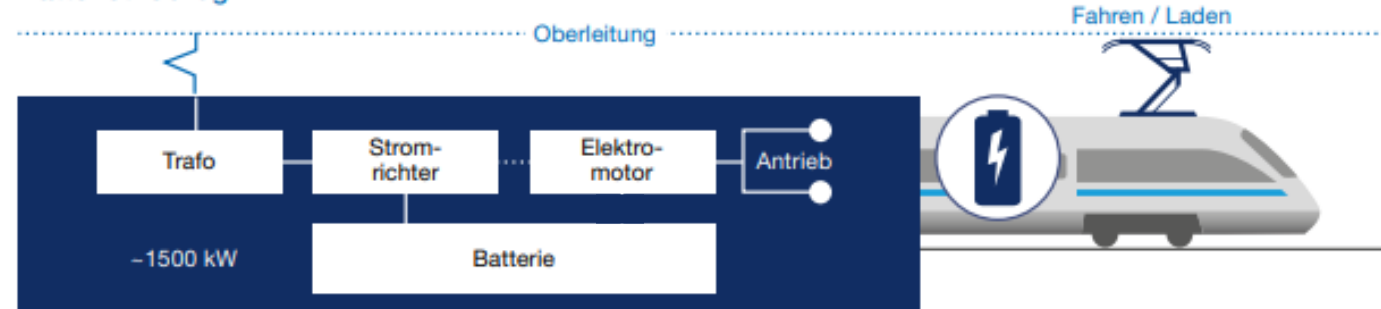
Fahrzeugtechnische Entwicklungen für Neufahrzeuge

Batterietriebzüge (BEMU)



Quelle: [auto-motor-und-sport.de](https://www.auto-motor-und-sport.de) (19.03.2021)

Batterietriebzug



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

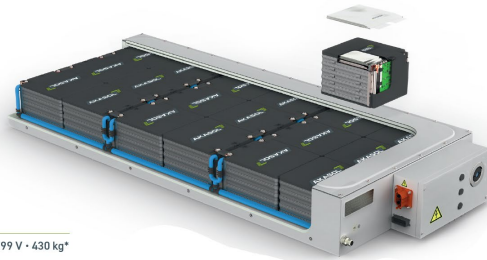
Quelle: In Anlehnung an https://www.bahn.de/db_regio/view/mdb/db_regio/zukunftswerkstatt/mdb_278211_unter_strom.pdf (19.03.2021)

<https://www.stadlerail.com/de/medien/article/185-kilometer-reichweite-stadler-schliesst-forschungsprojekt-batterietechnologie-mit-dem-flirt-akku-erfolgreich-ab/918/> (28.02.2022)

Elektromobilität Schiene

Batteriesysteme

18 AKM 46 POC



334 kW • 36.8 kWh • 799 V • 430 kg*
Typical product configuration.
Appearance and interfaces may vary.

CERTIFIED ACCORDING TO RAILWAY AND AUTOMOTIVE STANDARDS.

- > Development according to ISO 26262 up to ASIL C / EN 61508 SIL 2 possible
- > Tested safety (USABC, IEC, SAE, EN 50657, EN 50129, UN 38.3) and „real world“ experience
- > Multi-level short circuit protection on system level
- > Additional operating safety due to redundant battery management system
- > Suitable for multi-string systems with monitoring on single-string and full system level
- > Protection classes IP67 to IP6K9K possible
- > Robust and proven control unit BMS master (SIL2 compatible hardware)
- > SOC / SOH analysis
- > Single cell voltage monitoring and balancing

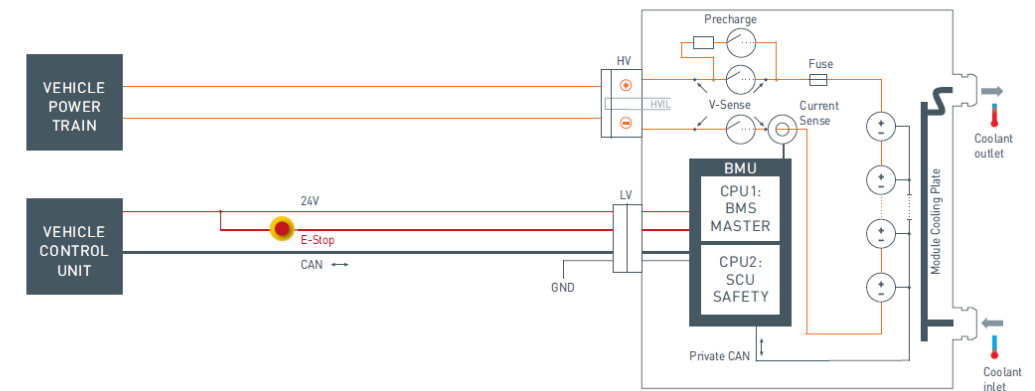
SCALABLE. VALIDATED. DURABLE.

- > High energy and performance density
- > Easy system connectivity / ready-to-install (aligned connection points, standardized CAN bus, optional VDA / SAE cooling connections)
- > Excellent price-performance ratio as a result of the development for serial production
- > Liquid cooling for even temperature distribution
- > Compact and lightweight solution, significant volume reduction due to liquid cooling
- > Long service life due to active and passive thermal management
- > Exceptionally robust, stainless steel battery case
- > Serial production, ISO 9001 compliant
- > Passive cell balancing
- > Maintenance-free operation

ELECTRICAL DATA	AKASYSTEM 18 AKM 46 POC
Cell connection in module	12s1p
Capacity	46 Ah
Energy	36.8 kWh
Technology	Li-Ion NANO nMC
Nominal voltage	799 V
Voltage (max.)	907 V
Voltage (min.)	583 V
Discharging power max. (10s) ^A	334 kW
Charging power max. (10s) ^A	184 kW
Continuous power (RMS)	92 kW
Power consumption in standby mode	9.0 W
Cycle life (at 80% DoD, 25 C°)	> 7,000 cycles

^A Peak rating depending on fuse and cable / connector configuration / SOC and temperature

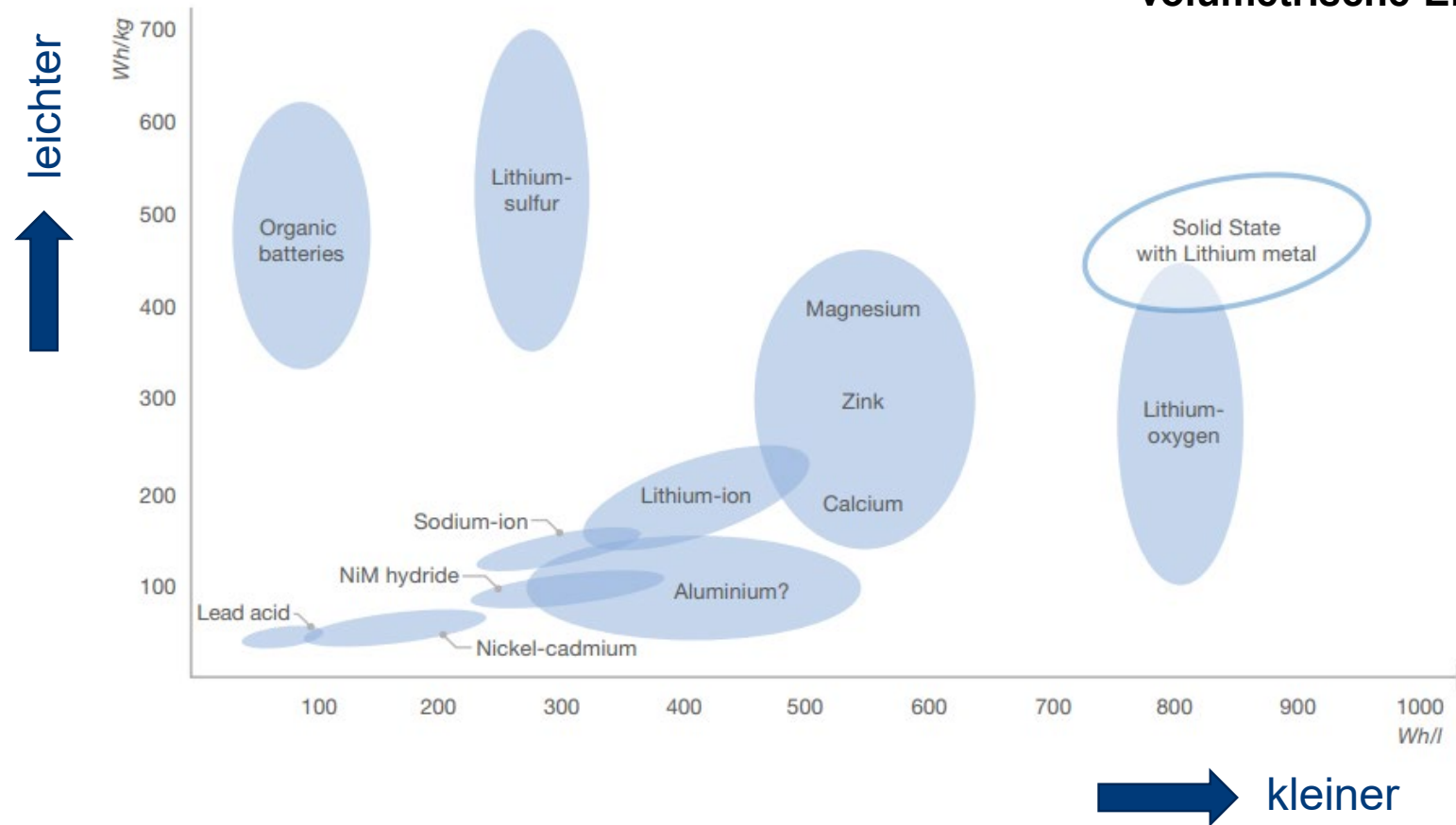
AKASYSTEM – SAFETY CONCEPT



Elektromobilität Schiene

Batteriesysteme - Energiedichte

Die **Energiedichte** ist ein Maß für den Energieinhalt einer Zelle bzw. einer Batterie pro Volumen oder Masse. Sie hat damit direkten Einfluss auf die **erzielbare Reichweite** eines rein elektrisch betriebenen Fahrzeugs mit Traktionsbatterie bei gleicher Masse bzw. gleichem Volumen und wird beschrieben als **spezifische Energiedichte** [Wh/kg] oder **volumetrische Energiedichte** [Wh/l].



- Zukünftige Batterie-Technologien:**
In der Forschung geht es um Aspekte wie
- eine höhere Energiedichte,
 - kürzere Ladedauer,
 - verbessertes Temperaturverhalten,
 - geringere Kosten,
 - erhöhte Sicherheit,
 - höhere Umweltverträglichkeit und eine
 - längere Lebensdauer.

Quelle: VDE-Kompodium Li-Ionen Batterien <https://www.dke.de/resource/blob/933404/dd44d15918ce4d4aefc363a4ef1490e1/kompodium-li-io-batterien-2021-de-data.pdf> (30.03.2022)

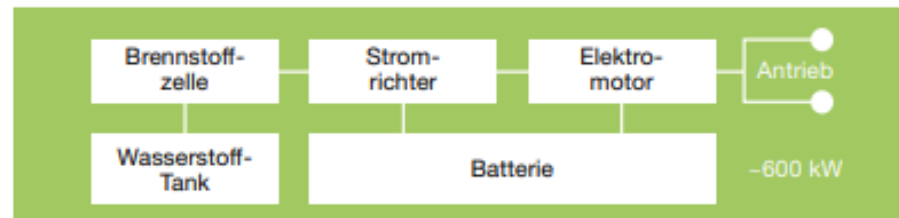
Elektromobilität Schiene

Fahrzeugtechnische Entwicklungen für Neufahrzeuge

Wasserstoff-Batterie-Triebzüge (HMU)



H2-BZ-Triebzug



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

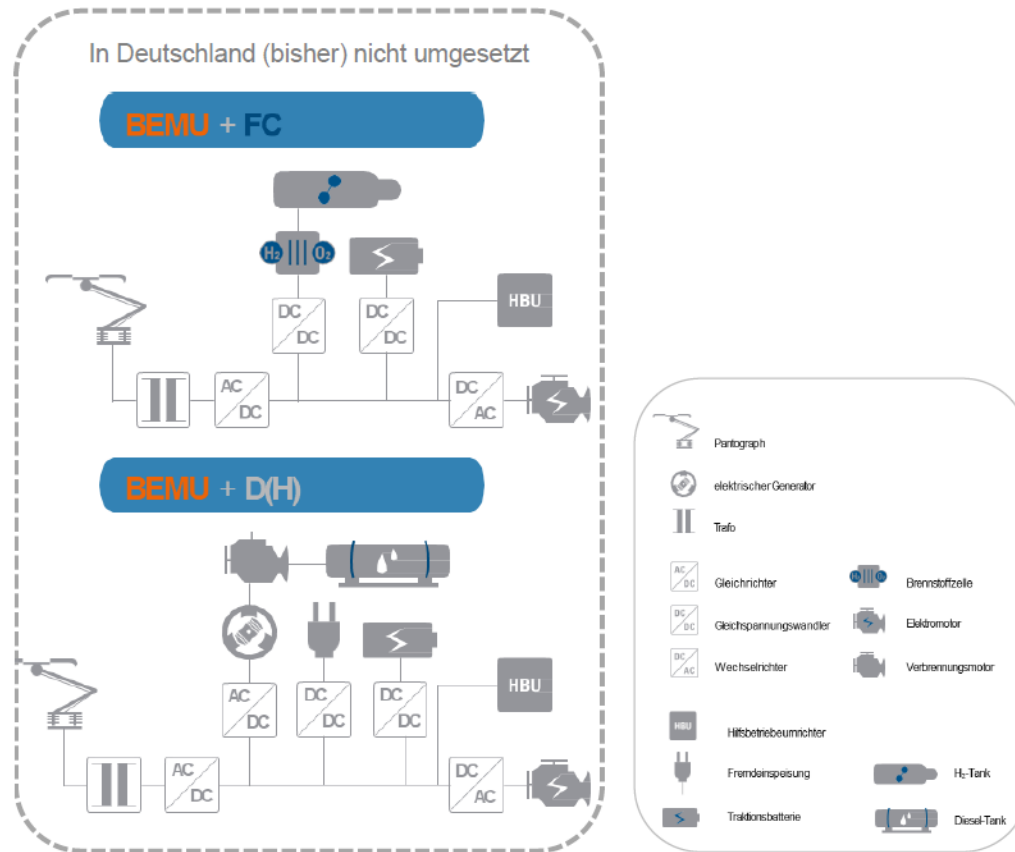
Bildquelle: Eigenes Bild

Quelle: In Anlehnung an https://www.bahn.de/db_regio/view/mdb/db_regio/zukunftswerkstatt/mdb_278211_unter_strom.pdf (19.03.2021)
<https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train> (18.03.2020)

Elektromobilität Schiene

Fahrzeugtechnische Entwicklungen für Neufahrzeuge

Weitere technische Möglichkeiten



Quelle: Vortrag Johannes Pagenkopf (DLR) – Tagung: Elektromobilität Schiene, DVV-Veranstaltung September 2020

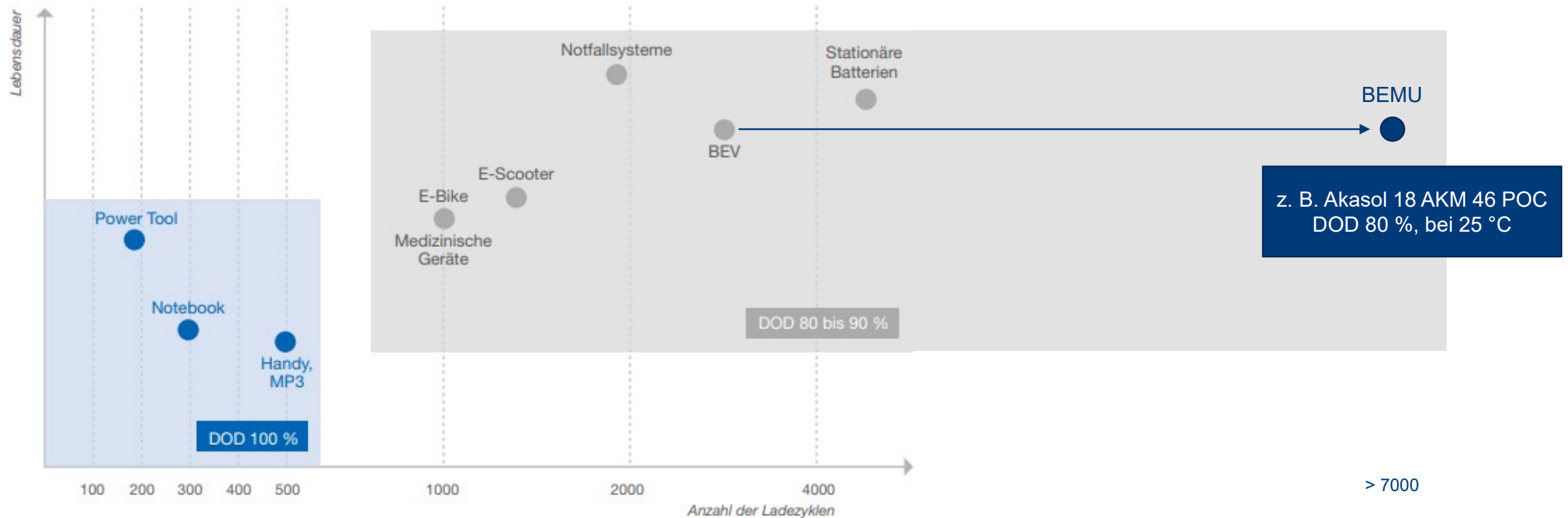
DLR-Studie für NOW GmbH (März 2020)



Elektromobilität Schiene

Batteriesysteme - Lebensdauer

Lebensdauer bei unterschiedlichen Anwendungen ohne und mit Beschränkung des DOD



In Anlehnung an Quelle: VDE-Kompodium Li-Ionen Batterien <https://www.dke.de/resource/blob/933404/dd44d15918ce4d4aefc363a4ef1490e1/kompodium-li-io-batterien-2021-de-data.pdf> (30.03.2022)
Eigene Ergänzung

Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Beispiel: HMU Fahrzeug Architektur

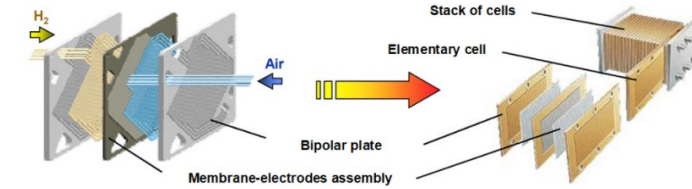


Bordsysteme
dauerhaft ca. 10 kW
Spitze 60 kW
bei HK-Betrieb

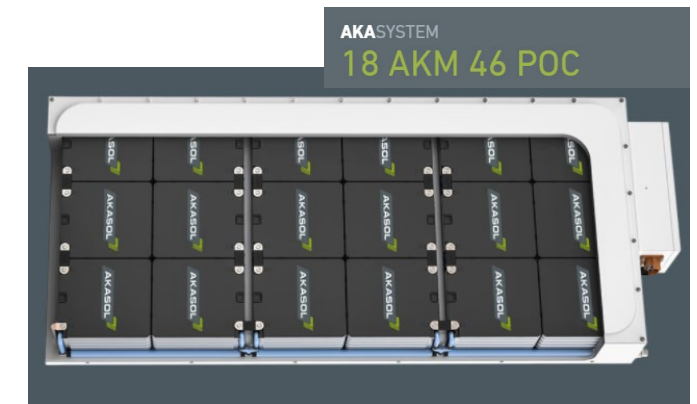
Energiespeicher
rd. 220 kWh
Spannung 799 V

jede Batterieeinheit:
Ladeleistung max. 184 kW
Entladeleistung max. 334 kW

Fahrmotor
ca. 370 kW Leistung Antrieb
ca. 400 kW Leistung ED-Bremse



Quellen:
Beispielfahrzeug - eigene Darstellung
<https://www.electrive.net/2020/01/13/alstom-bestellt-batterien-fuer-h2-zuege-bei-akasol/>
(20.03.2022)
https://www.lnvg.de/fileadmin/media/lnvg/Formulare/Fachaufsaetze/Brennstoffzellenfahrzeuge_in_Niedersachsen_Fachartikel_von_Thomas_Nawrocki_Feb_2018.pdf
(20.03.2022)
<https://www.urban-transport-magazine.com/wasserstoff-brennstoffzellen-emissionsfreie-personenzuege/> (20.03.2022)
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



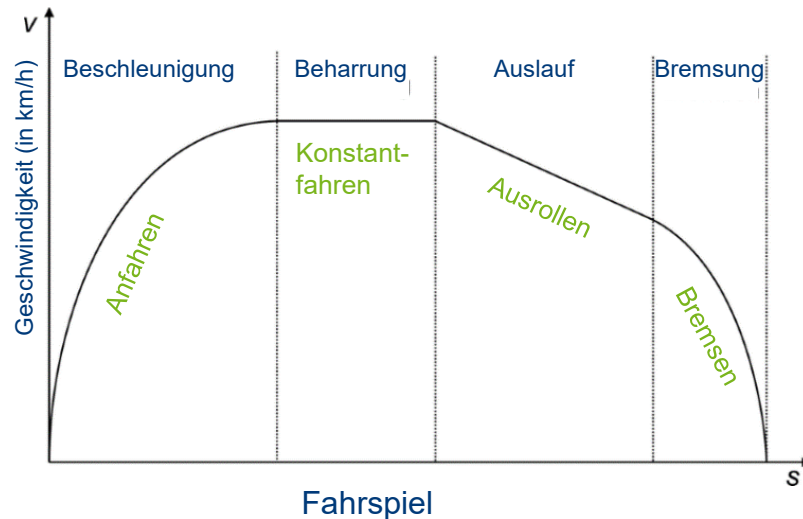
Gewicht 6 x 430 kg = 2.580 kg

Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Beispiel:

- ▶ Frankfurt–Höchst – Königstein – 15,9 km Streckenlänge
- ▶ mehrere Stationen ➡ typisches Fahrspiel
- ▶ max. 80 km/h

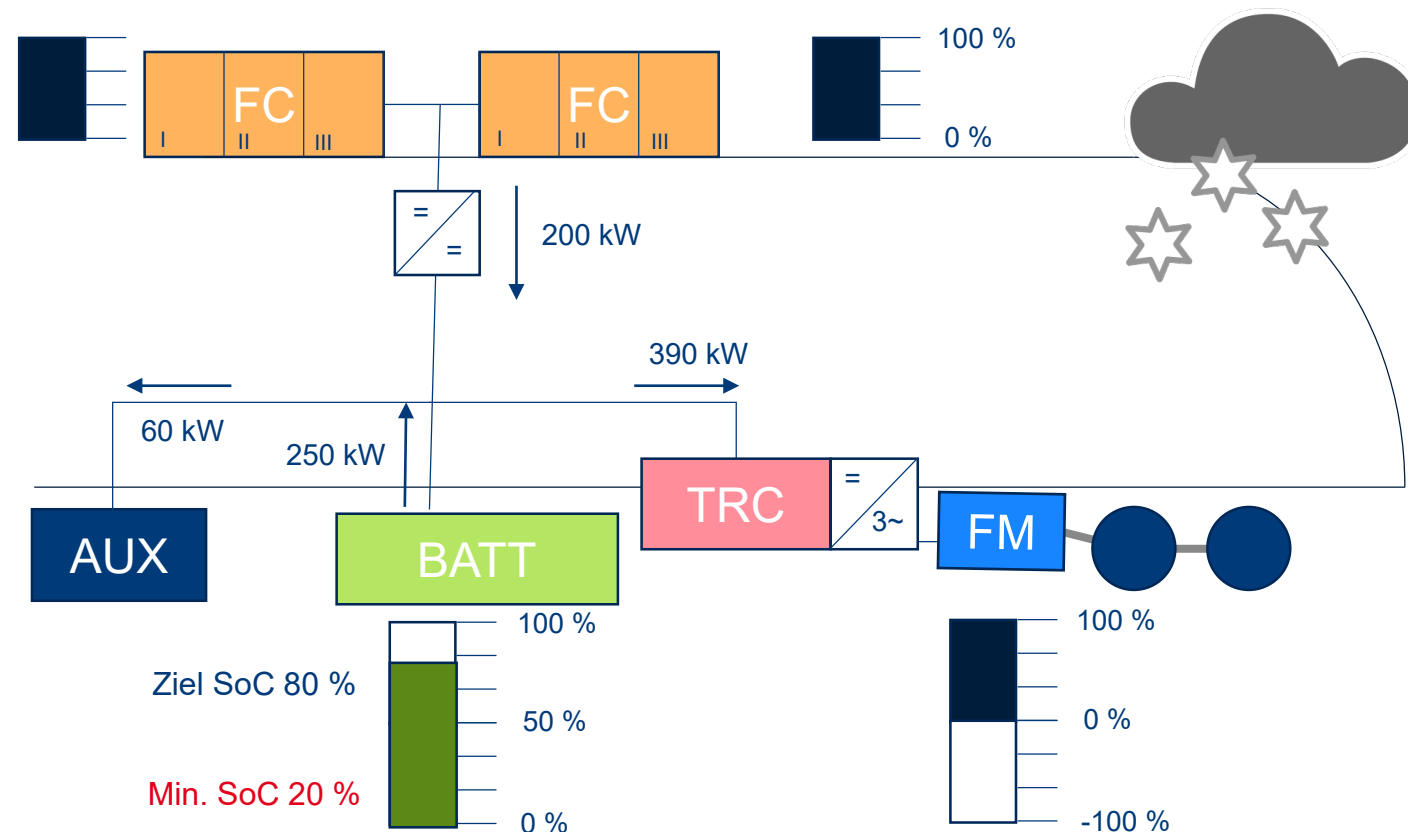


Quellen: https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6nigsteiner_Bahn (20.03.2022)
<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 1 Bergfahrt



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

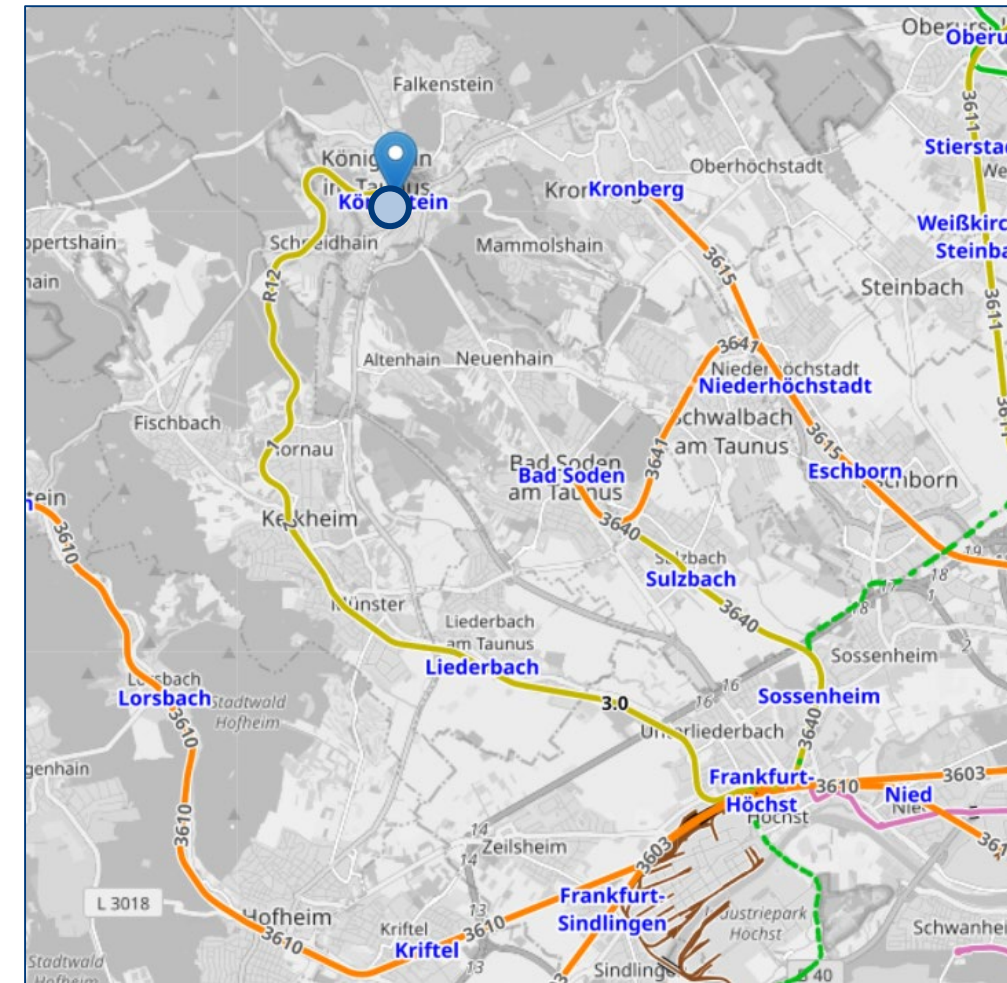
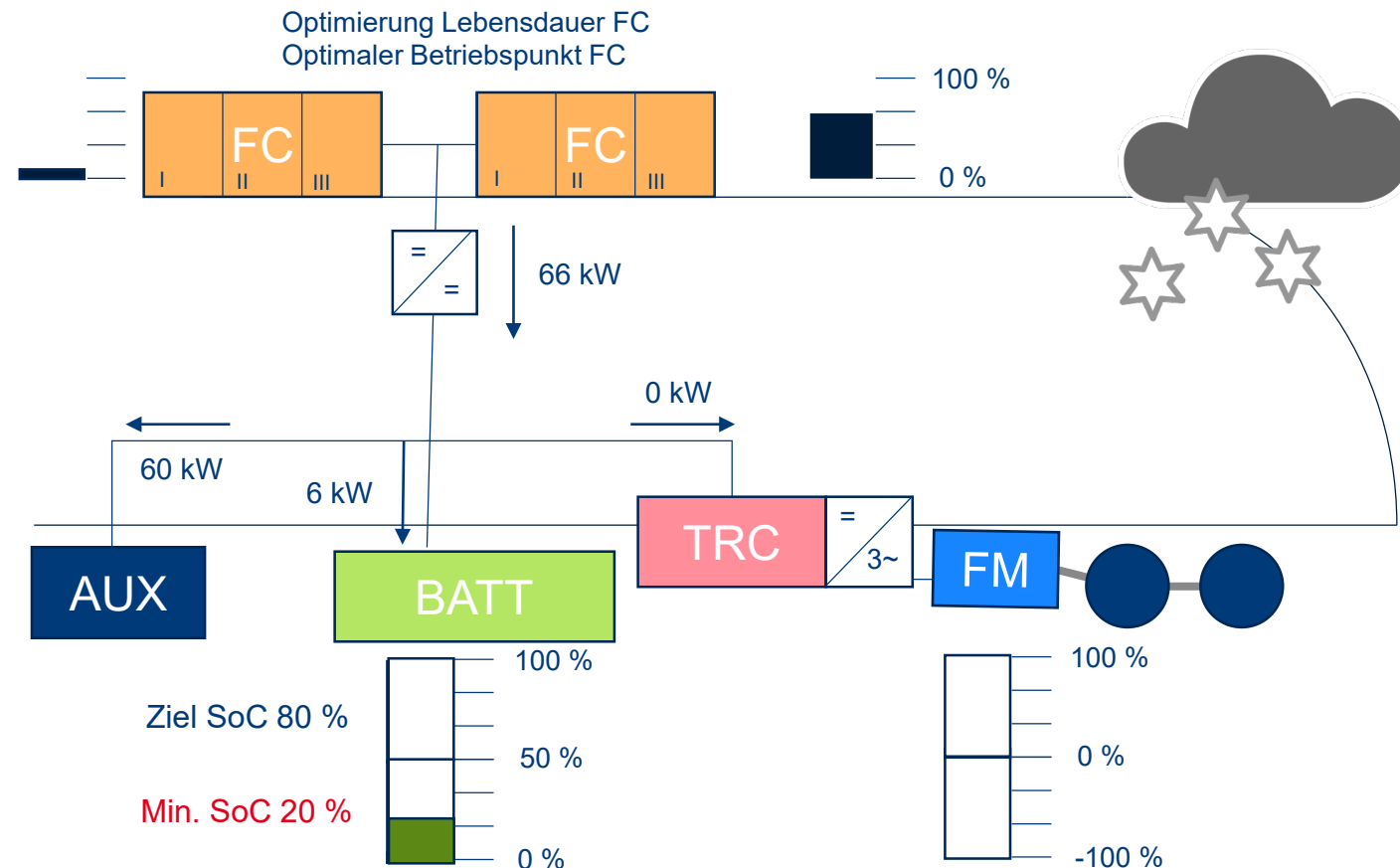
https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)

Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 1 Endstation (Berg)



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

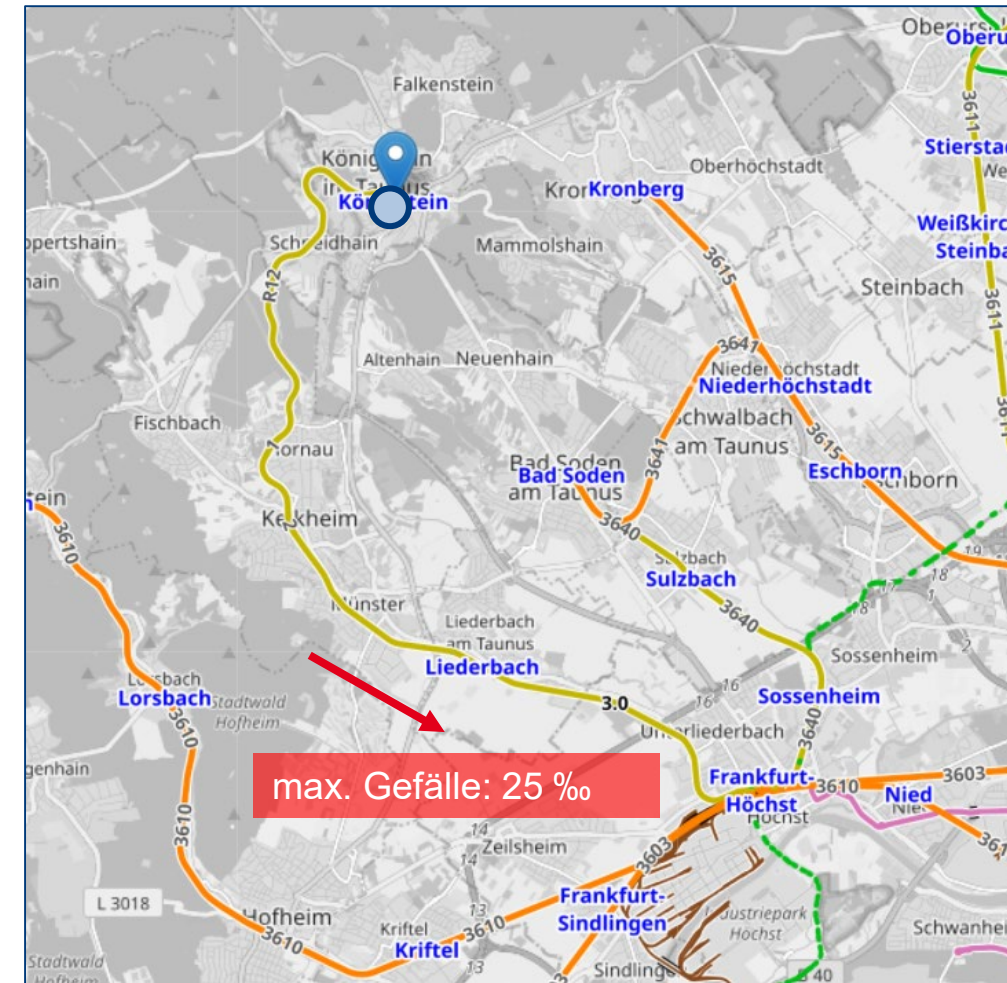
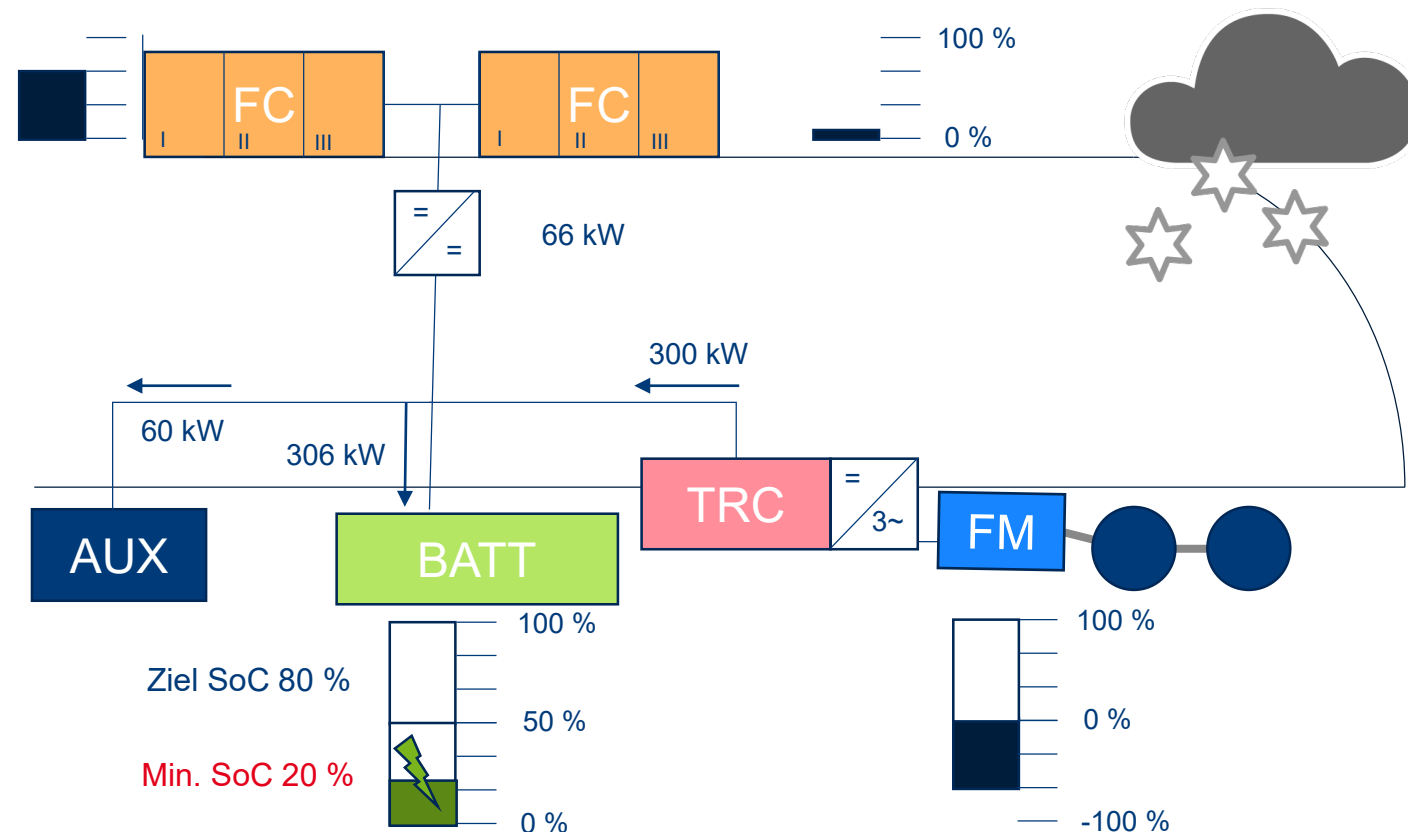
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 1 Talfahrt



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

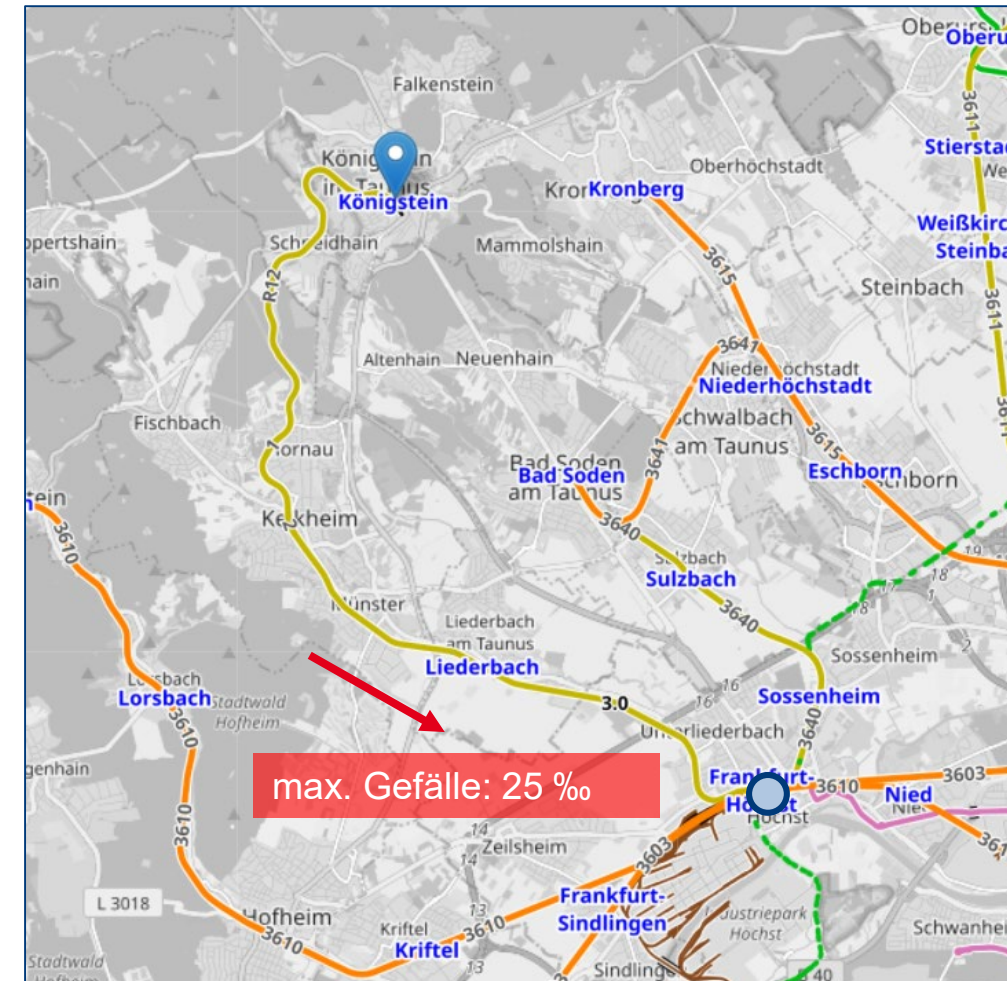
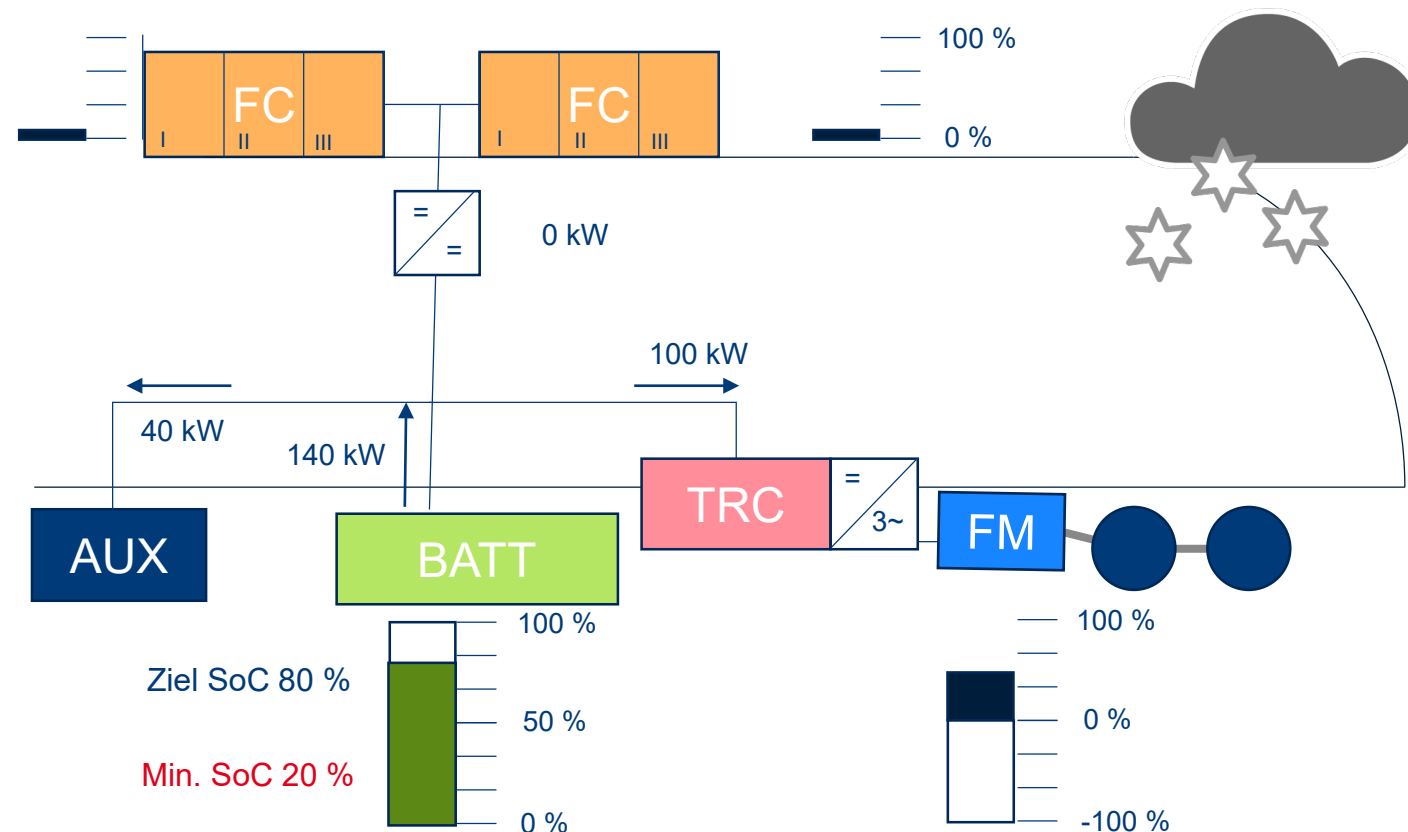
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 1 Talfahrt beendet



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

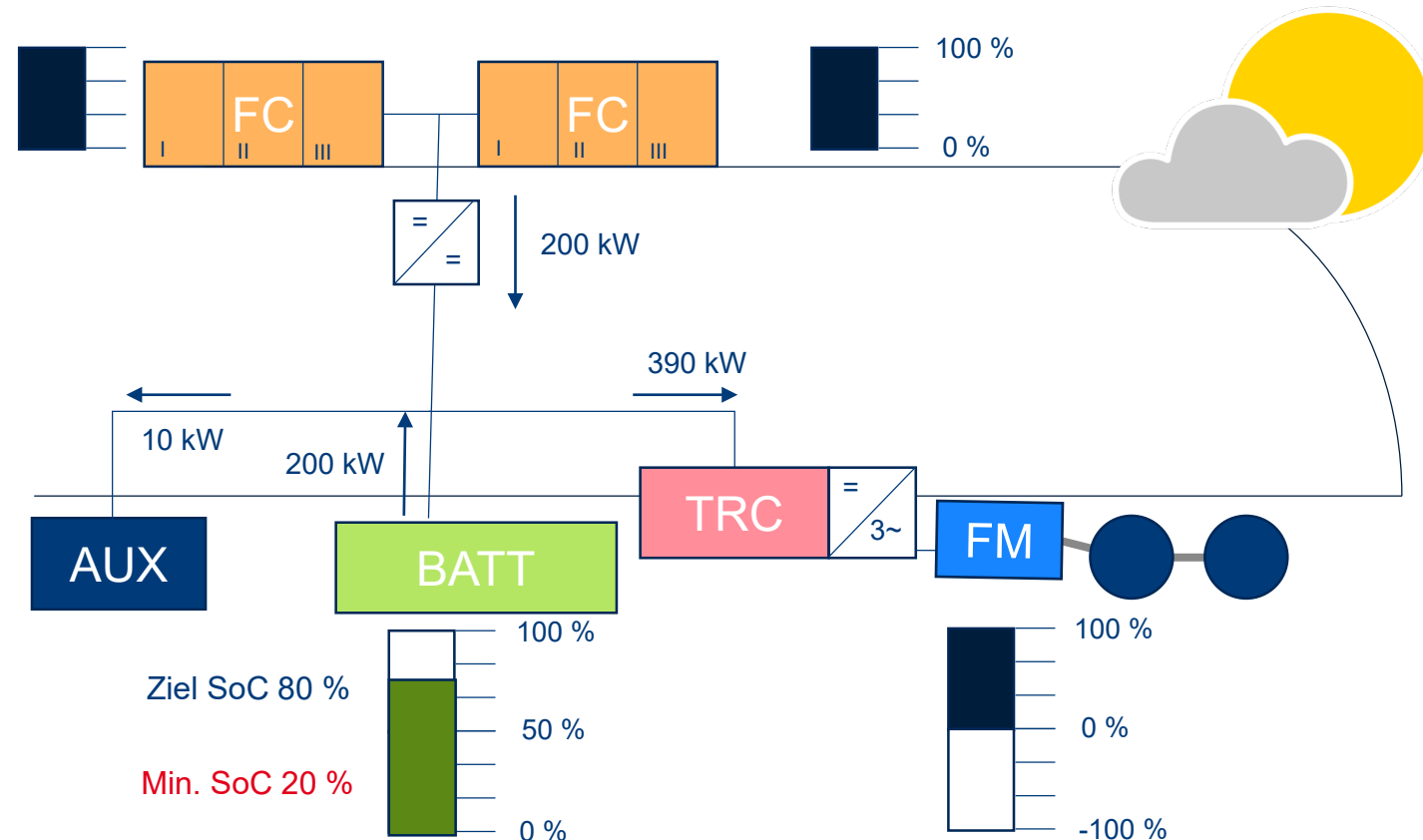
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 2 Bergfahrt



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

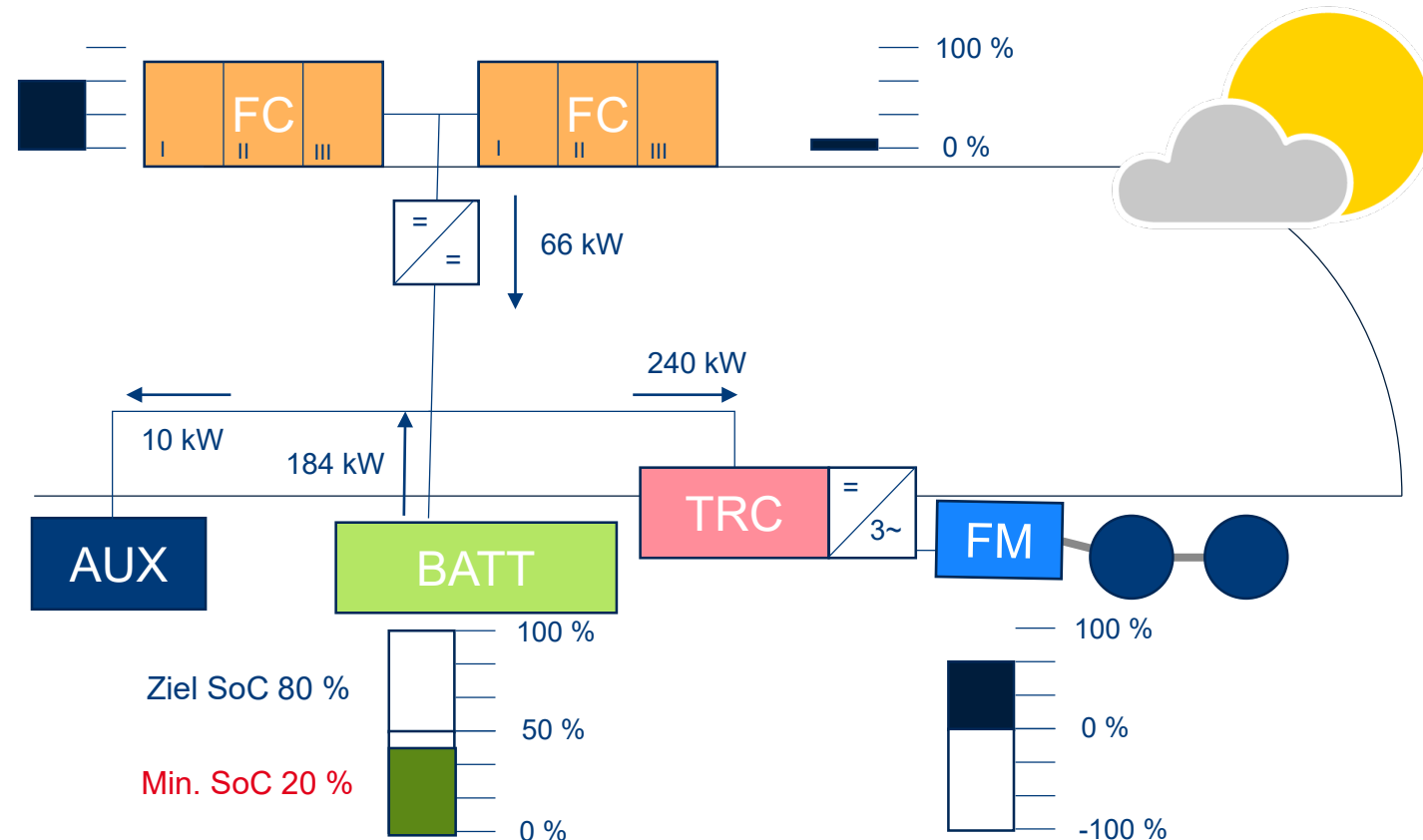
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 2 Bergfahrt



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

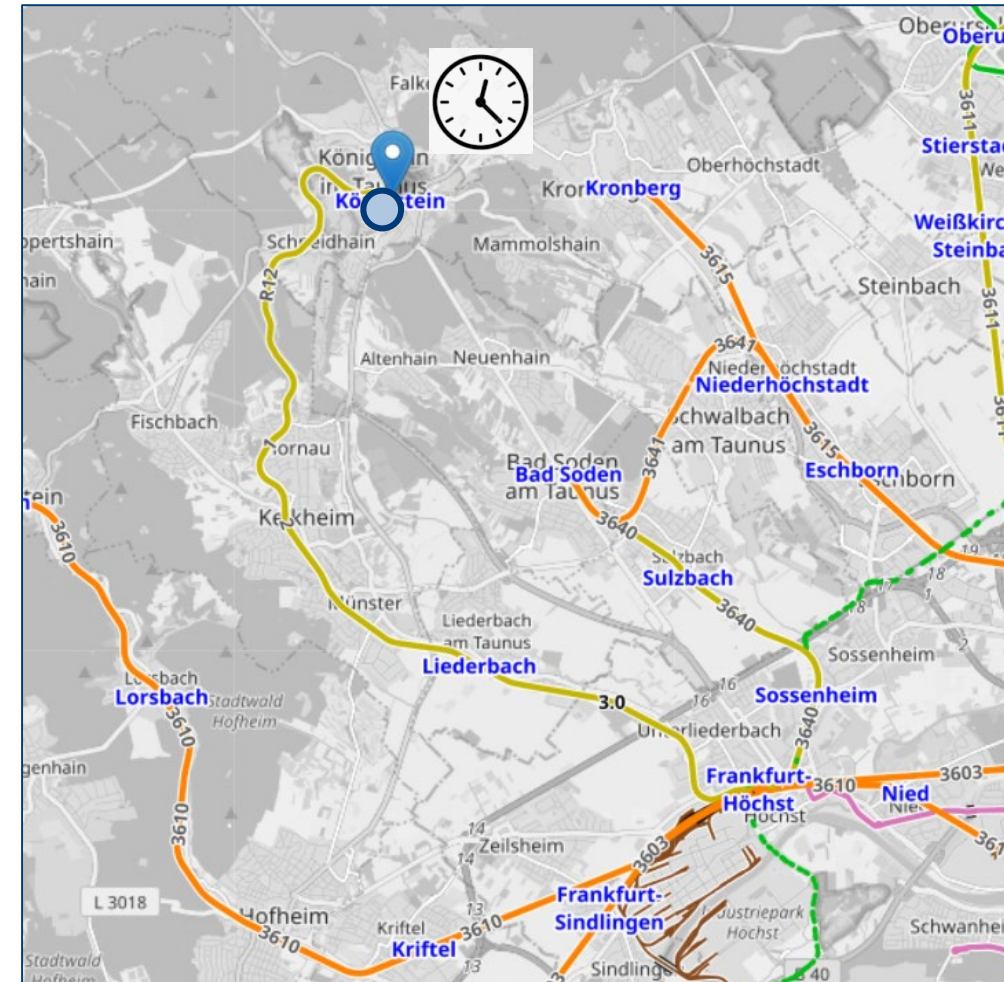
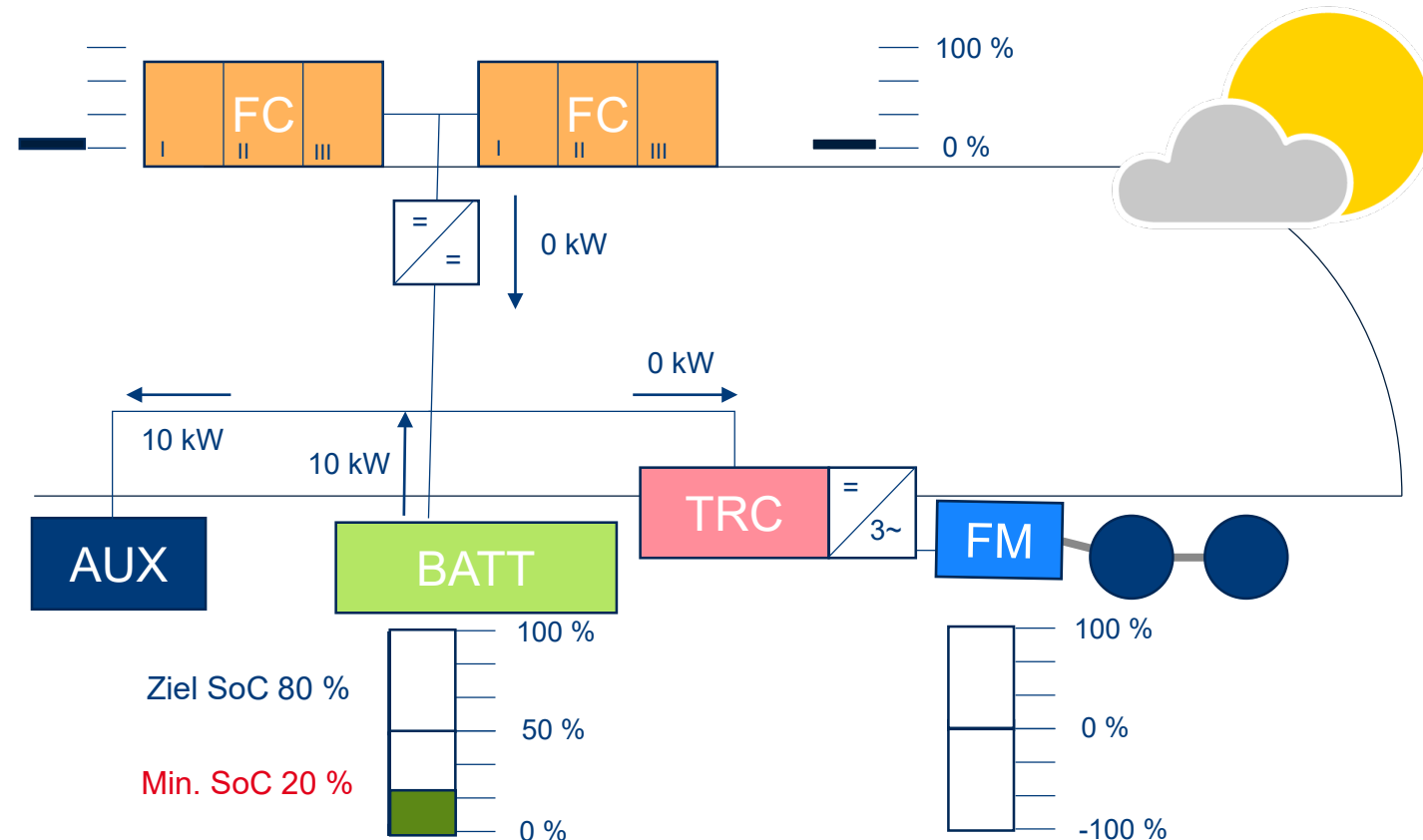
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 2 Endstation (Berg)



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

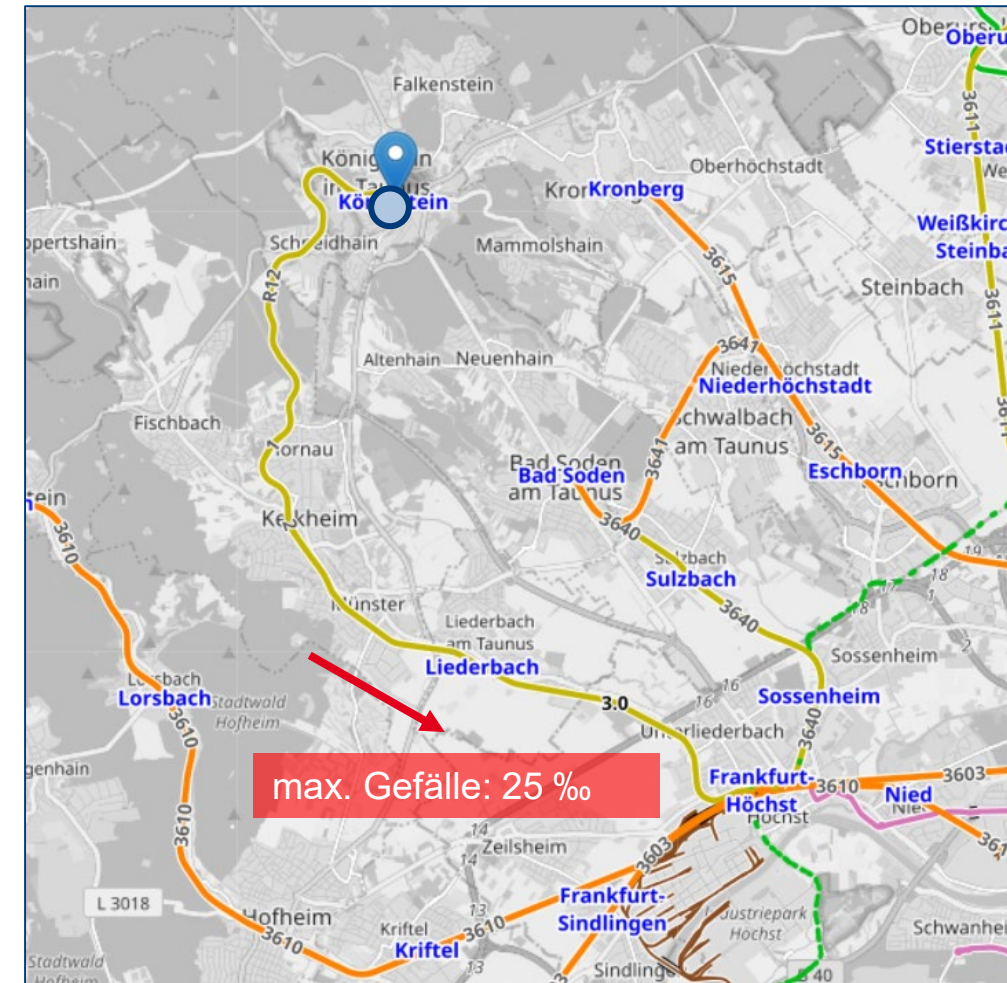
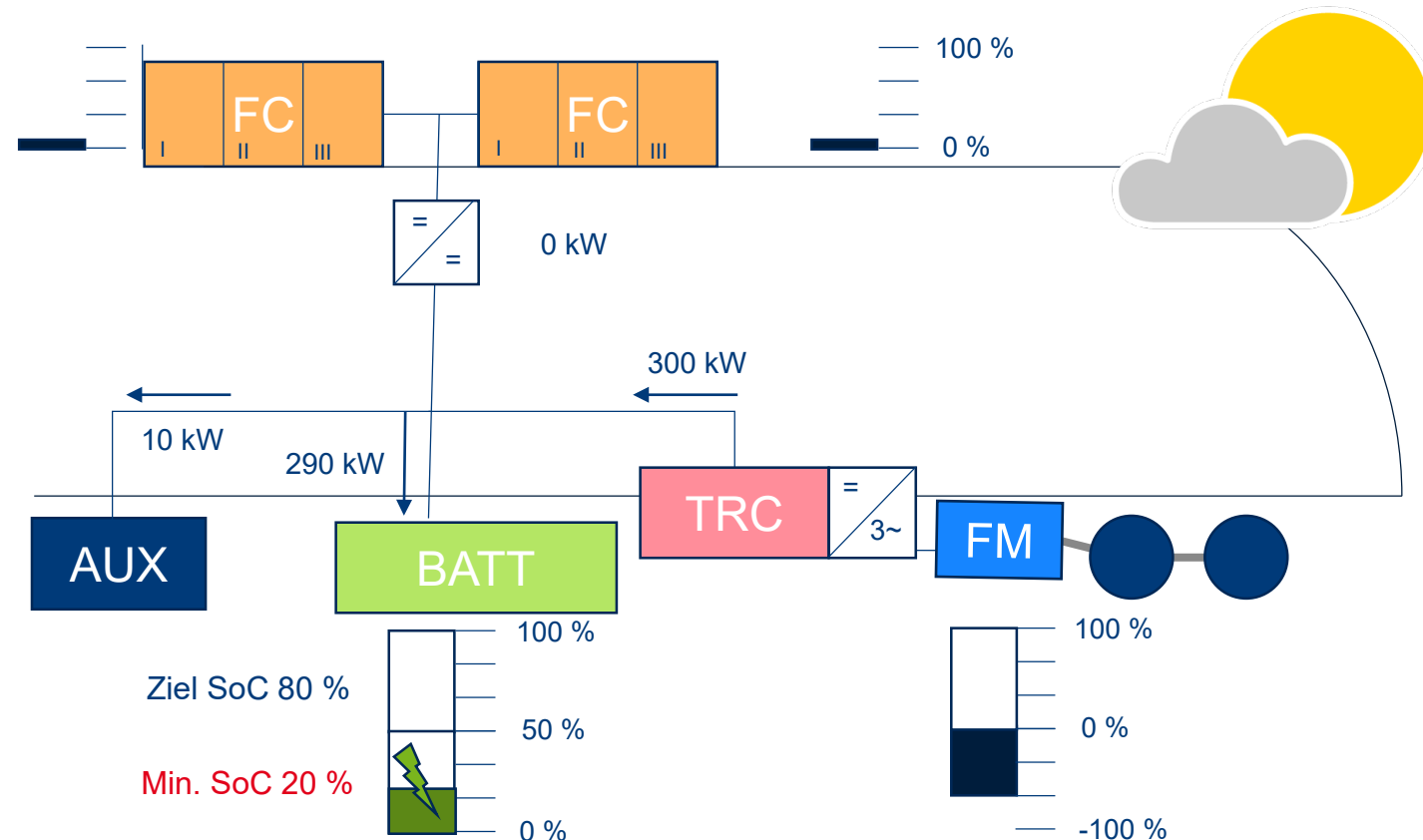
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 2 Talfahrt



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_node.html (20.03.2022)

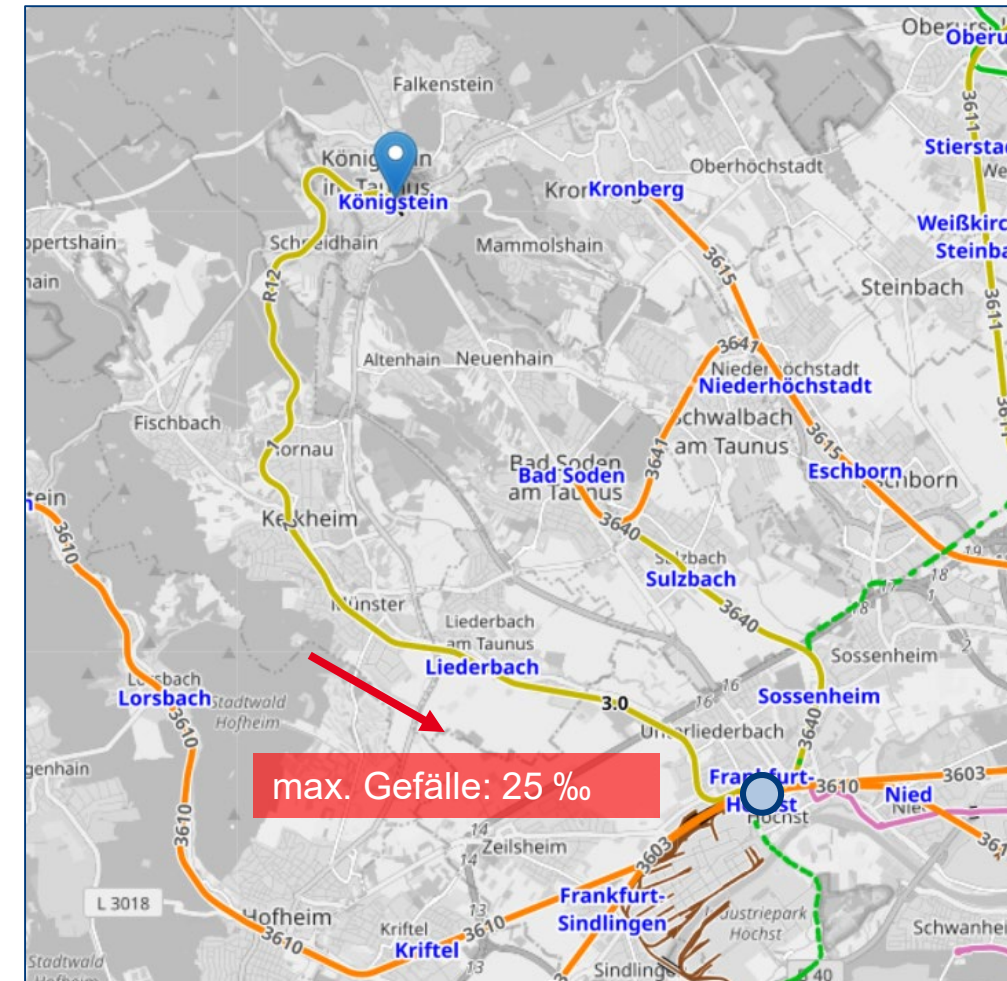
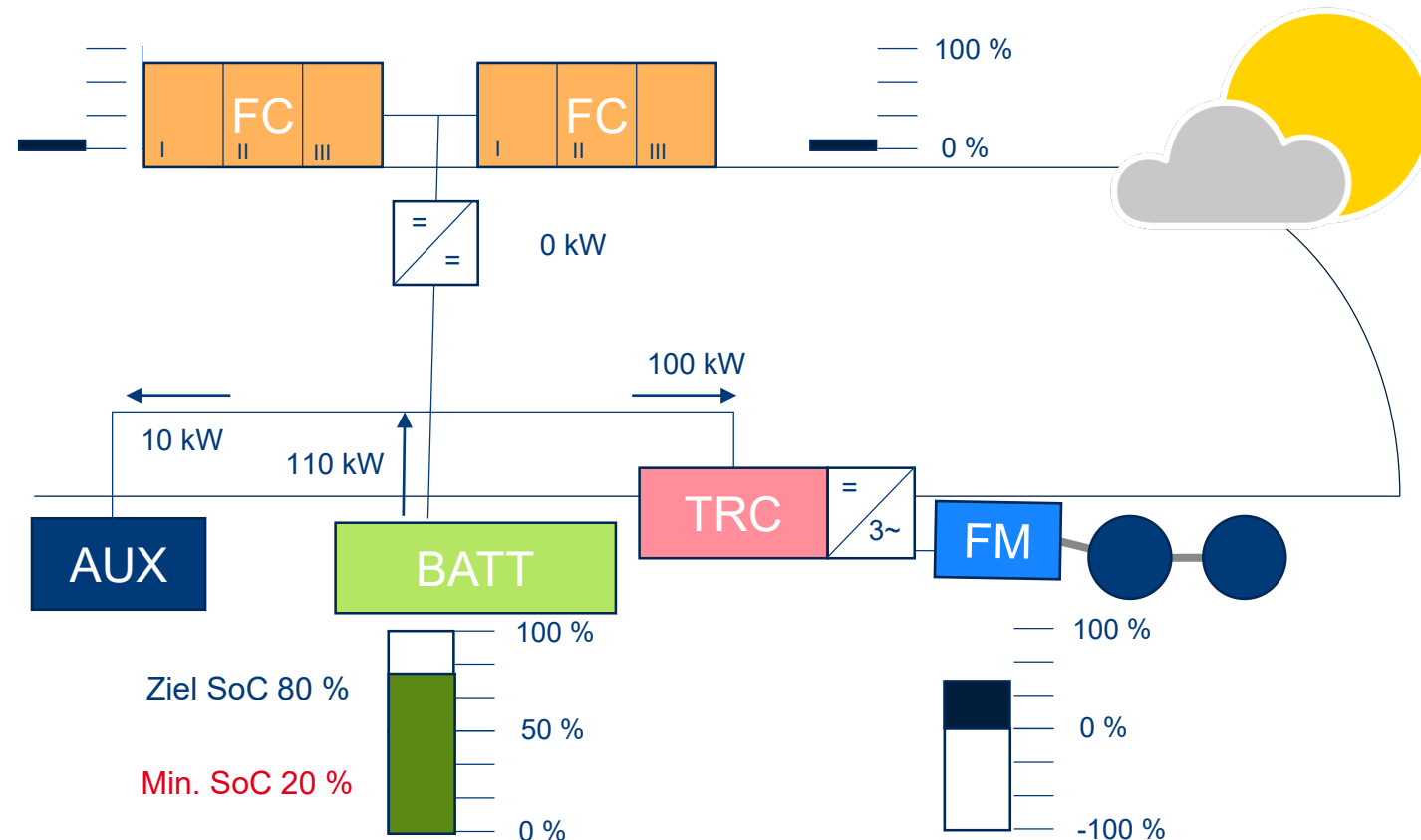
<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Energiemanagement HMU (Digitalisierung)

Fallbeispiel: HMU Betriebseinsatz – Szenario 2 Talfahrt beendet



Quellen:

Beispielfahrzeug - eigene Darstellung

<https://openrailwaymap.org/> (20.03.2022)

https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/objekt_einbindung/piktogramm_nod_e.html (20.03.2022)

<https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc> (20.03.2022)



Elektromobilität Schiene

Gesamtenergieeffizienz

Quellen:

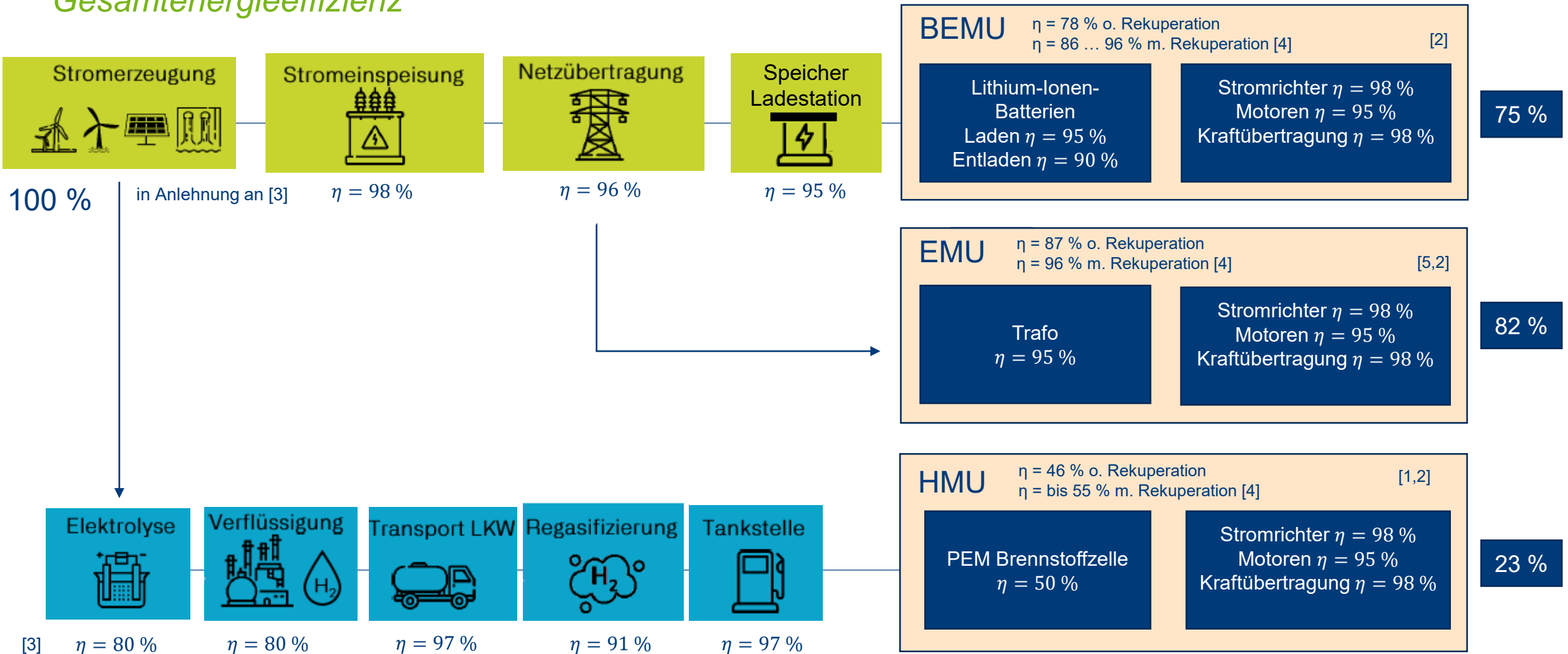
[1] Brennstoffzellentechnik https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-14935-2_4.pdf (20.03.2022)

[2] <https://www.urban-transport-magazine.com/wasserstoff-brennstoffzellen-emissionsfreie-personenzuege/> (20.03.2022)

[3] <https://www.ptx-allianz.de/wp-content/uploads/2021/01/ptx-allianz-darstellung-effizienzketten-von-erneuerbarer-energie-mobilitaetssektor.pdf> (20.03.2022)

[4] <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)

[5] <https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2020/02/BahnEffizienz.pdf> (20.03.2022)



[3] $\eta = 80 \%$

26.04.2022

Elektromobilität Schiene

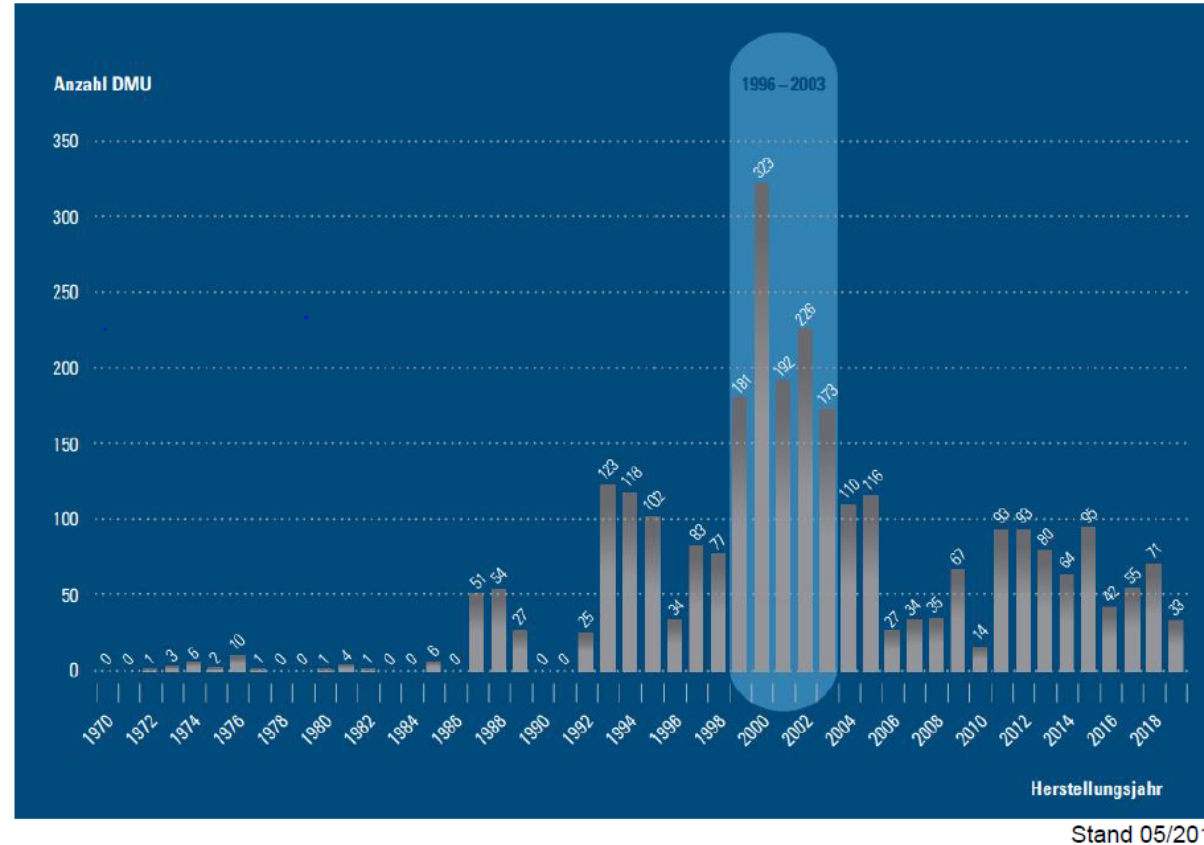
Dieseltriebfahrzeuge im SPNV – Umbaumöglichkeiten und Flottenerneuerung

• Bestand Diesel-Tfz im SPNV (05/2019)⁴⁾

- 2.862 D-Triebzüge-/wagen
- >100 D-Loks
- Durchschnittsalter D-Flotte: 16,5 a
- Zulassungsspeak um das Jahr 2000

→ Flottenerneuerungsbedarf

- (Neue Dieseltriebzüge)
- Umrüstung junger Bestands-DMU auf Hybridtechnik
- Streckenelektrifizierung
- Batterie-Oberleitungsbetrieb
- Wasserstoff-Betrieb
- ...



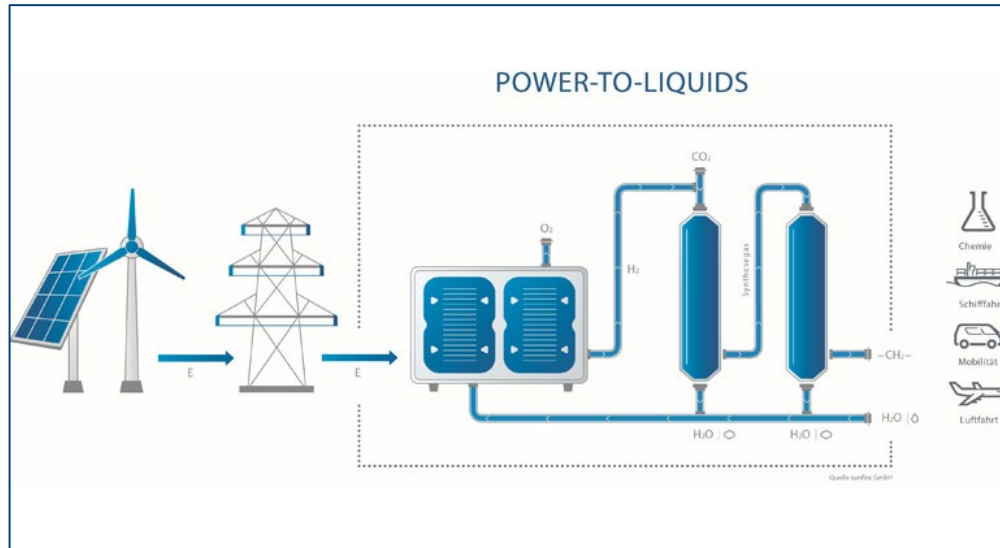
Quelle: Vortrag Johannes Pagenkopf (DLR) – Tagung: Elektromobilität Schiene, DVV-Veranstaltung September 2020

→ 2049

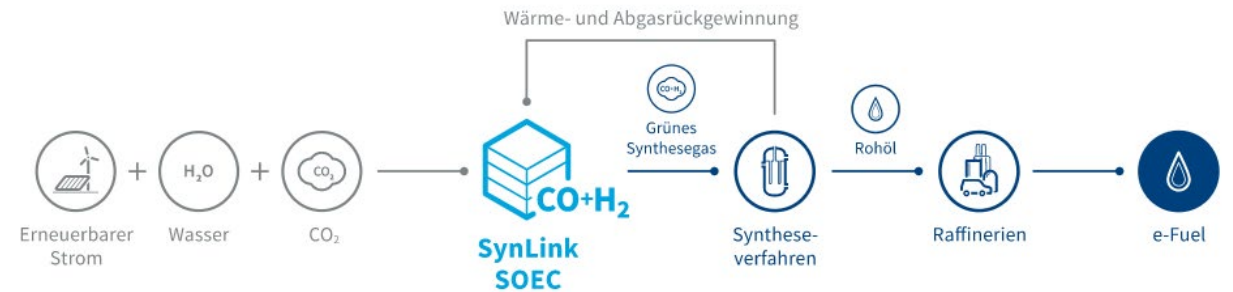
Elektromobilität Schiene

Umweltfreundliche Kraftstoffe für Dieseltriebzüge (E-Fuel)

- Szenario Fl+: PtL-Flüssigkraftstoffe als zentrale THG-freie Energieträgeroption



Quelle: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/oekostrom/sektorkopplung/power-to-gas> (17.02.22)
<https://www.sunfire.de/de/e-fuel> (27.03.2022)

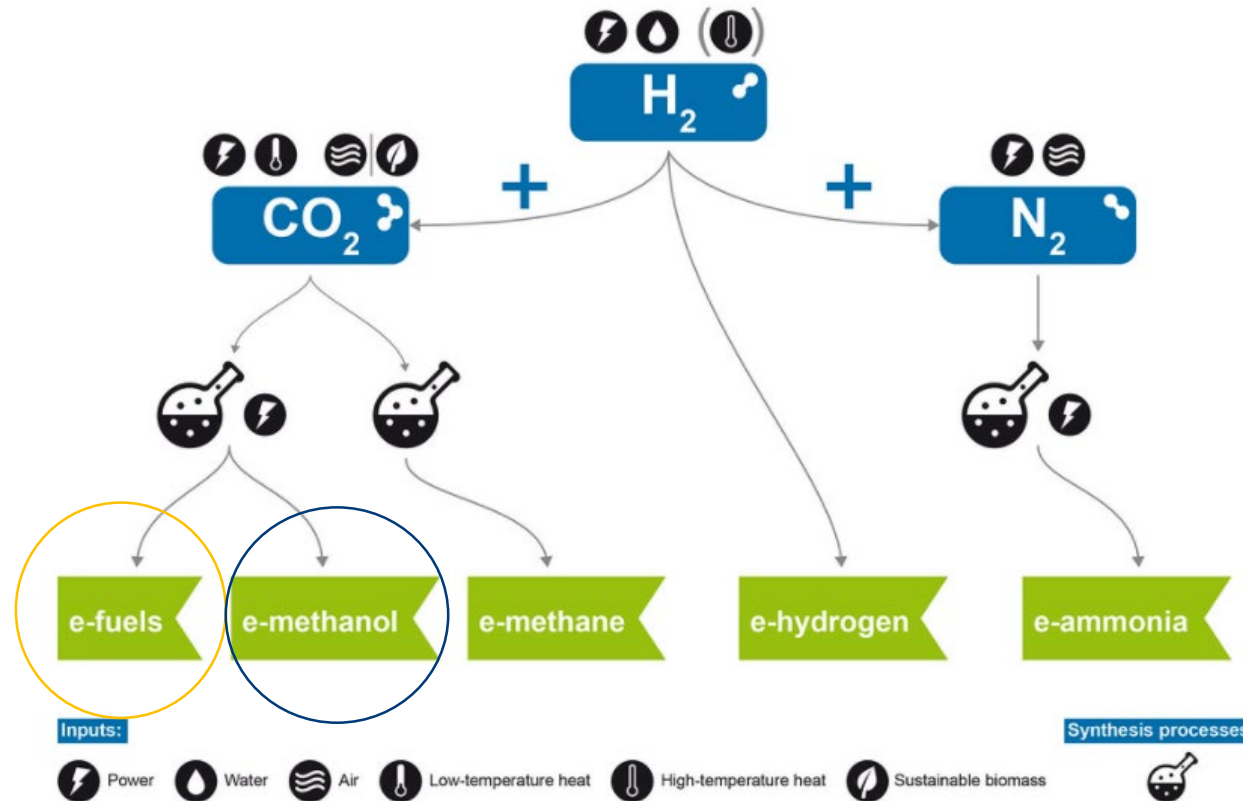


Elektromobilität Schiene

Power-to-X

Öko-Institut e.V.

Power-to-X: Overview of inputs, processes and PtX products
How power is converted into fuels and precursor chemicals



EN 15940

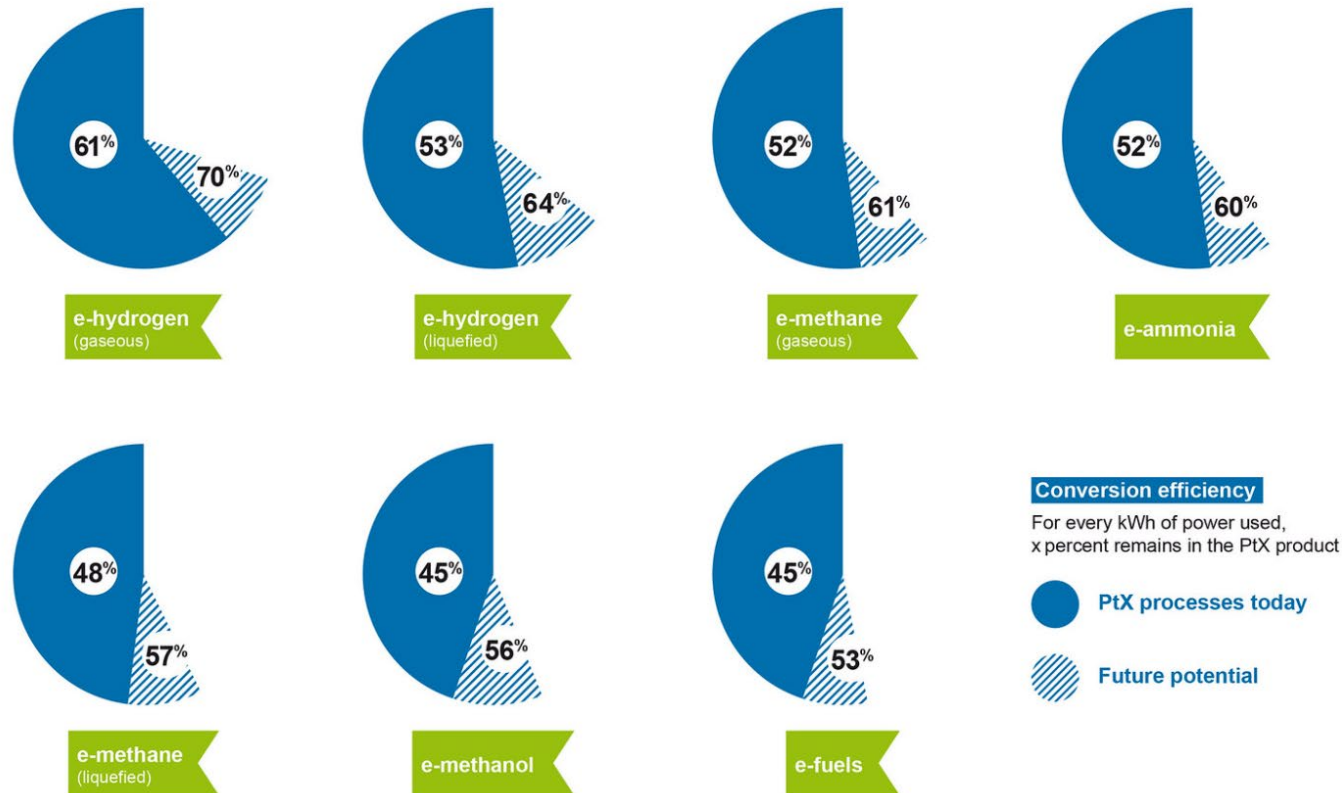
DIN EN 15940:2019-10
Kraftstoffe - Paraffinischer
Dieselkraftstoff aus Synthese oder
Hydrierungsverfahren -
Anforderungen und Prüfverfahren;
Deutsche Fassung
EN 15940:2016+A1:2018+AC:2019

Quelle: <https://www.flickr.com/photos/oekoinstitut/collections/72157632006732072/> (28.02.22)

Elektromobilität Schiene

Power-to-X

Power-to-X: How much power is left
Efficiency of power-to-fuel production now and in future



Quelle: <https://www.flickr.com/photos/oekoinstitut/collections/72157632006732072/> (28.02.22)



Elektromobilität Schiene

Gesamtenergieeffizienz

Quellen:

[1] Brennstoffzellentechnik https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-14935-2_4.pdf (20.03.2022)

[2] <https://www.urban-transport-magazine.com/wasserstoff-brennstoffzellen-emissionsfreie-personenzuege/> (20.03.2022)

[3] <https://www.ptx-allianz.de/wp-content/uploads/2021/01/ptx-allianz-darstellung-effizienzketten-von-erneuerbarer-energie-mobilitaetssektor.pdf> (20.03.2022)

[4] <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltreibzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (27.02.2022)

[5] <https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2020/02/BahnEffizienz.pdf> (20.03.2022)

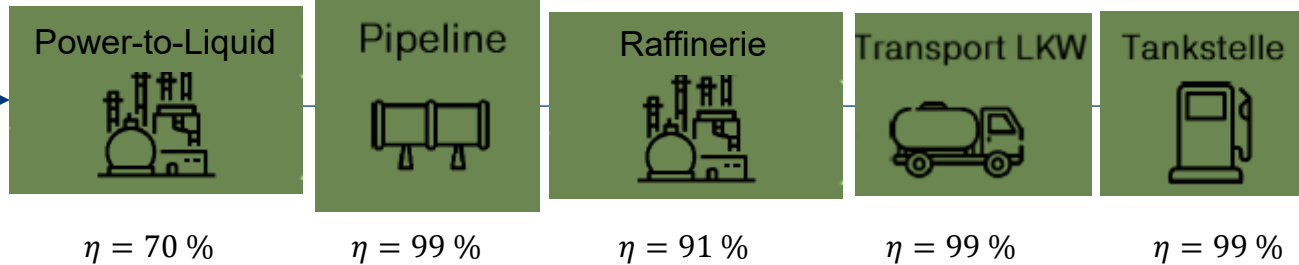
[6] https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf (20.03.2022)

Stromerzeugung

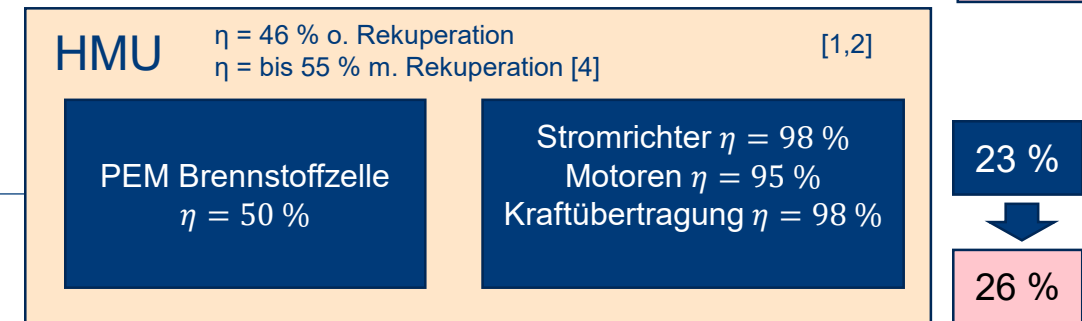
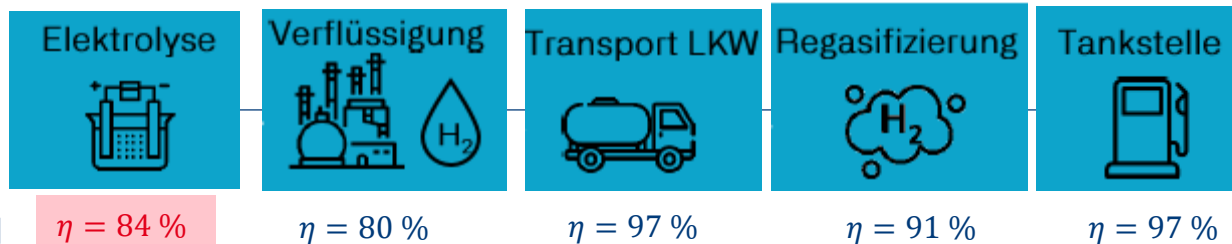
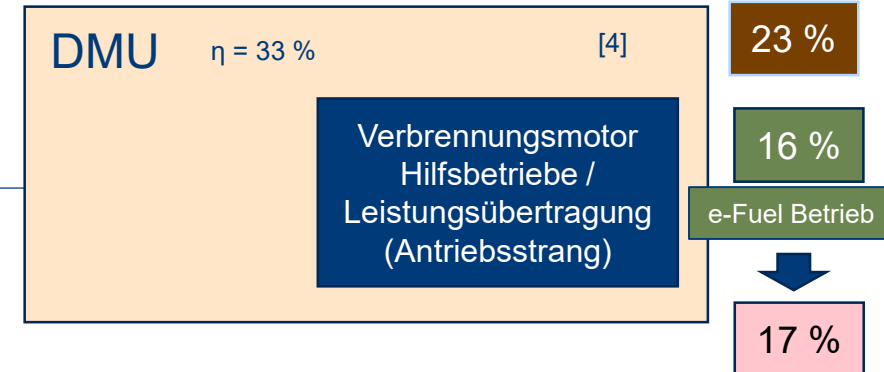


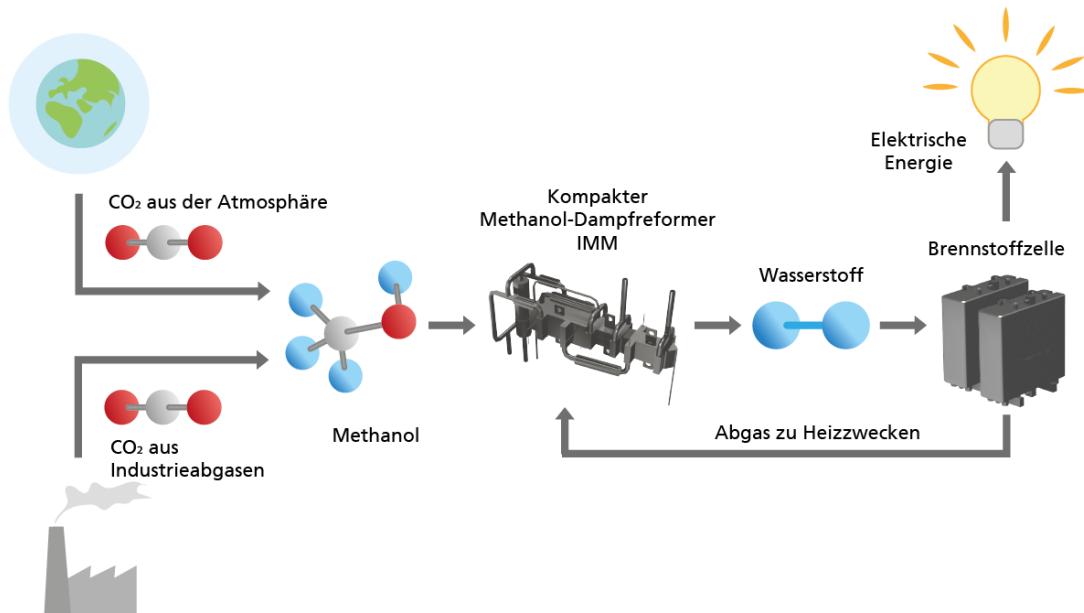
100 %

in Anlehnung an [3]



[6]



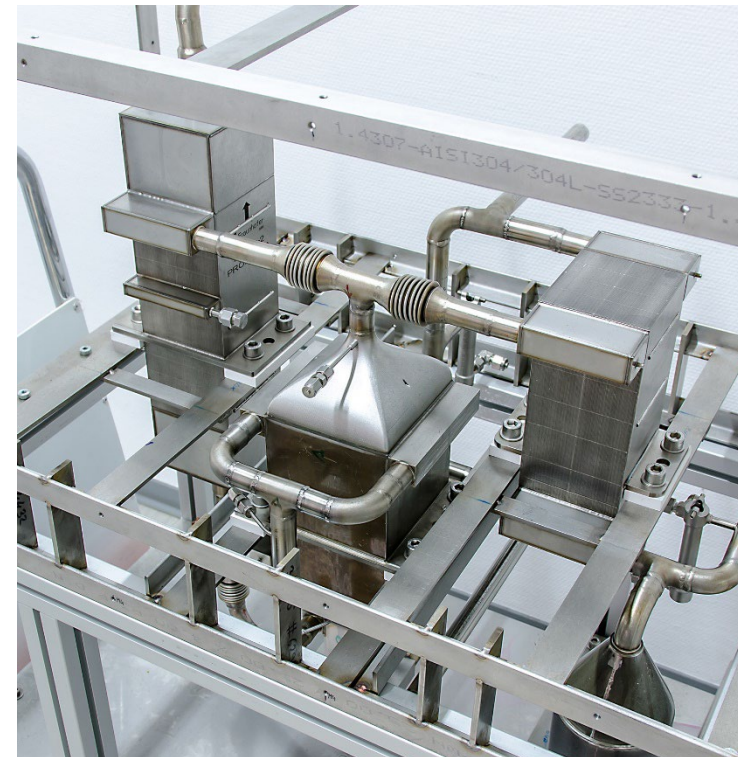


Wasserstofftechnologie

Wasserstoff aus Methanol gewinnen: Optimierte Reformer

Forschung Kompakt / 01. März 2022

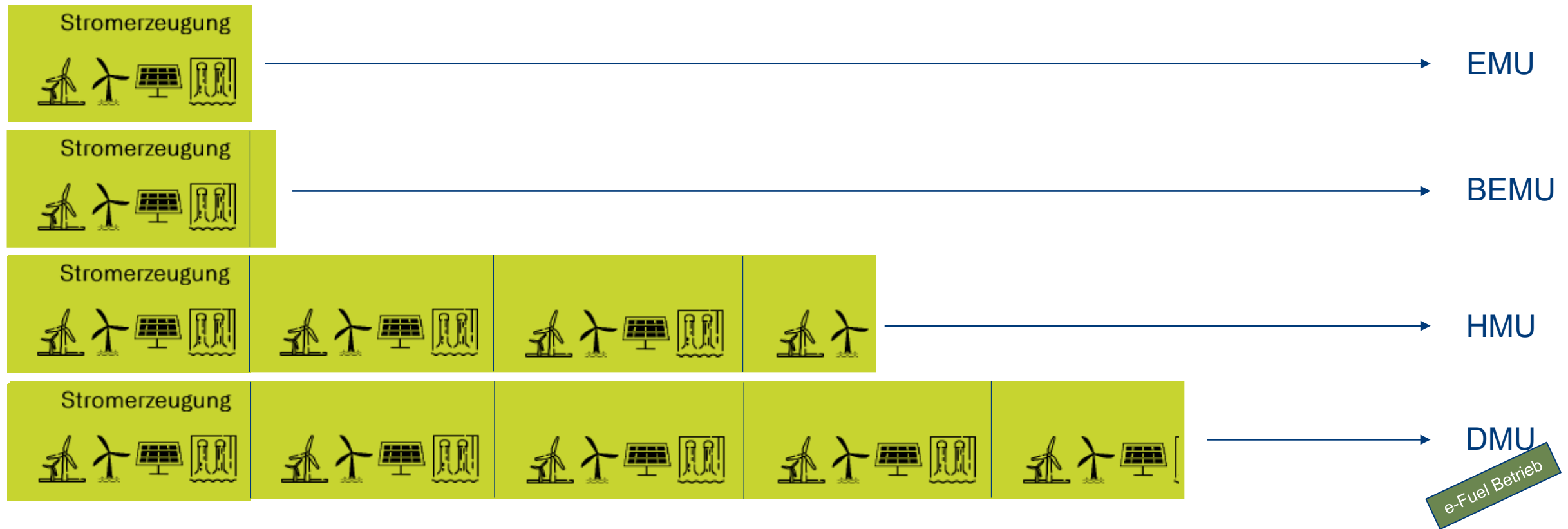
Methanol-Reformer wandeln gut transportierbares Methanol in Wasserstoff um. Doch bestehen bei herkömmlichen Reformern noch einige Probleme – so entsteht beispielsweise Katalysatorabrieb. Ein neuartiger Methanol-Reformer aus dem Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme IMM für die mobile Anwendung kann diese Herausforderungen lösen.



Quelle <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2022/maerz-2022/wasserstoff-aus-methanol-gewinnen-optimierte-reformer.html> (26.04.2022)

Elektromobilität Schiene

Energieeinsatz bezogen auf die gleiche Zugkilometerleistung



Bildquelle: <https://www.ptx-allianz.de/wp-content/uploads/2021/01/ptx-allianz-darstellung-effizienzketten-von-erneuerbarer-energie-mobilitaetssektor.pdf> (20.03.2022)

Elektromobilität Schiene

Energiekosten

Was würde synthetischer Sprit kosten?

Stand heute wären für einen Liter synthetischen Kraftstoffs circa 4,50 Euro in der Herstellung fällig. Optimistische Prognosen wie die des Wuppertal Instituts gehen davon aus, dass im **Jahr 2030 ein Preis von 2,29 Euro** inkl. Steuern möglich wäre. Klar ist: Trotz des generell gewachsenen ökologischen Bewusstseins werden die meisten Kunden E-Fuels nur akzeptieren, wenn der Preis stimmt. Und dafür wird es wichtig sein, mit welchen Steuern der Staat diese Kraftstoffe belegt, und wie viel Sprit die Autos dann im Alltagsbetrieb verbrauchen.



Wasserstoff-Elektrolyse: Ausgangspunkt muss grüner Strom sein • © Sunfire

Synthetische Kraftstoffe – Sind E-Fuels die Zukunft?



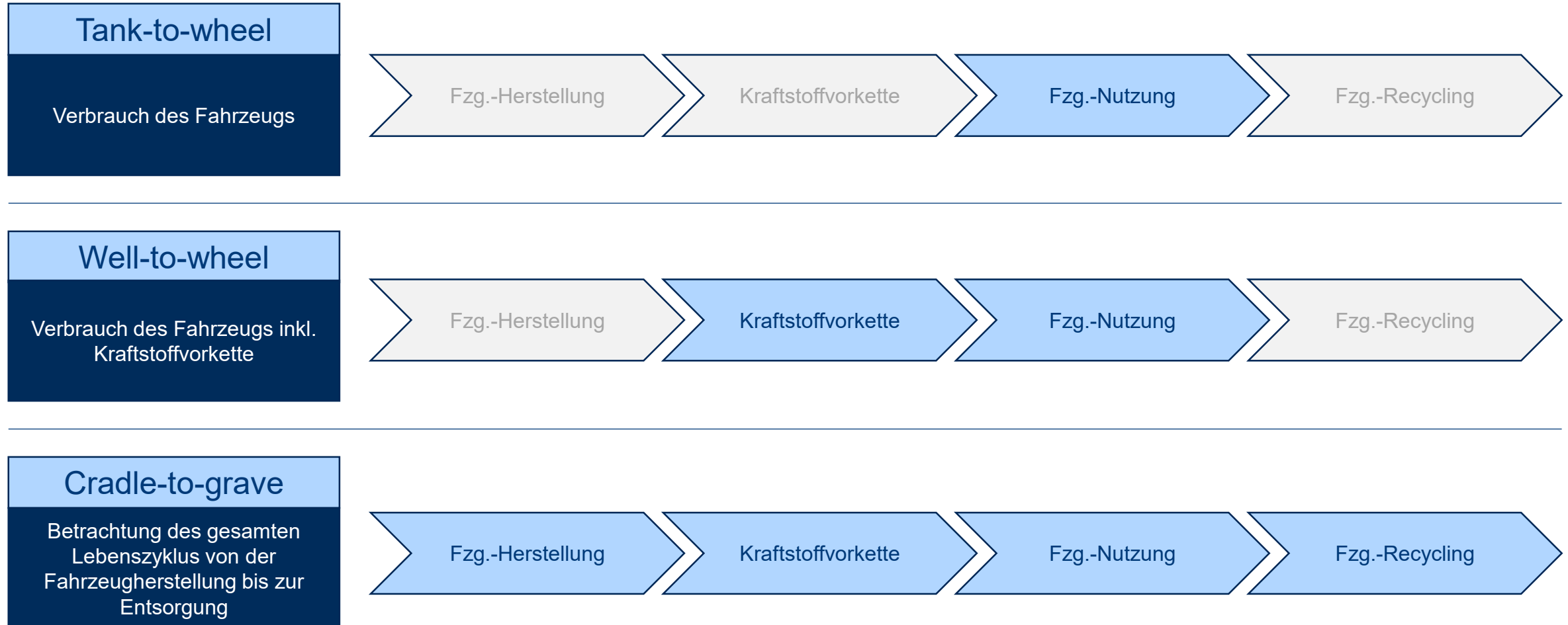
09.09.2021

Quelle: Vortrag Johannes Pagenkopf (DLR) – Tagung: Elektromobilität Schiene, DVV-Veranstaltung September 2020
ADAC
<https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>
(20.03.2022)

IV Typische charakteristische Werte	BEMU (Akku-OL-Tz)	HEMU (H2BZ-Tz)	DMU (Diesel-Tz)	EMU (OL-Triebzug)
Fahrzeugkonzept	2-3 Teiler (Einzelwagen / Jakobs-DG)	2-Teiler (Einzelwagen / Jakobs-DG)	1-3 Teiler (Einzelwagen / Jakobs-DG)	2-6 Teiler (Einzelwagen / Jakobs-DG; SD/DoSto)
Sitzplätze	120-170	120-160	70-300	120-430
Länge	40-60 m	40-60 m	25-80 m	40-108 m
Leistung	~1000 kW (Akku-Betrieb) ~2000 kW (OL-Betrieb)	~750-1000 kW	315 - 1560 kW	2000 – 4000 kW
vmax	140/160 km/h (im Akkubetrieb i.d.R. reduziert)	140 (160) km/h	100 - 160 km/h	140 – 160 km/h
Speicherkapazität	~300-1000 kWh	200-260 kg H2; ~200 kWh Akku	800 – 3700 l	-
Speichertechnologie	i.d.R. NMC/C, NMC/LTO	i.d.R. NMC/C	Dieseltankstofftank	-
Energiebedarf ((je nach Konfiguration / Strecke)	~ 2,5-6 kWh/km	~0,15-0,3 kg H2/km	~0,4-1,5 l /km	~3-10 kWh/km
OL-freie Reichweite (je n. Konfiguration / Strecke)	~40 – 100 km	600 – 1000 km	> id.R. 1000 km	-
Nachlade-/ Betankungszeit je <u>100km Reichweite</u>	15-30 min (bei 1,2 MW im Stand)	3-6 min	0,7-2 min	-
Infrastruktur- fordernis	Oberleitung, Oberleitungsinselanlage, Ladestation	H2-Tankstelle	Dieseltankstelle	Oberleitung
Baureihen / Hersteller	442 Talent 3 BEMU, 427 FLIRT Akku, 463 Mireo Plus B, 440 Coradia Continental BEMU	654 Alstom iLINT 6xx Mireo Plus H	div.	div.

Elektromobilität Schiene

Umweltbilanz



Elektromobilität Schiene

Zusammenfassung (1)

- EMUs stellen die Vorzugsvariante für den zukünftigen Schienenpersonennahverkehr dar.
- Eine Vollelektrifizierung ist sehr teuer und erfordert zusätzliche Instandhaltung.
- Die Entscheidung BEMU / HMU auf nicht elektrifizierten oder teilelektrifizierten Eisenbahnstrecken einzusetzen, muss auf Basis einer detaillierten technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Gesamtanalyse und –bewertung erfolgen.
- Technische Neuerungen verbessern mögliche BEMU Einsätze (z. B. größere Reichweiten, kürzere Ladezeiten, höhere Batterie Leistungs-/Energiedichten).
- Weitere Verbesserungen in der H₂-Prozesskette erhöhen die Wasserstoffverfügbarkeit.
- Energiemanagementsysteme bei HMU Fahrzeugen tragen entscheidend zum effizienten H₂ Einsatz bei.
- Technische Neuheiten (z. B. fahrzeugtauglicher Methanol Reformer) bieten Chancen für weitere Optimierungen von HMU Fahrzeugen.

Elektromobilität Schiene

Zusammenfassung (2)

Ein Umbau von DMUs, insbesondere die mehr als ein Drittel der Fahrzeuglebenszeit hinter sich haben, lohnt sich meist nicht:

- ▶ hoher Änderungsaufwand
- ▶ hoher Investitionsaufwand
- ▶ „Aufrüstungen“ im Sinne der Richtlinie 2016/797 (EU) bedeuten einen hohen Aufwand, der nicht nur auf das Antriebssystem begrenzt ist.
- ▶ Gesamt-Umweltbilanz ist zu betrachten, Nutzung von e-Fuel könnte die temporäre Restnutzung klimaneutral machen.



Vielen Dank!

Fragen?



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Marco Brey



Tel.: +49 5341 875 52590
Fax: +49 5341 875 52592

Email: m.brey@ostfalia.de