



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 CO₂-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. CO₂-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

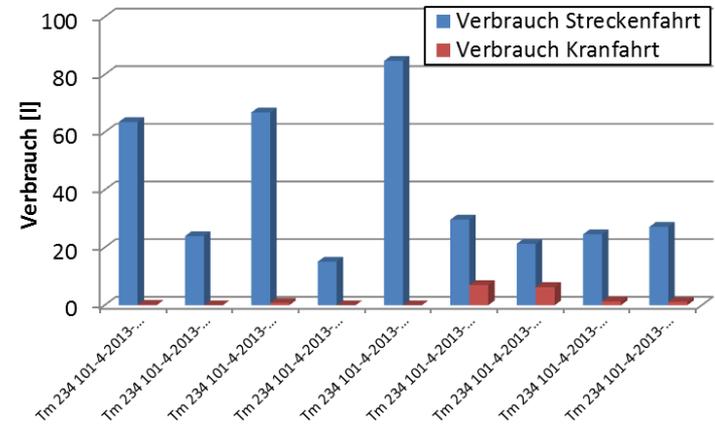
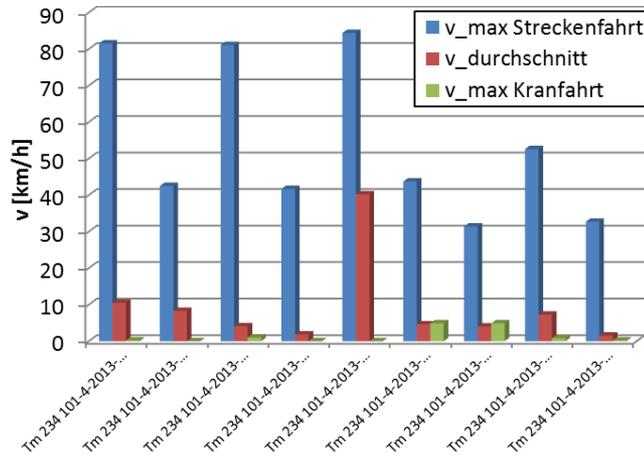
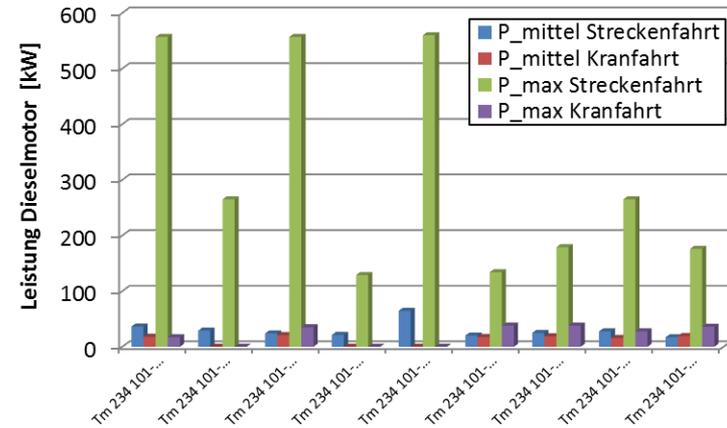
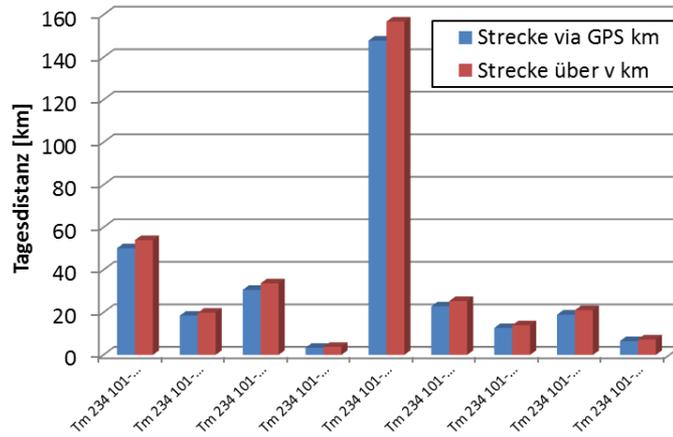
Referenzfahrzeug Tm 234	
Hauptantrieb	MTU Diesel, 550 kW
Stromerzeuger	Deutz Diesel 12,5 kVA elektrisch
Leistungsübertragung	Hydrostatisch
Zul. Gesamtgewicht	37 t
Leergewicht	30 t bzw. 37 t (3. Serie)
Fahrzeuganzahl	124



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 ₂ -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO ₂ / 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

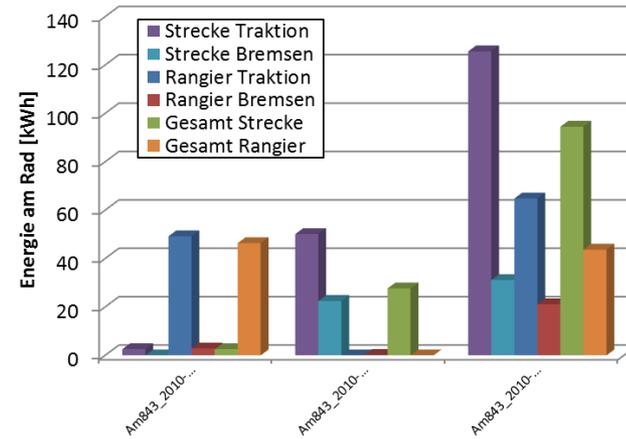
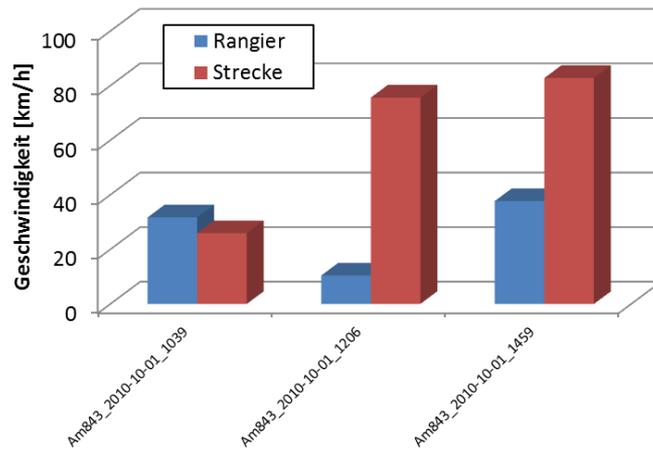
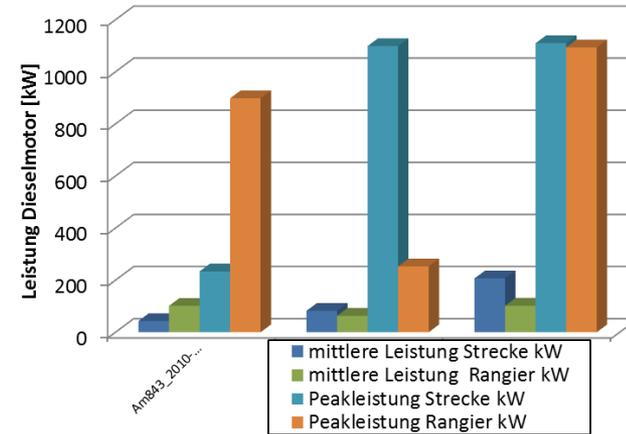
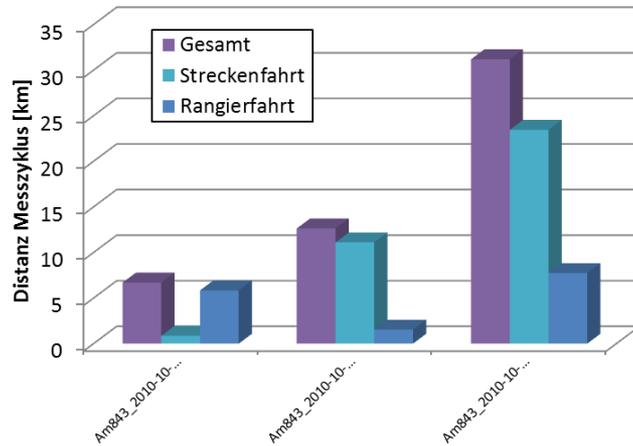
Referenzfahrzeug Am 843	
Hauptantrieb	Caterpillar Diesel, 1500 kW
Leistungsübertragung	Hydrodynamisch
Dienstmasse	80 t
Fahrzeuganzahl	76
Einsatzgebiete	Einzelwagenladungsverkehr (EWLV) Rangierverkehr (RV) Interventionsdienst



Baudienst	Rangierdienst	EWL	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

Flottenanalyse Am 843

Rangierdienst / EWL



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 ₂ -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO ₂ / 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 ₂ -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO ₂ / 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	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	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)

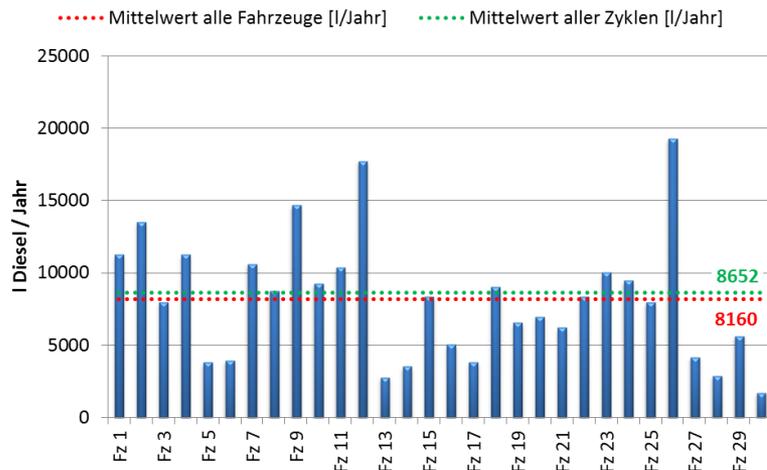


Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

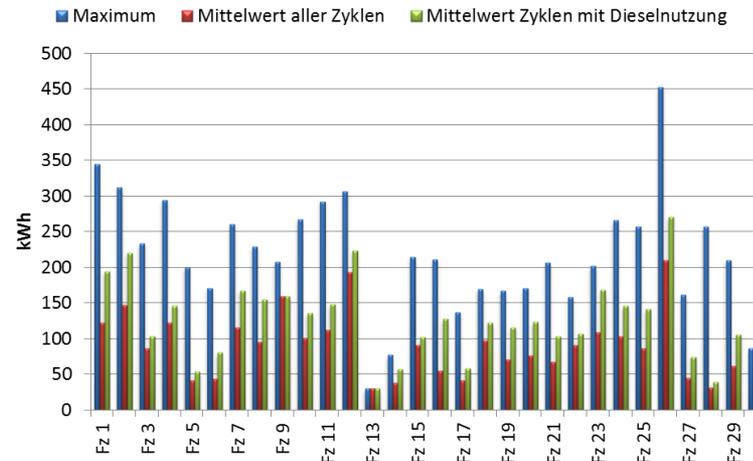
Flottenanalyse Eem 923

Einzelwagenladungsverkehr (EWLV)

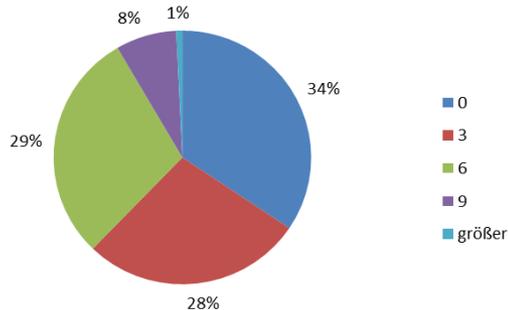
Mittlerer Jahresbedarf Diesel je Fahrzeug



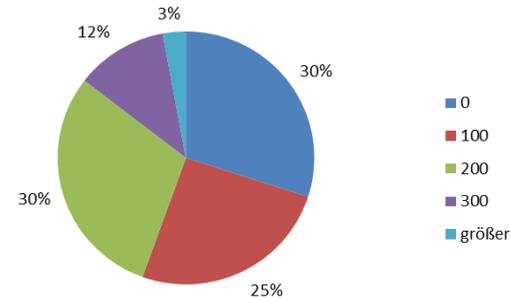
Elektr. Energie vom Diesel je Fahrzeug



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 ₂ -Ausstoß über 30 Jahre <small>(2,6145 kg CO₂ / l Diesel, nach BAFU)</small>	679 t
Mittlere Dieseldkosten über 30 Jahre <small>(bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2050 von 2,74 CHF/l)</small>	711.194 CHF



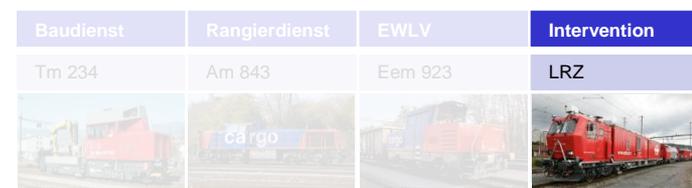
Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

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





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 ₂ -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO ₂ / 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

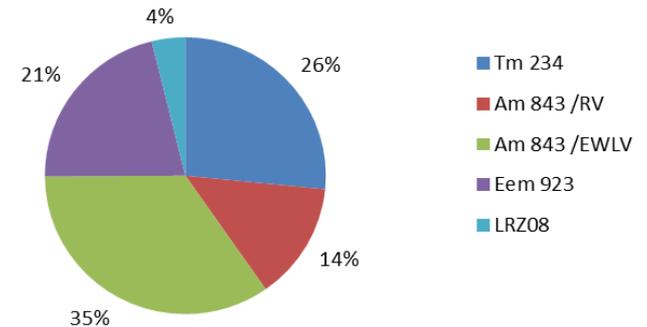
Zusammenfassung

Ergebnisse der Auswertung:

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

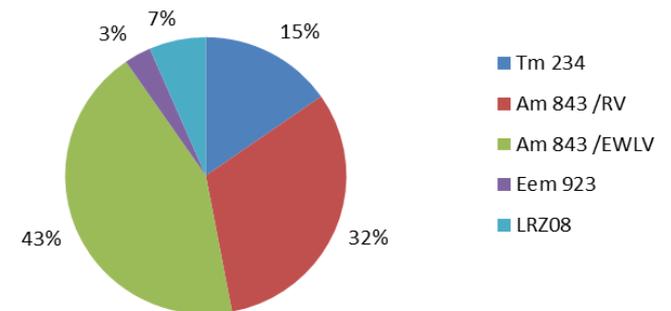
Fahrleistung über Einsatzjahre

Flotte gesamt: 131 Mkm



Dieserverbrauch über Einsatzjahre

Flotte gesamt: 253 MI



Inhalt / Gliederung

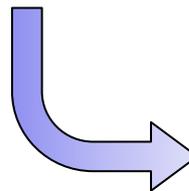
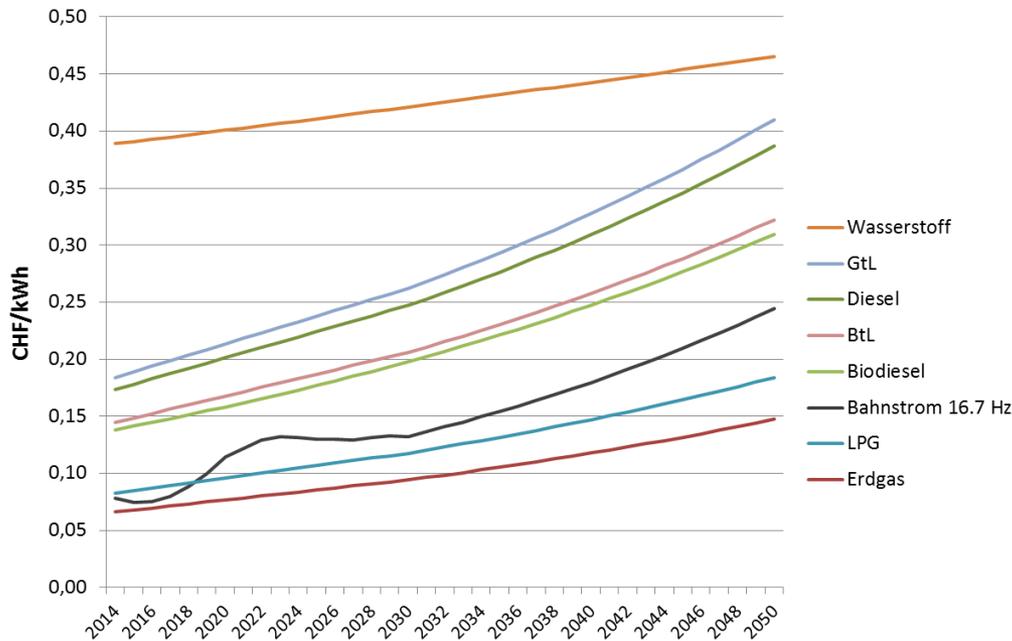
1. Vorgehensweise der Vorstudie
2. Flottenanalyse
- 3. Auslegungs- und Bewertungskriterien**
4. Alternative Antriebssysteme für SBB-Fahrzeuge
5. Handlungsempfehlungen





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
			



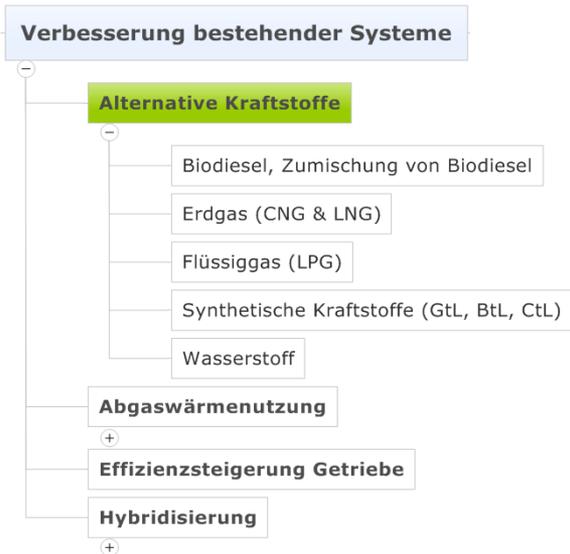
- Existierendes Antriebssystem bleibt weitgehend erhalten
- Effizienzsteigerung / Emissionsminderung durch zusätzliche Systeme oder Austausch bestehender Teilsysteme

- 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



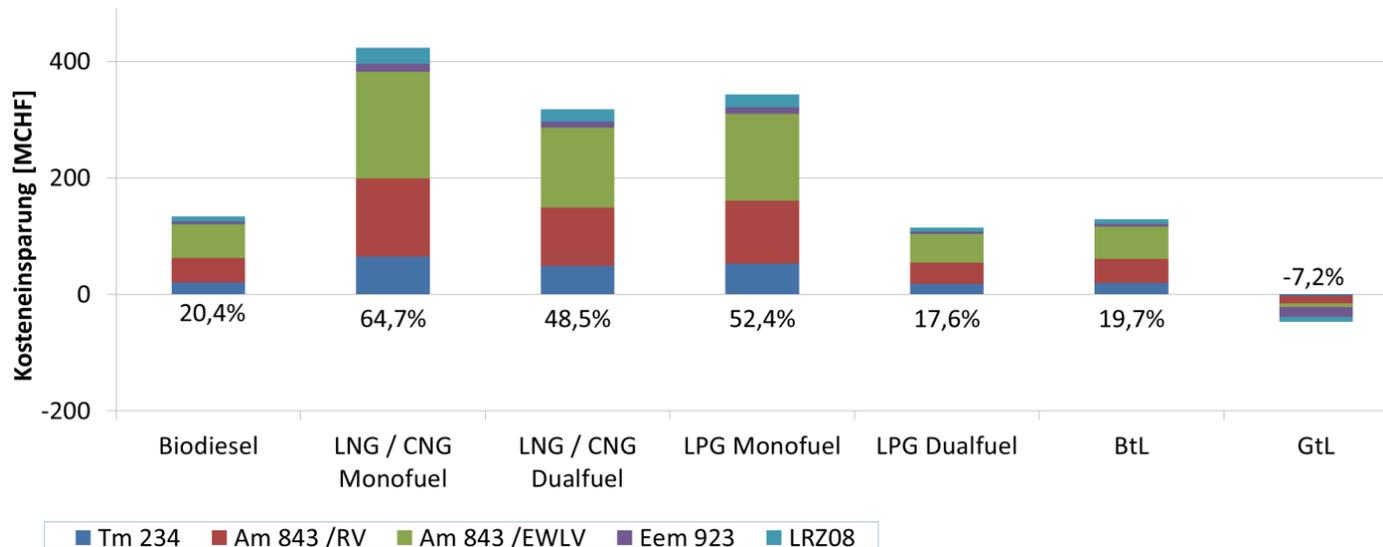


Bewertung der Antriebskonzepte

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
Kosten Energiebezug je 100 kWh am Rad [CHF]	104,0	84,0	88,0	112,0	36,0	52,0	21,4	113,2

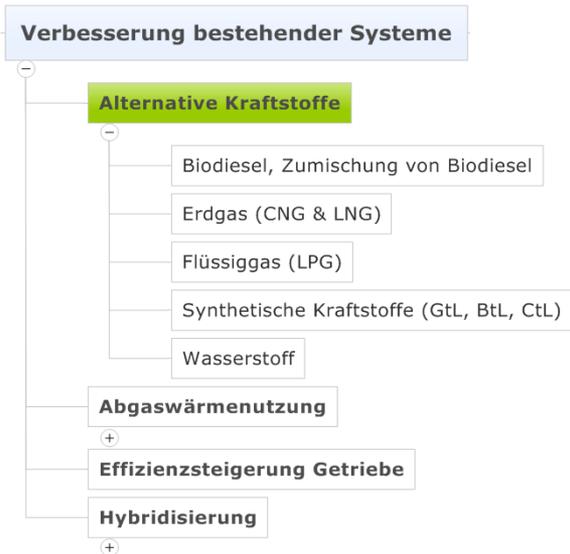
Prognose Preise in den Jahren 2030-2035



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

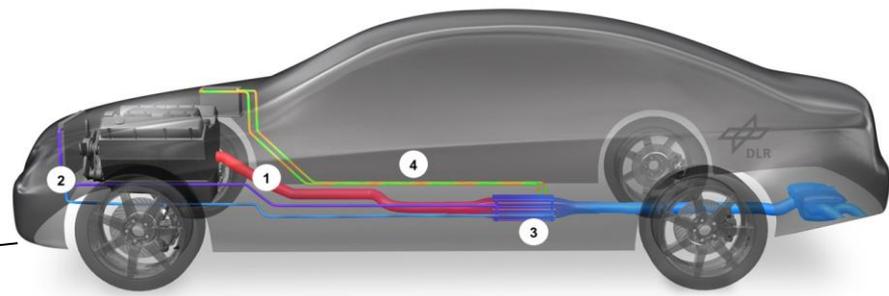
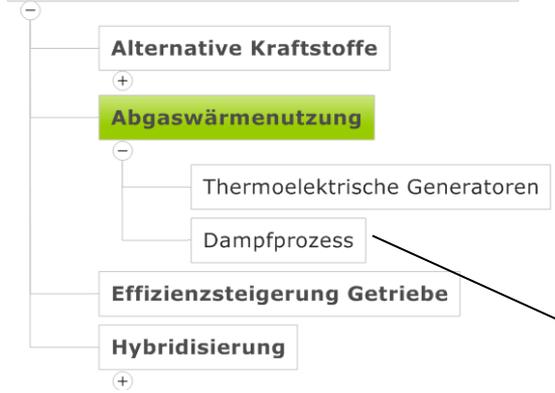
Nächste Schritte:

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

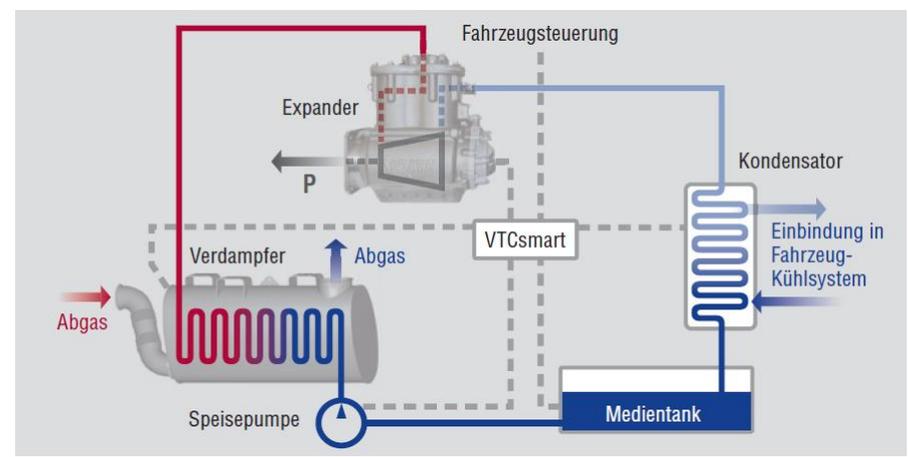


Alternative Antriebstechnologien

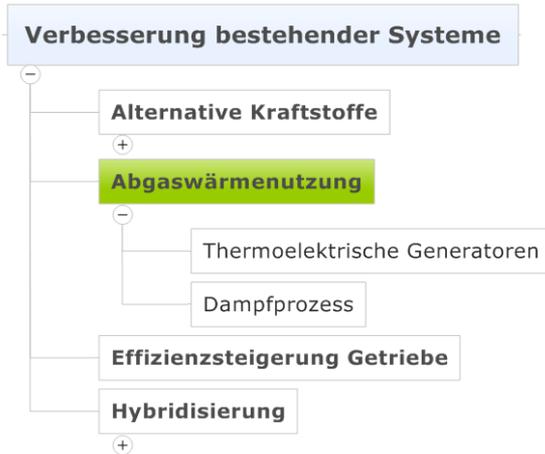
Verbesserung bestehender Systeme



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



Alternative Antriebstechnologien



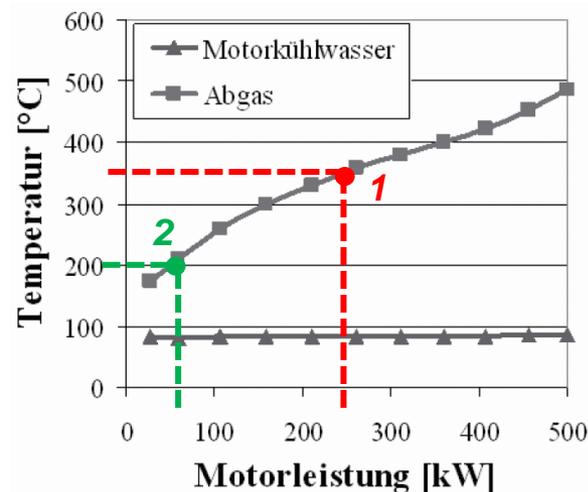
Carnot-Wirkungsgrad

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

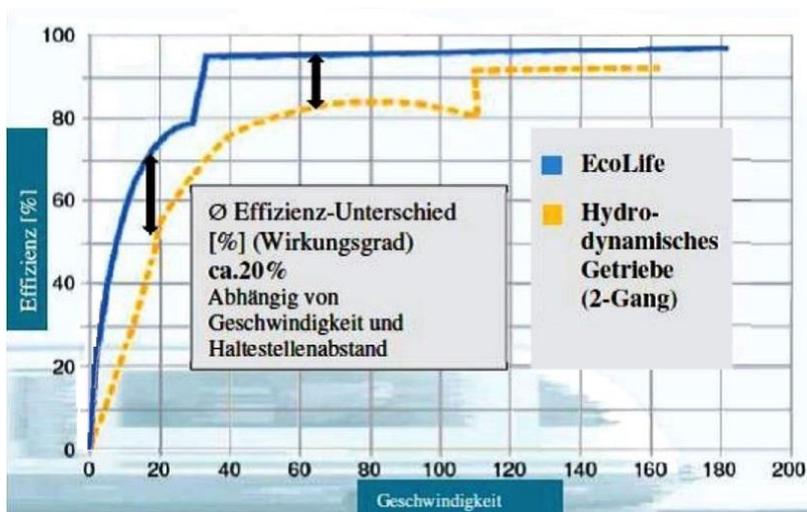
→ Leistungsverläufe Dieselmotor ermitteln



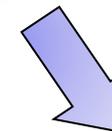
Alternative Antriebstechnologien

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**

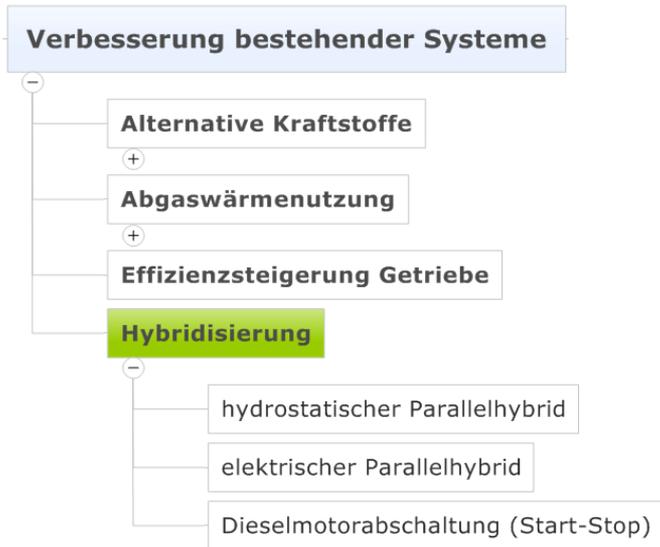
Intervention, Lösch- und Rettungsdienst

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

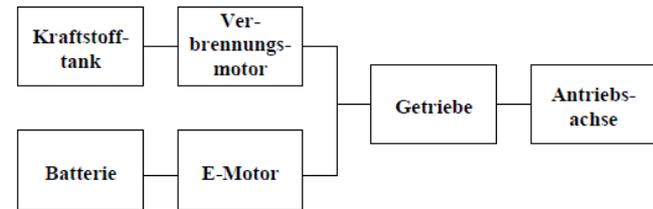
→ **Einsatz für Bestands- und Neufahrzeuge detailliert untersuchen**



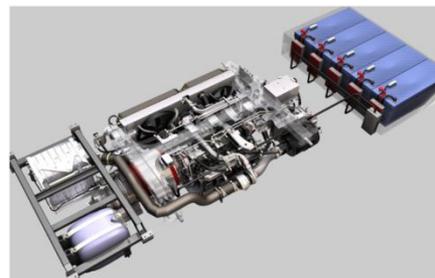
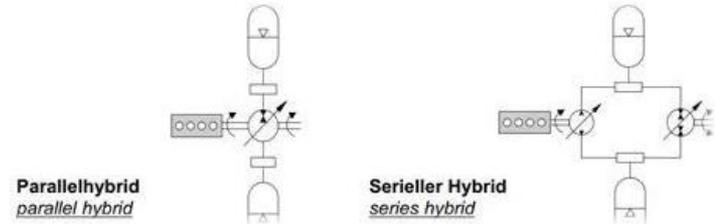
Alternative Antriebstechnologien



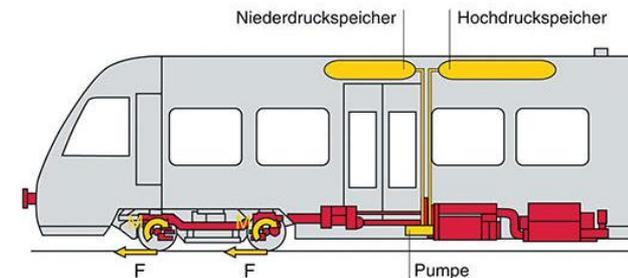
Parallelhybrid elektrisch



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

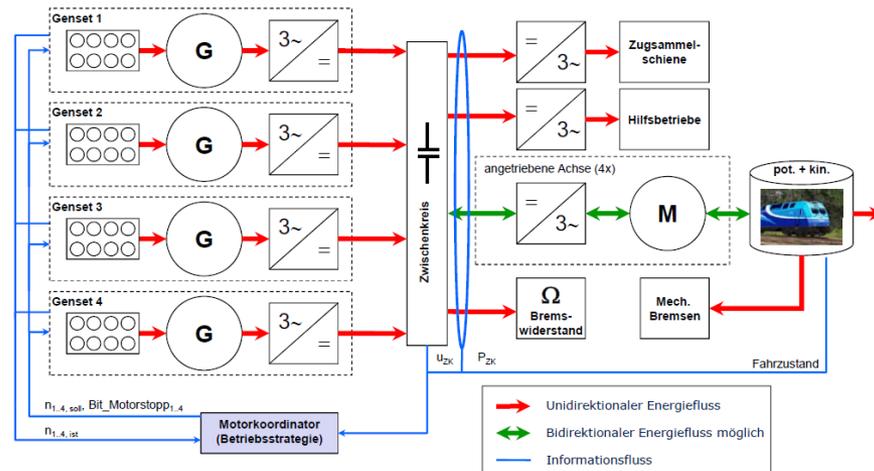
- Rekuperationspotential unbekannt, Einsparpotential nicht quantifizierbar
 - Elektrischer Parallelhybrid kann in Kombination mit Getriebetausch sinnvoll sein
 - Hohe Investitionskosten, Amortisation unklar
- ➔ **Datengrundlage verbessern**



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**



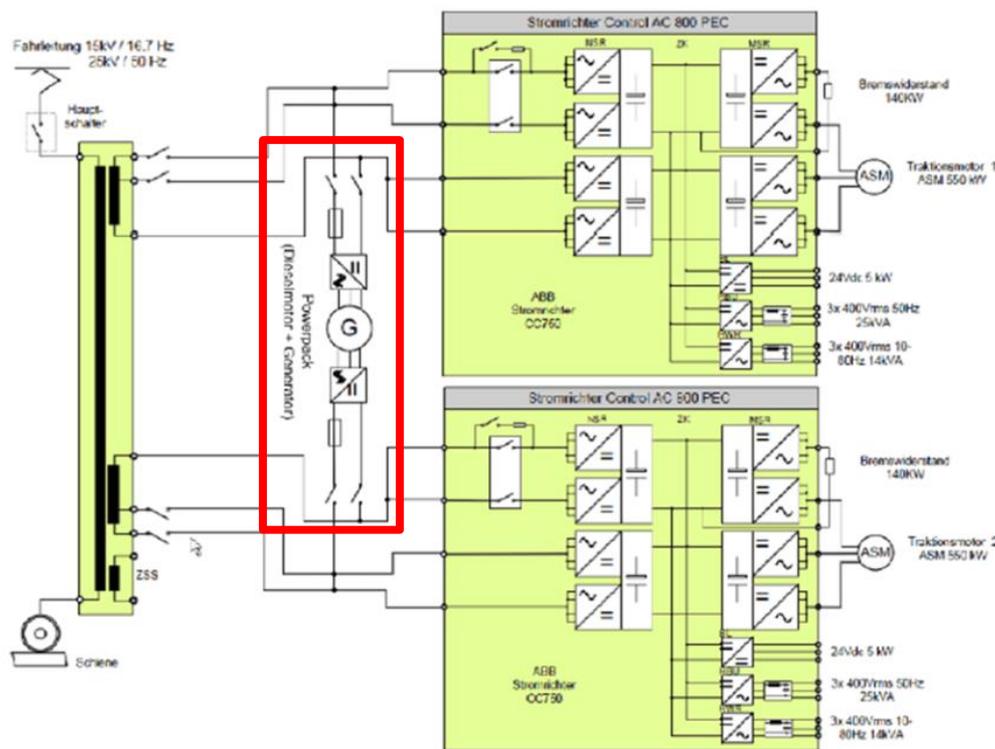
Alternative Antriebstechnologien

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 CO₂-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

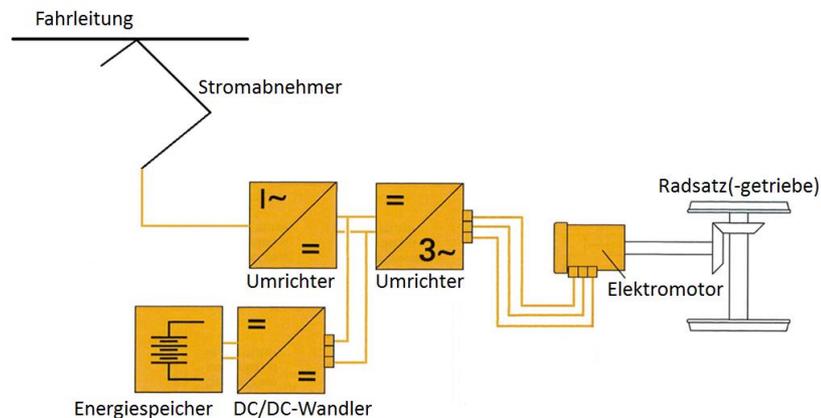
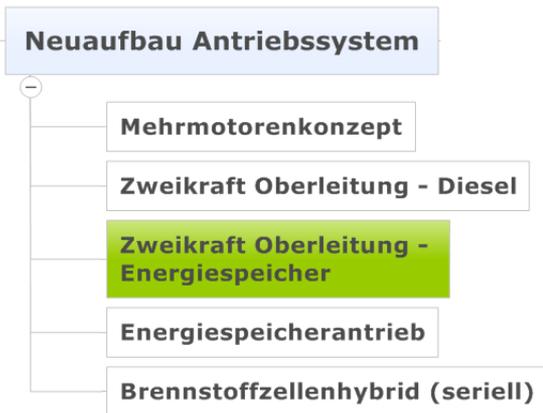
- ➔ **Konzept ist bereits umgesetzt**

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 CO2-Emissionen
- Oberleitungsverfügbarkeit nicht bekannt
- Tauschintervalle der Energiespeicher entscheidend für Wirtschaftlichkeit

→ Datengrundlage verbessern

→ Batterieauslegung mit Hersteller absichern

Einzelwagenladungsverkehr

- Energiekosten- und CO2-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

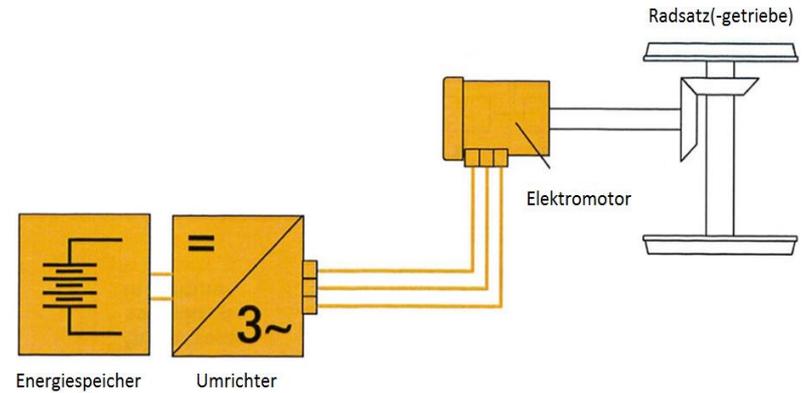
→ Konzept nicht weiter untersuchen



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, CO₂-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

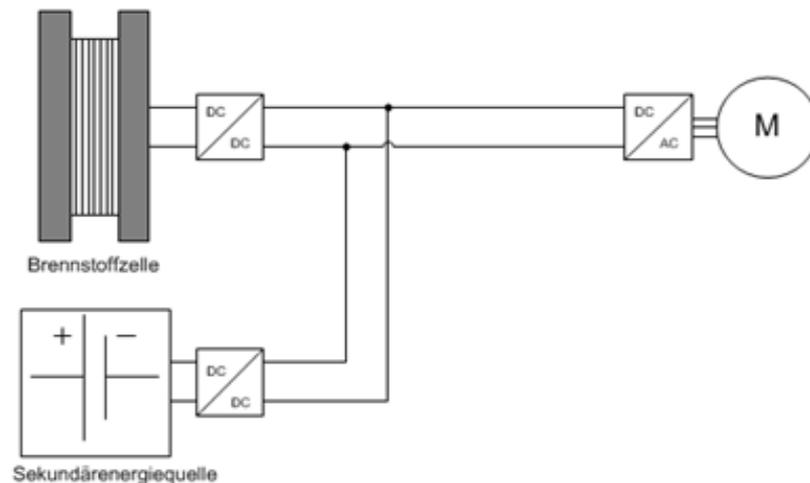
➔ Konzept nicht weiter untersuchen



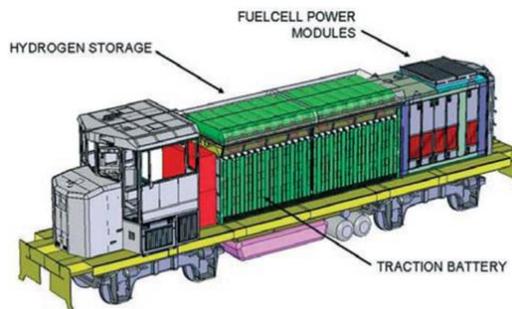
Alternative Antriebstechnologien

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 CO₂-Emissionen
 - Hohe Investitionskosten, Amortisation fraglich
- ➔ **Konzept detailliert untersuchen, wenn CO₂-freier Betrieb erforderlich ist**

Rangierdienst / Einzelwagenladungsverkehr

- Energiekosteneinsparung realisierbar
 - Keine direkten CO₂-Emissionen
 - Hohe Investitionskosten, Amortisation fraglich
- ➔ **Konzept detailliert untersuchen, wenn CO₂-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?



Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

Zusammenfassung Baudienst-Optionen

	Erstaus- rüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO ₂ -Emissionen je Fzg. über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
		[TCHF]	Dieselbedarf [m ³]	Energiekos- ten [TCHF]	
Status quo	?	312	805	815	
Alternative Kraftstoffe	?	?	?	?	→ Flottenstrategie erarbeiten
Start-Stop	?	248 -20%	640 (-165) -20%	648 -20%	Aufwand vergleichsweise gering → Für Bestands- und Neufahrzeuge detailliert untersuchen
Mehrmotoren- konzept	?	?	?	?	Verschiedene Varianten möglich → Für Neufahrzeuge detailliert untersuchen
Brennstoff- zellenhybrid	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 Fahrdrakt





Zusammenfassung Rangierverkehr-Optionen

	Erstaus- rüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO ₂ -Emissionen je Fzg. über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
		[TCHF]	Dieselbedarf [m ³]	Energiekos- ten [TCHF]	
Status quo	?	2.109	5.442	5.515	100% Rangierdienst
Alternative Kraftstoffe	?	?	?	?	→ Flottenstrategie erarbeiten
Zweikraft OL- Diesel**	850	843 (-1.266) -60%	2.918 (-2.524) -46%	2.206 (-3.309) -60%	Hoher Rangierbhf.-Elektrifizierungsanteil → Für Neufahrzeuge detailliert untersuchen
Zweikraft OL- Energie- speicher**	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
Brennstoff- zellenhybrid	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 EWL-Optionen

	Erstaus- rüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO ₂ -Emissionen je Fzg. über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
		[TCHF]	Dieselbedarf [m ³]	Energiekos- ten [TCHF]**	
Status quo	?	260	711 (nur Dieselanteil)	679	
Alternative Kraftstoffe	?	?	?	?	→ Flottenstrategie erarbeiten
Zweikraft OL- Energie- speicher	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

Baudienst	Rangierdienst	EWLV	Intervention
Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ
			

Zusammenfassung Intervention-, LRZ - Optionen

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

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 CO₂-Emissionen).
- Benennung der zu berücksichtigenden technischen Anforderungen bei der Umrüstung der Fahrzeuge.

Der Bereich Nachhaltigkeit (KOM-SMN-NH) erstellt aktuell eine CO₂-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?
- ...