



Bildquelle: Nick Zimmermann

Alternative zum Diesel - Batterietriebzüge im Schienenpersonennahverkehr Webinar der ARISTHODOS AG am 31.08.2023

Ulrich Zimmermann
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Bahnbetrieb und Infrastruktur

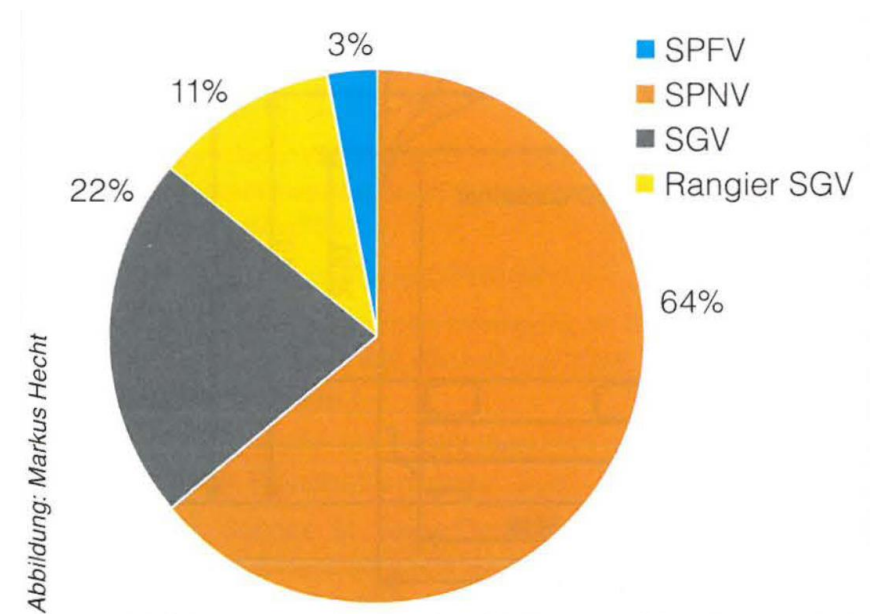
Agenda

- Grundlagen
- Projekt BEMU
- Analyse des Liniennetzes
- Testbetrieb
- Betrieb im Störfall
- Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanz
- Potentiale und Zusammenfassung

GRUNDLAGEN

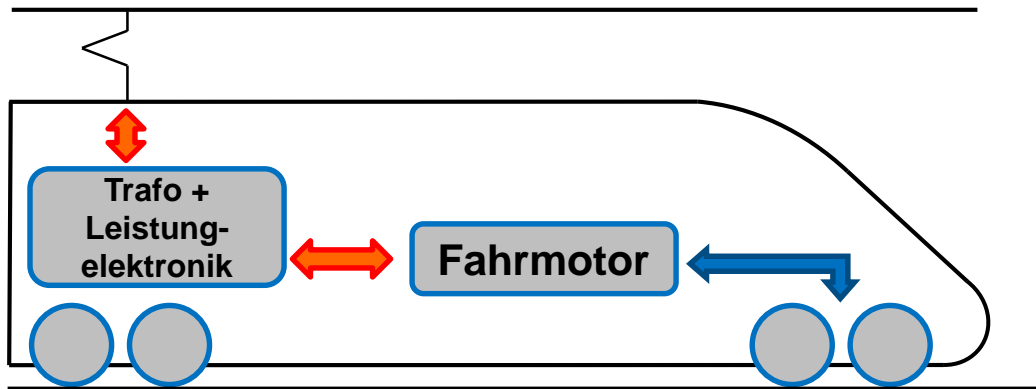
Einstieg – Warum beschäftigen wir uns mit dem Thema?

- Ca. 2.800 Dieseltriebzüge sind aktuell im deutschen Eisenbahnnetz unterwegs
- Emissionsproblematik
- Integration erneuerbarer Energien
- Lärmemissionen
- Dieselfahrzeuge können durch elektrische Fahrzeuge ersetzt werden
- Elektrifizierung der Infrastruktur (Oberleitung) *oder*
- Elektrisches Fahrzeug mit eigener Energieversorgung



Diesolverbrauch im Jahr 2010 nach Schienenverkehrsgattung (in Deutschland)

Electric Multiple Unit



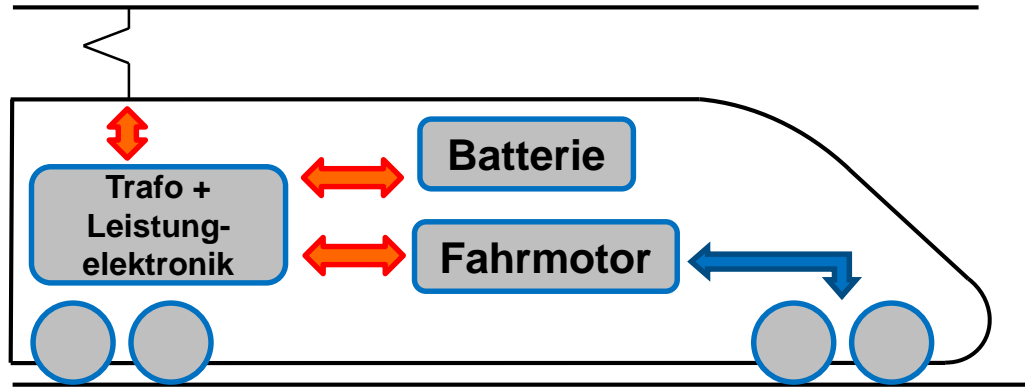
Infrastruktur: Oberleitung / Stromschiene

Rekuperation: Möglich (Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist)

Eigenschaften: Hoher Wirkungsgrad

Hohe Beschleunigung

Battery Electric Multiple Unit



- Infrastruktur: Oberleitung / Ladestationen
- Rekuperation: Möglich (in Batterie oder Oberleitung zurück)
- Eigenschaften:
 - Hohe Beschleunigung verglichen mit DMU
 - Höhere Masse durch Batterie
 - Wirkungsgrad Batteriemodus im Vergl. zu EMU niedriger
 - Begrenzte Reichweite ohne Oberleitung
 - Unter Oberleitung gleiche Eigenschaften wie EMU

Bombardier TALENT 3 BEMU



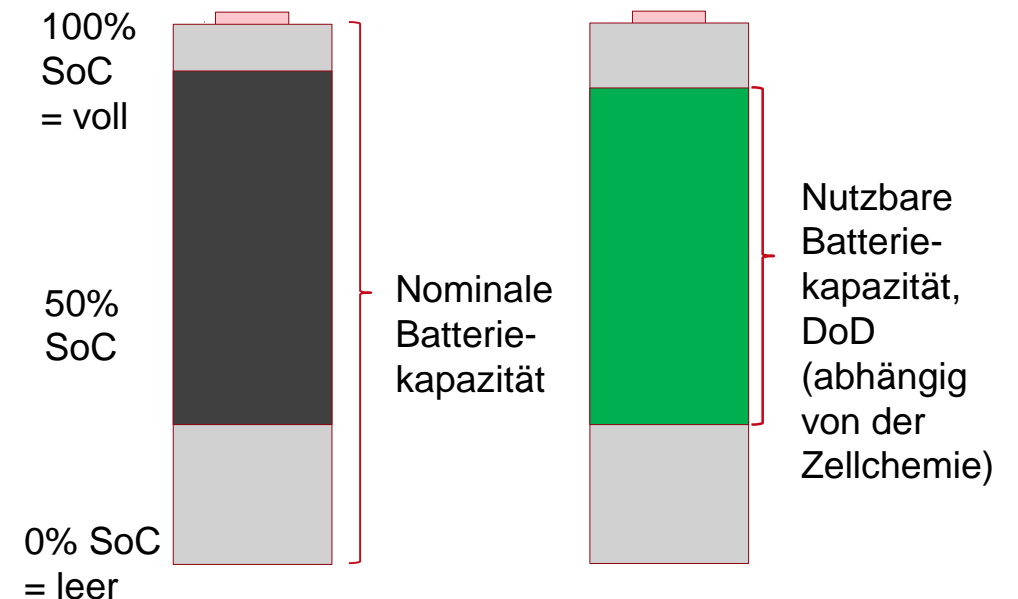
Bildquelle: Bombardier Transportation

Batterietechnik

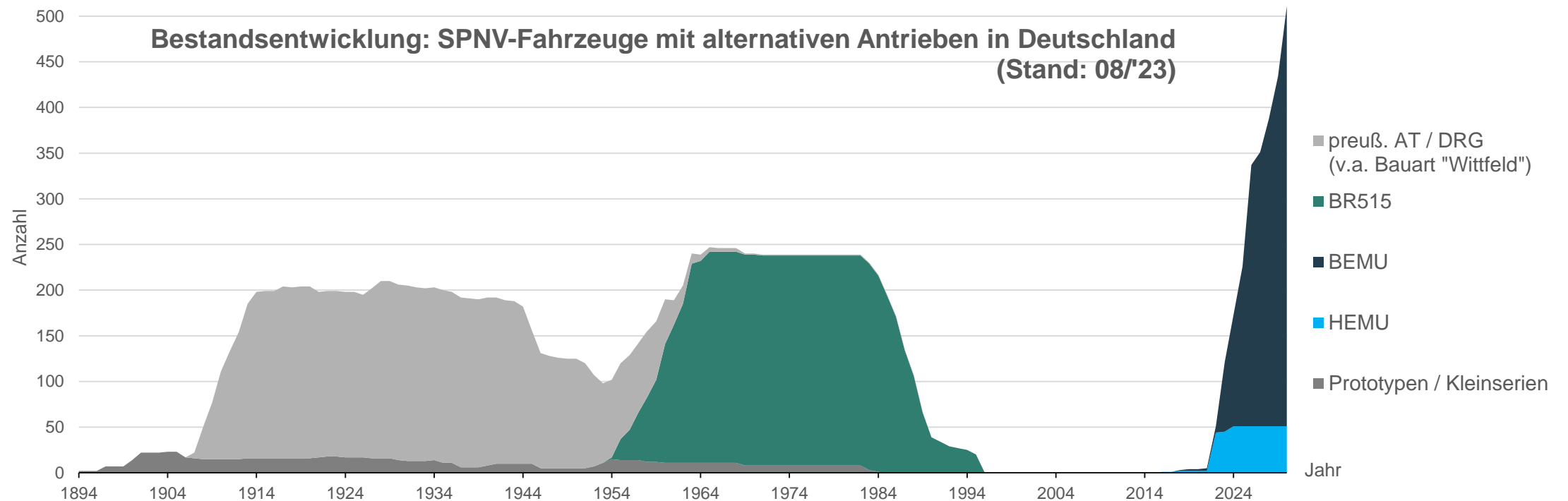
- Eine Batterie altert umso schneller, je wärmer sie wird (Notwendigkeit der Batteriekühlung)
- Eine Batterie altert umso schneller, je tiefer (=DoD) sie im Zyklus entladen wird
- Je nach Zellchemie gibt es ein Lade- bzw. Entladefenster, in welchem die Batterie ein nahezu lineares Verhalten aufweist

SoC = State of Charge (Ladezustand)

DoD = Depth of Discharge (Entladetiefe)









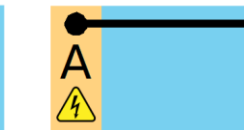
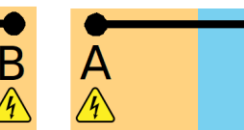


Alternative Antriebe im historischen Kontext



Reichweite der Batterietriebzüge

- Reichweite des Zuges abhängig von den Randbedingungen des jeweiligen Liniennetzes

	Keine Fahrleitung	1 Bahnhof elektrifiziert	Halbe Linie elektrifiziert	Endpunkte elektrifiziert	Teilstrecke nicht elektr.
Fahrtverlauf					
Strecke					
Min. BEMU-Reichweite	<i>Nachladung unmöglich</i>	$2 \times (A \leftrightarrow B)$	$A \leftrightarrow B$	$A \leftrightarrow B$	$(A \leftrightarrow B) \div 2$

- Berücksichtigung von äußeren Einflüssen und Vorgaben der Aufgabenträger notwendig.

Warum Ladeinfrastruktur?

- BEMU können via Fahrleitung nachladen, aber:
 - Fahrleitungsfreier Abschnitt kann Reichweite übersteigen
 - Es gibt Linien, die gar keinen Zugang zu Fahrleitungen haben
- Deshalb: zusätzliche Ladeinfrastruktur
 - Via Stromabnehmer, Ladekabel, ...?
 - Im Stand oder während der Fahrt?
 - Ladezeit vs. Wendezeit!
 - Wer baut und betreibt Lademöglichkeiten?
- Sehr dynamische Thematik:
 - 16,7 Hz vs. 50 Hz
 - Planungen an aktuellen Stand der Technik und der Regelungen anpassen
 - Schlagzeile in Der Eisenbahningenieur, Juni 2019: „Alternative Antriebe im SPNV - Infrastruktur kann das Problem werden“



Bildquelle: Ulrich Zimmermann

PROJEKT BEMU

Projektvorstellung



Projektpartner:

ALSTOM

Technische
Universität
Berlin




DB Regio



WIR BEWEGEN
DAS BAHNLAND BAYERN



Nahverkehrsgesellschaft
Baden-Württemberg mbH

Das Fahrzeug

- Dreiteiliger Regionaltriebzug
- Modulare und redundante Traktionsbatteriesysteme (TBS) mit 300 kWh Batteriekapazität
- Der BEMU Demonstrator hat eine betriebliche Reichweite von bis zu 40 km im Akkubetrieb, in Tests wurden mit Nutzung der „Batteriereserve“ deutlich größere Längen zurückgelegt.
- Das Batteriesystem ist in der Lage, erweitert zu werden und zukünftige Generationen von Batterietechnologie zu handhaben.
- Für Serienfahrzeuge können heute je nach Anwendung Reichweitenanforderungen von bis zu 80-120 km gewährleistet werden.



Bildquelle: Benjamin Ebrecht

Ziel des Probetriebs mit Fahrgästen

Erkenntnisse für den BEMU-Betrieb / Praxistauglichkeit des Konzepts

- Evaluation des Betriebskonzeptes
- Reichweite im Batteriemodus
- Energiemanagement
- Störfälle
- Umlaufplangestaltung

Einflüsse auf die Teilsysteme

- Einflussfaktoren auf den Energiebedarf (Traktion, Nebenverbraucher)
- Einflüsse auf das Batteriesystem
- Optimierung der jeweiligen Systeme und ihr Zusammenspiel

Validierung der Simulationsmodelle

- Validierung bestehender Tools zur Simulation und Auslegung
- Die Grundlagen zur Planung des künftigen BEMU-Betriebs werden verbessert

Akzeptanzstudie

- Befragung von Fahrgästen und Trassenanwohnern
- Verknüpfung der Aussagen mit aufgenommenen Daten (z.B. Fahrgastraumtemperatur)

Ziel: Gewinn wertvoller Erkenntnisse für Weiterentwicklung eines Serienfahrzeuges

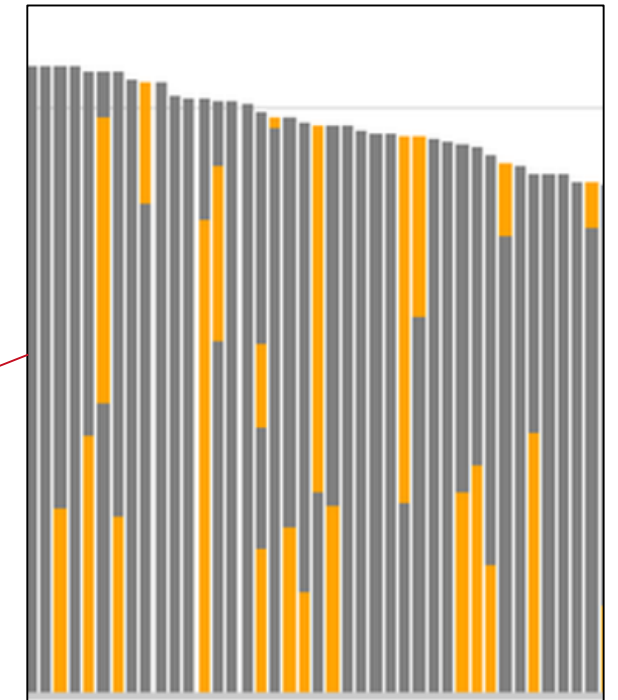
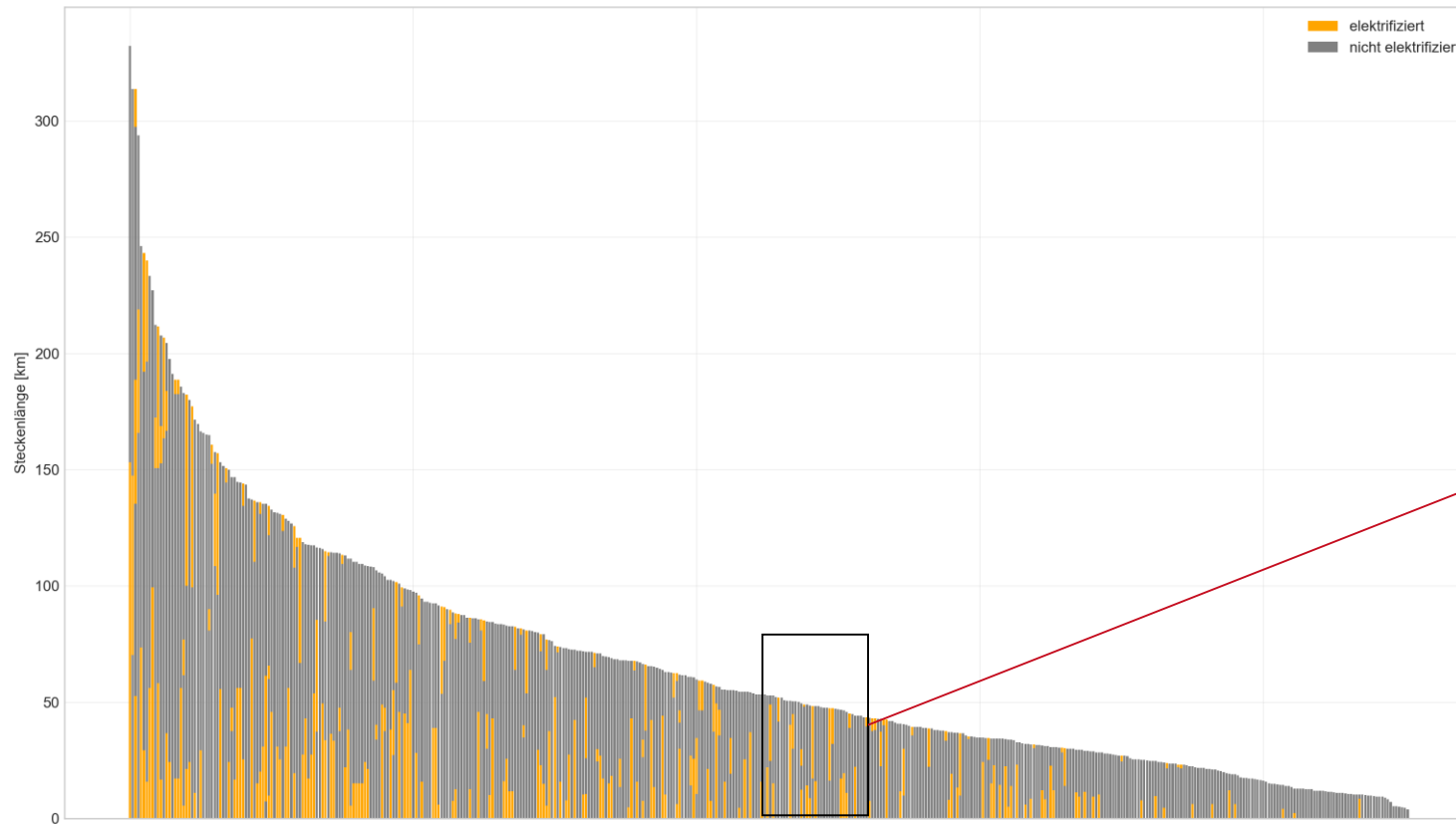
ANALYSE DES LINIENNETZES

Linienanalyse



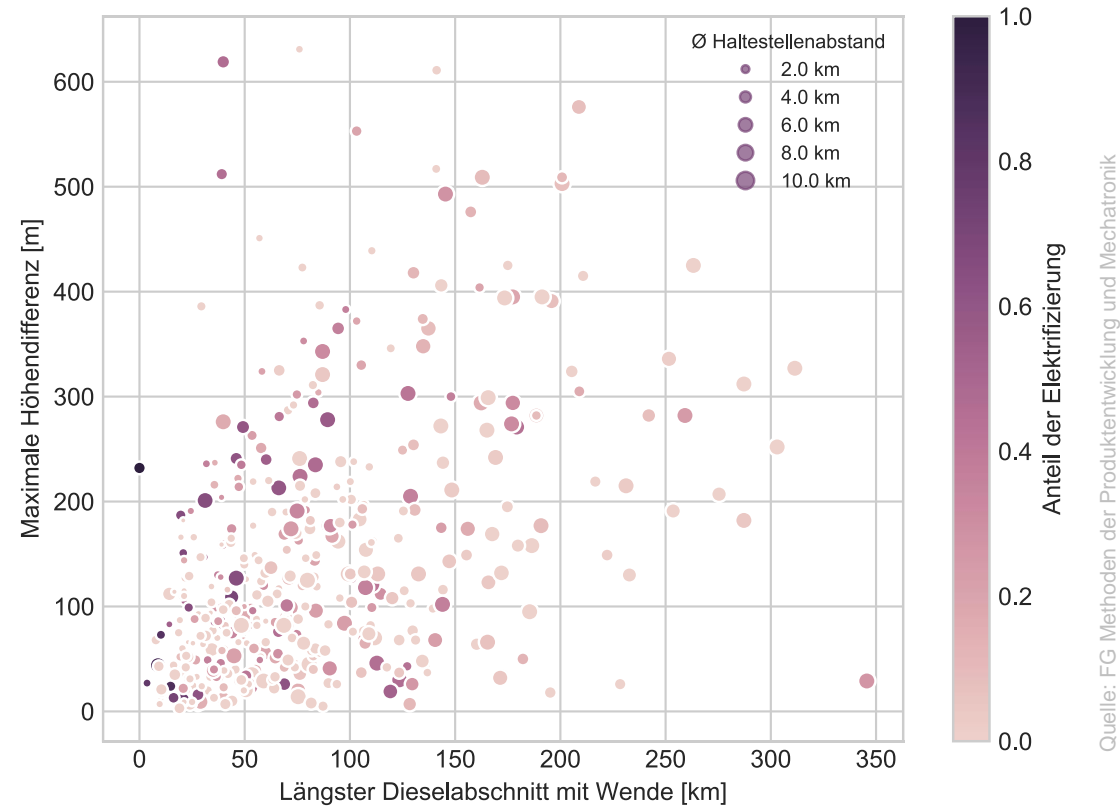
Gesamtuntersuchung deutsches Schienennetz (nicht elektrifiziert)	
Gesamtzahl der untersuchten Linien	452
davon Verstärkerlinien	95
davon Linien ohne elektrische Versorgung mit 15 kV	83
Median Linienlänge [km]	50,2
Median nicht-elektrifizierte Abschnitte [km]	39,5
Gesamtanzahl Netze	108
Linien, die aktuell keinem Ausschreibungsnetz zugeordnet sind	9
Teilelektrifizierte Bahnhöfe (einzelne Dieselgleise)	19

Fortführung Analyse der SPNV-Linien



Quelle: FG Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik

Fortführung Analyse der SPNV-Linien



TESTBETRIEB

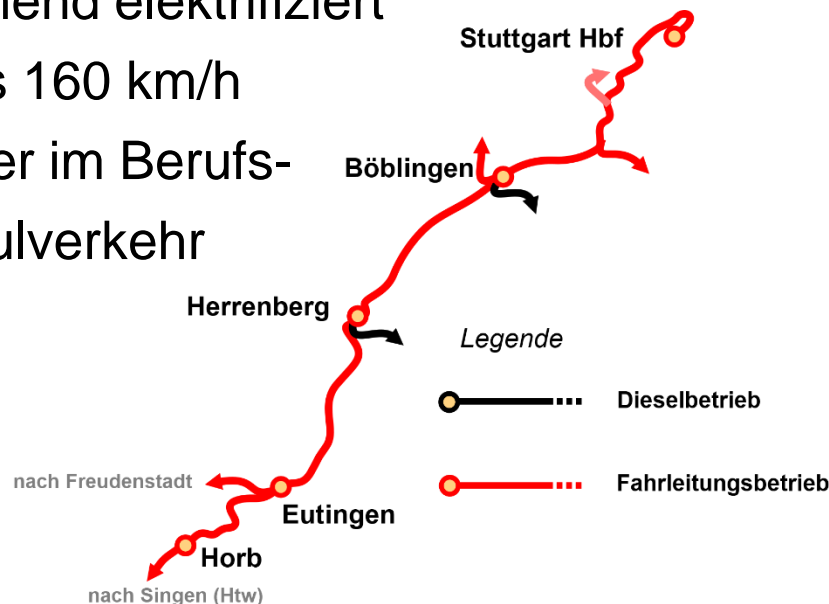
Planung des Probebetriebs – Streckenauswahl und Machbarkeitsanalyse

- Betrachtung von teilweise und durchgehend elektrifizierten Linien
 - Bewertung der Strecken nach Kriterienkatalog
 - Transition während der Fahrt im Testbetrieb nur bei kompletter Elektrifizierung
- Machbarkeitsanalyse auf Basis von energetischen Simulationen für in Frage kommende, teilelektrifizierte Strecken
 - Variation von Zuladung, Fahrweise und Wetterbedingungen
- Entscheidung für Probebetrieb:
 - Unterwöchig: Gäubahn (Stuttgart – Horb)
 - Ausgewählte Wochenenden: Pleinfeld – Gunzenhausen

Streckencharakteristika

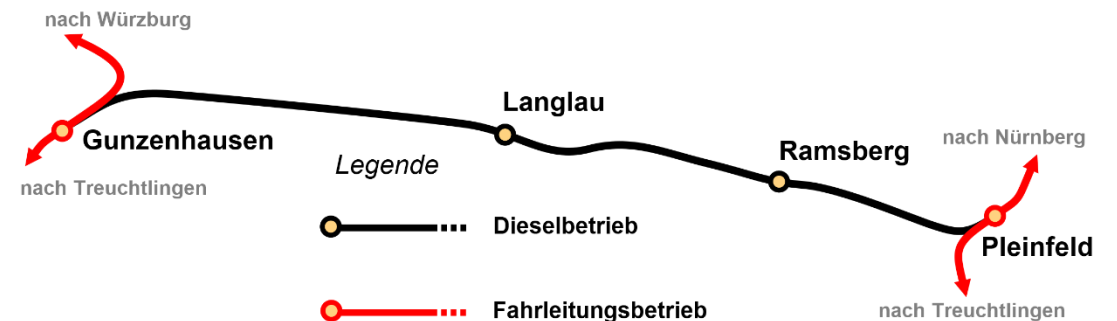
Gäubahn (Herrenberg – Horb, BW)

- Zweigleisige Hauptstrecke
- Länge: 26 km
- durchgehend elektrifiziert
- Vmax bis 160 km/h
- Verstärker im Berufs- und Schulverkehr



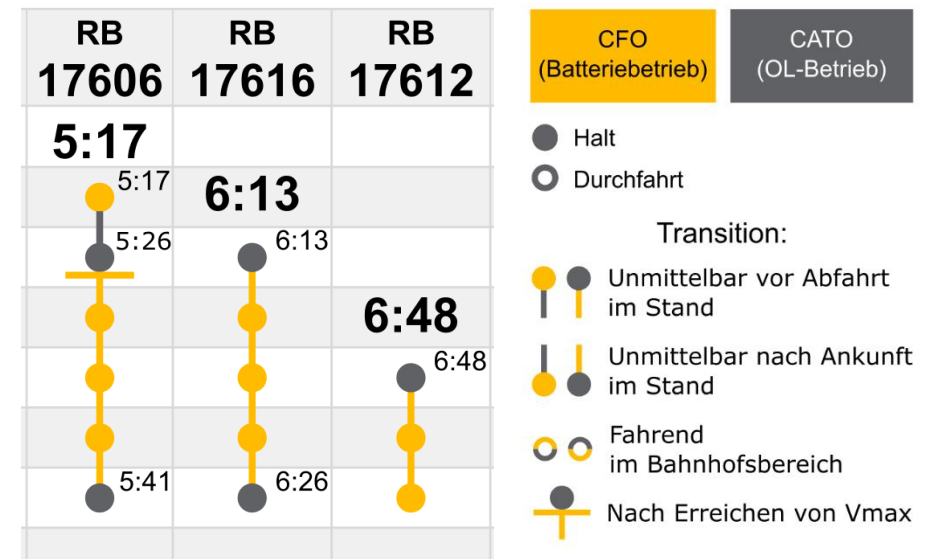
Pleinfeld – Gunzenhausen, BY

- eingleisige Nebenbahn
- Länge: 16,7 km
- Vmax 80 – 120 km/h
- Zwei-Stunden-Takt am Wochenende
- Oberleitung nur an den Endbahnhöfen



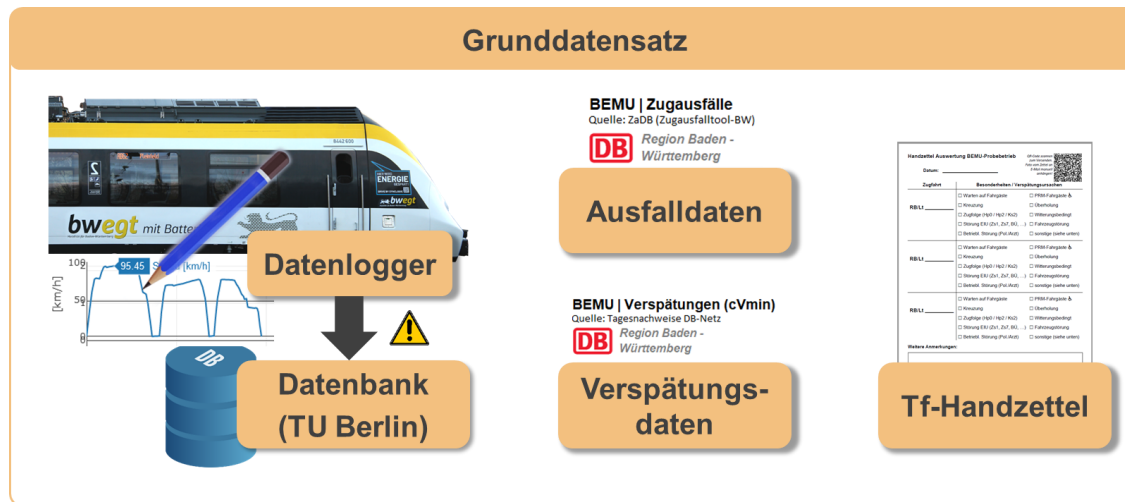
Gestaltung des Betriebsprogramms für die Gäubahn

- Definition:
 - Batteriebetrieb (CFO – Catenary Free Operation)
 - Oberleitungsbetrieb (CATO – Catenary Operation)
- Ausgewählte Ziele:
 - Hoher Anteil an CFO
 - Transitionen im Stand und während der Fahrt
 - Wenden im CATO und CFO
- Durchführung fahrtscharfer energetischer Simulationen zur Ermittlung der Machbarkeit
- Graphische Darstellung der Systemwechsel für das Fahrpersonal
- Entwicklung gemeinsam mit DB Regio und DB Netz



Ausschnitt aus dem gefahrenen Betriebsprogramm

Methodik der Auswertung

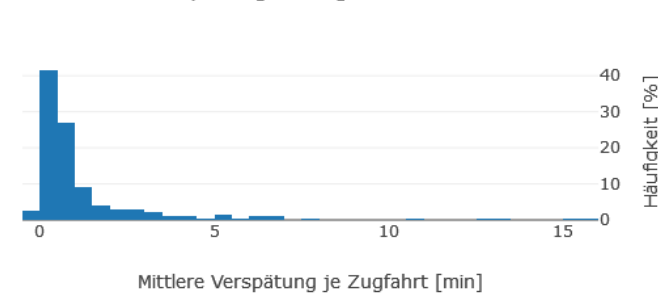


- Nutzung zahlreicher Datenquellen
 - Sensordaten vs. „Was Sensoren nicht sehen“
 - Zuarbeiten durch DB Regio und die Tfs
 - Umfangreiche Aufbereitung der Daten aus dem Fahrzeug-Logger notwendig
- Grunddatensatz
 - Auswertungen und Grafiken basieren auf diese aufbereiteten Daten
- Nachfolgende Zwischenauswertung
 - Datenstand 24.01. bis 06.03.22
 - = 6 Wochen Gäubahn-Einsatz sowie 4 Wochenenden Gunzenhausen - Pleinfeld

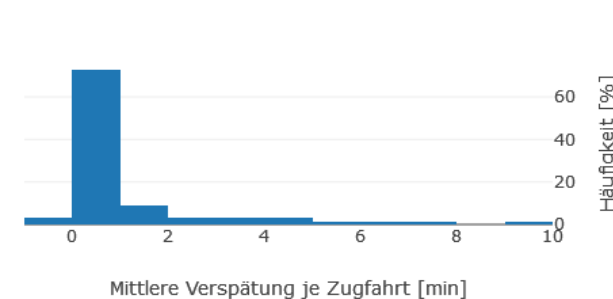
Auswertungen: Betriebliches (2)

- Verspätungen und deren Entwicklung – Gäubahn:
 - BEMU befährt im CFO-Modus ein CATO-Fahrplangefüge
 - Anfangsverspätungen werden im Mittel trotz verringerter CFO-Antriebsleistung beibehalten
 - Signifikanter Anteil sekundärer Ursachen (bspw. „Zugfolge“)
- Verspätungen und deren Entwicklung – Franken:
 - Schwerpunkt: 20 % der Fahrten mit Anfangsverspätung > 0,9 min (Warten auf Fahrgäste), die meist verringert werden kann
 - Häufigkeit deckt sich mit Dieselbetrieb
 - Bei anfangsverspäteten Fahrten signifikant größerer Verspätungsabbau mit BEMU gegenüber Dieselbetrieb!

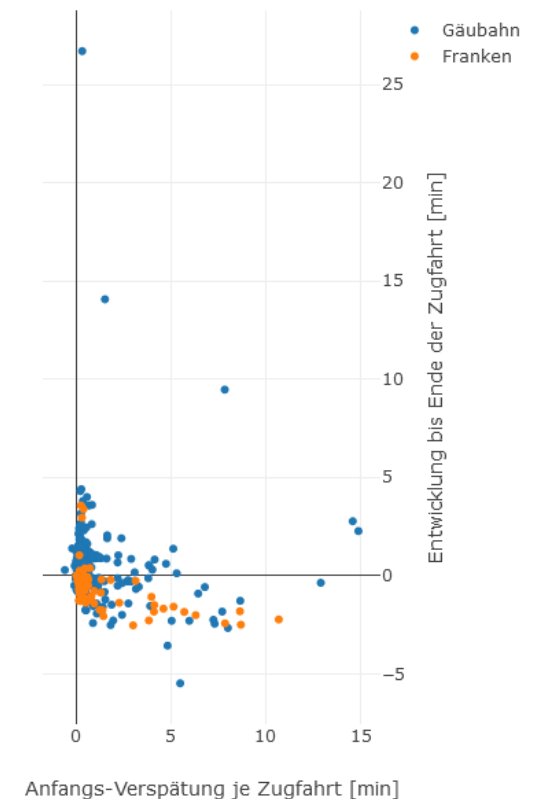
Mittlere Verspätung: Fahrgastfahrten Gäubahn



Mittlere Verspätung: Fahrgastfahrten Franken

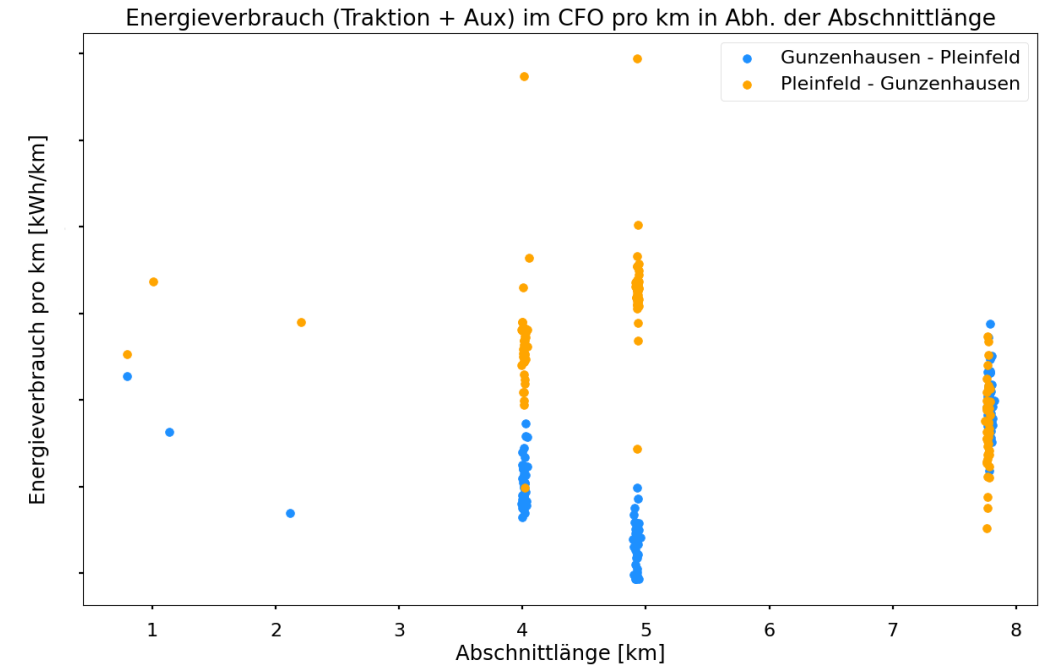
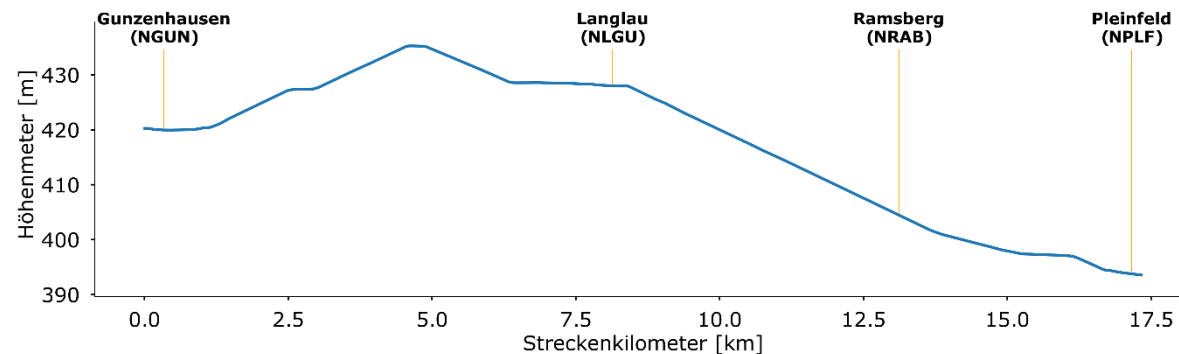


BEMU-Verspätungen: Entwicklung während der Zugfahrten



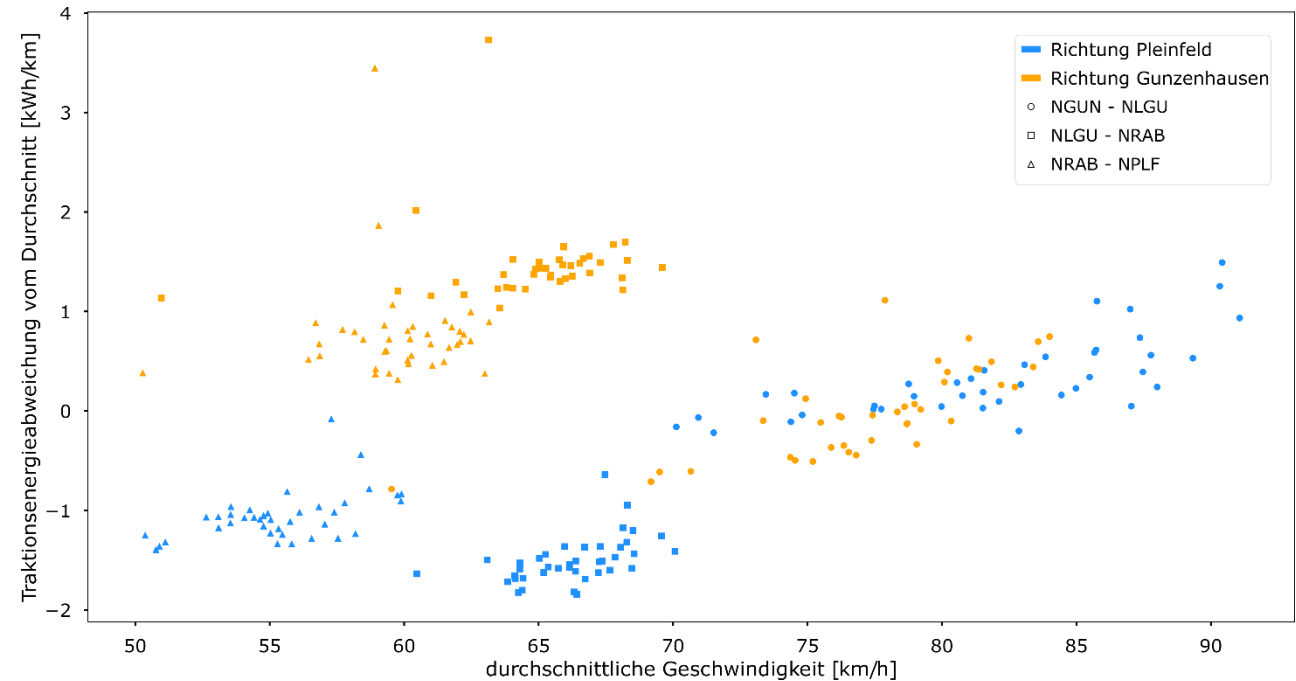
Energetische Auswertung (1)

- Basieren auf der Strecke in Bayern
- 6 Cluster (in Abh. des Höhenprofils und der Segmentlänge = Haltestellenabstand)
 - Die restlichen Punkte entsprechen unplanmäßigen Halten
- Streuung: Einflüsse auf den Verbrauch noch im Detail zu ermitteln



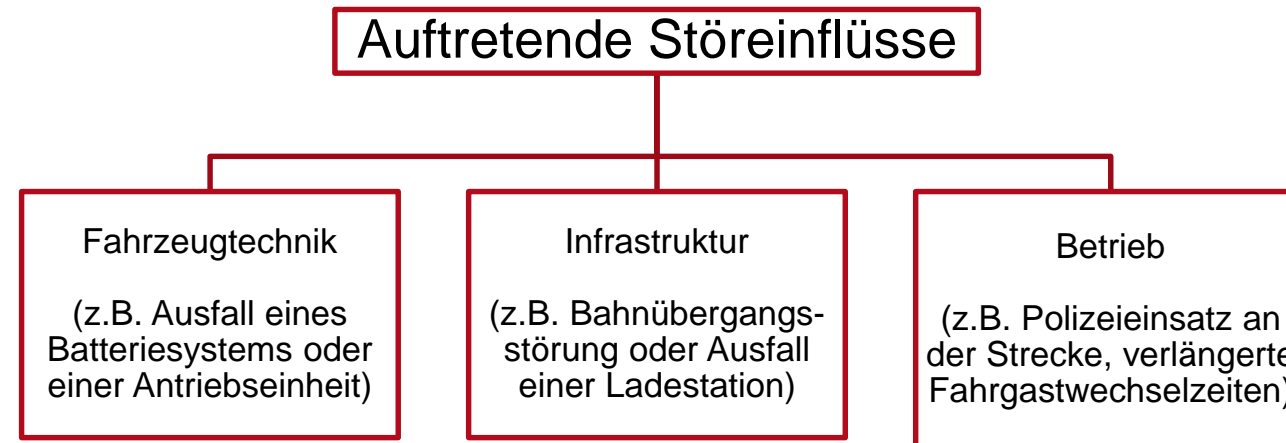
Energetische Auswertung (2)

- Beispielhaft:
Traktionsenergieverbrauch pro km in Abh. der durchschnittlichen Geschwindigkeit pro Segment
- Relativ zu dem durchschnittlichen Verbrauch auf der Strecke über den gesamten Probezeitraum
- Die signifikante Verbrauchsstreuung ist hauptsächlich auf die Fahrweise zurückzuführen
- Straffere Fahrweise (bzw. höhere Geschwindigkeit) führt zu höherem Verbrauch



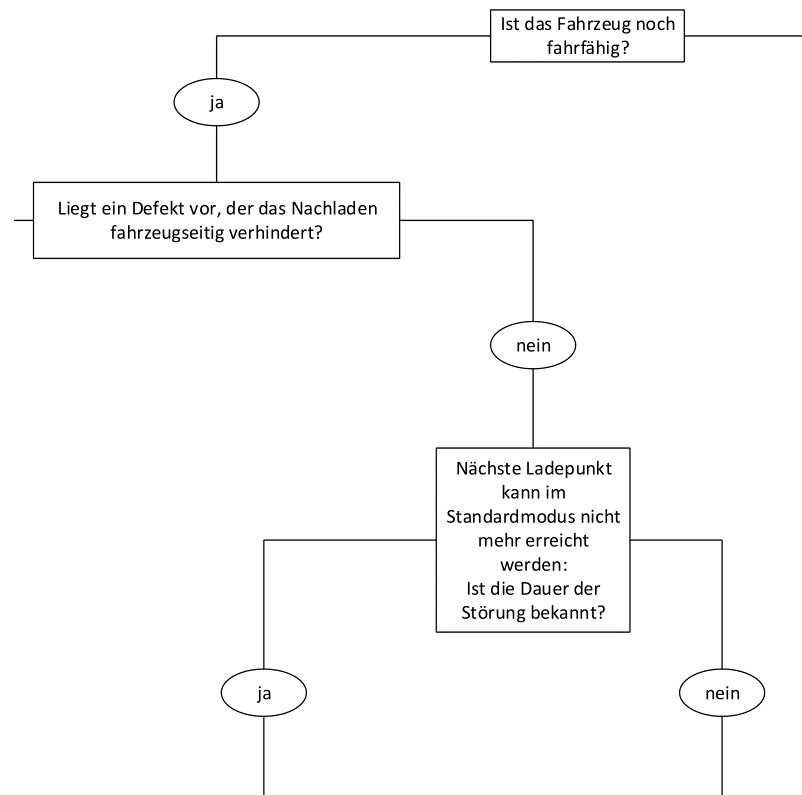
BETRIEB IM STÖRUNGSFALL

Störungsbetrieb allgemein



Nahezu alle Störeinflüsse lassen sich auf eine entscheidende Auswirkung herunterbrechen: Das BEMU-Fahrzeug erreicht nicht mehr die voraus- oder zurückliegende Ladeinfrastruktur, bleibt liegen und ist auf fremde Traktion angewiesen.

Fahrzeugauslegung - Energiemanagement



- Implementierung Energiemanagement bzw. Energiesparmodi
- Bei drohendem Liegenbleiben kann der Verbrauch verringert werden.
- Übermittlung der Informationen über voraussichtliche Dauer der Störung an Fahrpersonal (siehe auch Disposition)
- Klare Regelung, wer auf Basis welcher Informationen Entscheidungen treffen darf (Tf allein, Absprache mit EIU-Leitstelle)

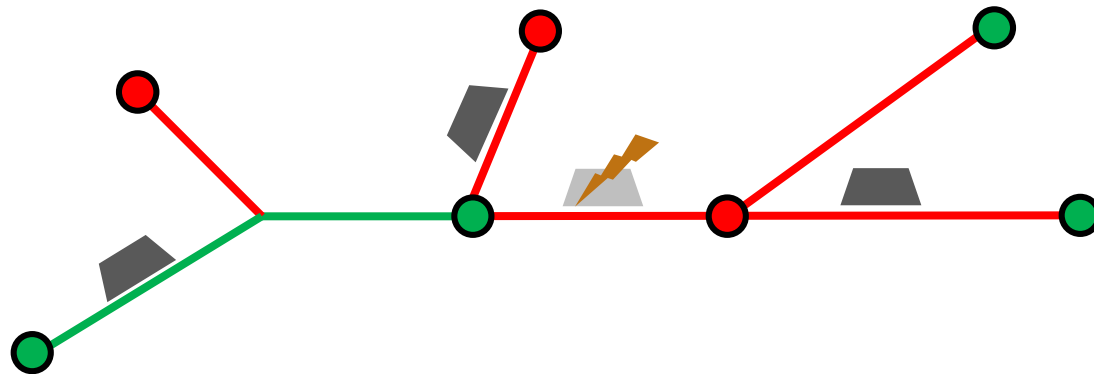
Betriebsplanung

- Wendezeiten als maßgeblicher Faktor
- Neben Fahrzeug- und Personalbelangen kommt an elektrifizierten Endpunkten die Ladezeit hinzu.
- Zeitpuffer muss eingeplant werden, um durch Verkürzung der Wendezeiten Verspätungen aufholen zu können
- Verknüpfung von bisherigen Diesel-Netzen und E-Netzen nutzen, BEMU als EMU einsetzen, um Ladezeit zu gewinnen

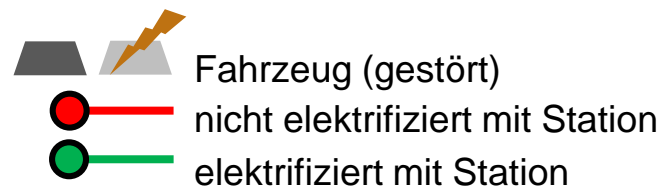


Bildquelle: Benjamin Ebrecht

Betriebsplanung – Konzepte für Störungsbetrieb



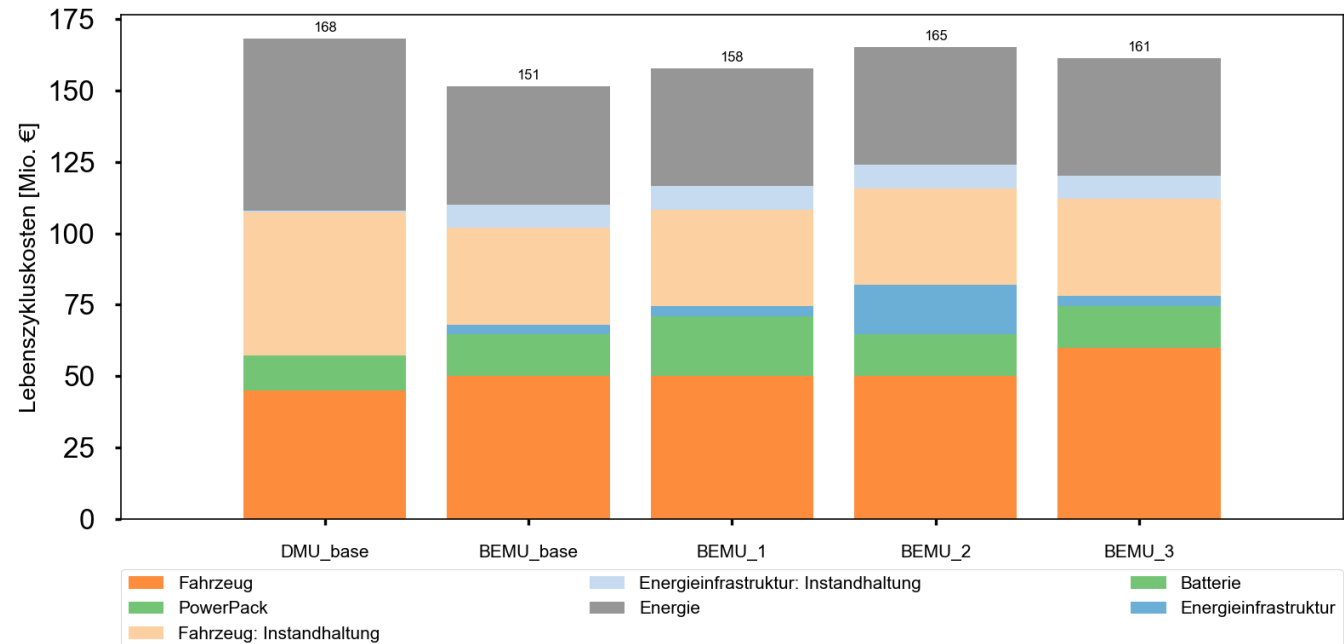
- Störeinflüsse im eigenen Netz analysieren und Dauer sowie Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten ableiten
- Möglichen Ausfall von Ladeinfrastruktur berücksichtigen
- Konzepte erarbeiten, welche Verkehre bei welchen Störungen noch gefahren werden können bzw. welche Maßnahme eingeleitet werden sollen



WIRTSCHAFTLICHKEIT UND UMWELTBILANZ

Wirtschaftlichkeit

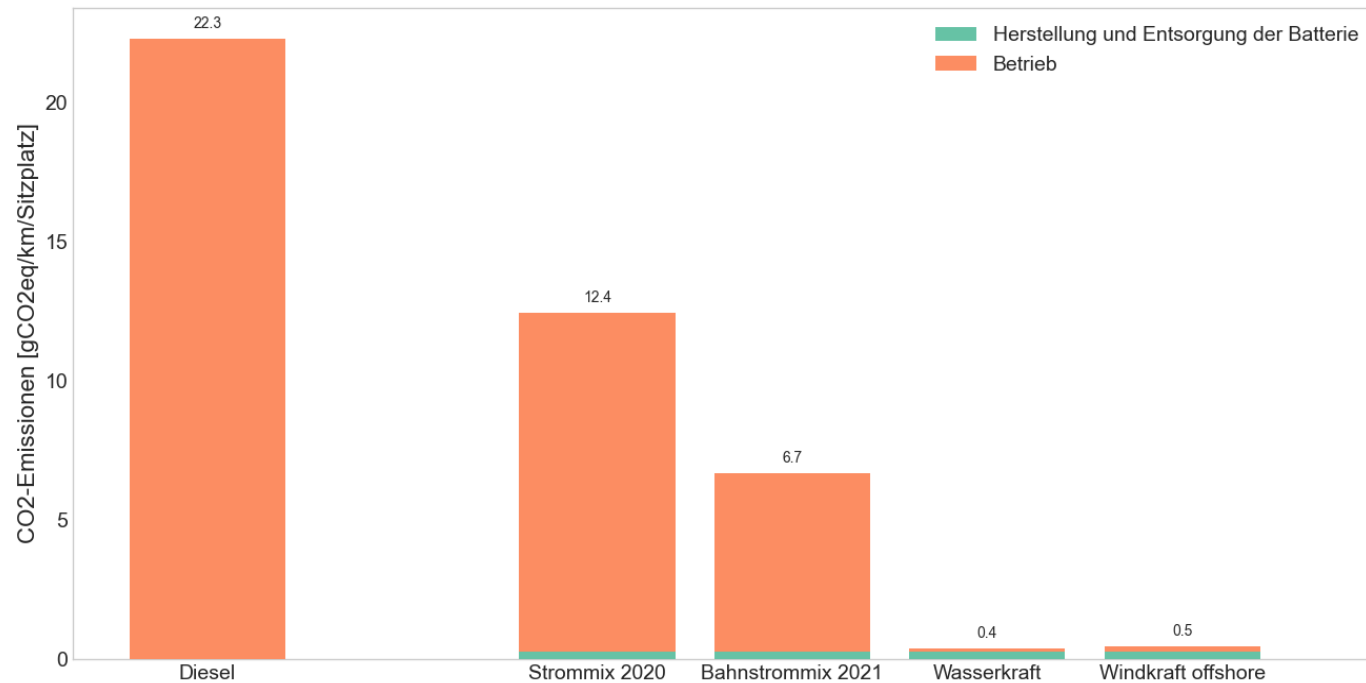
- Verschiedene Netztypen untersucht
- Starke Prognoseschwankung durch lange Fahrzeuglebensdauer
- Werte basieren zum Teil aufgrund fehlender Erfahrungswerte auf Schätzungen und Simulationen (z.B. Batterielebensdauer)
- Großteil der Untersuchungen ergibt über die Fahrzeuglebensdauer Vorteile von BEMU gegenüber Diesel.



Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Beispielnetz

Szenarien: BEMU_1: verkürzte Batterielebensdauer; BEMU_2: erhöhte Ladestationskosten; BEMU_3: erhöhte BEMU-Fahrzeugkosten

Umweltbilanz



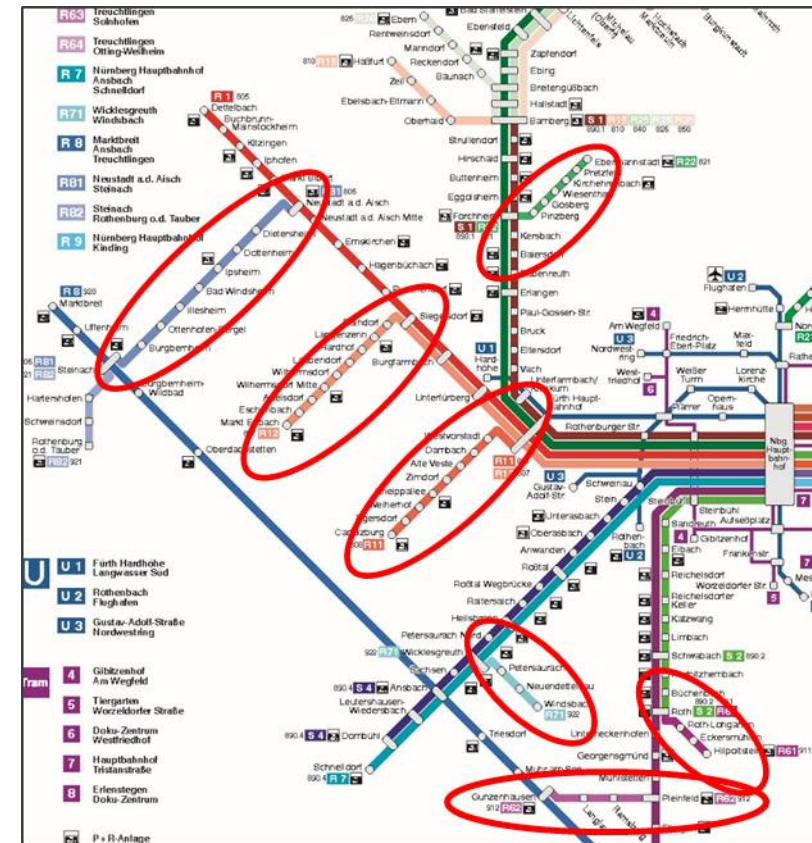
- Randbedingungen

- Dieserverbrauch 1,1 l/km
- BEMU-Verbrauch 5 kWh/km.
- NMC/C-Batterie mit einer Gesamtkapazität von 600 kWh und einer Lebensdauer von 6 Jahren
- 160 Sitzplätze pro Fahrzeug werden zugrunde gelegt
- Fahrzeuglebensdauer: 30 Jahre

POTENTIALE UND ZUSAMMENFASSUNG

Nutzbare Potentiale durch neue Fahrzeugtechnologie

- Bessere Fahrdynamik, dadurch ggf. kürzere Fahrzeiten und höhere Betriebsstabilität
- Höherer Fahrkomfort, leisere Fahrzeuge
- Ladeinfrastruktur kann bei späterer Vollelektrifizierung weiter genutzt werden, passende Planung vorausgesetzt
- Einfachere Durchbindung von Linien, Vermeidung von Umsteigebeziehungen



Bildquelle: Verkehrsverbund Großraum Nürnberg, online unter:
https://www.vgn.de/liniennetz/schiennetz_gesamtraum/

Zusammenfassung

- Fahrzeug konnte erfolgreich im Betrieb eingesetzt werden und die Anforderungen im Fahrgastbetrieb erfüllen
- Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanz positiv im Vergleich zum Dieselfahrzeug
- Betreiber und Aufgabenträger müssen die besonderen Merkmale von BEMU-Fahrzeugen berücksichtigen (begrenzte Reichweite, Aufladen, Infrastrukturplanung, Umlaufplanung usw.)
- Es müssen passende Anreizsysteme an den Schnittstellen zwischen den einzelnen Akteuren gesetzt werden.
- Auch vermeintlich kleine Details können entscheidend für einen erfolgreichen Betrieb sein.
- Wissensaustausch zwischen den Beteiligten muss gefördert werden.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Bildquelle: Benjamin Ebrecht

Kontakt

Ulrich Zimmermann

Fachgebiet Bahnbetrieb und Infrastruktur

Sekr. SG 18

Severingelände - Geb. SG-12

Salzufer 17 – 19

10587 Berlin

E-Mail ulrich.zimmermann@tu-berlin.de

Benjamin Ebrecht

Fachgebiet Bahnbetrieb und Infrastruktur

Sekr. SG 18

Severingelände - Geb. SG-12

Salzufer 17 – 19

10587 Berlin

E-Mail benjamin.ebrecht@tu-berlin.de