

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

Elektrisch fahren – was geht?

Leistungsgrenzen der Traktionsstromversorgung auf Bestands- und Ausbaustrecken

24. Internationale Tagung des Arbeitskreises Eisenbahntechnik
Salzburg, 8. Mai 2023

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan



Professur für Elektrische Bahnen

Forschung und Lehre in Dresden seit 1954



- › Energieerzeugung/ -übertragung
- › Energieverteilung/ -zuführung
- › Elektrisches Fahrzeug
- › Rückstromführung, Beeinflussung
- › Fahrzeug- und Anlagenbetrieb

Unser Geschäft ist: **Fahren mit Strom.**



Foto: A. Stephan



Foto: A. Stephan



Foto: M. Werner

Medialer Eindruck nach der Innotrans 2022 ...

Jetzt retten wir die Bahn mit Akku und Wasserstoff!

... oder sogar:

Damit machen wir die Bahn jetzt (endlich) grün!

Stimmt das?

Weder noch.

Denn die Eisenbahn hatte dafür längst eine bessere Idee:



Die Oberleitung: ein technischer Glücksfall ...

- kontinuierliche Energieversorgung mit **> 20 MW** pro Zug
 - bis **350 km/h** stabil bei nahezu allen Wetterlagen
 - Verfügbarkeit: **> 99,96 %**
 - Elektrischer Wirkungsgrad: **> 97 %** (Vollbahn)
 - Instandhaltungskosten **< 0,5 %** des Invests **p.a.**
 - Lebensdauer: **>> 50 Jahre**
 - **Materialien:** Beton, Stahl, Aluminium, Kupfer – alles **recyclbar**
 - seit über **100 Jahren** ständig **optimiert**
-
- Das müssen alternative Lösungen **erreichen oder überbieten** können.
 - Nahezu alle heute bestellten ICE's, Hochleistungslokomotiven, Regionalzüge und Straßenbahnen sind **Oberleitungsfahrzeuge**.

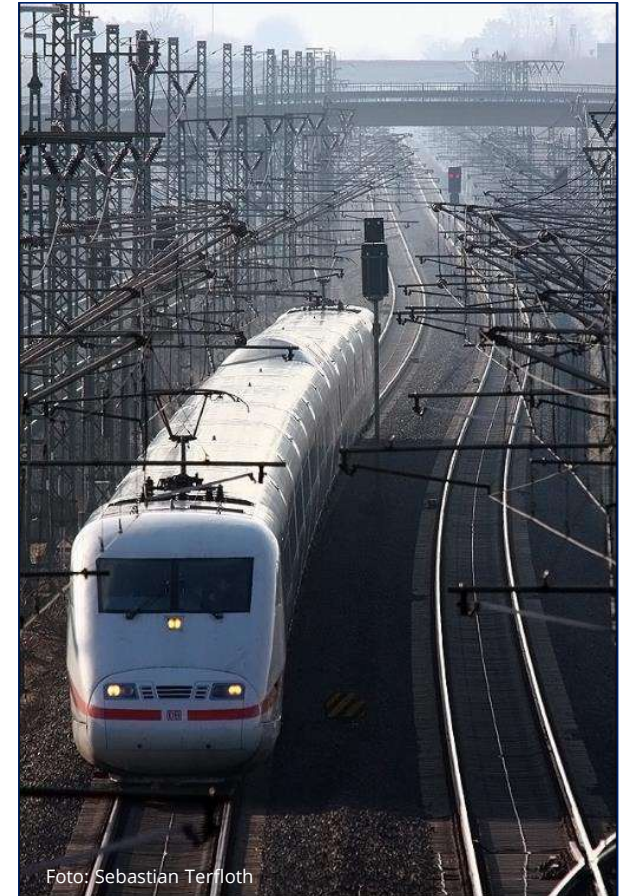


Foto: Sebastian Terfloth

Grundlagen: Systemvorteile der Eisenbahn

- **Zugbildung**
(... mit wenig Aufwand viele Fahrzeuge gleichzeitig bewegen ...)
- **Spurführung**
(... keiner muss lenken, nach hinten oder zur Seite schauen ...)

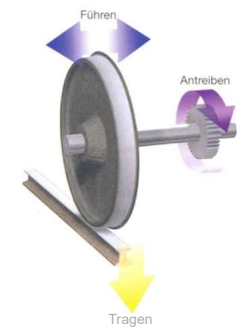
Moderne Eisenbahn heißt also:

VIEL (... große Massen, viele Menschen oder Güter ...)

+

SCHNELL (... im Vergleich zu anderen ...)

Und dafür ist die **Eisenbahn** am besten **ELEKTRISCH**.
Weil sie es **ohne Batterien** kann.



Warum fährt die Eisenbahn elektrisch?



Bo' Bo'
86 t, 4 Achsen
8,0 MW
10 ... 15 kg/kW

Leistung!
Leistung!
Leistung!



Co' Co' + Co' Co' + Co' Co' + Co' Co'
520 t, 24 Achsen
4 x 2,0 MW = **8,0 MW**
35 ... 50 kg/kW

Elektrisch fahren – eine Frage der Leistungsfähigkeit!

These:

*„Hätten wir die **Eisenbahn** in Europa **nicht elektrifiziert**,
wäre sie als Verkehrsträger heute **bedeutungslos**.“*



Schneller Fernverkehr



Regionalverkehr um Metropolen



Schwerer Güterverkehr



S- und U-Bahnen



Stadtbahnen

Verkehrswende heißt auch: Mehr elektrischer Bahnverkehr.

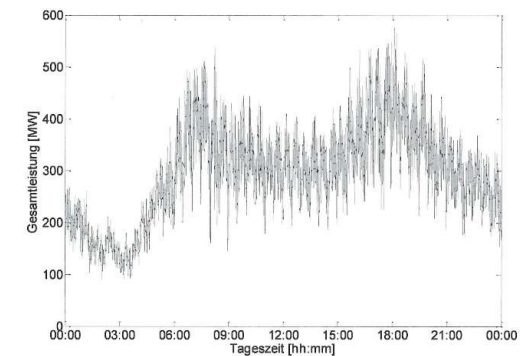
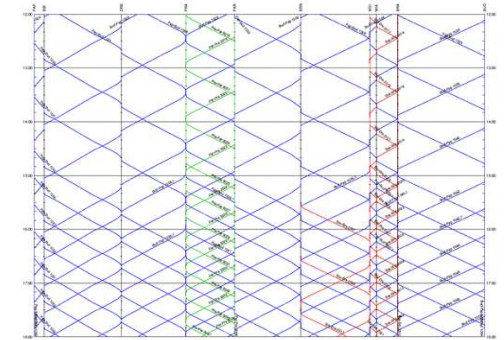


Verkehrlich:

- Taktverdichtung und Taktsymmetrierung (z.B. Deutschlandtakt)
 - Mehr Zugtrassen auf bestehender Infrastruktur
 - Längere, schwerere und leistungstärkere Züge
- ➔ Erhöhung von **Leistungs- und Energiebedarf**

Anlagentechnisch:

- Höhere Leistung = **höhere Ströme** (+ höhere Magnetfelder)
- Größere **Lastdynamik**
- Höhere und längere Beanspruchung ➔ **mehr Störungen**
- Weniger und **kürzere Instandhaltungsfenster**



Schaffen wir das?



Was geht (noch)?

- **350 km/h**
- **3-min-Takt**
- **22 MW** pro Zug
- **18-h-Betrieb**

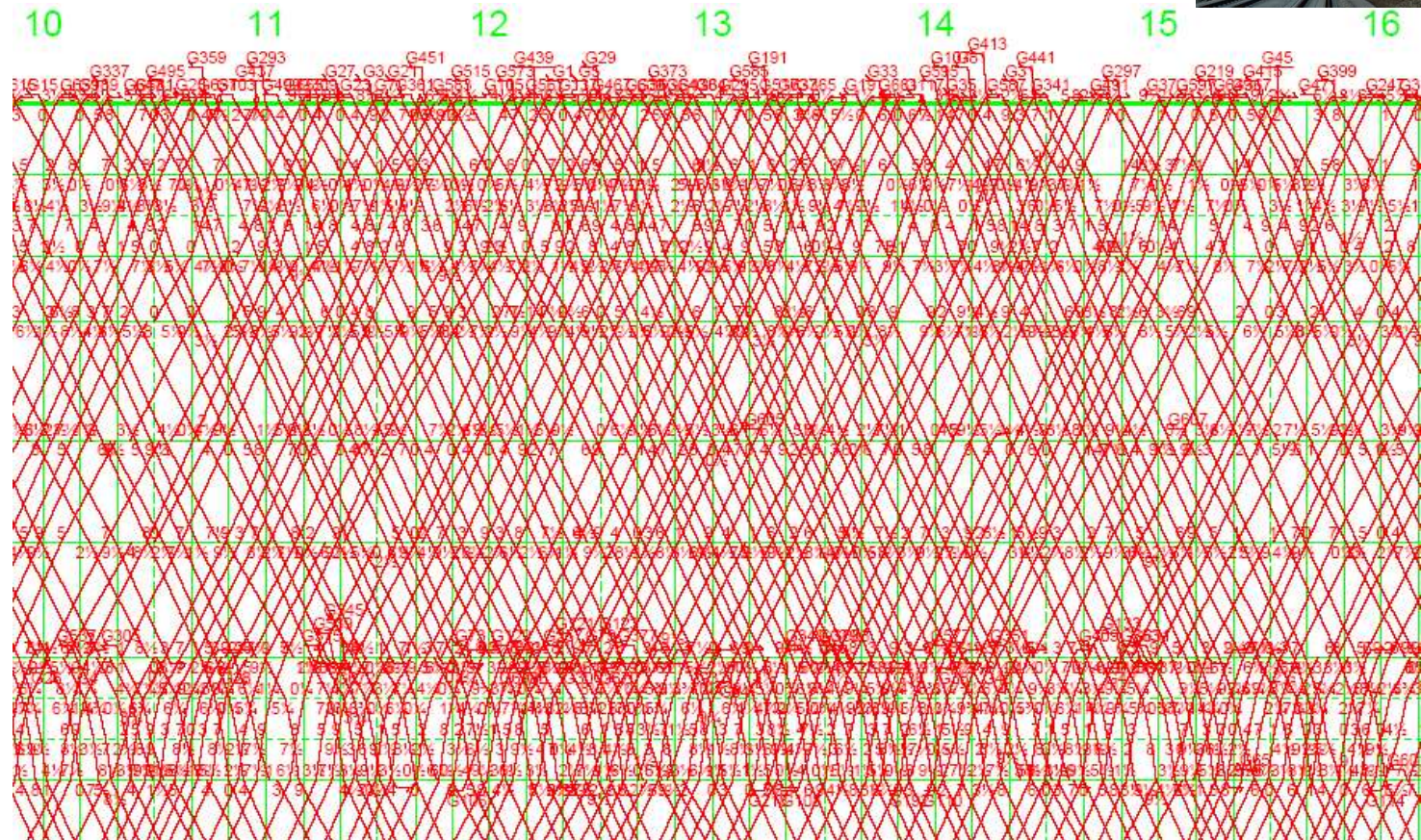


Abbildung 1: Wu-Gua DPL Auslegungsfahrplan 2028

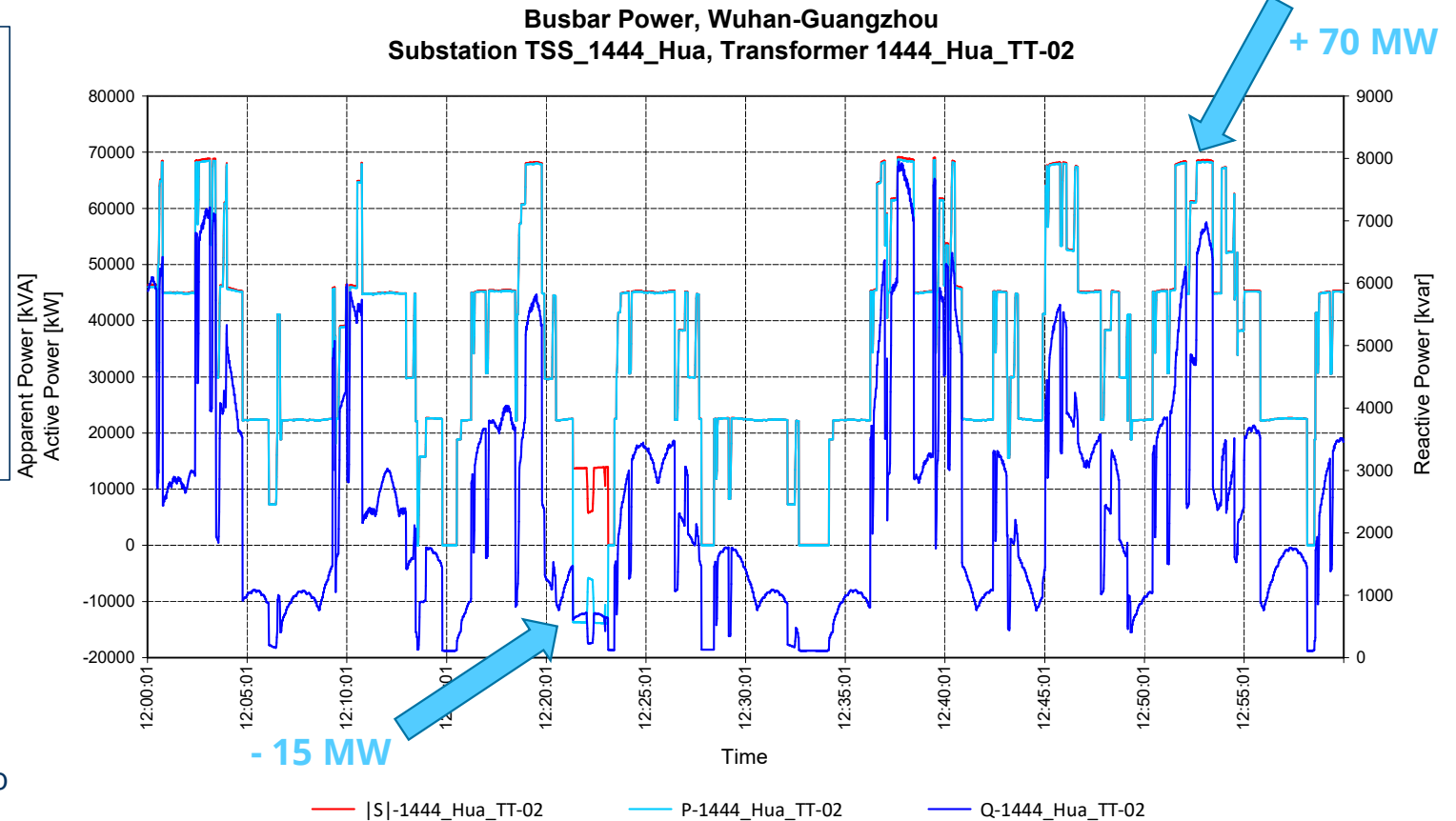
Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



Beispiel 1: HGV China

- **350 km/h**
- **3-min-Takt**
- **22 MW** pro Zug
- **18-h-Betrieb**

Abbildung 2: Wu-Gua DPL
Leistungsgang Unterwerkstrafo



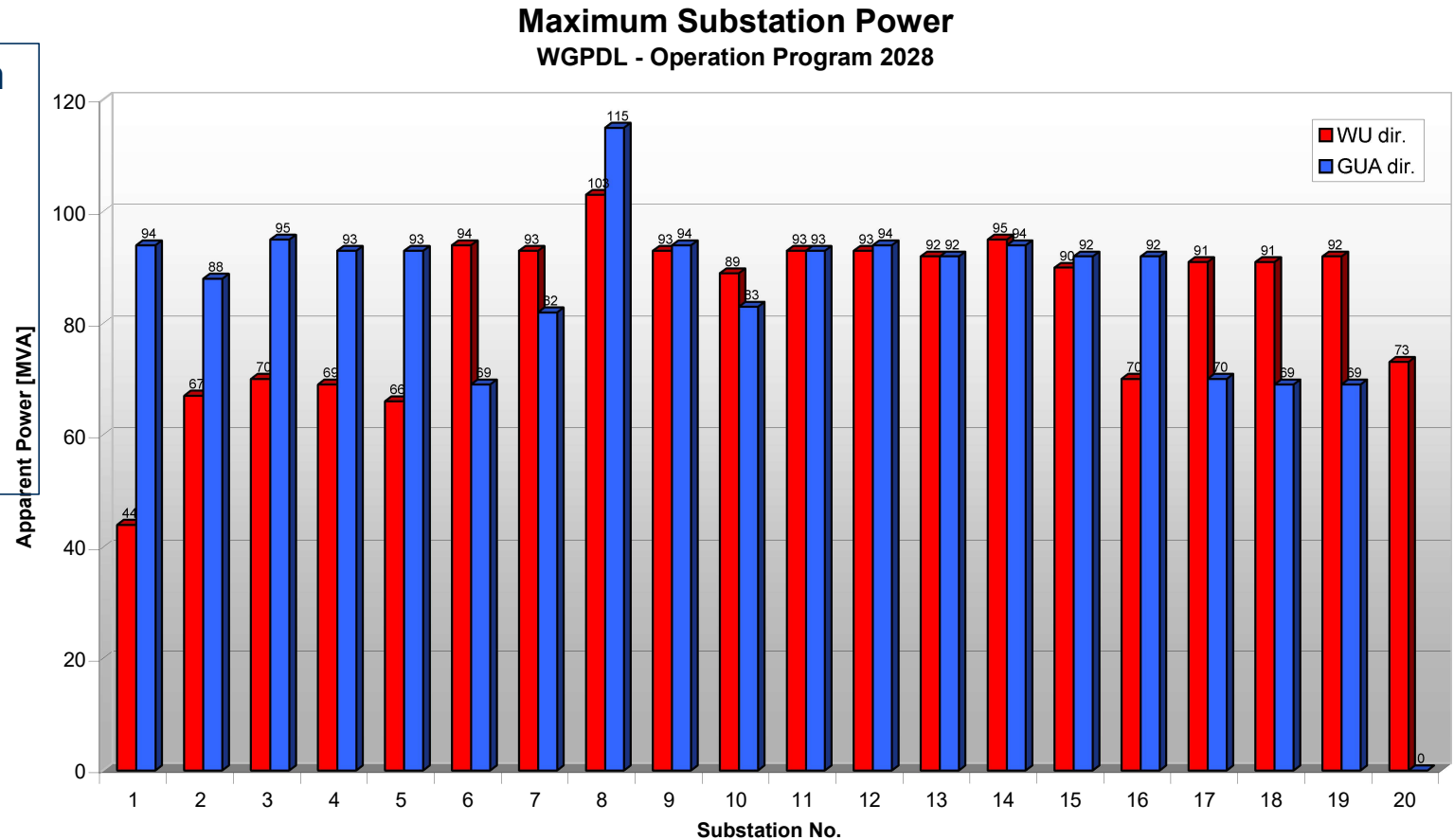
Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



Beispiel 1: HGV China

- 350 km/h
- 3-min-Takt
- 22 MW pro Zug
- 18-h-Betrieb

Abbildung 3: Wu-Gua DPL
Spitzenleistung Unterwerke



Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



Beispiel 1: HGV China

- **350 km/h**
- **3-min-Takt**
- **22 MW** pro Zug
- **18-h-Betrieb**

Technische Voraussetzungen:

- Leistungsstarke Energieerzeugung, spitzenlastfähig
- Leistungsfähiges Bahnstrom-Übertragungsnetz (dort spezifisch: 3 AC 220 kV 50 Hz, streckenparallel)
- Unterwerksleistungen > 50 MVA → **1.000 ... 2.000 kW/ km**
(Vergleichswert D: 300 ... 600 kW/ km)
- Fahrleitung mit Verstärkungs- und Rückleitersystemen
- Streckenorientierte Instandhaltungskapazitäten
- ETCS L2 auf allen Strecken

➔ **Das alles haben wir prinzipiell auch. Oder können es realisieren.**

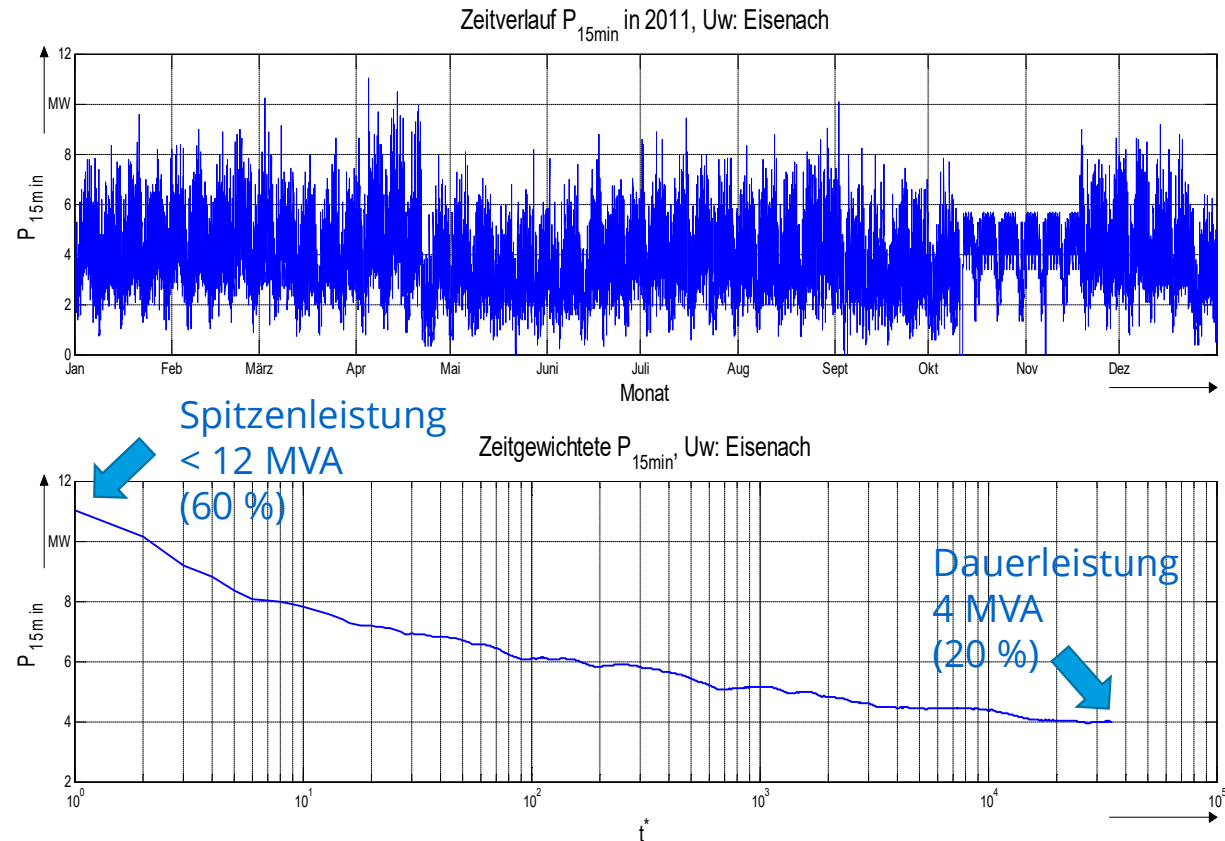
Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



Beispiel 2: DB AG

- **160 km/h**
- **Mischverkehr**
- max. **10 MW** pro Zug
- Unterwerksleistung **2 x 10 (15) MVA**

Abbildung 4:
Leistungsgang Unterwerk
(Zeitfunktion und zeitgewichtet)



Elektrisch fahren: Was geht (noch)?

Beispiel: 16,7-Hz-Bahnstromverbundnetz D (+ A + CH)

- Installierte Erzeugerleistung gesamt
ca. **3.500 MW**
 - Höchster Leistungsbezug (15 min)
ca. **2.300 MW**
 - 110-kV-Bahnstromleitungsnetz:
ca. **8.000 km** Trassenlänge
 - ca. **190** Unterwerke (zentral)
 - **12** Umformer-/ Umrichterwerke (dezentral)
 - Elektrifizierte Streckenlänge:
ca. **20.000 km**
- ➔ damit **90% der Transportleistung** im Netz



Abbildung 5:
2AC 110-kV-
Bahnstromnetz

Stand: 2022

Elektrifizierung: Aktuelle Herausforderungen (1)



Energieerzeugung / Netzregelung:

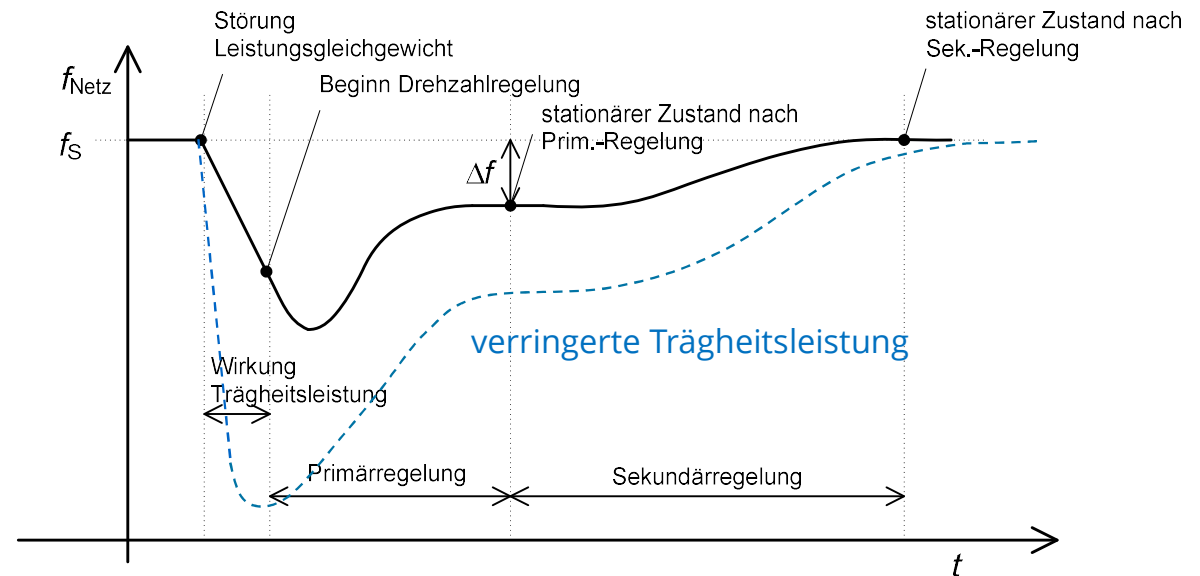
- Netzweite und kleinräumige **Integration regenerativer Energiequellen**
- Zunehmende Einspeisung über **Umrichter** („masseloses Netz“)

➔ Transiente **Netzstabilität** \leftrightarrow Netzregelung

Höherer Anteil Umrichter-Speisung

- ➔ Verringerte Trägheitsleistung
- ➔ Primärregelung mit größerem ΔP
- ➔ **Größere Frequenzabweichungen Δf**
- ➔ Rückwirkung auf die Fahrzeugregelung

Abbildung 6:
Ablauf der f-P-Regelung im zentralen Netz



Elektrifizierung: Aktuelle Herausforderungen (2)

Energieübertragung:

- (Zeitgerechte) Verfügbarkeit von **Leitungstrassen** (auch bei Erneuerung!)
- (Teil-)Verkabelung als „Enabler“ → technisch kritisch
- (Temporäre) **Sonderlösungen**, z.B. 2x25 kV auf OLA

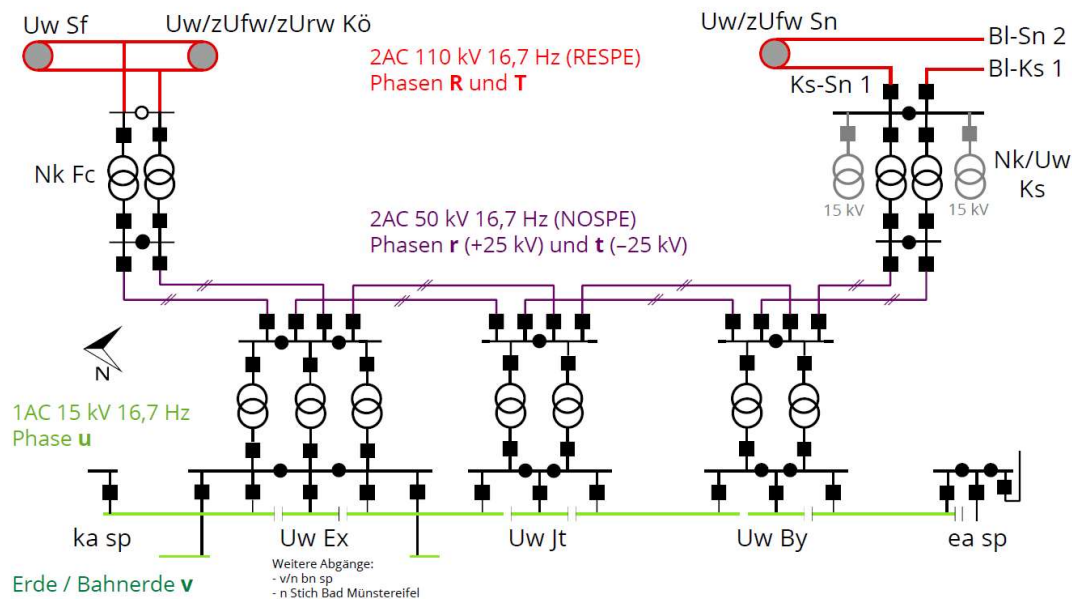
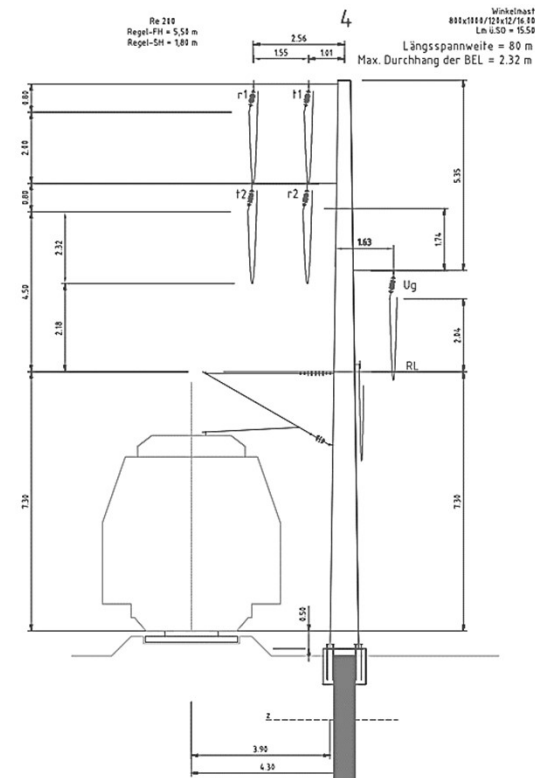


Abbildung 7:
2AC 2x25 kV 16,7 Hz
(Bsp. Eifelbahn)



Elektrifizierung: Aktuelle Herausforderungen (3)



Energiezuführung:

- Leistungserhöhung der Anlagenstruktur
 - **Unterwerke** (Transformatoren, Schaltanlagen) → **Platzbedarf**
 - **Fahrleitung** (Verstärkungsleitungen, Rückleitungsseile) → **Maststatik**
- Leitungsschutz: **Betriebs- und Kurzschlussströme**, Zwischensystemfehler
- **Spannungshaltung** bei Ausfallszenarien

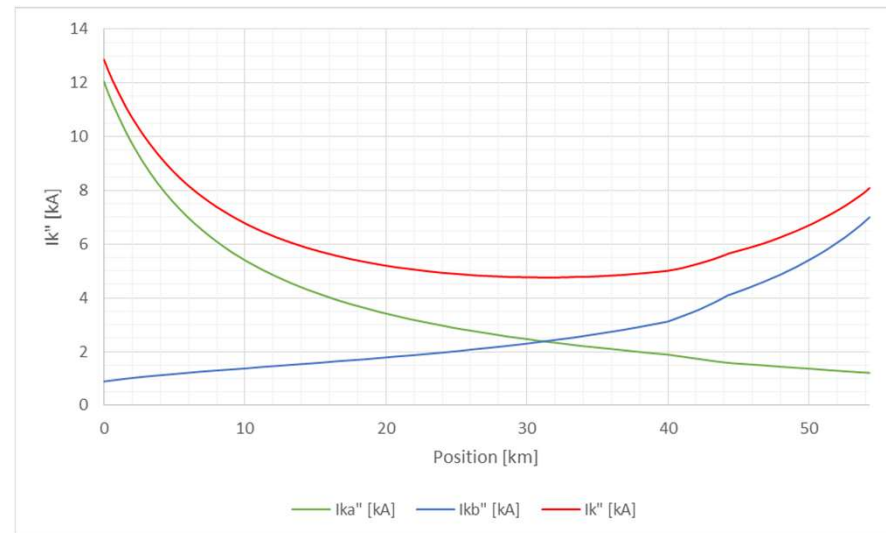


Abbildung 8:
Kurzschlussstromverlauf gesamt und pro StA
(Bsp. Eifelbahn)

Elektrifizierung: Aktuelle Herausforderungen (4)



Gesamtsystem und Schnittstellen:

- Niedrigste **Resonanzfrequenz** in ausgedehnten Netzen (mit **Kabelanteilen!**)
- Typenvielfalt von Umrichtern → **Störstrombeeinflussung** Gleisschaltmittel
- **Löschfähigkeit** von Erdfehlern → Netzauftrennung?

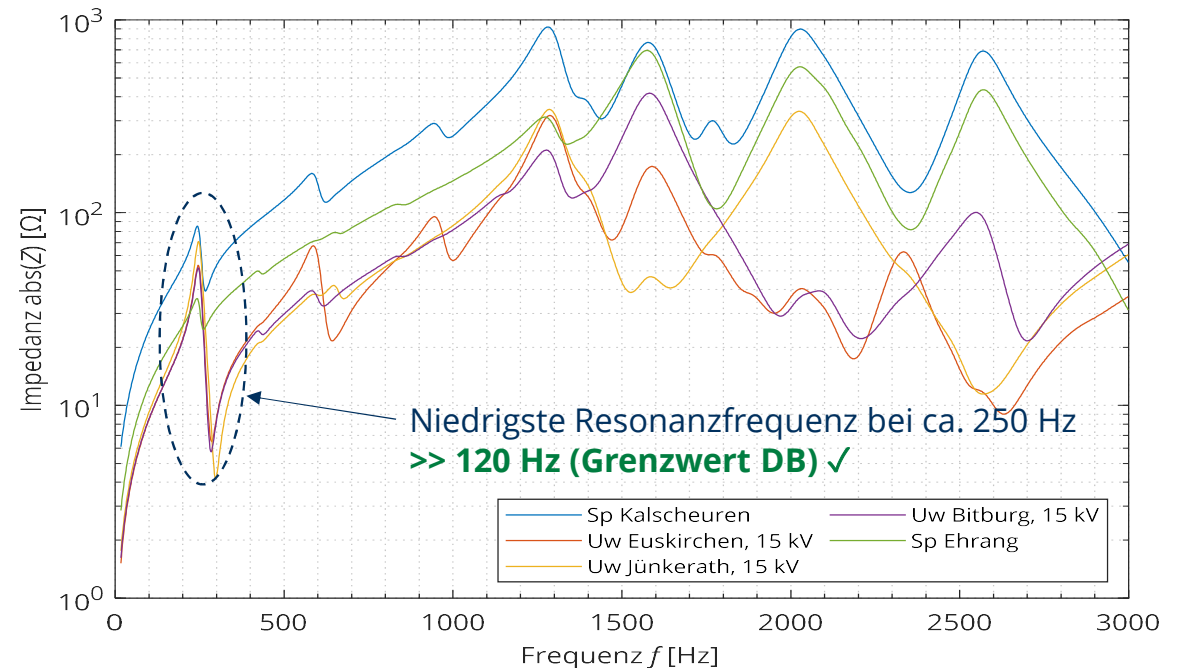


Abbildung 9:
Frequenzgang mit Resonanzstellen (Bsp. Eifelbahn)

Bahn-Elektrifizierung: Herausforderung **Umsetzung (!!!)**



Planerisch und rechtlich:

- **Es dauert viel zu lange!!!**
 - Finanzierungs-, Planungs- und Genehmigungsverfahren sind nicht mehr zeitgemäß.
 - Industriekapazitäten für Bau und Instandhaltung sind aktuell begrenzt.
- ➔ **Erhebliches „Enttäuschungspotenzial“ vorhanden!**

Fazit zur klassischen Elektrifizierung:

+ **Technisch geht noch deutlich mehr.**

Es gibt Aufgaben und Baustellen, aber die sind (mit Vorlauf) alle lösbar.

- **Wenn die elektrische Eisenbahn wirklich eine Rolle in der Verkehrswende spielen will muss die Umsetzung **deutlich schneller** gelingen.**

Sonst machen es andere.

Elektrifizierung: Blickpunkt Straßen(fern)verkehr



Aktuelle Prognose aus Simulationsrechnungen (TU Dresden):

- **Leistungsbedarf:** bis zu **6 MW / km** für Hochlastszenarien (10 Lkw pro km und RiFa)
(Vergleich: HGV Eisenbahn aktuell max. 1 ... 2 MW / km)
- **Einspeisung:** alle **0,5 ... 1 km** bei DC 1.500 V, Anschlussleistung jeweils bis zu 3 MW
- Analogieschluss für reine **Batterie-Lkw:** Ladeleistungen von **300 MW auf 50 km** notwendig (Raststätten-Abstand) – alternativ: 60 MW auf 10 km (Verdichtung Ladeplätze)
- **Aufbau von trassenbegleitenden Traktionsenergie-Übertragungs- und Verteilnetzen ist zwingend erforderlich!**
- **Auch das wird sehr viel zeitlichen Vorlauf brauchen.**

Oder lieber doch: Alternative Antriebe ... (?)



Foto: SNCF



Foto: Stephan



Foto: Alstom



Foto: Stadler



Foto: Bombardier



Status Quo:

- Es gibt **marktfähige** technische **Fahrzeuglösungen** mit Hybridantrieben. (Dual Mode, BEMU, HEMU, Diesel-Akku-Hybrid, ...)
- Es gibt einen internationalen **Herstellermarkt**. Die Kernkompetenz ist in **Europa**.
- Es gibt aber noch **keine** professionelle, standardisierte **Energie-Infrastruktur** dazu.

Hilft uns das?



Was geht (überhaupt)?

Warum reden wir über Alternativen?



Sachlich:

- Nicht alle Verkehre sind so leistungsstark und häufig, dass sich ausgedehnte elektrische Infrastrukturen in der Fläche rechnen.
- Alternative Antriebslösungen befreien uns (scheinbar) von langwierigen Planungs- und Genehmigungsprozessen für Infrastrukturen im öffentlichen Raum.

Kommerziell:

- Etablierte Mitspieler aus dem Energiesektor brauchen neue Geschäftsfelder.
- Neue Anbieter drängen auf den Markt.

Leider aber auch:

- Grundlegende physikalische Zusammenhänge scheinen vergessen – es gibt viel „gefühltes Wissen“.

Alternative Antriebe mit Akkumulatoren und Wasserstoff



Einsatzfelder im Schienenverkehr

- Kleinfahrzeuge
- Rangierlokomotiven / Anschluss- und Zustellfahrten
- Light Rail (Sonderfälle)
- **Leichter Regionalverkehr (Triebwagen)**

- ~~Schwerer Regionalverkehr~~
- ~~S- und U-Bahn~~
- ~~Fernverkehr~~
- ~~Hochgeschwindigkeitsverkehr~~
- ~~Güterverkehr~~

Ungeeignet wegen
hohem Leistungs- und
Energiebedarf

Antriebs- und Energiesysteme: Effizienz / Wirkungsgrade



Elektroenergienetze:	94 ... 98 %	(AA)
Elektromotoren / -generatoren:	93 ... 96 %	
<hr/>		
Akkumulatoren:	85 ... 90 %	(A)
Raffinerie inkl. Vorkette:	85 ... 90 %	
<hr/>		
H2-Druckspeicher inkl. Wandlungen:	80 %	(B)
Elektrolyseur:	70 %	
<hr/>		
Brennstoffzelle:	51 ... 58 %	(C)
<hr/>		
Dampfturbine inkl. Kreisprozess:	< 50 %	(D)
Verbrennungsmotor:	35 ... 40 %	

Technologievergleich: Energieeffizienz der Antriebssysteme

Vergleich ab Hochspannung 110 kV

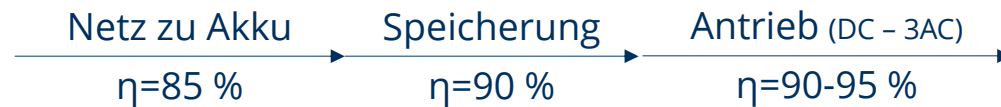


Elektroenergie Elektroantrieb



Gesamtwirkungsgrad ~ 80 %

Elektroenergie Akkumulator Elektroantrieb



Gesamtwirkungsgrad ~ 70 %

Elektroenergie Wasserstoff + Akku Elektroantrieb



Gesamtwirkungsgrad ~ 30 %

Quelle: Töpler, Wasserstoff und Brennstoffzelle, 2017; Datenbestand Professur für Elektrische Bahnen. Annahme: Elektrolytische Wasserstoffherstellung

Technologievergleich: CO₂-Bilanz

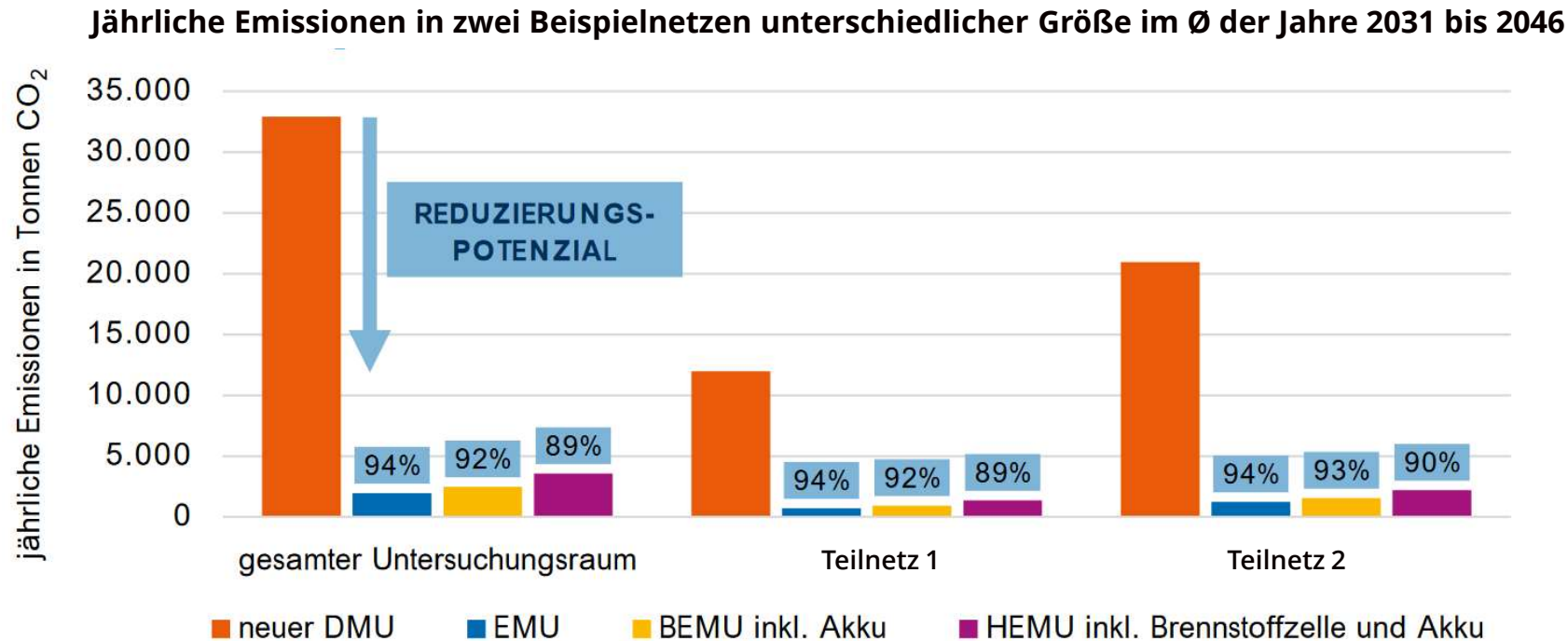


Abbildung 10:
CO₂-Emissionen
Regio-Netz

- Alle elektrischen Antriebstechnologien verbessern die CO₂-Bilanz gegenüber Diesel deutlich.
- Der Ökostromanteil im Energiemix hat Potenzial für weitere Verbesserung.

Technologievergleich: Herausforderung **Infrastruktur!!!**



Foto: Thomas Scherrans



Quelle: Stadtwerke Tübingen

Verlängerungs-/ Inseloberleitung

- Standardsystem zum Laden im Stand und in Bewegung
- Wirtschaftlichster Energiebezug
- ggf. Erweiterung der Bahnstromversorgung notwendig

Ladestation

- (Stromabnehmer-) Ladung nur im Stillstand, Leistung begrenzt
- bekannte Oberleitungskomponenten
- Energieanschluss ggf. aufwändig



Quelle: Clean Energy Partnership

Wasserstofftankstelle mit Logistik

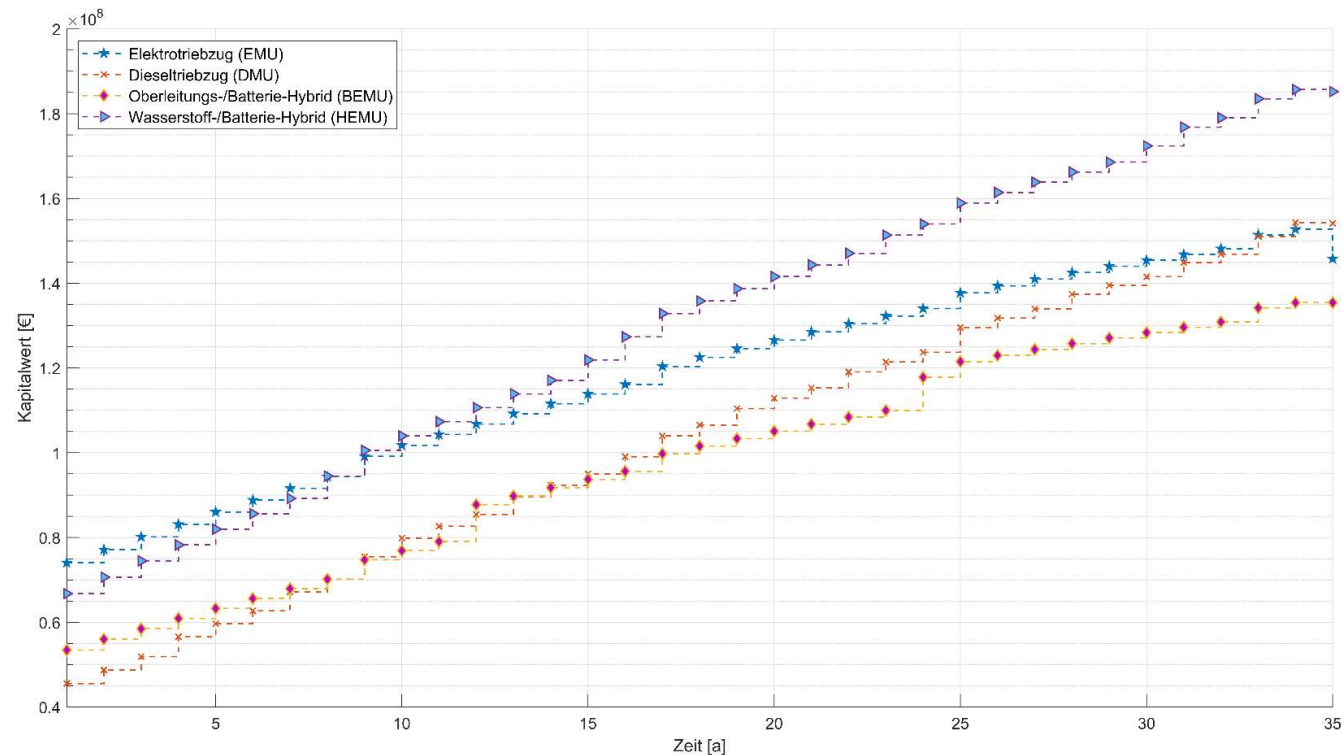
- Abgabe von verdichtetem Wasserstoff
- Logistik der Belieferung standortspezifisch
- lokale Direkterzeugung perspektivisch denkbar
- noch keine Standardlösungen, sehr teuer

Infrastruktur- und Energiebedarf
sind stets linien- und netz-
abhängig individuell zu prüfen

Technologievergleich: Wirtschaftlichkeit (Flotte und Netz) Kapitalwerte über 35 Jahre



Beispiel: 1- bzw. 1/2-h-Takt, **49,2 % elektrifiziert**, 9 Fahrzeuge, 420 Fzg.-km/d



4. HEMU

3. DMU

2. EMU

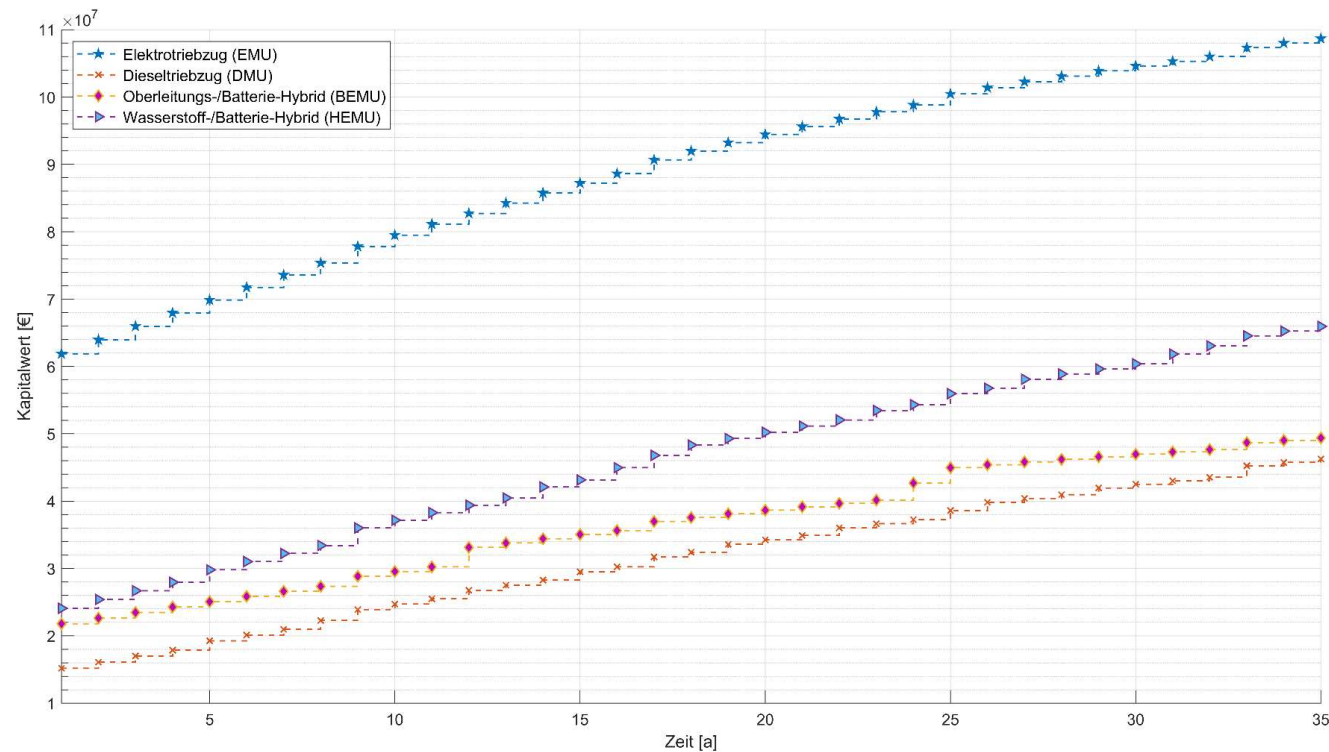
1. BEMU

Abbildung 11:
LCC Kapitalwerte Netz A

Technologievergleich: Wirtschaftlichkeit (Flotte und Netz) Kapitalwerte über 35 Jahre



Beispiel: 2- bzw. 1-h-Takt, **0,2 % elektrifiziert**, 3 Fahrzeuge, 370 Fzg-km/d



4. EMU

3. HEMU

2. BEMU

1. DMU

Abbildung 12:
LCC Kapitalwerte Netz B

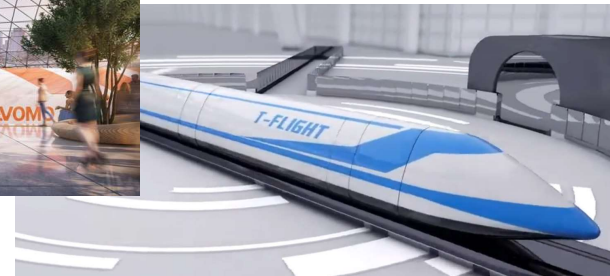
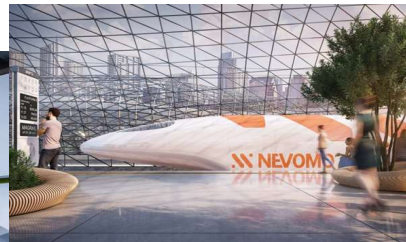
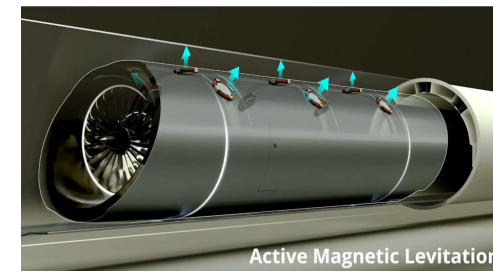
Elektrisch fahren – Fazit 2023



- Die **moderne Bahn** ist und bleibt voll **elektrisch**.
Nur so ist sie gleichermaßen **leistungsfähig** und **effizient**.
- Die klassische (AC-) **Elektrifizierung** hat noch **ausreichend Leistungsreserven**.
Für die Umsetzung braucht es aber **genügend** zeitlichen **Vorlauf**.
- Wichtige Voraussetzung sind **Leitungstrassen** für den überregionalen Lastausgleich und die sinnvolle Integration regenerativer Energiequellen.
- **Oberleitungs-/ Akku-Fahrzeuge** sind eine **Ergänzungsoption** für (schrittweise) Netzerweiterungen und bieten eine gute Migrationsperspektive für die Elektrifizierung.
- **Brennstoffzellen-/ Akku-Fahrzeuge** sind eine **Ergänzungsoption** für (lange) Linien mit geringem Aufkommen ohne Elektrifizierungsperspektive.
- **Elektrisch fahren** ist immer ein **Infrastruktur-Thema! – Egal womit.**

Und (wann) kommt der Hyperloop?

Gegenfrage: Welcher denn?



Antwort: Wenn sich jemand findet, der dafür bezahlt.

Verkehr studieren ... in Dresden



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Alona Chesnok (Studentin) >>

BRENNSTOFFZELLE

CLEVERE ENERGIE FÜR VERKEHRSSYSTEME ODER FALL FÜR DEN ZELLTOD?

VERKEHR STUDIEREN
DIPLOM VERKEHRSSINGENIEURWESEN
ELEKTRISCHE VERKEHRSSYSTEME

VERKEHRSSWISSENSCHAFTEN
VERKEHR STUDIEREN
DRESDEN

A poster for a student project. On the left, a white background with the TU Dresden logo and text. On the right, a photo of a young woman with blonde hair, wearing a blue sweatshirt with a circular logo that says 'VERKEHRSSWISSENSCHAFTEN', 'VERKEHR STUDIEREN', and 'DRESDEN'. The background of the poster has a gradient from orange to blue.



Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan
+49 (0) 351 463-36730
arnd.stephan@tu-dresden.de



Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik
Professur für Elektrische Bahnen
01062 Dresden
www.e-bahnen.de

Nicht mit dem Strom schwimmen – mit dem Strom fahren!



Foto: Stephan



Foto: Stephan



Foto: Alstom



Foto: Stadler



Foto: Scherrans