

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

Elektrisch fahren – was heißt das?

Grundlagen der Bahnelektrifizierung für Bestands- und Ausbaustrecken in Deutschland

Dialogforum Bahnstrom
Mühdorf, 17. Juli 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 Wasserstoff und Akku!

... 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.**
- Anlagen-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, Streckenlokomotiven, Regional- und S-Bahnzüge sowie TRAMs 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:

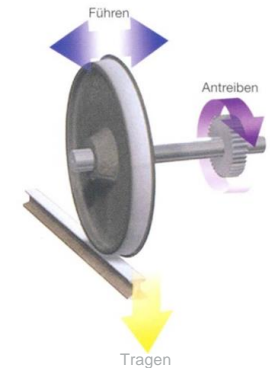
VIEL (... große Massen, viele Menschen oder Güter ...)

+

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

Und dafür ist die **Eisenbahn** am besten **ELEKTRISCH**.

Weil es dann **am billigsten** ist – und sie es **ohne Batterien** kann.



Grundlagen: 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

Elektrischer Bahnbetrieb in Deutschland



Streckenelektrifizierung mit Wechselstrom 1 AC 15 kV 16,7 Hz

- Oberleitungsspannung **15 kV** (Hochspannung) → für geringe Fahrzeugströme
- **Sonderfrequenz** historisch bedingt: **16 $\frac{2}{3}$ Hz** → ursprünglich für Wechselstrommotoren
- Sonderfrequenz muss **separat erzeugt** / gewandelt und verteilt werden

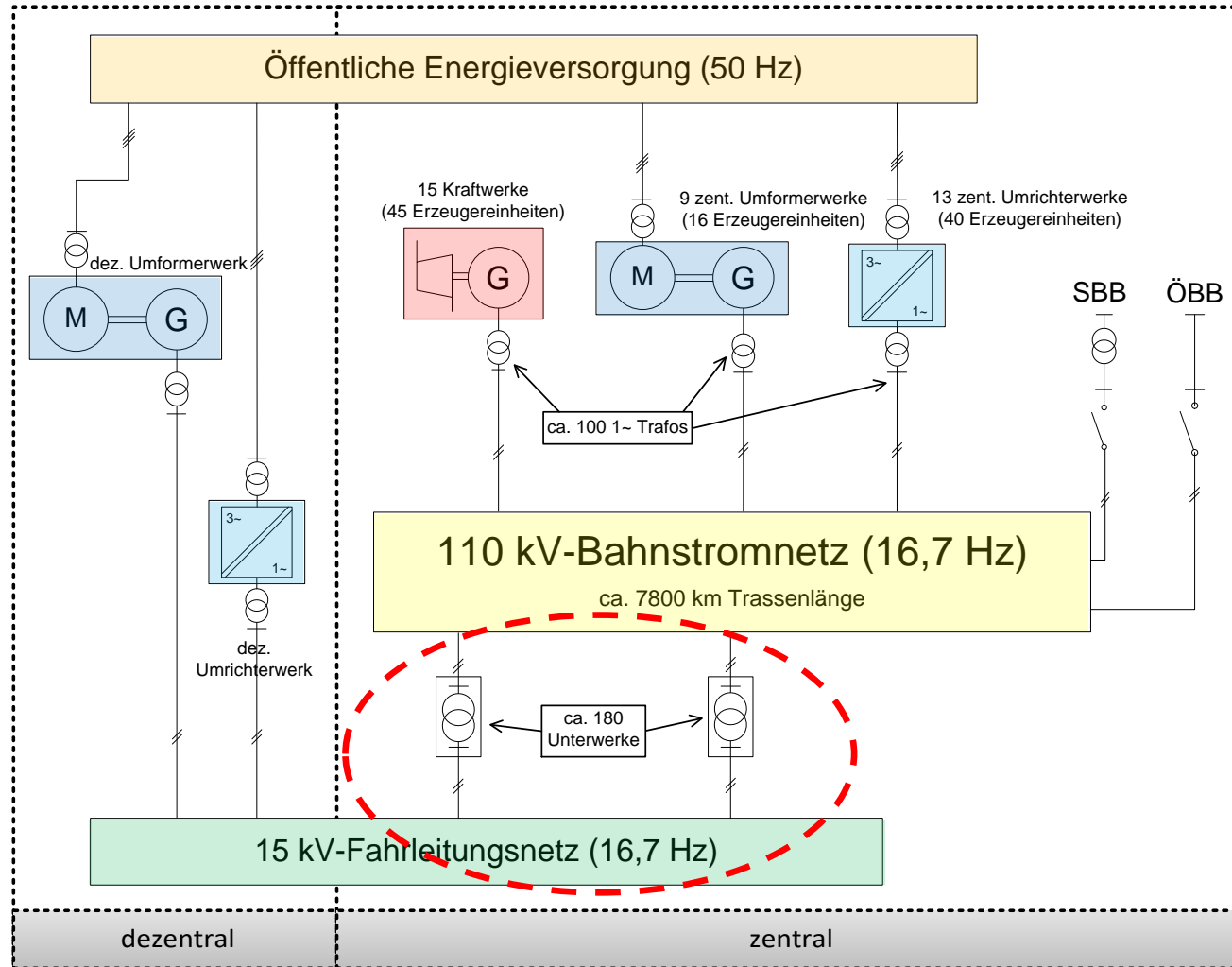
Deshalb:

- Zentraler Netzaufbau ab 1912/ 1913 im Zusammenwirken mit Österreich und Schweiz
→ heute leistungsstarkes Bahnstrom-Verbundnetz
→ aktuell > 50 % der elektrischen Transportleistung Europas mit 16,7 Hz
- In Schweden und Norwegen sowie NO-Deutschland dezentrale Versorgungsstruktur mit streckennaher Wandlung der Frequenz

Fazit:

- **16,7 Hz ist ein modernes, sehr leistungsfähiges europäisches Bahnstromsystem.**

Elektrischer Bahnbetrieb in Deutschland



Energieübertragung
Hochspannungsnetze

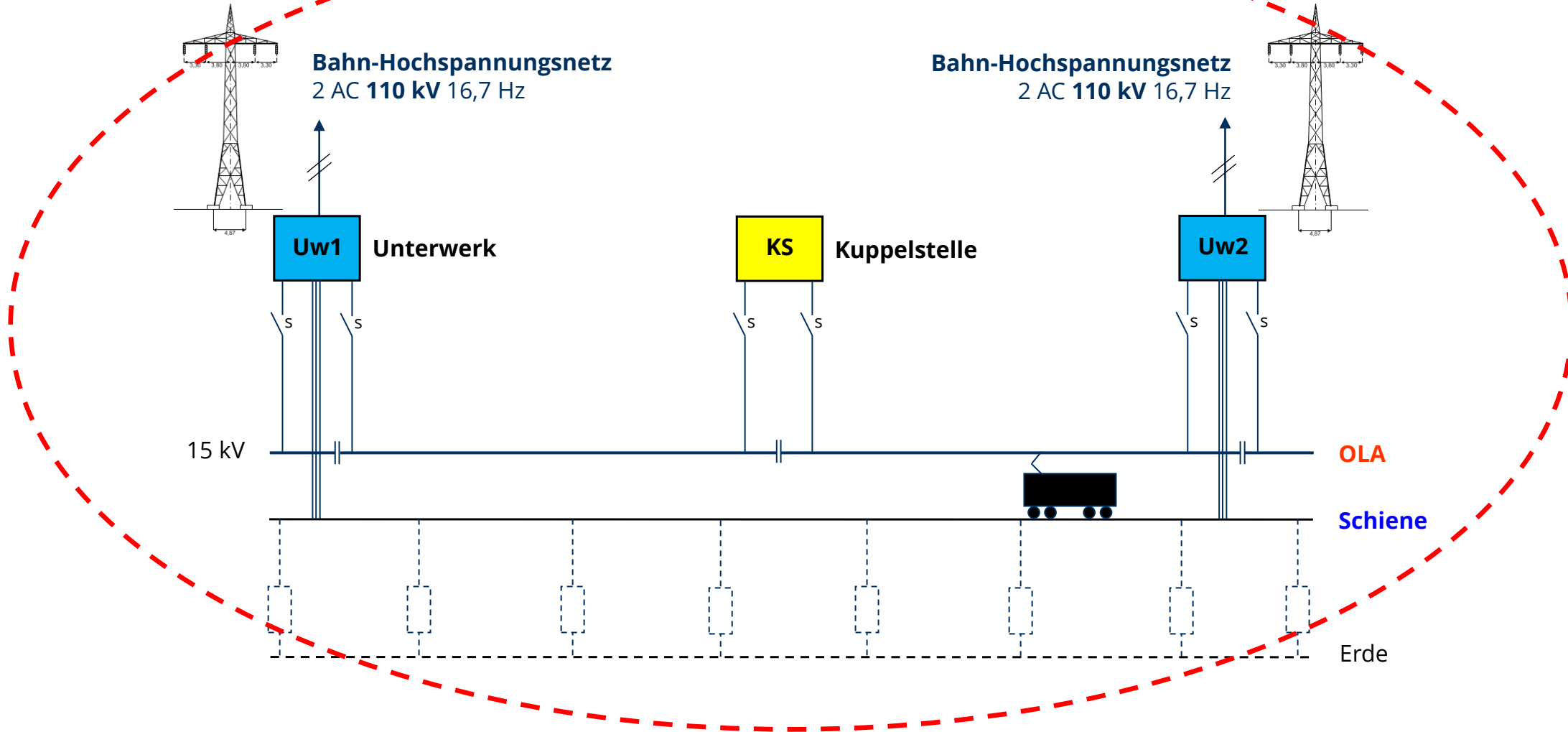
Bahnenergieerzeugung/ -wandlung
Kraftwerke, Umformer, Umrichter

Bahnenergieübertragung
Hochspannungsleitungen

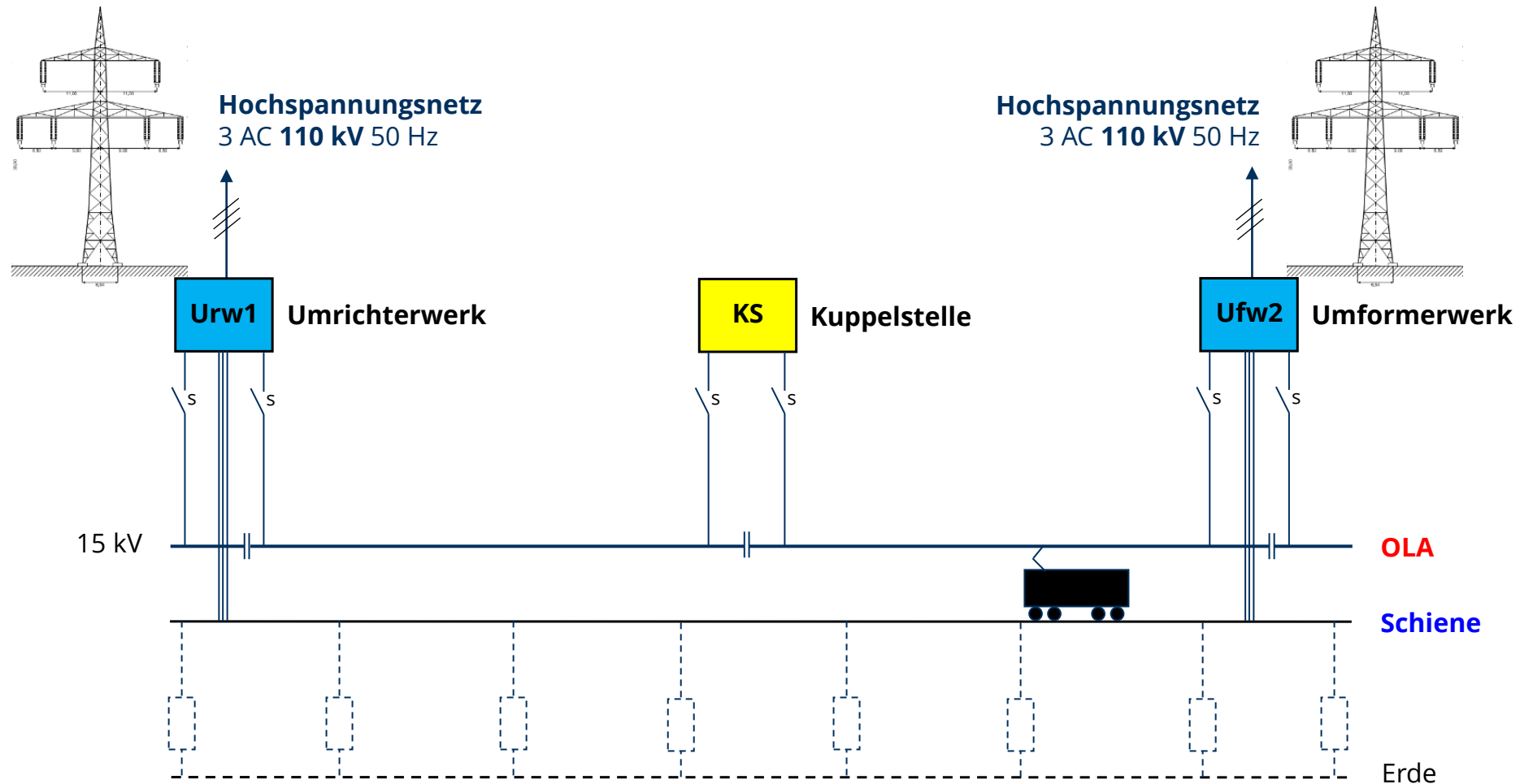
Bahnenergieverteilung
Unterwerke, Schaltposten

Bahnenergiezuführung
Oberleitung

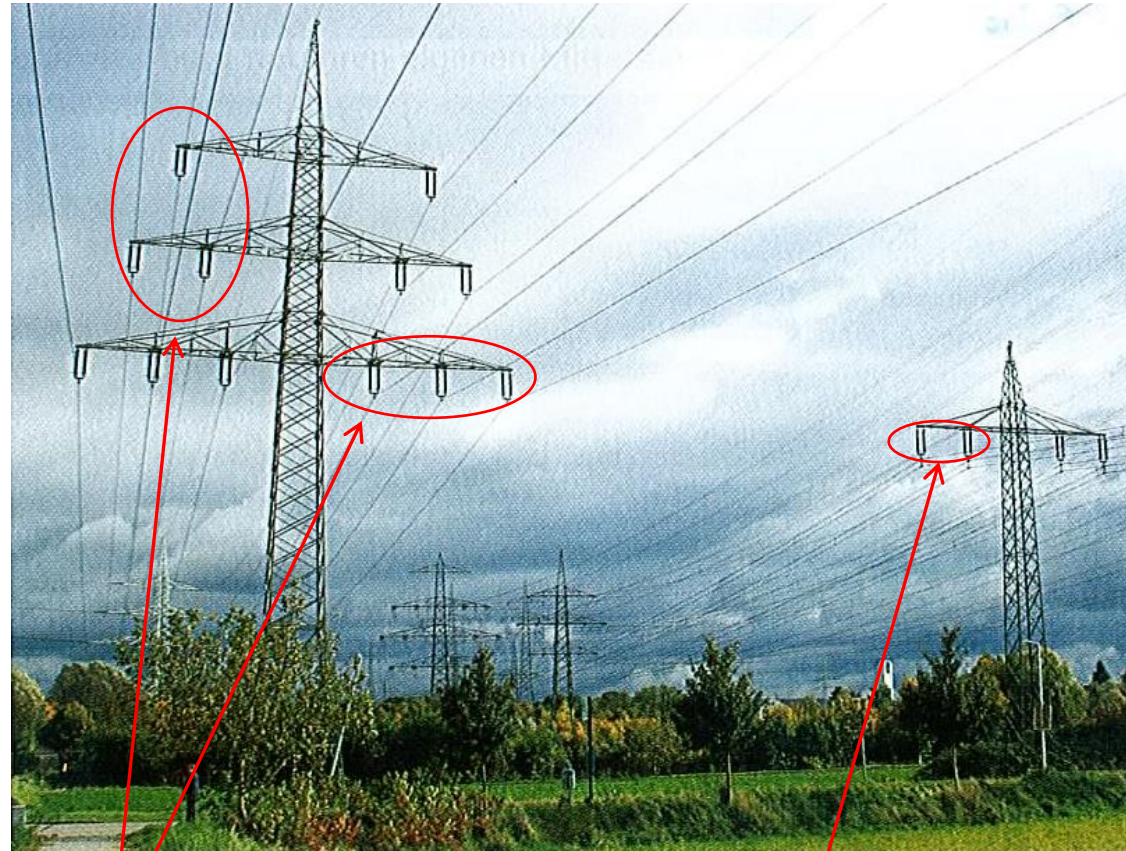
Bahnenergieversorgung 1AC 15 kV 16,7 Hz (zentral)



Bahnenergieversorgung 1AC 15 kV 16 ²/₃ Hz (dezentral)



Bahnstrom-Netzbetrieb: Hochspannungsleitungen



Drehstromleitung
3 AC 110 kV 50 Hz

Bahnstromleitung
2 AC 110 kV 16,7 Hz

Elektrischer Bahnbetrieb in Deutschland

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

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

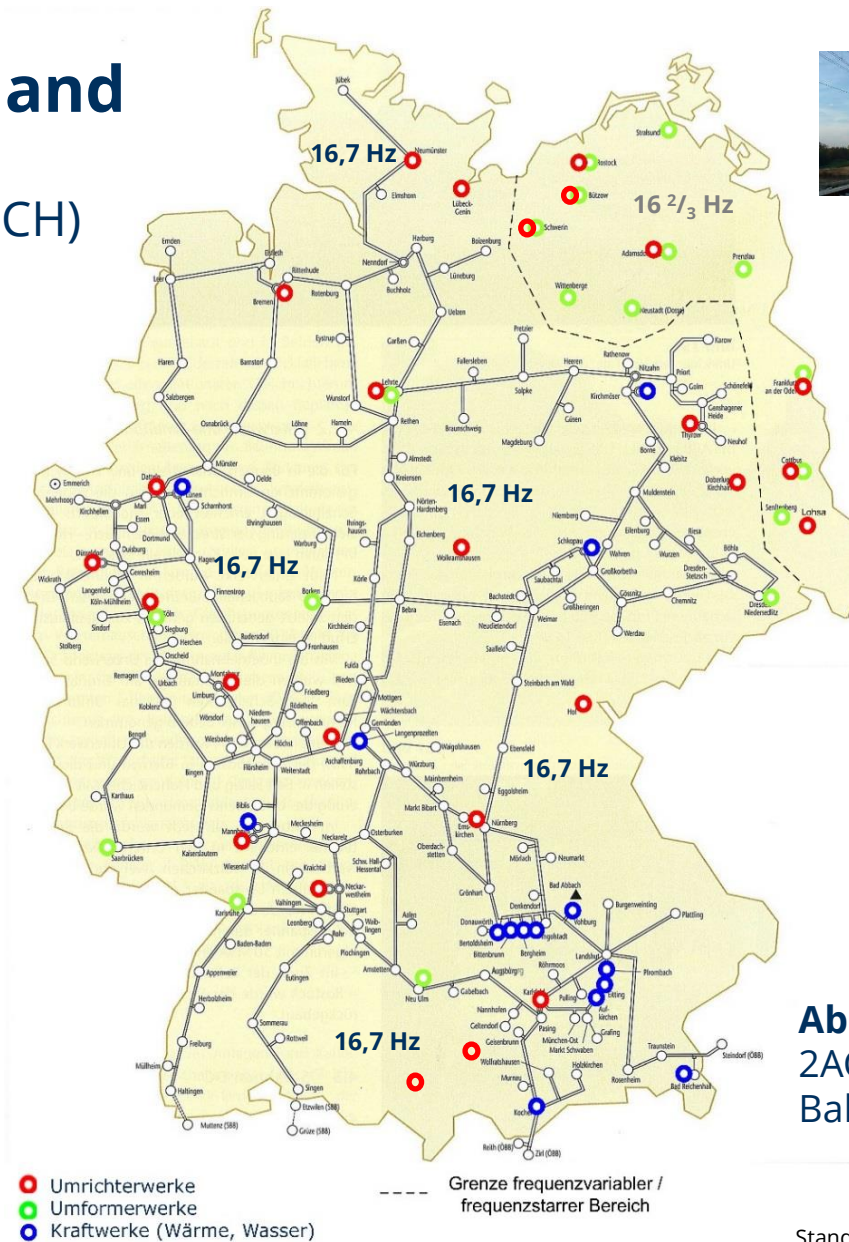


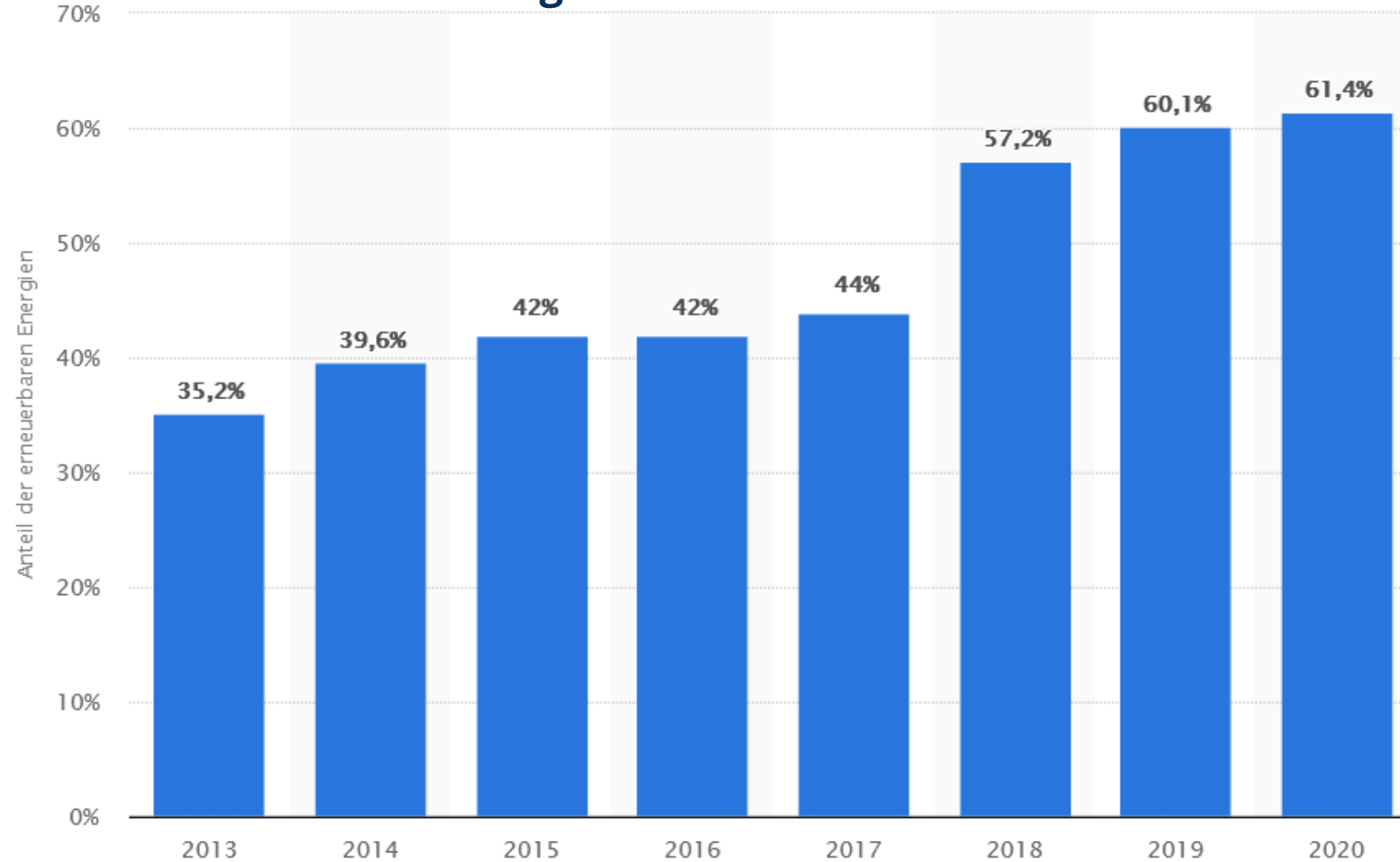
Abbildung 5:
2AC 110-kV-
Bahnstromnetz

Stand: 2022

Elektrischer Bahnbetrieb in Deutschland



Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Bahnstrommix



**Die elektrische
Bahn ist schon jetzt
sehr grün.**

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

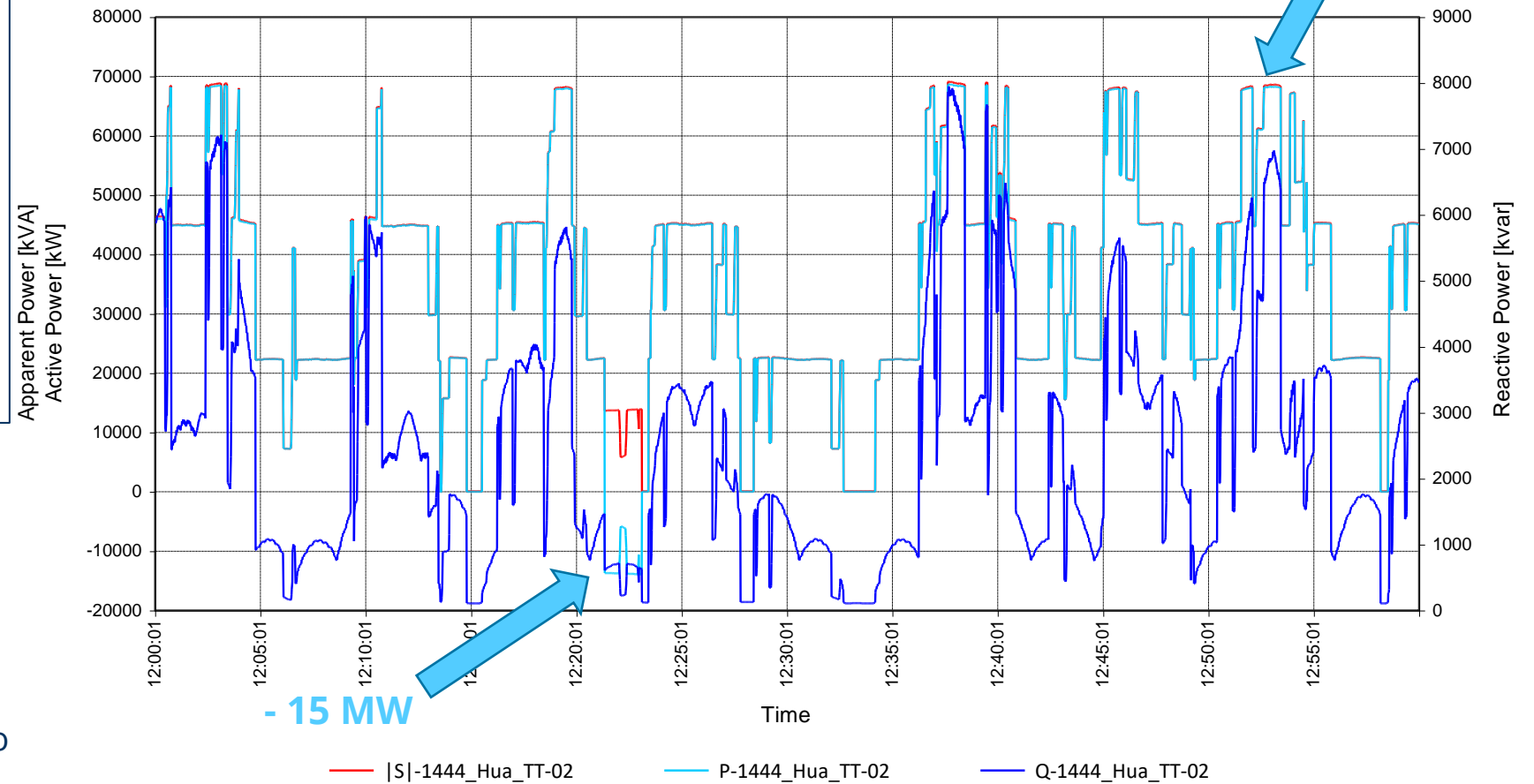


Abbildung 2: Wu-Gua DPL
Leistungsgang Unterwerkstrafo

Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



Beispiel 1: HGV China

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

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 können wir auch. – Und haben es schon lange!

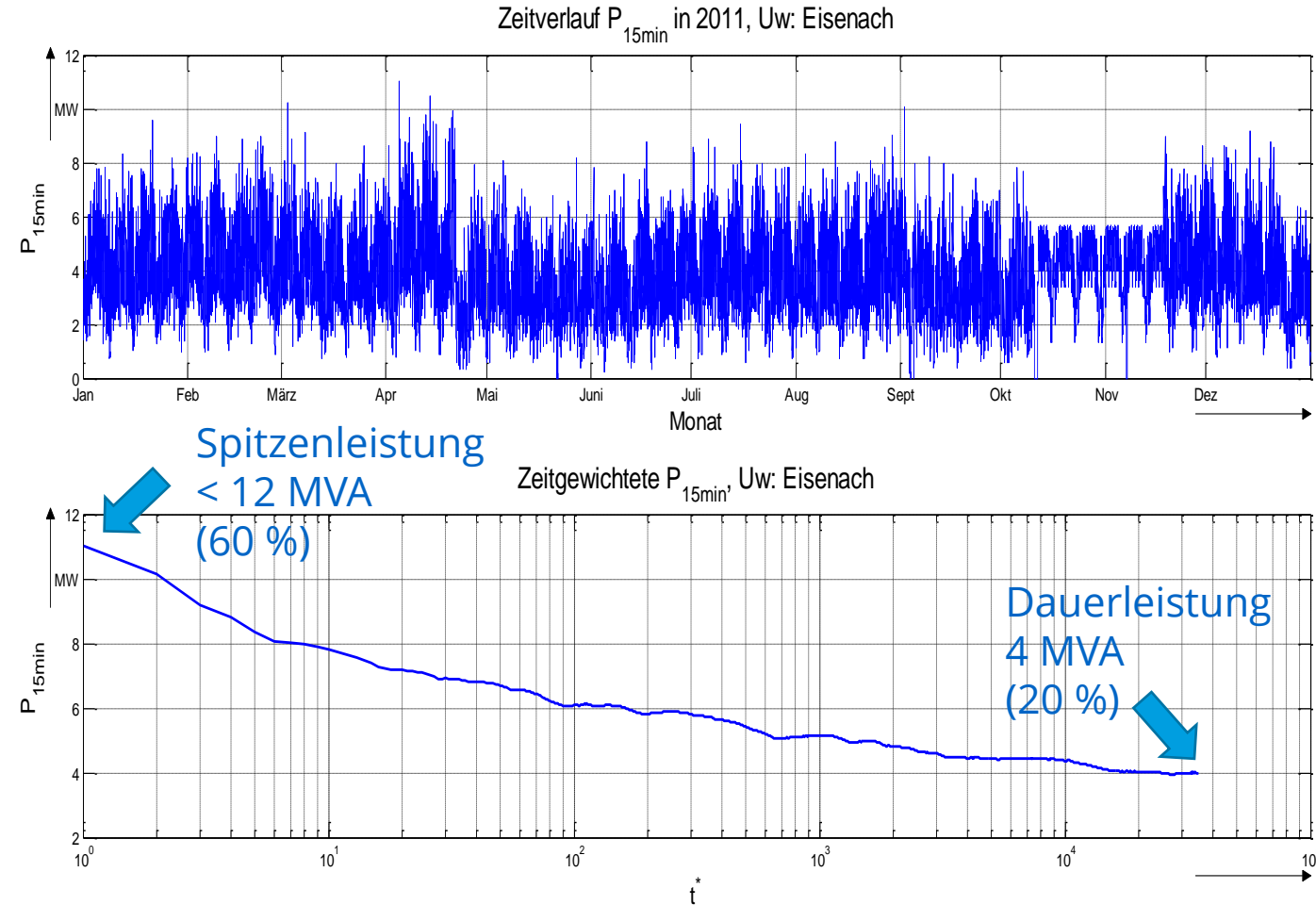
Elektrisch fahren: Was geht (noch)?



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)



Bahnelektrifizierung: Normen- und Rechtslage (1 – EN)



Norm	Titel
DIN EN 1991-1-4:2010	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010
DIN EN 15273-1:2017	Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 1: Allgemeines - Gemeinsame Vorschriften für Infrastruktur und Fahrzeuge; Deutsche Fassung EN 15273-1:2013+A1:2016
DIN EN 15273-3:2017	Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 3: Lichtraumprofile; Deutsche Fassung EN 15273-3:2013+A1:2016
DIN EN 50119:2021	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für die elektrische Zugförderung; Deutsche Fassung EN 50119:2020
DIN EN 50119 Bbl 1:2021-01	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für die elektrische Zugförderung; Beiblatt 1: Nationaler Anhang
DIN EN 50122-1:2017	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung - Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag; Deutsche Fassung EN 50122-1:2011 + A1:2011 + AC:2012 + A2:2016 + A3:2016 + A4:2017
DIN EN 50124-1:2017	Bahnanwendungen - Isolationskoordination - Teil 1: Grundlegende Anforderungen - Luft- und Kriechstrecken für alle elektrischen und elektronischen Betriebsmittel; Deutsche Fassung EN 50124-1:2017
DIN EN 50149:2013	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrischer Zugbetrieb - Rillenfahrdrähte aus Kupfer und Kupferlegierung; Deutsche Fassung EN 50149:2012
DIN EN 50163:2005	Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen; Deutsche Fassung EN 50163:2004

DIN EN 50206-1:2011	Bahnanwendungen - Schienenfahrzeuge - Merkmale und Prüfungen von Stromabnehmern - Teil 1: Stromabnehmer für Vollbahnfahrzeuge; Deutsche Fassung EN 50206-1:2010
DIN EN 50317:2012	Bahnanwendungen - Stromabnahmesysteme - Anforderungen und Validierung von Messungen des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung; Deutsche Fassung EN 50317:2012
DIN EN 50318:2019	Bahnanwendungen - Stromabnahmesysteme - Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Dachstromabnehmer und Oberleitung; Deutsche Fassung EN 50318:2018
DIN EN 50367:2020	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge - Kriterien zur Erreichung der technischen Kompatibilität zwischen Dachstromabnehmern und Oberleitung; Deutsche Fassung EN 50367:2020
DIN EN 50388-1:2017	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen und Bahnfahrzeuge - Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität - Teil 1: Allgemeines; Deutsche Fassung prEN 50388-1:2017
DIN EN 50388-2:2017	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen und Bahnfahrzeuge - Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität - Teil 2: Stabilität und Oberschwingungen; Deutsche Fassung prEN 50388-2:2017



Bahnelektrifizierung: Normen- und Rechtslage (2 – DB RIL)



Vorschrift / Richtlinie	Titel
Ril 997.0100 V1.2 (gültig ab 01.04.2020)	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Bestimmungen Planen und Errichten
Ril 997.0110 V2.0	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Grundlagen Raumbedarf für Oberleitungsanlagen
Ril 997.0111 V1.0	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Grundlagen Trageinrichtungen und Gründungen
Ril 997.0112 V1.1	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Grundlagen Oberleitungen
Ril 997.0113 V1.0	Allgemeine Grundlagen Trennstellen
Ril 997.0114 V1.0	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Grundlagen Bahnenergieleitungen
Ril 997.0115 V1.1	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Grundlagen Bauteile
Ril 997.0117 V1.0	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Grundlagen Schutzmaßnahmen gegen direktes Berühren und Schutzvorkehrungen
Ril 997.0118 V1.0	Oberleitungsanlagen; Laden von Battery Electric Multiple Units (BEMU) an der Oberleitung
Ril 997.0120 V1.0	Oberleitungsanlagen; Allgemeine Grundsätze Planen und Errichten von Oberleitungsanlagen
Ril 997.0140 V2.1	Oberleitungsanlagen Instand halten Allgemeines

Ril 997.0201 V2.0	Grundsätze für Rückstromführung, Bahnerdung und Potenzialausgleich
Ril 997.0202 V4.0	Rückstromführung planen
Ril 997.0203 V2.0	Rückstromführung errichten
Ril 997.0204 V4.1	Bahnerdung planen
Ril 997.0205 V3.0	Bahnerdung errichten
Ril 997.0206 V3.0	Potenzialausgleich planen und errichten
Ril 997.0222 V2.0	Maßnahmen der Rückstromführung bei Hochleistungsstrecken
Ril 997.0301 V2.0	Oberleitungsanlagen; Speisung und Schaltung der Oberleitung planen
Ril 997.0302 V2.0	Oberleitungsanlagen; Bezeichnungen und Benennungen festlegen
Ril 997.9101 V2.0	Verlängerung der Nutzungsdauer von Fahrdrähten
Ril 997.9107 V3.0	Oberleitungsanlagen – Korrosionsschutz durchführen
Ril 997.9109 V3.0	Mastfundamente instand setzen
Ril 997.9114 V5.0	Vogelschutz an Oberleitungsanlagen
Ril 997.9116 V2.0	Herstellung von Schienenanschlüssen und Verlegung von Bahnerdungsleitungen im Gleisbereich
Ril 997.9117 V1.0	Oberleitungsspannungsprüfeinrichtung (OLSP)
Ril 997.9118 V1.0	Ortssteuereinrichtungen und Fernwirkunterstationen für Oberleitungsanlagen



Bahnelektrifizierung: Normen- und Rechtslage (3 – BImSchV)



Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)

26. BImSchV

Ausfertigungsdatum: 16.12.1996

Vollzitat:

"Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266)"

Stand: Neugefasst durch Bek. v. 14.8.2013 | 3266

Fußnote

(+++ Textnachweis ab: 1. 1.1997 +++)

§ 1 Anwendungsbereich

(1) Diese Verordnung gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen, Niederfrequenzanlagen und Gleichstromanlagen nach Absatz 2. Sie enthält Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen und zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder. Die Verordnung berücksichtigt nicht die Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate.

**26. BImSchV
hat
Gesetzes-
charakter!**

Bahnelektrifizierung: Normen- und Rechtslage (4 – EMV)

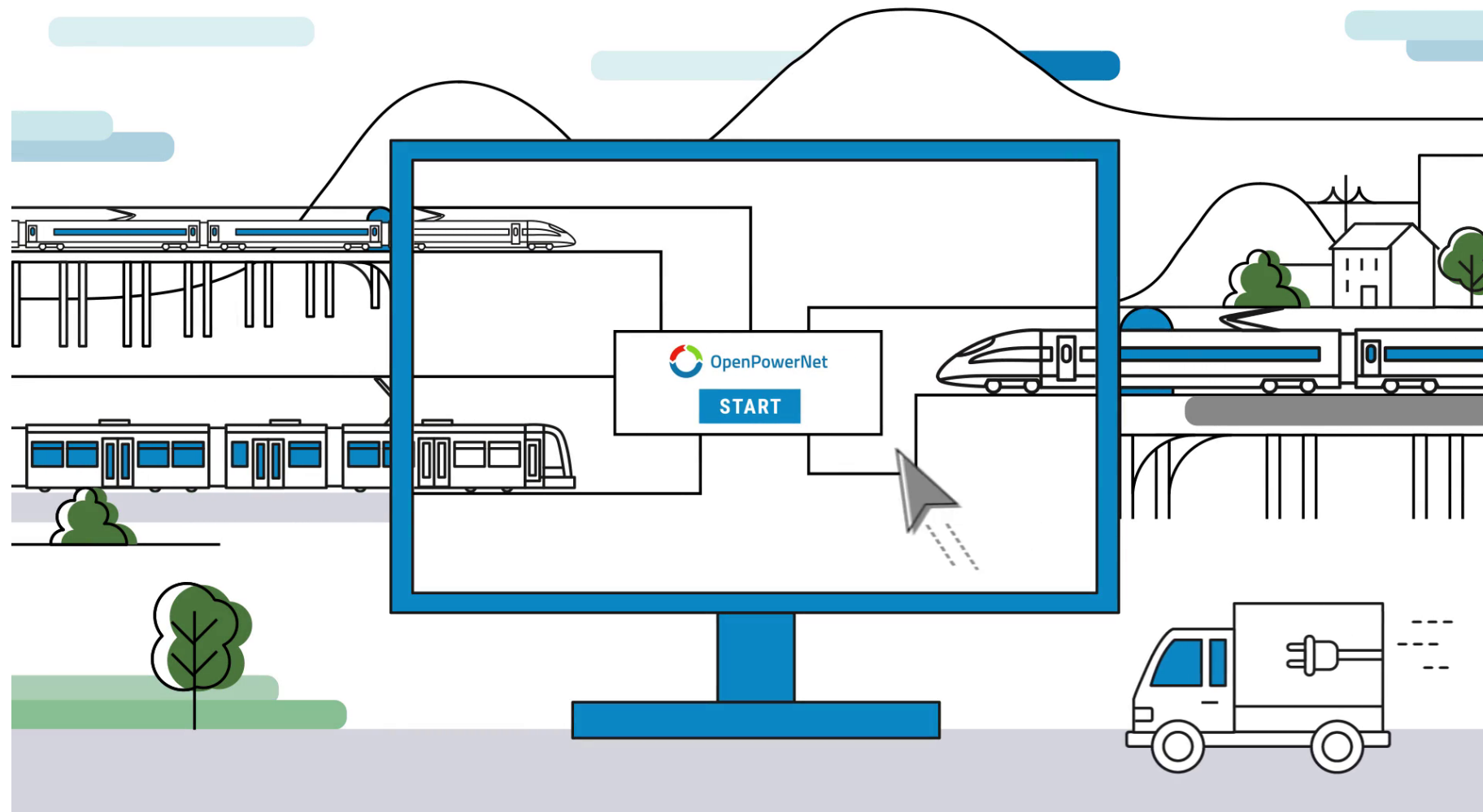


Europäische Normengruppe EN 50 121 – Elektromagnetische Verträglichkeit

- **EN 50121-1**
 - Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 1: Allgemeines
- **EN 50121-2**
 - Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 2: Störaussendungen des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt
- **EN 50121-3-1**
 - Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 3-1: Bahnfahrzeuge – Zug und gesamtes Fahrzeug
- **EN 50121-3-2**
 - Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 3-2: Bahnfahrzeuge – Geräte
- **EN 50121-4**
 - Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 4: Störaussendungen und Störfestigkeit von Signal- und Telekommunikationseinrichtungen
- **EN 50121-5**
 - Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit Teil 5: Störaussendungen und Störfestigkeit von ortsfesten Anlagen und Einrichtungen der Bahnenergieversorgung

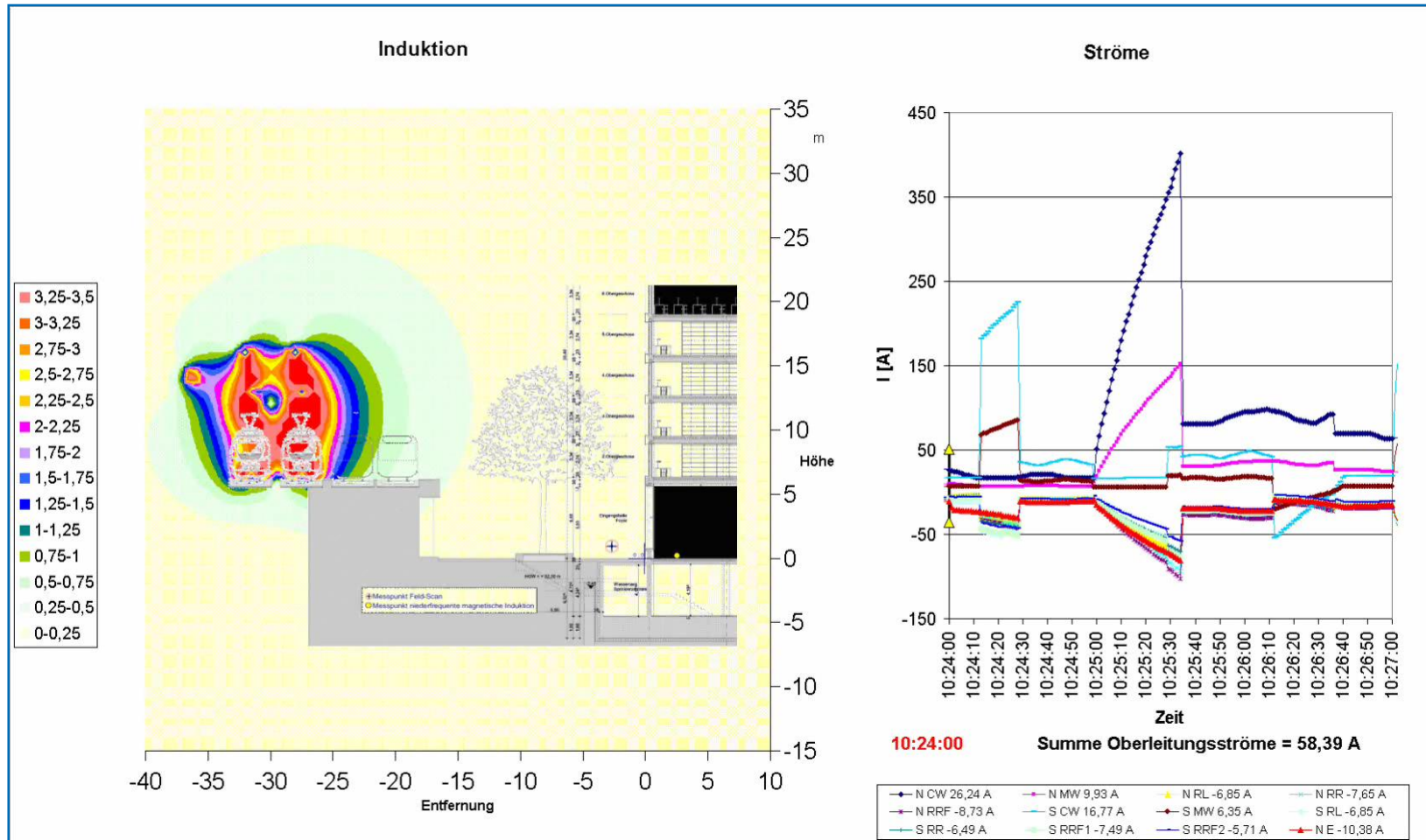
**Die EN 50 121
regelt die EMV
detailliert
für Bahnen.**

Bahnelektrifizierung: Moderne Nachweismethoden



**Computer-
simulation**

Bahnelektrifizierung: Moderne Nachweismethoden



Computer-
simulation

Bahnelektrifizierung: Normen- und Rechtslage



Zusammenfassung:

- Für die Bahnelektrifizierung existiert ein **umfangreiches** internationales, europäisches und deutsches **Normen- und Regelwerk**.
- Dieses Regelwerk ist durch **jahrzehntelange Betriebserfahrungen** abgesichert.
- Für alle Aspekte der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) gilt die **26. BImSchV** mit Gesetzescharakter. Diese schließt elektrische Bahnanlagen mit ein.
- Für elektrische Bahnen werden die EMV-Aspekte durch die europäisch harmonisierte Normengruppe **DIN EN 50121** detailliert für alle Teilsysteme präzisiert.
- Es gibt moderne Simulations- und Nachweismethoden bereits vor dem Bau.
- Erhöhte Gesundheitsrisiken durch elektrischen Bahnbetrieb sind weder national noch international in irgendeiner signifikanten Form bekannt oder belegt.

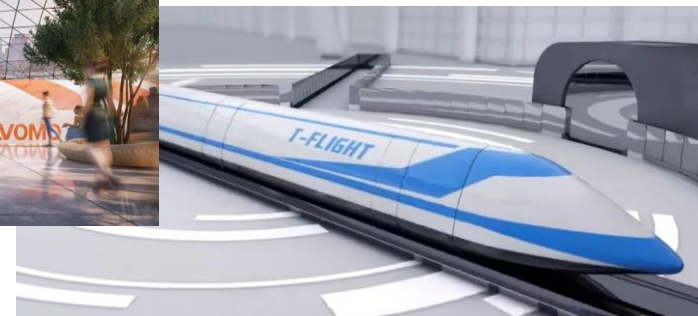
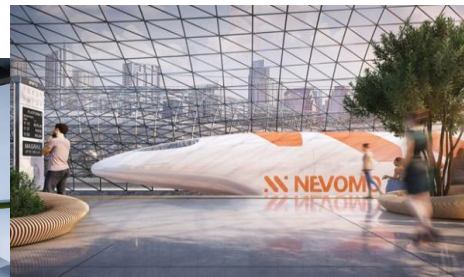
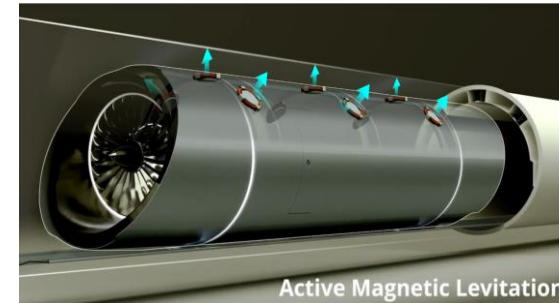
Fazit zur klassischen Bahn-Elektrifizierung



- + Es gibt über 100 Jahre durchweg positive Betriebserfahrungen.
- + Das technologische Risiko ist minimal.
- + Die Umweltwirkungen sind vergleichsweise gering.
- + Die elektrische Bahn in Deutschland fährt schon weitgehend mit grünem Strom.
- + Erhöhte Gesundheitsrisiken sind nicht belegt.
- + Technisch geht noch deutlich mehr.
- + Es ist und bleibt eine Zukunftstechnologie.
- Wenn die elektrische Eisenbahn wirklich eine Rolle bei der Verkehrswende spielen soll muss die Umsetzung **deutlich schneller** gelingen.

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

STOFF H_2

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

VERKEHR STUDIEREN
DIPLOM VERKEHRSSINGENIEURWESEN
ELEKTRISCHE VERKEHRSSYSTEME





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

Backup

Verkehrswende heißt auch: Mehr elektrischer Bahnverkehr.

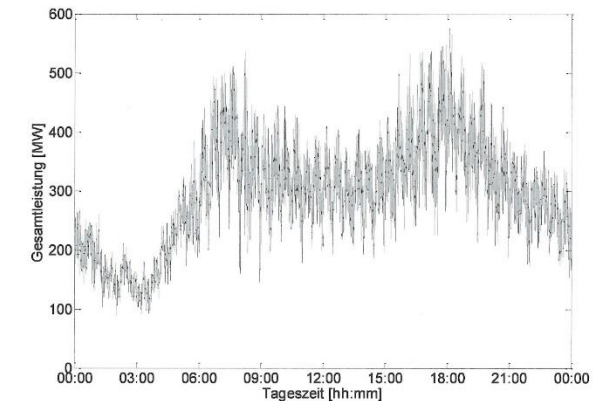
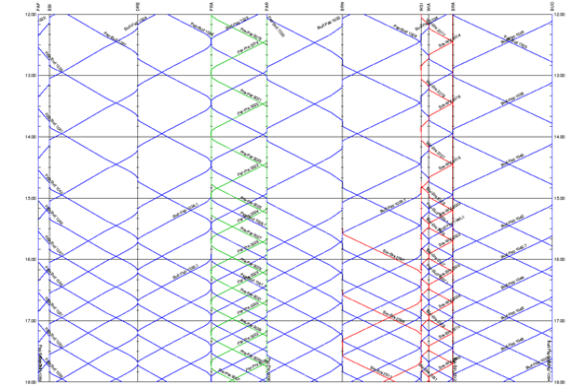


Verkehrlich:

- 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)?

Elektrifizierung: Aktuelle Herausforderungen (1)



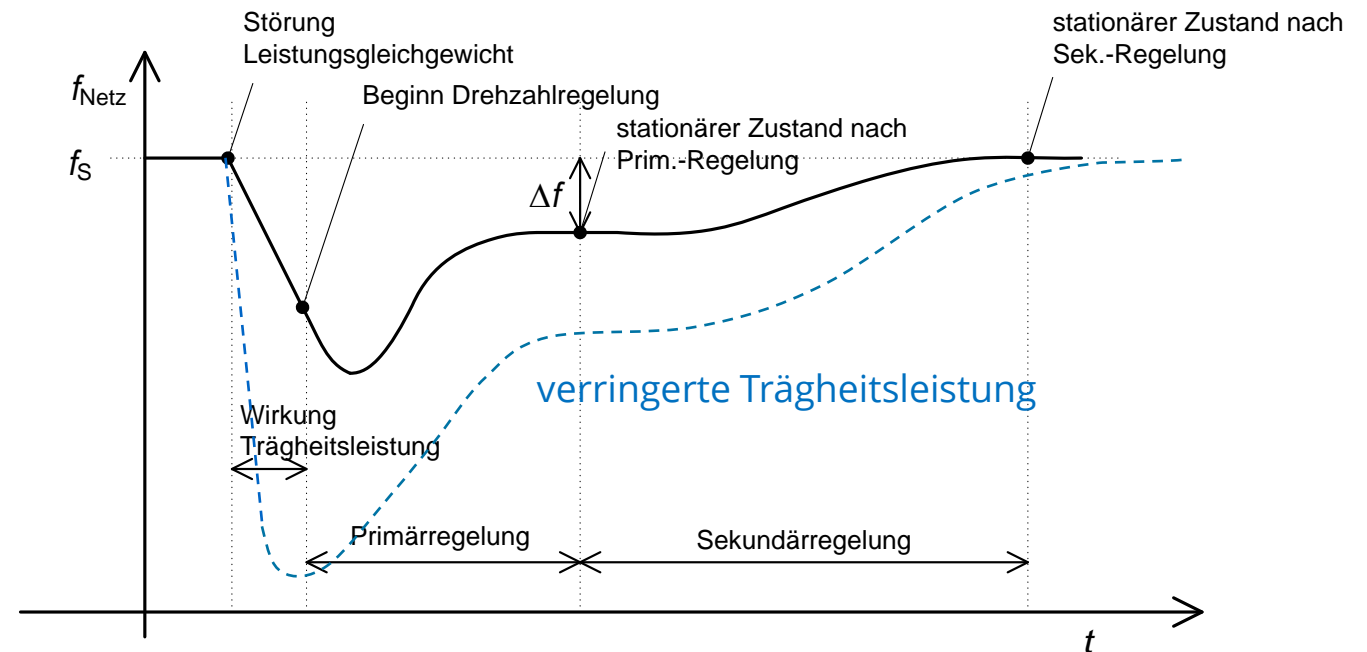
Energieerzeugung / Netzregelung:

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

Höherer Anteil Umrichter-Speisung

- ➔ Verringerte Trägheitsleistung
- ➔ Primärregelung mit größerem 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

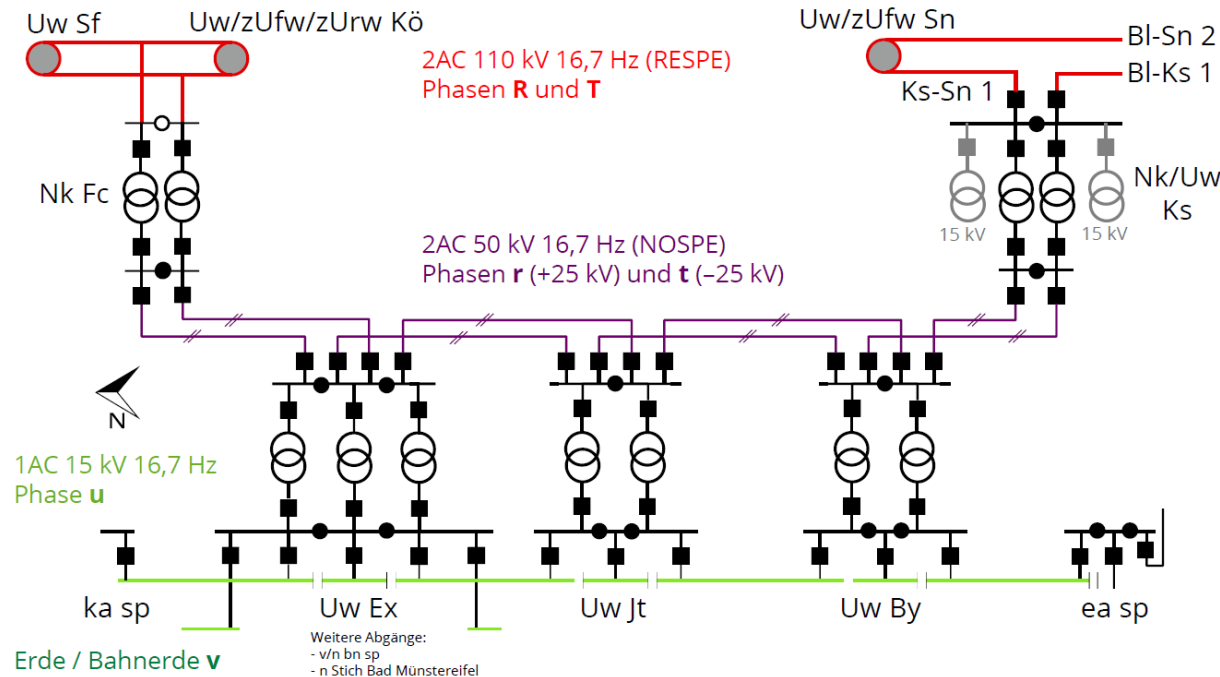
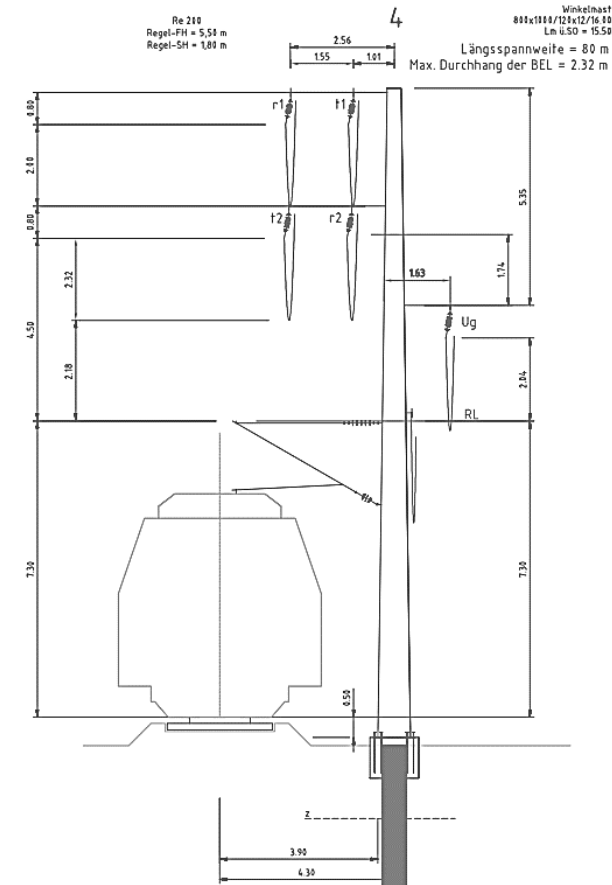


Abbildung 7:
2AC 2x25 kV 16,7 Hz
(Bsp. Eifelbahn)



Elektrifizierung: Aktuelle Herausforderungen (3)



Energiezuführung:

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

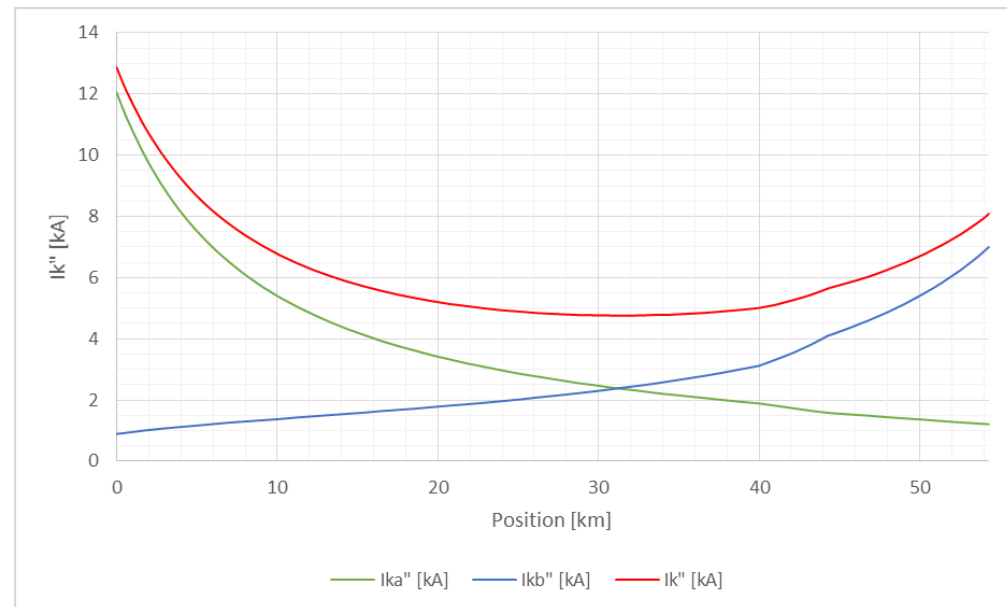


Abbildung 8:
Kurzschlussstromverlauf gesamt und pro StA
(Bsp. Eifelbahn)

Elektrifizierung: Aktuelle Herausforderungen (4)



Gesamtsystem und Schnittstellen:

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

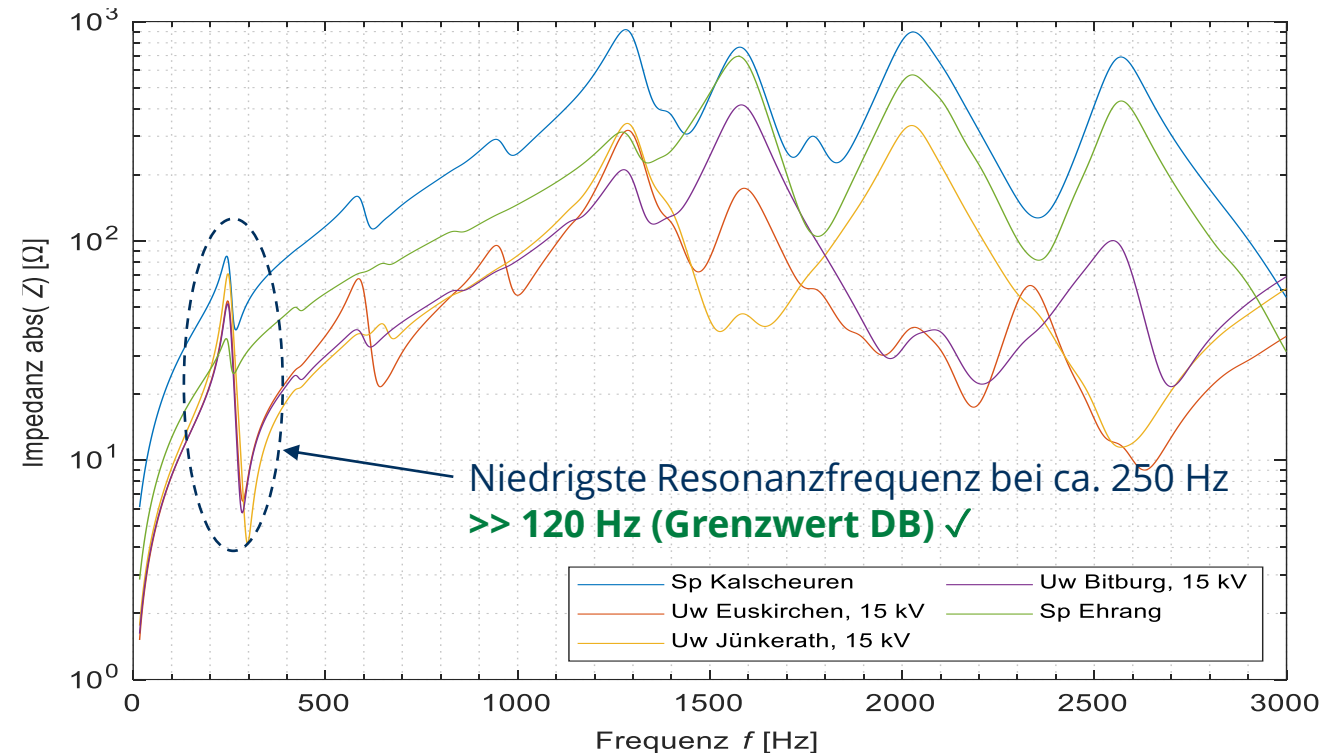


Abbildung 9:
Frequenzgang mit Resonanzstellen (Bsp. Eifelbahn)

Bewertung der Erdverkabelung (aus Projekt NO-Bayern)

- **Kostenfaktor 3 von Erdkabeln ggü. Freileitungen**
→ konservativ angesetzter Wert
 - **Lebensdauer der Erdkabel: 40 Jahre**
→ einmalige Reinvestition im Betrachtungszeitraum von 70 Jahren,
→ Neubau auf separater Trasse erforderlich
 - **Instandhaltungskosten der Erdkabel: 0,5 % p. a.**
 - **Kosten für Netzkupplung: 7.500.000 € (2x notwendig)**
 - **Lebensdauer der Netzkupplung: 50 Jahre**
→ Einmalige Reinvestition im Betrachtungszeitraum von 70 Jahren
 - **Kosten für Übergabestation Freileitung – Erdkabel: 100.000 € (4x notwendig)**
 - Übergabestation ohne Reinvestition
-
- **deutlich höherer wirtschaftlicher Aufwand im Lebenszyklus** (ca. Faktor 5)
 - **drastisch geringere Verfügbarkeit** (Fehlerrate 40-fach größer)
 - **erheblich höherer Umwelteingriff** (Flächenverbrauch, Wasserhaushalt, mehrfache und intensivere Bauphasen)

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 **Fahrzeuflösungen** 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



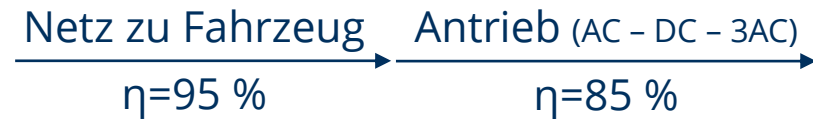
Elektroenergienetze:	94 ... 98 %	(AA)
Elektromotoren / -generatoren:	93 ... 96 %	
<hr/>		
Akkumulatoren:	85 ... 90 %	(A)
Raffinerie inkl. Vorkette:	85 ... 90 %	
<hr/>		
H2-Druckspeicher inkl. Wandlungen:	80 %	(B)
Elektrolyseur:	70 %	
<hr/>		
Brennstoffzelle:	51 ... 58 %	(C)
<hr/>		
Dampfturbine inkl.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

Technologievergleich: Energieeffizienz der Antriebssysteme

Vergleich ab Hochspannung 110 kV

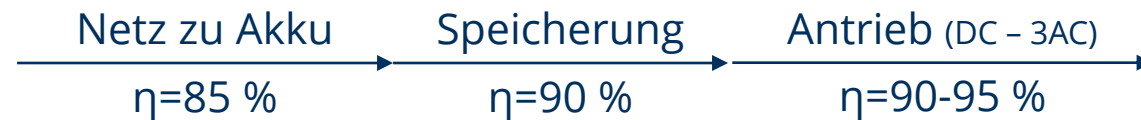


Elektroenergie Elektroantrieb



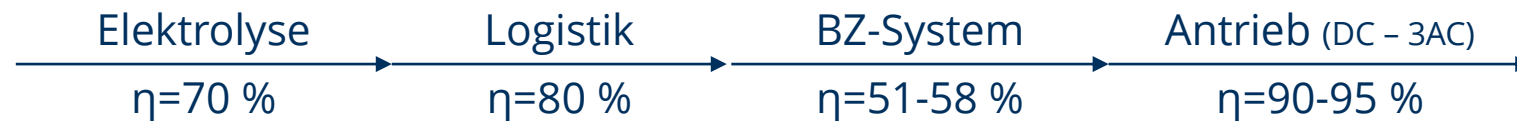
Gesamtwirkungsgrad ~ 80 %

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



Jährliche Emissionen in zwei Beispielnetzen unterschiedlicher Größe im Ø der Jahre 2031 bis 2046

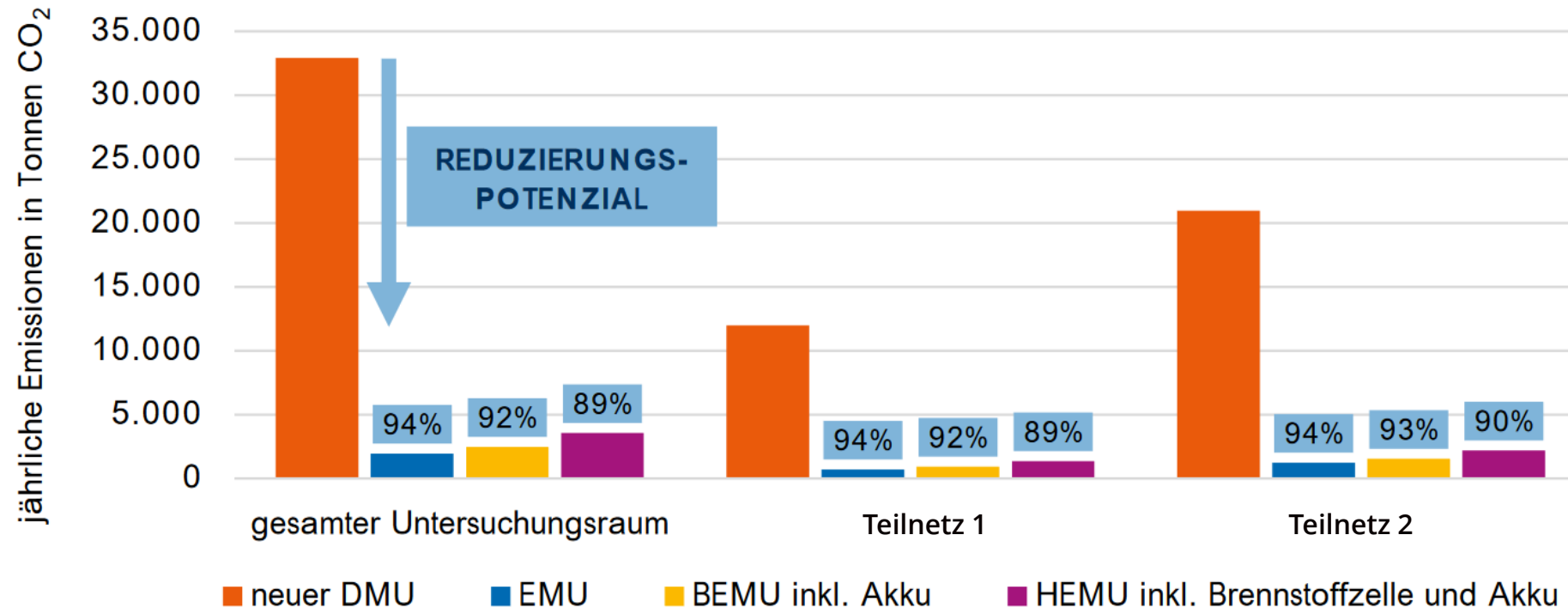


Abbildung 10:
CO₂-Emissionen
Regio-Netz

- 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



Quelle: Clean Energy Partnership

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

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 für den Schienenverkehr



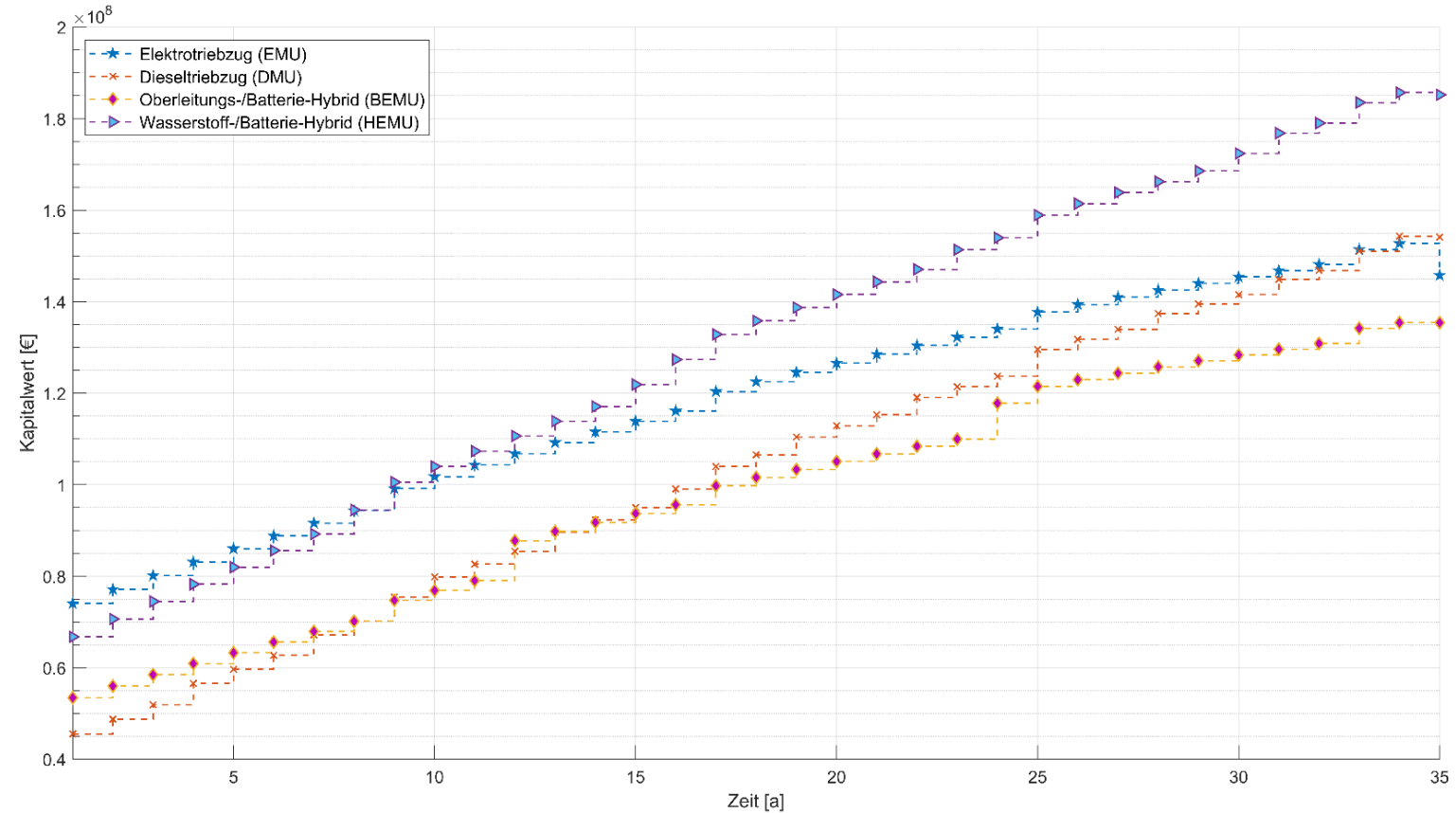
Lebenszykluskostenanalyse (LCC)

- **Investitionen** Fahrzeuge & *zusätzliche* Infrastruktur (+ ggf. Finanzierung)
→ Dimensionierung & Kalkulation zusätzlicher Infrastruktur, ggf. mit Varianten
- **Traktionsenergiekosten entsprechend Verbrauch** (abhängig von Bezugsquellen)
→ Diesel-/ H₂-Tankstelle, Oberleitung (Bahnnetz), Ladestation (Landesnetz)
→ Diesel-, Strom- und Wasserstoffkosten über Prognosen
- **Instandhaltungskosten** Fahrzeuge & *zusätzliche* Infrastruktur
 - laufende Instandhaltung
 - Hauptuntersuchungen Fahrzeuge
- **Re-Investitionen in Hochtechnologiekomponenten**
 - Batterien → Oberleitungs-/Batt.-Hybrid, Diesel-/Batt.-Hybrid, H₂-/Batt.-Hybrid
 - Brennstoffzellen → H₂-/Batt.-Hybrid
 - PowerPacks (Dieselmotoreinheit) → 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)

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



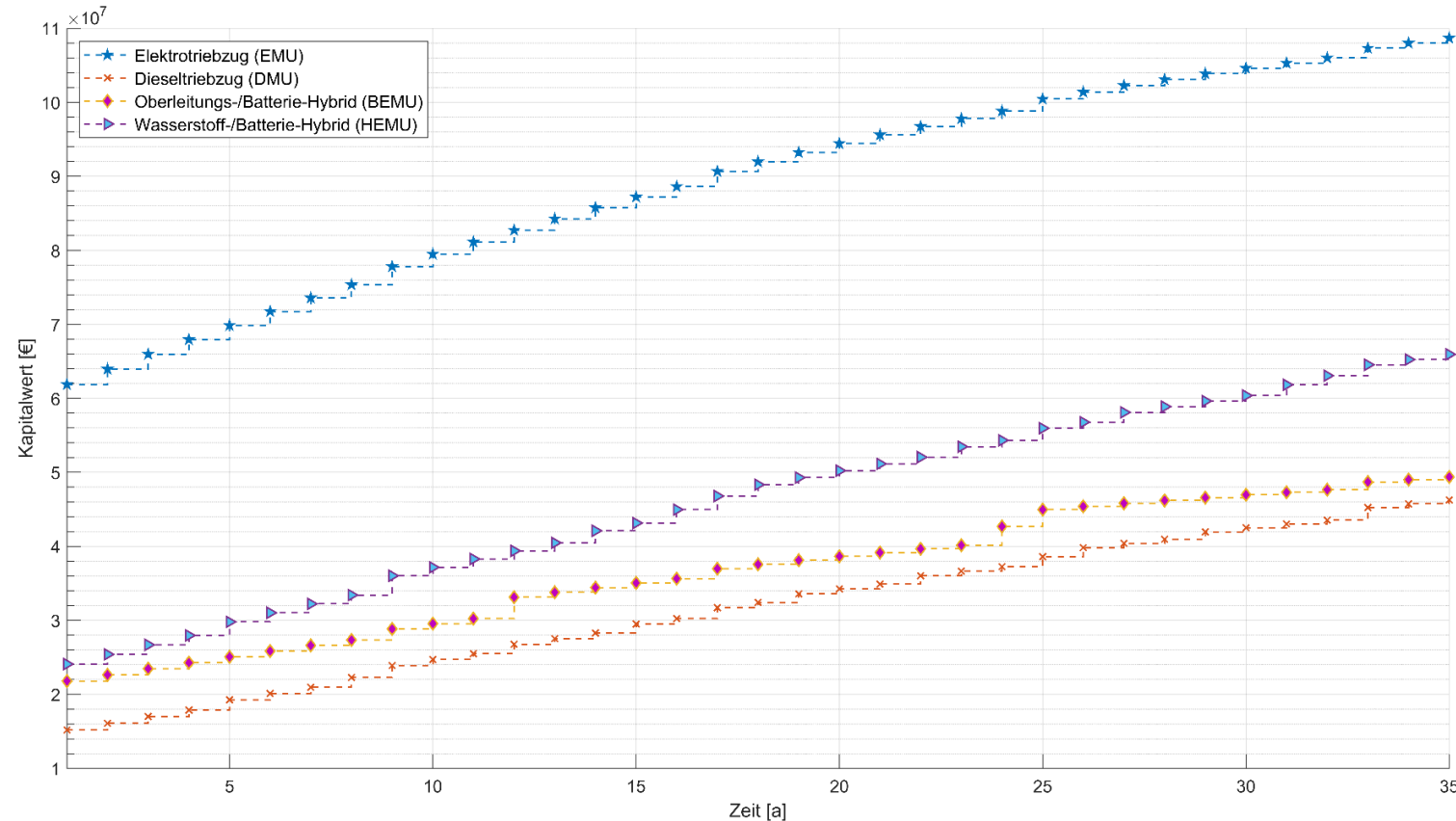
- 4. HEMU
- 3. DMU
- 2. EMU
- 1. BEMU

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

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 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.**

Erweitertes Fazit 2023



- **Oberleitungs-/ Akku-Fahrzeuge** sind eine **Ergänzungsoption** für (schrittweise) Netzerweiterungen mit guter Migrationsperspektive.
 - sinnvoll bei vorhandener (Teil-)Elektrifizierung
 - Reichweite im Akkubetrieb 60 ... 80 km
 - preiswertester Energiebezug aus vorhandener Oberleitung
 - konzeptionell sehr gut passend zur fortschreitenden Elektrifizierung, auch als Zwischenlösung
- **Brennstoffzellen-/ Akku-Fahrzeuge** sind eine **Ergänzungsoption** für (lange) Linien mit geringem Aufkommen ohne Elektrifizierungsperspektive.
 - Reichweite bis zu 1.000 km
 - **Wasserstofftanks** sind **groß / schwer** und erfordern eine Mindestfahrzeuggröße.
 - Brennstoffzellenfahrzeuge müssen in allen Anwendungsfällen **täglich betankt** werden.
 - Der Betrieb der **Brennstoffzelle** im Schienenfahrzeug benötigt eine **Dynamikbatterie**. Damit sind zwei Hochtechnologiekomponenten mit ausgeprägter **Alterung** an Bord.

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

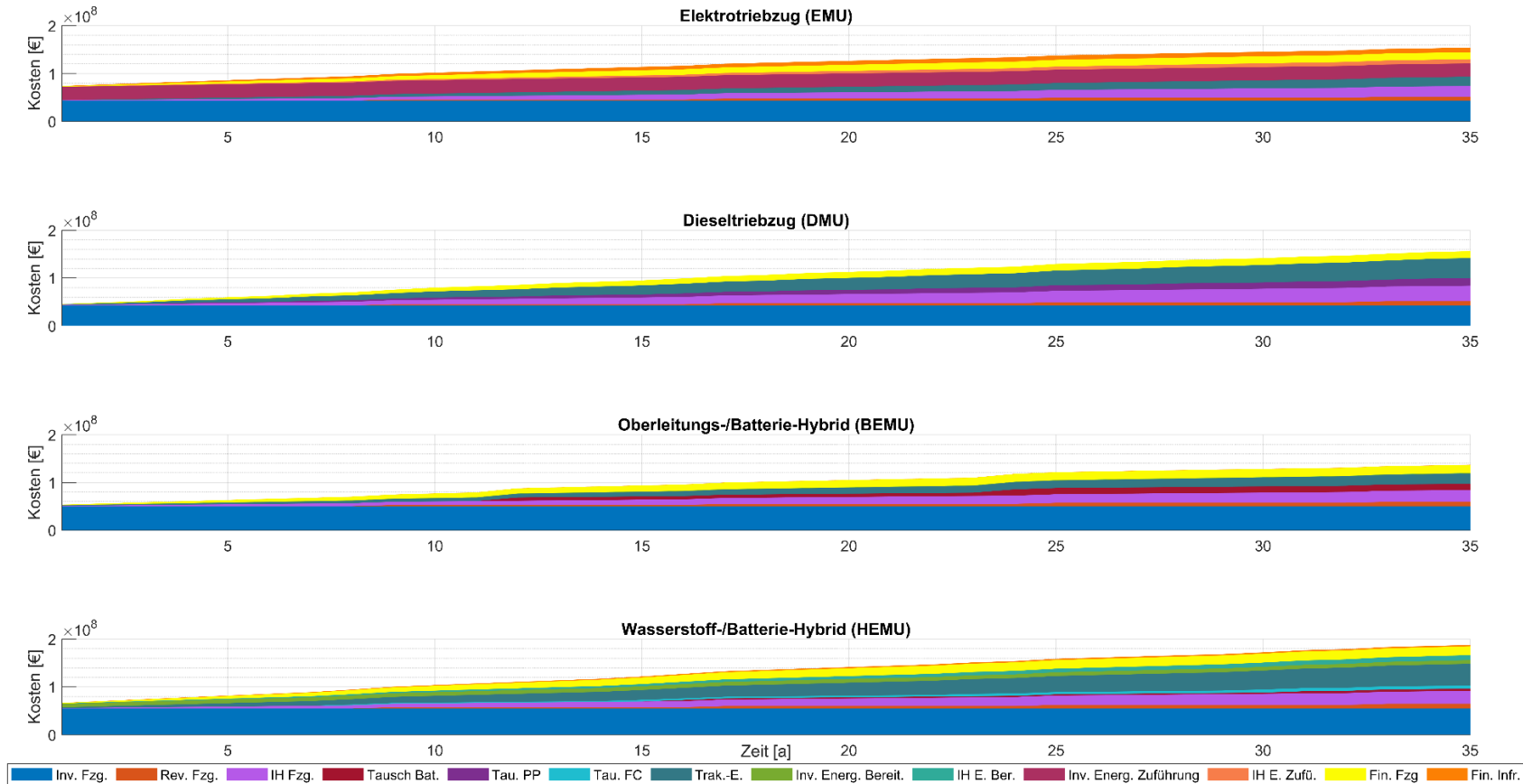


Abbildung 11:
Kostenanteile Netz A

Oder doch besser: Alternative Kraftstoffe?

Eignung

Alternative Kraftstoffe können einen Übergangspfad zur Herstellung der Kohlenstoffdioxidneutralität darstellen. Mit aktuellen Herstellungsmethoden sind die Kraftstoffe aber nicht vollständig emissionsfrei.

Übersicht

- HVO Kraftstoffe (Hydrierte Pflanzenöle) nach DIN EN 590 (Norm für die Eigenschaften von Dieseldieselkraftstoff) und somit ohne Anpassung des Motors
- Erdgas-/Wasserstoffgemisch: Anpassung oder Austausch des Verbrennungsmotors sowie der Tanks erforderlich
- PtL: Herstellung von strombasierten Kraftstoffen (Emissionsbewertung abhängig von dem jeweiligen Erzeugungsprozess bzw. der Energieerzeugung)

Grundproblem:

Die mehrfachen Energiewandlungsprozesse und der begrenzte Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors machen den **Gesamtprozess energetisch ineffizient.**

Aber: Keine andere Technologie erreicht vergleichbare Energie- und Leistungsdichten bei der Speicherung.

Verkehrssysteme: Welche Antriebe kommen zukünftig wofür in Frage?

Bahnen:

- **Elektromotoren** direkt gespeist
- **Elektromotoren** mit Speicher (Akku oder Wasserstoff)

Straßenfahrzeuge:

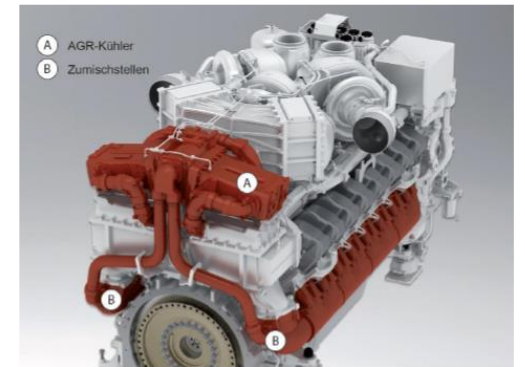
- **Elektromotoren** direkt gespeist
- **Elektromotoren** mit Speicher (Akku oder Wasserstoff)
- **Verbrennungsmotoren** mit synthetischen Kraftstoffen
- **Verbrennungsmotoren** mit Wasserstoff

Luftfahrzeuge:

- **Langstrecke: Verbrennungsmotoren** mit synthetischen Kraftstoffen
- Kurzstrecke: **Elektromotoren** mit Speicher (Akku)

Wasserfahrzeuge:

- **Hochseeschifffahrt: Verbrennungsmotoren** mit synthetischen Kraftstoffen
- Binnenschifffahrt: **Elektromotoren** mit Speicher (Akku oder Wasserstoff)



Abbildungen: © MTU