

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

# Elektrisch fahren – was geht?

## *Leistungsfähigkeit der Elektrifizierung und alternativer Lösungen*

ÖVG-Kongress Fahrstromanlagen 2022

Wien, 10. November 2022

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan



Foto: T. Scherrans



Foto: A. Stephan



Bild: Quintero HyperLoop

# 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 ...**

**Jetzt retten wir die Bahn mit Akku und Wasserstoff!**

**... oder sogar:**

**Damit machen wir die Bahn jetzt (endlich) grün!**

**Stimmt das?**

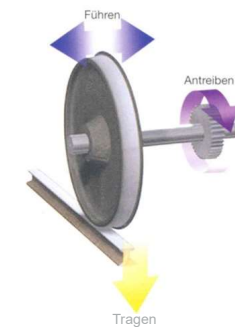
**Weder noch.**

Denn die Eisenbahn hatte dafür längst eine bessere Idee:



# 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 ...)

+

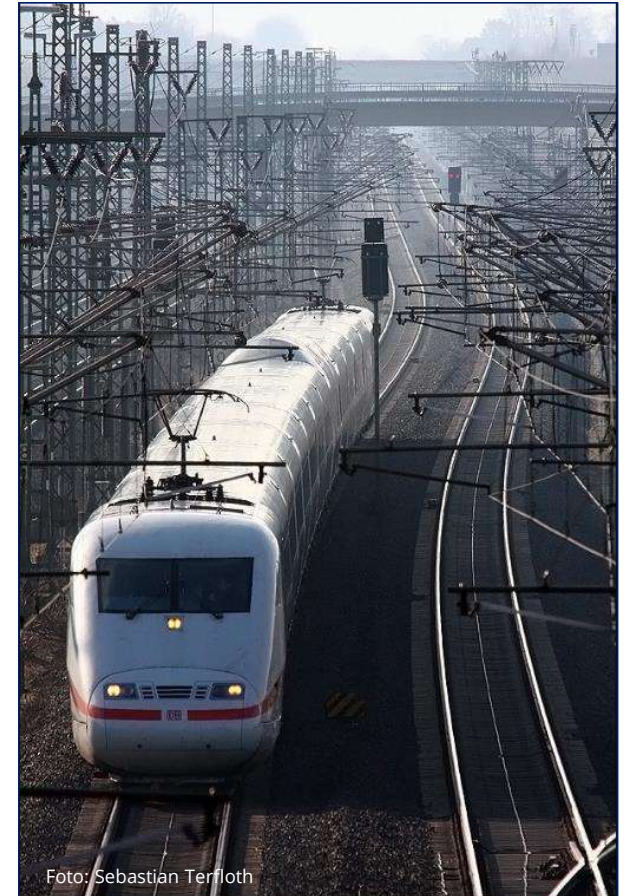
**SCHNELL** (... im Vergleich zu anderen ...)

Und dafür ist die **Eisenbahn** am besten **ELEKTRISCH**.  
**Weil sie es** (auch ohne Energiespeicher) **kann**.



# 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:** 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**.



# 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.

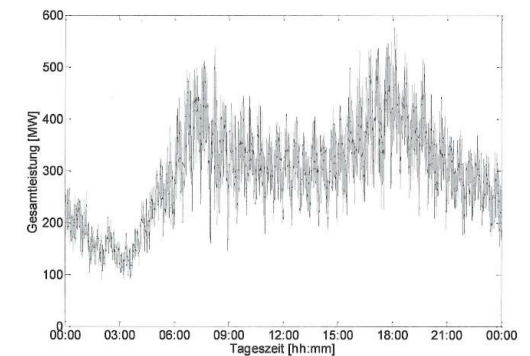
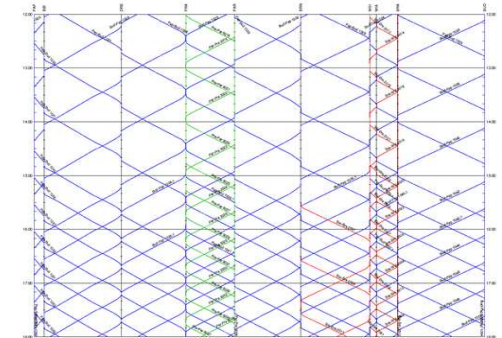


### Verkehrlich:

- Taktverdichtung und Taktsymmetrierung (z.B. Deutschlandtakt)
  - Mehr Zugtrassen auf bestehender Infrastruktur
  - Längere, schwerere und leistungsstärkere 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)?**

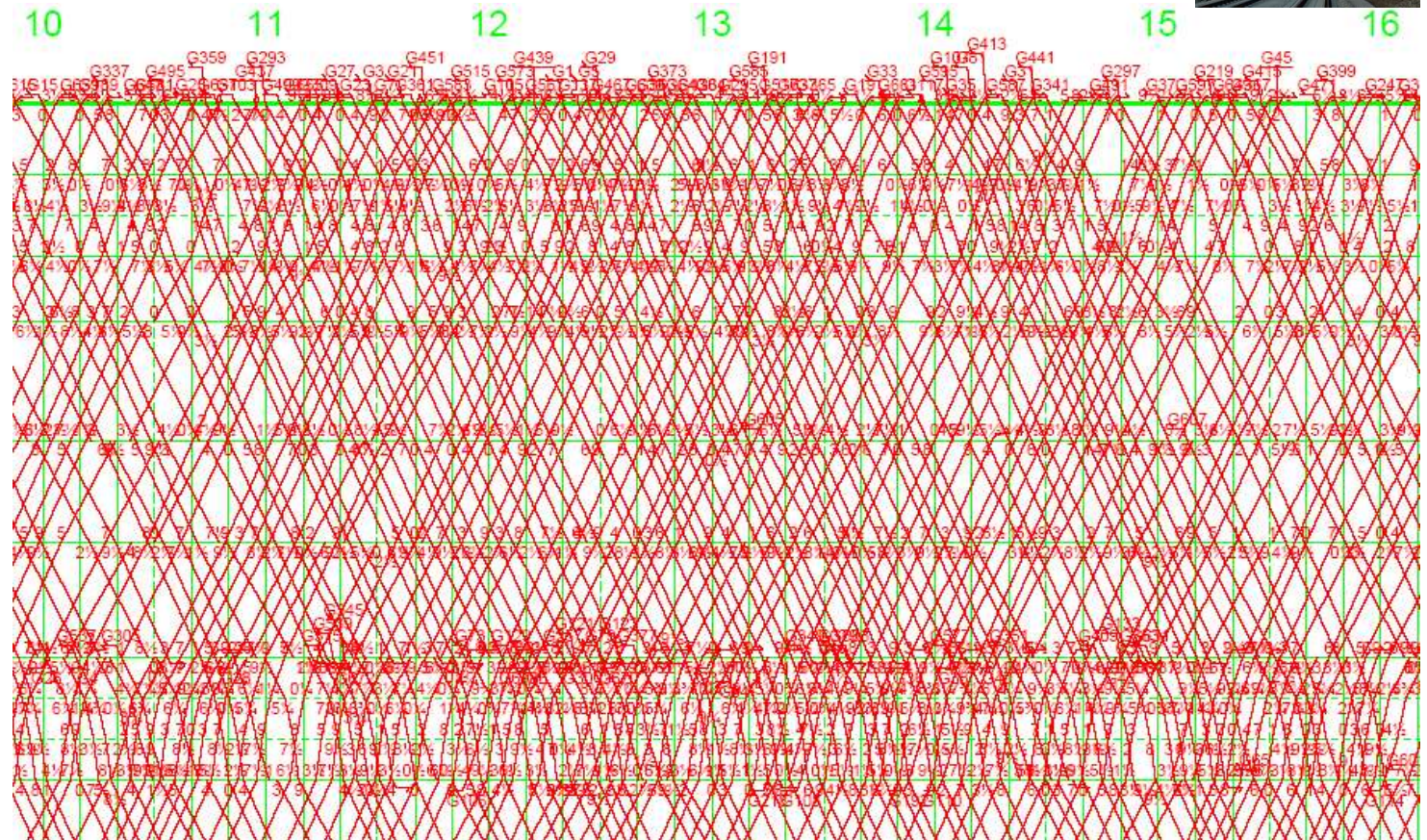


# Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



## Beispiel 1: HGV China

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



**Abbildung 1:**  
Auslegungsfahrplan 2028

# Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



## Beispiel 1: HGV China

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

Busbar Power, Wuhan-Guangzhou  
Substation TSS\_1444\_Hua, Transformer 1444\_Hua\_TT-02

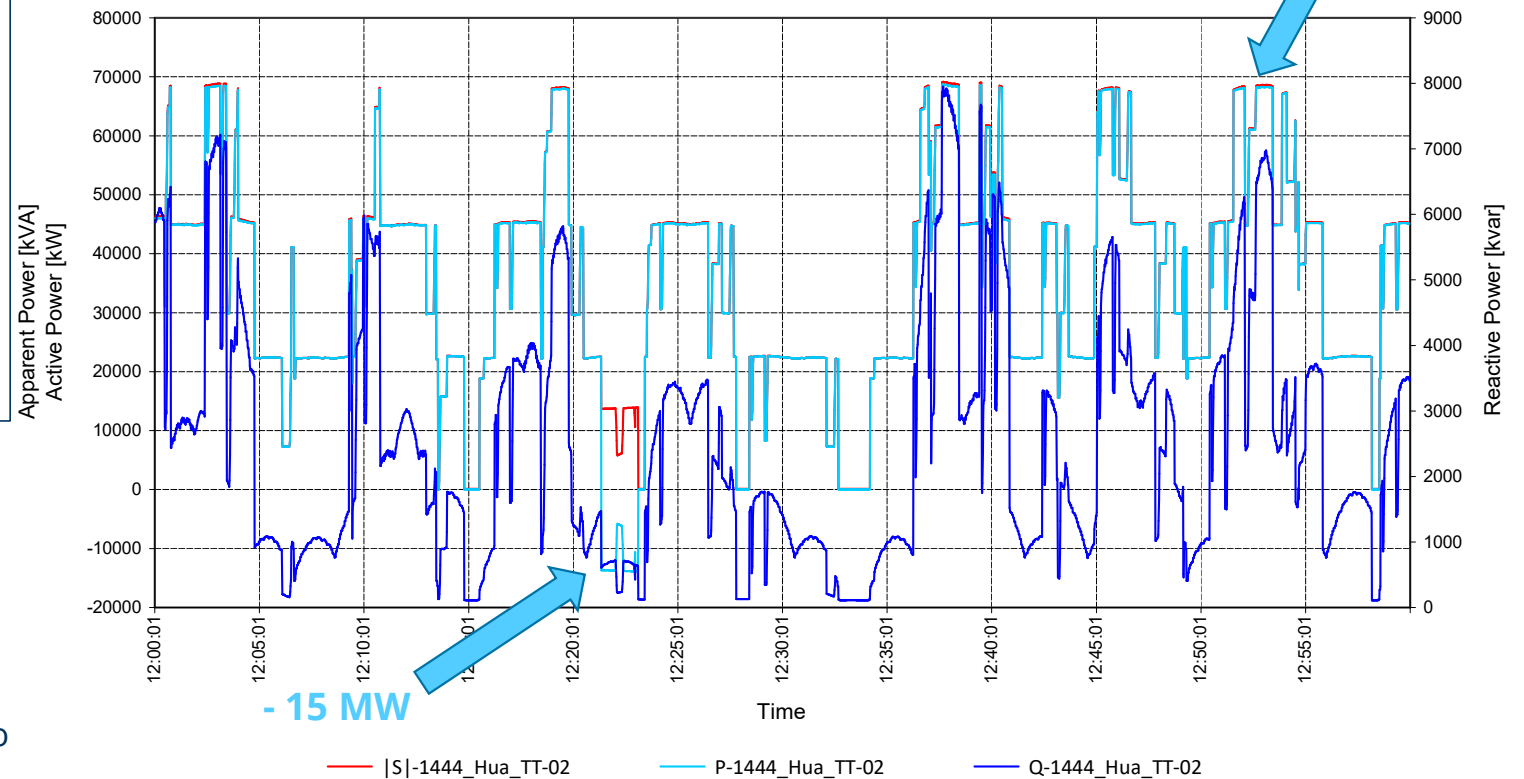


Abbildung 2:  
Leistungsgang Unterwerkstrafo

# Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



## Beispiel 1: HGV China

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

Maximum Substation Power  
WGPDL - Operation Program 2028

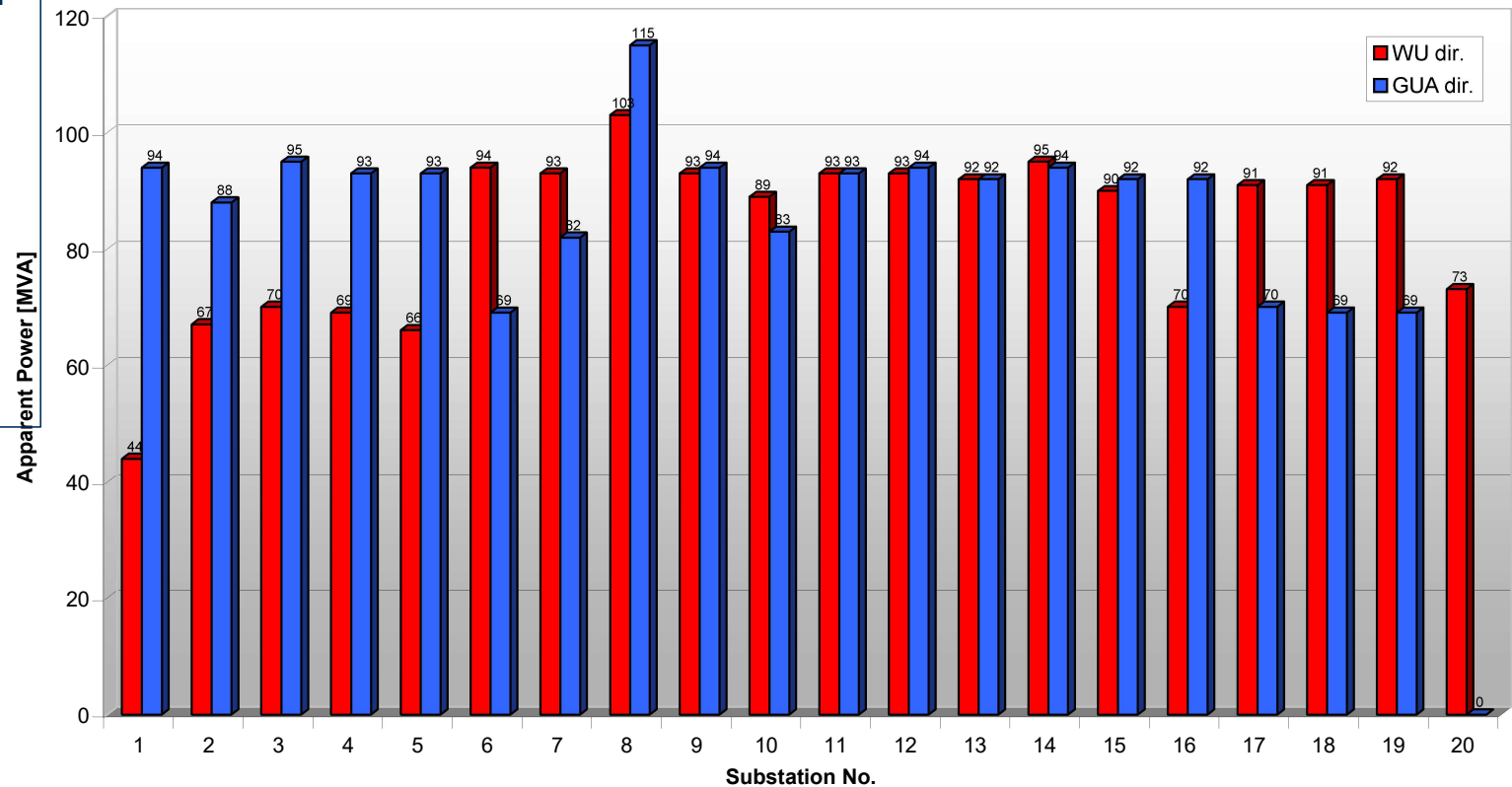


Abbildung 3:  
Spitzenleistung Unterwerk

# 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 speziell: 3 AC 220 kV, streckenparallel)
- Unterwerksleistungen > 50 MVA → **1.000 ... 2.000 kW/ km**  
(Vergleichswert D: 300 ... 600 kW/ km)
- Fahrleitung mit Verstärkungs- und Rückleitern
- Streckenorientierte Instandhaltungskapazitäten
- ETCS L2 auf allen Strecken

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

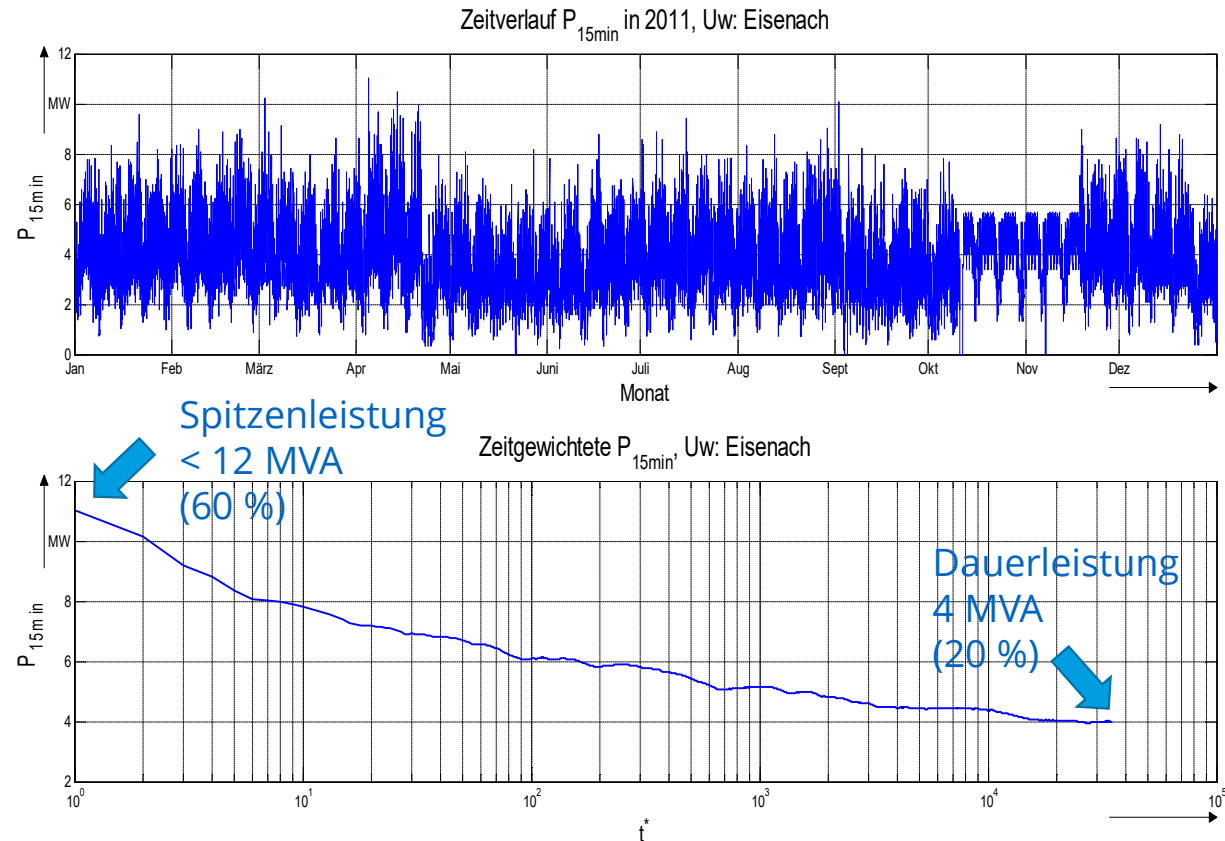
# Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



## 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)?

## 16,7-Hz-Bahnstromnetz in Deutschland

- Installierte Erzeugerleistung gesamt ca. **3.500 MW**
  - Höchster Leistungsbezug (15 min) ca. **2.300 MW**
  - 110-kV-Bahnstromnetz: ca. **7.900 km** Trassenlänge
  - **185** Unterwerke (zentral)
  - **12** Umformer-/ Umrichter-werke (dezentral)
  - Elektrifizierte Streckenlänge: ca. **20.000 km**
- ➔ damit **90% der Transportleistung** im Netz



● Umrichterwerke  
● Umformerwerke  
● Kraftwerke (Wärme, Wasser)

--- Grenze frequenzvariabler / frequenzstarrer Bereich

**Abbildung 5:**  
2AC 110-kV-Bahnstromleitungen

Stand: 2021

# Elektrifizierung: Herausforderungen (1)



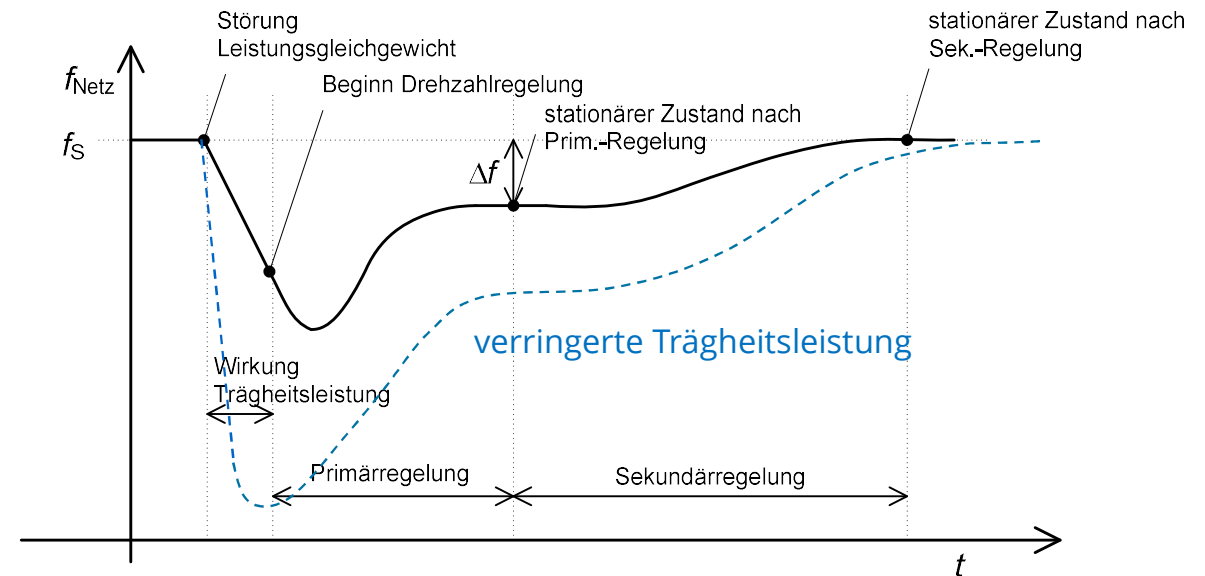
## Energieerzeugung / Netzregelung:

- Netzweite und kleinräumige Integration regenerativer Energiequellen
  - Zunehmende Einspeisung über Umrichter („masseloses Netz“)
- ➔ Transiente Netzstabilität ↔ Netzregelung

## Höherer Anteil Umrichter-Speisung

- ➔ Verringerte Trägheitsleistung
- ➔ Primärregelung mit größerem  $\Delta P$
- ➔ **Größere Frequenzabweichungen**
- ➔ Rückwirkung auf die Fahrzeugregelung

**Abbildung 6:**  
Ablauf der f-P-Regelung



## Elektrifizierung: Herausforderungen (2)



### Energieübertragung:

- (Zeitgerechte) Verfügbarkeit von Leitungstrassen (auch bei Erneuerung!)
- (Temporäre) Sonderlösungen, z.B. 2x25 kV auf OLA
- (Teil-)Verkabelung als „Enabler“
- Netzbetrieb  $\leftrightarrow$  Schutz, v.a. Erdfehlererkennung und -behandlung

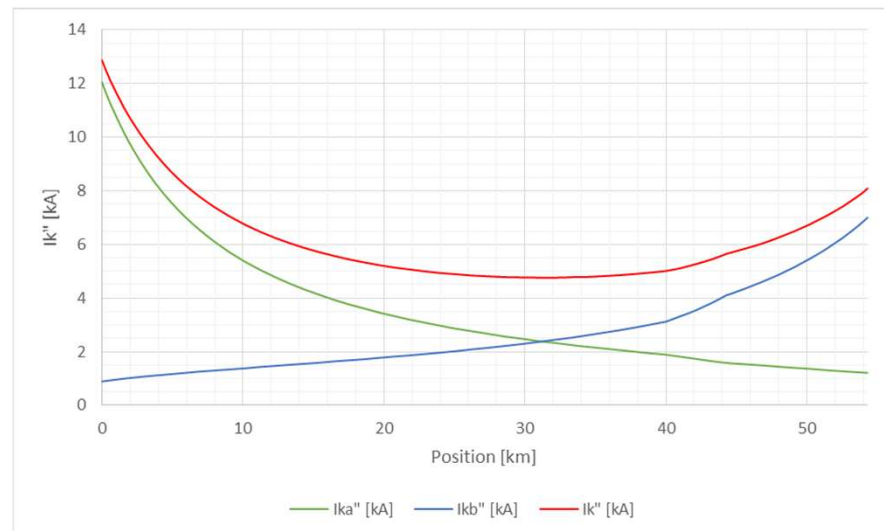


# Elektrifizierung: Herausforderungen (3)



## Energiezuführung:

- Leistungserhöhung der Anlagenstruktur
  - Unterwerke (Transformatoren, Schaltanlagen)
  - Fahrleitung (Verstärkungsleitungen, Rückleitungsseile)
- Fahrleitungsschutz: Betriebs- und Kurzschlussströme, Zwischensystemfehler



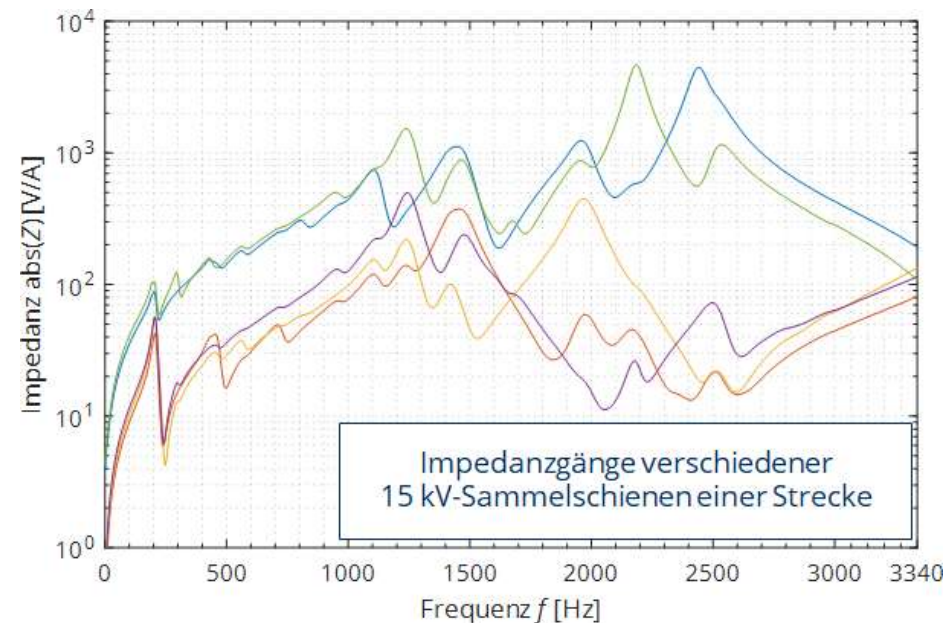
**Abbildung 7:**  
Kurzschlussstromverlauf gesamt und pro StA

# Elektrifizierung: Herausforderungen (4)



## Gesamtsystem und Schnittstellen:

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



**Abbildung 8:**  
Frequenzgang mit Resonanzstellen

# Elektrifizierung: Und die Umsetzung?



## Planerisch und rechtlich:

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

## Fazit zur 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 soll müssen wir **deutlich schneller** werden.**
- Sonst machen es andere.

# Die Rettung naht: Alternative Antriebe ...



## Status Quo:

- Es gibt **marktfähige** technische **Fahrzeuflösungen** mit Hybridantrieben. (Dual Mode, BEMU, HEMU, Diesel-Akku-Hybrid, ...)
- Es gibt einen internationalen **Herstellermarkt**. Die Kernkompetenz sitzt 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 lohnen.
- Alternative Antriebslösungen befreien uns (scheinbar) von langwierigen Planungs- und Genehmigungsprozessen für Infrastrukturen im öffentlichen Raum.

## Kommerziell:

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

## Leider aber auch:

- Grundlegende physikalische Zusammenhänge sind nicht immer präsent – 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



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

# Technologievergleich: Energieeffizienz der Antriebssysteme

Vergleich ab Hochspannung 110 kV

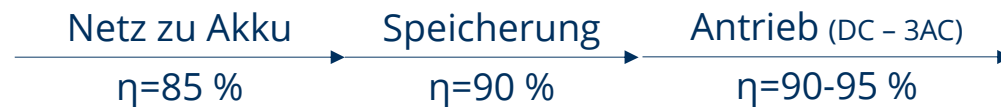


## Elektroenergie Elektroantrieb



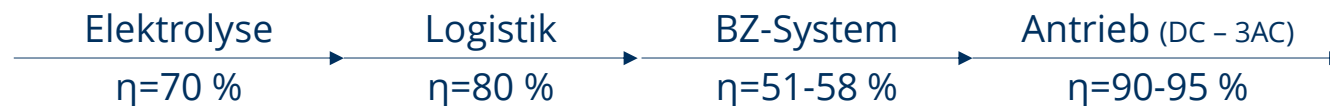
Gesamtwirkungsgrad ~ 80 %

## Elektroenergie Akkumulator Elektroantrieb



Gesamtwirkungsgrad ~ 70 %

## Elektroenergie Wasserstoff + Akku Elektroantrieb

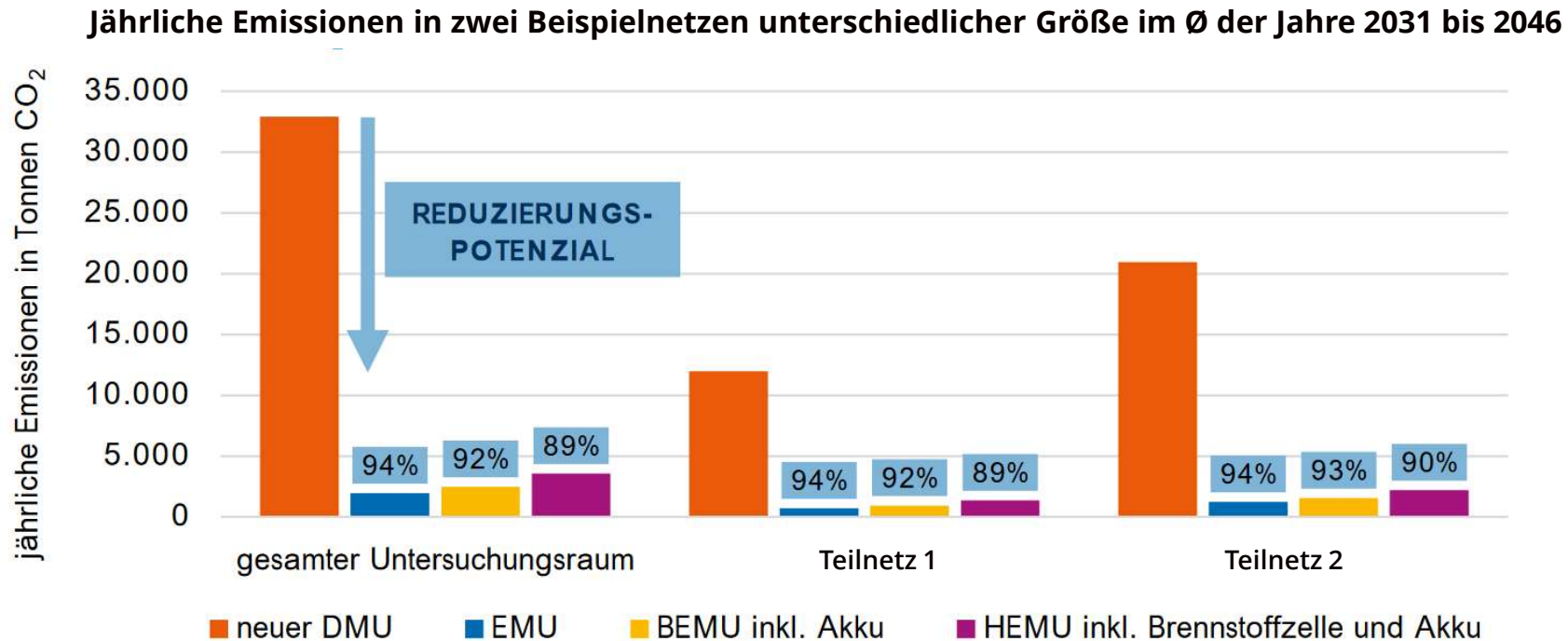


Gesamtwirkungsgrad ~ 30 %

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



# Technologievergleich: CO<sub>2</sub>-Bilanz



**Abbildung 9:**  
CO<sub>2</sub>-Emissionen  
Regio-Netz

- Alle elektrischen Antriebstechnologien verbessern die CO<sub>2</sub>-Bilanz gegenüber Diesel deutlich.
- Der Ökostromanteil im Energiemix hat Potenzial für weitere Verbesserung.

# Technologievergleich: Herausforderung **Infrastruktur!!!**



Foto: Thomas Scherrans

## **Verlängerungs-/ Inseloberleitung**

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



Quelle: Stadtwerke Tübingen

## **Ladestation**

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



Quelle: Clean Energy Partnership

## **Wasserstofftankstelle mit Logistik**

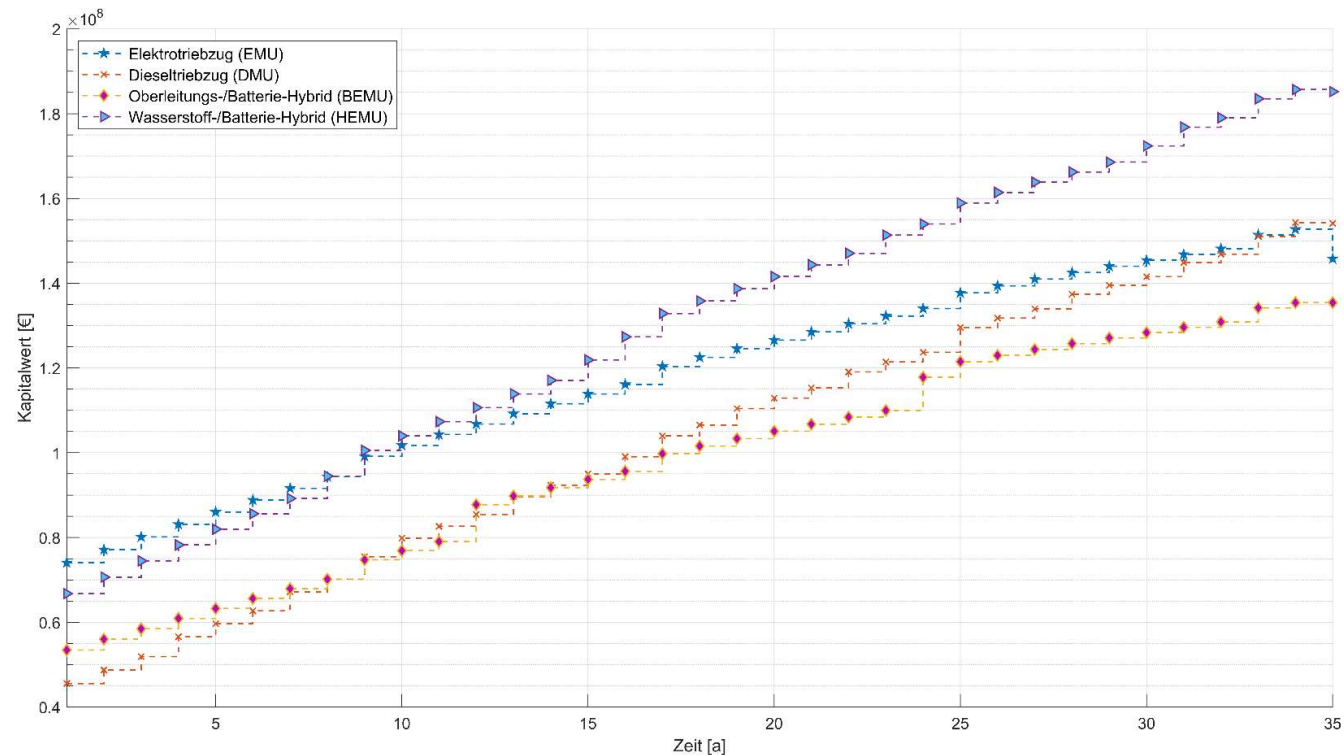
- Abgabe von verdichtetem Wasserstoff
- Logistik der Belieferung individuell zu klären
- lokale Direkterzeugung denkbar
- aber noch keine Standardlösung, sehr teuer

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



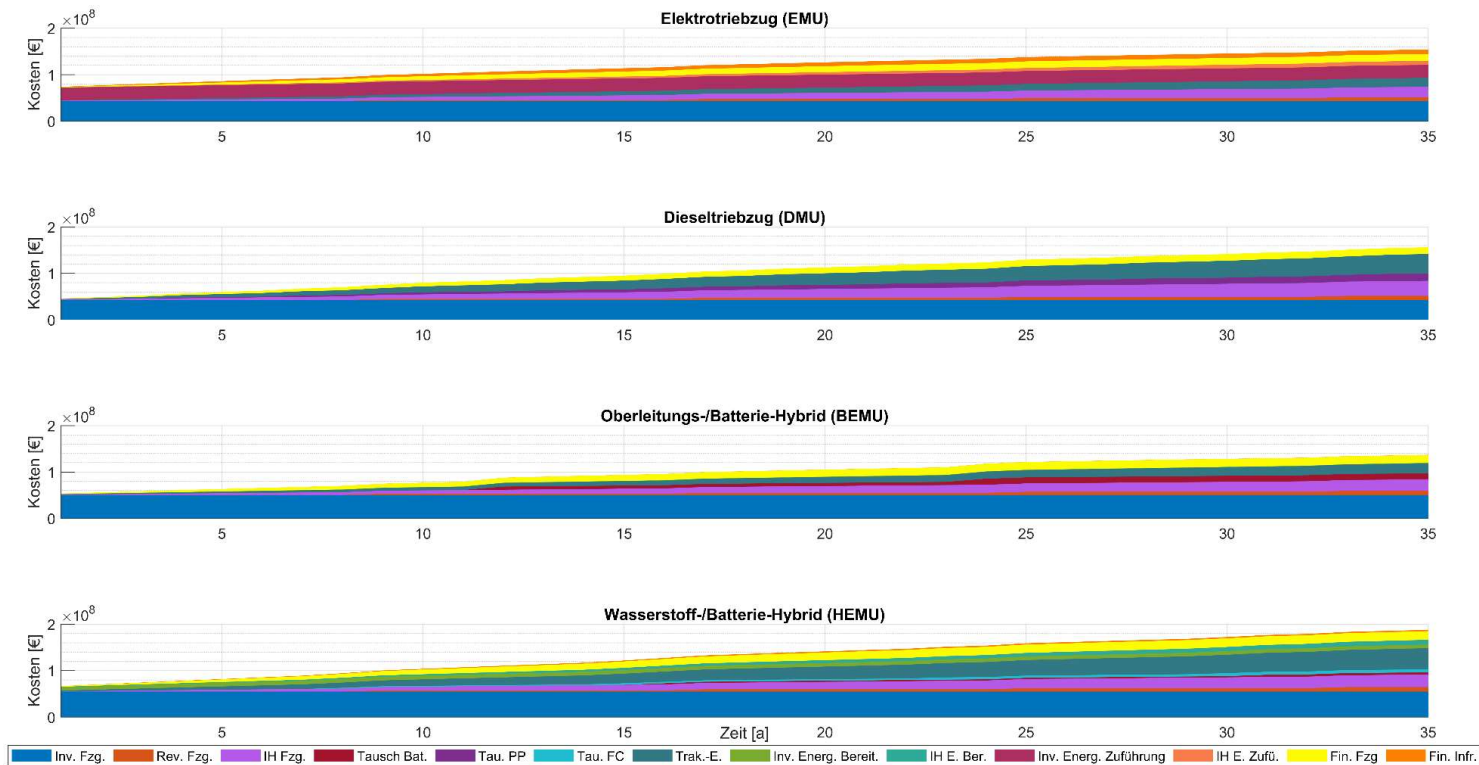
- 4. HEMU
- 3. DMU
- 2. EMU
- 1. BEMU

Abbildung 10:  
LCC Kapitalwerte Netz A

# Technologievergleich: Wirtschaftlichkeit (Flotte und Netz) Anteile der Kapitalwerte über 35 Jahre - Kostentreiber



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

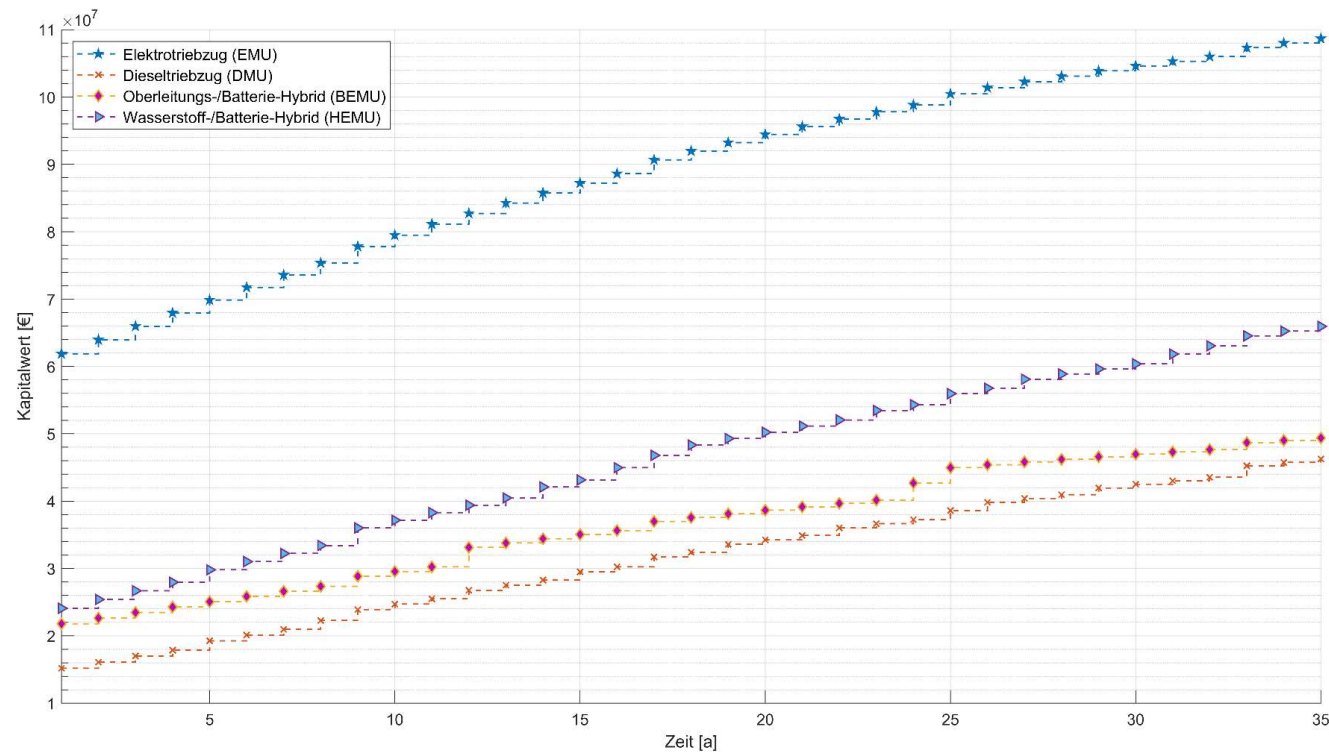


**Abbildung 11:**  
Kostenanteile Netz A

# 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

# LCC-Untersuchungen für alternative Antriebe



## 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, Akku, 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 Fahrzeugbeschaffungs- sowie die zyklischen Instandhaltungs- und Revisionskosten.*

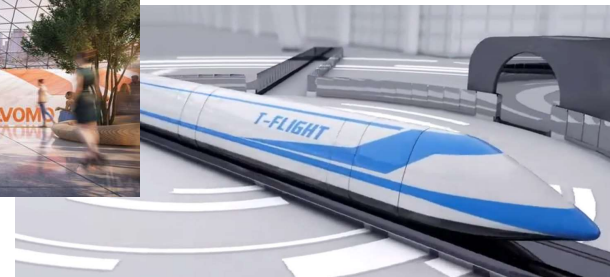
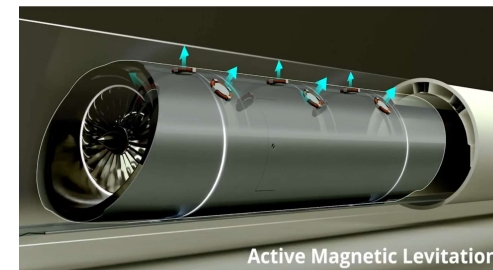
## Elektrisch fahren – Fazit 2022



- Die **moderne Bahn** ist und bleibt **elektrisch**.  
Denn 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**.
- **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.
- Die Wirtschaftlichkeit wird maßgeblich von den **langjährigen Betriebskosten** bestimmt (Treiber: Energie, Tausch von Hochtechnologiekomponenten).
- **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.





**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](http://www.e-bahnen.de)

# Herzlichen Dank für Ihr Interesse!



Foto: SNCF



Foto: Stephan



Foto: Alstom



Foto: Stadler



Foto: Bombardier

# Verkehr studieren ... in Dresden

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN**

Alona Chesnok (Studentin) >>

**BRENNSTOFFZELLEN**

**CLEVERE ENERGIE FÜR VERKEHRSSYSTEME ODER FALL FÜR DEN ZELLTOD?**

**VERKEHR STUDIEREN**  
DIPLOM VERKEHRSSYSTEME  
ELEKTRISCHE VERKEHRSSYSTEME

VERKEHRSSYSTEME  
VERKEHR STUDIEREN