



# BAV Vorstudie «Alternative Antriebe für Rangier- und Baudienstfahrzeuge».

Mario Falabretti, Bern, 22.01.2015

# Agenda.

1. Begrüssung
2. Einleitung
  - Motivation
  - Ziele
3. Präsentation der Forschungsarbeit
4. Verwendbarkeit der Resultate
  - Mehrwert für die SBB
  - Bezug zu aktuellen Projekten
5. Abschluss
  - Fragen
  - Diskussion

## 2. Einleitung.

### Motivation

Der 2-Kraft-Antrieb setzt sich bei den aktuellen Beschaffungen durch und ermöglicht einen massiven Rückgang bei Verbrauch und Emissionen.

**Doch welche Technologien können den Dieselantrieb zukünftig komplett ersetzen?**

- Im Rahmen des SBB Energiesparprogramms werden Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz gesucht und gefördert.
- Durch den Wechsel zu 100% erneuerbarer Energie bis 2025 ist der Verbrauchsanteil der Diesellokomotiven bezogen auf die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die SBB noch relevanter.
- Die Förderung des BAV ermöglichte die Durchführung einer detaillierten Vorstudie mit einem unabhängigen Forschungsinstitut.

## 2. Einleitung.

### Ziele

- Beschreibung typischer Einsatzprofile betroffener Fahrzeuggattungen und der daraus resultierenden Anforderungen an alternative Antriebe.
- Evaluierung des aktuellen Standes der technologischen Entwicklung potenzieller Antriebstechniken/ Zeithorizont bis zur Serienreife.
- Aufzeigen von alternativen Antriebstechnologien für die verschiedenen Einsatzzwecke der dieselbetriebene Fahrzeuge bei der SBB.
- Abgabe von konkreten Empfehlungen für vertiefte Untersuchungen je Fahrzeugtyp und Einsatzfall.
- ✓ Die SBB kennt und berücksichtigt zukünftig alternative Technologien bei der Beschaffung/ Modernisierung als Ersatz für den thermischen Antrieb.

### **3. Präsentation der Forschungsarbeit.**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

**Institut für Fahrzeugkonzepte**

Holger Dittus

Johannes Pagenkopf



Abschlusspräsentation Vorstudie SBB / BAV

# Alternative Antriebskonzepte für Rangier-, Bau- und Sonderfahrzeuge

Holger Dittus, Johannes Pagenkopf  
DLR | Institut für Fahrzeugkonzepte

Bern, 22.01.2015



Wissen für Morgen



# Inhalt / Gliederung

1. Vorgehensweise der Vorstudie
2. Flottenanalyse
3. Auslegungs- und Bewertungskriterien
4. Alternative Antriebssysteme für SBB-Fahrzeuge
5. Handlungsempfehlungen



# Vorgehensweise der Vorstudie



## Flottenanalyse und Randbedingungen

- **Analyse dieselbetriebener Traktionsmittel** der SBB Infrastruktur und SBB Cargo
- Definition typischer **Einsatzprofile**
- **Leistungs- und Energieanforderungen** aus Messdatenanalyse

## Identifizierung Antriebsalternativen

- **Stand der Technik "Alternative Antriebskonzepte"**
- **Eigenschaften und Kosten** von Antriebskomponenten
  - Spezif. Energie und Leistung, E- und P-Dichte
  - Wirkungsgrade
  - Gefährdungspotential
  - Reifegrad (TRL)
  - Komponentenkosten
  - Energiepreise
  - Emissionen

## Technische und wirtschaftliche Bewertung

- Qualitative **Eignungsuntersuchung**
- Antriebssystem-**Grobauslegung**
- Berechnung **Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Potential**
- Abschätzung der **Systemkosten vs. Energiekosten**

## Handlungsempfehlungen

- **Zusammenfassung Ergebnisse** und
- **Empfehlungen für vertiefte Untersuchung** vielversprechender Alternativen





# Inhalt / Gliederung

1. Vorgehensweise der Vorstudie
2. Flottenanalyse
3. Auslegungs- und Bewertungskriterien
4. Alternative Antriebssysteme für SBB-Fahrzeuge
5. Handlungsempfehlungen



# Flottenanalyse - Referenzfahrzeuge

## Baudienst

Tm 234



## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

Am 843



## Einzelwagenladungsverkehr

Eem 923



## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

LRZ 08



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse Tm 234

## Baudienst

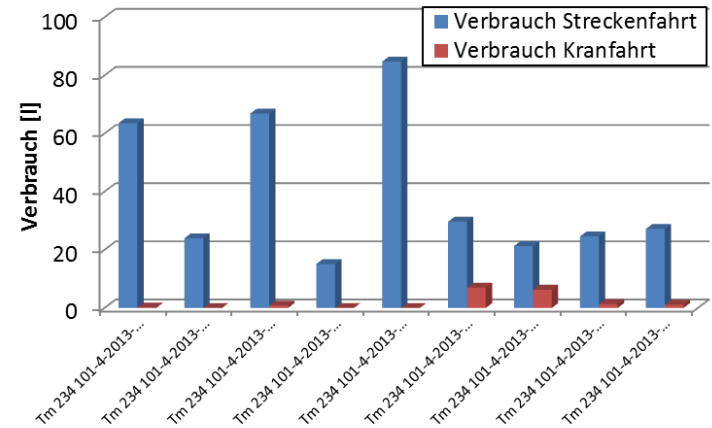
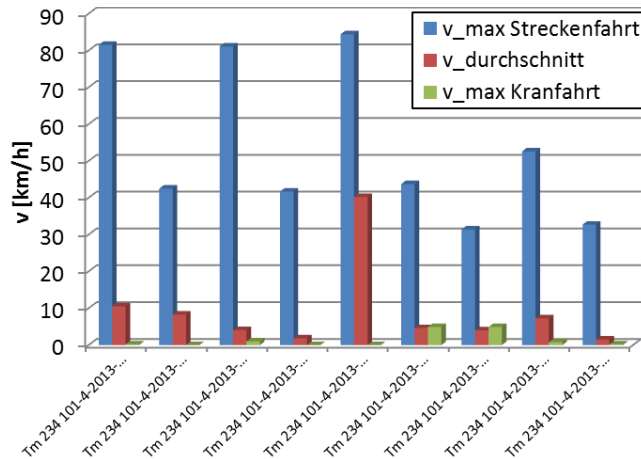
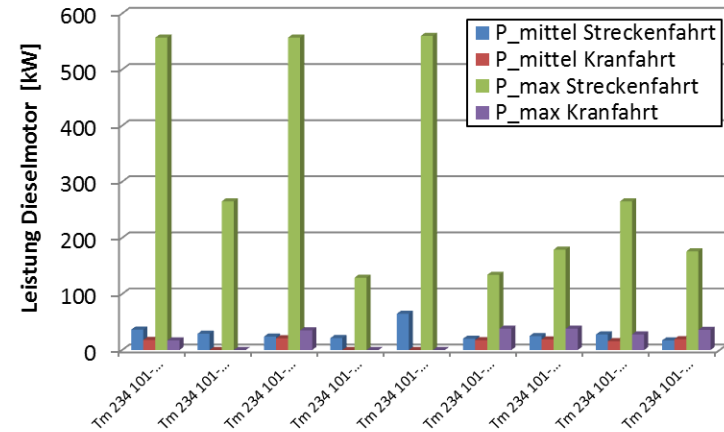
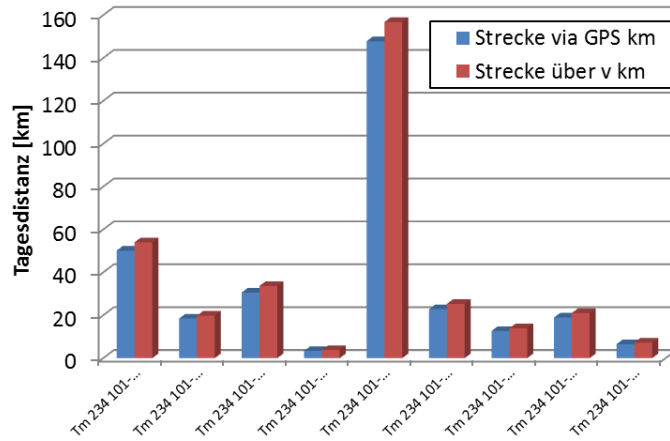
Referenzfahrzeug Tm 234	
Hauptantrieb	MTU Diesel, 550 kW
Stromerzeuger	Deutz Diesel 12,5 kVA elektrisch
Leistungsübertragung	Hydrostatisch
Zul. Gesamtgewicht	37 t
Leergewicht	30 t bzw. 37 t (3. Serie)
Fahrzeuganzahl	124



Baudienst	Rangierdienst	EWL	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse Tm 234

## Baudienst



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse Tm 234

## Baudienst

- Messdatenbasis: 9 Tagesfahrzyklen mit Geschwindigkeitsverlauf und Dieserverbrauch
- Tagesdistanzen zwischen 5 und 150 km
- Maximalgeschwindigkeit wird häufig nicht ausgenutzt
- Durchschnittsgeschwindigkeit meist  $\ll$  10km/h
- Maximalleistung des Dieselmotors häufig nicht ausgenutzt, geringe Durchschnittsleistung
- Dieserverbrauch zwischen 15 und 85 l/Tag
- Kranfahrt hat nur geringen Einfluss auf Kraftstoffverbrauch
- Geringes Rekuperationspotential (~8%)

Tägliche Aufzeichnungsdauer	Bis zu 22 h
Tagesdistanz der Fahrzyklen	Maximal 157 km, Mittelwert 37,3 km
Geschwindigkeiten	Maximal 80 km/h Mittlere Geschwindigkeit < 10 km/h, ein Fahrzyklus 40 km/h
Zeiten im Kranbetrieb	0 – 14 % der Aufzeichnungsdauer
Zeiten im Streckenbetrieb	20 – 41 % der Aufzeichnungsdauer
Anteil DM-Peakleistung	Sehr gering
Mittl. DM-Leistung im Streckenbetrieb	17- 65 kW, Mittelwert Fahrzyklen 29,5 kW
Rekuperationspotential* bez. auf Traktionsenergie am Rad	1,7 – 12,5 %, Mittelwert aller Fahrzyklen 7,9 %
Mittlere jährliche Fahrleistung	11.190 km
Mittlerer jährlicher Dieserverbrauch	12.480 l / Jahr
Dieserverbrauch über 25 Jahre	312.000 l / 25 Jahre
direkter CO <sub>2</sub> -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO <sub>2</sub> / l Diesel, nach BAfU)	815 t / 25 Jahre
Dieselposten über 25 Jahre (bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2045 von 2,58 CHF/l)	804.960 CHF / 25 Jahre



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ

# Flottenanalyse Am 843

## Rangierdienst / EWLV

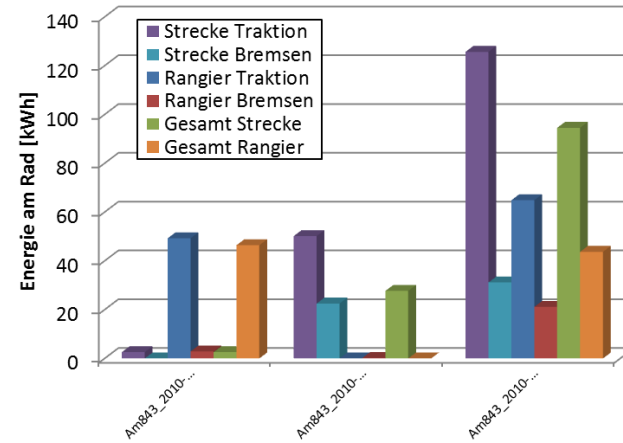
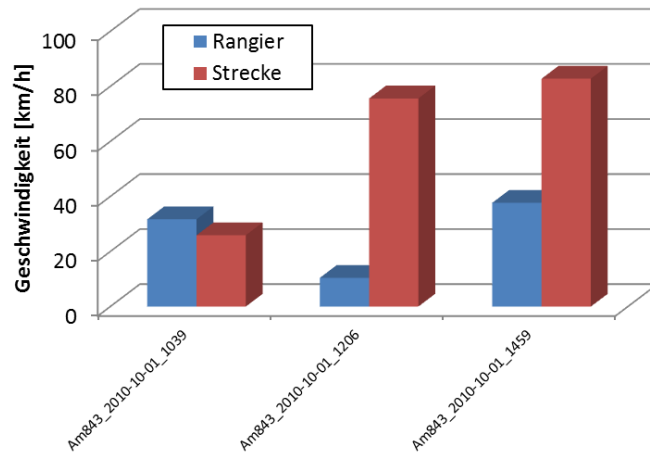
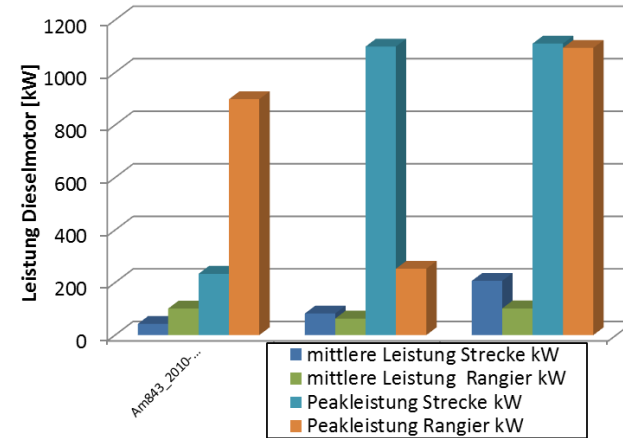
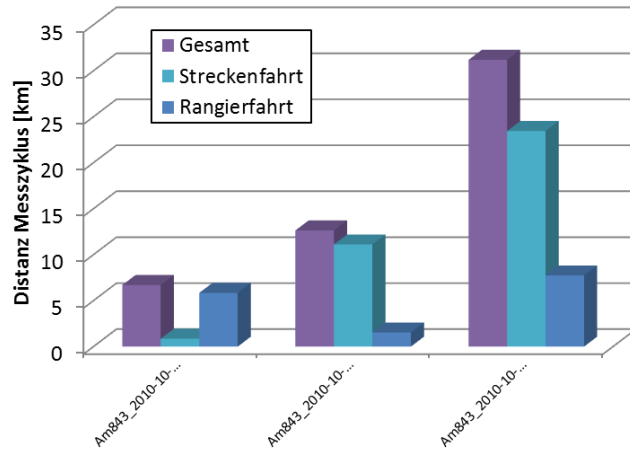
Referenzfahrzeug Am 843	
Hauptantrieb	Caterpillar Diesel, 1500 kW
Leistungsübertragung	Hydrodynamisch
Dienstmasse	80 t
Fahrzeuganzahl	76
Einsatzgebiete	Einzelwagenladungsverkehr (EWLV) Rangierverkehr (RV) Interventionsdienst



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse Am 843

## Rangierdienst / EWLVL



Baudienst	Rangierdienst	EWL	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse Am 843

## Rangierdienst

- Messdatenbasis: Geschwindigkeitsprofil und Leistungen am Dieselmotor bzw. Rad über einen Betriebstag
- Aufteilung zwischen Rangierverkehr und Einzelwagenladungsverkehr über Strecken- bzw. Rangiergang
- Für Flottenrechnung Ansatz 50% Rangierverkehr, 50% Einzelwagenladungsverkehr
- Mittlere Leistung am Rad < 50 kW
- Rekuperationspotential ca. 18 %, Bremsleistung bis 620 kW
- Bremsenergierekuperation möglich

Tägliche Einsatzdauer (Annahme)	9 h Rangierfahrt
Tagesdistanz	63 km Rangierfahrt
Max. Geschwindigkeit	38 km/h
Standzeiten ohne Dieselbetrieb	0,3 h
Max. Radleistung (Traktion/Bremse)	1170 kW / 620 kW
Mittl. Leistung am Rad	41,7 kW
Traktions- / Bremsenergie am Rad	475 kWh / 100 kWh
Mittleres Rekuperationspotential	Ca. 18 %
Mittlere jährliche Fahrleistung	18.888 km/Jahr
Mittlerer jährlicher Dieselverbrauch	84.375 l/Jahr
Dieselverbrauch über 25 Jahre	2.109.375 l / 25 Jahre
Direkter CO <sub>2</sub> -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO <sub>2</sub> / l Diesel, nach BAFU)	5.515 t / 25 Jahre
Dieselskosten über 25 Jahre (bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2045 von 2,58 CHF/l )	5.442 TCHF / 25 Jahre





Baudienst	Rangierdienst	EWL	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			



# Flottenanalyse Am 843

## Einzelwagenladungsverkehr

- Messdatenbasis: Geschwindigkeitsprofil und Leistungen am Dieselmotor bzw. Rad über einen Betriebstag
- Aufteilung zwischen Rangierverkehr und Einzelwagenladungsverkehr über Strecken- bzw. Rangiergang
- Für Flottenrechnung Ansatz 50% Rangierverkehr, 50% Einzelwagenladungsverkehr
- Mittlere Leistung am Rad < 65 kW
- Rekuperationspotential ca. 34%, Bremsleistung bis 740 kW
- Bremsenergierekuperation sinnvoll

Tägliche Einsatzdauer (Annahme)	9 h Streckenfahrt
Tagesdistanz	159 km
Max. Geschwindigkeit	83 km/h
Standzeiten ohne Dieselbetrieb	0,3 h
Max. Radleistung (Traktion/Bremse)	1143 kW / 740 kW
Mittl. Leistung am Rad	62,1kW
Traktions- / Bremsenergie am Rad	798kWh / 240 kWh
Mittleres Rekuperationspotential	Ca. 34 %
Mittlere jährliche Fahrleistung	47.579 km/Jahr
Mittlerer jährlicher Dieselverbrauch	115.496 l/Jahr
Dieselverbrauch über 25 Jahre	2.887.400 l / 25 Jahre
CO <sub>2</sub> -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO <sub>2</sub> / l Diesel, nach BAFU)	7.549 t / 25 Jahre
Dieselskosten über 25 Jahre (bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2045 von 2,58 CHF/l )	7.449.492 CHF / 25 Jahre







Baudienst	Rangierdienst	<b>EWLV</b>	Intervention
Tm 234	Am 843	<b>Eem 923</b>	LRZ
			

# Flottenanalyse Eem 923

## Einzelwagenladungsverkehr (EWLV)

Referenzfahrzeug Eem 923	
Hauptantrieb	Zweikraft Oberleitung-Diesel
Leistungsübertragung	Elektrisch
Radleistung unter Fahrdraht	1500 kW
Radleistung im Dieselbetrieb	290 kW
Dienstmasse	45 t
Fahrzeuganzahl	30
Einsatzgebiet	Einzelwagenladungsverkehr (EWLV)

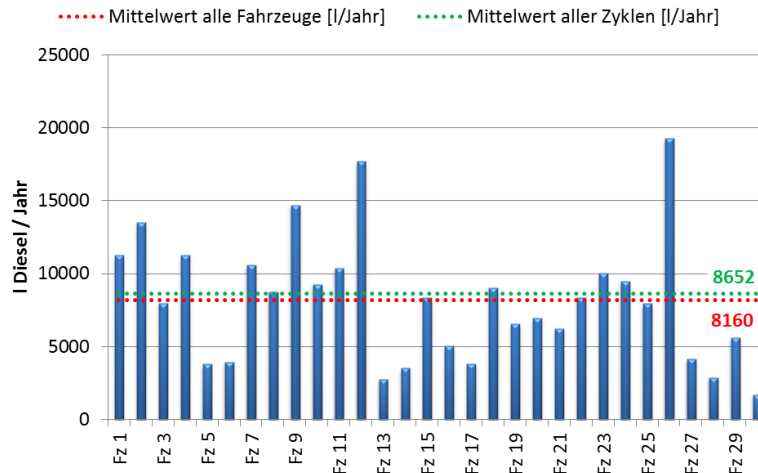


Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

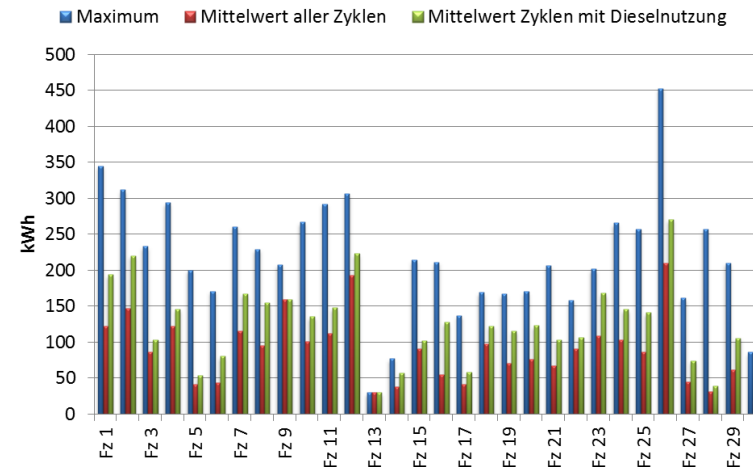
# Flottenanalyse Eem 923

## Einzelwagenladungsverkehr (EWLV)

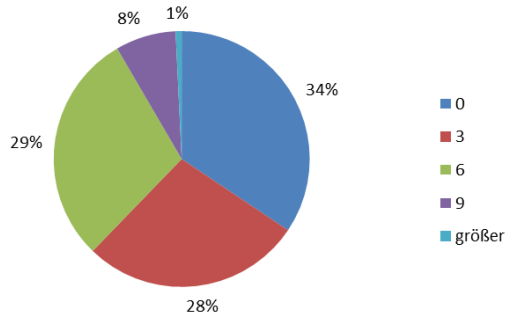
Mittlerer Jahresbedarf Diesel je Fahrzeug



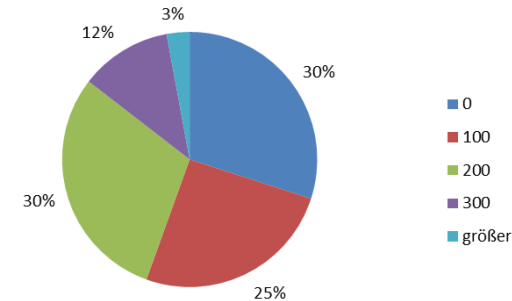
Elektr. Energie vom Diesel je Fahrzeug

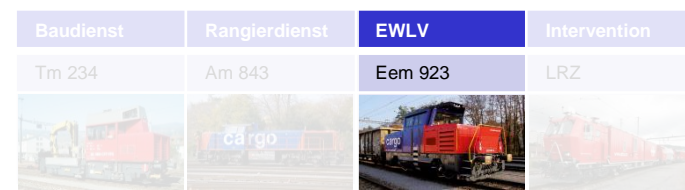


Betriebsstunden Dieselmotor



kWh Diesel gesamt





# Flottenanalyse Eem 923

## Einzelwagenladungsverkehr (EWLV)

- Messdatenbasis: Tages-Energiebilanzen von 30 Fahrzeugen über 1 Monat Betriebszeit
- Große Streubreite zwischen den Einsatztagen und Fahrzeugen
- Elektrischer Tagesenergiebedarf vom Diesel:
  - 30% der Fälle: Diesel nicht genutzt
  - 55% der Fälle < 200 kWh
  - 12% zwischen 200 und 300 kWh
  - 3% > 300 kWh
- Nachlademöglichkeiten unter Fahrdrabt aus Messdaten nicht ermittelbar

Tägliche Aufzeichnungsdauer	24 h
Bremsenergie (elektr. & Diesel)	0 kWh: 31%; 1 -90 kWh: 58% 90-180 kWh: 9%, >181 kWh: 11%
Mittlere jährliche Fahrleistung	30800 km pro Jahr und Fahrzeug
Mittlerer Jahres-Dieserverbrauch	8652 l pro Jahr Maximal: 19298 l/Jahr (Fz 26)
Mittlerer Verbrauch über 30 Jahre	259.560 l / 30a
Direkter CO <sub>2</sub> -Ausstoß über 30 Jahre <small>(2,6145 kg CO<sub>2</sub> / l Diesel, nach BAFU)</small>	679 t
Mittlere Dieselposten über 30 Jahre <small>(bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2050 von 2,74 CHF/l)</small>	711.194 CHF



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse LRZ 08

## Intervention

Referenzfahrzeug LRZ 08	
Hauptantrieb	4x MTU Powerpack, je 390 kW
Leistungsübertragung	Hydrodynamisch
Zul. Gesamtgewicht	246 t
Fahrzeuganzahl	11
Einsatzgebiet	Intervention, Lösch- und Rettungszug
<u>Annahmen:</u>	
Fahrleistung jährlich	18.300 km/a
Dieserverbrauch	2,9 – 3,7 l/km



Baudienst	Rangierdienst	WVLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse LRZ 08

## LRZ

- Datenbasis: Jahreskilometerleistung und Erfahrungswerte zum Dieserverbrauch
- Geschwindigkeitsprofile, Leistungsverläufe  
Rekuperationspotential und jährl. Laufleistung nicht ermittelbar
- Nur grobe Abschätzungen zum Einsparpotential möglich

Jährliche Laufleistung	18.300 km
Jährliche Laufleistung Einsatzfahrten / Übungsfahrten	Je 9150 km
Jährliche Betriebsstunden	750 h
Verbrauch pro h	70 – 90 l
Verbrauch pro km	2,9 – 3,7 l
Mittlerer Jahres-Dieserverbrauch	52.500 – 67.500 l
Mittlerer Dieserverbrauch über 25 Jahre	1.312 – 1.687 Tl
Direkter CO <sub>2</sub> -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO <sub>2</sub> / l Diesel, nach BAFU)	3432 – 4412 t l
Mittlere Dieserkosten über 25 Jahre (bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2045 von 2,58 CHF/l )	3.386 – 4.354 TCHF



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Flottenanalyse

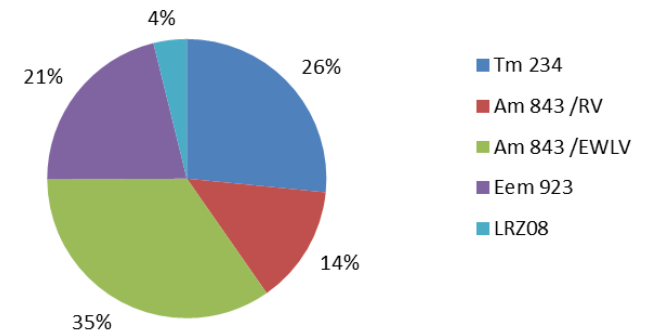
## Zusammenfassung

Ergebnisse der Auswertung:

- Randbedingungen für die Auslegung von Antriebssystemen
- Dieserverbräuche als Basis für Amortisationsrechnung
- Flotten-Dieserverbrauch und Verbrauchskosten werden von Am 843 dominiert

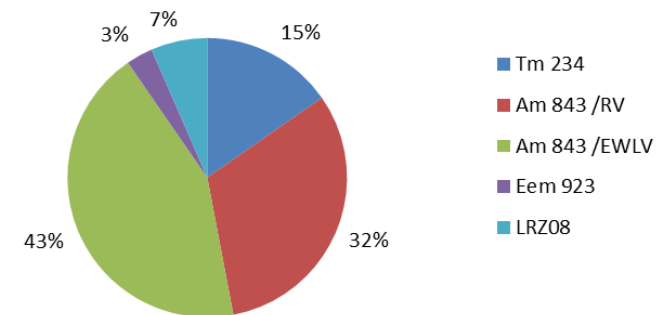
### Fahrleistung über Einsatzjahre

Flotte gesamt: 131 Mkm



### Dieserverbrauch über Einsatzjahre

Flotte gesamt: 253 MI



# Inhalt / Gliederung

1. Vorgehensweise der Vorstudie
2. Flottenanalyse
- 3. Auslegungs- und Bewertungskriterien**
4. Alternative Antriebssysteme für SBB-Fahrzeuge
5. Handlungsempfehlungen

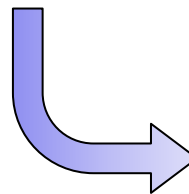
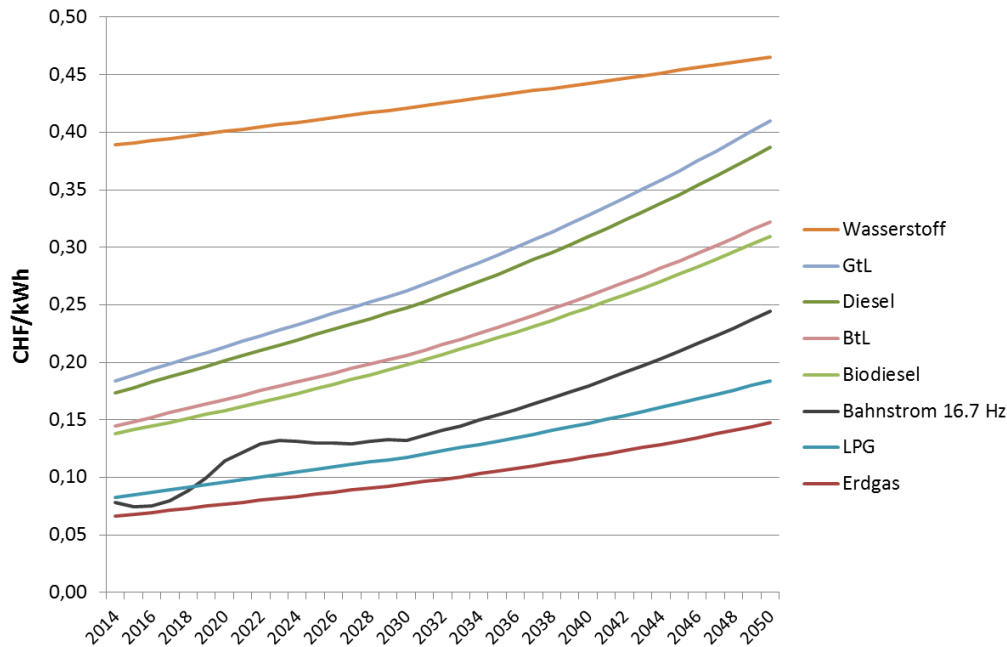






# Alternative Antriebstechnologien

## Randbedingungen für Bewertung - Energiekosten



Kraftstoff/Energieträger	Mittlerer spezifischer Energiepreis		Einheit
	(2020-2045)	(2020-2050)	
Bahnstrom	0,15	0,16	CHF/kWh
Diesel	2,58	2,74	CHF/l
Erdgas	1,28	1,36	CHF/kg
Biodiesel	1,89	2,01	CHF/l
GtL	2,66	2,82	CHF/l
BtL	2,07	2,20	CHF/l
LPG	0,85	0,90	CHF/l
Wasserstoff	14,19	14,37	CHF/kg





# Alternative Antriebstechnologien

## Randbedingungen für Bewertung - Komponenten

Kennwerte DC/DC-Wandler	
Wirkungsgrad DCDC-Wandler	98,0
Spezifische Leistung [W/kg]	4800
Leistungsdichte [W/l]	8000
Spezifische Kosten [CHF/kW]	240



Wirkungsgrade	
Wirkungsgrad Trafo	95,0
Wirkungsgrad Stromrichter (Gleichrichtung)	99,5
mittlerer Wirkungsgrad Dieselmotor	35%
mittlerer Wirkungsgrad hydrostat. LÜ	80%

Brennstoffzellensystem NT-PEM	
Wirkungsgrad [%]	45%
Leistungsdichte [kW/dm³]	0,33
Spez. Leistung [kW/kg]	0,36
Spez. Kosten [CHF/kW]	1200



Kennwerte Batterien	NMC	NiCd	NiMH
Spezifische Energie [Wh/kg]	100	20	35
Energiedichte [Wh/l]	90	25	40
Spezifische Leistung [W/kg]	1000	200	500
Leistungsdichte [W/l]	900	250	571
Energetischer Wirkungsgrad [%]	95,0	90,0	90,0
Wirkungsgrad Laden / Entladen je [%]	97,5	94,9	94,9
nutzbare Kapazität [%]	80	80	80
Spezifische Kosten [CHF/kWh]	1500	1300	1400



Wasserstoff-Drucktanks	
Masse inkl. H2 [kg]	145
Tankvolumen [dm³]	423
Gespeicherte H2-Masse [kg]	7,7
Spez. Tankmasse gefüllt [kg/kg H2]	18,8
Spez. Volumen [dm³/kg H2]	54,9
Spez. Energie H2 [kWh/kg]	33
Gespeicherte Energie [kWh]	254,1
Energiedichte Tank inkl H2 [kWh/dm³]	0,60
Spez. Energie Tank inkl H2 [kWh/kg]	1,75
Spez. Kosten Tank [CHF/kg H2]	1688

Fahrmotoren	
mittlerer Wirkungsgrad Fahrmotoren	90%
Spez. Leistung [kW/kg]	0,26
Spez. Kosten [CHF/kW]	100



Antriebsstromrichter	
mittlerer Wirkungsgrad ZK-> FM	95%
Spez. Leistung [kW/kg]	0,55
Spez. Kosten [CHF/kW]	133



Radsatzgetriebe	
Spez. Leistung [kW/kg]	0,93
Spez. Kosten [CHF/kW]	50



# Inhalt / Gliederung

1. Vorgehensweise der Vorstudie
2. Flottenanalyse
3. Auslegungs- und Bewertungskriterien
- 4. Alternative Antriebssysteme für SBB-Fahrzeuge**
5. Handlungsempfehlungen



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			



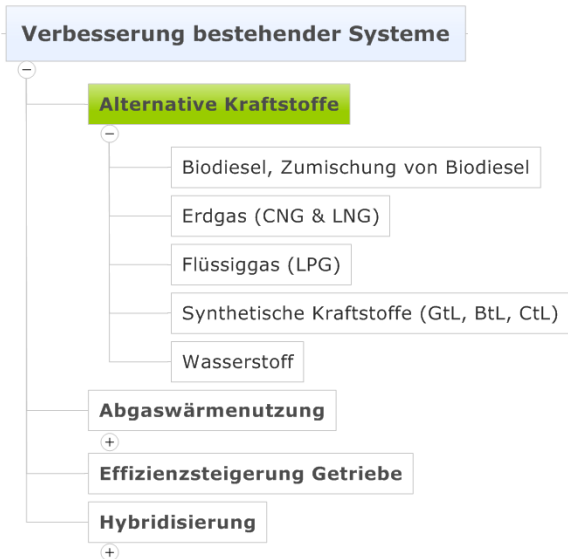
- Existierendes Antriebssystem bleibt weitgehend erhalten
- Effizienzsteigerung / Emissionsminderung durch zusätzliche Systeme oder Austausch bestehender Teilsysteme

- Übergang zu elektrischer Leistungsübertragung
- In Bestandsfahrzeugen ist die Umsetzung meist nicht möglich



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Alternative Antriebstechnologien



## Fahrzeug- und Infrastrukturmaßnahmen

### - Biodiesel und synthetische Kraftstoffe:

Kein oder geringer Umrüstaufwand an Kraftstoffsystem und Betankungsinfrastruktur

### - Erdgas und Flüssiggas:

Umrüstung von Motor- und Kraftstoffsystem, Leistungsübertragung kann erhalten bleiben.  
Neue Betankungsinfrastruktur notwendig

### - Wasserstoff:

Neuaufbau von Antriebssystem (Brennstoffzelle), Kraftstoffspeicher und Leistungsübertragung.  
Neue Betankungsinfrastruktur notwendig



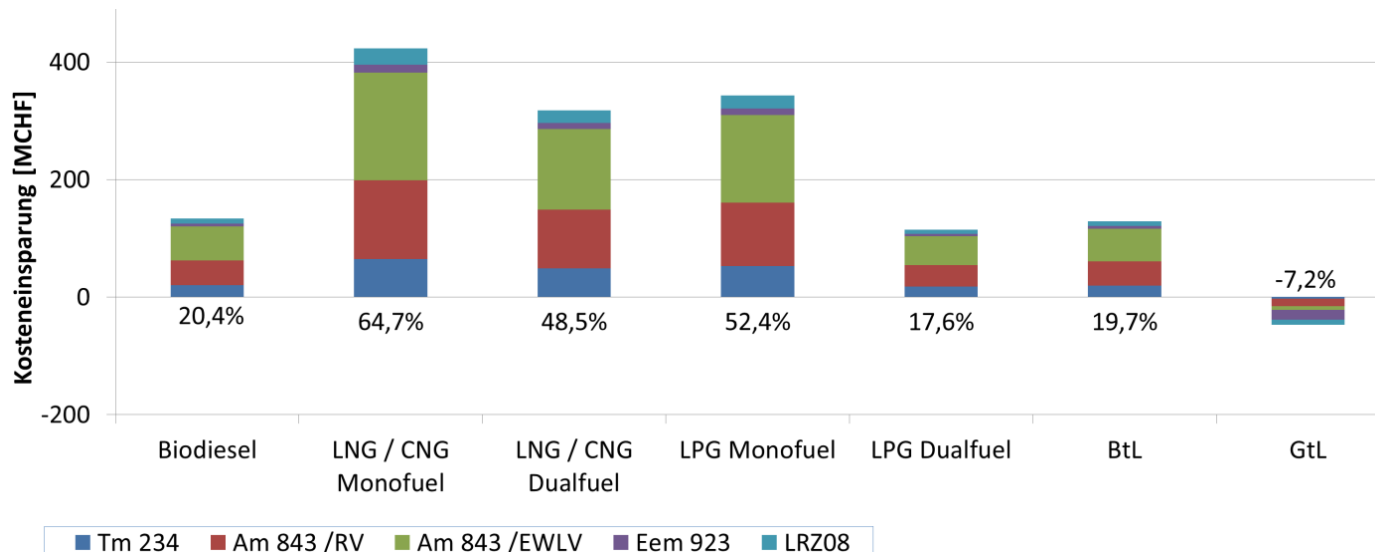


# Bewertung der Antriebskonzepte

## Alternative Kraftstoffe – Kostenvergleich zu Diesel

Antriebsform --> Kraftstoff / Energieträger -->	Verbrennungsmotorantrieb						OL-Fahrzeug	Brennstoffzellenantrieb
	Diesel	Biodiesel	BtL	GtL	CNG / LNG	LPG	Strom	Wasserstoff
Direkte Schadstoff-Emissionen	Bezug	0	+	+	+	+	++	++
Wirkungsgrad Antriebssystem ab Tank bzw. Pantograph [%]	25	25	25	25	25	25	70	38
Spezifische Kosten je Energieeinheit [CHF/kWh]	0,26	0,21	0,22	0,28	0,10	0,13	0,15	0,43
<b>Kosten Energiebezug je 100 kWh am Rad [CHF]</b>	<b>104,0</b>	<b>84,0</b>	<b>88,0</b>	<b>112,0</b>	<b>36,0</b>	<b>52,0</b>	<b>21,4</b>	<b>113,2</b>

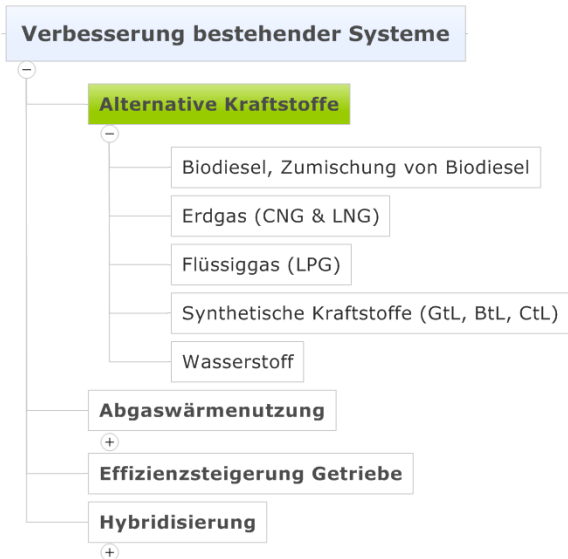
Prognose Preise in den Jahren 2030-2035



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Bewertung der Antriebskonzepte

## Alternative Kraftstoffe



- Kurz- bis mittelfristig umsetzbare Alternative zu konventionellem Diesel
- Prinzipielle Eignung der alternativen KS für alle Fahrzeuge
- Je nach Kraftstoffe deutliche Energiekosteneinsparungen möglich

### Empfehlung:

### **Entwicklung Energieträgerstrategie für SBB-Gesamflotte**

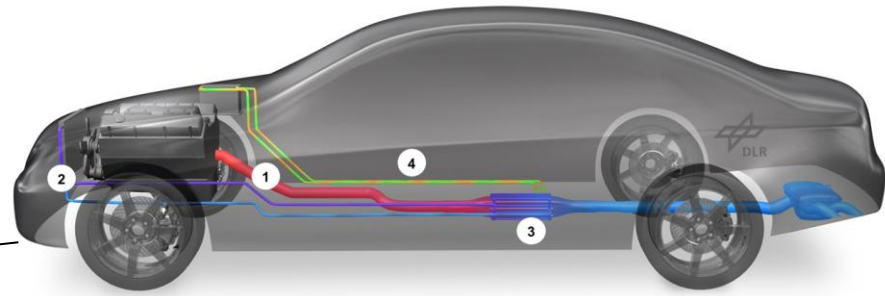
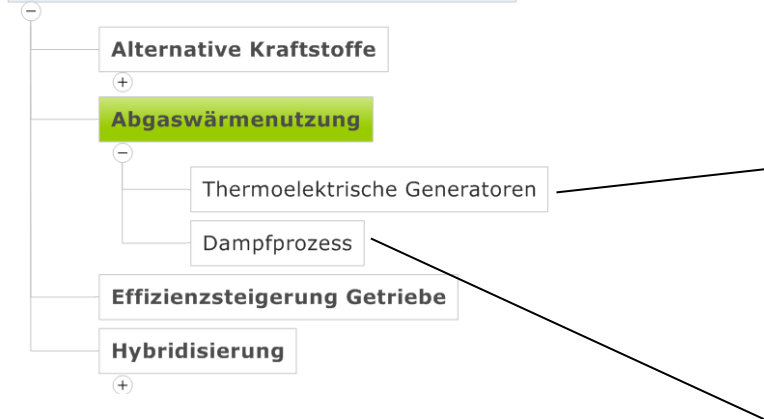
### **Nächste Schritte:**

- Analyse Infrastrukturbedarf und –kosten (Tankstellen)
- Detaillierte Betrachtung indirekter Emissionen der Kraftstoffherzeugung
- Analyse fahrzeugseitiger Anpassungsbedarf (Tanksystem, Verbrennungsmotor)
- Verfügbarkeit und Preise Verbrennungsmotoren klären

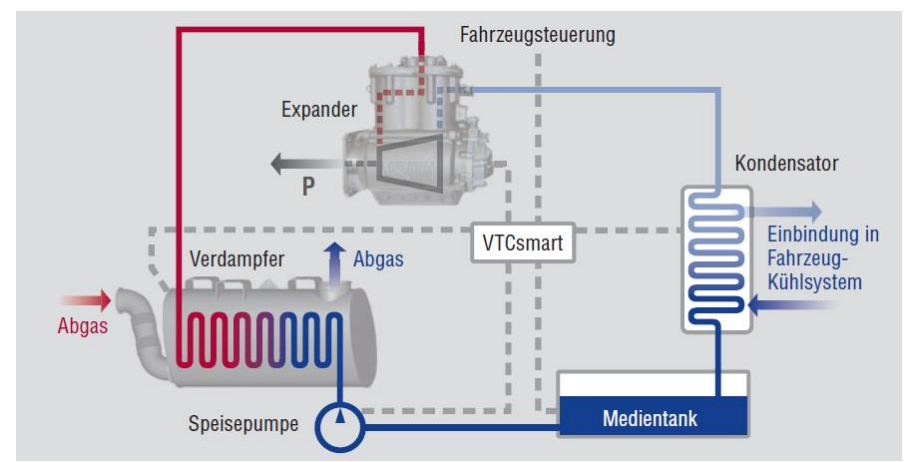


# Alternative Antriebstechnologien

## Verbesserung bestehender Systeme

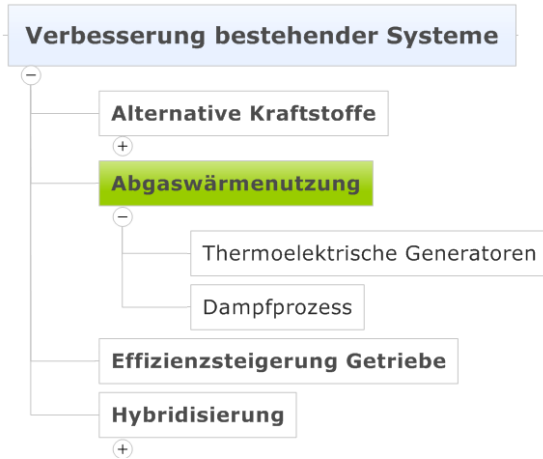


- 1 Abgasmassenstrom
- 2 Kühlmittelstrom
- 3 Thermoelektrischer Generator
- 4 Elektrische Leistungseinspeisung in Fahrzeugbordnetz





# Alternative Antriebstechnologien



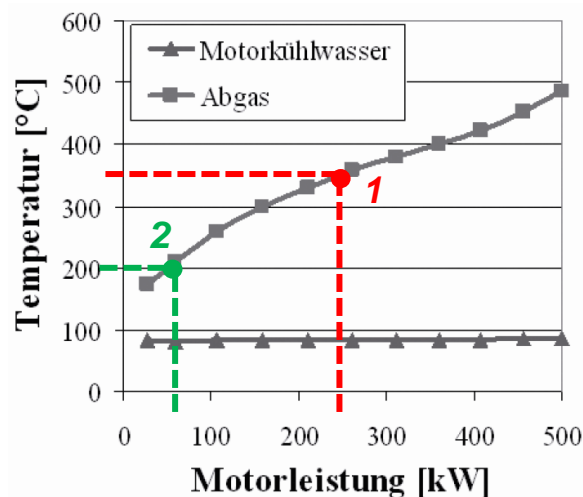
## Carnot-Wirkungsgrad

Theoretisch maximal erreichbarer Wirkungsgrad

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_K [K]}{T_H [K]}$$

$T_H$  : höchste Prozesstemperatur (Abgas)

$T_K$  : niedrigste Prozesstemperatur (Kühlmittel)



**Beispiele:**

**1**  $T_H = 623K, T_K = 373K$

**→**  $\eta_{Carnot} \approx 40\%$

**2**  $T_H = 473K, T_K = 373K$

**→**  $\eta_{Carnot} \approx 21\%$



# Bewertung Abgaswärmenutzung

## Baudienst

- Überwiegend geringe Dieselmotorleistung, mittlere Leistung < 65 kW  
→ Abgastemperatur zu gering

→ Abgaswärmenutzung nicht sinnvoll

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Überwiegend geringe Dieselmotorleistung, mittlere Leistung < 100 kW  
→ Abgastemperatur zu gering

→ Abgaswärmenutzung nicht sinnvoll

## Einzelwagenladungsverkehr

- Messdaten enthalten keine Leistungsverläufe, daher Abschätzung Abgastemperatur schwierig
- Massen- und Bauraumverfügbarkeit nicht gegeben

→ Abgaswärmenutzung nicht sinnvoll

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Keine Leistungsverläufe vorhanden, daher Abschätzung der Abgastemperatur schwierig

→ Abgaswärmenutzung nicht bewertbar

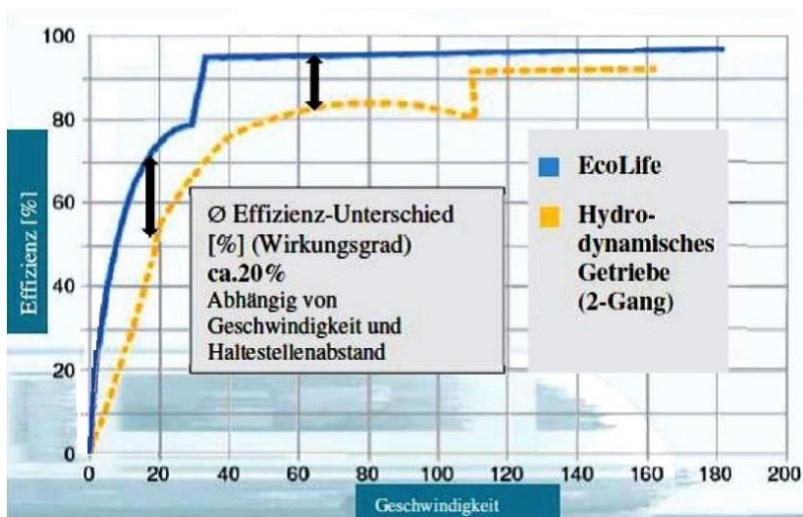
→ Leistungsverläufe Dieselmotor ermitteln



# Alternative Antriebstechnologien

## Verbesserung bestehender Systeme

- - +
  - +
  - +
  - +
- Alternative Kraftstoffe
  - Abgaswärmenutzung
  - Effizienzsteigerung Getriebe**
  - Hybridisierung



Hydrodynamisches Getriebe



Hydromechanische Getriebe



# Bewertung Effizienzsteigerung Getriebe

## Baudienst

- Technologie nicht kompatibel zur bestehenden hydrostatischen Leistungsübertragung

→ **Getriebetausch nicht möglich**

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Hydromechanische Getriebe in dieser Leistungsklasse nicht verfügbar

→ **Getriebetausch nicht möglich**

## Einzelwagenladungsverkehr

- Technologie nicht kompatibel zur bestehenden elektrischen Leistungsübertragung

→ **Getriebetausch nicht möglich**

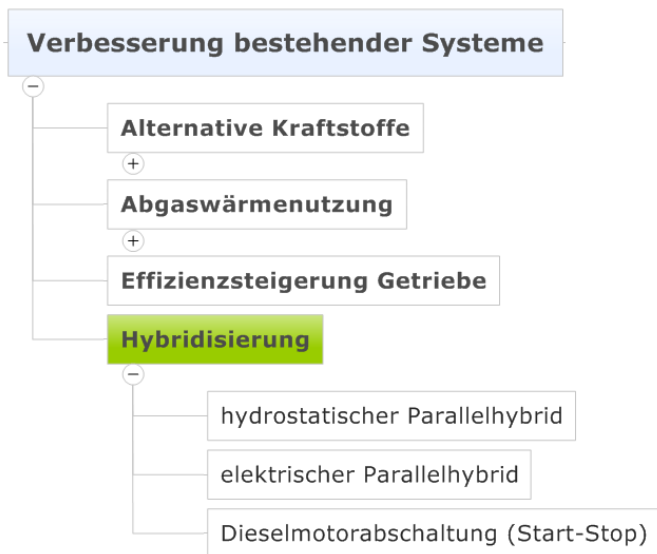
## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Hydromechanische Getriebe bieten Effizienz-, Kosten und Massenvorteile
- Einsparpotential aufgrund fehlender Leistungsverläufe nicht quantifizierbar

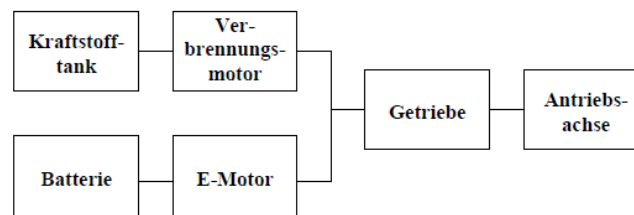
→ **Einsatz für Bestands- und Neufahrzeuge detailliert untersuchen**



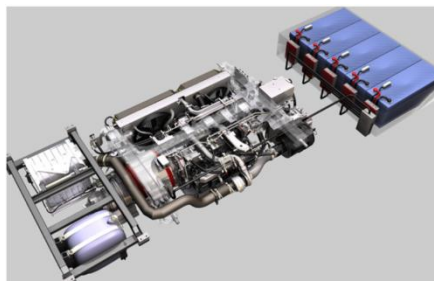
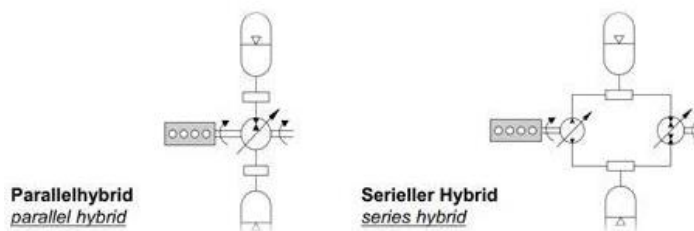
# Alternative Antriebstechnologien



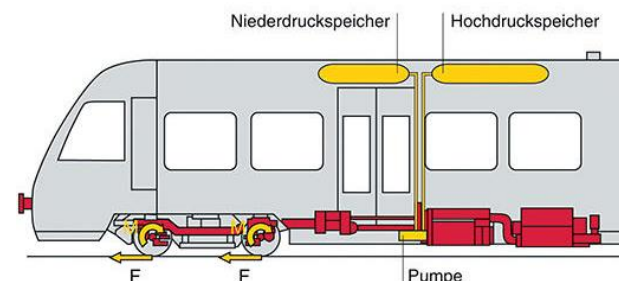
## Parallelhybrid elektrisch



## Hydraulische Hybride



MTU Hybrid Powerpack



Voith HydroBrid Konzeptstudie



# Bewertung Hybridisierung

## Baudienst

- Serieller hydrostatischer Hybridantrieb aufgrund Massenrestriktion und geringem Kostensparpotential ungeeignet
  - Einfache Start-Stop-Funktion (Konzept emkamatik) bietet Einsparpotentiale
- ➔ **Einfache Start-Stop-Funktion untersuchen**

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Große Speichermassen und -volumina notwendig
  - Beispielauslegung nicht realisierbar, andere Auslegungen möglich
  - Datenbasis für Bewertung nicht ausreichend
- ➔ **Datengrundlage verbessern**

## Einzelwagenladungsverkehr

- Rekuperationspotential unbekannt
  - Massen- und Bauraumverfügbarkeit nicht gegeben
  - Fahrzeuge speisen unter Fahrdraht bereits Bremsenergie zurück
- ➔ **Konzept nicht sinnvoll**

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

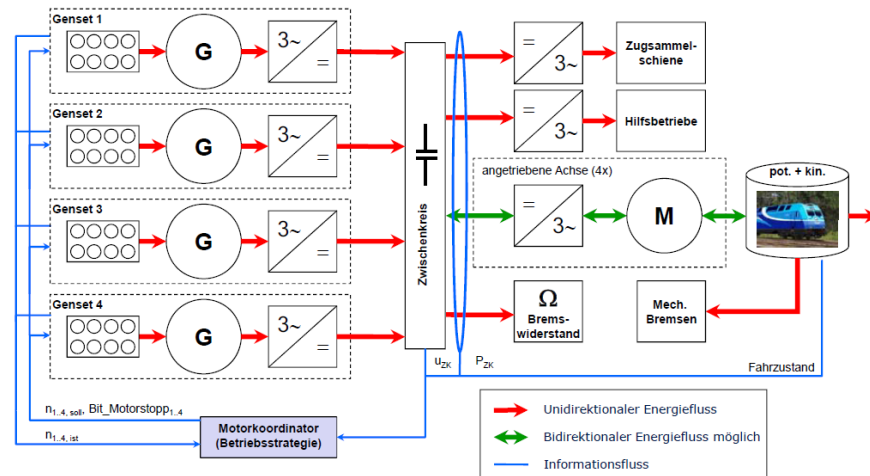
- Rekuperationspotential unbekannt, Einsparpotential nicht quantifizierbar
  - Elektrischer Parallelhybrid kann in Kombination mit Getriebetausch sinnvoll sein
  - Hohe Investitionskosten, Amortisation unklar
- ➔ **Datengrundlage verbessern**



# Alternative Antriebstechnologien

## Neuaufbau Antriebssystem

- 
- **Mehrmotorenkonzept**
- Zweikraft Oberleitung - Diesel
- Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher
- Energiespeicherantrieb
- Brennstoffzellenhybrid (seriell)



Alstom H3 Dual-Engine



Bombardier Traxx Multi-Engine



# Bewertung Mehrmotorenkonzept

## Baudienst

- Spitzenleistung nur selten benötigt, geringe Durchschnittleistung
- Kranbetrieb erfordert nur geringe Leistung
- Hydrostatische oder elektrische LÜ denkbar
- Fahrdrachtunabhängiger Betrieb gewährleistet
- ➔ **Für Neufahrzeuge detailliert untersuchen**

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Geringe Durchschnittleistung
- Spitzenleistung selten erforderlich
- Fahrdrachtunabhängiger Betrieb gewährleistet
- ➔ **Leistungsverläufe des Fahrzeugs ermitteln**
- ➔ **Für Neufahrzeuge detailliert untersuchen, wenn autarker Betrieb gefordert wird**

## Einzelwagenladungsverkehr

- Bauraum und Massenrestriktionen
- Weitere Verkleinerung des bestehenden Dieselmotors nicht sinnvoll
- Energiekosten und direkte Emissionen größer als beim Zweikraftfahrzeug OL-Diesel
- ➔ **Konzept nicht sinnvoll**

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Mehrmotorenkonzept ist im Bestandsfahrzeug bereits umgesetzt (4 PowerPacks)
- ➔ **Steuerungsstrategie anpassen, Start-Stop-Funktion integrieren**





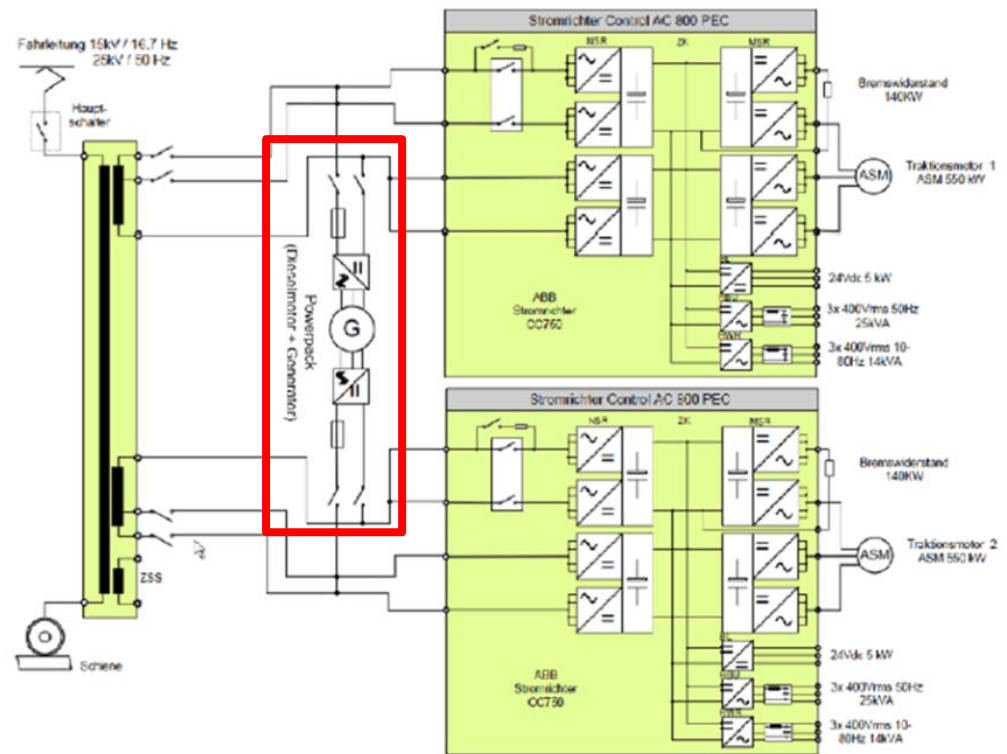
# Alternative Antriebstechnologien

## Neuaufbau Antriebssystem

- 
- **Mehrmotorenkonzept**
- **Zweikraft Oberleitung - Diesel**
- **Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher**
- **Energiespeicherantrieb**
- **Brennstoffzellenhybrid (seriell)**



Stadler Eem 923



# Bewertung Zweikraft Oberleitung - Diesel

## Baudienst

- Autarker Betrieb gewährleistet
  - Signifikante Energiekosten- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung erwartet
  - Massenrestriktion (~10t Mehrgewicht) verhindern Umsetzung
- ➔ **Konzept nicht weiter untersuchen**

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Potential zur Massenreduzierung
  - Fahrdrahtunabhängiger Betrieb gewährleistet
  - Ab 30% Energie aus der Fahrleitung  
Amortisation der Investitionskosten gegeben
- ➔ **Oberleitungsverfügbarkeit analysieren**
- ➔ **Konzept detailliert untersuchen**

## Einzelwagenladungsverkehr

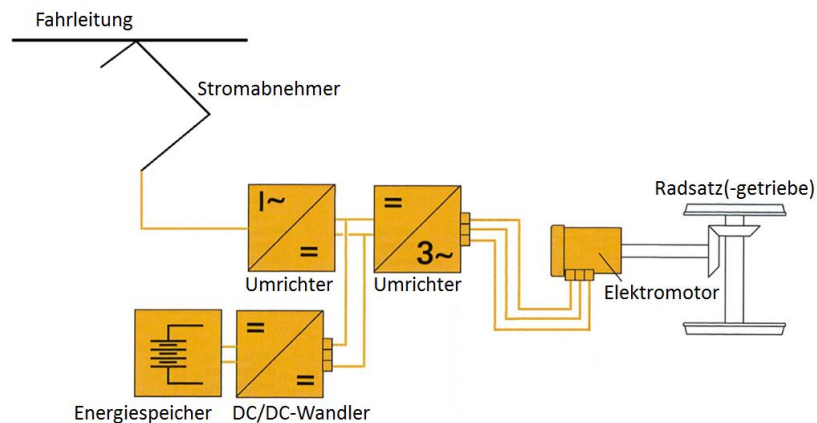
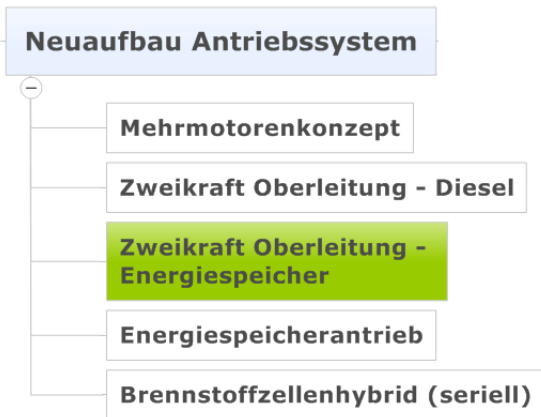
- ➔ **Konzept ist bereits umgesetzt**

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Zunahme der Antriebskomplexität
  - Volle Leistung ohne Oberleitung nicht gewährleistet
  - Massen- und Bauraumrestriktionen
- ➔ **Konzept nicht weiter untersuchen**



# Alternative Antriebstechnologien



JR East EV-E300-1



Bombardier Class 379 - Umbau



Bombardier Mitrac Energy Saver



# Bewertung Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher

## Baudienst

- Elektrische LÜ erforderlich
- Autarker Betrieb ohne Oberleitung nur kurzzeitig möglich
- Hohe Investitionskosten

→ Konzept nicht weiter untersuchen

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Oberleitungsverfügbarkeit nicht bekannt
- Tauschintervalle der Energiespeicher entscheidend für Wirtschaftlichkeit

→ Datengrundlage verbessern

→ Batterieauslegung mit Hersteller absichern

## Einzelwagenladungsverkehr

- Energiekosten- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung gegenüber Zweikraft OL-Diesel
- Leistungssteigerung im fahrdrahtlosen Betrieb
- Vergleichsweise geringe Speicherkosten

→ Eem 923 als Erprobungsträger detailliert untersuchen

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Zunahme der Antriebskomplexität
- Autarker Betrieb nicht gewährleistet
- Massen- und Bauraumrestriktionen

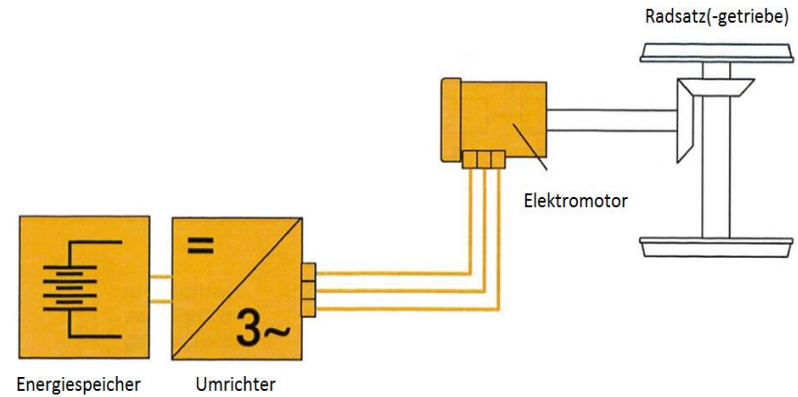
→ Konzept nicht weiter untersuchen



# Alternative Antriebstechnologien

## Neuaufbau Antriebssystem

- Mehrmotorenkonzept
- Zweikraft Oberleitung - Diesel
- Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher
- Energiespeicherantrieb**
- Brennstoffzellenhybrid (seriell)



London Underground: Wartungszüge



DB-Baureihe 515/815 „Akkublitz“



# Bewertung Energiespeicherantrieb

## Baudienst

- Elektrische LÜ erforderlich
- Mehrtägiger autarker Betrieb ohne Ladestationen nicht gewährleistet

➔ Konzept nicht weiter untersuchen

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Energiekostenreduzierung, CO<sub>2</sub>-Vermeidung
- Sehr hohe Kosten für Energiespeichertausch erwartet → Konzept nicht wirtschaftlich
- Zweikraft OL-Energiespeicher besser geeignet

➔ Konzept nicht weiter untersuchen

## Einzelwagenladungsverkehr

- Hohe Investitionskosten
- Im Vergleich zum Zweikraftfahrzeug OL-Energiespeicher ökonomisch und betrieblich nicht sinnvoll

➔ Konzept nicht weiter untersuchen

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Autarker Betrieb nicht gewährleistet

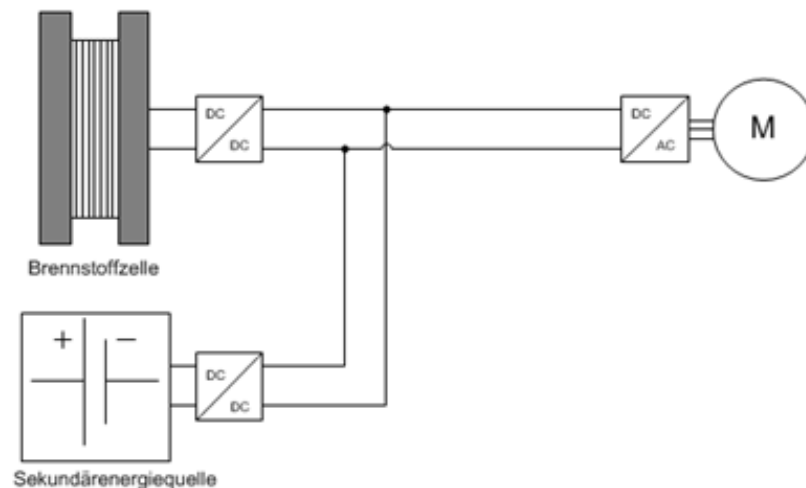
➔ Konzept nicht weiter untersuchen



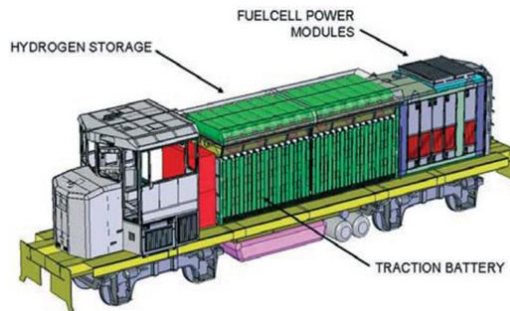
# Alternative Antriebstechnologien

## Neuaufbau Antriebssystem

- Mehrmotorenkonzept
- Zweikraft Oberleitung - Diesel
- Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher
- Energiespeicherantrieb
- Brennstoffzellenhybrid (seriell)**



Alstom iLint-Projekt



GreenGoat BNSF



NE-Train JR East



# Bewertung Brennstoffzellenhybrid

## Baudienst

- Energiekosteneinsparung möglich durch Vermeidung des Leerlaufverbrauchs
  - Keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Hohe Investitionskosten, Amortisation fraglich
- ➔ **Konzept detailliert untersuchen, wenn CO<sub>2</sub>-freier Betrieb erforderlich ist**

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Energiekosteneinsparung realisierbar
  - Keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Hohe Investitionskosten, Amortisation fraglich
- ➔ **Konzept detailliert untersuchen, wenn CO<sub>2</sub>-freier Betrieb erforderlich ist**

## Einzelwagenladungsverkehr

- Hohe Investitionskosten
  - Im Vergleich zum Zweikraftfahrzeug OL-Energiespeicher ökonomisch und betrieblich nicht sinnvoll
- ➔ **Konzept nicht weiter untersuchen**

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Hohe Verfügbarkeit des Fahrzeugs ist aufgrund des derzeitigen Reifegrads von Brennstoffzellen nicht zu gewährleisten
- ➔ **Konzept nicht weiter untersuchen**





# Vielversprechende Konzepte

## Baudienst

- Alternative Kraftstoffe
- Start-Stop-Funktion für Dieselmotor
- Mehrmotorenkonzept
- (Brennstoffzellenhybrid)

## Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Alternative Kraftstoffe
- Zweikraft OL-Diesel
- Mehrmotorenkonzept?
- Zweikraft OL-Energiespeicher?
- (Brennstoffzellenhybrid)

## Einzelwagenladungsverkehr

- Alternative Kraftstoffe
- Zweikraft Oberleitung-Diesel
- Zweikraft Oberleitung-Energiespeicher

## Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

- Alternative Kraftstoffe
- Effizienzsteigerung Getriebe
- Abgaswärmenutzung?
- Hybridisierung?





# Zusammenfassung Baudienst-Optionen

	Erstaus- rüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO <sub>2</sub> -Emissionen je Fzg. über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
		[TCHF]	Dieselbedarf [m <sup>3</sup> ]	Energiekos- ten [TCHF]	
<b>Status quo</b>	?	312	805	815	
<b>Alternative Kraftstoffe</b>	?	?	?	?	→ Flottenstrategie erarbeiten
<b>Start-Stop</b>	?	248 -20%	640 (-165) -20%	648 -20%	Aufwand vergleichsweise gering → Für Bestands- und Neufahrzeuge detailliert untersuchen
<b>Mehrmotoren- konzept</b>	?	?	?	?	Verschiedene Varianten möglich → Für Neufahrzeuge detailliert untersuchen
<b>Brennstoff- zellenhybrid</b>	371	0 -100%	629 (-176) -22%	0 -100%	Autarker Betrieb, keine direkten Emissionen, leiser Betrieb (Nachteinsätze, Tunnel) → Für autarken, emissionsfreien Betrieb

\* Kosten der Antriebs-Hauptkomponenten und Speicher je Fahrzeug

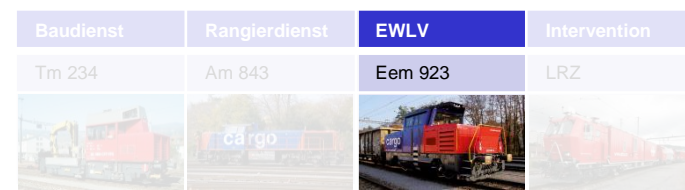
\*\* Bei 60 % Energieanteil aus Fahrdrabt





# Zusammenfassung Rangierverkehr-Optionen

	Erstaus- rüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO <sub>2</sub> -Emissionen je Fzg. über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
		[TCHF]	Dieselbedarf [m <sup>3</sup> ]	Energiekos- ten [TCHF]	
<b>Status quo</b>	?	2.109	5.442	5.515	100% Rangierdienst
<b>Alternative Kraftstoffe</b>	?	?	?	?	→ Flottenstrategie erarbeiten
<b>Zweikraft OL- Diesel**</b>	850	843 (-1.266) -60%	2.918 (-2.524) -46%	2.206 (-3.309) -60%	Hoher Rangierbhf.-Elektrifizierungsanteil → Für Neufahrzeuge detailliert untersuchen
<b>Zweikraft OL- Energie- speicher**</b>	1.220	0 -100%	1.257 (-4.184) -77 %	0 -100%	OL-Verfügbarkeit nicht bekannt Tauschintervalle der Speicher entscheiden über Wirtschaftlichkeit → Datengrundlage verbessern → Batterieauslegung mit Hersteller
<b>Brennstoff- zellenhybrid</b>	1.115	0 -100%	1.168 (-4.274) -21%	0 -100%	Autarker Betrieb, keine direkten Emissionen, leiser Betrieb (Nachteinsätze, Tunnel) → Für autarken, emissionsfreien Betrieb



# Zusammenfassung EWLV-Optionen

	Erstaus- rüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO <sub>2</sub> -Emissionen je Fzg. über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
		[TCHF]	Dieselbedarf [m <sup>3</sup> ]	Energiekos- ten [TCHF]**	
<b>Status quo</b>	?	260	711 (nur Dieselanteil)	679	
<b>Alternative Kraftstoffe</b>	?	?	?	?	→ Flottenstrategie erarbeiten
<b>Zweikraft OL- Energie- speicher</b>	470 (Batterie und DCDC- Wandler)	0 -100%	157 (-553) -77 %	0 -100%	Leistungssteigerung ggü. Dieselgenerator, vergleichsweise geringe Speicherkosten, emissionsfreier Betrieb möglich. → Eem 923 als Erprobungsträger detailliert untersuchen



# Zusammenfassung Intervention-, LRZ - Optionen

	Erstaus- rüstungs- kosten	Energiebedarf, -kosten, CO <sub>2</sub> -Emissionen je Fzg. über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
		[TCHF]	Dieselbedarf [m <sup>3</sup> ]	Energie- kosten [TCHF]	
<b>Status quo</b>	?	1.500	3.870	3.992	
<b>Alternative Kraftstoffe</b>	?	?	?	?	→ Flottenstrategie erarbeiten
<b>Effizienz- steigerung Getriebe</b>	?	1.225 (-225) -15% *	3.289 (-581) -15% *	3.404 (-588) -15% *	Massen- und Investitionskostenvorteile, → Einsatz für Bestands- und Neufahrzeuge anstreben
<b>Abgaswärme- nutzung</b>	?	?	?	?	Keine Leistungsverläufe vorhanden → Potentialeinschätzung anhand von detaillierten Messdaten (Abgastemperaturen, Abgasmassenströme)
<b>Hybridisierung</b>	~ 4x200 TCHF zusätzlich	?	?	?	Rekuperationspotential unbekannt, hohe Investitionskosten, Amortisation unklar → <b>Datengrundlage verbessern</b>

# Inhalt / Gliederung

1. Vorgehensweise der Vorstudie
2. Flottenanalyse
3. Auslegungs- und Bewertungskriterien
4. Alternative Antriebssysteme für SBB-Fahrzeuge
5. Handlungsempfehlungen



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

## Handlungsempfehlungen

- **Langfristige Kraftstoffstrategie** für Gesamtflotte thermischer Traktionsmittel entwickeln, zusätzlich Infrastrukturkosten ermitteln
- **Hohen Elektrifizierungsgrad nutzen** durch **Zweikraft-Antriebe OL-ES**
  - Annahmen Energiespeicher verifizieren, durch detaillierte Untersuchung der Energiespeicherauslegung und Haltbarkeit auf Erprobungsträger(n)
  - Nachlademöglichkeiten unter OL analysieren (bisher nur Energiebetrachtung, keine Leistungsbetrachtung, keine Nachlademöglichkeiten betrachtet)
- Beim **LRZ** Effizienzsteigerung durch **Getriebetausch** anvisieren



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

# Handlungsempfehlungen

- **Konzentration auf Am 843**, da hier größter Einfluss auf Kosten, Verbrauch und Emissionen
  - Datengrundlage verbessern
  - Oberleitungsverfügbarkeit ermitteln
  - Leistungsverläufe verschiedener Fahrzeuge aufzeichnen
- **Energiespeicher** sind für viele Konzepte wichtig, aber große **Unsicherheit hinsichtlich Dimensionierung, Kosten und Lebensdauer**
  - Auslegung mit Speicherlieferanten konkretisieren
  - Austauschintervalle ermitteln
  - Kostenannahmen absichern





# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Holger Dittus  
+49 711 6862-581  
holger.dittus@dlr.de

Johannes Pagenkopf  
+49 30 67055-7957  
johannes.pagenkopf@dlr.de



Wissen für Morgen



## 4. Verwendbarkeit der Resultate.

Mehrwert für die SBB

- Neutrale Betrachtung und Bewertung bekannter alternativer Antriebstechnologien.
- Berücksichtigung von Gefährdungspotenzial und aktuellem Reifegrad.
- Überblick bereits umgesetzter Konzepte in Schienenfahrzeugen.
- Aufzeigen der Grenzen und der Hürden zur Umsetzung alternativer Antriebstechnologien.
- Benennung erfolgsversprechender Lösungen für die betrachteten Fahrzeuggattungen und Empfehlungen zur Vertiefung.
- Erste Kosten-/Nutzen-Betrachtung für die definierten Technologien.

## 4. Verwendbarkeit der Resultate.

Bezug zu aktuellen Projekten

### **Beschaffung Rangier- und Streckenlokomotiven Aem 940/ Baudiensttraktoren Tm 234 DART**

- Bestätigung der getroffenen Lösungsansätze als Basis für die Ausschreibung.
- Vergleichsbasis für die Bewertung der eingereichten Konzepte.
- Plausibilisierung der Energieverbrauchsangaben und der Einflüsse auf die Lebenszykluskosten.

## 4. Verwendbarkeit der Resultate.

Bezug zu aktuellen Projekten

### Modernisierung schwere Rangierlok Am 843

- Input für die Auswahl und Bewertung möglicher Varianten zur Verbesserung der Energieeffizienz im Rahmen des Refits.
- Anhaltspunkt für die Veränderung der Lebenszykluskosten auf Grund reduzierter Treibstoffverbräuche.
- Empfehlungen für die Vertiefung und Detaillierung der Konzepte.

### Optimierung Baudiensttraktor Tm 234

- Bestätigung des eingeschlagenen Weges zur geringfügigen Optimierung der Bordnetzversorgung (verbesserte Start/Stop-Funktion).

## 4. Verwendbarkeit der Resultate.

Bezug zu aktuellen Projekten

### Erneuerung Flotte Lösch- und Rettungszüge (LRZ)

- Erste grobe Bewertung einer möglichen Optimierungsmassnahme (hydromechanische anstelle hydrodynamischer Getriebe).
- Empfehlungen für die Erhebungen detaillierter Betriebsdaten zur weiteren ausgearbeitet und bewertet der empfohlenen Massnahme.
- Berücksichtigung des Einsatzzweckes und der Komplexität der LRZ.

### Optimierung/ Neubeschaffung 2-Kraft-Rangierlok Eem 923

- Aufzeigen möglicher 2-Kraft-Konzepte für eine nächste Generation.
- Konkrete Empfehlung zur Erprobung eines Energiespeichers bei Absehbarkeit einer Beschaffung/ Modernisierung (ca. 5 Jahre zuvor).

## 4. Verwendbarkeit der Resultate.

Bezug zu aktuellen Projekten

### Strategie «Alternative Kraftstoffe»

- Vergleich der verfügbaren Kraftstoffe hinsichtlich der Betriebskosten und der direkten Schadstoff-Emissionen.
- Aufzeigen der positiven Effekte durch den Einsatz von Kraftstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen (Reduzierung oder Entfall der Mineralölsteuer gemäss Treibstoffökobilanz-Verordnung/ Reduktion CO<sub>2</sub>-Emissionen).
- Benennung der zu berücksichtigenden technischen Anforderungen bei der Umrüstung der Fahrzeuge.

Der Bereich Nachhaltigkeit (KOM-SMN-NH) erstellt aktuell eine CO<sub>2</sub>-Prognose zur Ableitung neuer Klimaschutzziele. Im Rahmen des weiterführenden Programms zur Umsetzung von Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgase ist der Einsatz alternativer Kraftstoffe mindestens konzernweit zu prüfen und abzustimmen.

## 5. Abschluss.

### Fragen und Diskussion

- Fragen zu den getroffenen Lösungen und deren Bewertung.
- Teilt Ihr die Einschätzungen zur Verwendbarkeit der Resultate?
- Gibt es weitere Projekte für welche die Erkenntnisse verwendet werden können?
- ...