

Fachtagung Eisenbahnrecht und Technik

# *Alternative Antriebe Aber welche denn?*

*Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan, TU Dresden*

*Frankfurt am Main, 08.04.2019*



# Professur für Elektrische Bahnen

## Planung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme



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

# Warum kein Dieserverkehr mehr?

- Verringerung von CO<sub>2</sub>- und Schadstoffausstoß ...
- Lärmreduktion ...
- Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern ...
- höhere Energieeffizienz, grüne Mobilität ...

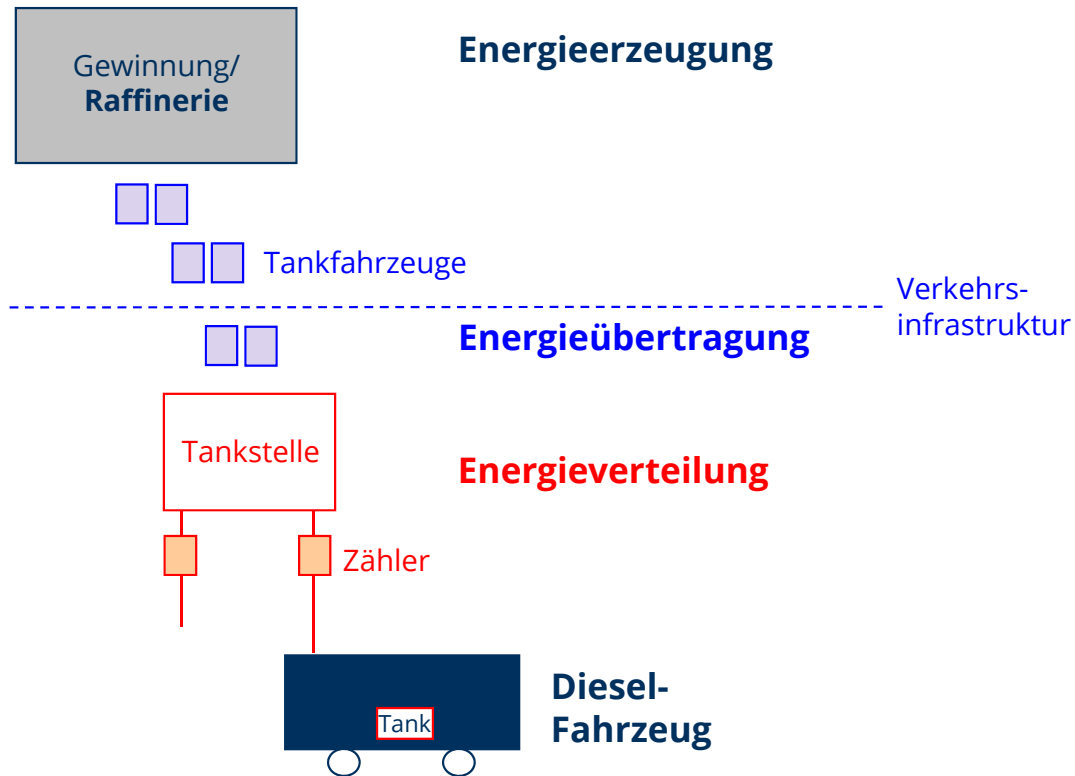


→ **Dies alles sind gesellschaftliche Ziele.**

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

- Es kann aber auch **handfeste Gründe** geben, wie z.B.
  - Dieserverbot (emissionsfreie Zonen, Tunnel)
  - lokale Lärmschutzauflagen
  - vorhandene (Teil-)Elektrifizierungen mit Ausbauoption
  - **höhere Wirtschaftlichkeit im Lebenszyklus**

# Diesel ist so schön einfach ...



## Dieselbetrieb heißt:

- kleinere Leistungen
- akzeptable Reichweiten
- **kaum eigene Infrastruktur!**



# Mediale Erwartungshaltung zur Elektromobilität ...

## Alles wird elektrisch ...

- ... Fahrräder, Mopeds, Autos, Transporter, Busse, Lkw, Schiffe, vielleicht sogar Flugzeuge ...
- ... und natürlich auch die Dieselzüge ...
- ... mit super-leistungsfähigen Batterien in unbegrenzter Menge ...
- ... und produziert aus nachwachsenden Rohstoffen, die umweltfreundlich und menschenwürdig gewonnen werden ...
- ... ohne hässliche und gefährliche Stromleitungen und Kraftwerke ...
- ... und die *Cloud* hilft dabei ganz bestimmt auch ... *irgendwie* ...

**Fazit:** Jetzt wird die Welt wirklich **ganz schnell** besser.

Soviel aus der Sendung „**Wunschkonzert**“.

# Elektroverkehr: Blick in die Vergangenheit ... (1)

## Pferdebahn → Elektrische Straßenbahn, ca. 1880 ff

- in weniger als 10 Jahren, **weltweit!!!**
- Koppelgeschäft mit Elektrizitätswerken: Straßenbahnen waren erste (und zunächst einzige) Abnehmer der Energie

### Migrationsaspekte:

- Großteil der **INFRASTRUKTUR** war mit den Gleisanlagen schon **vorhanden**
- nur geringe Weiterentwicklungen im Fahrzeugbau
- Elektrizitätswerke versprachen hohen Gewinn mit Perspektive der umfassenden Stadtelektrifizierung
- **unternehmerisches Risiko gering**
- einziger Vorbehalt: Technik musste funktionieren

### Technische Lösungen:

- Oberleitung an Häusern, Elektrizitätswerke streckennah, Fahrzeuge nachgerüstet



# Elektroverkehr: Blick in die Vergangenheit ... (2)

## Dampflokomotive → Elektrische Lokomotive, ab ca. 1910 ff

- Alles versprach, **besser** zu werden:
- Leistung, Fahrdynamik, Reichweite - ohne Nachladung/ Betankung, Energiebedarf, Instandhaltung, Verfügbarkeit, Bedienung, ...

### Migrationsaspekte:

- Nachrüstung in bestehender **INFRASTRUKTUR** an Masten mit definierter Geometrie zum Gleis
- zentrale Energieversorgung - auf Zuwachs ausgelegt
- Weiterentwicklung der Fahrzeuge (Hochphase Dampflokl!)
- **Aber:** höhere Beanspruchungen im Betrieb und landesweite **Standardisierung** der **INFRASTRUKTUR** notwendig
- Schließlich dauerte es **fast 30 Jahre**, bis es stabil war.



### Entscheidungsgrundlage zur Elektrifizierungswürdigkeit:

- brauchte keine wissenschaftliche Methodik, aber **INFRASTRUKTUR-Programme**

# Elektroverkehr: ... zurück in die Gegenwart

## Elektrifizierung von Bahnverkehren heute

- Randbedingungen und Erfolgsaussichten sind heute anders als in der Historie der Straßenbahn- und Eisenbahnelektrifizierung.
- Es geht heute hauptsächlich um Bahnstrecken mit relativ **wenig Verkehr**.
- **Konkurrent** ist dort der weltweit etablierte, antriebstechnisch vergleichsweise einfache, betrieblich hoch flexible und wirtschaftlich erfolgreiche **Dieselantrieb**. Seine betriebliche INFRASTRUKTUR: **Tankstelle und Abstellgleis**. Mehr nicht.

## Migrationsaspekte heute:

- Es wird zunächst nichts wirklich besser (wie 1880, 1910 - 1930), sondern erstmal alles **komplizierter**: technisch, betrieblich, wirtschaftlich (und ggf. sogar ökologisch – wenn wir wirklich alles betrachten).
- Ganz gleich, ob elektrische Züge mit Fahrleitungen, Batterien oder Brennstoffzellen: wir brauchen dafür neue INFRASTRUKTUR.
- Diese INFRASTRUKTUR muss in **urbane Räume** mit umfangreichen anderen Infrastrukturen (die oft kaum dokumentiert sind) integriert werden. Dort leben **Menschen**, die neuen Verkehrsinfrastrukturen grundsätzlich **skeptisch** begegnen.

**Konfliktpotenzial!**



# Elektrifizierung mit alternativen Antrieben – Überblick

## Hybrid-Antriebe mit elektrischen Energiespeichern

Projekt	Ursprung	Typ	Akkutyp	Ziele												
				el. aus Station fahren	el. im Stand	Red. Kraftstoffbedarf	Red. Emissionen	Ersatz Dieselmotor	Downsizing Dieselmotor	Spitzenlastübernahme	Red. Leerlaufzeit DM	Übergang el. - nicht el.	Wartungsarbeiten	Erweiterung Capex		
KiHa E200	D	HDMU	LI	X	X	X	X			X						
HB-E210	D	HDMU	LI	X	X	X	X									
HB-E300	D	HDMU	LI	X	X	X	X									
KiYa E991	D	HDMU	LI	X	X	X	X									
KuMoYa E995	D	HFMU	LI			X	X									
KuMoYa E995	D	BEMU	LI													
EV-E301	E	BEMU	LI													
817-100	E	BEMU	LI													
819	E	BEMU	LI													
Seibu 20000	E	BEMU	LI													
EV-E801	E	BEMU	LI													
HD300	D															
Class 379	E															
Mireo	E															
LINT 54 Bet	E															
EcoTr	E															
B																
Pla																
Tea 24			?													
Eea 935		BESL	?													
VR30C2-H		HFSL	?			X	X	X								X
VR36C2-H		HFL	?			X	X	X								X
Inno Tech Tr	D	HDMU	LI	X	X	X	X									
V-Train 2	D	HDPC	LI	X	X	X										
R291	E	FEMU	LI			X	X	X								X
Rh 5047	D	BEMU	LI					X								
DE75 BB Hybrid	D	HDSL	LI			X	X									
DE60 C Hybrid	D	HDSL	LI			X	X									
1063 Innoshunt	E	BESL	?													X

**weltweit ca. 50 Projekte**  
als Prototypen & Kleinserien



# Alternative Antriebe – Basistechnologien



## Diesel

- Dual Mode DE Triebzug
- Dual Mode DE Lokomotive
- Hybrid Batterie-Dieseltriebzug
- Hybrid Batterie-Diesel-Rangierlok
- Hybrid Batterie-Diesel-Generatorwagen



## Elektro

- Hybrid Batterie-Elektrotriebzug
- Hybrid Batterie-Elektro-Rangierlok
- Hybrid Batterie-Elektro-Lokomotive

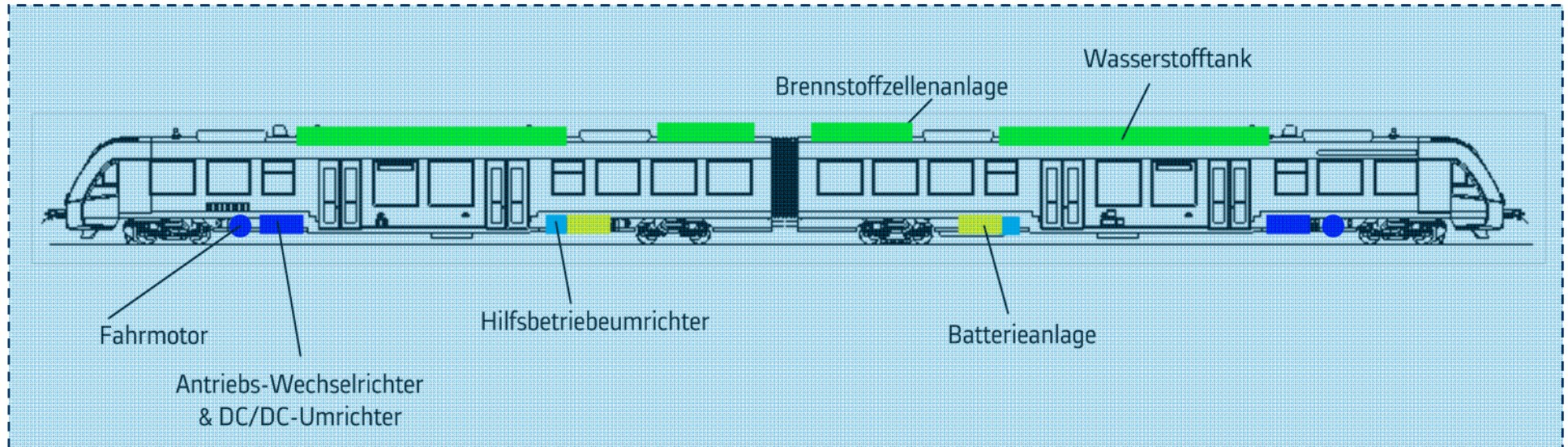


## Wasserstoff

- Hybrid Fuel Cell Triebzug
- Hybrid Fuel Cell Rangierlok
- Hybrid Fuel Cell Elektrotriebzug
- Hybrid Fuel Cell Lokomotive

# Alternative (Hybrid-)Antriebe

## Beispiel 1: *Coradia iLINT* von Alstom – Systemkonzept



Darstellung: **ALSTOM**

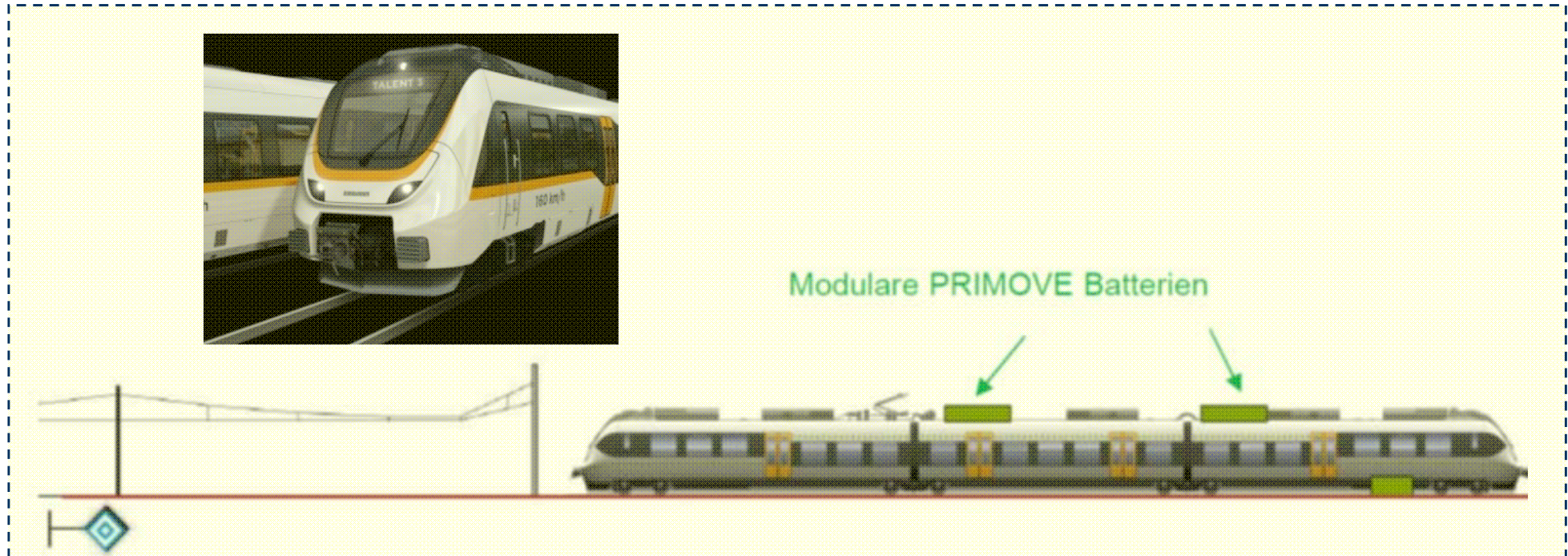
### Brennstoffzellen-/ Batterie-Hybrid

- Elektrischer Antrieb
- Energiebereitstellung durch fahrzeugseitige **Brennstoffzelle**  
→ spezielle Wasserstoff-Tankstellen
- Zwischenspeicher mit **Li-Ionen-Batterien**
  - für Leistungsspitzen beim Beschleunigen und Rekuperation beim Bremsen
  - Batterienachladung aus Brennstoffzelle und Rekuperation



# Alternative (Hybrid-)Antriebe

## Beispiel 2: *Talent 3 BEMU* von Bombardier – Systemkonzept



Darstellung: **BT**

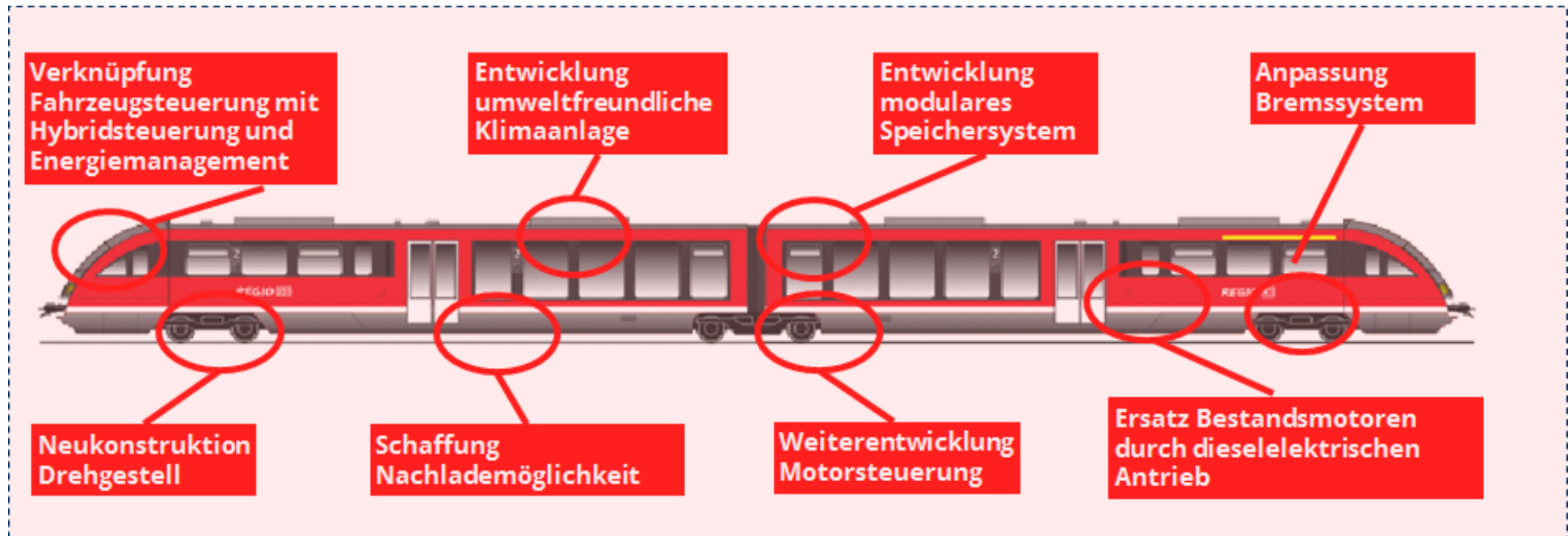
### Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid

- Plattformfahrzeug Talent 3 für Oberleitungsbetrieb
- zusätzliche Energiespeicher mit **Li-Ionen-Batterien**, Reichweite 40 km regulär
- Nachladung aus Oberleitung über Pantograph – während der Fahrt und im Stand
- Betrieb mit 16,7 Hz und 50 Hz möglich



# Alternative (Hybrid-)Antriebe

## Beispiel 3: *EcoTrain* von DB RegioNetz – Systemkonzept



Darstellung: *DB Regio*

### Diesel-/ Batterie-Hybrid mit Ausbauoption zum E-Hybrid

- Bestandsfahrzeug BR 642: Umrüstung auf elektrischen Antrieb
- Energiebereitstellung durch Diesel+Generator und **Li-Ionen-Batterien**
- Externe Nachladung über Kabel+Stecker (Depot) und Pantograph (Betrieb)
- zahlreiche neue Komponenten (Drehgestell, Powerpack, Klimaanlage, ...)

# Pro-Argumente der Protagonisten ... **alle richtig!**

## ➤ **Brennstoffzellen-/ Batterie-Hybrid *iLINT*:**

sofort NO<sub>x</sub>-frei, keine Oberleitung, effiziente Speicherung in H<sub>2</sub>,  
regenerative Energiequellen zur H<sub>2</sub>-Erzeugung zukünftig nutzbar  
→ Sektorkopplung

## ➤ **Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid *Talent 3*:**

Leistungsstarkes Plattformfahrzeug, elektrisches Fahren unter Ober-  
leitung, Überbrückung von Elektrifizierungslücken bis 40 km  
→ passt zur fortschreitenden Elektrifizierung

## ➤ **Diesel-/Batterie-Hybrid *EcoTrain*:**

Umrüstung von Bestandsfahrzeugen mit bahnerprobten Komponenten,  
vorhandene Tanklogistik, Nutzung der Oberleitung zum Laden  
→ Perspektive E-Hybrid

# Einschätzung der Marktreife

- Aktuell stehen
  - Brennstoffzellen-/ Batterie-Hybrid
  - Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid
  - Diesel-/ Batterie-Hybridvor der ersten Markteinführung.
- Es gibt derzeit in Deutschland aber
  - nur ein zugelassenes Fahrzeug (Ziel: weitere 2019/ 2020),
  - kaum Erfahrungen im Alltagsbetrieb,
  - keine professionelle Infrastruktur für Betankung/ Nachladung.
- **Alle Hybridtechnologien stehen und fallen mit dem elektrischen Energiespeicher **Li-Ionen-Batterie**.**

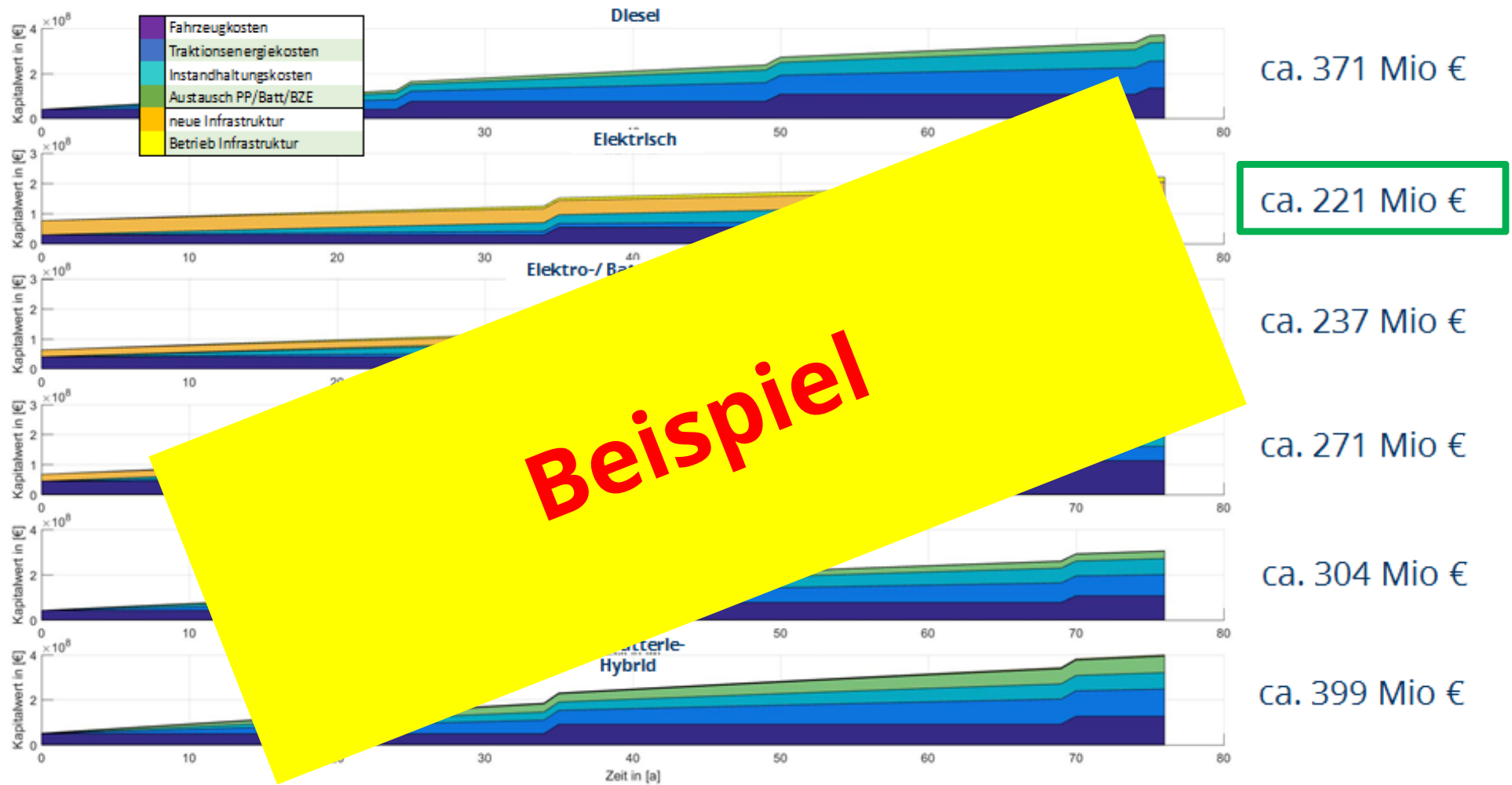
# Was ist außer dem Fahrzeug noch zu berücksichtigen?

- Aufbau einer bahntauglichen Nachlade-Infrastruktur (Strom, H<sub>2</sub>)  
*technisch, **betriebl**ich und kommerziell*
- Komplexere Instandhaltung (WER macht das?)
- Integrierbarkeit regenerativer Energiequellen (!)
- **Geschäftsmodelle** für Nachlade-/ Tankinfrastruktur
- Technische **Regelwerke** für Bahninfrastrukturanlagen (DB Netz)
- System-/ Komponenten-**Zulassungen** für Bahnanlagen (EBA / ERA)
- Perspektiven der weiteren Streckenelektrifizierung
- Ausrollen in die Fläche → **Migrationskonzept**



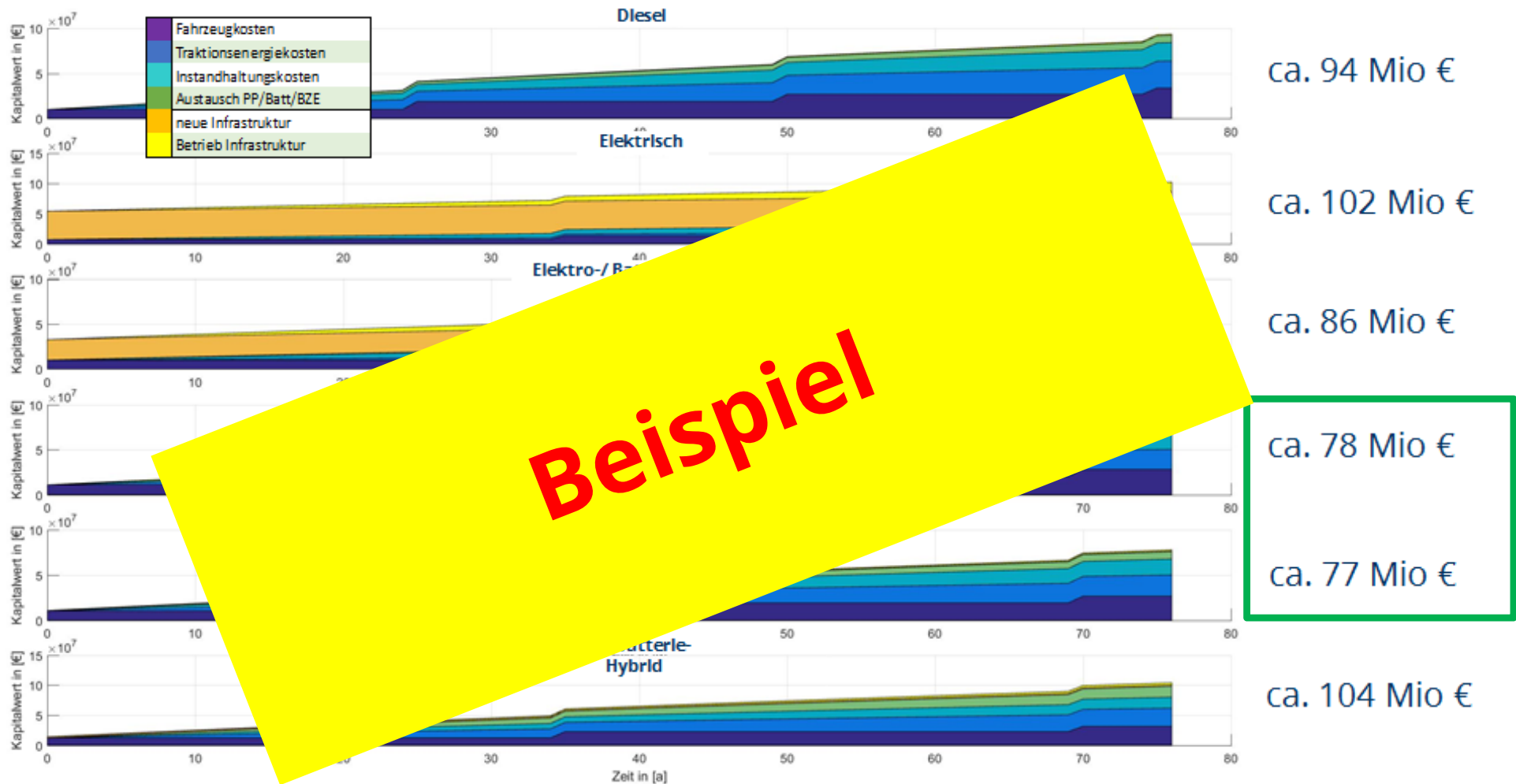
# Elektrifizierungswürdigkeit – Was eignet sich wofür?

## LCC – Kapitalwertverläufe (Bsp.: RE, 30-min-Takt, 50 % schon elektrifiziert)



# Elektrifizierungswürdigkeit – Was eignet sich wofür?

## LCC – Kapitalwertverläufe (Bsp.: RE, 2-h-Takt, 50 % schon elektrifiziert)



# Erkenntnisse aus LCC-Analysen – Was eignet sich wofür?

## Hybridantriebe:

- Hybride können schon heute wirtschaftlicher sein als Dieselfahrzeuge.
- Bei vorhandener Teilelektrifizierung mit Ausbauoption sind OL-/ Batterie-Hybridfahrzeuge wirtschaftlich und betrieblich vorteilhaft.
- Ohne Elektrifizierungsperspektive sind Diesel-/ Batterie-Hybride wirtschaftlich, wenn an Endpunkten (und Zwischenhalten) aus der Oberleitung nachgeladen werden kann.
- Wasserstoff (mit Sektorkopplung) ist eine Option für längere Strecken mit geringerem Aufkommen und ohne Elektrifizierungsperspektive.

## Elektrifizierungswürdigkeit

- Bei Taktverkehren häufiger als 1-h-Takt (Regio) lohnt sich langfristig immer die Elektrifizierung. Die Bahnstrom-Infrastruktur steht dann auch für andere Verkehre (Cargo, Fernverkehr, Umleiter) zur Verfügung.
- Für den weiteren Netzausbau ist ein Konzept mit „Teilelektrifizierung“ (keine Lücken > 40 km ...) für den leichten Regionalverkehr sinnvoll.
- Für Güterverkehrsstrecken ist die durchgängige Elektrifizierung geboten.

# Was fehlt in aktuellen Bewertungsverfahren?

## Abbildung rechtlicher und gesellschaftlicher Themen:

- **Migrationsaspekte:**

- planungsrechtliche Hürden - Genehmigungs- und Umsetzungszeiten
- Abhängigkeiten von bzw. technisches Konfliktpotenzial mit anderen Infrastrukturen
- Rückfallebenen bei Technologie- und Verfügbarkeitsproblemen

- **Perspektiven der Raumentwicklung:**

- Elektroverkehre brauchen (teure) Infrastrukturen in der Fläche.
- Die Investitionen erfordern eine lange Nutzung.
- Mit elektrischen Verkehrssystemen betreibt man langfristige Stadt- und Raumentwicklung.
- Vergabezeiträume von wenigen Jahren sind hierfür kontraproduktiv.



# Was fehlt in aktuellen Bewertungsverfahren?

## Wirtschaftliche und ökologische Aspekte:

- **ökonomische Bewertung** über den **gesamten Lebenszyklus** – dabei: Festlegung realistischer Nutzungs- bzw. Abschreibungsdauern
- **differenzielle Sachbilanz**: Welche heutigen Materialien werden zukünftig wodurch ersetzt, wo entstehen ggf. Engpässe?
- **Ökologische Bewertung** nicht nur für die Betriebsphase, sondern inklusive Herstellung, Bau und Entsorgung

## Grundsätzlich bleibt der Widerspruch:

gesellschaftlich gewünschte langfristige ökologische Effekte  
*versus*  
kurzfristige wirtschaftliche Erfolge

# Zum Schluss ...

- Die Grundrichtung „Mehr Elektroverkehr“ ist absolut richtig. Davon kann vor allem die Schiene profitieren.
- Aktuell besteht die Gefahr, dass viele proprietäre Lösungen entstehen.  
(... für jede Strecke ein spezielles Fahrzeug mit spezifischer Infrastruktur ...)
- **Elektroverkehr ist immer ein INFRASTRUKTUR-Thema!**  
(... ganz gleich ob mit Oberleitung, Nachladung, Betankung/ Distribution).
- **INFRASTRUKTUR** heißt: **langfristiger** Planungs- und Finanzierungsvorlauf.  
Und meist auch: öffentliche Mitsprache.
- Hinsichtlich der Rechtssicherheit für Errichtung 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.

# Kontakt

**Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan**

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

**Hettnerstr. 1-3  
Raum POT 253/ 254  
01062 Dresden**

**Tel: +49 (0) 351 463-36730**

**Fax: +49 (0) 351 463-36825**

**E-Mail: [arnd.stephan@tu-dresden.de](mailto:arnd.stephan@tu-dresden.de)**

**[www.E-Bahnen.de](http://www.E-Bahnen.de)**

