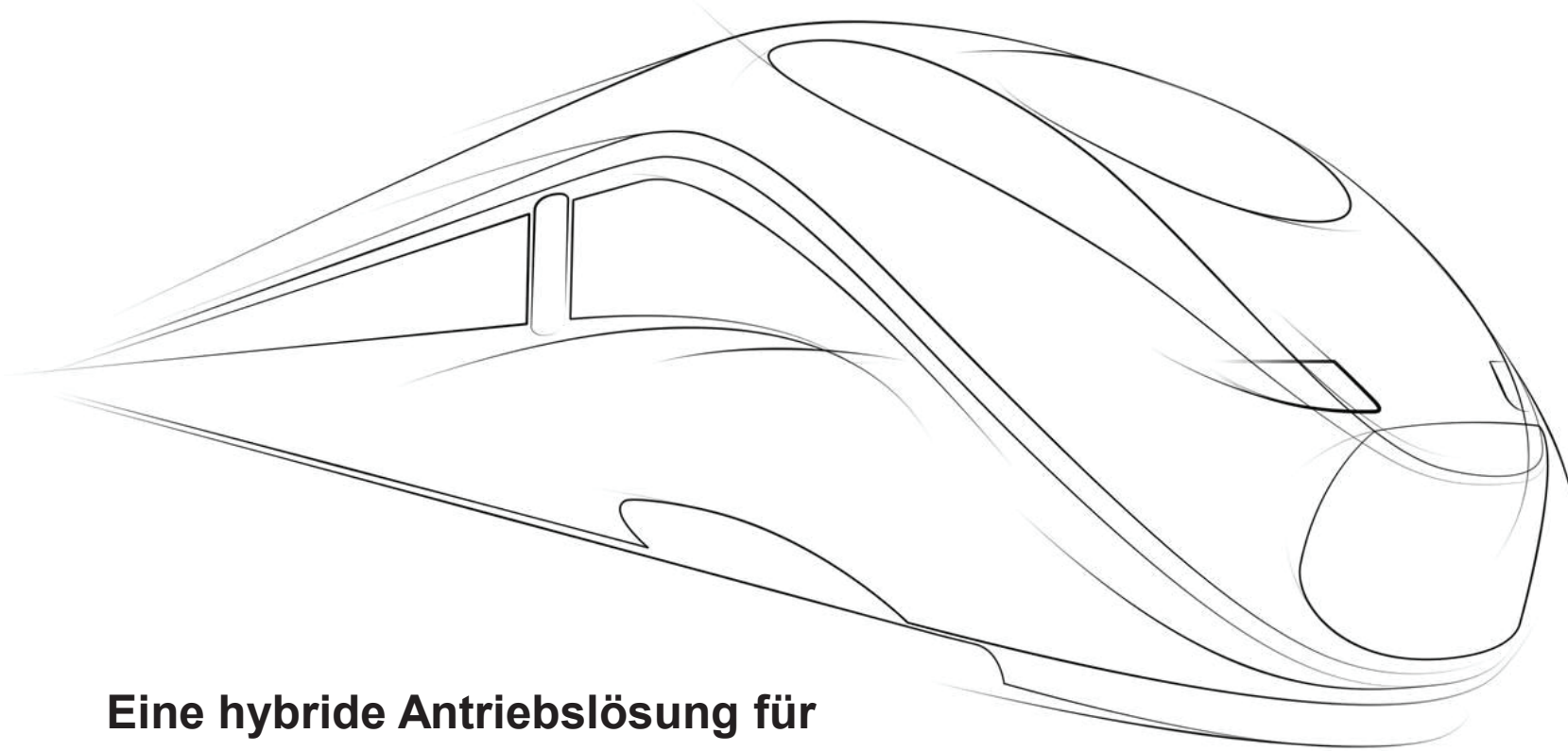


## **A PASSION FOR RAILWAY SOLUTIONS**



**Eine hybride Antriebslösung für  
eine Elektro-Verschublok mit Akkus als Energiespeicher**

**M. Hofer, C. Peer, J. Kometer (Molinari Rail Austria GmbH)**

**43. Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“, Graz, 3. – 6. April 2016**

## **1. Molinari Rail**

## **2. Projektvorstellung**

### **2.1. Lastkollektiv**

### **2.2. Auswahl Akku-Technologie**

### **2.3. Kostenvergleich Akku**

### **2.4. Elektrische und mechanische Integration**

## **3. Zusammenfassung und Ausblick**

# Molinari Rail

## Kompetenzen und Leistungen



### Consulting

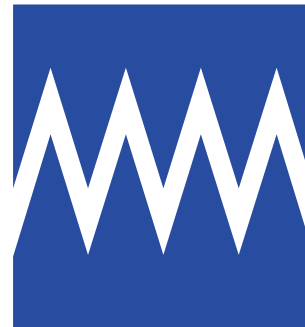
Ausschreibungs- & Angebotsunterstützung  
Markt- und Machbarkeitsstudien  
Exportunterstützung  
Flotten- & Werkstätten-Management  
Audits von Werkstätten  
Bauüberwachung

### Analysis

Machbarkeitsstudien und Optimierung  
Festigkeitsnachweise  
Crash Analyse  
Versuchsplanung und -Evaluation  
Schweissanalyse  
Simulation von Fahrzeugdynamik

### Engineering

Entwicklung von Schienenfahrzeugen  
Systemengineering  
Mechanische und elektrische Systemintegration  
Schemaerstellung  
RAMS & LCC-Analysen  
Anforderungsmanagement



**MOLINARI**

### Systems

Komplette Subsysteme  
Generatorsets, Schwenktritte  
Crash Komponenten  
Werkstatt Infrastruktur  
Werkstatt- und Herstellungsequipment  
Technologietransfer

# **Inhalt**



## **1. Molinari Rail**

## **2. Projektvorstellung**

### **2.1. Lastkollektiv**

### **2.2. Auswahl Akku-Technologie**

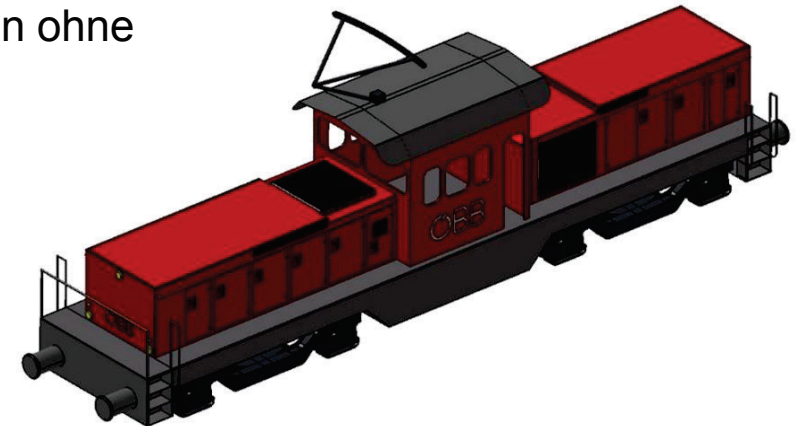
### **2.3. Kostenvergleich Akku**

### **2.4. Elektrische und mechanische Integration**

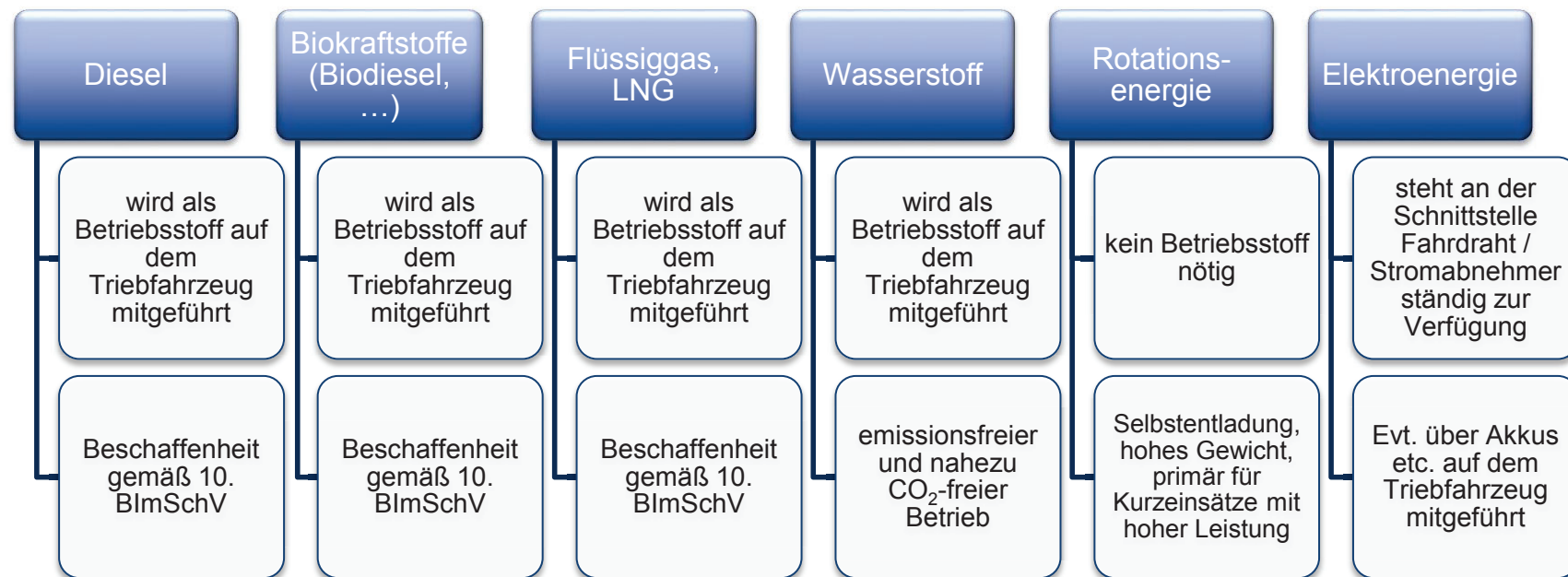
## **3. Zusammenfassung und Ausblick**

## Projektbeschreibung:

- „Machbarkeitsstudie des Umbaus einer E-Verschublok des Typs 1063 der ÖBB zum temporären Betrieb auf Nebengleisen ohne Oberleitung“
- Projekt gefördert durch die österreichische Forschungsförderungs-Gesellschaft (FFG)
- Anforderungen:
  - Im Betrieb mit Hilfsenergie:
    - ca. 200 kW Leistung
    - ca. 200 kWh Energie (Ausgang Batterie)
  - Bei Projektende muss die Lok wieder rückgebaut werden (können).
  - Der Energiespeicher muss unter Fahrdrabt aufladbar sein.



# Mögliche Energieträger



10. BImSchV ... Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Deutsches Recht  
Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen

# Definition Hybrid- und Zweikraft-Schienenfahrzeuge



## Definition Hybrid-Schienenfahrzeug

Werden an Bord des Schienenfahrzeuges zwei voneinander unabhängige Energiespeicher mitgeführt, dann wird von einem Hybrid (oder auch Hybridelektro)-Schienenfahrzeug gesprochen.

siehe ETR, Nr. 10 Oktober 2014, S. 32

## Definition Zweikraft-Schienenfahrzeug

Diese Schienenfahrzeuggattung zeichnet sich durch den Bezug der Traktionsleistung aus zwei unterschiedlichen Energiequellen aus, wobei meist nur eine an Bord des Fahrzeuges mitgeführt wird.

siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Zweikraftlokomotive>

# Projektvorstellung

## Vor- und Nachteile vorhandener Lok-Systeme



### Elektro-Lokomotiven

- Vorteile
  - Hohe Leistung
  - Lange Lebensdauer
  - Hohe Zuverlässigkeit
  - Geringe Wartungskosten
  - Geringe Lärm- und Luftbelastung
- Nachteile
  - Auf Nebenstrecken ohne Elektrifizierung nicht einsetzbar

### Diesel-Lokomotiven

- Vorteile
  - Auf elektrifizierten und nicht elektrifizierten Strecken einsetzbar
- Nachteile
  - Mäßige Leistung
  - Hohe Lärm- und Luftbelastung
  - Hohe laufende Kosten

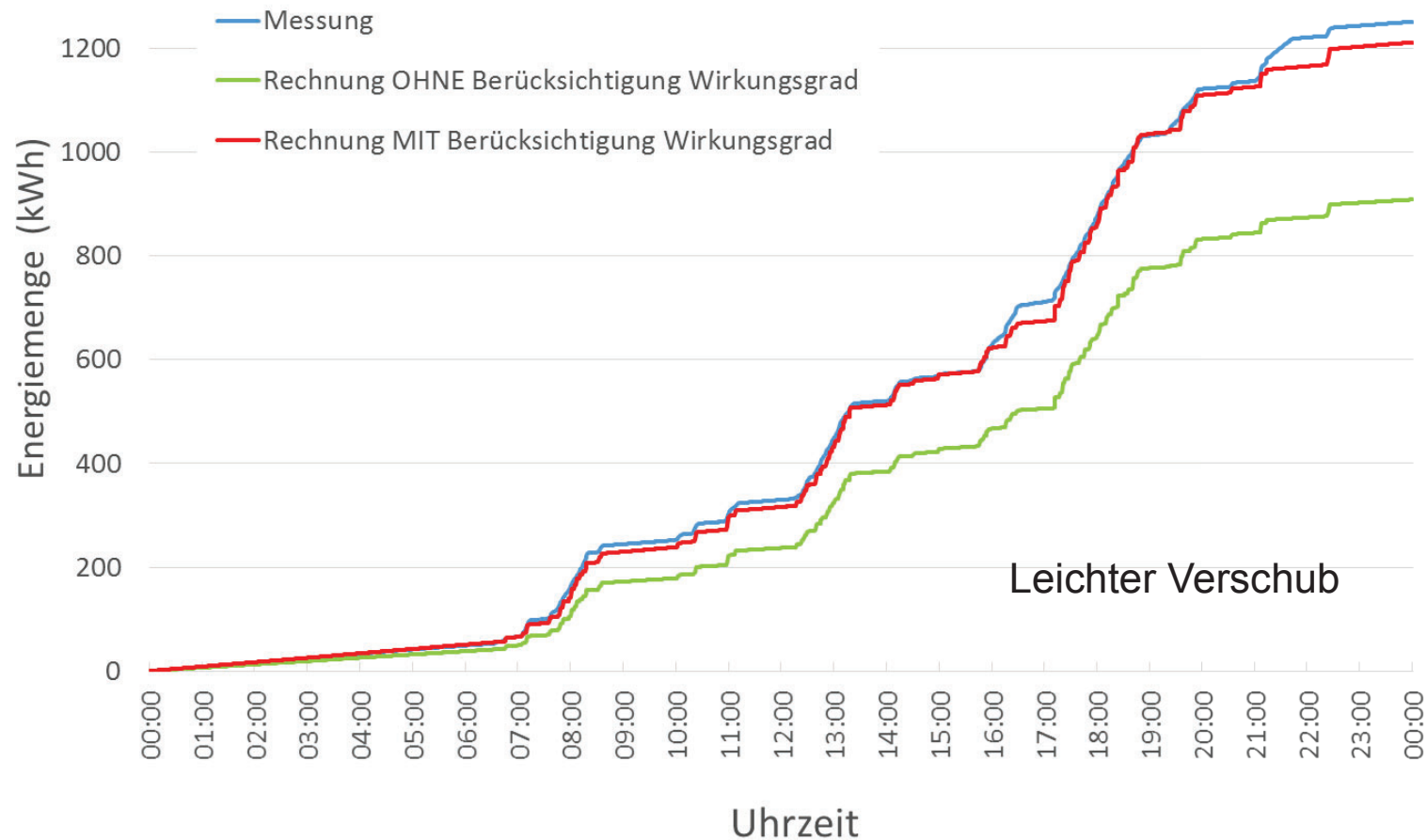
### Zusammenführung der Vorteile

**Integration eines Akkusystems in eine bestehende Elektrolok**

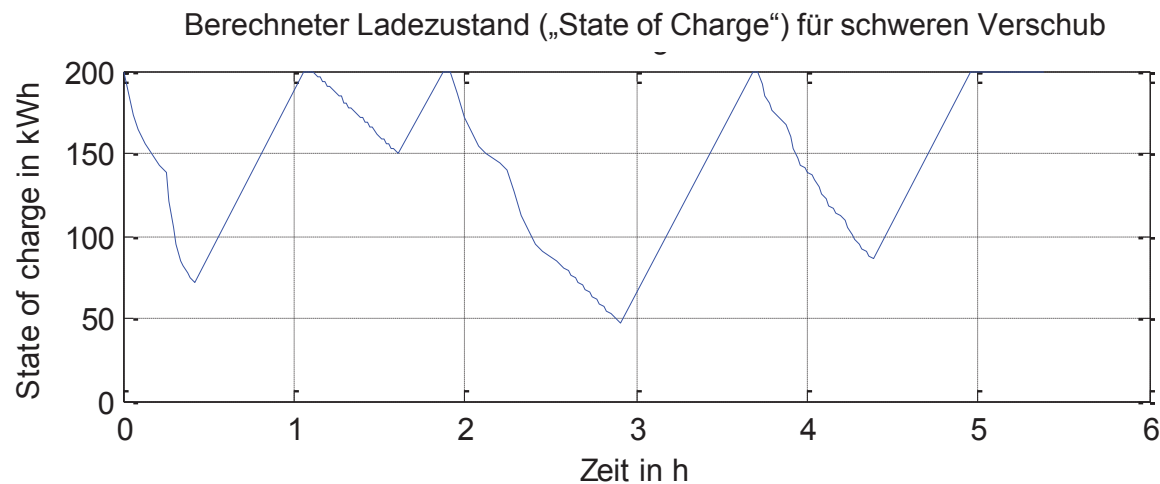


## Lastkollektiv <sup>1</sup>

- Datenanalyse: Zusammensetzung des Lastkollektivs aus verschiedenen, realen Einsatz-Szenarien



- Vorgaben
  - Streckenprofile sind gegeben und wurden der Berechnung zu Grunde gelegt
  - Limitierte Geschwindigkeit im Verschubbetrieb
  - Extreme Leistungsspitzen wurden aus dem Kollektiv entfernt.
- Energiebedarf
  - Die Vorgaben wurden mit einem detaillierten Akku-Modell für jedes einzelne Szenario berechnet.
  - Ca. 200 kWh Akkukapazität werden für das anspruchsvollste Streckenprofil benötigt.



### Lastkollektiv

- Schwerer Verschub
  - 3 Tage / Woche
  - Verschub-Geschwindigkeit ca. 8 km/h
  - Steigung mit max. Neigung und voller Länge der gemessenen Steigungen
  - 2x Anfahren unter voller Last je Steigung
  - Rest der Zeit ist Stillstand
- Leichter Bahnhofs-Verschub (Personenwagen-Verschub)
  - 4 Tage / Woche
  - Aus gemessenem Bahnhofs-Verschub

# Auswahl Akku-Technologie

## Übersicht



### Energiedichte allgemein

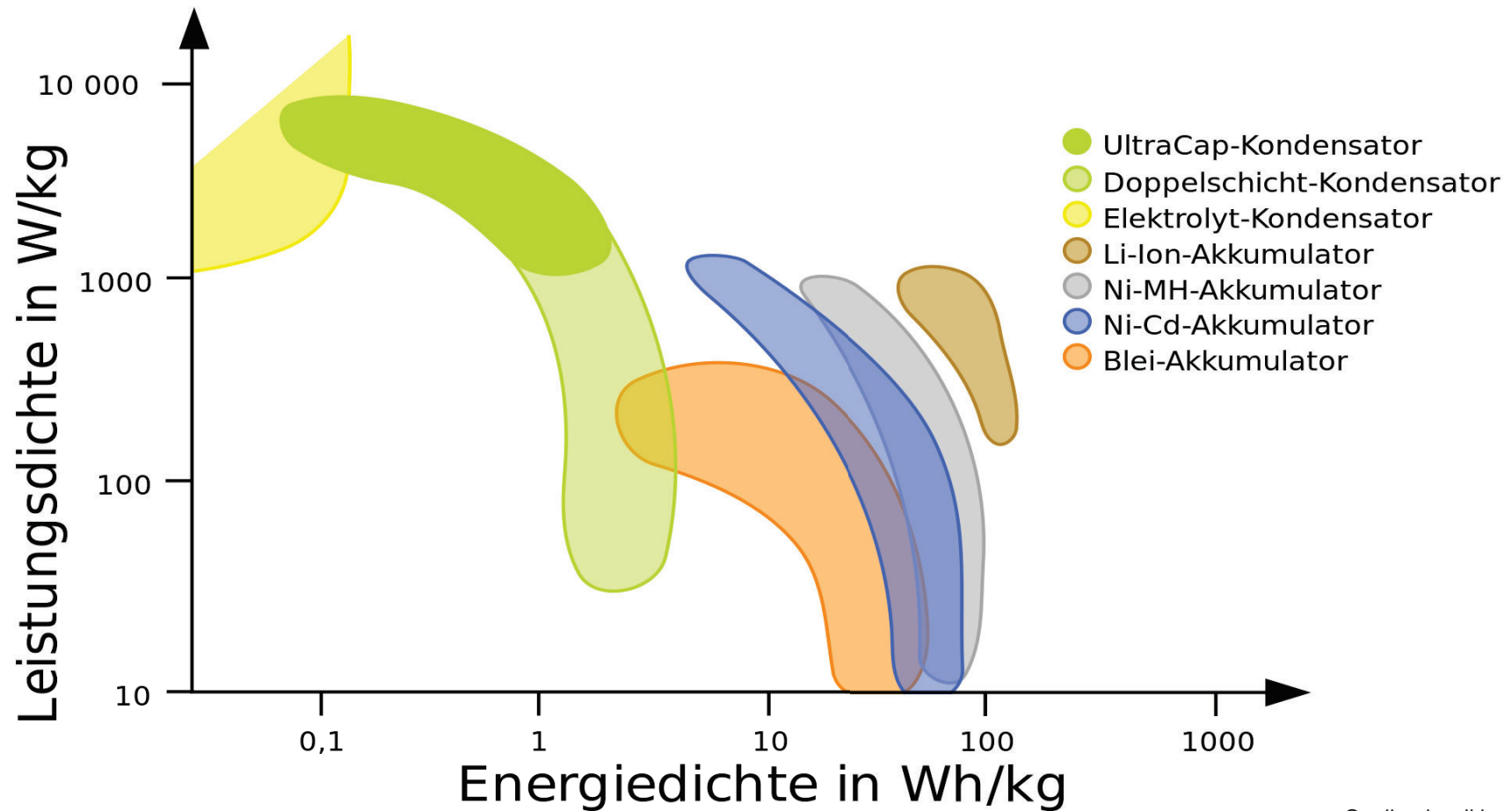
- Flüssige Kraftstoffe
  - Ca. 7.000 bis 10.000 Wh/l
- Gasförmige Kraftstoffe
  - Ca. 1.000 Wh/l (Wasserstoff @35 MPa)
  - Ca. 3.000 Wh/l (Wasserstoff aufnehmende Legierungen)
  - Ca. 2.000 Wh/l (CNG @ 20 MPa)
- Akkus
  - Ca. 50 bis 300 Wh/l
- Kondensatoren
  - Bis ca. 1,5 Wh/l

### Zusätzliche Einschränkungen

- Temperaturbereich für Laden und Entladen
- Zyklenfestigkeit
- Kosten

# Auswahl Akku-Technologie

## Zusammenhang Leistungs- und Energiedichten



Quelle: de.wikipedia.org

# Auswahl Akku-Technologie

## Energiedichte auf Zellebene

### Technologie-Vergleich / Literatur

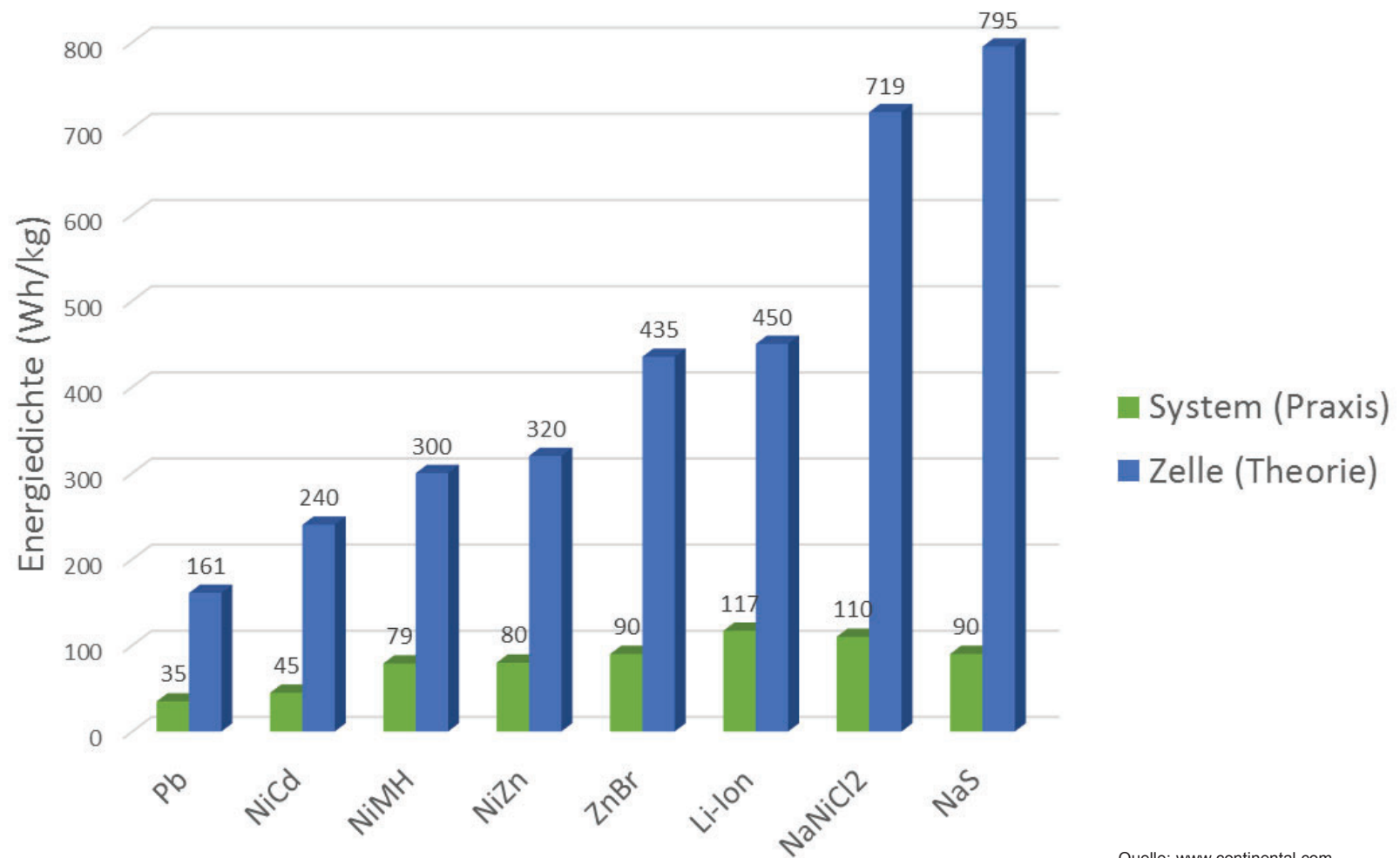
	Einheit	Pb	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Polymer
Energiedichte Volumetrisch	Wh / l	70	180	300	350	270
Energiedichte Gravimetrisch	Wh / kg	35	50	70	140	150
Nominal-Spannung je Zelle	V	2,0	1,2	1,2	3,2 – 3,7	3,5 - 4,3
Betriebs-Temperatur	°C	-20 / 45	-40 / 60	-20 / 50	Entladen: -10/+50 Laden: +5/+45	+10/+60

### Massen-Abschätzung

	Einheit	Pb	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Polymer
Masse	t	5.7	4	2.8	1.4	1.33
Bauraum	m <sup>3</sup>	2.8	1.1	0.7	0.6	0.75

# Auswahl Akku-Technologie

## Vergleich Zell- und Systemebene <sup>1</sup>



Quelle: [www.continental.com](http://www.continental.com)

# Auswahl Akku-Technologie

## Vergleich Zell- und Systemebene <sup>2</sup>

### ▪ Li-Ionen Zelle

- Energiedichte:
  - 200 - 250 Wh/l
  - 100 -140 Wh/kg

> -50 %

### Li-Ionen System

- Energiedichte:
  - < 90 Wh/l
  - ca. 100 Wh/kg

### ▪ Abschätzung Zelle

- 0.6 m<sup>3</sup>
- 1.4 t

> +50 %

### ▪ Abschätzung System

- > 2.2 m<sup>3</sup>
- > 2 t



## Kostenvergleich Akku Annahmen



- Lokomotive
  - ca. 20 Jahre Restlebenszeit zu erwarten (evt. Ausmusterung von Diesel-Lokomotiven)
- Akku
  - 2.500 bis 4.000 Zyklen möglich (80% Entladung)
  - Ca. 6 Jahre (bei ca. 80% Restkapazität)
  - Austausch gegen leistungsfähigere Systeme (neue Entwicklungen) möglich
- Stromrichter
  - Lebenszeit ca. 25 bis 30 Jahre
  - Lebenszeit Zusatzkomponenten (Lüfter, Pumpen) ca. 15 Jahre

# Kostenvergleich Akku

## Vergleich der Kosten zur Automobilindustrie



### Akku mit Bahnzulassung

- ca. 300.000 € / 200 kWh = 1.500 € / kWh

### Bekannte Beispiele aus der Automobilindustrie

- Nissan Leaf: 12.000 € / 24 kWh = 500 € / kWh
- Tesla Modell S: 35.000 € / 85 kWh = 410 € / kWh
- Literaturwert: 300 € / kWh bis 400 € / kWh

**Starke Preisunterschiede bei ähnlichen Anforderungen**



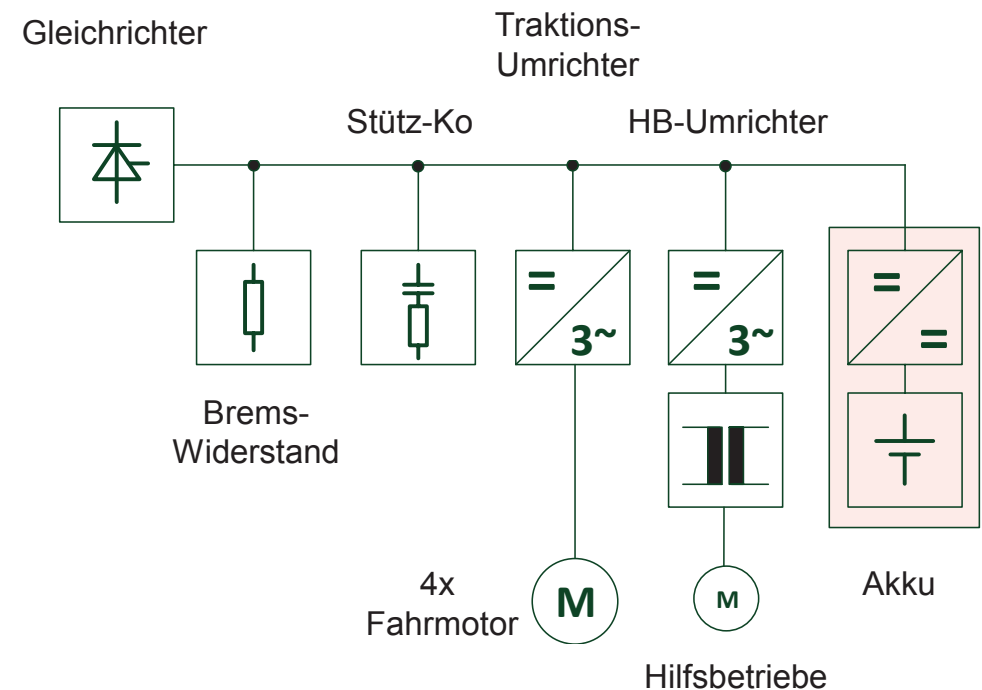
**Kostenreduktion zu erwarten**

# Elektrische und mechanische Integration

## Konzept Elektrik

- hohe Modularität gefordert
- Kein Eingriff in das bestehende Lokomotiv Kontroll-System nötig  
→ nur eine “überlagerte” Steuerung
- Spannungs-Niveaus
  - Zwischenkreis Spannungen typisch zwischen 1200 V to 1400 V
- Akku-Pack
  - Bis zu 799 V Nominal-Spannung
  - 6 Jahre berechnete Lebensdauer

### DC-Zwischenkreis



# Elektrische und mechanische Integration

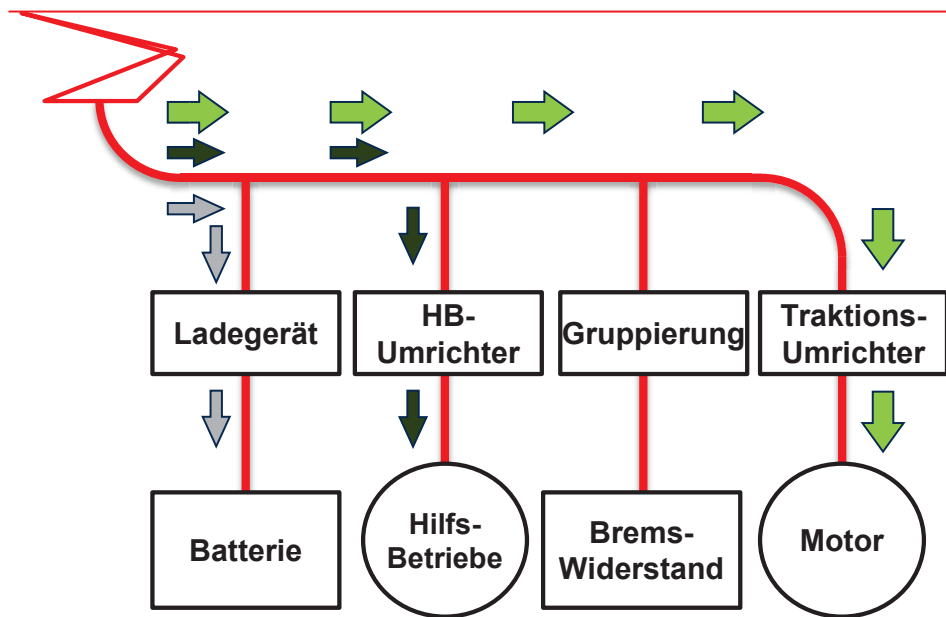
## Betriebs-Modi <sup>1</sup>



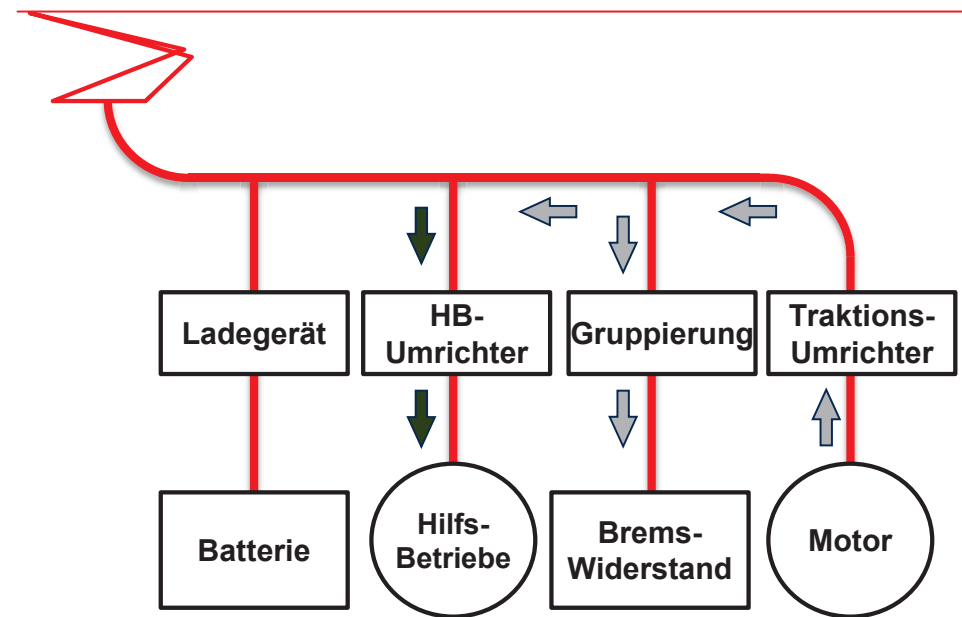
Keine Rekuperation:

- Nur geringe Ladeströme im Verhältnis zur Kapazität („C-Rate“) möglich
- Vereinfachung des Systems bei voller Modularität

### Traktion / Oberleitung



### Bremsen / Oberleitung



# Elektrische und mechanische Integration

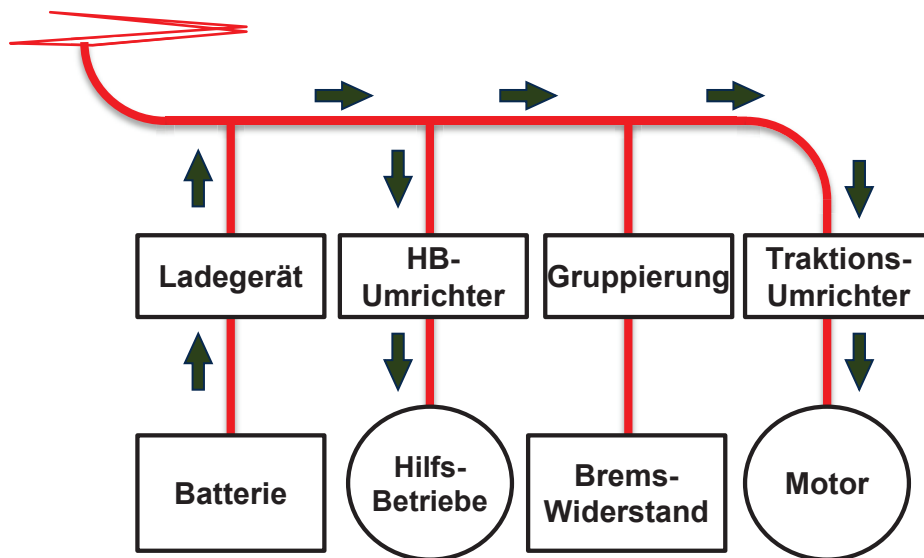
## Betriebs-Modi <sup>2</sup>



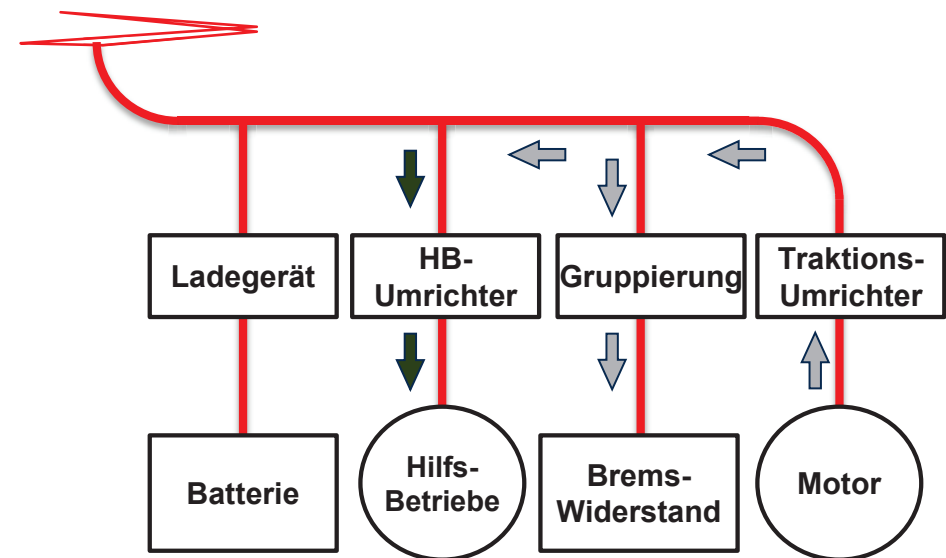
Keine Rekuperation:

- Nur geringe Ladeströme im Verhältnis zur Kapazität („C-Rate“) möglich
- Vereinfachung des Systems bei voller Modularität

### Traktion / Akku



### Bremsen / Akku



# Elektrische und mechanische Integration Bauraum



Bauraum

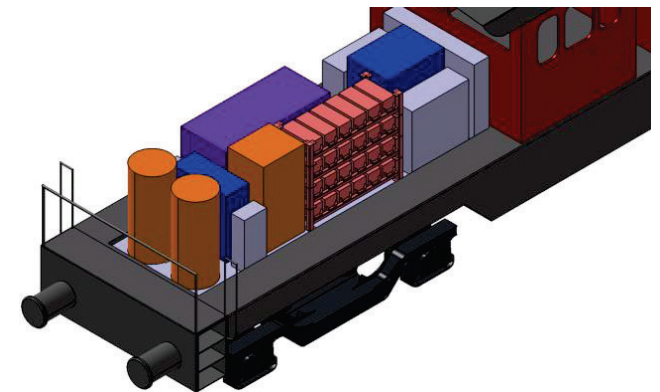
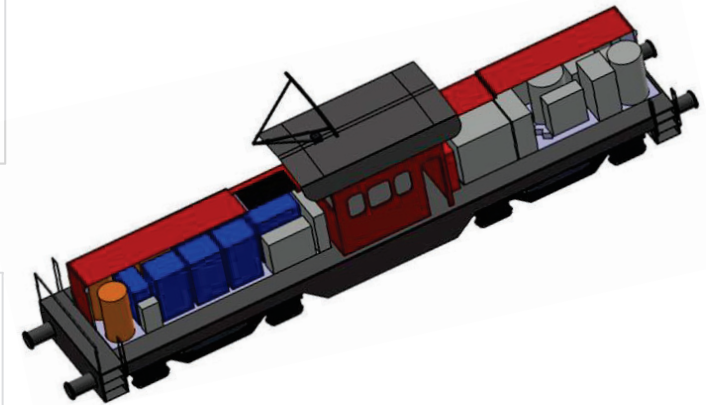
Stromrichter

Integration

- Freier Bauraum minimal
- Optimierung der Geräteanordnung

- Modernisierung von alten Systemkomponenten
- Wassergekühlter Stromrichter notwendig
- DC/DC-Steller im System integriert

- 2.2 m<sup>3</sup> Bauraum (verteilt) verfügbar
- Leistungsreduktion auf ca. 1 MW mit Oberleitung bei ca. 200 kW im Akkubetrieb zulässig
- Gesamtmasse der Lok wird nicht erhöht.



# Elektrische und mechanische Integration

## Änderung Gesamtmasse



Status

Erlaubte  
Abweichung

Neues  
System

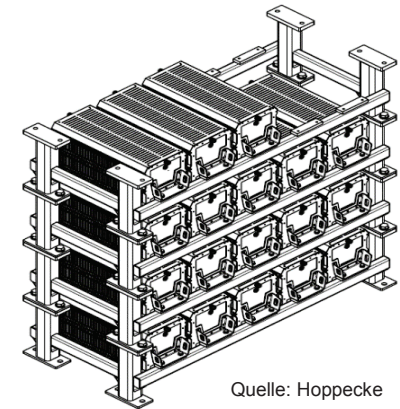
- Masse 4x Umrichter: 4 x 865 kg
- Masse Hilfs-Umrichter: 432 kg

- Änderung Gesamtmasse (lt. VgEV) < 10%
- Erhöhung stat. Radsatzlast < 1,5 to
- Kein Eingriff in sicherheitsrelevante Steuerungen

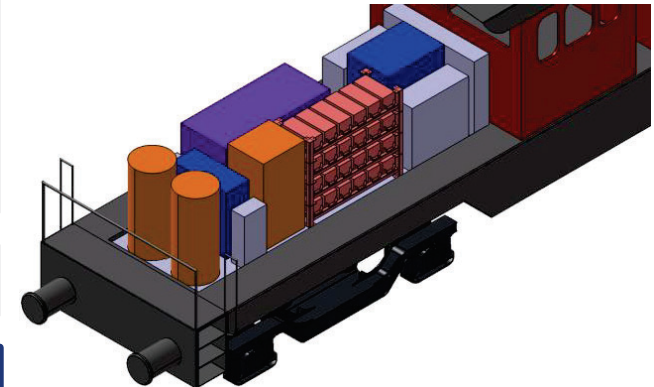
- Neuer Umrichter: 1200 kg
- Akku-Pack: 2000 kg
- Hilfskomponenten (ca.) 140kg

**Massenbilanz: -550 kg**

**Voraussichtl. keine Änderung der Zulassung nötig  
(Brandschutz und dyn. Bremse sind mit Gutachter zu klären)**



Quelle: Hoppecke



# **Inhalt**



## **1. Molinari Rail**

## **2. Projektvorstellung**

### **2.1. Lastkollektiv**

### **2.2. Auswahl Akku-Technologie**

### **2.3. Kostenvergleich Akku**

### **2.4. Elektrische und mechanische Integration**

## **3. Zusammenfassung und Ausblick**



# Zusammenfassung Projekt



- Generelle Tendenzen
  - „Hybridisierung“ von Lokomotiven / Triebzügen „liegt im Trend“
  - Positive Umwelt-Wirkung
  - Hohe Akzeptanz in Industrie, Politik und Gesellschaft
- Kosten
  - Die LCC-Kosten werden aktuell von jenen des Akkus dominiert.
  - Bei gegebenem Lastkollektiv ist alle 6 Jahre ein Akku-Ersatz nötig.
- Technologie
  - Akkus sind aktuell noch sehr teuer, speziell in bahntauglichen Varianten.
  - Das nachhaltige Refurbishment von alten Lokomotiven erfordert einen radikalen technologischen Einschnitt.
  - „Performance-Parameter“ von Akkus unterscheiden sich sehr stark in Theorie und Praxis.

**«hybriden Lösungen  
gehört die Zukunft»**

## Danksagung



Die Erkenntnisse dieses Vortrages wurden im Projekt

**„Elektrische Lokomotive mit zusätzlichem Akku-Energiespeicher für  
oberleitungsfreien Betrieb“**

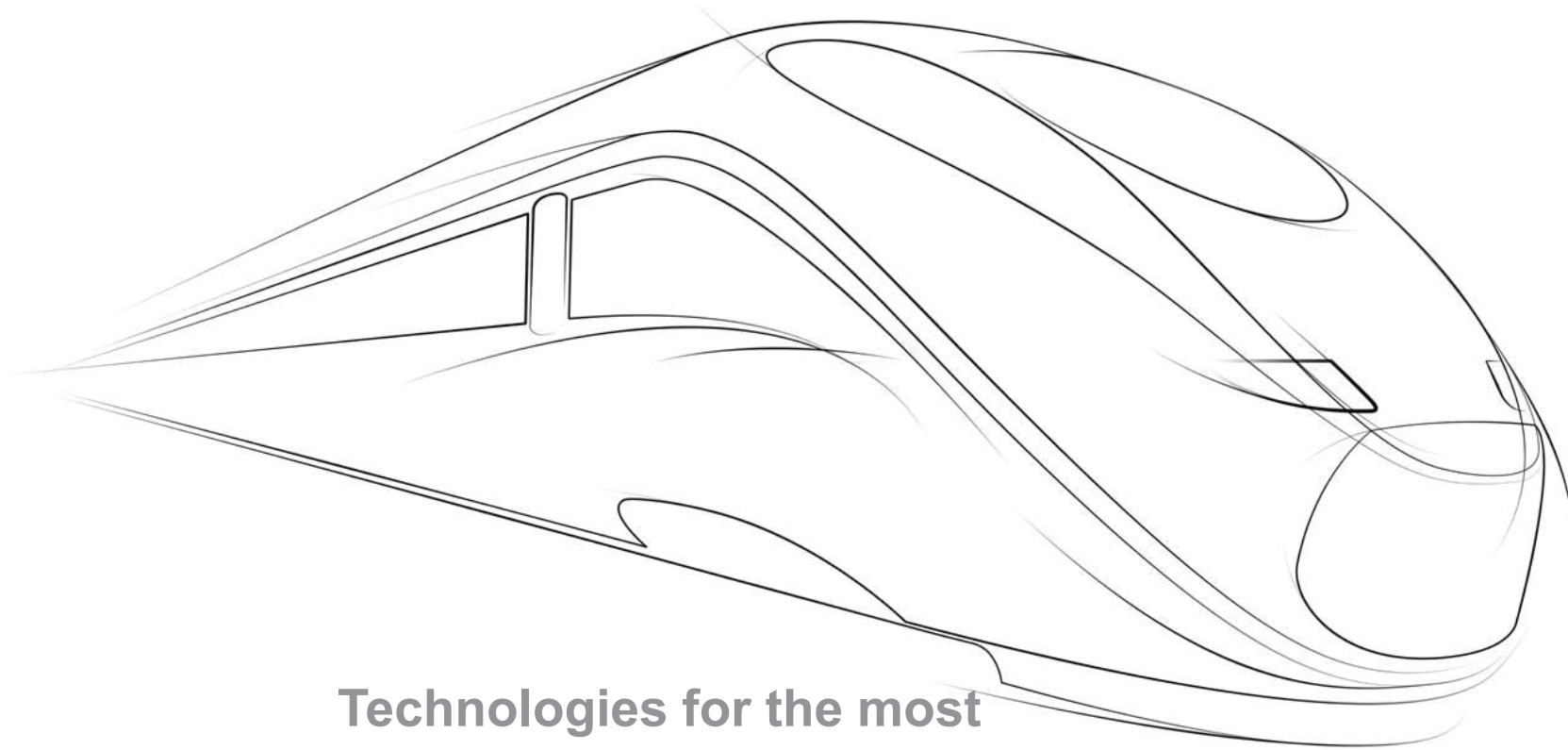
erarbeitet und dankenswerter Weise von

- der Österreichischen Forschungs-Förderungsgesellschaft (FFG)



unterstützt.

## **A PASSION FOR RAILWAY SOLUTIONS**



Technologies for the most  
sustainable mode of transit  
**Made by Molinari**