Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik
Professur für Elektrische Bahnen

Bewertung alternativer Antriebe im SPNV

Welcher Hybrid eignet sich für welches Netz?

Foto: SNCF

Foto: Stephan

Foto: Alstom

Foto: Stadler

3. ÖVG-Kongress Fahrstromanlagen

12. November 2021

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan
Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Dipl.-Ing. Nyascha Thomas Wittemann

Vorab …

Moderne Bahnen

=

VIEL + SCHNELL + ELEKTRISCH

1.

Warum kein Dieselverkehr mehr

?

Handlungsbedarf: Warum kein Dieselverkehr mehr?

- Verringerung von CO_2- und Schadstoffausstoß …
- Lärmreduktion …
- Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern …
- höhere Energieeffizienz, grüne Mobilität …

→ **Dies alles sind gesellschaftliche Ziele.**

Dahinter stehen meist politischer Wille oder Betroffenheiten, **selten aber wirtschaftliche Treiber**.

→ **Es kann aber auch handfeste Gründe geben, wie z.B.**

- Dieselverbot (emissionsfreie Zonen, Tunnel)
- lokale Lärmschutzauflagen
- vorhandene (Teil-)Elektrifizierungen mit Ausbauoption
- höhere Wirtschaftlichkeit im Lebenszyklus

Entscheidungsbedarf: Antriebe in SPNV-Dieselnetzen

Ausgangslage:

- Deutschland: Vergabe von Verkehrsleistungen über Ausschreibungen
  → Technologieentscheidungen für Betriebsaufnahmen ab 2024 bis 2030 stehen in vielen Netzen an
- SPNV in diesen Dieselnetzen soll ökologischer werden
- Mehrere alternative Antriebstechnologien bieten sich als Lösung an

Ziel der Untersuchungen:

- **Gesamtwirtschaftliche Technologiebewertung** mit einheitlicher Antriebstechnologie für vollständige Netze
  → sichert **Wirtschaftlichkeit und Flexibilität** des Betriebs
  → mehrere Technologien im Netz führen zu **höheren Kosten**
- Bewertungskriterien: **Betrieb, Wirtschaftlichkeit, Ökologie**

2.

Welche technologischen Alternativen gibt es

?

Übersicht Antriebstechnologien

1. **Weiterbetrieb mit klassischen Dieselfahrzeugen**
   Referenzfall: keine zusätzliche Infrastruktur

2. **Einsatz klassischer Elektrofahrzeuge**
   Referenzfall: Streckenelektrifizierung Gesamtnetz notwendig

3. **Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge**
   mit elektrischem Energiespeicher und Nachlade-Infrastruktur (vorhandene Oberleitung und zusätzliche Ladeabschnitte)

4. **Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge**
   mit elektrischem Antrieb & Energiespeicher sowie Brennstoffzelle, mit Wasserstoff-Tankinfrastruktur und -logistik

5. **Zweikraftfahrzeuge Elektro/ Diesel**
   sog. Dual-Mode-Fahrzeuge ohne elektrischen Energiespeicher und ohne zusätzliche Infrastruktur

6. **Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge**
   mit elektrischem Antrieb & Energiespeicher sowie Nachlade-Infrastruktur (vorh. Oberleitung und zusätzliche Ladeabschnitte)

Elektrisch fahren – mit oder ohne Oberleitung?
Welcher Hybrid soll es sein?

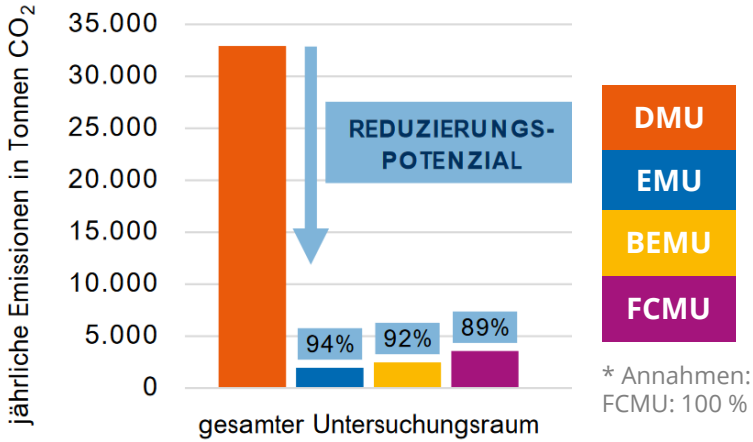
Ziel:

langfristig belastbare **Entscheidungskriterien** zur Technologieauswahl und für Umsetzungsstrategien

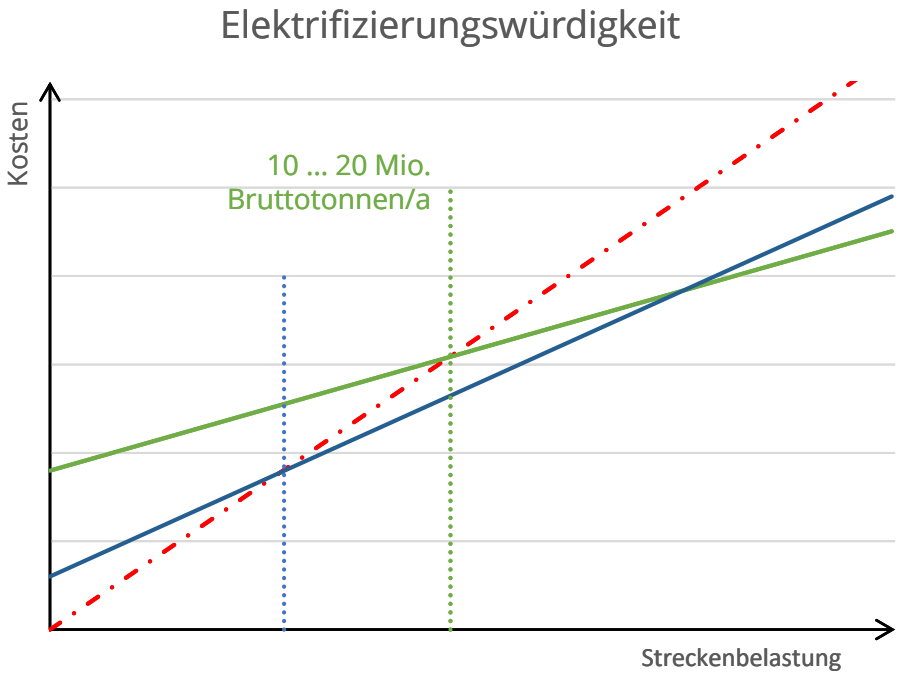
→Bisher nur: **Diesel** oder **Fahrleitung**

→neu: **Hybridantriebe**

+ ggf. CO_2-Emissions-Bewertung



* Annahmen: EMU+BEMU: Bahnstrommix 2031-2046, FCMU: 100 % regernative Elektroenergie zur Erzeugung



Einschätzung der Marktreife

- Aktuell stehen
  - Brennstoffzellen-/ Batterie-Hybride und
  - Oberleitungs-/ Batterie-Hybride

  vor den ersten Betriebsaufnahmen ab Ende 2022.
- ➢ **Ca. 40 festbestellte HEMU & mehr als 150 bestellte BEMU**
- ➢ **Alle großen Fahrzeughersteller bieten BEMU an**
- ➢ **Einige Hersteller zudem auch HEMU**

- Es gibt derzeit in Deutschland aber
  - nur je Technologie zwei zugelassene Vorserien-Fahrzeuge (Ziel: weitere Zulassungen 2022/2023 für Betriebsaufnahmen im SPNV),
  - kaum Erfahrungen im Alltagsbetrieb,
  - noch kaum professionelle Infrastruktur für Betankung/ Nachladung.
- ➢ **Zudem: Alle Hybridtechnologien stehen und fallen mit der realen Betriebstauglichkeit der Hochtechnologiekomponenten (Brennstoffzelle, Batterie).**

Infrastrukturbedarf BEMU

Bestandsoberleitung / Verlängerungsoberleitung

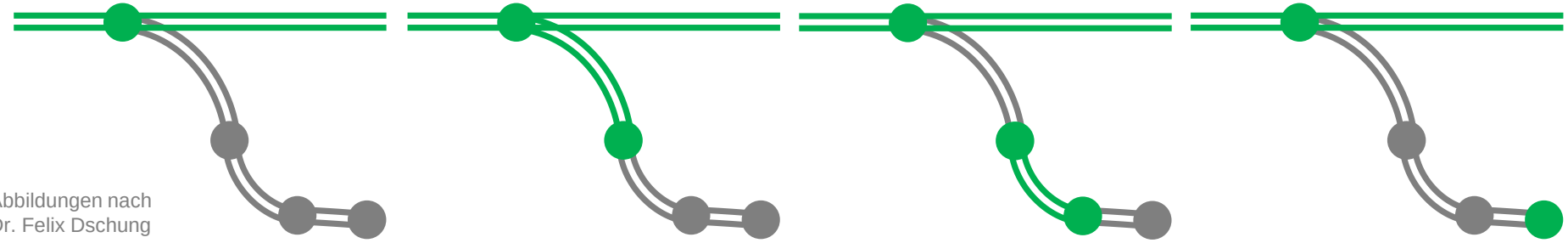
- Standardsystem zur Versorgung
- Laden im Stand und in Bewegung
- Energieversorgung erforderlich

Inseloberleitung

Quelle: Stadtwerke Tübingen

Ladestation

- Stromabnehmerladung im Stillstand
- Entspricht baulich einer bekannten Oberleitung
- Energieversorgung aufwändiger



Abbildungen nach
Dr. Felix Dschung

Fotos: Wittemann

Machbarkeit der Ladeinfrastruktur vor Ort (1)

- Bestandssignaltechnik (Gleisfreimeldung, Stellwerke, Kabelanlagen) → Beeinflussungsfestigkeit derselben
- (nicht) vorhandene Erdungsanlagen an Bahnsteigen, Geländern, Zäunen etc.

- Durchfahrtshöhen/ Freiheit des Stromabnehmerraumes bei Ingenieurbauwerken (Tunnel, Brücken, Bahnsteigdach)
- Energieversorgungssituation

Fotos: Wittemann

Machbarkeit der Ladeinfrastruktur vor Ort (2)

Freiheit Stromabnehmerdurchgang

Energieversorgungssituation

Infrastrukturbedarf FCMU / FCEMU

Quelle: Clean Energy Partnership

Quelle: Linde

Wasserstofftankstelle

- Zwischenlagerung von H_2
- Geregelte Abgabe von H_2 an Fahrzeuge

Dezentrale Erzeugung an der Tankstelle

- Elektrolytische Erzeugung aus Wasser + Strom

Zentralisierte Erzeugung

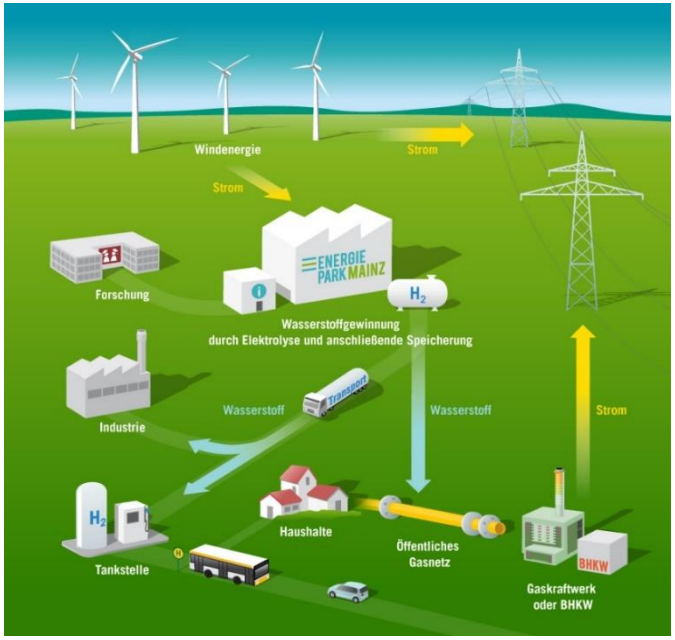
- Großtechnische Herstellung von H_2
- Aufbereitung und Verdichtung/Verflüssigung

Bestandsoberleitung

- Standardsystem zur Versorgung
- Laden im Stand und in Bewegung
- Energieversorgung erforderlich

Machbarkeit der Wasserstoffinfrastruktur vor Ort

- **Wo?** Leistungsfähige & betrieblich gut erreichbare Betankungsstandorte
- **Wie?** Erzeugung am Abgabeort (On Site) oder zentrale Produktion mit Logistik
- **Was?** Flüssigwasserstoff (LH2), Gasförmiger Wasserstoff (GH2) → Wirtschaftlichkeit
- **Was noch?** Ökologische Bewertung (grüner/grauer Wasserstoff), Sektorenkopplung …



Quelle: energiepark-mainz.de

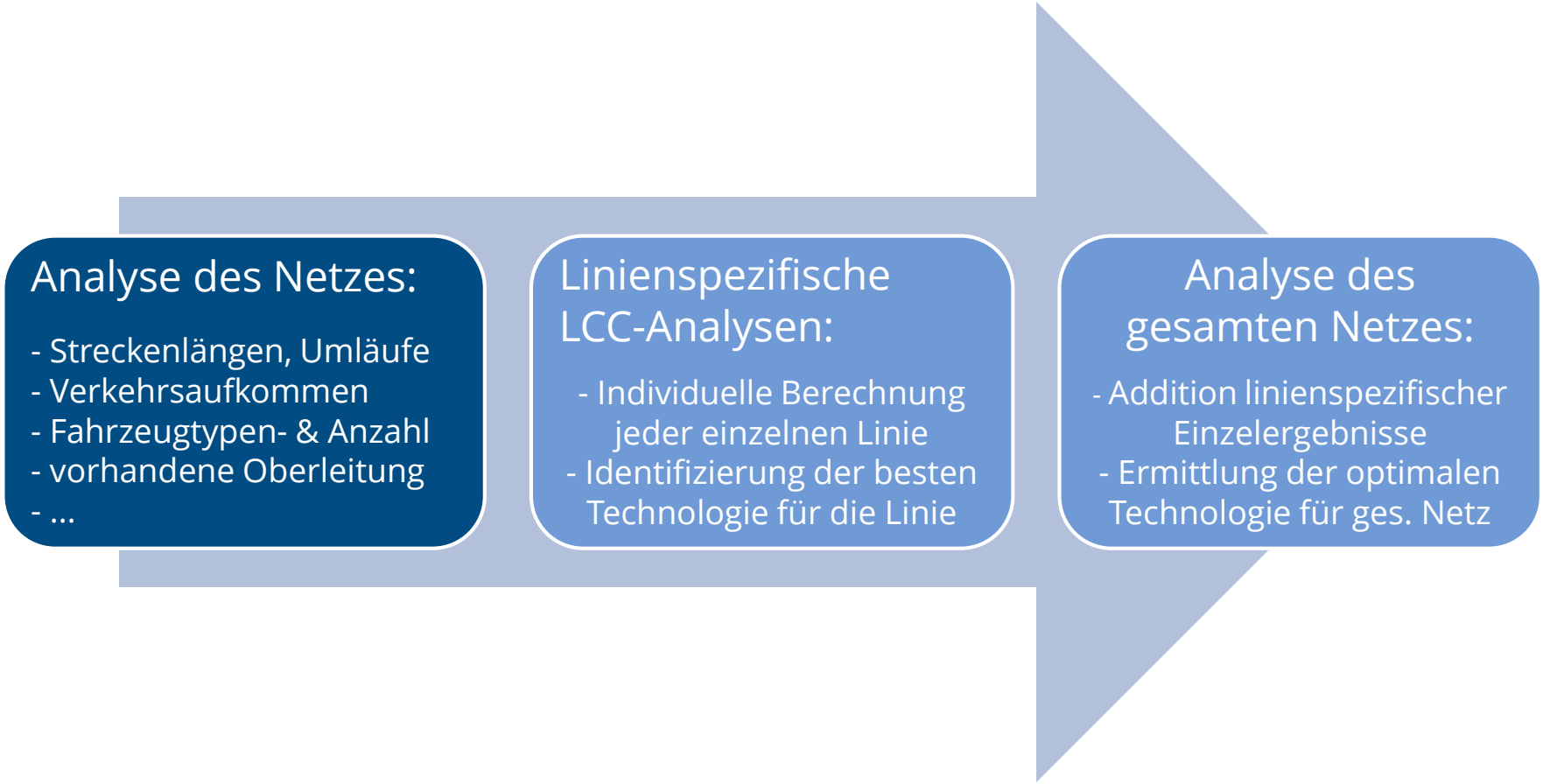
Quelle: NOW GmbH

3.

Welcher Hybrid für welches Netz

?

Methodik
Vorgehen bei einer Netzbewertung



Methodik
Betrachtete Parameter des Berechnungsmodells

- **Investitionen** Fahrzeuge & *zusätzliche* Infrastruktur (+ ggf. Finanzierung)
  → Dimensionierung & Kalkulation zusätzlicher Infrastruktur, ggf. mit Varianten
- **Traktionsenergiekosten entsprechend Ø-Verbrauch** (abhängig von Bezugsquellen)
  → Diesel-/ H_2-Tankstelle, Oberleitung (Bahnnetz), Ladestation (Landesnetz)
- **Instandhaltungskosten** Fahrzeuge & *zusätzliche* Infrastruktur
  - laufende Instandhaltung
  - Hauptuntersuchungen Fahrzeuge
- **Re-Investitionen** in **Hochtechnologiekomponenten**
  - Batterien → Oberleitungs-/Batt.-Hybrid, Diesel-/Batt.-Hybrid, H_2-/Batt.-Hybrid
  - Brennstoffzellen → H_2-/Batt.-Hybrid
  - PowerPacks (Dieselmotoreneinheit) → Diesel, Dual Mode, Diesel-/Batt.-Hybrid

  → jeweils in Abhängigkeit von variabler, belastungsabhängiger Lebensdauer
- ggf. erforderliche **Re-Investitionen** in **Fahrzeuge & *zusätzliche* Infrastruktur**
- **(Restwerte** bei Betrachtungsdauern < Abschreibungszeitraum der Komponenten)

Bestimmung Infrastrukturbedarf bzw. –kosten

- **Wo** wird Lade- bzw. Tankinfrastruktur benötigt?
  - Prüfung des Energiebedarfs je Fahrt (insbes. BEMU) bzw. je Tag (insbes. FCMU)
  - Spitzenwertbetrachtung: auch für schwierigste Bedingungen (im Winter & bei Störungen) muss das Konzept funktionieren
  - Einfluss Betrieb: **wann** kann **wo** (wie viel) getankt/geladen werden

- **Welche** Lade- bzw. Tankinfrastruktur wird benötigt?
  - **Leistungsfähigkeit der Anlage** → Ladeleistung bzw. Bereitstellungsleistung Wasserstoff pro Stunde/Tag/Jahr
  - **Welche Ausdehnung** ist notwendig → Anzahl & Länge der elektrifizierten Betriebs- und Abstellgleise bzw. Anzahl Tanksäulen
  - **Einfluss Wasserstofflogistik**: Anlieferung vs. On-Site-Herstellung
  - **Platzbedarf** der Tankstellen- & Einspeise-/Umwandlungsanlagen

- **Welche Kosten?**
  - Betrachtung der technisch notwendigen Ausrüstung vor Ort unter Berücksichtigung wirtschaftlichen Machbarkeit
  - Kostenbestimmung anhand Kostenkenn-/Erfahrungswerten, Studien, Angeboten …

4.

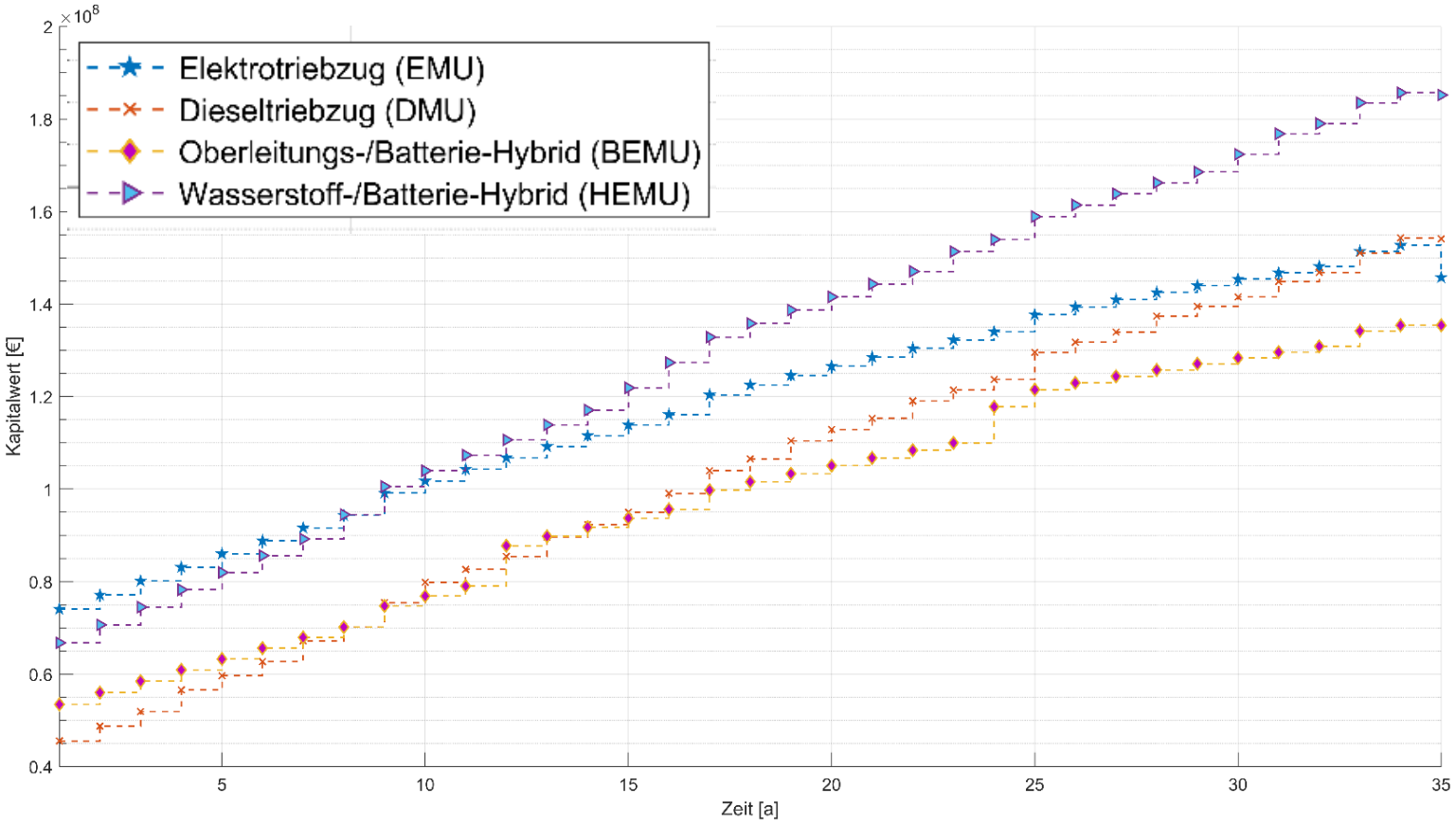
Wer macht das Rennen

?

Lebenszykluskostenuntersuchung

LCC – Kapitalwertverläufe mit Restwerten

Bsp.: 1- bzw. tlw. 1/2-h-Takt, 49,2 % elektrifiziert, 9 Fahrzeuge & ca. 417 Fzg-km

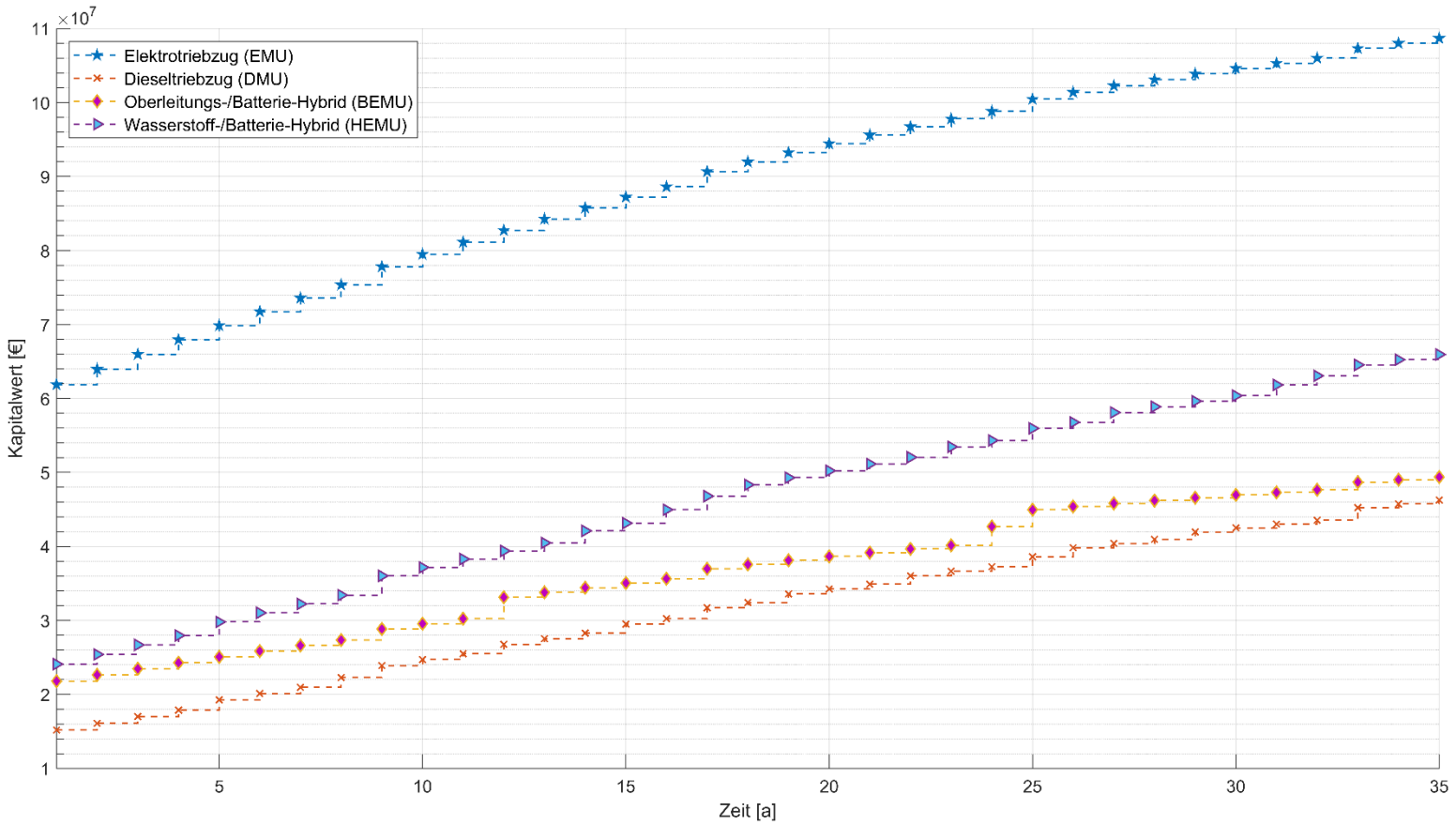


- Alternative Antriebe schon heute **ähnlich wirtschaftlich** wie Dieselverkehr
- Vollelektrifizierung ggf. sinnvoll: nutzbar dann auch für Güter- & Fernverkehr

Lebenszykluskostenuntersuchung

LCC – Kapitalwertverläufe mit Restwerten

Bsp.: 2- bzw. 1-h-Takt, 0,2 % elektrifiziert, ca. 370 Fzg-km bei 3 Fahrzeugen

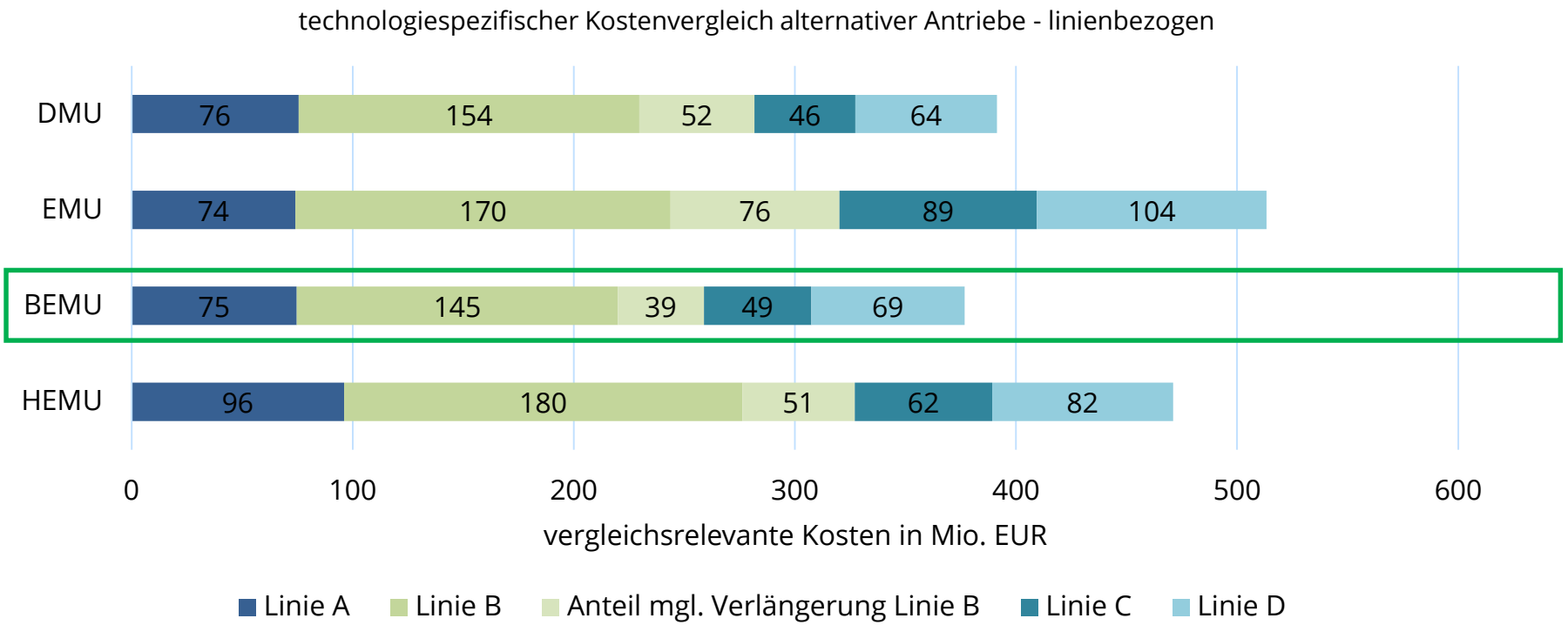


- bei kaum vorhandener Infrastruktur & wenig Verkehr oft DMU wirtschaftlich vorn
- CO_2-Bepreisung hat Potenzial, dieses Ergebnis zugunsten des BEMU zu beeinflussen

Lebenszykluskostenuntersuchung

LCC – Kapitalwerte für 35 Jahre

Beispielnetz



- Zusammenfassung einzelner Linien zu einem netzweiten Gesamtergebnis
- Hier: schwach befahrenes Netz → hoher Einfluss (nicht) notwendiger Infra.
- **Dadurch:** Ausgleich unterschiedlicher Linienergebnisse für einheitliches Gesamtergebnis mit großer Fahrzeuganzahl & einheitlicher Technologie

Erkenntnisse aus LCC-Analysen (1)
Grundsätze

Gesamtwirtschaftlichkeit:

- Für nahezu jeden Anwendungsfall ergibt sich eine andere Rangfolge der Technologien.
- Das Gesamtergebnis hängt sehr stark von täglicher **Fahrzeugbetriebsleistung** ab (Umlauf-Kilometer, Taktdichte, Bespannung).
- Die (nicht) vorhandene **INFRASTRUKTUR** beeinflusst die Rangfolge massiv.

Hohe Kostenrelevanz haben:

- **Traktionsenergiekosten** (spezifische Energiepreise, Antriebswirkungsgrad)
- Belastungsabhängiger **Austausch von Antriebs- und Speicherkomponenten** (speziell: PowerPack, Batterie, Brennstoffzelle)
- Lebensdauer der Fahrzeuge (Häufigkeit der Wiederbeschaffung, insbes. bei Umbau)
- INFRASTRUKTUR-Kosten für Elektrifizierung, wenn Betriebsleistung und vorhandener Elektrifizierungsgrad gering sind

- *Geringeren Einfluss auf die Rangfolge haben die unterschiedlichen Fahrzeug-beschaffungs- sowie die zyklischen Instandhaltungs- und Revisionskosten.*

Erkenntnisse aus LCC-Analysen (2)
Was eignet sich wofür?

Hybridantriebe:

- Hybride können schon heute wirtschaftlicher sein als Dieselfahrzeuge.
- Bei vorhandener Teilelektrifizierung und Ausbauoptionen sind Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge wirtschaftlich und betrieblich vorteilhaft.
- Wasserstoff (mit Sektorenkopplung!) ist eine Option für längere Strecken mit geringerem Aufkommen und ohne Elektrifizierungsperspektive.
- Eine Kombination von Oberleitung und Wasserstoff (inkl. Batterie) könnte betrieblich viele Einsatzfälle abdecken, wenn sie technisch + wirtschaftlich umsetzbar ist.

Elektrifizierungswürdigkeit:

- Bei Taktverkehren häufiger als 1- bzw. ½-h-Takt (Regionalverkehr) lohnt sich langfristig nahezu immer die Elektrifizierung. Die Bahnstrom-Infrastruktur steht dann auch für andere Verkehre (Güter- & Fernverkehr, Umleiter) zur Verfügung.
- Für den weiteren Netzausbau ist ein Konzept mit „Teilelektrifizierung“ (keine Lücken größer als 50 … 60 km) für den leichten Regionalverkehr sinnvoll.
- Für Güterverkehrsstrecken ist die durchgängige Elektrifizierung geboten.

Zum Schluss …

- Die Grundrichtung „Alternative Antriebe“ für die Eisenbahn ist richtig. Aber es ist ein begrenzter Markt mit vielen Zwangsbedingungen.
- Es besteht die Gefahr, dass proprietäre Lösungen entstehen.
  (… für jede Strecke ein spezielles Fahrzeug mit spezifischer Infrastruktur …)
- **Elektroverkehr ist immer ein INFRASTRUKTUR-Thema!**
  (… ganz gleich ob mit Oberleitung, Batterie oder Wasserstoff).
- INFRASTRUKTUR heißt: langfristiger Planungs- und Finanzierungsvorlauf. Und immer auch: öffentliche Mitsprache.
- Hinsichtlich der Rechtssicherheit für Errichtung, Förderung und Betrieb von Lade- und Betankungsinfrastrukturen sind noch einige Fragen offen.

➢ Erfolgreich werden diejenigen sein, die die **Migration** in den Bestand (Betrieb, Technik/ Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit) schnell hinbekommen.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

ELEKTRISCHE BAHNEN

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

+49 (0) 351 463-36730
arnd.stephan@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla

+49 (0) 351 463-36577
tobias.bregulla@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Nyascha Wittemann

+49 (0) 351 463-36829
nyascha_thomas.wittemann@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik
Professur für Elektrische Bahnen
01062 Dresden

ELEKTRISCHE BAHNEN

www.E-Bahnen.de

Nicht mit dem Strom schwimmen - mit dem Strom fahren!