



Alternative An- triebskonzepte für Rangier- und Bau- fahrzeuge

Vorstudie SBB

Deutsches Zentrum für Luft- und Raum-
fahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte

Prof. H. E. Friedrich

Pfaffenwaldring 38-40

D-70569 Stuttgart, GERMANY

Tel +49 (0)711/6862-256

Fax +49 (0)711/6862-258

Name Marcus Hoffmann

Tel 030 67055 626

Fax 030 67055 283

E-Mail marcus.hoffmann@dlr.de

Titel	Vorstudie SBB
Schlüsselwörter	Dieseltraktion, Alternative Antriebstechnologien, CO ₂ , Treibstoffverbrauch
Zugänglichkeit	Öffentlich
Autoren	Marcus Hoffmann, Holger Dittus, Johannes Pagenkopf, Mathias Böhm
Dateiname	Vorstudie_SBB_BAV.docx
FK: Review durch	Dr. Joachim Winter
FK: Freigegeben durch	Prof. Dr. Horst E. Friedrich
Unterschrift:	
Gedruckt am	18.03.2015
Änderungen:	Einarbeitung Anträge BAV

Das BAV hat die Erstellung der folgenden Studie unterstützt. Sie gibt die Stellung der Autoren - und nicht des BAV - wider.

Inhaltsverzeichnis

0	Executive Summary	1
1	Einleitung	5
1.1	Motivation / Hintergrund.....	5
1.2	Ziele der Vorstudie	6
1.3	Rahmenbedingungen und Abgrenzungen der Vorstudie.....	7
1.4	Projektorganisation, beteiligte Stellen und Projektablauf.....	7
2	Definition Referenzfahrzeuge und Einsatzszenarien	9
2.1	Verwendete Kostenelemente.....	9
2.2	Energiepreise	11
2.3	Baudienst.....	12
2.3.1	Referenzfahrzeug Tm 234	12
2.3.2	Typische Randbedingungen	15
2.3.3	Auswertung Referenzzyklen	15
2.4	Rangierdienst und Einzelwagenladungsverkehr.....	17
2.4.1	Referenzfahrzeug Am 843	17
2.4.2	Typische Randbedingungen	19
2.4.3	Auswertung Referenzzyklen	19
2.5	Einzelwagenladungsverkehr.....	21
2.5.1	Referenzfahrzeug Eem 923	21
2.5.2	Typische Randbedingungen	23
2.5.3	Auswertung Referenzzyklen	23
2.6	Intervention.....	26
2.6.1	Referenzfahrzeug LRZ 08.....	26
2.6.2	Typische Randbedingungen	27
2.6.3	Auswertung Referenzzyklen	28
2.7	Zusammenfassung	28
3	Stand der Technik Energiespeicher & -wandler	30
3.1	Energiespeicher.....	32
3.1.1	Elektrochemische Energiespeicher.....	35

3.1.2	Elektrostatische Energiespeicher	44
3.1.3	Schwungmassenspeicher	45
3.1.4	Hydraulikspeicher	46
3.1.5	Vergleich realisierter Energiespeichersysteme	50
3.2	Verbrennungsmotoren und alternative Kraftstoffe	51
3.2.1	Luftschadstoffe und Emissionsgrenzwerte	51
3.2.2	Konventionelle Dieselmotoren	53
3.2.3	Verbrennungsmotoren mit alternativen Kraftstoffen	55
3.2.4	Vergleich alternativer Kraftstoffe	66
3.3	Brennstoffzelle	70
4	Alternative Antriebskonzepte	72
4.1	Energiespeicherantrieb	72
4.2	Mehrmotorentechnologie	73
4.3	Abgaswärmenutzung bei Dieselmotoren	74
4.3.1	Thermoelektrischer Generator - TEG	74
4.3.2	Thermodynamischer Kreisprozess	76
4.4	Zweikraftfahrzeuge	78
4.4.1	Zweikraft Oberleitung – Diesel	78
4.4.2	Zweikraft Oberleitung – Energiespeicher	78
4.5	Verbrennungsmotorhybrid	79
4.5.1	Parallelhybrid elektrisch	79
4.5.2	Serieller Hybrid elektrisch	80
4.5.3	Hydraulischer Hybrid	81
4.6	Brennstoffzellenhybrid	83
4.7	Hydraulische Leistungsübertragung	84
5	Bewertung alternativer Antriebskonzepte	88
5.1	Bestandsfahrzeuge	89
5.1.1	Tm 234	89
5.1.2	Am 843	93
5.1.3	Eem 923	95
5.1.4	LRZ 08	102

5.2	Neufahrzeuge	107
5.2.1	Baudienst	107
5.2.2	Rangierverkehr	115
5.2.3	Einzelwagenladungsverkehr	128
5.2.4	Lösch- und Rettungsdienst	130
6	Empfehlungen für eine detaillierte Betrachtung und mögliche Pilotversuche	133
6.1	Alternative Kraftstoffe	133
6.2	Parallelhybrid elektrisch	135
6.3	Mehrmotorenkonzept	136
6.4	Zweikraft OL-Diesel	136
6.5	Zweikraft OL-Energiespeicher	136
6.6	Brennstoffzellenhybrid	137
6.7	Effizienzsteigerung durch Getriebetausch	138
7	Literaturverzeichnis	139
8	Anhang	151
8.1	Elektrochemische Energiespeicher	151
8.2	Elektrostatische Energiespeicher	154
8.3	Schwungmassenspeicher	157
8.4	Abgaswärmenutzung	160
8.5	Brennstoffzellen	164
8.6	Alternative Antriebe in Schienenfahrzeugen	165
8.6.1	MTU Hybrid Powerpack	165
8.6.2	Alstom H3 Lokomotivplattform	166
8.6.3	Hybrid Locomotive von GE Transportation	167
8.6.4	Hitachi Hybrid Diesel Train	167
8.6.5	New Energy Train von JR East	168
8.6.6	„Green Goat“/ BNSF Railway	169
8.6.7	Siemens Vectron - Mehrsystemlokomotive	170
8.6.8	Alstom Lirex Experimental	170
8.6.9	Voith Turbo Eco Pack	171

8.6.10	BNSF-Railway Lokomotiven mit LNG-Antrieb.....	172
8.7	Wasserstoffgewinnung	173
8.8	Energiepreise	174

Abkürzungsverzeichnis

ABB	Asea Brown Boveri
ALPS	Advanced Locomotive Propulsion System /fortschrittliches Lokantriebssystem
AWN	Abgaswärmenutzung
BAV	Bundesamt für Verkehr
BNSF Railway	Burlington Northern and Santa Fe Railway
BMS	Batteriemanagementsystem
BMW	Bayerische Motoren Werke
BtL	Biomass to Liquid / Biomasseverflüssigung
BR	Baureihe
BZ	Brennstoffzelle
CNG	Compressed natural gas / komprimiertes Erdgas
CtL	Coal to Liquid / Kohleverflüssigung
DB	Deutsche Bahn
DC	direct current / Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIWA	Differential-Wandler
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DM	Dieselmotor
DoD	Depth of Discharge / Entladetiefe
DSK	Doppelschichtkondensator
EPA	Environmental Protection Agency / US- Umweltschutzbehörde
EU	Europäische Union
EWLV	Einzelwagenladungsverkehr
FAME	Fatty acid methyl ester / Fettsäuremethylester
Genset	Dieselmotorgeneratorsatz
GtL	Gas to Liquid / Gasverflüssigung
HC	Hydro carbons / Kohlenwasserstoffe

LFP	Lithium-Eisen-Phosphat-Batterie
LNG	Liquefied natural gas / verflüssigtes Erdgas
LKW	Lastkraftwagen
LPG	Liquefied Petroleum Gas / Flüssiggas
LRV	light rail vehicle / Straßen- oder Stadtbahn
LRZ	Lösch- und Rettungszug
MTU	Motoren- und Turbinen-Union Friedrichshafen
NaNiCl	Natrium Nickel Chloride / Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCd	Nickel Cadmium / Nickel-Kadmium-Batterie
NiMH	Nickel Metal Hydride / Nickel-Metallhydrid-Batterie
NMC	Lithium Nickel Mangan Cobalt / Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Batterie
ORC	Organic-Rankine-Cycle / organischer Rankine Kreisprozess
OL	Oberleitung
PEM	Proton Exchange Membrane / Protonen-Austausch-Membran
PM	Particulate matter / Partikelemission
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals / Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
RV	Rangierverkehr
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SCR	Selective catalytic reduction / selektive katalytische Reduktion
SMS	Schwungmassenspeicher
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français
SOC	State of Charge / Ladezustand
TEG	Thermoelektrischer Generator

TRL	Technology Readiness Level / technologischer Reifegrad
TtW	Tank to Wheel / Kraftstofftank zum Rad
TrÖbiV	Treibstoffökobilanz-Verordnung
UIC	Union internationale des chemins de fer / Internationaler Eisenbahnverband
UN	United Nations / Vereinte Nationen
VDB	Verband der Bahnindustrie
VT	Verbrennungstriebwagen
WtW	Well to Wheel / Quelle zum Rad
XtL	X to Liquid / Verflüssigung von Kohlenwasserstoffen
ZEBRA	Zero Emission Battery Research Activities / Null Emissionen Batterieforschungsaktivitäten
ZK	Zwischenkreis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Dieseltraktor Tm 234	13
Abbildung 2.2: Z-v-Diagramm Tm 234 (2)	14
Abbildung 2.3: Rangierlokomotive Am 843.....	17
Abbildung 2.4: Zweikraftlokomotive Eem 923.....	22
Abbildung 2.5: Häufigkeitsverteilung Betriebsstunden Dieselmotor	25
Abbildung 2.6: Maximal- und Mittelwerte der vom Dieselmotor bereitgestellten elektrischen Energie je Fahrzeug	26
Abbildung 2.7: Lösch- und Rettungszug LRZ 08	27
Abbildung 3.1: Reifegradbewertung Technology Readiness Level nach (6)	31
Abbildung 3.2: Modell zur Bewertung des Schadensausmasses nach DIN EN 50126	31
Abbildung 3.3: Modell zur Bewertung der Gefährdungshäufigkeit nach DIN EN 50126	32
Abbildung 3.4: Übersicht Speicherarten	33
Abbildung 3.5: Leistungs- und Energiedichte verschiedener Energiespeicher auf Zellebene (7)	34
Abbildung 3.6: Ragone-Diagramm für NiCd und NiMH Batterien (8).....	34
Abbildung 3.7: Vergleich von Energiespeichern auf Zell- und Systemebene	35
Abbildung 3.8: Prinzip einer Hydraulikspeicheranwendung.....	47
Abbildung 3.9: Max. Volumennutzungsgrad verschiedener Hydrospeicher (27) ..	47
Abbildung 3.10: Kennlinien für Hydrospeicher (29)	48
Abbildung 3.11: Schadstoffemissionsgrenzwerte in der EU und Schweiz (40)	52
Abbildung 3.12: Abschätzung Wasserstofferzeugungskosten nach Produktionsverfahren (76).....	65
Abbildung 3.13: Energiedichtenvergleich alternativer Kraftstoffe nach (56) (57) (60) (69) (80) (81)	67
Abbildung 3.14: Energiedichtevergleich alternativer Kraftstoffe auf Tank- / Energiespeicherebene (60) (74) (81)	68
Abbildung 3.15: Direkte Kohlenstoffdioxid-Emission verschiedener Kraftstoffe (83) (84).....	69
Abbildung 4.1: Prinzipdarstellung Energiespeicherantrieb nach (31)	72
Abbildung 4.2: Prinzipdarstellung Mehrmotorenttechnologie (87)	73
Abbildung 4.3: Prinzipskizze thermoelektrisches Modul (88).....	75

Abbildung 4.4: Prinzipschaubild Fahrzeugintegration (88)	75
Abbildung 4.5: Prinzipschaubild einer thermodynamischen Kreisprozessanwendung (94)	77
Abbildung 4.6: Prinzipdarstellung Zweikraft mit Stromabnehmer und Energiespeicher nach (31)	79
Abbildung 4.7: Schematische Darstellung eines Parallelhybrids (97).....	80
Abbildung 4.8: Schematische Darstellung eines seriellen Hybrids (97).....	81
Abbildung 4.9: hydraulische Hybridsystemstrukturen (98)	81
Abbildung 4.10: Mögliche Antriebsarchitektur mit einem Brennstoffzellensystem und einem zusätzlichen Energiespeicher	84
Abbildung 4.11: Vergleich von hydromechanischen und hydrodynamischen Getriebesystemen nach (104)	87
Abbildung 5.1: Dieseldieselgeneratoreinheit der Eem 923	97
Abbildung 5.2: Schnittzeichnung der Eem 923.....	97
Abbildung 5.3: Einsparungen LRZ über Lebensdauer.....	102
Abbildung 6.1: Kraftstoffkosteneinsparung der betrachteten Flotte gegenüber Diesel über Lebensdauer	134
Abbildung 6.2: Reduzierung direkte CO ₂ -Emissionen der betrachteten Flotte ggü. Diesel über Lebensdauer	135
Abbildung 8.1: Prinzip der Energiespeicherung in einem galvanischem Element (109).....	151
Abbildung 8.2: Beispiel der Entladecharakteristik einer Batterie (110)	152
Abbildung 8.3: Zyklfestigkeit einer Batterie als Funktion der Entladetiefe (111)	153
Abbildung 8.4: Entlade-Temperaturcharakteristik (1C) einer Sanyo LCO-Zelle (12)	153
Abbildung 8.5: Aufbau eines Doppelschichtkondensators (109)	154
Abbildung 8.6: Energieinhalt eines DSK als Funktion der Spannung.....	155
Abbildung 8.7: Kapazität und Innenwiderstand eines DSK in Abhängigkeit von der Temperatur (21)	156
Abbildung 8.8: Lebensdauer eines DSK in Abhängigkeit der Zellspannung und der Betriebstemperatur (21)	157
Abbildung 8.9: Aufbau eines Schwungmassenspeichers	158
Abbildung 8.10: Lade- und Entladekennlinie eines SMS.....	159
Abbildung 8.11: Energieströme eines Dieselfahrzeugs im Nennleistungspunkt (115).....	161

Abbildung 8.12 Exergiebilanz Dieselmotor im Nennleistungspunkt (88)	161
Abbildung 8.13 Temperaturverläufe über der Motorleistung (88)	163
Abbildung 8.14: Vergleich von Brennstoffzellensystemen (Betriebstemperatur) 164	
Abbildung 8.15: Vergleich von Brennstoffzellensystemen (Elektrolyt) (116)	165
Abbildung 8.16: Konfigurationen der Alstom H3 (119)	166
Abbildung 8.17: Hitachi Hybrid HST (123).....	168
Abbildung 8.18: Schematische Darstellung des seriellen Diesel-Hybrid-Antriebssystem JR East (125).....	168
Abbildung 8.19: Schematische Darstellung des Brennstoffzellen-Antriebssystem JR East (125)	169
Abbildung 8.20: Anordnung Brennstoffzelle, Wasserstoffdruckbehälter, Batterien (126).....	170
Abbildung 8.21: Antriebssystem eines Lirex-Halbzuges (127)	171
Abbildung 8.22: Prinzipieller Aufbau und Hydraulikschaltplan des Voith Turbo Eco Pack (128).....	172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Haupt-Kostengruppen neuer Antriebskonzepte, rot umrahmt sind die in dieser Studie näher untersuchten Kostengruppen.....	10
Tabelle 2.2: Angesetzte mittlere Energiepreise für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen (Nominalpreise).....	12
Tabelle 2.3: Daten Dieselmotor Tm 234 nach (2).....	13
Tabelle 2.4: Zusammenfassung Baudienst-Messdaten.....	16
Tabelle 2.5: Daten Dieselmotor Am 843 nach (3).....	18
Tabelle 2.6 Zusammenfassung Am 843 Rangierverkehr-Messdaten für 9h-Betriebstag	20
Tabelle 2.7 Zusammenfassung Am 843 Einzelwagenladungsverkehr-Messdaten für einen 9h-Betriebstag	21
Tabelle 2.8 Zusammenfassung Eem 923 Einzelwagenladungsverkehr-Messdaten	24
Tabelle 2.9: Zusammenfassung Referenzzyklen LRZ 08.....	28
Tabelle 2.10: Zusammenfassung der Referenzzyklen	29
Tabelle 3.1: Technische Daten NiCd-Batterien (8) (9) (10) (11).....	37
Tabelle 3.2: Technische Daten NiMH-Batterien (8) (10) (11) (12).....	38
Tabelle 3.3: Technische Daten der NaNiCl-Batterie auf Modulebene (12) (13) (14) (15) (16).....	39
Tabelle 3.4: Vergleich Lithium-basierte-Batteriesysteme (12) (18) (19) (20)	41
Tabelle 3.5: Gegenüberstellung elektrochemischer Energiespeicher auf Zellniveau (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (18) (19) (20)	43
Tabelle 3.6: Vergleich von realisierten Speichertypen auf Systemebene (33) (34) (35) (36) (37) (38).....	50
Tabelle 3.7: Emissionsfaktoren von Fahrzeugen der SBB (41)	53
Tabelle 3.8: Kennwerte Dieselmotoren und Diesel-Powerpacks (42) (43) (44) (45)	53
Tabelle 3.9: Kosten-Vergleich alternativer Kraftstoffe und Strom auf Fahrzeugebene (Dieselfahrzeug als Bezug)	69
Tabelle 4.1: Massenvergleich hydrodynamische und hydromechanische Getriebe	87
Tabelle 5.1 Betrachtete Antriebskonzepte nach Fahrzeug und Einsatzszenario..	88
Tabelle 5.2: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für Tm 234	89

Tabelle 5.3: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für Am 843	93
Tabelle 5.4: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für Eem 923	96
Tabelle 5.5: Systemauslegung Zweikraft OL-Energiespeicher Eem 923.....	99
Tabelle 5.6: Kosten für Jahresenergiebedarf Zweikraft OL-Energiespeicher Eem923.....	100
Tabelle 5.7: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für LRZ	103
Tabelle 5.8: Abschätzung Hauptkomponenten Zweikraftausrüstung Baudienst.	109
Tabelle 5.9: Energiekosten Baudienstfahrzeug für OL-D-Antrieb.....	110
Tabelle 5.10: Grobauslegung Brennstoffzellenantrieb Baudienst.....	112
Tabelle 5.11: Zusammenfassung Baudienst-Optionen.....	114
Tabelle 5.12: Abschätzung Hauptkomponenten Zweikraftausrüstung Rangierlok	117
Tabelle 5.13: Abschätzung der Einsparpotentiale OL-D-Verkehr / Rangierverkehr	118
Tabelle 5.14: Komponentenmassen des elektrischen Antriebssystems.....	120
Tabelle 5.15: Abschätzung der Einsparpotentiale OL-E-Verkehr / Rangierlok ...	120
Tabelle 5.16: Masse der Hauptkomponenten eines Energiespeicherantriebs für Am 843 bei Dimensionierung auf 1500 kW Nennleistung	123
Tabelle 5.17: Vergleich Antriebs- und Energiespeichersystem batterieelektrisch vs. dieselhydraulisch (107)	123
Tabelle 5.18: Grobauslegung (worst case) Brennstoffzellenantrieb Rangierverkehr	125
Tabelle 5.19: Zusammenfassung Rangierverkehr-Optionen	127
Tabelle 5.20: Zusammenfassung EWL-Optionen	129
Tabelle 5.21: Zusammenfassung Intervention-, LRZ-Optionen	132
Tabelle 8.1: Charakteristische Daten verschiedener SMS (34) (114) (26)	160

0 Executive Summary

Dieselbetriebene Fahrzeuge verursachen rund ein Drittel der CO₂-Emissionen des gesamten SBB-Konzerns, obwohl die SBB im Personenverkehr keine dieselbetriebenen Fahrzeuge einsetzt. Die Verursacher sind vorhandene Rangier-, Bau- und Spezialfahrzeuge.

Zur Reduzierung von CO₂-Emissionen, Treibstoffverbrauch und -kosten der dieselbetriebenen Fahrzeuge aus dem Baudienst, Rangierdienst, Einzelwagenladungsverkehr und von Intervention wurden zwei vielversprechende Handlungsansätze untersucht:

- die Verbesserung der Energieeffizienz existierender Fahrzeuge
- die Antriebselektrifizierung von Neufahrzeugen

Für die existierenden Fahrzeuge standen Messdaten aus dem Betrieb zur Verfügung, die zur Definition von Einsatz- und Energieprofilen für die Auslegung alternativer Antriebskonzepte ausgewertet wurden. Für die Einsatzprofile wurden prinzipiell geeignete Konzepte identifiziert, die technische Machbarkeit untersucht und Potentiale zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und Kraftstoffkosten bewertet. Dabei wurden betrachtet:

- Alternative Treibstoffe, auch aus nachwachsenden Rohstoffen
- Effizienzsteigerung durch Nutzung von Abgaswärme
- Mehrmotorenantrieb
- Verbrennungsmotor-Hybridantriebe
- Reiner Energiespeicherantrieb
- Brennstoffzellen-Hybridantrieb
- Zweikraftantriebe in den Kombinationen Oberleitung-Energiespeicher und Oberleitung-Dieselmotor

Für alle dieselbetriebenen Fahrzeuge ergab sich, dass die Umstellung auf elektrische Traktionsenergie große Kosten- und CO₂-Einsparpotentiale bietet. In Bestandsfahrzeugen, bei denen eine Elektrifizierung nicht oder nur schwer umgesetzt werden kann, lassen sich durch Preis- und Steuervorteile auch beim

Einsatz von Gas- und Biotreibstoffen Energiekosten und CO₂-Emissionen reduzieren.

Für die existierenden Baudienstfahrzeuge vom Typ Tm 234 kann eine Start-Stop-Funktion zur Vermeidung des Leerlaufverbrauchs mit relativ geringem Aufwand mit der bereits vorhandenen Diesel/Generatoreinheit umgesetzt werden. Von den für Baudienst untersuchten Antriebskonzepten für Neufahrzeuge stellt das Mehrmotorenkonzept kurz- bis mittelfristig einen vielversprechenden Lösungsansatz dar. Längerfristig ist der Brennstoffzellenhybrid das einzige Konzept, das über mehrere Tage CO₂- und emissionsfreien Betrieb ohne Oberleitung oder Zwischenladen eines Energiespeichers ermöglicht.

Im Rangierdienst zeigen die Zweikraftkonzepte Oberleitung-Diesel bzw. Oberleitung-Energiespeicher großes Potential zur Reduzierung der Energiekosten und der CO₂-Emissionen. Die Wirtschaftlichkeit der Kombination mit einem Energiespeicher kann aufgrund großer Unsicherheiten bei der Dimensionierung und Lebensdauer der Energiespeicher nicht abschließend bewertet werden. Generell liegen bisher wenig praktische Erfahrungen mit Traktionsenergiespeichern in Schienenfahrzeugen vor. Dadurch bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich ihres Verhaltens im Eisenbahnbetrieb. Um dem zu begegnen, wird empfohlen, auf Basis konkreter Leistungsprofile die Auslegung für den Rangierdienst weiter zu detaillieren und von Energiespeicherherstellern verbindliche Angaben zu Lebensdauer und Kosten ihrer Produkte einzuholen. Für die technische Umsetzung sollten Energiespeicher zunächst im Rahmen von Pilotprojekten getestet werden, bevor im schweren Rangierverkehr große Mengen teurer Energiespeicher eingesetzt werden.

Wird für neue Rangierfahrzeuge ein von der Oberleitung vollständig unabhängiger Betrieb gefordert, dann stellt das Mehrmotorenkonzept - auch in Kombination mit alternativen Kraftstoffen - eine Möglichkeit zur Reduzierung von Verbrauch und Emissionen dar. Soll der Rangierbetrieb nicht nur Oberleitungs- sondern auch CO₂-frei sein, dann ist von den untersuchten Antriebskonzepten

allein der Brennstoffzellenhybrid in der Lage, Mehrschichtbetrieb über mehrere Tage ohne Zwischenladen oder Nachtanken durchzuführen.

Im Einzelwagenladungsverkehr können die CO₂-Emissionen der Eem 923 durch das Zweikraftkonzept Oberleitung - Energiespeicher gänzlich vermieden und gleichzeitig Energiekosten eingespart werden, obwohl bereits der überwiegende Teil der Traktionsarbeit unter Oberleitung stattfindet. Es wird daher empfohlen, das Konzept des Zweikraftfahrzeugs Oberleitung-Energiespeicher weiter voranzutreiben. Dazu sollte die Dimensionierung des Energiespeichers anhand von tatsächlichen Leistungsverläufen mit Berücksichtigung der Nachlademöglichkeiten optimiert und die Auslegung der Systemkomponenten weiter konkretisiert werden. Es ist zu untersuchen, ob und wie die Energiespeicher thermisch konditioniert werden müssen und welcher Aufwand hierfür entsteht, außerdem muss zwischen direkter Anbindung an den Zwischenkreis oder Verwendung eines DC/DC-Wandlers entschieden werden. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten bei den Batteriekennwerten kann die Charakterisierung einzelner Energiespeichermodule am Prüfstand weiter zur Absicherung des Konzepts beitragen, bevor mit Packaging-Untersuchungen eine Integration ins Fahrzeug vorbereitet wird.

Mit den vorliegenden Daten war für Lösch- und Rettungszüge nur eine qualitative Betrachtung möglich. Für das Bestandsfahrzeug LRZ 08 wird die Analyse der Kosten einer Umrüstung auf hydromechanische Getriebe empfohlen, da hier gegenüber hydrodynamischen Getrieben ein Kraftstoffeinsparpotential von mehr als 15 % in Aussicht gestellt wird und eine Verkleinerung der Getriebe-massen realisierbar ist. Bei Neufahrzeugen wird ebenfalls empfohlen, den Einsatz hydromechanischer Getriebe zu forcieren. Eine darauf aufbauende Option stellt die Hybridisierung des Antriebsstrangs dar. Diese geht aber mit Mehrkosten einher, deren Amortisation mit der vorhandenen Datengrundlage nicht ausreichend bewertet werden konnte.

Im Vergleich der Energiekosten alternativer Treibstoffe bieten Erdgas und Flüssiggas das größte Einsparpotential. Biodiesel und biomassebasierter syn-

thetischer Kraftstoff (BtL) stellen ebenfalls reduzierte Energiekosten in Aussicht. Ein Vorteil von Biodiesel und den synthetischen Kraftstoffen BtL, CtL und GtL ist, dass existierende Betankungsinfrastruktur weitgehend unverändert beibehalten werden kann. Bei gasförmig gespeicherten Kraftstoffen ist dagegen eine neue Betankungsinfrastruktur aufzubauen. Außerdem kann es bei gasförmig gespeicherten Kraftstoffen zu geringeren Fahrzeugreichweiten kommen, wenn kein zusätzlicher Bauraum für die Druckspeicher zur Verfügung steht.

Die Nutzung alternativer Treibstoffe sollte keine rein fahrzeugbasierte Entscheidung sein, sondern in einer langfristigen, flottenübergreifenden Kraftstoffstrategie umgesetzt werden. Dabei sind auch CO₂-Emissionen in der Kraftstoffherzeugung und die Kosten der Betankungsinfrastruktur zu berücksichtigen. Weiterführend wird empfohlen, die Investitionskosten für die Infrastruktur detailliert zu untersuchen und zu prüfen, ob über Insellösungen Erfahrungen mit den Kraftstoffen gesammelt werden können, um die flächendeckende Einführung im Rahmen einer langfristigen Kraftstoffstrategie abzusichern.

1 Einleitung

Zur Umsetzung der Energiestrategie 2050 des Bundes, respektive der Energiestrategie 2025 der SBB zur Senkung von Kraftstoff- bzw. Energiebedarf, und den damit verbundenen Zielen zur Reduzierung von Schadstoff- und CO₂-Emissionen, sind Potentiale zur Energieeffizienzsteigerung für dieselbetriebene Schienenfahrzeuge der SBB Infrastruktur und SBB Cargo zu ermitteln. Den Zielen kann z.B. durch Einsatz alternativer Kraftstoffe, durch Hybridisierung des Antriebsstrangs, durch Nutzung von Abgaswärmeströmen oder durch die Substitution von Verbrennungsmotoren durch Brennstoffzellen oder Energiespeicher und durch die Nutzung der Oberleitung näher gekommen werden. Grundsätzlich haben diese Konzepte das Potential, die Ökobilanz der Fahrzeuge zu verbessern. Bei der Ermittlung der Potentiale zur Energieeffizienzsteigerung erfordert es eine eigens auf jeden Fahrzeugtyp abgestimmte Lösung.

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050) fördert das Bundesamt für Verkehr (BAV) Projekte zur Steigerung der Energieeffizienz. Die SBB wurde bei der Erarbeitung vorliegender Forschungsarbeit vom Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unterstützt.

1.1 Motivation / Hintergrund

Die wesentlichen Ziele, welche die Energiestrategie im öffentlichen Verkehr (ESöV) 2050 durch das Bundesamt für Verkehr verfolgt und in dieser Vorstudie untersucht werden sind:

- Die Steigerung der Energieeffizienz
- Die Reduktion des CO₂-Ausstosses durch Senkung der Verbräuche von fossilen Treibstoffen

Obwohl die SBB keine dieselbetriebenen Fahrzeuge im Personenverkehr einsetzt, verursachen die vorhandenen Rangier-, Bau- und Spezialfahrzeuge rund ein Drittel der CO₂-Emissionen des gesamten Konzerns.

Der Anteil der Dieseltraktion am Gesamtenergiebedarf zu Traktionszwecken der SBB betrug im Jahre 2012 6,12 %. Dabei teilte sich der jährliche Dieserverbrauch von 11,4 Millionen Liter jeweils zu 48 % auf die Divisionen Cargo und Infrastruktur auf, die verbleibenden 4 % werden durch die Division Personenverkehr verursacht. Durch den Diesereinsatz werden jährlich rund 30`000 Tonnen CO₂ freigesetzt. (1)

Aufgrund des bereits hohen Elektrifizierungsgrades des SBB-Netzes gilt es, kommende Fahrzeuggenerationen auf die konsequente Nutzung des elektrischen Antriebes auszurichten, wodurch eine Reduktion des Dieserverbrauchs von mindestens 20% angestrebt wird. Bis Ende 2013 wurden hierfür bereits Zweikraftfahrzeuge des Typs Eem 923 in Dienst gestellt, die den elektrischen Antrieb unter Oberleitung mit einem Dieselmotor für oberleitungsfreien Betrieb kombinieren. Durch den Einsatz von weiteren Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten anstelle der aktuell verwendeten konventionellen Diesel-Antriebssysteme strebt die SBB längerfristig einen Rückgang des Dieserverbrauchs auf 50 % im Vergleich zu heute an. (1)

1.2 Ziele der Vorstudie

Ziel der Studie ist, durch die Analyse von typischen Einsatzprofilen dieselbetriebener Traktionsmittel der SBB Infrastruktur und SBB Cargo aus dem Rangierverkehr, Einzelwagenladungsverkehr (Nahzustellung Güterverkehr), Bauverkehr sowie der Intervention, konkrete Empfehlungen alternativer Antriebskonzepte für den jeweiligen Einsatzzweck zu erarbeiten. Dabei werden der aktuelle Stand der technologischen Entwicklung im Bereich der Antriebstechnik berücksichtigt und mögliche Technologien für die jeweiligen Einsatzzwecke evaluiert. Daraus abgeleitet werden Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen von vielversprechenden Antriebskonzepten und mögliche Umsetzungsstrategien dargestellt.

1.3 Rahmenbedingungen und Abgrenzungen der Vorstudie

In dieser Studie werden anhand von Messdaten Einsatzprofile von dieselbetriebenen Traktionsmitteln der SBB untersucht, typische Leistungen, Energie- bzw. Kraftstoffbedarfe ermittelt und zu Referenzzyklen für das jeweilige Einsatzgebiet zusammengefasst. Auf Grundlage der Referenzzyklen werden ein qualitativer technischer Vergleich und eine Grobauslegung für ausgewählte Antriebskonzepte durchgeführt, welche in einer Zeitspanne von 2020 bis 2025 zur Marktreife gebracht werden könnten. Hierbei liegt der Fokus auf der fahrzeugseitigen Umsetzbarkeit. Mit Hilfe von einfachen Amortisationsrechnungen auf Grundlage von Energiekostenprognosen der SBB wird für ausgewählte alternative Antriebskonzepte dargestellt, ob durch Verringerung der Energiekosten ein wirtschaftlicher Betrieb realisierbar sein könnte.

In dieser Studie werden ausschließlich die direkten Emissionen („tank-to-wheel“-Emissionen), die bei der Verbrennung der Kraftstoffe im Fahrzeug entstehen, betrachtet. Die indirekten Emissionen der energetischen Vorkette, welche für die Herstellung und den Transport von Treibstoffen anfallen, („well-to-tank“-Emissionen) werden nicht betrachtet.

1.4 Projektorganisation, beteiligte Stellen und Projektablauf

Die Studie ist in fünf Arbeitspakete unterteilt und endet mit der Abgabe des Abschlussberichtes. Projektleiter SBB ist Mario Falabretti, beteiligt von Seiten der SBB sind das Flottenmanagement SBB Infrastruktur und Personenverkehr, die Flottentechnik SBB Cargo und das SBB Industriewerk Biel. Die Projektleitung für das DLR liegt bei Dr. Joachim Winter, bearbeitet wird die Studie durch Holger Dittus, Johannes Pagenkopf und Marcus Hoffmann. Begleitend wird die Studie von Walter Josi und Daniel Kiener seitens des BAV betreut.

Durch die SBB werden Fahrzeuginformationen und Einsatzprofile von dieselbetriebenen Traktionsmitteln aus dem Rangierverkehr, Einzelwagenladungsverkehr (Nahzustellung Güterverkehr), Bauverkehr sowie für Interventionstätigkeiten bereitgestellt. Sie werden durch das DLR analysiert und die charakteristi-

schen Eigenschaften und Energiebedarfe je Einsatzzweck identifiziert, um eine Aussage zum Energieeinsparpotential treffen zu können. Der Stand der Technik von Energiewandlern, Energiespeichern und bereits realisierten Hybridfahrzeugen wird vom DLR zusammengefasst. Für die genannten Einsatzzwecke wird die technische Umsetzbarkeit für alternative Antriebskonzepte differenziert nach Bestands- und Neufahrzeugen analysiert. Darauf basierend wird ein qualitativer Vergleich der Konzepte unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten vorgenommen.

Abschließend werden vom DLR basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen detailliert zu betrachtende Antriebskonzepte für die verschiedenen Einsatzzwecke empfohlen. Für die Umsetzungsstrategie wird ergänzt, welche nächsten Schritte für eine Realisierung der Antriebskonzepte notwendig sind.

2 Definition Referenzfahrzeuge und Einsatzszenarien

Um eine Aussage zum Energieeinsparpotential und zur Eignung von alternativen Antrieben für die verschiedenen Fahrzeuge treffen zu können, werden zunächst die bisher eingesetzten Fahrzeuge und deren Verbreitung (Anzahl) untersucht. Weiterhin wird eine Klassifizierung der Fahrzeuge hinsichtlich ihres Einsatzprofils und des daraus resultierenden Energie- bzw. Leistungsbedarfs erstellt.

Die unterschiedlichen Fahrzeugtypen werden entsprechend ihrem Einsatzzweck in vier mit der SBB abgesprochene Fahrzeugklassen eingeteilt. Die Einteilung der Fahrzeugklassen wurde wie folgt vorgenommen:

- Baudienst
- Rangierdienst (Zerlegen und Neuformieren von Güterzügen)
- Einzelwagenladungsverkehr bei SBB Cargo
- Intervention / Lösch- und Rettungsdienst (selbstfahrend)

Für jeden Einsatzzweck wurde ein Referenzfahrzeug festgelegt, dabei wurden die folgenden Fahrzeuge ausgewählt:

- | | |
|--|---------|
| • Baudienst: | Tm 234 |
| • Rangierdienst/Einzelwagenladungsverkehr: | Am 843 |
| • Einzelwagenladungsverkehr: | Eem 923 |
| • Intervention: | LRZ 08 |

2.1 Verwendete Kostenelemente

Die Entscheidung für ein Antriebs- und Energieversorgungssystem hat unmittelbare Auswirkungen auf die Anschaffungs- und Betriebskosten des Fahrzeugs sowie auf die Kosten der Errichtung bzw. Anpassung und den Betrieb der notwendigen infrastrukturellen Anlagen. Tabelle 2.1 zeigt die wichtigsten Kostenkomponenten und wie sie dem Fahrzeug und der Infrastruktur zuzurechnen sind.

Tabelle 2.1: Haupt-Kostengruppen neuer Antriebskonzepte, rot umrahmt sind die in dieser Studie näher untersuchten Kostengruppen

Fahrzeug			Infrastruktur
Anschaffungskosten	Betriebskosten	Stilllegungskosten	Anschaffung, Betrieb, Stilllegung
Komponenten (Speicher und Wandler)	Energie (Traktion und Hilfsbetriebe)	Verwertung/ Verschrottung/ Veräußerung	Tank-/Ladestellen
Entwicklung, Tests, Dokumentation, Zulassung, etc.	Instandhaltung		Depots, Werkstätten
	Ersatzinvestitionen und Retrofit		

In dieser Studie werden ausschließlich Kosten betrachtet, die mit dem Antriebs- und Energieversorgungssystem des Fahrzeugs in Verbindung stehen. Davon werden die Komponentenerstausrüstungs- und Energiekosten quantifiziert, da diese Kostenblöcke den Großteil der Gesamtkosten ausmachen (in der Tabelle farblich hervorgehoben).

Alle übrigen Kosten werden qualitativ betrachtet:

- Entwicklungs-, Test-, Dokumentations-, Zulassungskosten, etc. sind einzelfallspezifisch von vielen Faktoren abhängig und können daher nicht pauschal angegeben werden
- Instandhaltungskosten (Aufwendungen für Inspektion, Wartung, Reparatur und Austausch) ändern sich gegenüber Dieselbestandsfahrzeugen und sind im frühen Konzeptstadium nicht verlässlich prognostizierbar,
- Kosten für die Erneuerung von Komponenten sind stark von der jeweiligen Auslegung und Betriebsstrategie abhängig

- Kosten für Entwurf, Auslegung und Bau bzw. Anpassung von Tankstellen, Ladepunkten, Depots und Werkstätten sind von den örtlichen Randbedingungen abhängig und deshalb nicht Gegenstand dieser Studie

2.2 Energiepreise

Die Berechnung der Energiekosten für den Traktionsbetrieb basiert auf derzeit im öffentlichen Verkehr gültigen Energiepreisen und Vorhersagen zur Entwicklung der Energiepreise. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen in dieser Studie werden in Absprache mit der SBB die in Tabelle 2.2 dargestellten Energiepreise verwendet. Grundlage bilden Energiepreisprognosen der SBB bis 2030 von Diesel, Erdgas und Strom (16,7 Hz, 15 kV-Fahrleitungen). Die Preise sind in Durchschnittswerte für die Zeiträume 2020-2045 und 2020-2050 unterteilt.

Da die Einsatzzeiten der in dieser Studie beschriebenen Fahrzeugkonzepte zum Teil deutlich über das Jahr 2030 hinausgehen, wurden die Preisprognosen der SBB über das Jahr 2030 hinaus fortgeschrieben. Dafür wurden die durchschnittlichen Preissteigerungsraten bis 2030 linear bis zum Jahr 2050 extrapoliert.

Zusätzlich zu Diesel, Erdgas und Strom wurden auch Biodiesel, LPG (Liquefied Petroleum Gas bzw. Flüssiggas) und Wasserstoff in die Preisprognosen aufgenommen. Die Preise sind nominal angegeben und somit nicht inflationsbereinigt.

Grundsätzlich sind die in dieser Studie verwendeten Preisdaten als ein möglicher zukünftiger Preispfad zu verstehen. Die Preisentwicklung der Energieträger innerhalb der nächsten 30 – 40 Jahre ungewiss. Die in Tabelle 2.2 dargestellten Durchschnittspreise stellen ein aus Sicht der Autoren und der SBB mögliches Szenario dar. Variierende Energiepreisentwicklungen können zu deutlich abweichenden Gesamtenergiekosten und damit auch zu veränderten Ergebnissen hinsichtlich der Gesamtwirtschaftlichkeit führen. In Kapitel 5 und 6 sind die dort berechneten Energiemengen (Einsparungen, Minder- oder Differenzenergiebedarfsmengen) deshalb getrennt nach Fahrzeug und Antriebssys-

tem aufgeführt und können entsprechend mit abweichenden Energiepreisen multipliziert werden.

Eine detailliertere Beschreibung der den angesetzten Energiepreisen zugrundeliegenden Daten und Annahmen findet sich im Anhang (Kapitel 8.8).

Tabelle 2.2: Angesetzte mittlere Energiepreise für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen (Nominalpreise)

Kraftstoff/Energieträger	Mittlerer spezifischer Energiepreis		Einheit
Zeitraum	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

2.3 Baudienst

2.3.1 Referenzfahrzeug Tm 234

Beim Baudienstfahrzeug Tm 234 (Abbildung 2.1) handelt es sich um einen zweiachsigen Dieseltraktor mit Ladebrücke und Ladekran oder Hebebühne für die Dienste von SBB Infrastruktur, welcher für den Bau und Unterhalt der Bahnbahnen, Fahrleitungen und Signale eingesetzt wird. Zudem sind der Transport von Bauzügen sowie Rangieraufgaben möglich. Im Baustellenbetrieb und im Depot steht meist keine Fahrleitung zur Verfügung.

Insgesamt befinden sich derzeit 124 Fahrzeuge dieses Typs im Einsatz. Das zul. Gesamtgewicht beträgt 37t, darin enthalten ist die Zuladung von 7t bei der ersten und zweiten Serie bzw. 500kg Zuladung bei der 3. Serie mit Arbeitskorb.



Abbildung 2.1: Dieseltraktor Tm 234

Das Fahrzeug verfügt über die Betriebsarten „Streckenfahrt“ (0 - 80 km/h), „Arbeitsfahrt“ (0 - 20 km/h) und „Fahren im Kranbetrieb“ (0 - 4 km/h). Gleichzeitiges Fahren und Kranbewegungen sind nicht möglich. Der Kran ist mit Höhen- und Seitenbegrenzungen ausgerüstet, die ein Arbeiten unter eingeschalteter Oberleitung erlauben. Als Antrieb wird ein Euro-II-Dieselmotor (Tabelle 2.3) mit einer Nennleistung von 550 kW und einem Brennstoffvorrat von 660 l eingesetzt. (2)

Tabelle 2.3: Daten Dieselmotor Tm 234 nach (2)

Fabrikat	mtu
Typ	12 V 183 TD 13
Kühlung	Wasser mit Frostschutz
Arbeitsverfahren	Viertakt
Verbrennungsverfahren	Direkteinspritzung
Aufladung	Abgas - Turboaufladung mit Ladeluftkühlung
Bauform	90° V Motor
Zylinderzahl	12
Verdichtungsverhältnis	17,25 : 1
Kolbendurchmesser / -hub	128 mm / 142 mm
Hubraum eines Zylinders	1,83 l
Leerlaufdrehzahl	700 U/min
Drehzahl bei Kranbetrieb	900 U/min / 1200 U/min
Maximale Drehzahl	2100 U/min
Dauerleistung	550 kW bei 2100 U/min

Für die Leistungsübertragung wird ein stufenlos geregelter Hydrostatik-Antrieb genutzt, der die volle Zugkraft ab $v > 0$ km/h zur Verfügung stellt. Vorteil des hydrostatischen Getriebes ist die stufenlose Leistungsübertragung (keine Schaltsprünge) über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Der Ladekran, die Federblockierung und der Kompressor werden über eine zusätzliche Hydrostatikpumpe angetrieben, welche die Komponenten lastdruckunabhängig bei Leerlauf des Dieselmotors mit maximalem Förderstrom versorgt.

Ein am Dieselmotor angeflanschter elektrischer Generator lädt vier Bleibatterien. Diese versorgen mit 24 V Gleichstrom den elektrischen Teil des Fahrzeugs. Das Zugkraftdiagramm der Tm 234 ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die maximale Anfahrzugkraft am Rad beträgt 81 kN.

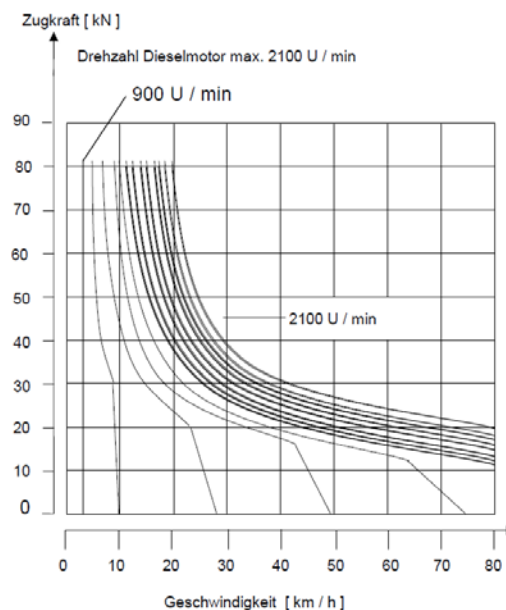


Abbildung 2.2: Z-v-Diagramm Tm 234 (2)

Für die spätere Bewertung der Integrationsmöglichkeiten alternativer Antriebssysteme wurde eine auf Datenblättern und Annahmen basierende Masse der Hauptkomponenten des Antriebssystems von 4,84 t bilanziert.

Zusätzlich zum Antriebsdieselmotor verfügt die Tm 234 über einen kleinen Dieselmotor (Deutz BF4M 1008 oder Deutz D2008L04) für eine etwaige externe Stromversorgung über eine Generatorgruppe. Dieser zweite Dieselmotor bezieht den benötigten Brennstoff ebenfalls aus dem Hauptkraftstofftank.

2.3.2 Typische Randbedingungen

Typische Einsatzbedingungen im Baustellenverkehr sind (Angaben basieren auf den Annahmen für ein neues Fahrzeug mit demselben Einsatzzweck wie die bestehende Tm 234):

- 5.000 km jährliche Laufleistung
- 1.000 Betriebsstunden / Jahr
- 300 Tage Betrieb / Jahr
- 25 Jahre Lebensdauer
- autarker Betrieb muss gewährleistet sein

Für die aktuell laufende Ausschreibung bei SBB Infrastruktur für neue Baudiensttraktoren wurde im Vorfeld die Möglichkeit für einen Zweikraftantrieb geprüft. Dazu wurden von folgenden Gegebenheiten ausgegangen:

- Mögliche Streckenfahrten elektrisch: 96%
- Möglicher Baustellenbetrieb elektrisch: 78 – 80% (gesperrte Strecke aber eingeschaltete Fahrleitung)
- Nutzbare Zuladung auf Ladefläche: 1 t

Ein neues Fahrzeug verfügt über eine max. Zuladung von 3,2 t auf der Ladefläche. Bei einem Bestandsfahrzeug Tm 234 (1. + 2. Serie) ist eine max. Zuladung von 7 t möglich. Da diese in der Praxis selten ausgenutzt wird, wird davon ausgegangen, dass diese um 1 t reduziert werden kann. Die Zuladung von 1 t wurde als mögliche Reduktion der bestehenden Ladekapazität definiert, wenn zusätzliche Systeme verbaut werden.

2.3.3 Auswertung Referenzzyklen

Das Vorgehen bei der Auswertung der Messdaten ist in einem eigenen Bericht detailliert dargestellt. An dieser Stelle werden die Auswertungsergebnisse zusammenfassend dargestellt und charakteristische Eigenschaften des untersuchten Baudienststeinsatzes beschrieben. Die Zusammenfassung der mit einem

Datenlogger aufgezeichneten Fahrzyklen ist in Tabelle 2.4 dargestellt. Für die spätere Auslegung von Antriebssystemen dient die Tabelle als Basis.

Tabelle 2.4: Zusammenfassung Baudienst-Messdaten

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
Standzeiten (ohne Dieselpetrieb)	52 – 87 % der Aufzeichnungsdauer
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 aller Fahrzyklen 29,5 kW
Rekuperationspotential* bez. auf Traktionse- nergie 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
Dieselskosten über 25 Jahre (bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2045 von 2,58 CHF/l)	804.960 CHF / 25 Jahre

* Rekuperationspotential: Abgeschätzt, da für Tm 234 keine Radleistungen aufgezeichnet wurden

Die einzelnen Messzyklen, die tageweise aufgezeichnet wurden, zeigten große Unterschiede hinsichtlich Einsatzdauer, Leistungsanforderungen, Energiebedarf und zurückgelegter Distanz. Die mittlere Leistung des Dieselmotors ist in allen Fahrzyklen im Vergleich zur Nennleistung gering.

Die jährlichen Fahrleistungen und damit auch der Dieserverbrauch sind im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen gering, wodurch in den Amortisationsrechnungen für die alternativen Antriebssysteme selbst große prozentuale Verbrauchseinsparungen nur zu relativ kleinen monetären Einsparungen führen werden.

Das Rekuperationspotential (Verhältnis aus Brems- zu Traktionsenergie am Rad) ist aufgrund der häufig nur geringen Geschwindigkeiten relativ klein. Der Kranbetrieb macht nur einen kleinen Anteil der gesamten Einsatzzeit aus, und der Dieselmotor ist in bis zu 87 % der Messzeit nicht in Betrieb.

2.4 Rangierdienst und Einzelwagenladungsverkehr

2.4.1 Referenzfahrzeug Am 843

Die Am 843 (Abbildung 2.3) ist eine vierachsige, dieselhydraulische Rangier- und Güterlokomotive. Die insgesamt 28 Fahrzeuge werden durch die Division Infrastruktur in den drei großen Rangierbahnhöfen Basel, Limmattal und Lausanne Triage zum Zerlegen- und Neuformieren von Güterzügen eingesetzt. Hier ist unter anderem der Ablaufbergbetrieb mit geringen Geschwindigkeiten und großen Zugkräften (teilweise ferngesteuert) vorgesehen.



Abbildung 2.3: Rangierlokomotive Am 843

Weitere 48 Fahrzeuge dieses Typs sind bei den Divisionen Personenverkehr für Rangierarbeiten in den Grenzbahnhöfen sowie bei SBB Cargo im Einzelwagenladungsverkehr im Einsatz. Ein kleiner Teil der Infrastruktur-Flotte wird zudem zu Interventionszwecken eingesetzt, z.B. zur Bergung von liegengebliebenen Zügen.

Die Am 843 wird von einem 4 Takt Dieselmotor der Firma Caterpillar angetrieben (Tabelle 2.5). Dieser stellt eine Leistung von 1500 kW bereit. Zur Leistungsübertragung dient ein hydrodynamisches Getriebe L 5r4 zseU2 der Firma Voith.

Tabelle 2.5: Daten Dieselmotor Am 843 nach (3)

Fabrikat	Caterpillar
Typ	3512B TA - SC
Kühlung	Wasser mit Frostschutz
Arbeitsverfahren	Viertakt
Einspritzsystem	Direkteinspritzung
Aufladung	Abgasturboaufladung mit Ladeluftkühlung
Bauform	60°-V-Motor
Zylinderzahl	12
Verdichtungsverhältnis	13,5 : 1
Kolbendurchmesser / Hub	170 mm / 215 mm
Hubraum eines Zylinders	4,31 Liter
Leerlaufdrehzahl	700 U/min
Maximale Drehzahl	1800 U/min
Dauerleistung	1500 kW
Start	E-Anlasser
Motorregelung	elektronisch
Motormasse (einschließlich 134 l Kühlwasser und 322 l Schmieröl)	ca. 7700 kg
Abgasanlage	Partikelfilter- / Nachverbrennungsanlage
Abgasemission	ERRI 2003
Motorschmieröl	322 l
Kühlwasser	600 l (Total mit Kühler)

Die Dienstmasse der Am 843 beträgt 80 t. Da keine Ballastierung im Fahrzeug verbaut ist, bestehen außer der Verkleinerung des Dieseltanks kaum Möglichkeiten, durch signifikante Masseneinsparungen am Bestandsfahrzeug die Massen zusätzlicher Komponenten zu kompensieren. Für die spätere Bewertung der Integrationsmöglichkeiten alternativer Antriebssysteme wurde eine Masse der Hauptkomponenten des Antriebssystems von 28,3 t bilanziert.

2.4.2 Typische Randbedingungen

Typische Einsatzbedingungen einer Am 843 im Rangier- und Einzelwagenladungsverkehr sind (Angaben basieren auf den aktuellen Betriebsdaten):

- 18.000 km jährliche Laufleistung
- 2.400 Betriebsstunden / Jahr
- 8 h / Tag
- 300 Tage Betrieb / Jahr
- 25 Jahre Einsatzdauer
- Ein elektrischer Betrieb wäre abhängig von der Ausrüstung der Rangierbahnhöfe teilweise möglich.
- Fahrzeuge werden zudem im Einzelwagenladungsverkehr eingesetzt (Einsatzprofil ähnlich der Eem 923) und bei der Intervention.

2.4.3 Auswertung Referenzzyklen

Für die Am 843 standen Messdaten zur Verfügung, die einen Einsatztag beschreiben und sowohl Strecken- als auch aus Rangierfahrten umfassen, welche allerdings keine repräsentative Grundlage aller Einsatzzwecke des Fahrzeugs darstellt. Die Auswertung ist in einem eigenen Bericht detailliert beschrieben, im Folgenden werden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Für den Referenzzyklus Rangierverkehr wurden dabei ausschließlich die Fahrten im Rangiergang betrachtet, für den Einzelwagenladungsverkehr die Fahrten im Streckengang. In beiden Fällen wurden die Messdaten auf eine Tageseinsatzdauer von 9 h hochgerechnet.

Die Zusammenfassung der Rangier-Fahrzyklen ist in Tabelle 2.6 dargestellt. Die mittlere Dieselmotor-Leistung ist im Vergleich zur Maximalleistung gering. Das Potential für die Rekuperation von Bremsenergie ist größer als im Baudienst, aber kleiner als im Einzelwagenladungsverkehr. Die ermittelte jährliche Laufleistung stimmt mit den typischen Einsatzbedingungen des Fahrzeugs gut überein.

Für den Einzelwagenladungs-Fahrzyklus der Am 843 wurden die Anteile der Fahrzyklen, die im Streckengang gefahren wurden, ebenfalls auf eine Tages-Betriebsdauer von 9 h hochgerechnet (Tabelle 2.7).

Tabelle 2.6 Zusammenfassung Am 843 Rangierverkehr-Messdaten für 9h-Betriebstag

Tägliche Einsatzdauer (Annahme)	9 h Rangierfahrt
Tagesdistanz	63 km Rangierfahrt
Max. Geschwindigkeit	38 km/h
Standzeiten ohne Dieselmotorbetrieb	0,3 h
Max. Leistung Rad (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 Dieserverbrauch	84.375 l/Jahr
Dieserverbrauch 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)	5.442.188 CHF / 25 Jahre

Im Vergleich zum Baudiensttraktor Tm 234 und zum Rangierverkehr der Am 843 ist das Rekuperationspotential im Einzelwagenladungsverkehr größer, d.h. es steht im Verhältnis zur aufgewandten Traktionsenergie mehr Bremsenergie zur Verfügung, die mit entsprechenden Antriebssystemen zurückgewonnen werden könnte. Die mittleren Leistungen des Dieselmotors sind wesentlich

kleiner als die Nennleistung, was prinzipiell für einen hohen Anteil Teillastbetrieb des Dieselmotors spricht. Hinsichtlich der Betriebspunkte des Dieselmotors ist im Vergleich zum Tm 234 eine gleichmäßigere Verteilung über den gesamten Leistungsbereich zu verzeichnen und insbesondere die großen Leistungen nahe der Nennleistung des Dieselmotors werden häufiger genutzt.

Tabelle 2.7 Zusammenfassung Am 843 Einzelwagenladungsverkehr-Messdaten für einen 9h-Betriebstag

Tägliche Einsatzdauer (Annahme)	9 h Streckenfahrt
Tagesdistanz	159 km
Max. Geschwindigkeit	83 km/h
Standzeiten ohne Dieselmotorbetrieb	0,3 h
Max. Leistung Rad (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 Dieserverbrauch	115.496 l/Jahr
Dieserverbrauch 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

2.5 Einzelwagenladungsverkehr

2.5.1 Referenzfahrzeug Eem 923

Das Zweikraftfahrzeug Eem 923 (Abbildung 2.4) wird von der SBB im Einzelwagenladungsverkehr eingesetzt. Derzeit sind 30 Fahrzeuge bei SBB Cargo im Einsatz, welche für die Verteilung der Güterwagen (vom Cargo Stützpunkt zum Endkunden) nach Überführung der Güterzüge durch Streckenlokomotiven genutzt werden.

Die Zweikraftlokomotive Eem 923 mit einer Dienstmasse von 45 t ist mit einem fahrdrahtgebundenen elektrischen Antrieb (15 kV / 16,7 Hz und 25 kV / 50 Hz) und einem Dieselgenerator ausgerüstet. Sie kann unter Fahrleitung für Streckenfahrten bis 120 km/h eingesetzt werden. Bei nicht vorhandener Fahrleitung ist die Leistung am Rad auf 290 kW begrenzt. (4)



Abbildung 2.4: Zweikraftlokomotive Eem 923

Die Treibachsen werden von zwei Asynchronmotoren über jeweils ein Tatzlagergetriebe der Firma Gmeinder angetrieben. Jeder Fahrmotor liefert eine Maximalleistung von 750 kW (max. Leistung am Rad unter Fahrleitung 1.472 kW), die maximale Anfahrzugkraft beträgt insgesamt 150 kN. Fahrdrahtunabhängig steht ein Dieselaggregat mit einer maximalen mechanischen Leistung von ~360 kW zur Verfügung. Dabei werden die Stromrichter durch einen an den Dieselmotor angeflanschten Drehstromgenerator versorgt. Die Anfahrzugkraft von 150 kN bleibt erhalten. (4)

Für die spätere Bewertung der Integrationsmöglichkeiten alternativer Antriebssysteme wurde eine Masse der Hauptkomponenten des Antriebssystems von 3,823 t bilanziert.

2.5.2 Typische Randbedingungen

Für die weiteren Betrachtungen wurden folgende Einsatzbedingungen definiert (Angaben basieren auf Ausschreibungsbestimmungen):

- 24.000 km jährliche Laufleistung
- 2.500 Betriebsstunden / Jahr
- 300 Tage Betrieb / Jahr
- 30 Jahre Lebensdauer

2.5.3 Auswertung Referenzzyklen

Für das Fahrzeug Eem 923 wurden von der SBB Datenaufzeichnungen von 30 Fahrzeugen über insgesamt einen Monat bereitgestellt. Die Analyse der Messzyklen ist in einem eigenen Bericht detailliert dokumentiert, hier wird lediglich die Zusammenfassung aller Messzyklen dargestellt. Die Messzyklen enthalten Energiebedarfe für die Energieversorgungssysteme Oberleitung 15kV, Oberleitung 25 kV und Dieselbetrieb. Weiterhin wurden die Energiebedarfe in die Betriebsphasen Fahrbetrieb, Parken und Schlummern aufgeteilt. Für die Auswertung ist der Betrieb im Dieselmotor relevant. Die zugehörigen Größen in den Messdaten sind:

- *Kilometerstand*
- *DM Stunden* - Betriebsstunden des Dieselmotors
- *Energie Fahren Diesel* – Durch Dieselgenerator im Modus Fahren bereitgestellte elektrische Energie
- *Energie Park Diesel* – Durch Dieselgenerator im Modus Parken bereitgestellte elektrische Energie

Wie auch bei den anderen Fahrzeugen ist aufgrund der verschiedenen Einsatzorte und Einsatzprofile eine breite Streuung der Messdaten vorhanden. Anhand von Mittelwertbildung und Häufigkeitsverteilungen wurde das in Tabelle 2.8 dargestellte Einsatzprofil für den Einzelwagenladungsverkehr zusammengefasst.

Tabelle 2.8 Zusammenfassung Eem 923 Einzelwagenladungsverkehr-Messdaten

Tägliche Einsatzdauer	24 h
Bremsenergie (elektr. & Diesel)	0 kWh: 31%; 1 -90 kWh: 58% 90-180 kWh: 9%, >181 kWh: 11%
Mittlere jährliche Fahrleistung	30.800 km/Jahr
Mittlerer jährlicher Dieserverbrauch	8.652 l/Jahr Maximal: 19.298 l/Jahr (Fz 26)
Dieserverbrauch über 30 Jahre	259.560 l / 30 Jahre
Direkter CO ₂ -Ausstoß über 30 Jahre (2,6145 kg CO ₂ / l Diesel, nach BAFU)	679 t / 30 Jahre
Dieselskosten über 30 Jahre (bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2050 von 2,74 CHF/l)	711.194 CHF / 30 Jahre

Die Auswertung der täglichen Dieselbetriebsstunden ist in Abbildung 2.5 dargestellt. In 34 % der untersuchten Zyklen war der Dieselmotor nicht in Betrieb, in 28 % der Messzyklen betrug die Betriebsdauer weniger als 3 h. Weitere 29 % der Messzyklen weisen eine Betriebsdauer zwischen 3 und 6 Stunden auf, 8 % zwischen 6 und 9 Stunden und 1 % mehr als 9 Betriebsstunden pro Messzyklus. Zu beachten ist hier, dass in den Aufzeichnungen nur ganze Betriebsstunden vorhanden sind, d.h. es kann durchaus sein, dass aufgrund von Rundungsvorgängen Messzyklen, an denen der Dieselmotor für weniger als eine halbe Stunde in Betrieb war, als Zyklen ohne Betrieb identifiziert werden. Die Analyse zeigt, dass die Fahrzeuge überwiegend unter Oberleitung betrieben werden. Bemerkenswert ist, dass es auch wenige Einsatztage gibt, an denen mit mehr als 9 h der Dieselbetrieb sehr stark ausgeprägt ist.

Betriebsstunden Dieselmotor

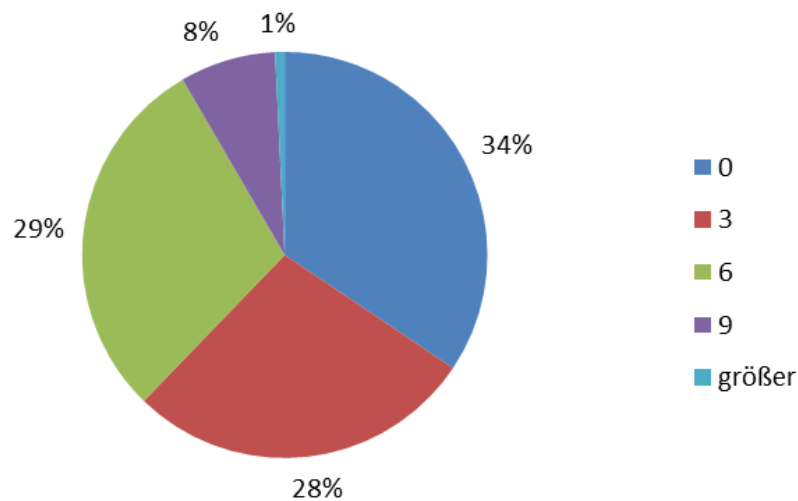


Abbildung 2.5: Häufigkeitsverteilung Betriebsstunden Dieselmotor

Der Vergleich der verschiedenen Fahrzeuge in der Dieselgeneratornutzung ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Die blaue Säule kennzeichnet jeweils die maximal vom Dieselgenerator bereitgestellte elektrische Energie, die rote Säule den Durchschnitt aller Fahrzyklen dieses Fahrzeugs und die grüne Säule den Durchschnitt der Fahrzyklen, in denen der Dieselgenerator zum Einsatz kam.

Die Auswertung zeigt, dass zwischen den Fahrzeugen erhebliche Unterschiede im vom Dieselgenerator zu deckenden Energiebedarf bestehen. Ausschlaggebend ist die regionale Zuteilung und Verwendung der Fahrzeuge. Je nach Region sind mehr oder weniger fahrleitungsfreie Strecken bei den Endkunden zu befahren. Zudem sind die Distanzen, welche auf nicht-elektrifizierten Strecken bis zum Endkunden zurückgelegt wurden, je nach Standort sehr unterschiedlich. Zudem variiert die zu befördernde Last stark. So ist Fahrzeug Fz 26 sowohl hinsichtlich der maximal benötigten Energiemenge (~450 kWh) als auch hinsichtlich der durchschnittlich in den Fahrzyklen mit Dieselmotor benötigten Energiemengen (~270 kWh) herausragend. Dagegen sind bei den Fahrzeugen Fz 5 und Fz 6 die maximal benötigten Energiemengen mit weniger als 200 kWh sehr viel kleiner und die durchschnittlich im Dieselmotor benötigten Energien betragen weniger als 75 kWh.

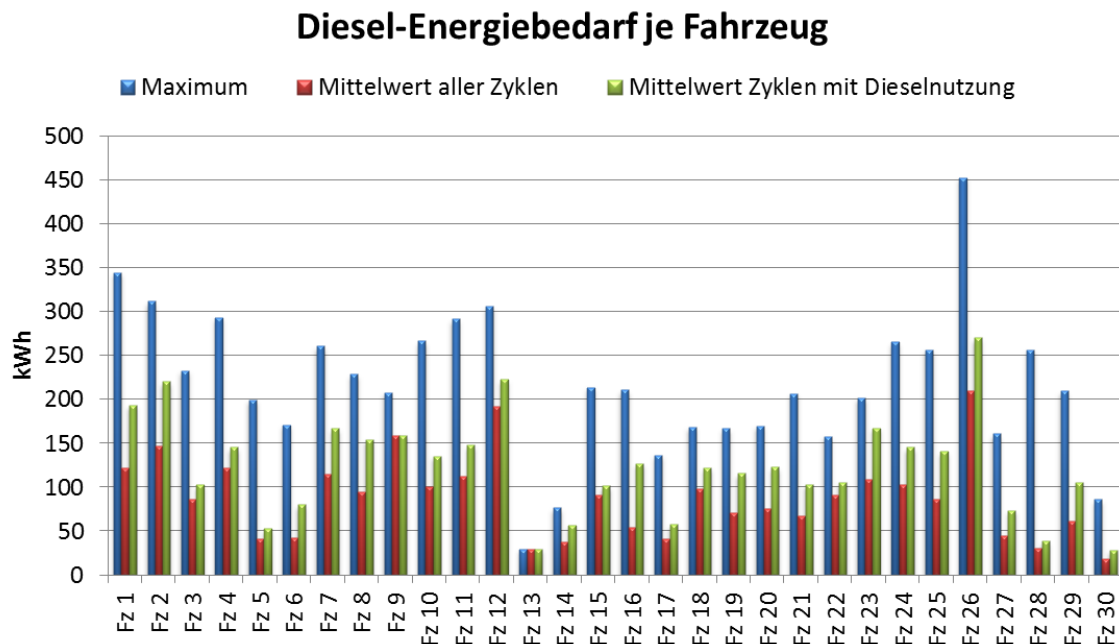


Abbildung 2.6: Maximal- und Mittelwerte der vom Dieselmotor bereitgestellten elektrischen Energie je Fahrzeug

Es ist zu berücksichtigen, dass aus den vorhandenen Messdaten keine Aussage über den zeitlichen Verlauf von Oberleitungs- und Dieselbetrieb getroffen werden kann.

2.6 Intervention

2.6.1 Referenzfahrzeug LRZ 08

Der dreiteilige Lösch- und Rettungszug LRZ 08 der SBB (Abbildung 2.7) besteht aus einem auch separat betreibbaren Rettungsfahrzeug (Gewicht: 60 t, Zuladung: 12 t), einem Gerätefahrzeug (Gewicht: 74 t, Zuladung: 5 t) und einem Tanklöschwagen (Gewicht: 42,8 t, Zuladung: 52 t / nicht angetrieben) (5). Er wird für Lösch- und Rettungsaufgaben, im Abschleppdienst, zur Bereitstellung von Strom, Licht, Druck-/ Atemluft sowie zum Materialtransport für Interventionstätigkeiten, z.B. Aufgleisungen von Fahrzeugen, eingesetzt. Außerdem werden regelmäßig Übungsfahrten zur Sicherstellung der Einsatzbereitschaft durchgeführt. Der aktuelle Bestand an Lösch- und Rettungszügen ähnlicher Bauart (selbstfahrend, 3- oder 4-teilig) über alle Typen beträgt 11 Fahrzeuge (1 x LRZ 04 / 3-teilig, 8 x LRZ 08 / 3-teilig, 2 x LRZ 14 / 4-teilig).



Abbildung 2.7: Lösch- und Rettungszug LRZ 08

Angetrieben wird der LRZ 08 von vier MTU Powerpacks, welche jeweils einen MTU 6H1800R84 Dieselmotor mit 390 kW Nennleistung verwenden. Jeweils zwei Powerpacks befinden sich auf dem Gerätefahrzeug und dem Rettungsfahrzeug. Zur Leistungsübertragung werden hydrodynamische Turbogetriebe T211 re.4 der Firma Voith verwendet. (5)

Für die spätere Bewertung der Integrationsmöglichkeiten alternativer Antriebssysteme wurde eine Masse der Hauptkomponenten des Antriebssystems von 28,5 t bilanziert.

2.6.2 Typische Randbedingungen

Für die aktuellste Generation von Lösch- und Rettungszügen wird eine Temperaturbeständigkeit von -20 °C bis +50 °C (dauerhaft)/ +60 °C (für 15 Min) gefordert. Zudem muss die volle Motorleistung bis +40 °C dauerhaft zur Verfügung stehen. Aufgrund der kaum kalkulierbaren Anforderungen bei Rettungs- und Interventionseinsätzen muss das Fahrzeug autark betreibbar sein, d.h. der Betrieb muss auch ohne Fahrdratversorgung gewährleistet sein.

2.6.3 Auswertung Referenzzyklen

Da für den LRZ keine Daten aus Messfahrten vorliegen, kann hier lediglich eine Abschätzung auf Grundlage der Einsätze im Jahr erfolgen (Details im Messdatenbericht). In Tabelle 2.9 ist diese zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2.9: Zusammenfassung Referenzzyklen LRZ 08

Jährliche Laufleistung	18.300 km
Jährliche Laufleistung Einsatzfahrten	9150 km
Jährliche Laufleistung Übungsfahrten	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	1.312.500 – 1.687.500 l / 25 Jahre
Direkter CO ₂ -Ausstoß über 25 Jahre (2,6145 kg CO ₂ / l Diesel, nach BAFU)	3432 – 4412 t / 25 Jahre
Mittlere Dieseldkosten über 25 Jahre (bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2045 von 2,58 CHF/l)	3.386 – 4.354 TCHF / 25 Jahre

2.7 Zusammenfassung

In Tabelle 2.10 sind die Ergebnisse der Referenzzyklenauswertung zusammengefasst, welche die Randbedingungen zur Auslegung von alternativen Antriebssystemen darstellt. Hier wird deutlich, dass Dieserverbrauch und Verbrauchskosten von der Am 843 im Rangier- und Einzelwagenladungsverkehr dominiert werden und damit das größte Potential zur Einsparung darstellen.

Tabelle 2.10: Zusammenfassung der Referenzzyklen

	Tm 234	Am 843 RV	Am 843 EWL	Eem 923	LRZ
Anzahl der Fahrzeuge	124	76		30	11
Einsatzdauer	25 Jahre	25 Jahre		30 Jahre	25 Jahre
Mittlere jährliche Laufleistung	11.190 km	18.888 km	47.579 km	30.800 km	18.300 km
Mittlerer Jahresdieselvebrauch	12.480. l	84.375 l	115.496 l	8.652 l	52.500 - 67.500 l
Mittlerer Dieselverbrauch über Einsatzjahre	312 Tl	2.109 Tl	2.887 Tl	259 Tl	1.312 - 1.687 Tl
Direkter CO2-Ausstoß über Einsatzjahre	815 t	5.515 t	7.549 t	679 t	3.432 - 4.412 t
Mittlere Dieselskosten über Einsatzjahre	804 TCHF	5.442 TCHF	7.449 TCHF	711 TCHF	3.386- 4.354 TCHF

3 Stand der Technik Energiespeicher & -wandler

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik von Energiespeichern und Energiewandlern (Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen) für den Einsatz in Schienenfahrzeugen zusammengefasst. Weitere für die Übertragung der Leistung an die Antriebsräder erforderliche Komponenten z.B. Getriebe, Umrichter oder Fahrmotoren werden im nachfolgenden Kapitel (Alternative Antriebskonzepte) bei der Betrachtung der Antriebssysteme beschrieben.

Dabei werden die folgenden Kriterien betrachtet:

- Spezifische Energie [Wh/kg], Spezifische Leistung [W/kg]
- Energiedichte [Wh/l], Leistungsdichte [W/l]
- Zyklfestigkeit, Lebensdauer
- Wirkungsgrad
- Gefährdungspotential
- Investitionskosten
- Reifegrad
- Umweltbelastung bei Nutzung
- Emissionsfaktoren (bei Energiewandlern)

Der Reifegrad wird als Technology Readiness Level (TRL) beschrieben und gibt auf einer Skala von 1 bis 9 an, wie weit eine Technologie entwickelt ist. Die Bewertungskriterien für die Marktnähe einer Technologie zeigt Abbildung 3.1.

TRL 1	Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips Wissenschaftliche Studien wurden durchgeführt
TRL 2	Theoretische Anwendungsmöglichkeiten wurden identifiziert Anwendungsspezifische Simulationen wurden durchgeführt
TRL 3	Technologisches Konzept Nachweis der Funktionsfähigkeit einer Technologie
TRL 4	Versuchsaufbau und erfolgreiche Durchführung erster Experimente in einem Labor
TRL 5	Technologie und relevante Komponenten wurden identifiziert Versuchsaufbau und erfolgreiche Durchführung in Einsatzumgebung
TRL 6	Prototyp in Einsatzumgebung
TRL 7	Prototyp im Einsatz
TRL 8	Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionsfähigkeit im Einsatzbereich
TRL 9	Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes Fertigung unter Wettbewerbsbedingungen

Abbildung 3.1: Reifegradbewertung Technology Readiness Level nach (6)

Das Gefährdungspotential wird in Schadensausmaß und Gefährdungshäufigkeit unterteilt. Zur Bewertung dient ein Modell nach DIN EN 50126 (Abbildung 3.2, Abbildung 3.3).

I	katastrophal (Unfalltote, zahlreiche Schwerverletzte und/oder schwere Umweltschäden)
II	kritisch (einzelner Unfalltoter, Schwerverletzter und/oder nennenswerte Umweltschäden)
III	marginal (kleinere Verletzung, nennenswerte Bedrohung der Umwelt)
IV	unbedeutend (mögliche, geringfügige Verletzung)

Schadensausmaß

Abbildung 3.2: Modell zur Bewertung des Schadensausmasses nach DIN EN 50126

A	häufig (Wird häufig auftreten, Die Gefahr ist ständig gegenwärtig)
B	wahrscheinlich (Wird mehrmals auftreten. Es ist zu erwarten, dass die Gefahr eintritt)
C	gelegentlich (Kann mehrmals auftreten. Es ist zu erwarten, dass die Gefahr mehrmals eintritt)
D	selten (Kann manchmal während des Lebenszyklusses auftreten. Es ist sinnvoll, mit dem Eintreten der Gefahr zu rechnen)
E	unwahrscheinlich (Das Auftreten ist unwahrscheinlich, aber möglich. Es darf angenommen werden, dass diese Gefahr nur in Ausnahmefällen eintritt)
F	unvorstellbar (Das Auftreten ist extrem unwahrscheinlich. Es darf angenommen werden, dass diese Gefahr nicht eintritt)

Gefährdungshäufigkeit

Abbildung 3.3: Modell zur Bewertung der Gefährdungshäufigkeit nach DIN EN 50126

3.1 Energiespeicher

Für die Bewertung von Energiespeichersystemen werden neben den allgemeinen Kriterien zusätzlich die folgenden Eigenschaften betrachtet:

- energetischer Gesamtwirkungsgrad (Quotient der Lade- und Entlade-Energie)
- Lade- und Entladedauer, Selbstentladung
- Kalendarische Lebensdauer, Betriebsstunden und Zyklenfestigkeit
- Verhalten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (Temperatur...)

Die Speicherung von Energie kann auf verschiedene Arten erfolgen. Abbildung 3.4 zeigt eine Einteilung von Speichertechnologien, welche in diesem Abschnitt näher betrachtet werden. Diese unterscheiden sich in elektrostatische Speicher (Doppelschichtkondensator), mechanische Speicher (Druck- und Schwungmas-senspeicher) und chemische Speicher (Sekundärbatterien).

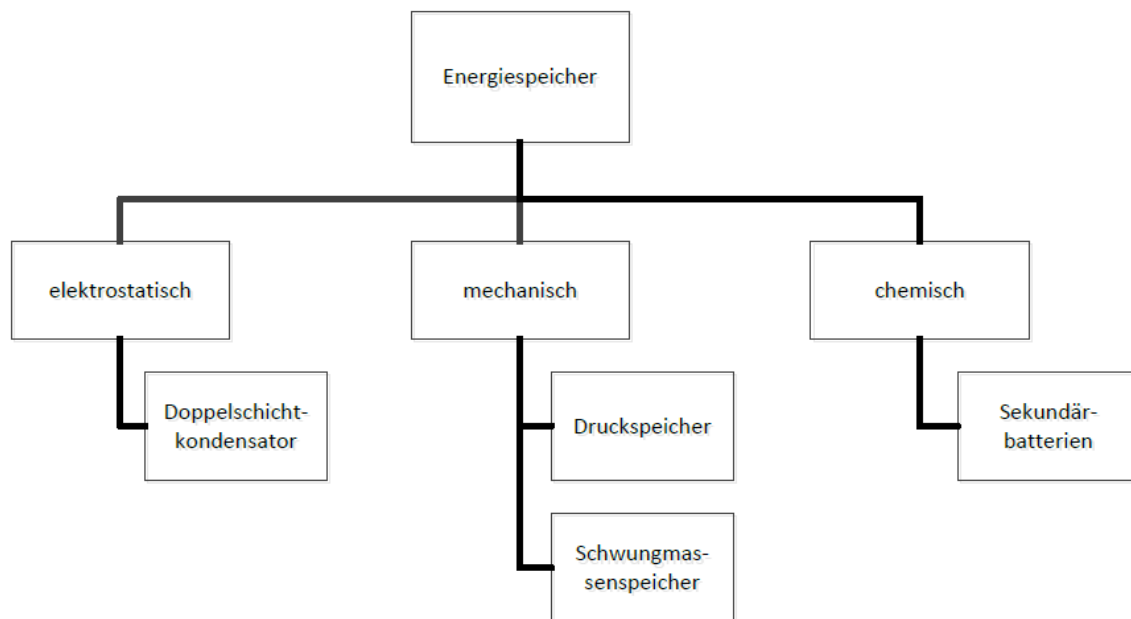


Abbildung 3.4: Übersicht Speicherarten

Die Energie- und Leistungsdichte von Speicherzellen können in einem Ragone-Diagramm dargestellt werden. Abbildung 3.5 verdeutlicht, dass ein auf die Anwendung zugeschnittener Kompromiss zwischen Leistungs- und Energiedichte eingegangen werden muss, da kein Energiespeicher in beiden Kriterien Maximalwerte erreicht. Es ist zu beachten, dass je nach Auslegung entweder hohe Energie oder hohe Leistung eingestellt werden kann, aber nicht beides gleichzeitig.

Hinsichtlich der gespeicherten Energie pro kg Materialeinsatz sind alle Batterien gegenüber Doppelschichtkondensatoren im Vorteil, während Doppelschichtkondensatoren im Allgemeinen eine höhere Leistungsdichte aufweisen. Deutlich erkennbar ist der große Bereich, den Lithium-Ionen-Batterien abdecken können. Je nach Anforderung sind Li-Ion-, NiCd- und NiMH- Batterien für hohe spezifische Leistungen oder hohe spezifische Energien ausgelegt, jeweils zum Nachteil des anderen Parameters. Abbildung 3.6 zeigt daher beispielhaft ein Ragone-Diagramm für NiCd- und NiMH-Batterien, in dem jeweils Hochleistungs- und Hochenergiezellen gegenübergestellt sind. Die Abbildung verdeut-

licht, dass bereits bei der Systemauslegung der den Anforderungen genügende Batterietyp ausgewählt werden muss..

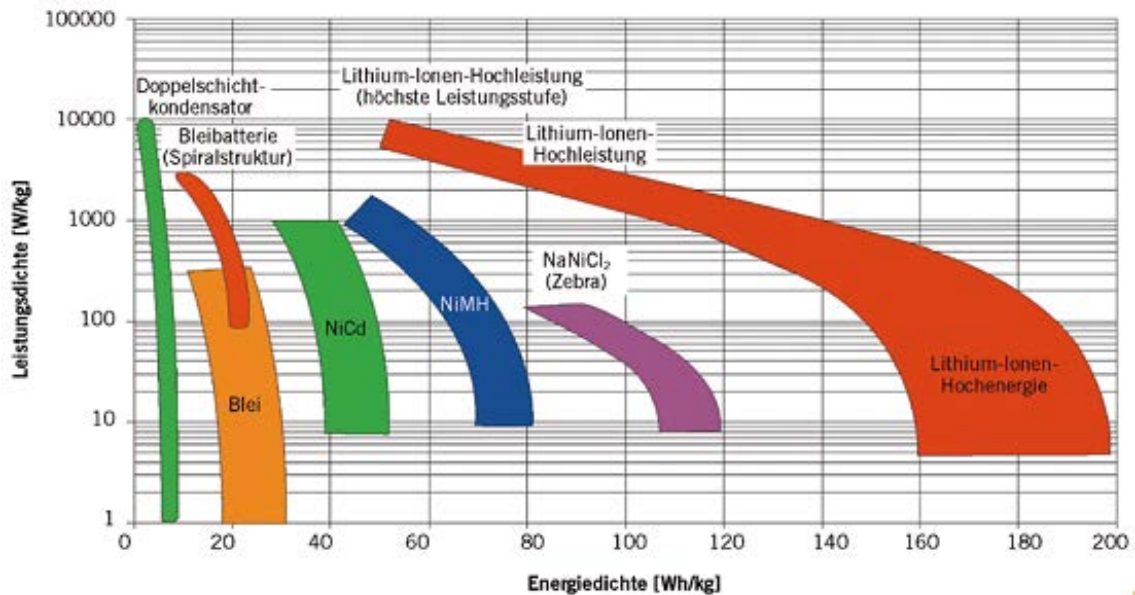


Abbildung 3.5: Leistungs- und Energiedichte verschiedener Energiespeicher auf Zellebene (7)

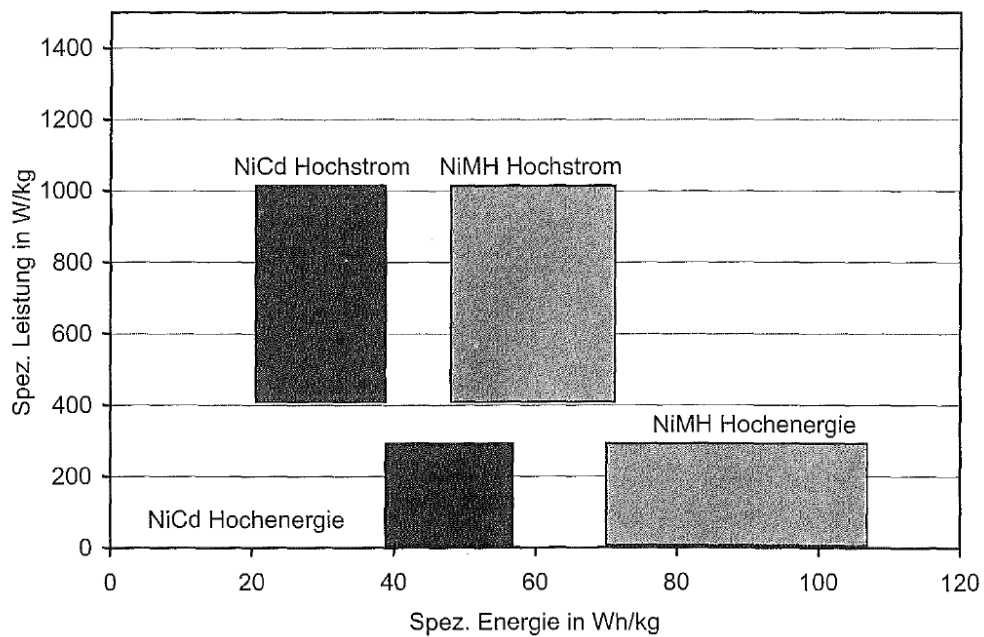


Abbildung 3.6: Ragone-Diagramm für NiCd und NiMH Batterien (8)

Der Vergleich verschiedener Speicher kann auf Zell- und auf Systemebene erfolgen. Für den Einsatz im Schienenfahrzeug sind die Systemwerte relevant, da aus Ihnen der tatsächlich benötigte Bauraum und die resultierende Masse ermittelt werden können. Bei der Systembetrachtung reduzieren sich die Zellwerte von spezifischer Leistung und Energie oder Wirkungsgrad durch Berücksichtigung zusätzlicher Systemkomponenten wie Gehäuse, Kühlung / Heizung und Speichermanagementsystem. Abbildung 3.7 stellt für Batterien und Doppelschichtkondensatoren beispielhaft dar, wie sich die Einbeziehung von Systemkomponenten auf die Kennwerte der spezifischen Leistung und der spezifischen Energie auswirken.

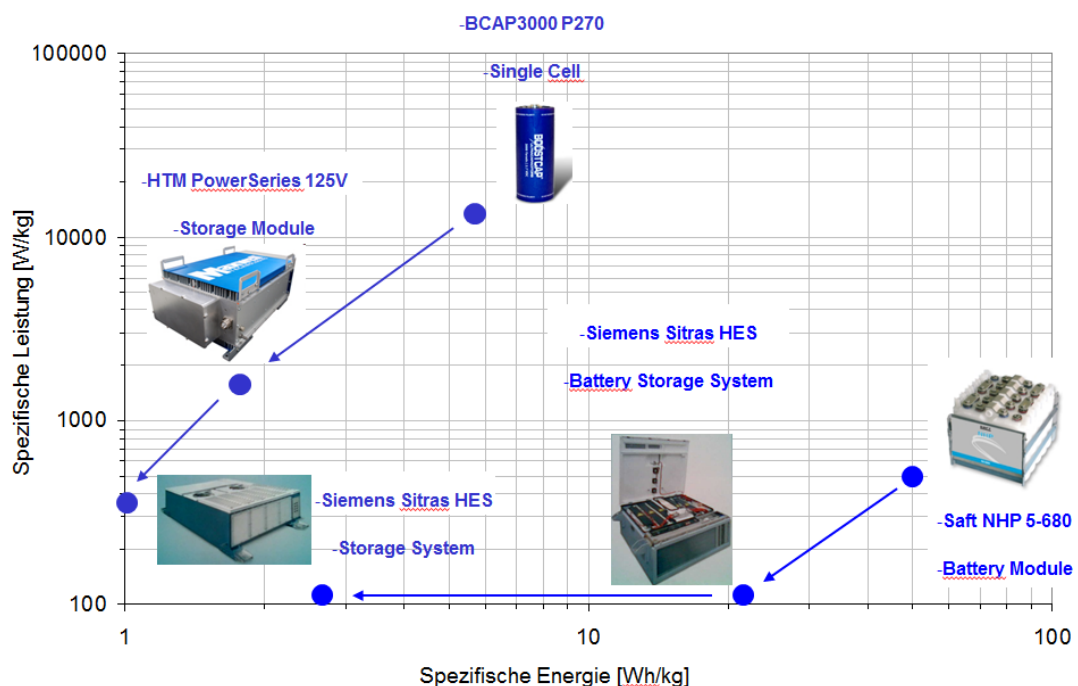


Abbildung 3.7: Vergleich von Energiespeichern auf Zell- und Systemebene

3.1.1 Elektrochemische Energiespeicher

Elektrochemische Energiespeicher oder auch Sekundärbatterien sind Energiespeicher, die elektrische Spannung mit Hilfe elektrochemischer Umwandlungsprozesse erzeugen. Die Spannung der elektrochemischen Zelle variiert in

einem breiten Bereich abhängig von der gewählten Elementenkombination (Details siehe Anhang).

Beim Vergleich von Batterien auf Systemebene variieren die Herstellerangaben bezüglich der spezifischen Energie und Leistung, da diese Angaben vom tatsächlich genutzten Kapazitätsbereich abhängen. Dieser wird über die Entladetiefe *Depth of Discharge*, DoD, beschrieben. Wird ein Speicher mit einem DoD von 80 % betrieben, dann werden maximal 80 % der installierten Kapazität genutzt. Angaben für die Zyklenfestigkeiten beziehen sich meist auf 80 % DoD. Im Allgemeinen erhöht sich bei Batterien die realisierbare Zyklenanzahl überproportional bei Verringerung des DoD.

Die Integration eines elektrochemischen Energiespeichers in das Fahrzeug erfolgt meist über einen DC/DC-Wandler zwischen Speicher und Gleichspannungs-Zwischenkreis. Da Speichersysteme mit großer Kapazität aus mehreren Modulen zusammengesetzt werden, ist prinzipiell eine Verteilung an verschiedene Einbauorte im Fahrzeug möglich.

Die Rekuperation von Bremsenergie stellt die größte Herausforderung für Batteriespeicher dar, da eine große Energiemenge innerhalb sehr kurzer Zeit gespeichert werden muss und die zulässigen Ladeströme geringer als die Entladeströme sind. Bei entsprechender Auslegung und Kühlung können Batteriespeichertypen große Energiemengen in kurzer Zeit aufnehmen.

NiCd-Batterien

Anfang des vorigen Jahrhunderts wurde die Nickel-Cadmium-Batterie vom Schweden Waldemar Jungner entwickelt, wobei die heute üblichen gasdichten und wartungsfreien Bauformen erstmals in den 1950er Jahren gefertigt wurden. Sie sind oftmals schnellladefähig und weisen mit einer intelligenten Ladeelektronik keinen Memoryeffekt auf. (9) Die NiCd-Technologie ist ausgereift und wird zum Beispiel von Alstom in den V100-Hybrid-Rangierloks eingesetzt. Bedingt durch die eingesetzten chemischen Stoffe sind NiCd-Batterien relativ sicher, allenfalls beim Bruch des Gehäuses stellt eventuell austretende, stark ätzende Kalilauge ein gewisses Risiko dar. (8)

Tabelle 3.1: Technische Daten NiCd-Batterien (8) (9) (10) (11)

	Allgemein
Zellspannung [V]	1,2
Spezifische Leistung [W/kg]	250 - 1000
Spezifische Energie [Wh/kg]	10 - 55
Energiedichte [Wh/l]	~ 150
Leistungsdichte [W/l]	~ 500
Betriebstemperatur [°C]	-20 - +40
Energetischer Wirkungsgrad [%]	~ 70
Zykluslebensdauer bei 80 % DoD	1500
kalendarische Lebensdauer	12 - 18 Jahre
Gefährdungspotential	IV E

Vorteile:

- + erprobte Technologie
- + robust gegen Tiefentladung
- + geringe Temperaturabhängigkeit der Lade-/Entladeströme

Nachteile:

- hohe Selbstentladung 25 % / Monat
- hoher Wartungsaufwand (regelmäßige Entladung)
- umweltschädlich und giftig durch Verwendung des Schwermetalls Cadmium
- geringes Potential zur Kostensenkung

NiMH-Batterien

Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) weisen eine ähnliche Zellspannung wie NiCd-Batterien auf. Sie sind seit 1980 kommerziell erhältlich. Sie weisen eine höhere Energiedichte auf und sind sicherheitstechnisch unbedenklicher, da sie ohne Cadmium auskommen. (9) Die Technologie ist ausgereift und wird als Traktionsbatterie beispielsweise im Personenwagen Toyota Prius verwendet. Bedingt durch die eingesetzten chemischen Stoffe sind NiMH-Batterien relativ

sicher. Bei hohen Temperaturen oder bei mechanischen Beschädigungen des Gehäuses besteht die Gefahr, dass Wasserstoff austritt. Wasserstoff ist sehr leicht entzündlich allerdings auch stark flüchtig, so dass ein Gefahrenpotential nur für kurze Zeit besteht. Daher sollten eine Belüftung, damit eventuell austretender Wasserstoff abtransportiert werden kann, und eine Temperaturüberwachung vorhanden sein. (8)

NiMH-Batterien können hohe Entladeströme abgeben. Allerdings reduzieren starke Entladungen die Lebenserwartung erheblich. Zusätzlich beschleunigen hohe Temperaturen (über 45 °C) den Alterungsprozess. Die Umgebungstemperatur hat einen starken Einfluss auf das Verhalten der Batterie. Sie weist bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C einen deutlichen Kapazitätsverlust auf und ab etwa -20 °C wird sie unbrauchbar. Daher ist für den Einsatz eine Flüssigkeitskühlung und eine Heizung vorzusehen, um die Batterie im optimalen Temperaturfenster von 20 °C bis 35 °C betreiben zu können.

Tabelle 3.2: Technische Daten NiMH-Batterien (8) (10) (11) (12)

	Allgemein
Zellspannung [V]	1,2
Spezifische Leistung [W/kg]	400 - 1000
Spezifische Energie [Wh/kg]	20 - 100
Energiedichte [Wh/l]	~ 200
Leistungsdichte [W/l]	200 - 700
Betriebstemperatur [°C]	-30 - +65
Energetischer Wirkungsgrad [%]	~ 70
Zykluslebensdauer bei 80 % DoD	~1000
kalendarische Lebensdauer	5 - 10 Jahre
Gefährdungspotential	IV E

Vorteile:

- + erprobte Technologie
- + robust gegen Tiefentladung

Nachteile:

- hohe Selbstentladung 30 % / Monat
- empfindlicher gegen Überladung als NiCd
- Temperaturabhängigkeit des Lade-/Entladeverhaltens
- geringes Potential zur Kostensenkung

NaNiCl-Batterien (Hochtemperaturbatterie)

Die Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie (NaNiCl), auch ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities) Batterie genannt, wurde in den 1970er-Jahren als Traktionsbatterie entwickelt. Sie wird den Hochtemperaturbatterien, deren Arbeitstemperatur zwischen 270 °C und 350 °C liegt, zugeordnet. Die Entwicklung hatte das Ziel, die Energiedichte und die Leistungsfähigkeit der Natrium-Schwefel-Batterie zu erreichen und dabei ihre Nachteile hinsichtlich der Sicherheit zu vermeiden. Im geladenen Zustand liegt in der Zelle flüssiges Natrium als negative Elektrode und Nickel in fester Form als positive Elektrode vor. (13) Bedingt durch die eingesetzten chemischen Stoffe werden NaNiCl-Batterien als sicher eingestuft.

Tabelle 3.3: Technische Daten der NaNiCl-Batterie auf Modulebene (12) (13) (14) (15) (16)

	Allgemein
Zellspannung [V]	2,59 bei 300 °C
Spezifische Leistung [W/kg]	~150
Spezifische Energie [Wh/kg]	100 -120
Energiedichte [Wh/l]	100 - 130
Leistungsdichte [W/l]	~200
Betriebstemperatur [°C]	270 - 350
Energetischer Wirkungsgrad [%]	~85 %
Zyklenlebensdauer bei 80 % DoD	~1000
kalendarische Lebensdauer	~10 Jahre
Gefährdungspotential	IV E

Vorteile:

- + Schnellladefähig
- + Recyclefähig
- + Nicht toxisch
- + Leistungsfähigkeit von Umgebungstemperatur unabhängig

Nachteile:

- vergleichsweise geringe Leistungsdichte
- Aufheizzeit: ca. 14 h
- Temperaturhaltung erfordert Heizenergie, dadurch hohe Selbstentladung

Lithium-basierte-Batteriesysteme

Bei auf Lithium basierenden Batteriesystemen existieren verschiedene Zusammensetzungen von Kathoden- und Anodenmaterialien. Je nach Paarung ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften bzgl. der Nennspannung, Leistungsdichte, Lebensdauer, Sicherheit etc. der Batterie. Im Folgenden werden die Materialkombinationen Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) und Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) betrachtet, da diese die für den Bahnbetrieb notwendige hohe spezifische Energie und Leistung, Sicherheit und Lebensdauer bieten können. (17)

Lithium basierte Batteriesysteme reagieren empfindlich auf Überladung. Dies kann zu einem thermischen Durchgehen verbunden mit einer plötzlichen Selbsterwärmung führen. Dabei steigt nicht nur die Temperatur in der Zelle, es kommt außerdem zu einem Ansteigen des Zelldruckes bis hin zum Auswerfen von Zellkomponenten. Durch ein Batteriemanagementsystem (BMS) bzw. Schutzeinrichtungen im Batteriemodul kann ein Überladen allerdings verhindert werden.

Tabelle 3.4: Vergleich Lithium-basierte-Batteriesysteme (12) (18) (19) (20)

	Hochleistungszelle Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)	Hochleistungszelle Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)	Hochenergiezelle Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)
Nutzbarer Zellspannungsbereich [V]	2,5 - 3,6	2,5 - 4,2	2,5 - 4,2
spez. Energie [Wh/kg]	60 - 110	100 - 150	175 - 240
spez. Leistung [W/kg]	~4.000	~4.000	~1.000
Energiedichte [Wh/l]	125 - 250	250 - 350	400 - 640
Leistungsdichte [W/l]	~10.000	~10.000	~2.000
Zyklusfestigkeit bei 80% DoD	1.500	800	800
kalendarische Lebensdauer	>5 Jahre	>5 Jahre	>5 Jahre
Betriebstemperatur [°C]	-30 - 60	-30 - 60	-20 - 60
Gefährdungspotential	III D	III D	III D

Vorteile: (19) (18) (15)

- Hohe Zellspannung / Wirkungsgrade liegen bei ~95 %
- Unterschiedliche Materialzusammenstellung / -eigenschaften möglich
- Schnellladefähig
- Geringer Wartungsaufwand
- Hohes Entwicklungspotential (Kostenreduktion)

Nachteile: (19) (18) (15)

- Anspruchsvolle Zellüberwachung sowie Thermomanagement notwendig (BMS)
- Erhöhte Sicherheitsmaßnahmen erforderlich → Überladung, thermisches Durchgehen, Temperaturüberwachung, Tiefenentladung
- Bisher wenig Erfahrungen in Traktionsanwendungen

Derzeit liegen die Kosten für Li-Ionen-Traktionsbatterien für Schienenfahrzeuge bei etwa 1.000 - 2.000 CHF/kWh auf Systemebene (je nach Zellchemie und Abnahmemenge, Schätzwerte enthalten Einmalkosten für Engineering, Auslegung, etc.). In den folgenden Kostenberechnungen wird für Lithium-basierte Batteriesysteme mit einem Wert von 1.500 CHF/kWh gerechnet.

Für alle betrachteten elektrochemischen Energiespeicher gilt, dass eine detaillierte Speicherauslegung vom jeweiligen Hersteller anhand von Lastprofilen und Lebensdauieranforderungen durchgeführt wird. Neben der Auswahl geeigneter Zellen umfasst dies die Definitionen der zu installierenden Speicherkapazität und der zulässigen Entladetiefe. Im Folgenden werden daher beispielhaft Entladetiefen angenommen. Für mögliche konkrete Umsetzungsvorhaben ist in Zusammenarbeit mit Herstellern eine detaillierte Speicherauslegung vorzunehmen.

Tabelle 3.5 stellt die hier vorgestellten elektrochemischen Energiespeicher gegenüber. Bei der Betriebstemperatur ist zu beachten, dass es sich um Grenzwerte aus Hersteller- bzw. Literaturangaben handelt. Die optimale Betriebstemperatur ist von der Technologie abhängig und kann bei unter- bzw. überschreiten zu Leistungseinbußen und Lebensdauerverkürzung führen (vgl. Anhang).

Tabelle 3.5: Gegenüberstellung elektrochemischer Energiespeicher auf Zellniveau (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (18) (19) (20)

	NiCd	NiMH	NaNiCl (Modul)	LFP Hochleistung	NMC Hochleistung	NMC Hochenergie
spez. Energie [Wh/kg]	10 - 55	20 - 100	100 - 120	60 - 110	100 - 150	175 - 240
spez. Leistung [W/kg]	250 - 1000	400 - 1000	~150	~4000	~4000	~1000
Energiedichte [Wh/l]	~150	~200	100 - 130	125 - 250	250 - 350	400 - 640
Leistungsdichte [W/l]	~500	200 - 700	~200	~10000	~10000	~2000
energetischer Wirkungsgrad [%]	~70	~70	~85	~90	~95	~95
Zyklusfestigkeit bei 80% DoD	1500	1000	1000	1500	800	800
kalendarische Lebensdauer [Jahre]	12 - 18	5 - 10	~10	>5	>5	>5
Selbstentladung pro Monat [%]	~25	~30	~10% pro Tag	2 - 10	2 - 10	2 - 10
Zellspannung [V]	1,2	1,2	2,59 (bei 300°C)	2,5 - 3,6	2,5 - 4,2	2,5 - 4,2
Betriebstemperatur [°C]	-20 - 40	-30 - 65	-60 - 120	-30 - 60	-30 - 60	-20 - 60

3.1.2 Elektrostatische Energiespeicher

In einem Doppelschichtkondensator (DSK, auch Supercap oder Ultracap) erfolgt die Energiespeicherung durch Ladungstrennung und basiert auf der Speicherung von Energie im elektrischen Feld zwischen zwei geladenen Elektroden (Details siehe Kapitel 8.2). Die Anbindung eines DSK-Systems an den Zwischenkreis eines Fahrzeugs erfolgt über einen DC/DC-Wandler, wobei der große genutzte Spannungsbereich berücksichtigt werden muss. Da sich ein Speichersystem aus mehreren Modulen zusammensetzt, ist eine Verteilung an verschiedene Einbauorte im Fahrzeug möglich. Die Form jedes Moduls ist aufgrund der Zusammensetzung aus einzelnen Speicherzellen relativ flexibel. (21)

Eigenschaften von DSK (22) (23) (24)

- Nennspannung Einzelzelle: 2,5 bis 2,7 V
- Spezifische Energie: ~ 5 Wh/kg
- Spezifische Leistung: 5.000 - 50.000 W/kg
- Temperaturbereich -40 bis +65 °C
- Energetischer Wirkungsgrad: ~95 %
- Zyklenfestigkeit: 500.000 - 1.000.000 Zyklen
- Kalendarische Lebensdauer: 10 - 20 Jahre
- Gefährdungspotential: IV E

Vorteile

- + Hohe Zyklenstabilität
- + Ladezustand direkt aus Spannung ermittelbar
- + Hohe spezifische Leistung
- + Wartungsfrei
- + Kurzschlussfest, tiefenentladbar

Nachteile

- Hohe Kosten bezogen auf Energie
- Geringe spezifische Energie
- Aufwendige Leistungselektronik durch großen Spannungsbereich
- Zellschädigung bei Überladung
- Entstehung giftiger Gase bei Brand

3.1.3 Schwungmassenspeicher

Schwungmassenspeicher (SMS) speichern Energie kinetisch in der Trägheit einer rotierenden Masse. Beim Einspeisen von Energie wird die Drehgeschwindigkeit gesteigert und bei Energieentnahme verringert. Bereits realisierte Systeme sind sowohl für den stationären als auch für den mobilen Bereich einsetzbar. Zu den Systemkomponenten gehören ein Wechselrichter, Vakuumpumpe, elektronische Überwachung und Kühlsystem. Dabei kann der Anteil der Peripherie (Gehäuse, Wechselrichter, Vakuumpumpe, ...) am Gesamtgewicht fast doppelt so hoch sein wie das Gewicht des eigentlichen Schwungrades.

Die Anbindung eines SMS erfolgt direkt an den Gleichspannungszwischenkreis des Fahrzeugs. Ein Wechselrichter als Verbindung zwischen elektrischer Maschine und Zwischenkreis wandelt die Zwischenkreis-Gleichspannung in die für die elektrische Maschine benötigte Wechselspannung mit variabler Frequenz und Spannung.

Eigenschaften von SMS (24) (25) (26)

- Spezifische Energie: 5 - 10 Wh/kg
- Spezifische Leistung: 250 - 1800 W/kg
- Energiedichte: ~ 7 Wh/l
- Leistungsdichte: ~ 1.000 W/l
- Betriebstemperatur: - 25°C bis + 50°C
- Energetischer Wirkungsgrad: ~90 %

- Zyklfestigkeit: ~ 1.000.000 Vollastzyklen
- Kalendarische Lebensdauer: ~ 20 Jahre
- Gefährdungspotential: IV D

Vorteile

- + Hohe Zyklfestigkeit und Lebensdauer
- + Hohe spezifische Leistung

Nachteile

- Hohe Selbstentladung 3 - 20 % / h
- Kontinuierliche Überwachung notwendig
- Komplexes mechanisches System, mechanische Defekte möglich
- Erhöhter Wartungsaufwand durch mechanische Komponenten
- Crashverhalten nicht ausreichend untersucht

3.1.4 Hydraulikspeicher

Hydraulische Energiespeichersysteme bestehen aus einem Nieder- und einem Hochdruckbehälter. Beim Laden wird eine Flüssigkeit über eine hydrostatische Pumpe-Motor-Einheit vom Niederdruck- in den Hochdruckbehälter gefördert (vgl. Abbildung 3.8). Dabei wird im Hochdruckbehälter ein Gas (meist Stickstoff) bei mehr als 350 bar komprimiert. Bei der Expansion des Gases wird über das hydrostatische Antriebselement das Fahrzeug beschleunigt, wobei die Hydraulikflüssigkeit vom Hochdruckbehälter in den Niederdruckbehälter gefördert wird.

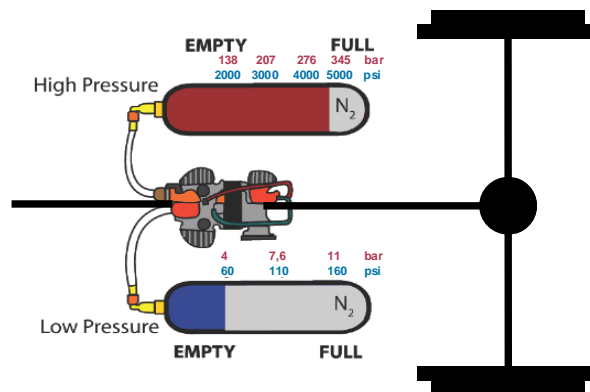


Abbildung 3.8: Prinzip einer Hydraulikspeicheranwendung

Die gebräuchlichsten Typen von Druckspeichern sind Membranspeicher, Blasenspeicher und Kolbenspeicher, welche aus Faserverbundwerkstoffen (FVK) oder Stahl bestehen. Speicher aus Faserverbundwerkstoffen sind teuer und leichter allerdings weniger schlagfest. Membranspeicher besitzen geringe Volumina und eine geringere Trägheit im Vergleich zu Kolbenspeichern. Mit Kolbenspeichern sind hohe Kolbengeschwindigkeiten möglich, wodurch die Dichtungen jedoch schneller zu internen Leckagen neigen. Der Volumennutzungsgrad eines Hydrospeichers beschreibt das Verhältnis von maximal aufnehmbarem Ölvolumen zum maximalen Gasvolumen und ist hauptsächlich von der Bauart des Speichers abhängig. Abbildung 3.9 zeigt den Volumennutzungsgrad der genannten Bauarten. (27)

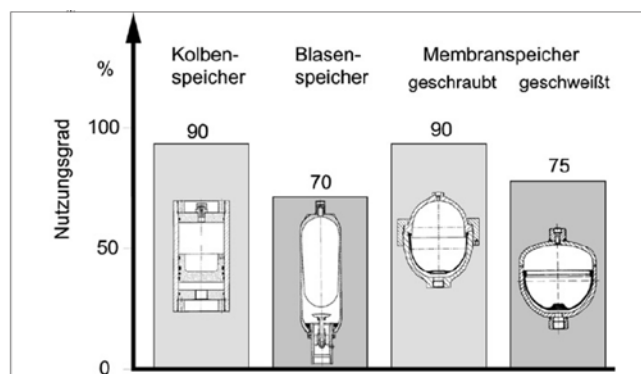


Abbildung 3.9: Max. Volumennutzungsgrad verschiedener Hydrospeicher (27)

Zwar ist der Volumennutzungsgrad des Blasenspeichers im Vergleich am geringsten, doch werden sie in der Praxis schwerpunktmäßig zur Speicherung von Rekuperationsenergie eingesetzt. Sie erlauben hohe Ölströme, sind war-

tungsarm, weisen kurze Reaktionszeiten auf (25 ms) und besitzen im Vergleich zu Kolbenspeichern keinen relativen Reibungsdruck. Mit Blasenspeichern sind Drücke bis zu 550 bar und Volumina bis zu 200 l möglich. (28)

Der gasseitige Wirkungsgrad eines Hydrospeichers ist das Verhältnis zwischen der vom Gas abgegebenen Volumenänderungsarbeit zu der vom Gas aufgenommenen Volumenänderungsarbeit während eines Arbeitszyklus. Dieser ist stark vom Belastungsprofil und der Belastungsfrequenz abhängig. Eine langsame Zustandsänderung bewirkt einen Energieverlust durch Wärme, so dass eine Ent- bzw. Beladung polytrop (konstante spezifische Wärmekapazität) erfolgt. Dieser tritt bei schnellen Zustandsänderungen in geringerem Maße auf und die Zustandsänderung kann ideal als adiabat (kein Austausch von Wärmeenergie) angesehen werden. (29)

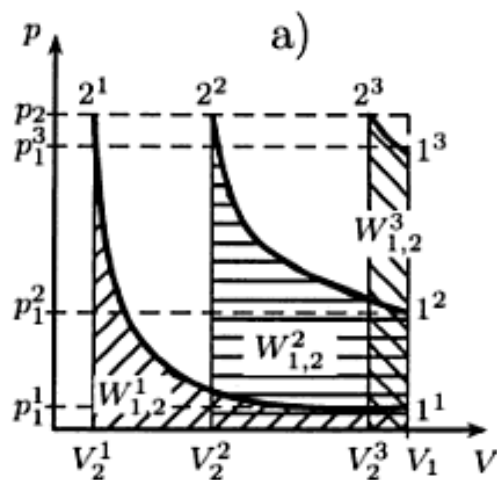


Abbildung 3.10: Kennlinien für Hydrospeicher (29)

Abbildung 3.10 zeigt die Verhältnisse für die aufzuwendende bzw. speicherbare Energie W_{12} von Hydrospeichern bei der Vorgabe eines maximalen Druckes p_2 und eines maximalen Volumens V_2 für drei verschiedenen Anfangsdrücke p_1^1 , p_1^2 und p_1^3 . Mit aktuell verfügbaren Hydrospeichern können dabei Wirkungsgrade von bis zu 90 % erreicht werden. (27) (29)

Eigenschaften von Hydraulikspeichern (27) (30) (31) (32)

- Spezifische Energie: 0,2 - 6 Wh/kg (abhängig vom Druckspeicher)
- Spezifische Leistung: 1 - 90 kW/kg (abhängig vom Druckspeicher)
- Betriebstemperatur: -20 °C - +80 °C
- gasseitiger Wirkungsgrad: bis zu 90 % (abhängig vom Druckspeicher)
- Zyklenfestigkeit: ~ 7.000 Vollastzyklen
- Kalendarische Lebensdauer: ~ 20 Jahre
- Gefährdungspotential: IV E

Vorteile:

- + Elektrifizierung mechanischer Antriebssysteme nicht notwendig
- + geringe Temperaturabhängigkeit des Speichersystems
- + hydrostatische Komponenten sind ausgereift
- + Nutzung der Bremsenergie in hydrostatisch angetriebenen Komponenten möglich

Nachteile:

- Geringe Energiedichte
- Große Systemdrücke, je nach Auslegung mehr als 350 bar möglich
- Leckage und Undichtigkeiten führen zu Ölaustritt
- Senkrechte Anordnung der Speicher bevorzugt → Raumbedarf
- regelmäßige Überprüfung der Druckleitungen und Druckbehälter notwendig

3.1.5 Vergleich realisierter Energiespeichersysteme

Tabelle 3.6: Vergleich von realisierten Speichertypen auf Systemebene (33) (34) (35) (36) (37) (38)

	DSK		SMS	NiCd	NiMH		NaNiCl	Lithium basierte Batteriesysteme	
spez. Energie [Wh/kg]	1,0 (1)	2,34 (2)	7,4 (3)	20 (4)	22 (5)	<35 (6)	119 (7)	112 (8)	100 (9)
spez. Leistung [W/kg]	350 (1)	700 (2)	111 (3)	<200 (4)	127 (5)	<500 (6)	167 (7)	565 (8)	1000 (9)
Energiedichte [Wh/l]	0,44 (1)	1,9 (2)	---	25 (4)	20 (5)	<40 (6)	181 (7)	145 (8)	90 (9)
Leistungsdichte [W/l]	150 (1)	577 (2)	---	<250 (4)	118 (5)	<550 (6)	257 (7)	730 (8)	900 (9)
energetischer Wirkungsgrad [%]	---	---	90 (3)	~90 (4)	---	~90 (6)	---	---	~95 (9)
Zyklusfestigkeit (bei 80% DOD)	---		---	~3000 (4)	---	~3500 (6)	---	3100 (8)	~3500 (9)
kalendarische Lebensdauer [Jahre]	---		---	5 - 25 (4)	---	5 - 25 (6)	---	---	>5 (9)
Masse [kg]	820 (1)	428 (2)	18000 (3)	---	826 (5)	---	182 (7)	943 (8)	---
Betriebstemperatur [°C]	---		---	-50 - 60 (4)	---	-30 - 50 (6)	-40 - 50 (7)	-15 - 55 (8)	-10 - 50 (9)
Kosten [CHF/kWh] (10)	12.000 - 36.000		10.000 - 30.000	800-1.800	900-1.900	900-1.900	1.000-2.000	1.000-2.000	1.000-2.000
Kosten [CHF/kW] (10)	40 - 120		~700	40 - 90	140 - 300		700 - 1400	150 - 400	
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Lebensdauer - Zyklusfestigkeit - hohe Leistung - SOC einfach bestimmbar - Sicherheit - "einfaches" Gesamtsystem 		<ul style="list-style-type: none"> - Lebensdauer - Zyklusfestigkeit - hohe Leistung 	<ul style="list-style-type: none"> - erprobte Technologie - robust gegen Tiefenentladung 	<ul style="list-style-type: none"> - erprobte Technologie - robust gegen Tiefenentladung 		<ul style="list-style-type: none"> - schnellladefähig - Recyclefähig - Nicht toxisch 	<ul style="list-style-type: none"> - schnellladefähig - geringer Wartungsaufwand - großes Entwicklungspotential - hohe Wirkungsgrade 	
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - geringe spez. Energie - Kosten bezg. auf Energie - Alterung temperaturabhängig 		<ul style="list-style-type: none"> - hohe Selbstentladung - Überwachung notwendig - Sicherheit - Komplexität - Crashverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Selbstentladung - Wartungsaufwand - umweltschädlich und giftig (Schwermetall Cadmium) - geringes Potential zur Kostensenkung 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Selbstentladung 30 % / Monat - empfindlicher gegen Überladung als NiCd - geringes Potential zur Kostensenkung 		<ul style="list-style-type: none"> - vergleichsweise geringe Leistungsdichte - Aufheizzeit: ca. 14 h - erfordert Heizenergie / Temperaterhaltung 	<ul style="list-style-type: none"> - Zellüberwachung notwendig (BMS) - Sicherheitsmaßnahmen erforderlich - wenig Erfahrungen in Traktionsanwendungen 	

- 1 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Siemens Sitras Hybrid Energy Storage System (inkl. Kühlung)
2 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Bombardier Mitrac Energy Saver Unit LRV 2008 (inkl. Kühlung)
3 - spezifische Werte des Gesamtsystems: ALPS Rail Flywheel (Schwungrad mit Leistungselektronik und Generator)
4 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Hoppecke Ni-Cd Antriebsbatterie für Bahnfahrzeuge
5 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Siemens Sitras Hybrid Energy Storage System (inkl. Wasserkühlung)
6 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Hoppecke Ni-MH Antriebsbatterie für Bahnfahrzeuge
7 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Mesda Z5-557-ML3X-38 (Zellstack inkl. Heizung)
8 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Akasol NMC System 45M 53 (Zellstack inkl. Kühlung / ohne Kühlmittel)
9 - spezifische Werte des Gesamtsystems: Hoppecke NMC Antriebsbatterie für Bahnfahrzeuge
10 - Basierend auf Kostenschätzungen des DLR

In Tabelle 3.6 sind Erfahrungswerte aus Veröffentlichungen und bereits realisierten Projekten dargestellt. Für konkrete Vorhaben sollten auch Gespräche mit Herstellern geführt werden, die auf Basis von Lastprofilen, Lebensdaueranforderungen etc. eine detaillierte Auslegung des Energiespeichersystems inklusive Wartungs- und Austauschintervallen durchführen können. Dabei kann es zu Abweichungen von den oben angeführten Werten kommen.

Im Rahmen dieser Studie werden für weiterführende Betrachtungen die folgenden Werte definiert:

	DSK	Hydraulik	NMC	NiCd	NiMH
Spezifische Energie [Wh/kg]	1	1	100	20	35
Spezifische Leistung [W/kg]	350	10.000	1000	200	500
Energiedichte [Wh/l]	0,44	---	90	25	40
Leistungsdichte [W/l]	150	---	730	200	115
Energetischer Wirkungsgrad [%]	95	90	95	90	90
nutzbare Kapazität [%]	80	---	80	80	80
Spezifische Kosten [CHF/kWh]	24.000	3.000	1500	1300	1400

3.2 Verbrennungsmotoren und alternative Kraftstoffe

3.2.1 Luftschadstoffe und Emissionsgrenzwerte

Bei der Verbrennung von kohlenstoffbasierten Kraftstoffen werden Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Feinstaubpartikel (PM) als Nebenprodukt je nach verwendetem Motor und Kraftstoff in unterschiedlicher Höhe emittiert.

Weltweit sind in den letzten Jahren diesbezüglich schrittweise strengere Grenzwerte für Schadstoffe und Partikel im Schienenverkehr festgelegt worden. In der EU gelten für dieselbetriebene Schienenfahrzeuge die EU-Richtlinien 97/68/EG und 2004/26/EG (Bereich Non-Road Mobile Machinery), die Grenzwerte für den Ausstoß von NO_x , HC, CO und PM festlegen. Abbildung 3.11 zeigt die Entwicklung der Grenzwertstufen für neue Bahndieselmotoren. In der Schweiz gelten die EU-Grenzwerte gemäß 2004/26/EG, mit der zusätzlichen

Auflage, spezielle Partikelfilter einzusetzen (vgl. (39)) um neben der Masse auch die Anzahl der Partikel Rechnung zu tragen.

Norm	Etappe	Kategorie	Inkraft-treten*	Motorleistung (kW)	Grenzwerte in [g/kWh]			
					CO	HC	NO _x	Partikel
UIC Kodex 624 V	Stufe I A		1982		8.0	2.4	20.0	2.5
	Stufe I B		1993		4.0	1.6	16.0	2.0
	Stufe I C		1997		3.0	0.8	12.0	1.6
	Stufe II		2003	P ≤ 560	2.5	0.6	6.0	0.25
			2003	P > 560	3.0	0.8	9.5	0.25
	Stufe III		2008	P ≤ 560	2.0	0.5	4.5	0.15
			2008	P > 560	2.0	0.5	6.0	0.20
(97/68/EG) 2004/26/EG	Stufe III A	Lokomotive	01.2006/07	130 ≤ P ≤ 560	3.5	4.0 (HC+NO _x)		0.2
			01.2008/09	560 ≤ P ≤ 2000	3.5	0.5	6.0	0.2
			01.2008/09	P > 2000, Hubraum > 5[l/Zyl]	3.5	0.4	7.4	0.2
		Triebwagen	01.2005/06	P > 130	3.5	4.0 (HC+NO _x)		0.2
	Stufe IIIB	Lokomotive	01.2011/12	P > 130	3.5	4.0 (HC+NO _x)		0.025
		Triebwagen	01.2011/12	P > 130	3.5	0.19	2.0	0.025

Prüfzyklus: ISO 8178-4, F bzw. C1 für Triebwagen
 * Erster Termin: Gültig für neue Motorentypen. Zweiter Termin: Gültig für die 1. Inverkehrsetzung bzw. 1. Inbetriebnahme von neuen Motoren.

Abbildung 3.11: Schadstoffemissionsgrenzwerte in der EU und Schweiz (40)

Die Richtlinie 2004/26/EG legt fest, dass die Grenzwerte der Stufe IV nicht für Lokomotiven und Triebwagen Gültigkeit besitzen; für sie gelten demnach weiterhin die Grenzwertstufen Stufe III A bzw. B. Das Inkrafttreten der Stufe IV, bzw. ggf. einer neuen Stufe V, für Brennkraft-Schienenfahrzeuge erscheint für den Zeithorizont um das Jahr 2020 realistisch (vgl. (41))

Für die Tm 234 und die Am 843 zeigt Tabelle 3.7 ermittelte Messdaten und zum Vergleich die Abgasgrenzwerte nach UIC I und II des UIC-Kodex 624. (41)

Tabelle 3.7: Emissionsfaktoren von Fahrzeugen der SBB (41)

Fahrzeug	Einsatzfeld	Leistung Dieselmotor	Grenzwertstufe	Emissionsfaktoren in g/kWh (in Klammern die Grenzwerte nach UIC I bzw. UIC II)			
				HC	CO	NOx	PM
Tm 234	Baudienst	550 kW	UIC-I	1,1 (0,8)	4,0 (3,0)	7,0 (12,0)	0,15 (0,5)
Am 843	Rangierdienst	1500 kW	UIC-II (ERRI-2003)	0,2 (0,8)	0,7 (3,0)	8,9 (9,5)	0,1 (0,25)

3.2.2 Konventionelle Dieselmotoren

Im Allgemeinen werden Dieselmotoren nach ihrer Leistung klassifiziert.

Tabelle 3.8 stellt beispielhaft die Spannbreite der spezifischen Leistung und der Leistungsdichte von Dieselmotoren und Powerpacks dar.

Tabelle 3.8: Kennwerte Dieselmotoren und Diesel-Powerpacks (42) (43) (44) (45)

	Spezifische Leistung [kW/kg]	Leistungsdichte [kW/m³]	Spezifische Kosten [CHF/kW]
Dieselmotor (ohne Betriebsstoffe)	0,24 - 0,46	186 - 371	80 - 150
Powerpack (inkl. Betriebsstoffe)	0,08 - 0,11	39 - 55	350 - 1.200

Bei entsprechender Wartung und Pflege können Verbrennungsmotoren sehr lange eingesetzt werden. Aus technischer Sicht gibt es kein allgemeingültiges Kriterium, wann das Ende der Lebensdauer erreicht ist. Meist erfolgt die Auslegung auf eine definierte Anzahl von Betriebsstunden, da in der Praxis der Betrieb mit zunehmendem Alter unwirtschaftlicher wird. Der Wartungsaufwand steigt mit zunehmender Einsatzdauer an, und durch den technischen Fortschritt stehen modernere, wirtschaftlichere Verbrennungsmotoren mit geringerem spezifischen Verbrauch und größerer Leistungsdichte zur Verfügung. Legislative Vorgaben wie verschärfte Emissionsgrenzwerte gelten zwar nur für neue Verbrennungsmotoren, mindern aber trotzdem die Akzeptanz für ältere, weniger saubere Verbrennungsmotoren.

Die Kosten für Dieselmotoren variieren je nach Spezifikation und abgenommener Stückzahl. Nach DLR-Erhebung liegen die spezifischen Kosten eines 300 - 600 kW-Dieselmotors zwischen 80 und 150 CHF/kW. Die spezifischen Kosten für Powerpacks (inkl. Getriebe, Schalldämpfer, Abgasnachbehandlung etc.) übersteigen die Motorkosten um ein Vielfaches. Je nach Ausführungsvariante und inkludierten Teilsystemen (Kühlsystem, Tank, Bordnetzgenerator), der Abnahmemenge und ob es sich um Erstausrüstungs- oder Ersatzsysteme handelt, variieren die Kosten nach DLR-Erhebung stark zwischen etwa 350 - 1200 CHF/kW.

Zur Verringerung der Abgasemissionen und insbesondere zur Einhaltung der strengen NO_x - sowie PM-Grenzwerte werden Motoren, Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung durch umfassende Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten permanent optimiert. Dazu gehören Maßnahmen zur Kühlung der Ladeluft und der Vergrößerung des Einspritzdrucks. Ferner werden aufwendige Systeme zur Abgasnachbehandlung entwickelt. Hierbei handelt es sich vor allem um Abgasrückführungssysteme und SCR-Systeme (Selective Catalytic Reduction), die mit Harnstofflösungen zur Verringerung der Stickoxidemissionen arbeiten.

Durch die Rückführung des Abgases in den Verbrennungsraum mit einer damit einhergehenden Senkung der Temperatur und Sauerstoffkonzentration können zwar die NO_x -Werte reduziert werden, gleichzeitig steigt jedoch die Partikelanzahl an, wodurch ein zusätzlicher kostenintensiver Diesel-Rußpartikelfilter erforderlich werden kann. Durch den Einsatz von SCR-Systemen sind zusätzliche Komponenten wie Steuergeräte, Verrohrungen, Pumpen und AdBlue-Tanks sowie Harnstofflösungen erforderlich und der Dieselmotorkraftstoffverbrauch kann ggf. ansteigen.

Das Umweltbundesamt schätzt die Kosten für den nachträglichen Einbau von Rußpartikelfiltern auf ca. 1-2 % des Anschaffungspreises. (39) Der Verband der Bahnindustrie (VDB) geht für den nachträglichen Einbau von Abgasnachbehandlungssystemen von bis zu 15 % des Fahrzeugpreises aus. (40) Allerdings

wird mit der technischen Weiterentwicklung eine Kostendegression in der Zukunft erwartet.

3.2.3 Verbrennungsmotoren mit alternativen Kraftstoffen

Dieselmotoren sind Selbstzünder, bei denen die den Zylindern zugeführte Luft durch Kompression erhitzt wird und sich der eingespritzte Kraftstoff selbständig entzündet. Dieses Prinzip funktioniert auch bei Biodiesel und diesel-ähnlichen synthetischen Kraftstoffen.

Beim Einsatz von Erdgas (CNG) oder Flüssiggas (LPG) ist keine kontrollierte Selbstentzündung möglich, was zusätzliche Maßnahmen am Verbrennungsmotor erforderlich macht. Soll der Motor ausschließlich mit einem der genannten Kraftstoffe betrieben werden, dann ist eine Umstellung des Motors auf Fremdzündung durch Zündkerzen (Otto-Prinzip) erforderlich. Im Fall von LPG muss trotzdem Ottokraftstoff mitgeführt werden, da der Kraftstoff bei kaltem Motor nicht schnell genug verdampft. Für den Kaltstart des Motors wird daher solange Ottokraftstoff verwendet, bis im Ansaugtrakt und Verbrennungsraum für das selbstständige Verdampfen des LPG-Kraftstoffs ausreichende Temperaturen erreicht sind.

Als Alternative zur Umrüstung auf das Ottoprinzip steht bei Erdgas auch die so genannte Dual-Fuel- oder Bi-Fuel-Technologie zur Verfügung, die eine Beibehaltung des Selbstzündungsprinzips ermöglicht. Bei dieser Technologie werden Diesel und Erdgas gleichzeitig verbrannt, wobei der Dieseldieselkraftstoff die Selbstzündung einleitet. Ein reiner Erdgasbetrieb ist mit dieser Technologie nicht möglich, da je nach Herstellerangabe mindestens 3-10% Dieseldieselkraftstoff für die Selbstentzündung eingespritzt werden müssen. Ein reiner Dieseldieselbetrieb ist weiterhin möglich.

Eine Umstellung der Verbrennungsmotoren auf alternative Kraftstoffe kann hinsichtlich Schadstoffemissionen und Kosten günstiger als der Dieseldieselbetrieb sein. Je nach Kraftstoff ist aber mit einer Steigerung des Aufwandes für die Kraftstoffspeicherung im Fahrzeug zu rechnen. Weiterhin können nicht unerhebliche Anpassungen der Betankungsinfrastruktur erforderlich sein. Bei bioge-

nen Kraftstoffen ist zudem zu berücksichtigen, dass diese in Flächen- und Nutzungskonkurrenz zu Nahrungsmitteln stehen, pestizidintensive Monokulturen fördern und zusätzliche Schadstoff-Emissionen bei der Gewinnung mit sich bringen können. (46) (47)

Die Auswirkungen, die verschiedene alternative Kraftstoffe auf Verbrennungsmotor und Tanksystem, Schadstoffemissionen, Energiekosten und Betankungsinfrastruktur haben, werden im Folgenden für die Biodiesel, synthetischen Dieselmotorkraftstoff, Erdgas und Flüssiggas diskutiert. Zusätzlich wird Wasserstoff als Energieträger für Brennstoffzellensysteme berücksichtigt.

3.2.3.1 Biodiesel

Nach DIN EN 14214 ist FAME (fatty acid methyl ester, Fettsäuremethylester) die übergreifende Bezeichnung für alle Methylester auf Basis von Pflanzen- und Tierölen, die im Folgenden als Biodiesel bezeichnet werden. Hierzu zählen z.B. Rapsölmethylester (RME) und Sojaölmethylester (SME). Bei der Herstellung wird das Pflanzenöl mit Hilfe von Methanol als Katalysator chemisch zu Biodiesel umgesetzt.

Reiner Biodiesel wird als B100 bezeichnet. Es kommen auch Mischungen mit mineralischem Diesel zum Einsatz, die entsprechend ihrem Anteil an Biodiesel bezeichnet werden, z.B. B20 für einen mineralischen Dieselmotorkraftstoff mit 20% Biodieselanteil.

Biodiesel ist aggressiver als mineralischer Diesel, wodurch Kunststoffe und Gummisorten angegriffen und u. U. Motordichtungen und Kraftstoffschläuche beschädigt werden können. Die Oxidationsstabilität und damit die Lagerfähigkeit sind im Vergleich zu konventionellem Diesel geringer. Da Biodiesel hygroskopisch ist, steigt der Wassergehalt beim Transport und der Lagerung an. Hieraus resultiert auch ein schlechteres Kälteverhalten, Biodiesel muss ab -20 °C ggf. in beheizten Tanks aufbewahrt werden. Reiner Biodiesel (B100) hat eine Energiedichte von 8,9 kWh/l. Aufgrund der geringeren Energiedichte ist mit einem Mehrverbrauch bis zu 10 % zu rechnen.

Der Umrüstaufwand für den Einsatz von Biodiesel ist im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen gering. Moderne Verbrennungsmotoren sind meist ab Werk für B10 freigegeben, je nach Hersteller sind auch Freigaben bis B100 (z.B. Caterpillar) vorhanden. Bestehende Tankanlagen können fahrzeug- und infrastrukturseitig prinzipiell weiter verwendet werden, jedoch sind die im Kraftstoffsystem verwendeten Kunststoffe und Gummimischungen auf Verträglichkeit zu prüfen und gegebenenfalls zu ersetzen. Sind Lager- und Fahrzeugtanks Temperaturen unter -20°C ausgesetzt, so kann der Einbau einer Tankheizung erforderlich sein. Weiterhin ist mit einem höheren Wartungsaufwand (Ölwechselintervalle, Kraftstofffilter) zu rechnen.

Erste Erfahrungen mit biogenen Kraftstoffen wurden seitens der Prignitzer Eisenbahn GmbH im Testbetrieb bis 2010 gemacht. Hier kam es insbesondere im Winter zu massiven Ausfällen der Fahrzeuge bei Temperaturen unter -20°C durch vermehrte Filterverstopfungen. (48) Die Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF) führte Tests mit B20-Biodiesel durch. Hier ergaben sich keine nennenswerten Emissionsvorteile, während gleichzeitig Leistungsverluste sowie ein erhöhter Kraftstoffverbrauch entstanden. Dem entgegen stehen Untersuchungen aus Großbritannien, welche Dieselmischungen mit einem biosynthetischen Anteil zwischen 10 % (B10) und 50 % (B50) reduzierte Schadstoffausstoßwerte bescheinigen. (49)

Der Preis für Biodiesel ist u.a. von der Art der Erzeugung, den Kosten der Grundstoffe und weiteren Faktoren abhängig. Kostenvorteile gegenüber konventionellem Dieselmotorkraftstoff können sich in der Schweiz im Bereich der Besteuerung ergeben. Gemäß der Treibstoffökobilanz-Verordnung (TrÖbiV) kann eine Reduzierung oder ein Entfall der Mineralölsteuer (derzeit 0,76 CHF/Liter auf Diesel) bei Einsatz von Kraftstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen erzielt werden. Dazu ist ein Nachweis der positiven ökologischen Gesamtbilanz gegenüber fossilen Kraftstoffen (u.a. mind. 40 % CO_2 -Reduktion) zu führen. (50) (51) (52)

Die Kosten für die Umrüstung einer Tankanlage im Schienenverkehr werden mit ca. 2.000 € (2.400 CHF) geschätzt. Für den Neubau inklusive eines eigenen Tanks für Biodiesel werden 20.000 € (24.000 CHF) angegeben. (52)

Nach REACH (Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals)-Verordnung (EG) 1907/2006 gilt Fettsäuremethylester nicht als Gefahrenstoff und unterliegt deshalb nicht den Vorschriften der Verordnung brennbare Flüssigkeiten. Weiterhin wird es in die Wassergefährdungsklasse 1 (schwach wassergefährdend) eingestuft. (53)

3.2.3.2 Synthetische Kraftstoffe (X to liquid - XtL)

XtL (X to liquid) ist die allgemeine Bezeichnung von flüssigen synthetischen Kohlenwasserstoffen, welche nach dem verwendeten Rohstoff unterschieden werden. Als Basis können Biomasse (Biomass to Liquid - BtL), Erdgas (Gas to Liquid - GtL) oder Kohle (Coal to Liquid - CtL) dienen. (54) (55) Die Energiedichte von synthetischen Kraftstoffen ist im Allgemeinen vergleichbar bzw. geringfügig geringer als die von Diesel. Für GtL werden etwa 9,5 kWh/l (56) und für BtL 9,4 kWh/l (57) angegeben.

Die Produktion von synthetischen Kraftstoffen kann z.B. durch die Fischer-Tropsch-Synthese erfolgen. Im Rahmen der Synthesegaserzeugung können die Eigenschaften des Kraftstoffes an die Anforderungen des Motors und der Abgasnachbehandlung angepasst werden. (55)

Derzeit ist die Herstellung und Bereitstellung (well to tank) von synthetischen Kraftstoffen entweder deutlich teurer (BtL) (55) (58) oder sie weisen schlechtere Treibhausgasemissionen als konventioneller Diesel auf (CtL).

Die Höhe der Treibhausgasemissionen bei BtL variiert je nach Grundstoff, Anbaumethode, Produktion in den verfahrenstechnischen Anlagen und der Distribution. Im Allgemeinen ist hier von einer geringeren CO₂-Belastung auszugehen. (54) (55) (58) Allerdings unterliegt BtL ähnlich wie Biodiesel auch der Diskussion um Nahrungsmittelkonkurrenzen.

Für die Herstellung von GtL wird Erdgas als Grundstoff verwendet. Da in der Schweiz bezogen auf den Energieinhalt Erdgas deutlich günstiger als Dieselmotorkraftstoff ist, kann auch trotz verfahrenstechnischer Herstellung von GtL eine preislich konkurrenzfähige Alternative zum Dieselmotorkraftstoff entstehen. Jedoch ist die CO₂-Bilanz von GtL deutlich schlechter als die von Erdgas. (58)

Der auf Kohle basierende CtL-Kraftstoff weist im Vergleich mit GtL, Dieselmotorkraftstoff und BtL eine deutlich schlechtere CO₂-Bilanz auf. Die Herstellung wurde in der Vergangenheit hauptsächlich in Staaten mit einem hohen Kohlevorkommen vorangetrieben, z. B. in Südafrika. (58)

Einen flächendeckenden Einsatz von synthetischen Kraftstoffen verhindert derzeit noch die mangelnde Verfügbarkeit von Produktionsanlagen, die eine Versorgung mit für den Verkehr relevanten Mengen gewährleisten können. Eine stufenweise Markteinführung mit Hilfe kleinerer dezentraler Anlagen scheint jedoch möglich.

Für den Einsatz im Schienenfahrzeug kann XtL jedoch Vorteile bieten, da es in bestehenden konventionellen Motoren eingesetzt werden kann und keine technischen Änderungen an Tankstellen oder Fahrzeugen vorzusehen sind. (59) Insbesondere die aufwändigere Bereitstellung und Speicherung gasförmiger Kraftstoffe kann somit vermieden und im Fahrzeug eine größere Energiedichte des Tanksystems inklusive Kraftstoff realisiert werden.

Derzeit laufen Versuche der DB AG mit auf Erdgas basierendem GtL in einigen Rangierlokomotiven der DB Schenker AG, um Erfahrungen zu Kraftstoffverbrauch und Instandhaltungsaufwand der Dieselmotoren zu gewinnen. Nach den ersten zwei Monaten Versuchsdauer sind bislang keine Störungen aufgetreten.

3.2.3.3 Erdgas (LNG & CNG)

Die Zusammensetzung von Erdgas schwankt je nach Fundstätte. Es besteht zu 75-99 % aus Methan, weiterhin aus Ethan, Butan und Inertgasen. Grundsätzlich sind zwei Erdgasqualitäten zu unterscheiden: L (low) und H (high). L-Gas besitzt einen Methangehalt bis 87 % und einen geringeren Energiegehalt als H-

Gas. Abhängig von den konkreten Einsatzbedingungen ist mit Erdgas eine CO₂-Einsparung von bis zu 10 % sowie eine Reduzierung von Stickstoffoxid (NO_x) oder Rußpartikel (PM) bis zu 50 % möglich. (60) (61) Es kann abhängig vom Motoraufbau bei ungünstigen Betriebszuständen dazu kommen, dass das Methan nicht vollständig verbrennt und in die Atmosphäre gelangt. Methan ist ca. 21x klimaschädlicher als CO₂. Daher ist für eine positive Klimabilanz der Methanschlupf so gering wie möglich zu halten. (62)

Bei allen Gasmotoren gelangt das Erdgas gasförmig in den Motor. Dabei fließt das Gas durch einen zusätzlich notwendigen Druckregler, welcher auf den erforderlichen Mindestdruck für den Motorbetrieb eingestellt ist. (63) Grundsätzlich sind viele der aktuell verfügbaren Dieselmotoren für den Betrieb mit Erdgas anpassbar. Aufgrund der geringeren Zündfähigkeit des Erdgases ist für Erdgasmotoren eine Fremdzündung notwendig. Dies kann entweder durch eine Zündkerze (Mono-Fuel) oder durch das Zündstrahlverfahren (Dual-Fuel-Antrieb) realisiert werden. Beim Zündstrahlverfahren werden je nach Betriebspunkt zwischen 3 - 60 % Erdgas durch Diesel substituiert, um eine Entzündung des Kraftstoffes zu gewährleisten. (64) Dafür ist neben dem Erdgastank ein weiterer Dieseltank notwendig. Bei Mono-Fuel-Motoren handelt es sich um reine Erdgasmotoren, wohingegen Dieselmotoren durch Umrüstung mit Dual-Fuel betreiben werden können. Da derzeit am Markt keine Serienmotoren für Schienenfahrzeuge (weder Mono- noch Dual-Fuel Motoren) verfügbar sind, ist mit Entwicklungskosten für z.B. ein Dual-Fuel Retrofit von ~120 TCHF zu rechnen. (65) Weitere Kosten für Tank-Komponenten und Fahrzeug-Umbau können nach gegenwärtigem Stand nicht genau beziffert werden. MTU plant entsprechend den Marktbedingungen die Einführung eines Gasmotors im Bahnbereich (Serien-geschäft) bis 2020. (66)

Die Speicherung von Erdgas kann in flüssiger (Liquefied Natural Gas LNG) oder in komprimierter Form (Compressed Natural Gas CNG) erfolgen. Unabhängig von der Art der Speicherung ist aufgrund der geringeren Energiedichte von Erdgas und der aufwändigeren Tankkonstruktion im Vergleich zu konventionellen Dieseltanks mehr Bauraum für den Erdgastank erforderlich.

Bei der Wahl des Standortes von Gas-Betankungsanlagen und Fahrzeugabstellanlagen muss individuell geprüft werden, inwieweit ein ausreichender Sicherheitsabstand zu spannungsführenden Elementen, wie z. B. Oberleitungen, erforderlich ist und wie durch Sicherheitsmaßnahmen eine etwaige Gefährdungen minimiert werden kann. Grundsätzlich ist nach (67) bei Unfällen davon auszugehen, dass im Vergleich zu Dieselfahrzeugen der Abstand zur Absicherung eines Unfallortes größer gewählt werden muss sowie spezielle Ausrüstung, z.B. Gaswarngeräte, erforderlich sind.

Für die Bewertung von Erdgas als alternativem Kraftstoff werden folgende Annahmen getroffen:

- Berechnungsbasis ist die für die Gesamt-Lebensdauer berechnete Diesel-Kraftstoffenergie, die durch Erdgas oder Erdgas-Diesel-Kombination bereitgestellt wird
- Dual-Fuel-Erdgasmotor: Im Mittel werden 75 % der Energie durch Erdgas, 25 % durch Dieselmotorkraftstoff bereitgestellt
- Mono-Fuel-Erdgasmotor: 100% der Energie werden durch Erdgas bereitgestellt

Flüssig-Erdgas (Liquefied Natural Gas - LNG)

Die Speicherung von Erdgas in flüssiger Form erfolgt bei ca. -162 °C bei Umgebungsdruck. Wird Erdgas in flüssiger Form gespeichert, so muss der Tank ausreichend isoliert sein, um die Temperatur zu halten und um die Verdampfungsverluste bei langen Standzeiten des Fahrzeugs möglichst gering zu halten. Bevor LNG in den Brennraum transportiert wird, muss es zunächst wieder verdampft werden. Damit ist im Vergleich zu CNG ein zusätzlicher Verdampfer notwendig. (63)

Aufgrund der im Vergleich zu Diesel geringeren Energiedichte (9,8 kWh/l bei Diesel, 5,3 kWh/l bei LNG), ist bei gleicher Fahrzeugreichweite der Bauraumbedarf für die LNG-Behälter um etwa den Faktor zwei größer als für Dieseltanks. (60) LNG ermöglicht im Vergleich zu CNG höhere Reichweiten bei gleichem Tankvolumen.

Investitionskosten für LNG-Tankstellen wurden in verfügbarer Literatur nicht gefunden. Daher wird zunächst davon ausgegangen, dass sich die im Rahmen von CNG-Tankstellen bewegen (vgl. komprimiertes Erdgas).

Komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas - CNG)

Die Speicherung von Erdgas in komprimierter Form (Energiedichte: 2,2 kWh/l bei 200 bar) erfolgt in Druckbehältern bei meist 200 bis maximal 240 bar. Ein höherer Gasdruck führt zu einer höheren Energiedichte und damit zu einer höheren Reichweite. Im Vergleich zu LNG hat CNG den Vorteil, dass es kostengünstiger bereitzustellen ist, da für die Komprimierung weniger Energie aufgewendet werden muss. (63) CNG-Motoren und -speicher sind im PKW schon heute Stand der Technik und haben damit einen TRL von 9.

Die Kosten einer CNG-Erdgastankstelle mit je einer Zapfsäule für Busse betragen laut einer Studie des Fürstentums Liechtenstein etwa 1,25 Millionen CHF. (68) Für den Schienenfahrzeugbereich ergeben sich ggf. stark abweichende Werte durch z.B. höhere Tankkapazitäten und größere tägliche Abgabemengen.

3.2.3.4 Flüssiggas (*Liquefied Petroleum Gas – LPG*)

Flüssiggas (Energiedichte: 6,8 kWh/l / 12,8 kWh/kg) (69) ist ein fossiler Kraftstoff, der aus den Kohlenwasserstoffen Propan und Butan in jahreszeitlich angepassten Mischungsverhältnissen besteht. (70) Die Speicherung erfolgt in flüssiger Form in Stahltanks bei ca. 10 bar und Umgebungstemperatur. (71) (72)

Aufgrund der geringen Zündfähigkeit von Flüssiggas ist wie beim Einsatz von Erdgas eine Fremdzündung notwendig. Im PKW-Bereich werden fast ausschließlich Ottomotoren eingesetzt, in Nutzfahrzeugen wurden auch Dieselmotoren entweder auf Dual-Fuel-Betrieb umgerüstet, wobei die Zündung durch einen Dieselanteil (~66 %) im Kraftstoff erfolgt, oder mit Zündkerzen nachgerüstet. (73) Bei der Umrüstung sind in beiden Fällen ein zusätzlicher Druckbehälter

ter, eine separate Einspritzanlage inkl. Druckregler und ein angepasstes Motormanagement notwendig. (72)

Bis 2011 führte Vossloh Versuche mit einer flüssiggasbetriebenen Rangierlokomotive durch. Dabei wurde ein Dieselmotor für einen monovalenten Betrieb mit Fremdzündung (Ottomotorprinzip) modifiziert. Das Flüssiggas wurde in Standardtanks bei 6 -10 bar gespeichert wobei ein Gasvolumen von 77 % des Dieselkraftstoffes erreicht wurde. Die Versuche wurden wieder eingestellt, da sich kaum Vorteile gegenüber einem Dieselantrieb ergeben haben. (74)

Bei der Wahl des Standortes von Gas-Betankungsanlagen und Fahrzeugabstellanlagen muss individuell geprüft werden, inwieweit ein ausreichender Sicherheitsabstand zu spannungsführenden Elementen, wie z. B. Oberleitungen, erforderlich ist und wie durch Sicherheitsmaßnahmen eine etwaige Gefährdungen minimiert werden kann.

Für die Bewertung von LPG als alternativem Kraftstoff werden folgende Annahmen getroffen:

- Berechnungsbasis ist die für die Gesamt-Lebensdauer berechnete Diesel-Kraftstoffenergie
- Dual-Fuel-Erdgasmotor: 33 % der Energie werden durch LPG, 66 % durch Dieselkraftstoff bereitgestellt
- Mono-Fuel-Erdgasmotor: 100% der Energie werden durch LPG bereitgestellt

3.2.3.5 Wasserstoff

Wasserstoff (spezifische Energie: 33 kWh/kg) wird in Brennstoffzellen verwendet, um elektrische Energie zu erzeugen. Die Speicherung im Bereich von mobilen Anwendungen erfolgt entweder gasförmig (C-H₂ - compressed hydrogen) in Drucktanks bei 350 - 700 bar oder tiefgeköhlt verflüssigt (L-H₂ - liquid hydrogen) bei rund -250 °C. Heute werden im mobilen Bereich vor allem Drucktanks eingesetzt, da hier definierte Zulassungsparameter für den Einbau im Fahrzeug existieren. Außerdem ist der Energieaufwand für die Verflüssigung

von Wasserstoff nicht unerheblich, er beträgt je nach Menge und angewandter Methode 28 % bis 46 % des Energieinhaltes des Wasserstoffs.

Bei Druckgastanks werden, abhängig vom Aufbau des Druckbehälters, folgende Typisierungen vorgenommen:

- *Typ 1:* nahtlose Flaschen aus Stahl
- *Typ 2:* nahtloser Kernbehälter (Liner) Zylinderteil umwickelt mit Kohlenstofffasern
- *Typ 3:* metallischer Liner vollumwickelt mit Kohlenstofffasern
- *Typ 4:* Kernbehälter aus Kunststoff, welcher mit Kohlenstofffasern vollumwickelt ist

Bei den Typen 3 und 4 handelt es sich um die in der Praxis in mobilen Anwendungen eingesetzten Druckgasspeichertypen. Allerdings kann bei einem doppelt so hohen Druck nicht die doppelte Menge an Wasserstoff gespeichert werden, da die ideale Gasgleichung ihre Gültigkeit verliert und die reale Gasgleichung angewendet werden muss. Problematisch bei der 700 bar Technologie ist der hohe Wasserstoffdurchgangskoeffizient der Kunststoffliner, was eine hohe Diffusionsrate des Wasserstoffs durch die Tankwände nach sich zieht. Um die Permeabilität zu verringern, werden sogenannte Sperrschichtpolymere eingesetzt.

Beim Betrieb von Wasserstoffsystemen sind geeignete Sicherheitsstrategien notwendig, da Wasserstoff eine sehr niedrige Zündenergie benötigt. Wasserstoff ist farblos und nicht toxisch. Hier ist zu beachten, dass eine Wasserstoffflamme nahezu unsichtbar und damit schwer zu lokalisieren ist. Dabei liegt die Detonationsgrenze von Wasserstoff bei ca. 18 Volumen % und damit deutlich über der von Diesel (ca. 1,1 Volumen %). Weiterhin kann Wasserstoff zur Erstickung führen, wenn es eine Sauerstoffatmosphäre in geschlossenen Räumen verdrängt. (75) Zudem sind Wasserstofftanks durch die erforderliche Druckfestigkeit im Vergleich zu Dieseltanks unempfindlicher gegenüber Beschädigungen.

Die Wasserstoffpreise ergeben sich in Abhängigkeit von der Erzeugungsart (vgl. Kapitel 8.7, der Kosten des Primärenergieträgers Strom, Erdgas, etc.), der Wasserstoffabnahmemenge sowie der Besteuerung bzw. Subventionierung und der Marge (bei Fremdbezug). In Bezug auf die Wasserstofferzeugungskosten findet sich in der Literatur eine große Bandbreite an Kosten in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Basisannahmen. Abbildung 3.12 gibt einen Überblick über die Bandbreite der Erzeugungskosten nach Technologie. Zu den Erzeugungskosten kommen Distributionskosten, die je nach Menge und Anlieferort durchaus in gleicher Höhe hinzukommen können. Im Rahmen der Studie werden für Wasserstoff Kosten von 13 CHF/kg (für 2014) angenommen.

Verfahren / Prozess		H ₂ -Erzeugungskosten	Kostenanteile Brennstoffkosten (Erdgas, Strom)
Erdgas-reformierung	Große Anlagen 10.000-100.000 Nm ³ /h	1,20-5,50 €/kg H ₂	bis zu 80%
	Kleine Anlagen 50-100 Nm ³ /h		
Elektrolyse		3,00-7,00 €/kg H ₂ , abhängig von Technologie (alkalisch, PEM), Betriebsweise (kontinuierlich vs. dynamisch), Energiequelle (Kraftwerk oder fluktuierende regenerative Quellen)	75-85 %, bei Annahme 0 ct/kWh (Ausfallenergie nutzen) kann der Wert auch deutlich unter 3,00 €/kg fallen.
Biomassereformierung		1,56-1,89 €/kg H ₂	40% (Biomasse)
Photobiologische H ₂ -Erzeugung		129,76-0,56 €/kg H ₂ (Mittelwert 3,24)	Investitionskosten bis zu 92%

Verschiedene Faktoren haben Einfluss auf die Produktionskosten. Dazu gehören insbesondere die Preise für Erdgas und Strom, die Berücksichtigung von Einspeisevergütungen und CO₂-Zertifikaten, die technische Reife der Herstellungsverfahren und andere.

Abbildung 3.12: Abschätzung Wasserstofferzeugungskosten nach Produktionsverfahren (76)

Für Betankungsanlagen und -strategien ist eine Orientierung an bestehender Technik aus dem Straßenverkehr denkbar. Mit Hilfe spezieller Füllkupplungen wird der Wasserstoff hierbei flüssig oder gasförmig bei 350 oder 700 bar bereitgestellt. Im Busbereich hat sich im Vergleich zum PKW eine Betankung mit 350 bar etabliert. Dazu wird voraussichtlich im Oktober 2014 der SAE J2601-2 HD (Heavy Duty) publiziert. Für weitere Normungsarbeiten im Bahnbereich wäre zukünftig eine Anlehnung an diesen Standard möglich. In der SAE J2601-2 HD wird in der Option B eine Betankung für 350 bar mit einem Massenstrom von bis zu 120 g/s (7,2 kg/min, Tankkapazität > 10kg) spezifiziert. Dies entspricht einem Dieselvolumenstrom von etwa 24 l/min. (77)

Für die Betankung von Wasserstofffahrzeugen müssen geeignete Tankanlagen mit Gleisanschluss installiert werden. Als Kosten für Wasserstofftankstellen für Straßenfahrzeuge werden derzeit 1 Million Euro (ca. 1,2 Millionen CHF) genannt. (78) Für Elektrolyseanlagen der dezentralen Erzeugung von Wasserstoff werden in der Literatur zusätzlich 1 Million Euro (ca. 1,2 Millionen CHF) angegeben. (79) Für Schienenfahrzeuge ist auf Grund höherer Anforderungen an Speicher und Betankungsanlagen mit entsprechend höheren Kosten zu rechnen.

Bei der Wahl des Standortes von Wasserstoff-Betankungsanlagen und Fahrzeugabstellanlagen muss individuell geprüft werden, inwieweit ein ausreichender Sicherheitsabstand zu spannungsführenden Elementen, wie z. B. Oberleitungen, erforderlich ist und wie durch Sicherheitsmaßnahmen eine etwaige Gefährdungen minimiert werden kann.

3.2.4 Vergleich alternativer Kraftstoffe

Abbildung 3.13 zeigt den direkten Vergleich der beschriebenen Kraftstoffe bezüglich Energiedichte und spezifischer Energie. Die größte Energiedichte weist konventioneller Dieselmkraftstoff auf, insbesondere die unter Druck gespeicherten gasförmigen Kraftstoffe (CNG und CH₂) sowie Flüssig-Wasserstoff (LH₂) und LPG benötigen ein zum Teil deutlich größeres Volumen für die Bereitstellung der gleichen Energiemenge.

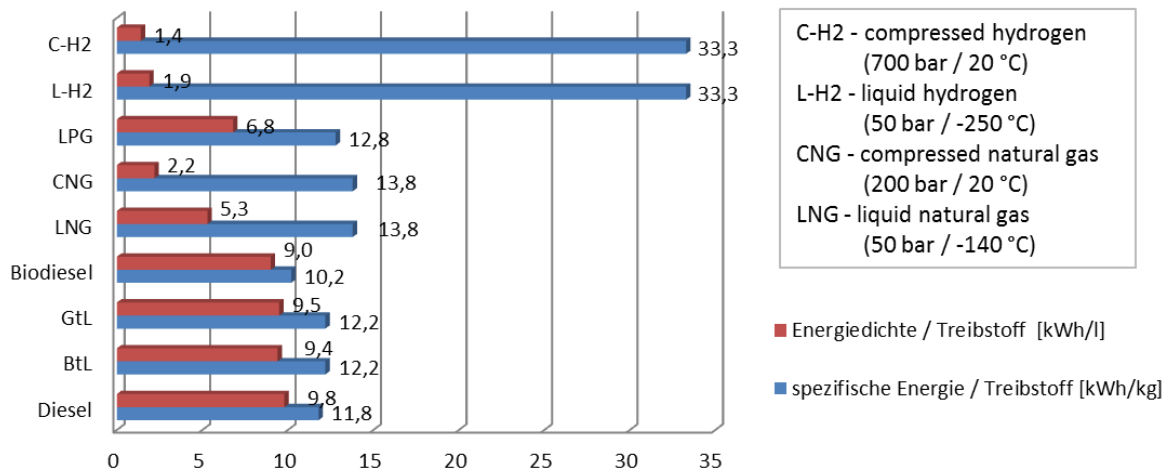


Abbildung 3.13: Energiedichtenvergleich alternativer Kraftstoffe nach (56) (57) (60) (69) (80) (81)

Je nach Kraftstoff sind unterschiedliche Anforderungen an die Tanksysteme zu stellen. Generell gilt, je niedriger die Temperaturen und/oder je höher die Drücke sind, desto mehr Material muss für die Tanksysteme verbaut werden.

Gegenüber Dieselkraftstoff stellen sich auf Tanksystemebene die Energiedichten und spezifischen Energien insbesondere für Wasserstoff, CNG und LNG als deutlich ungünstiger dar, was direkten Einfluss auf Bauraumbedarf und Masse der Tanks hat. Abbildung 3.14 zeigt die Energiedichte und spezifische Energie auf Tanksystemebene für verschiedene Kraftstoffe. Die Daten gelten für Straßenfahrzeuge, können aber prinzipiell auch auf Schienenfahrzeuganwendungen übertragen werden. Zur Veranschaulichung der Unterschiede in Bezug auf Energiedichte und spezifische Energie wurde zusätzlich ein elektrochemischer Energiespeicher auf Batteriesystemebene dem Vergleich hinzugefügt.

Die deutlichen Unterschiede relativieren sich, wenn man die jeweiligen Wirkungsgradketten Batterie- bzw. Brennstoffzellen-elektrischer und dieselbasierter Antriebssysteme einbezieht und damit berücksichtigt, dass der Bedarf an Kraftstoffenergie der elektrischen Antriebssysteme geringer ist. Nichtsdestotrotz verdeutlicht die Abbildung die substantiellen Unterschiede der einzelnen Energieträger und die sich daraus ergebenden Restriktionen in der praktischen Anwendung.

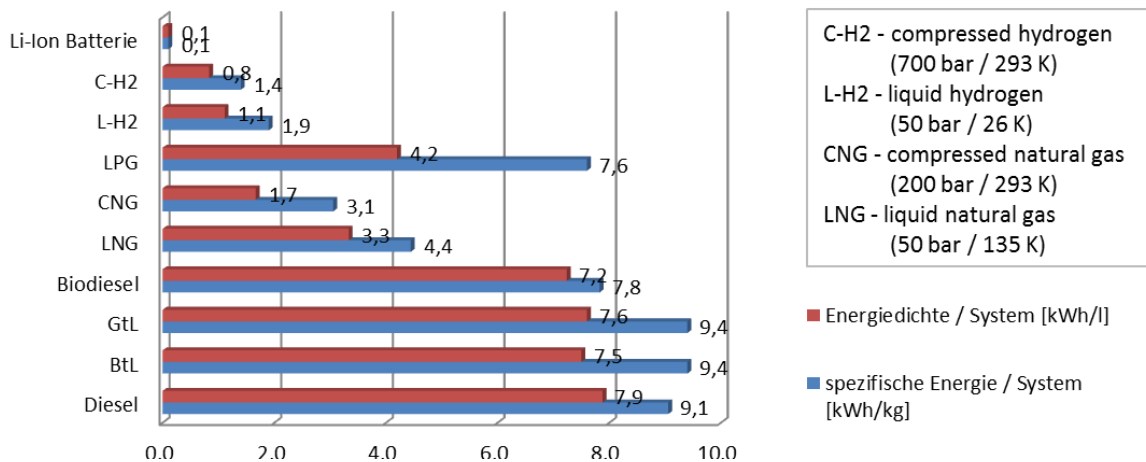


Abbildung 3.14: Energiedichtevergleich alternativer Kraftstoffe auf Tank- / Energiespeicherebene (60) (74) (81)

Abbildung 3.15 stellt die direkten Kohlenstoffdioxid-Emissionen verschiedener Treibstoffe dar. Diese direkten CO₂ Emissionen fallen am Ort der Energieumwandlung, also ihrer Verbrennung an. Die Emissionen zur Herstellung des Brennstoffes werden dabei nicht betrachtet. (82) Es kann festgestellt werden, dass infolge des geringeren Kohlenstoffgehalts von Erdgas (LNG / CNG) weniger CO₂ entsteht, als bei der Verbrennung von herkömmlichem Diesel oder Biodiesel. Zudem ist beim Einsatz von Biokraftstoffen bei der Verbrennung keine CO₂-Einsparung festzustellen. Wasserstoff erzeugt bei der „kalten Verbrennung“ in einer Brennstoffzelle direkt keine CO₂ Emissionen, allerdings entstehen CO₂-Emissionen bei der Erzeugung des Wasserstoffs in unterschiedlicher Höhe je nach Primärenergieträger und Produktionsverfahren.

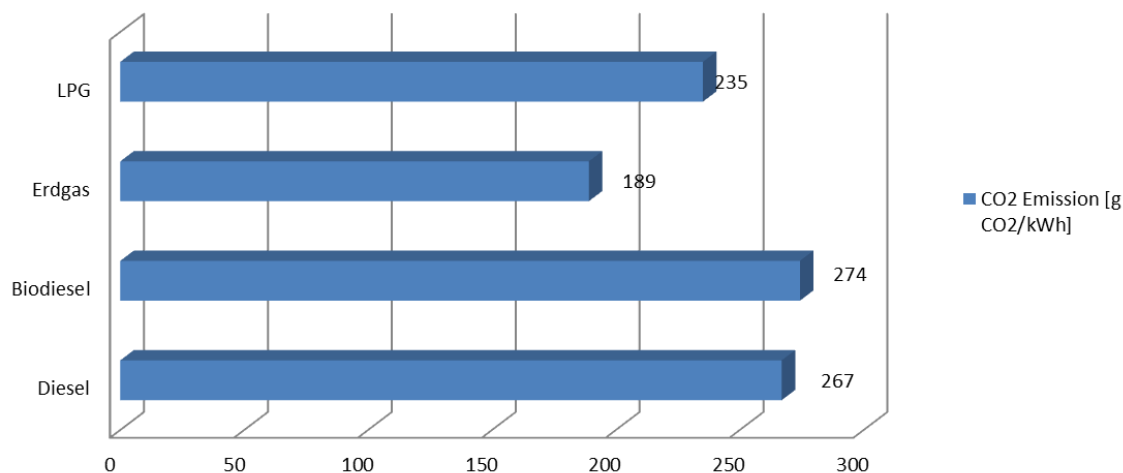


Abbildung 3.15: Direkte Kohlenstoffdioxid-Emission verschiedener Kraftstoffe (83) (84)

Ein abschließender Vergleich (Tabelle 3.9) von Verbrennungsmotorantrieben mit alternativen Kraftstoffen, einem elektrischen Antrieb eines Oberleitungsfahrzeugs und eines Brennstoffzellenantriebes zeigt, dass die hier vorgestellten alternativen Kraftstoffe hinsichtlich der Verfügbarkeit schlechter abschneiden. Die Verfügbarkeit schließt das Vorhandensein von entsprechenden Tankstellen mit ein. Allerdings liegen die Vorteile insbesondere bei Erdgas (CNG/LNG) bei den direkten Schadstoff- und CO₂-Emissionen sowie den Kosten bezogen auf die Energiemenge.

Tabelle 3.9: Kosten-Vergleich alternativer Kraftstoffe und Strom auf Fahrzeugebene (Dieselfahrzeug als Bezug)

Antriebsform --> Kraftstoff / Energieträger -->	Verbrennungsmotorantrieb						OL-Fahrzeug	Brennstoffzellenantrieb
	Diesel	Biodiesel	BtL	GtL	CNG / LNG	LPG	Strom	Wasserstoff
Verfügbarkeit Kraftstoff / Energieträger	Bezug	-	-	-	-	-	(+)	-
Lokale Schadstoff-Emissionen	Bezug	0	+	+	+	+	++	++
Wirkungsgrad Antriebssystem ab Tank bzw. Pantograf [%], ca.	25	25	25	25	25	25	70	38
spezifische Energie Kraftstoff [kWh / kg]	11,8	10,2	12,2	12,2	13,8	12,8	---	33,3
Energiebezug für 100 kWh am Rad [kg]	33,9	39,2	32,8	32,8	29,0	31,3	---	7,9
Energiebezug für 100 kWh am Rad [l]	40,8	44,6	42,4	42,0	---	58,8	---	---
Energiebezug für 100 kWh am Rad [kWh]	400	400	400	400	400	400	142,9	---
Spezifische Kosten [CHF/kg]	3,07	2,14	2,68	3,42	1,24	---	---	14
Spezifische Kosten [CHF/l]	2,55	1,88	2,08	2,67	---	0,88	---	---
Spezifische Kosten je Energieeinheit [CHF/kWh]	0,26	0,21	0,22	0,28	0,10	0,13	0,15	0,43
Kosten Energiebezug für 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

Für einen Vergleich der Kosten der Kraftstoffe und Strom ab der Ebene des Energiebezugs (ab Tank bzw. Stromabnehmer) wurde ein pauschaler Wert von

100 kWh verrichteter Arbeit am Rad festgesetzt. Anhand des Kostenvergleichs lässt sich ersehen, dass die Kosten für alternative Kraftstoffe ausgenommen GtL geringer sind als bei einem mit Diesel betriebenen Verbrennungsmotor. Zum Vergleich wurde als Ergänzung zu den flüssigen Kraftstoffen zusätzlich Strom als Energieträger in die Gegenüberstellung aufgenommen. Ein deutlicher Kostenvorteil zeigt sich bei Oberleitungsfahrzeugen gegenüber autark angetriebenen Fahrzeugen, allerdings setzen diese Fahrzeuge naturgemäß eine Oberleitungsinfrastruktur voraus. Weiterhin kann die größte Reduktion von direkten Schadstoff- und CO₂-Emissionen mit einem Oberleitungs- und dem Brennstoffzellenfahrzeug erzielt werden.

Wasserstoff besitzt zwar die höchste spezifische Energie allerdings sind die Energiekosten für den Brennstoffzellenantrieb derzeit noch sehr hoch und die zukünftige Preisentwicklung ist zum heutigen Zeitpunkt nur schwer abzusehen.

Synthetische Kraftstoffe besitzen zwar eine geringfügig höhere spezifische Energie als Dieselmotorkraftstoff, doch sind diese aufgrund des niedrigen Entwicklungsstandes nicht für einen großflächigen Einsatz geeignet.

Angesichts der geringeren Energiedichten der hier vorgestellten alternativen Kraftstoffe gegenüber dem Dieselmotorkraftstoff ergeben sich größere erforderliche Tankvolumina um die gleiche Reichweite zu. Zudem konnten sich aufgrund der häufig notwendigen Infrastrukturanpassungen alternative Kraftstoffe wie CNG/LNG und LPG bisher nicht im Schienenfahrzeugbereich durchsetzen.

3.3 Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle wandelt in einem elektrochemischen Prozess den chemischen Energieinhalt eines Brennstoffs direkt in elektrische Energie um. Im Gegensatz zur Umwandlung des Brennstoffs in einem Wärmekraftprozess unterliegt die Brennstoffzelle nicht dem Carnot-Wirkungsgrad, der anhand der oberen und unteren Temperaturen eines thermischen Prozesses den höchsten theoretisch möglichen Wirkungsgrad für die Umwandlung von Wärmeenergie in

mechanische Energie beschreibt. Dies ermöglicht bei bestimmten Brennstoffzellentypen hohe Wirkungsgrade der Stromerzeugung von bis zu 70 %.

Durch ihren hohen Entwicklungsstand hat sich die Niedertemperatur-PEM (*Proton Exchange Membrane*) Brennstoffzelle in mobilen Anwendungen durchgesetzt. Ein Brennstoffzellensystem besteht im Wesentlichen aus einem Wasserstofftank, einer Lüftereinheit mit Befeuchter, einem Thermo- und Wassermanagement und dem eigentlichen Brennstoffzellenstack. PEM-Brennstoffzellensysteme benötigen zusätzlich einen Kompressor, ein Kühlsystem sowie ein Steuerungsmodul und zeichnen sich durch einen einfachen Aufbau der Peripherie und kurze Systemstartzeiten aus. Sie lassen sich auch bei niedrigen Temperaturen starten und betreiben. Eine weiterführende Erklärung der Funktion erfolgt in Kapitel 8.4.

Während des Betriebs entstehen keine direkten Schadstoff- und CO₂-Emissionen. Diese fallen allerdings je nach Herstellungsart des Wasserstoffs bereits in der Vorkette an (vgl. Kapitel 8.7).

Brennstoffzellen unterliegen aktuell noch einer begrenzten Lebensdauer. So wird von Foulds die Lebensdauer eines Stacks mit 15.000 h angegeben. (85) Für Anwendungen im Busbereich wird von Ahluwalia eine geforderte Lebensdauer von 25.000 h für das Jahr 2025 angegeben, auch wenn der Nachweis, dass diese Lebensdauern tatsächlich erreicht werden, noch aussteht. (86) Für Bahnanwendungen können diese Werte als Orientierung gelten.

Für Brennstoffzellenmodule können zum derzeitigen Stand noch keine belastbaren und zuverlässigen Kostenangaben getroffen werden. Nach DLR-Schätzungen liegen die spezifischen Kosten derzeit bei etwa 1.200 CHF/kW für Brennstoffzellenmodule. Hinzu kommen die Kosten für DC/DC-Wandler (geschätzt: 240 CHF/kW), Kühlaggregate, Installation und die Fahrzeugintegration sowie die Wasserstofftanks.

4 Alternative Antriebskonzepte

4.1 Energiespeicherantrieb

Im Rahmen dieser Studie wird unter einem Energiespeicherantrieb ein Antriebssystem verstanden, welches außerhalb der Betriebszeiten aufgeladen wird und im Betrieb keine weiteren Energiequellen außer dem fahrzeugseitigen Speicher nutzt. Ein Energiespeicherantrieb besteht aus Energiespeicher(n), Umrichter(n) und Elektromotor(en) (Abbildung 4.1). Die Auslegung des Speichers erfolgt auf den Tagesenergiebedarf sowie die maximal benötigte Leistung eines Fahrzeugs. Voraussetzung für diese Auslegung ist, dass ein tägliches Laden des Speichers betrieblich realisierbar ist. Dabei kann durch Rekuperation von Bremsenergie die mitzuführende Energiemenge geringer sein, als der Tagesenergiebedarf.

Je nach Energiebedarf und damit Auslegung des Energiespeichers können sich sehr große Massen und Investitionskosten ergeben. Die Gesamtmasse des Speichers hängt wesentlich von der eingesetzten Technologie, der spezifischen Energie und vom zulässigen DoD ab. Die Herausforderung bei der Auslegung der Energiespeicher ist die Gewährleistung hoher Zyklenfestigkeit bei gleichzeitig möglichst geringer Überdimensionierung.

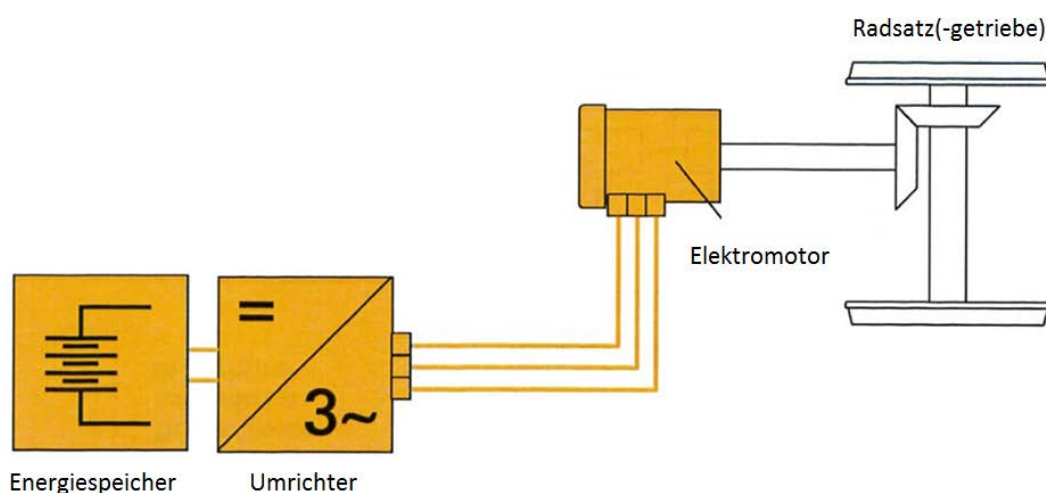


Abbildung 4.1: Prinzipdarstellung Energiespeicherantrieb nach (31)

Der Reifegrad des Energiespeicherantriebs wird mit TRL9 bewertet, da bereits in den 1980er Jahren in Deutschland Akkutriebwagen der BR515 im Regelbetrieb eingesetzt wurden.

4.2 Mehrmotorentechnologie

Bei der Mehrmotorentechnologie handelt es sich um ein diesel-elektrisches Antriebssystem, bei dem anstelle eines großen Dieselgenerators zwei oder mehr kleinere Dieselmotorgeneratorsätze (Gensets) mit Dieselmotoren gleicher oder unterschiedlicher Leistung verwendet werden. (vgl. Abbildung 4.2) Prinzipiell können auch mit anderen Kraftstoffen betriebene Verbrennungsmotoren eingesetzt werden.

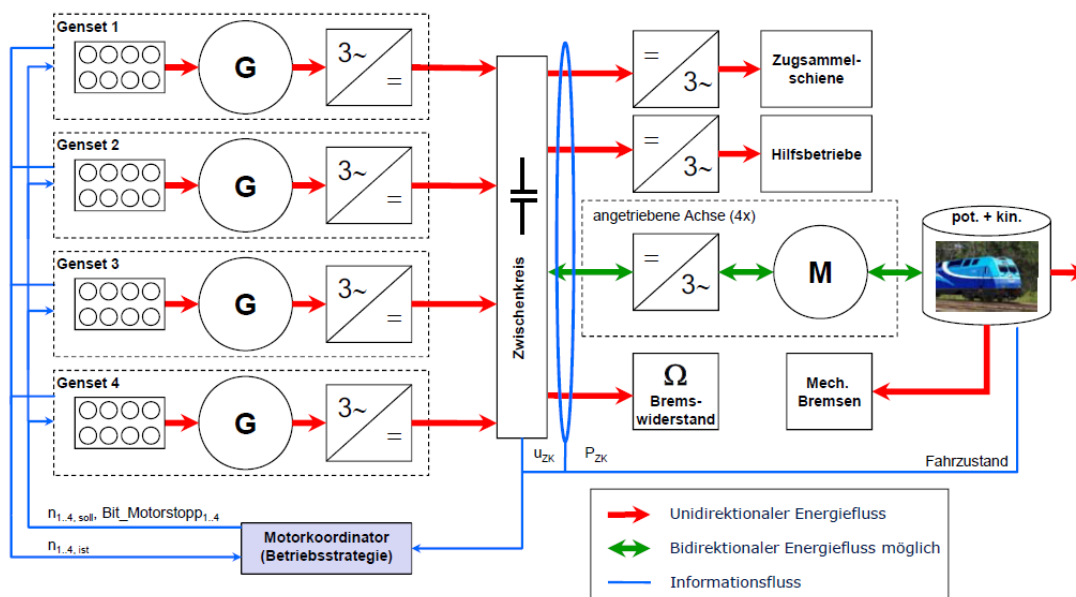


Abbildung 4.2: Prinzipdarstellung Mehrmotorentechnologie (87)

Bei geringen Leistungsanforderungen ist es möglich, einen oder mehrere Dieselmotoren automatisch abzuschalten, womit der Wirkungsgrad der verbleibenden Dieselmotoren durch eine Lastpunktanhebung verbessert wird. Ein übergeordnetes Steuersystem sorgt dafür, dass eine Kühlwassertemperatur von 60 °C nicht unterschritten wird. Dies hat den Vorteil, dass ein Motor nach Neustart sofort belastet werden kann.

Ein Vorteil ist die hohe Verfügbarkeit durch die Redundanz der Dieselmotoren und eine hohe Modularität. Weiterhin versucht man, auf in der Großserie verfügbare Dieselmotoren aus dem Bus- oder LKW-Bereich zurückzugreifen, die zudem die jeweils strengsten geltenden Abgasvorschriften erfüllen. Nachteilig sind im Allgemeinen ein Mehrgewicht durch die zusätzlichen Motoren und deren Anbindung an das Antriebssystem, eine komplexere Steuerung und ein erhöhter Wartungsaufwand.

Der Reifegrad der Mehrmotorentechnologie wird mit TRL9 bewertet, da aktuell mit der Bombardier TRAXX der Baureihe 246 auf dieser Technologie basierende Fahrzeuge am Markt verfügbar und bahntechnisch zugelassen sind.

4.3 Abgaswärmenutzung bei Dieselmotoren

Die Nutzung der Abwärme von Verbrennungskraftmaschinen zur Erzeugung elektrischer oder mechanischer Arbeit kann zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches und damit zur Erhöhung des Wirkungsgrads bei gleicher mechanischer Leistung beitragen. Die Nutzung kann mittels thermoelektrischer Generatoren (Seebeck-Effekt) oder einem auch als „Dampfprozess“ bezeichneten thermodynamischen Kreisprozess (z.B. Organic-Rankine-Cycle, ORC) erfolgen. Beide werden im Folgenden beschrieben.

4.3.1 Thermoelektrischer Generator - TEG

Der thermoelektrische Generator (TEG) wandelt Wärmeenergie ohne den Einsatz von mechanisch beweglichen Teilen in elektrische Energie. Durch die Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Kühlmittel (Abbildung 4.3) entsteht an einem aus Halbleiterwerkstoffen gefertigten thermoelektrischen Modul eine elektrische Spannung (Seebeck-Effekt). Je höher die Temperaturdifferenz, desto höher die erzeugte Spannung und der Wirkungsgrad.

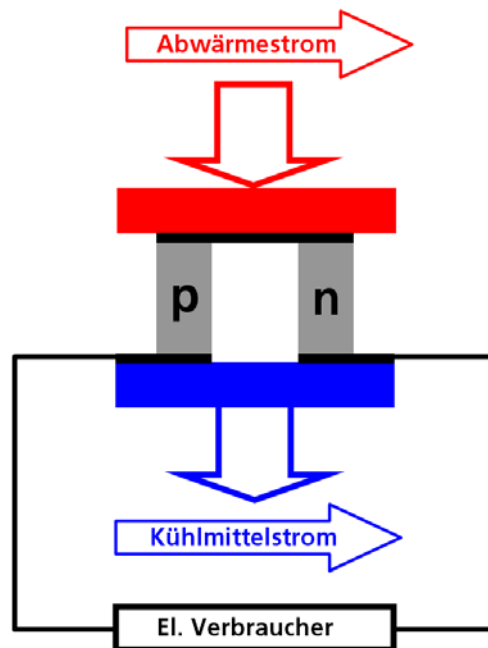


Abbildung 4.3 Prinzipskizze thermoelektrisches Modul (88)

Ein TEG besteht aus einer Vielzahl thermoelektrischer Module, die zwischen einem abgas- und einem kühlmittelseitigen Wärmeübertrager angeordnet sind. Durch die Wärmeübertrager soll eine möglichst große Wärmeleistung aus dem Abgasstrom entzogen, gleichmäßig auf die TEG Module verteilt und über das Kühlmedium abgeführt werden.

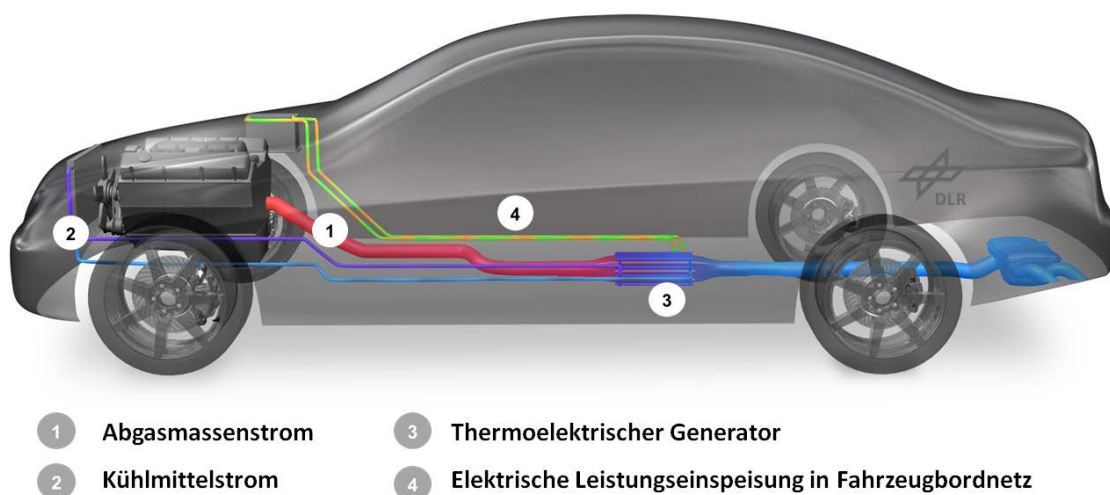


Abbildung 4.4: Prinzipschaubild Fahrzeugintegration (88)

Die fahrzeugseitige Integration erfolgt zwischen Abgasstrang und Kühlsystem (vgl. Abbildung 4.4), wobei aus thermodynamischer Sicht die Einbindung möglichst nah am Motor erfolgen sollte, damit möglichst hohe Abgastemperaturen zur Verfügung stehen. Die vom TEG ungenutzte Wärme wird zusätzlich in den Kühlkreislauf zurückgeführt, wodurch eine gesteigerte Kühlleistung erforderlich sein kann. (89) (90) (91)

Thermoelektrische Generatoren wurden in Straßenfahrzeugen bereits integriert. Zur Berechnung der Verbrauchseinsparung wird dabei davon ausgegangen, dass die vom TEG bereitgestellte elektrische Energie sonst durch den Generator bereitgestellt werden müsste. Im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), der sich durch geringe Motorlasten und damit auch geringe Abgastemperaturen auszeichnet, wird für Ottomotoren ein Verbrauchreduzierungspotential im Bereich von 1 bis 2 % angegeben, im US-Combined-Fahrzyklus mit höheren Lasten und Abgastemperaturen zwischen 2 und 2,5 %. Für die nahe Zukunft werden Einsparungen im Bereich von bis zu 5 % erwartet. (92), (93)

Der Reifegrad des TEG wird mit TRL4 - TRL5 bewertet. Im Straßenfahrzeugbereich wurden TEGs bereits in Testfahrzeugen eingesetzt und erprobt, aber nicht in Serie eingesetzt. Die Bahnfestigkeit wurde bisher nicht nachgewiesen.

4.3.2 Thermodynamischer Kreisprozess

Im thermodynamischen Kreisprozess wird ein Arbeitsmedium mittels der im Abgas enthaltenen Wärme verdampft. Bei der Entspannung des Dampfes in einer Expansionsmaschine wird mechanische Arbeit erzeugt, welche über eine Kupplung in den Antriebsstrang zurückgeführt werden kann. Alternativ wird der Expandermaschine ein Generator nachgeschaltet, um elektrische Energie zu erzeugen. Diese kann in einer Batterie zwischengespeichert und/oder für Hilfsbetriebe oder Boostbetrieb zur Verfügung gestellt werden. Wie auch beim TEG sind für einen effizienten Betrieb möglichst hohe Abgastemperaturen und eine geringe Dynamik vorteilhaft. Im Gegensatz zum TEG verwendet der thermodynamische Kreisprozess mechanisch bewegte Komponenten und bringt einen größeren Regelungsaufwand mit sich.

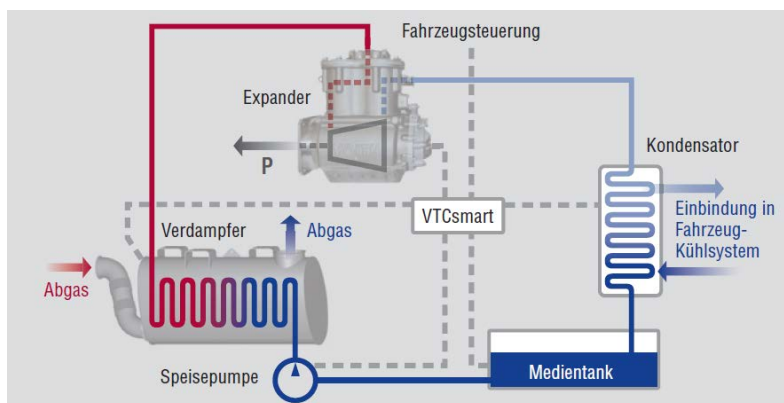


Abbildung 4.5: Prinzipschaubild einer thermodynamischen Kreisprozessanwendung (94)

Die Verdampfungstemperatur des Arbeitsmediums liegt typischerweise zwischen 180 °C und 270 °C. Das Arbeitsmedium sollte frostsicher sein, alternativ muss das System konstruktiv so ausgelegt sein, dass keine Frostschäden auftreten können.

In Straßenfahrzeugen wurde ein thermodynamischer Kreisprozess in Form des sogenannten Turbosteamers untersucht. Das Verbrauchseinsparungspotential im Geschwindigkeitsbereich zwischen 70 und 100 km/h (also bei höheren Motorlasten) wird für Ottomotoren mit etwa 4-6 % angegeben, für die nahe Zukunft ist für die BMW-Ingenieure „eine Steigerung des Verbrauchseinsparpotentials auf bis zu 10 % vorstellbar“ (95).

In Schienenfahrzeugen arbeitete bis 2013 die Firma Voith an der Integration eines thermodynamischen Kreisprozesses, mittlerweile wurden die Aktivitäten in die SteamDrive GmbH ausgegliedert. Das vorgestellte System kann entweder mechanische Arbeit („SteamTrac“) oder elektrische Energie („SteamDrive“) bereitstellen. Laut Herstellerangabe wurde das System SteamDrive bereits in einem Schienenfahrzeug erprobt, dabei konnten bei einer Motorleistung von 225 kW ca. 14 kW (6 %) als mechanische Leistung bereitgestellt werden (96). Die realisierbare Verbrauchseinsparung oder weitere Messwerte (z.B. die zusätzlich notwendige Kühlleistung durch den gesteigerten Wärmeeintrag ins Kühlmittel), die für die Angabe der realisierbaren Verbrauchseinsparung notwendig wären, wurden nicht angegeben. Laut Hersteller liegt eine Zulassung des Eisenbahnbundesamtes vor. (94)

Der Reifegrad des thermodynamischen Kreisprozesses für Schienenfahrzeuge wird mit TRL6 bewertet, da bereits ein Schienenfahrzeug des Typs NE81 mit integriertem Dampfprozess als Erprobungsträger eingesetzt wurde.

4.4 Zweikraftfahrzeuge

Zweikraftfahrzeuge lassen sich durch kombinierte Antriebs- bzw. Energiearten betreiben. Dabei kann nach UN Definition¹ klar zwischen einem Hybridfahrzeug und einem Zweikraftfahrzeug unterschieden werden, da beim Zweikraftfahrzeug der für einen Hybridantrieb notwendige zweite Energiespeicher fehlt.

4.4.1 Zweikraft Oberleitung – Diesel

Eine mögliche Kombination eines Zweikraftantriebes besteht aus einem Oberleitungs- und einem zusätzlichen dieselektrischen Antrieb vergleichbar mit der Eem 923. Dabei ist der Dieselmotor meist klein dimensioniert und für die „letzte Meile“ vorgesehen, um kurze Strecken ohne Fahrdrabt zu überbrücken. Nachteil dieser Kombination ist, dass durch das Fehlen eines Energiespeichers im Dieselmotor keine Rekuperationsenergie gespeichert werden kann. Allerdings kann diese direkt für den Betrieb der Hilfsbetriebe genutzt werden.

Der Reifegrad wird mit TRL9 bewertet. Rangierlokomotiven des Typs Eem 923 und Streckenlokomotiven des Typs ALP-45DP von Bombardier nutzen diese Technologie im Regelbetrieb.

4.4.2 Zweikraft Oberleitung – Energiespeicher

Die Kombination von Oberleitungs- und Energiespeicher-Antrieb (vgl. Abbildung 4.6) ermöglicht das Laden des Energiespeichers während des Fahrzeugbetriebs unter Oberleitung. Dabei wird der Energiespeicher so dimensioniert, dass er die Energie für kurze Strecken ohne Fahrdrabt zur Verfügung stellen kann.

¹ Antriebe, bei denen mindestens zwei verschiedene Energiewandler (z. B. Verbrennungsmotor und Elektromotor) und zwei verschiedene Energiespeicher (z. B. Kraftstofftank und Batterie) vorhanden sind und zum Antrieb des Fahrzeugs beitragen. (71)

Für diesen Einsatzzweck sind elektrochemische Speicher aufgrund ihrer hohen Energiedichte besser geeignet als Doppelschichtkondensatoren oder Hydraulikspeicher, deren Vorteile in der hohen spezifischen Leistung liegen.

Der Reifegrad dieser Kombination wird mit TRL8 bewertet. Straßenbahnanwendungen mit dieser Technologie werden bereits erfolgreich im Regelbetrieb eingesetzt, Vollbahnanwendungen im Regelbetrieb sind bisher nicht bekannt.

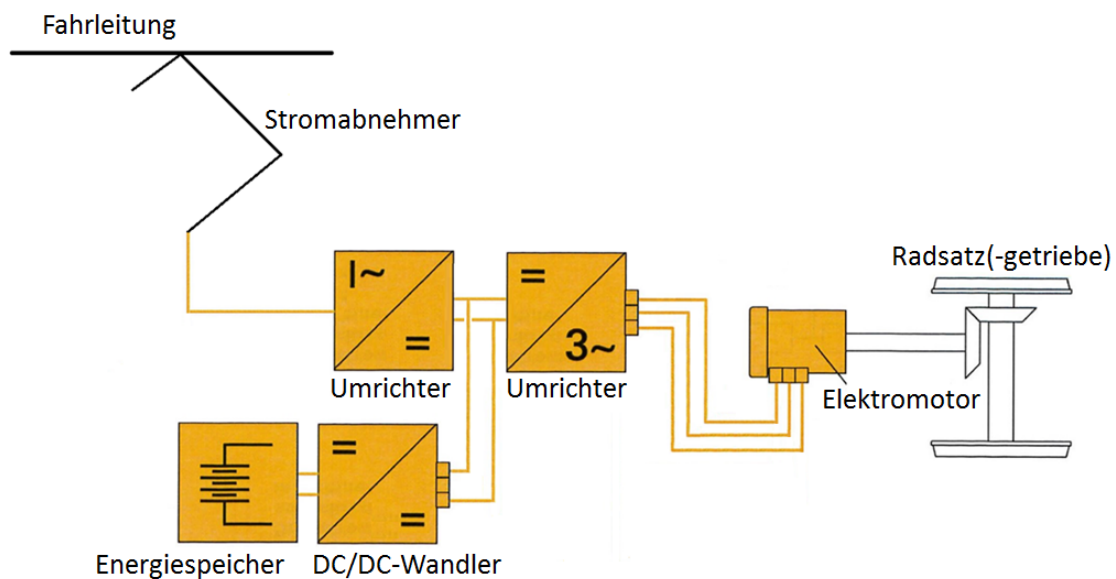


Abbildung 4.6: Prinzipdarstellung Zweikraft mit Stromabnehmer und Energiespeicher nach (31)

4.5 Verbrennungsmotorhybrid

Die Kombination eines Verbrennungsmotors und eines zusätzlichen Energiespeichers kann in die zwei Grundstrukturen des parallelen und des seriellen Hybrids differenziert werden. Die Dimensionierung des Speichers richtet sich nach der Betriebs- und Ladestrategie, der Reichweite und der abzugebenden Leistung.

4.5.1 Parallelhybrid elektrisch

Bei einem Parallelhybrid sind der Verbrennungsmotor und der Elektromotor parallel angeordnet (vgl. Abbildung 4.7), wobei die mechanische Leistung des Verbrennungs- und des E-Motors addiert und ohne Wechsel in eine andere

Energieform über ein Getriebe zu den Rädern geleitet wird. Damit bietet sich die Möglichkeit, beide Antriebsaggregate gleichzeitig oder getrennt voneinander zu betreiben. Der E-Motor kann je nach Betriebszustand als Generator verwendet werden und den Energiespeicher laden. Verbrauchsvorteile ergeben sich dabei aus der Verwendung eines kleineren Verbrennungsmotors und der Möglichkeit zur Bremsenergieerückgewinnung. Der Reifegrad dieser Hybridvariante wird mit TRL 8 bewertet, da diese Technologie bereits in einem dieselmechanischen Triebzug der Baureihe VT 642 erprobt wurde (vgl. Kapitel 8.6.1).

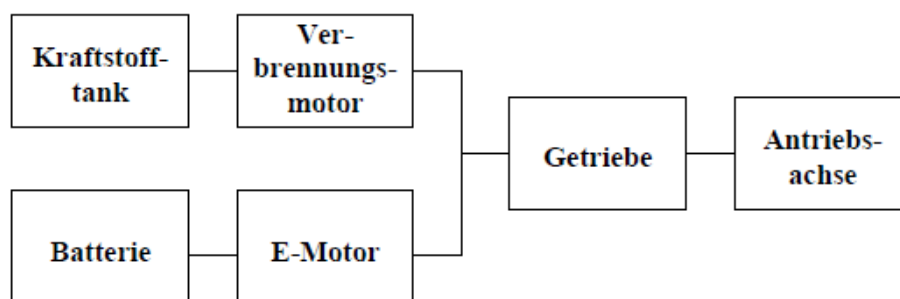


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung eines Parallelhybrids (97)

4.5.2 Serieller Hybrid elektrisch

Bei einem seriellen Hybrid wird der Verbrennungsmotor mechanisch von der Antriebsachse entkoppelt wodurch nur ein rein elektrischer Antrieb über einen Generator möglich ist (vgl. Abbildung 4.8). Dabei besteht die Möglichkeit, Drehzahl und Drehmoment innerhalb der Motorgrenzen so einzustellen dass ein möglichst verbrauchsgünstiger Betriebspunkt verwendet wird. Der E-Motor bezieht bei dieser Anordnung die elektrische Energie aus dem Generator oder aus der Batterie. Ein Nachteil sind dabei die Verluste durch die Wirkungsgradkette von V-Motor - Generator - E-Motor - Getriebe. Weiterhin sind alle Aggregate im Antriebsstrang auf die gesamte Antriebsleistung ausgelegt, was sich nachteilig auf die Masse auswirkt. Der Reifegrad dieser Hybridvariante wird mit TRL 8 bewertet, da diese Technologie bereits in einer Rangierlokomotive der Firma Alstom (vgl. Kapitel 8.6.2) erprobt wurde.

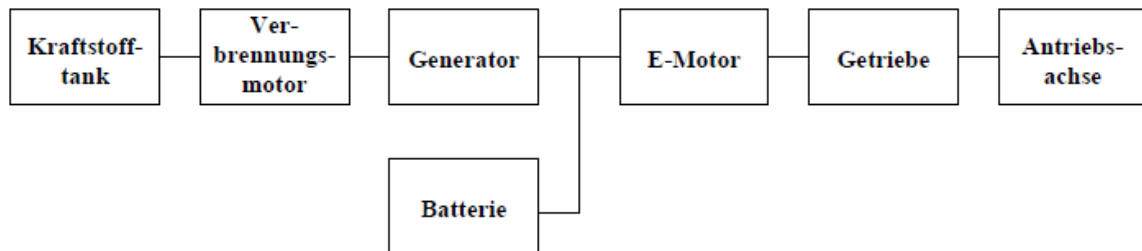


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung eines seriellen Hybrids (97)

4.5.3 Hydraulischer Hybrid

Hydraulische Hybridantriebe nutzen die im Kapitel Energiespeicher vorgestellten Hydraulikspeicher für die Energiespeicherung. Die Energiespeicherung erfolgt mittels Förderung von Hydrauliköl vom Niederdruck- zum Hochdruckspeicher durch Hydromotoren bzw. -pumpen, wobei sich der Gasdruck im Hochdruckspeicher erhöht. Bei der Entladung der Speicher wird die Strömungsrichtung umgekehrt und die unter Druck stehende Flüssigkeit treibt einen oder mehrere Hydromotoren an. Hydraulische Hybride können sowohl in serieller als auch in paralleler Anordnung aufgebaut werden (Abbildung 4.9).

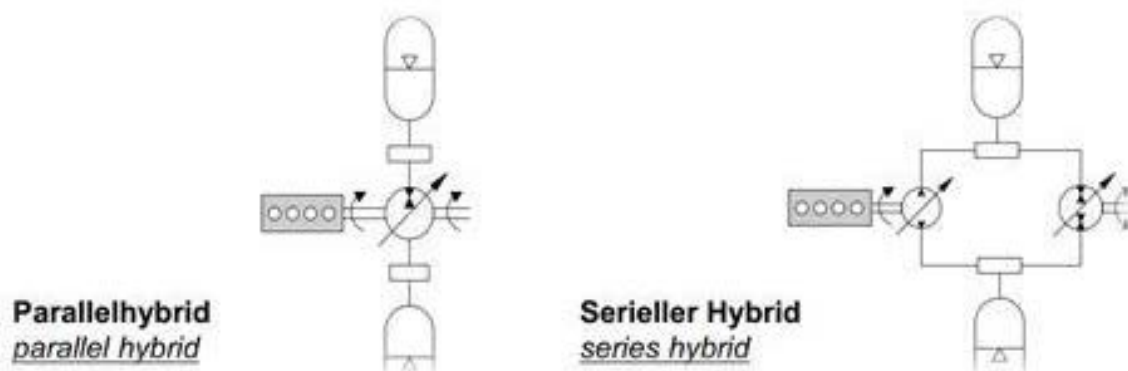


Abbildung 4.9: hydraulische Hybridsystemstrukturen (98)

Bei der parallelen Anordnung, die auch als Nachrüstsysteem für konventionelle Straßenfahrzeuge angeboten wird, wird meist die existierende Kardanwelle zwischen Getriebe und Achsgetriebe durch eine Welle mit integrierter Hydromotor-Pumpeneinheit ersetzt. Zusätzlich werden die beiden Speicher und eine

Steuerung für das System eingebaut. Im Straßenfahrzeug verwendet die Steuerungseinheit meist Brems- und Gaspedalstellungen für die Ansteuerung des Systems. Im Schienenfahrzeug ist eine aufwändigere Integration in Antriebssteuerung und Leittechnik notwendig, der Eingriff ins Bremskonzept ist bei Nachrüstungen von Bestandsfahrzeugen zulassungsrelevant.

Die serielle Anordnung ist vom Prinzip her identisch zum seriellen elektrischen Hybrid. Ein Verbrennungsmotor treibt eine hydraulische Pumpe an, die über Hydraulikleitungen die hydraulischen Fahrmotoren versorgt. Die ebenfalls im Hydraulikkreis integrierten Hydrospeicher werden so gesteuert, dass sie beim Bremsen Energie aufnehmen und diese bei Leistungsbedarf wieder abgeben. Die gleichzeitige Versorgung der Fahrmotoren über Verbrennungsmotor und Hydrospeicher ist ebenfalls möglich, und auch eine Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors bei geringen Leistungsanforderungen am Rad kann durch Beladen der Speicher realisiert werden.

Aufgrund der hohen Leistungsdichte der Speicher sind hydraulische Hybridantriebe gut geeignet, um Bremsenergie mit hoher Leistung zu rekuperieren und später wieder abzugeben. Das rein hydraulische Fahren ohne Unterstützung durch den Verbrennungsmotor ist dagegen aufgrund der geringen Energiedichte wenn überhaupt nur für sehr kurze Distanzen möglich.

Aktuelle hydraulische Systeme für die Speicherung von Rekuperationsenergie sind unter anderem für Anwendungen in Straßenfahrzeugen bis 200 kW entwickelt und im Einsatz. Dabei liegt der Fokus auf Fahrzeugen mit einer hohen Anzahl von Beschleunigungs-Zyklen. Tests wurden in Europa zum Beispiel von Bosch-Rexroth mit einem Müllfahrzeug durchgeführt, Bosch-Rexroth zeigte auch Interesse an der Integration in Bahnfahrzeuge. Von Voith Turbo wurde ein System für den Einsatz in Dieseltriebwagen konzipiert, für das bisher aber noch kein praktischer Nachweis erfolgte. In den USA wird die Entwicklung von hydraulischen Hybridantrieben von der Umweltschutzbehörde EPA unterstützt. Der amerikanische Hersteller Eaton verfolgte viele Jahre ein Parallelhybrid-Konzept namens Hydraulic Launch Assist für leichte und mittelschwere LKW, PickUps

und Müllsammelfahrzeuge. Die Entwicklung bei Eaton wurde allerdings im Jahr 2012 eingestellt. Die amerikanische Firma Lightning Hybrids bietet ein Parallelhybrid-Nachrüstsystem für Busse und leichte LKW an, für das in standardisierten Prüfstandtests auf verschiedenen Normfahrzyklen für Straßenfahrzeuge direkte CO₂-Einsparungen von 16% gezeigt wurden. Die Kraftstoffeinsparungen dürften ähnlich hoch sein. Lightning Hybrids setzt auf Druckspeicher aus Faser-Verbund-Werkstoffen, wodurch sich nach Aussagen des Unternehmens geringere Speichermassen ergeben. Parker Hannifin Hybrid Drive Systems Division bietet seit 2010 das serielle hydraulische Hybridsystem „RunWise“ für Müllfahrzeuge an und wirbt für diesen Einsatzfall mit Verbrauchseinsparungen von bis zu 50%.

Sowohl das parallele als auch das serielle hydraulische Hybridsystem wird mit einem Reifegrad von TRL6 – TRL7 bewertet. Serieneinsätze in Straßenfahrzeugen sind bereits nachgewiesen, in Bahnfahrzeugen wurde bisher kein System getestet oder eingesetzt.

4.6 Brennstoffzellenhybrid

Beim Einsatz von Brennstoffzellen im Antriebssystem ist eine Hybridisierung mit einem zusätzlichen Energiespeicher notwendig, um durch die Abdeckung der dynamischen Lasten die Lebensdauer des Brennstoffzellensystems zu erhöhen. Weiterhin können die Energiespeicher dazu genutzt werden, die Rekuperationsenergie aufzunehmen.

Die Auslegung von Brennstoffzelle und Energiespeicher erfolgt auf Basis von Lastprofilen des Anwendungsfalls. Dabei wird üblicherweise die Brennstoffzellenleistung so ausgelegt, dass die mittlere im Einsatzprofil benötigte Leistung abgedeckt wird. Der Energiespeicher muss folglich so ausgelegt werden, dass die Deckung der Leistungsspitzen gesichert ist und der hierfür erforderliche Energieinhalt zur Verfügung steht.

Für die Anbindung an den Fahrzeug-Gleichspannungszwischenkreis bestehen verschiedene Möglichkeiten. Die größte Flexibilität ermöglicht die in Abbildung 4.10 dargestellte Anbindung von Energiespeicher und Brennstoffzelle über je

einen DC/DC-Wandler. Alternativ kann entweder die Brennstoffzelle oder der Energiespeicher direkt an den Zwischenkreis gekoppelt werden, wobei für die Brennstoffzelle der unidirektionale Leistungsfluss durch Sperrdioden abgesichert werden muss.

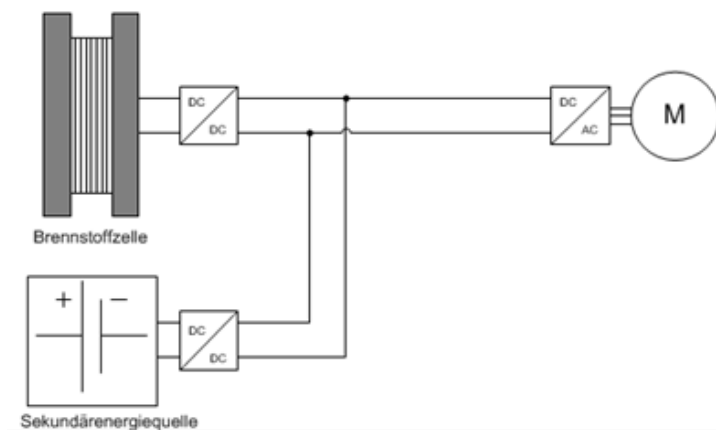


Abbildung 4.10: Mögliche Antriebsarchitektur mit einem Brennstoffzellensystem und einem zusätzlichen Energiespeicher

Die Spannung des Zwischenkreises wird dabei durch das direkt angebundene System vorgegeben. Bei dem Einsatz von Brennstoffzellensystem und Batterie könnte die Batterie direkt an den Fahrzeugzwischenkreis angebunden werden. Die Spannung des Fahrzeugzwischenkreises darf jedoch nur in einem definierten Bereich variieren, um die Funktion des Traktionsstromrichters zu gewährleisten. Dies kann gleichzeitig bewirken, dass nur ein Teil der Batteriekapazität abgerufen werden kann.

Der Reifegrad von Brennstoffzellen-Hybridantrieben wird mit TRL7 bewertet. Es existieren verschiedene Erprobungsträger („Green Goat“ von BNSF Railway, New Energy Train der East Japan Railway Company vgl. Anhang 8.6). Ein am Markt erhältliches Produkt mit allgemeiner Bahnzulassung ist bisher nicht bekannt. (99) (100) (101)

4.7 Hydraulische Leistungsübertragung

Die hydraulische Leistungsübertragung nutzt ein flüssiges Arbeitsmedium zur Übertragung der Leistung. Grundsätzlich kann zwischen hydromechanischen, hydrostatischen und hydrodynamischen Getrieben unterschieden werden.

Ein *hydromechanisches* Getriebe besteht aus einem hydrodynamischen Anfahrwandler, dem ein mechanisches Stufengetriebe nachgeschaltet ist. Beim Anfahren und bei niedrigen Geschwindigkeiten ist der Wandler wirksam, danach wird er überbrückt und das Getriebe arbeitet als mechanisches Lastschaltgetriebe. In der Praxis wird entweder der hydrodynamische Drehmomentwandler dem Getriebe vorgeschaltet (ZF-Ecomat bzw. EcoLife) oder – bei leistungsverzweigten Getrieben – in das Getriebe integriert (Voith DIWA Getriebe). Hydromechanische Getriebe sind aufgrund des begrenzten Eingangsdrehmoments bisher für PowerPacks mit Dieselmotorleistungen bis etwa 500 kW verfügbar. Die Investitionskosten eines hydromechanischen Getriebes werden aufgrund der Großserienentwicklung für Busse mindestens 15% geringer als die eines hydrodynamischen Getriebes gleicher Leistung angenommen. Weitere Vorteile der hydromechanischen Getriebe sind geringes Gewicht und Bauraumbedarf, hoher Reifegrad aufgrund Großserienentwicklung für Busse und LKW, hoher Wirkungsgrad über den gesamten Geschwindigkeitsbereich und verschleißfreies Retarderbremsen ohne Anhebung der Dieselmotordrehzahl. Nachteilig ist die Limitierung der Eingangsmomente und die daraus resultierende Leistungsbegrenzung sowie die vergleichsweise geringe Lebensdauer.

Bei der *hydrostatischen* Leistungsübertragung wird durch den Dieselmotor eine Verdrängerpumpe angetrieben, welche das Hydrauliköl auf Betriebsdrücke von bis zu 400 bar bringt. Dieses fließt bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten zu einem Verdrängungsmotor als leistungsabgebendes Glied. Im Allgemeinen bestimmt der Schwenkwinkel des Hydromotors dabei die Fahrtrichtung sowie die Geschwindigkeit. Vorteil des hydrostatischen Antriebs ist die Regelcharakteristik bei konstanter Motordrehzahl, bei der ein bestimmter Schwenkwinkel einer bestimmten Geschwindigkeit entspricht. Dabei kann die Richtung und die Geschwindigkeit unabhängig vom Fahrwiderstand vorgegeben werden. Nachteile sind der schlechte Wirkungsgrad bei hohen Geschwindigkeiten und die kurzen Wartungsintervalle durch auftretende Undichtigkeiten.

Bei der *hydrodynamischen* Leistungsübertragung wird ein Pumpenrad durch den Dieselmotor angetrieben. Somit wird mechanische Energie in Strömungs-

energie eines Öls gewandelt, welches im Kreislauf durch das Getriebe strömt. Im Turbinenrad wird dem Öl die Strömungsenergie entzogen und in mechanische Energie gewandelt. Dabei erfolgt die Leistungsübertragung berührungslos und schwingungstrennend, unterliegt aber dem hydraulischen Schlupf zwischen Pumpen- und Turbinenrad. (102) (103) Vorteile der hydrodynamischen Getriebe sind hohe Lebensdauer, Drehmomentfestigkeit, Schaltvorgänge ohne Zugkraftunterbrechung, verschleißfreies hydrodynamisches Bremsen und die Entkopplung des Dieselmotors von Stößen und Schwingungen aus dem Antriebsstrang. Weiterhin ist ein schnelles und verschleißfreies Wechseln der Fahrtrichtung möglich. Nachteilig sind das hohe Gewicht, die im Vergleich zu hydromechanischen Getrieben schlechteren Wirkungsgrade bei geringen Geschwindigkeiten und die sich negativ auf den Verbrauch auswirkende Anhebung der Dieselmotordrehzahl beim Bremsen zur Erzeugung eines Stützmoments für die hydrodynamische Bremse.

Die hydromechanischen, hydrostatischen und hydrodynamischen Getriebe werden mit einem Reifegrad von TRL9 bewertet, da alle Systeme bereits am Markt vorhanden sind.

Der Vergleich von hydromechanischen und hydrodynamischen Getrieben zeigt deutliche Vorteile der hydromechanischen Getriebe. Hinsichtlich der Getriebewirkungsgrade im Leistungsbereich bis etwa 500 kW zeigt Abbildung 4.11, dass hydromechanische Getriebe im gesamten Geschwindigkeitsbereich einen größeren Wirkungsgrad aufweisen als hydrodynamische Getriebe. Insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten ist mit hydromechanischen Getrieben eine erhebliche Wirkungsgradsteigerung möglich. Weitere Effizienzvorteile entstehen beim Bremsen, da in hydromechanischen Getrieben sekundärseitig angebrachte Retarder keine Anhebung der Getriebeeingangsdrehzahl durch den Verbrennungsmotor erfordern und somit der hierfür notwendige zusätzliche Kraftstoffaufwand entfällt.

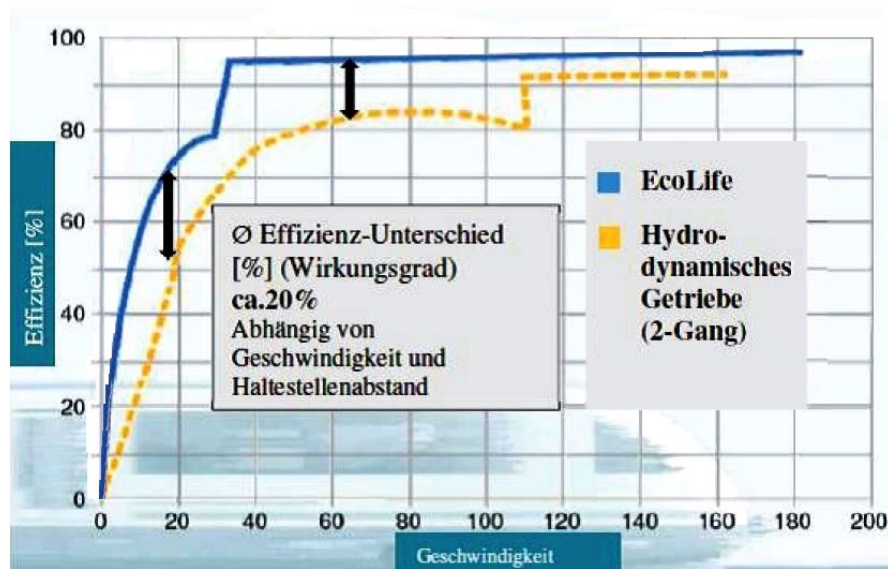


Abbildung 4.11: Vergleich von hydromechanischen und hydrodynamischen Getriebesystemen nach (104)

Der Vergleich der Getriebemassen (Tabelle 4.1) zeigt deutliche Vorteile für die hydromechanischen Getriebe, die inklusive Wendegetriebe und verschleißfreier Bremse (Retarder) etwa 40 - 60% leichter sind als hydrodynamische Getriebe.

Tabelle 4.1: Massenvergleich hydrodynamische und hydromechanische Getriebe

	hydrodynamisch	hydromechanisch		
	Voith T 211 re.4	Voith DIWA Rail (D 884.5)*	ZF Ecomat Rail HP 902 R	ZF EcoLife 6 AP 2000 B
Getriebeingangsleistung [kW]	350	320	---	---
Getriebeingangsmoment [Nm]	2200	1900	1800	2000
Getriebeingangsdrehzahlen [min ⁻¹]	1600 - 2800	2200	2650	tbd
Anzahl der Gänge	2	4	4 - 5	6
Ölfüllung [l]	75	---	30	40
Getriebemasse (trocken) inkl. Retarder [kg]	900	540	370	379

* mit Wendegetriebe

5 Bewertung alternativer Antriebskonzepte

Die Bewertung alternativer Antriebskonzepte für die beschriebenen Einsatzszenarien erfolgt sowohl für Bestands- als auch für Neufahrzeuge. Dabei werden für Bestandsfahrzeuge die Konzepte betrachtet, die sich im jeweiligen Fahrzeug mit vertretbarem Aufwand unter weitgehender Erhaltung des bisherigen Antriebssystems umsetzen lassen (spezifischer Umbau aus Energieeffizienzgründen). Für Neufahrzeuge werden Konzepte betrachtet, die bei Bestandsfahrzeugen die Umrüstung des bisherigen Antriebsstrangs auf eine elektrische Leistungsübertragung erfordern würden und somit einem Neuaufbau des gesamten Antriebssystems gleichkämen. Bei Neufahrzeugen können diese Technologien von Beginn an integriert werden.

Tabelle 5.1 Betrachtete Antriebskonzepte nach Fahrzeug und Einsatzszenario

	Bestandsfahrzeuge				Neufahrzeuge			
	Tm 234	Am 843	Eem 923	LRZ 08	Baudienst	Rangierverkehr	Einzelwagen-ladungsverkehr	Lösch- und Rettungsdienst
Alternative Kraftstoffe	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Abgaswärmenutzung	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Getriebeaustausch	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja
Hydraulischer Hybrid	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Parallelhybrid elektrisch	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja
Energiespeicherantrieb	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Mehrmotorenkonzept	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Zweikraft OL-Diesel	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Zweikraft OL-Speicher	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Brennstoffzellenhybrid	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja

5.1 Bestandsfahrzeuge

5.1.1 Tm 234

5.1.1.1 Alternative Kraftstoffe

Wie bereits in Kapitel 3.2.4 dargestellt, sind die reinen Verbrauchskosten der alternativen Kraftstoffe durchweg geringer als die des konventionellen Diesels. Lediglich bei einem Einsatz von GtL ergeben sich höhere Verbrauchskosten. Auch hinsichtlich der direkten Emissionen sind abgesehen von Biodiesel die alternativen Kraftstoffe dem konventionellen Diesel überlegen. Dem gegenüber stehen die Mehrkosten für Fahrzeug- und Infrastrukturanpassungen. Bei einem Einsatz von Biodiesel und synthetischen Kraftstoffen ist mit keinem bzw. sehr geringem Umbauaufwand des Fahrzeugs und der Infrastruktur zu rechnen.

Tabelle 5.2: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für Tm 234

	Tm 234						
Einsatzjahre	25						
mittlerer jährlicher Dieserverbrauch [l]	12.480						
Einsatztage / a	300						
durchschnittlicher Dieserverbrauch/d [l]	41,6						
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	805						
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	815						

	Biodiesel	LNG / CNG Monofuel	LNG / CNG Dualfuel	LPG Monofuel	LPG Dualfuel	BtL	GtL
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	641	284	414	383	664	646	829
Einsparung ggü. Diesel [TCHF]	164	521	805	805	804	159	-24
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	838	578	638	719	783	---	---
CO2 Einsparung [%]	-3	29	22	12	4	---	---

Fazit

Die Kosten für die Fahrzeug-Umrüstung auf LPG und Erdgas sind aufgrund der Anpassungen des Tanksystems deutlich höher als die Kosten für Umrüstungen auf XtL und Biodiesel. Konkrete Kostendaten für Erdgas- und LPG-Serienmotoren sind derzeit jedoch nicht bekannt. Die Umrüstung auf die beiden genannten Kraftstoffe erfordert zusätzliche Investitionen für die Betankungsinfrastruktur, die im Rahmen einer alternativen Kraftstoffstrategie für alle thermisch betriebenen Fahrzeugtypen untersucht und bewertet werden sollten.

Bei alleiniger Betrachtung der Tm 234-Bestandsfahrzeuge wird daher empfohlen, kurzfristig die Zumischung von Biodiesel und längerfristig den Einsatz von (biomassebasiertem) synthetischem Diesel detailliert zu untersuchen. Für den Einsatz von Biodiesel ist zunächst mit den Herstellern des Fahrzeugs und der Motoren zu prüfen, bis zu welchem Mischungsverhältnis Biodiesel eingesetzt werden kann.

5.1.1.2 Abgaswärmenutzung

Fazit:

Die Messdaten der Tm 234 lassen aufgrund der überwiegend geringen Leistungsanforderungen (max. mittlere Leistung: 64,5 kW) auf geringe Abgastemperaturen schließen. Da die Abgaswärmenutzung unabhängig vom verwendeten System (Thermoelektrischer Generator oder Dampfprozess) auf hohe Abgastemperaturen angewiesen ist, werden für die untersuchten Messzyklen keine signifikanten Kraftstoffeinsparungen erwartet. Eine detailliertere Betrachtung wird daher nicht empfohlen.

5.1.1.3 Hydraulischer Hybrid

Aufwand:

Da das Fahrzeug bereits mit einem hydrostatischen Antrieb ausgerüstet ist, liegt die Hybridisierung durch den zusätzlichen Einbau von hydraulischen Speichern nahe. Folgende Veränderungen müssten am Fahrzeug vorgenommen werden:

- Einbau von Hoch- und Niederdruckspeicher mit Leitungen und Ventilen
- Anpassung der Leittechnik und Antriebssteuerung

Die reinen Materialkosten für die Integration der Speicher werden als vergleichsweise gering eingeschätzt, da das hydrostatische Antriebssystem bereits vorhanden ist. Einen größeren Aufwand stellt aber die Anpassung der Leittechnik und Antriebssteuerung dar, nicht zuletzt auch weil die für die Rückgewin-

nung von Bremsenergie notwendigen Eingriffe ins Bremskonzept zulassungsrelevant sind.

Erwartete Verbrauchseinsparung:

Das theoretische Rekuperationspotential bezogen auf die Traktionsenergie am Rad beträgt im Mittel der Fahrzyklen 7,9 %. Fahrwiderstände und Wirkungsgradverluste bei der Be- und Entladung des Speichers sind darin nicht berücksichtigt. Unter der Annahme, dass nach Berücksichtigung der Fahrwiderstände und Wirkungsgradverluste für die Speicherung 70 % des theoretischen Potentials tatsächlich realisiert werden können, ergeben sich Verbrauchseinsparungen von im Mittel 5,5 %. Weitere Verbrauchseinsparungen sind theoretisch durch Lastpunktanhebung des Dieselmotors und Zwischenspeicherung der Energie in den hydraulischen Speichern möglich.

Die hochgerechneten Kraftstoffkosten bei 25 Jahren Einsatzdauer betragen 805 TCHF. Eine Einsparung von 5,5 % über die Lebensdauer des Fahrzeugs resultiert in einer Kraftstoffkosteneinsparung von etwa 44 TCHF.

Fazit:

Die detaillierte Untersuchung des hydraulischen Hybridantriebs für die Bestandsfahrzeuge Tm 234 wird aus folgenden Gründen nicht empfohlen:

- Es wird erwartet, dass die Kosten für Material und Integration inkl. Anpassung der Steuerung und Zulassung die abgeschätzten Kosteneinsparungen von 44 TCHF übersteigen.
- Wie in Kapitel 4.5.3 erwähnt wurde das System bisher nicht bahntauglich umgesetzt. Daher liegen keine Kostendaten für Material und Integration vor.
- Bei den Bestandsfahrzeugen der dritten Bauserie ist das zulässige Gesamtgewicht bereits erreicht, eine Integration zusätzlicher Systeme ist nicht möglich.

5.1.1.4 Start-Stop mit Stromerzeuger

Im Fall der Tm 234 mit einem 550 kW großen Traktionsdieselmotor ist die klassische Mehrmotorenteknologie mit elektrischer Leistungsübertragung nicht sinnvoll, da sie den Neuaufbau des gesamten Antriebssystems erfordern würde.

Da aber bereits eine zweite Diesel/Generatoreinheit (Verbrauch: 2,5 l/h) als Stromerzeuger auf dem Fahrzeug installiert ist, kann diese dazu verwendet werden, eine Start-Stop-Funktion für den Hauptdiesel zu realisieren. Dabei lädt der Stromerzeuger die 24 V Bordnetzbatteie, um den Startvorgang des Hauptdiesels abzusichern. Durch diese Maßnahme kann der Hauptdiesel im Stillstand / Nichtgebrauch abgestellt und der Leerlaufverbrauch (5,35 l/h) eingespart werden.

Erwartete Einsparung:

Die Firma emkamatik errechnete im Rahmen einer Machbarkeitsabklärung im Jahr 2013 ein jährliches Einsparpotential von ca. 4 TCHF (Einsparung von 8,53 l / 22,3 kg CO₂ pro Tag) basierend auf den damaligen Dieselpreisen. (105) Dabei wurde vorläufig ein manuelles Einschalten der Diesel/Generatoreinheit abhängig vom Ladezustand der Batterie berücksichtigt.

Mit dem in der vorliegenden Studie verwendeten mittleren Dieselpreis von 2,58 CHF und einer ebenfalls von den Annahmen der emkamatik-Berechnung abweichenden Einsatzdauer von 300 Tagen im Jahr ergibt sich ein jährliches Einsparpotential von ca. 6,6 TCHF (auf 25 Jahre Lebensdauer: 165 TCHF, ca. 167 t CO₂).

Fazit:

Die von emkamatik vorgeschlagene Verwendung des Stromerzeugers als Batterieladegerät ermöglicht, mit vergleichsweise geringem Aufwand eine manuelle Start-Stop-Funktion für den Hauptdieselmotor zu realisieren. Wie auch die Analyse des DLR ergeben hat, ist der Dieselmotor häufig in Betrieb, obwohl keine oder sehr geringe Last anliegt. Die Vermeidung dieser Diesellauf-

zeiten bietet die Möglichkeit, das von emkamatik berechnete Dieseleinsparpotential von ~64.000 l (-20 %) über die Lebensdauer zu realisieren. Es wird empfohlen, die Kosten für die Umsetzung zu prüfen und bei nachgewiesener Rentabilität eine prototypische Umsetzung auf einem Fahrzeug vorzunehmen.

5.1.2 Am 843

5.1.2.1 Alternative Kraftstoffe

Wie bereits in Kapitel 3.2.4 dargestellt, sind die reinen Verbrauchskosten der alternativen Kraftstoffe fast durchweg geringer als die des konventionellen Diesels. Lediglich bei einem Einsatz von GtL ergeben sich höhere Verbrauchskosten. Auch hinsichtlich der direkten Emissionen sind abgesehen von Biodiesel die alternativen Kraftstoffe dem konventionellen Diesel überlegen. Dem gegenüber stehen die Mehrkosten für Fahrzeug- und Infrastrukturanpassungen.

Tabelle 5.3: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für Am 843

	Am 843 /RV	Am 843 /EWLV
Einsatzjahre	25	25
mittlerer jährlicher Dieserverbrauch [l]	84.375	115.496
Einsatztage / a	300	300
durchschnittlicher Dieserverbrauch/d [l]	281,3	385,0
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	5.442	7.449
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	5.515	7.549

	Biodiesel	LNG / CNG Monofuel	LNG / CNG Dualfuel	LPG Monofuel				
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	4.332	5.930	1.921	2.630	2.801	3.835	2.588	3.543
Einsparung ggü. Diesel [TCHF]	1.110	1.520	3.521	4.820	2.641	3.615	2.854	3.907
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	5.664	7.753	3.907	5.348	4.310	5.900	4.858	6.650
CO2 Einsparung [%]	-3	-3	29	29	22	22	12	12
	LPG Dualfuel	BtL	GtL					
Kosten über Einsatzjahre [CHF]	4.486	6.141	4.368	5.979	5.606	7.674		
Einsparung ggü. Diesel [CHF]	956	1.308	1.075	1.471	-164	-224		
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	5.294	7.246	----	----	----	----		
CO2 Einsparung [%]	4	4	----	----	----	----		

Fazit

Die Kosten für die Fahrzeug-Umrüstung auf LPG und Erdgas sind aufgrund der Anpassungen des Tanksystems deutlich höher als die Kosten für Umrüstungen auf XtL und Biodiesel. Konkrete Kostendaten für Erdgas- und LPG-Serienmotoren sind derzeit jedoch nicht bekannt. Die Umrüstung auf die beiden genannten Kraftstoffe erfordert zusätzliche Investitionen für die Betankungsinf-

rastruktur, die im Rahmen einer alternativen Kraftstoffstrategie für alle thermisch betriebenen Fahrzeugtypen untersucht und bewertet werden sollten.

Im Gegensatz zur Tm 234 sind die Gesamt-Verbrauchskosten der Am 843 größer und damit auch die realisierbaren Einsparungen z.B. durch den Einsatz von Erdgas. Es wird daher empfohlen, eine langfristige Kraftstoffstrategie zu entwickeln und dazu die Kosten für die Bereitstellung der Tankstelleninfrastruktur zu prüfen und den realisierbaren Kraftstoffkosteneinsparungen gegenüberzustellen.

5.1.2.2 Abgaswärmenutzung

Fazit

Die Messdaten der 843 lassen sowohl im Rangier- als auch im Streckenbetrieb aufgrund der überwiegend geringen Leistungsanforderungen (max. mittlere Leistung: 41,4 bzw. 64,5 kW) auf geringe Abgastemperaturen schließen. Da die Abgaswärmenutzung unabhängig vom verwendeten System (Thermoelektrischer Generator oder Dampfprozess) auf hohe Abgastemperaturen angewiesen ist, werden für die untersuchten Messzyklen keine signifikanten Kraftstoffeinsparungen erwartet. Eine detailliertere Betrachtung wird daher nicht empfohlen.

5.1.2.3 Hydraulischer Hybrid

Aufwand

Im Zusatzbericht ist für die Annahme einer Bremsung aus 80 km/h die Masseabschätzung eines Hydraulikspeichersystems bei typischen Kennwerten zu finden.

Fazit:

Bereits aus der einfachen Abschätzung ergibt sich eine Zusatzmasse von mindestens 5,3 t, die im Fahrzeug nicht untergebracht werden kann. Weitere Komponenten (Hydrostatiköl, Niederdruckspeicher, Verrohrung, ...) und die Berücksichtigung von Anhängelasten bei der Bremsenergieberechnung führen in der realen Umsetzung zu noch größeren Massen für das hydrostatische

Rekuperationssystem. Somit ist die technische Umsetzbarkeit der gezeigten Auslegung nicht realistisch.

Mit Hilfe detaillierter Simulationsrechnungen könnte ermittelt werden, welche Einsparpotentiale mit anderen Auslegungen (kleinere Kapazität und / oder Leistung) des Speichersystems vorhanden sind. Voraussetzung hierfür sind weitere Leistungsprofile, da die vorhandene Datengrundlage zu klein für eine qualifizierte Auslegung ist.

5.1.2.4 *Parallelhybrid elektrisch*

Fazit:

Die Auslegung eines elektrischen Parallelhybrids erfolgt analog zu der des hydraulischen Hybrids. Aufgrund des beschränkten Bauraums und kaum vorhandener Gewichtsreserven in der Am 843 ist auch hier davon auszugehen, dass eine technische Realisierbarkeit bei einem auf Bremsungen aus 80 km/h ausgelegten elektrischen Parallelhybrid kaum möglich ist. Mit Hilfe detaillierter Simulationsrechnungen könnte ermittelt werden, welche Einsparpotentiale mit anderen Auslegungen (kleinere Kapazität und / oder Leistung) des Speichersystems vorhanden sind. Voraussetzung hierfür sind weitere Leistungsprofile, da die vorhandene Datengrundlage zu klein für eine qualifizierte Auslegung ist.

5.1.3 Eem 923

5.1.3.1 *Alternative Kraftstoffe*

Wie bereits in Kapitel 3.2.4 dargestellt, sind die reinen Verbrauchskosten der alternativen Kraftstoffe fast durchweg geringer als die des konventionellen Diesels. Lediglich bei einem Einsatz von GtL ergeben sich höhere Verbrauchskosten. Auch hinsichtlich der direkten Emissionen sind besehen von Biodiesel die alternativen Kraftstoffe dem konventionellen Diesel überlegen. Dem gegenüber stehen die Mehrkosten für Fahrzeug- und Infrastrukturanpassungen.

Tabelle 5.4: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für Eem 923

	Eem 923						
Einsatzjahre	30						
mittlerer jährlicher Dieserverbrauch [l]	8.652						
Einsatztage / a	300						
durchschnittlicher Dieserverbrauch/d [l]	28,8						
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	711						
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	679						
	Biodiesel	LNG / CNG Monofuel	LNG / CNG Dualfuel	LPG Monofuel	LPG Dualfuel	BtL	GtL
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	567	251	366	338	586	571	733
Einsparung ggü. Diesel [TCHF]	144	460	345	373	125	140	-22
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	697	481	530	598	651	---	---
CO2 Einsparung [%]	-3	29	22	12	4	---	---

Fazit

Die Kosten für die Fahrzeug-Umrüstung auf LPG und Erdgas sind aufgrund der Anpassungen des Tanksystems deutlich höher als die Kosten für Umrüstungen auf XtL und Biodiesel. Konkrete Kostendaten für Erdgas- und LPG-Serienmotoren sind derzeit jedoch nicht bekannt. Die Umrüstung auf die beiden genannten Kraftstoffe erfordert zusätzliche Investitionen für die Betankungsinfrastruktur, die im Rahmen einer alternativen Kraftstoffstrategie für alle thermisch betriebenen Fahrzeugtypen untersucht und bewertet werden sollten.

Bei alleiniger Betrachtung der Eem 923-Bestandsfahrzeuge wird empfohlen, kurzfristig die Zumischung von Biodiesel und längerfristig den Einsatz von (biomassebasiertem) synthetischem Diesel detailliert zu untersuchen. Für den Einsatz von Biodiesel ist zunächst mit den Herstellern des Fahrzeugs und der Motoren zu prüfen, bis zu welchem Mischungsverhältnis Biodiesel eingesetzt werden kann.

5.1.3.2 Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher

Aufwand:

Bei der Umrüstung eines Bestandsfahrzeugs auf Zweikraftantrieb mit Energiespeicher kann die Dieselgeneratoreinheit inkl. Kühlung (Abbildung 5.1) und Tank entfallen. Anhand der hierdurch zur Verfügung stehenden Masse- und Bauraumreserve wird zunächst die maximal installierbare Energiespeicherkapazität ermittelt.

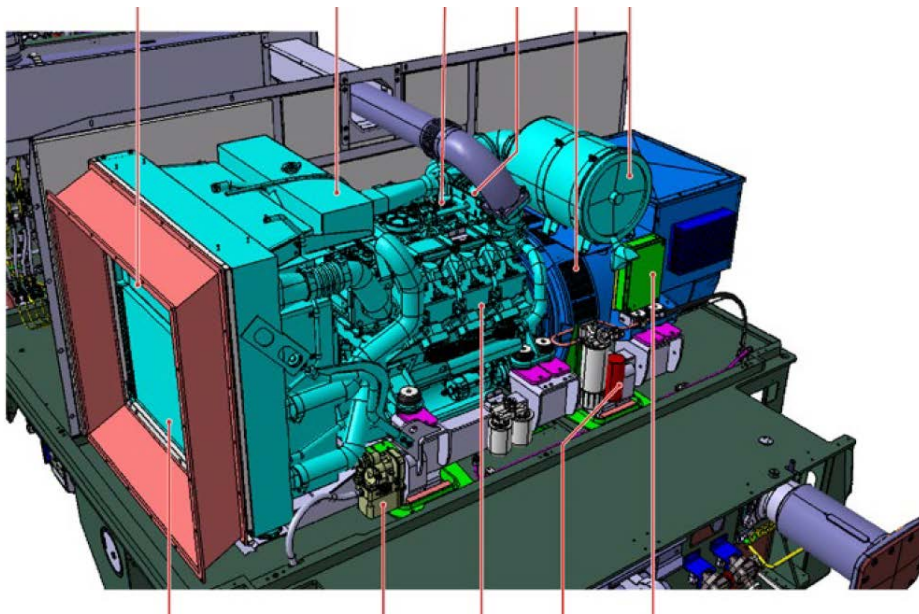


Abbildung 5.1: Dieselgeneratoreinheit der Eem 923

Die Analyse der Schnittzeichnung (Abbildung 5.2 / roter Rahmen) der Eem 923 ergibt einen nutzbaren Bauraum von ca. $1,1 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 3,3 \text{ m}^3$. Durch Entfall des Dieseltanks stehen weitere $0,9 \text{ m}^3$ Bauraum zur Verfügung. Die Masse der Dieselgeneratoranlage beträgt 2.631 kg , Dieseltank und Abgasanlage wiegen weitere 1192 kg . Ohne weitere Änderungen ergibt sich eine maximal zulässige Masse des Batteriesystems und der erforderlichen Peripherie von 3.823 kg und ein zur Verfügung stehender Bauraum von ca. $4,2 \text{ m}^3$.

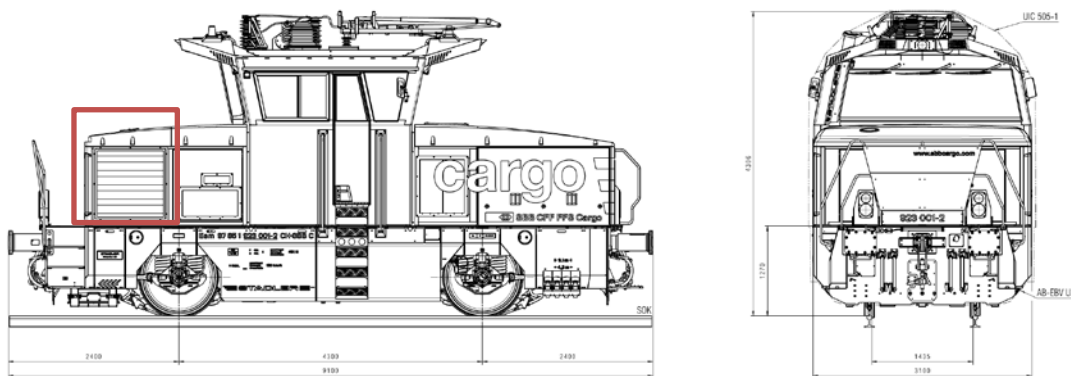


Abbildung 5.2: Schnittzeichnung der Eem 923

Für die elektrische Anbindung des Energiespeichers an das existierende Fahrzeug bestehen verschiedene Möglichkeiten.

1. Energiespeicher werden direkt an die Zwischenkreise der ABB-Stromrichter angeschlossen. Diese Variante ist hinsichtlich des Lade-/Entladewirkungsgrads günstig. Sie erfordert aber eine angepasste Steuerung der Zwischenkreisspannung, da Lade- und Entladevorgänge der Batterie lediglich über die Differenz der Zwischenkreis- und Klemmenspannung gesteuert werden können. Weiterhin ist die Ansteuerung der Bremswiderstände anzupassen.
2. Energiespeicher werden über Gleichspannungswandler an die Zwischenkreise der ABB-Stromrichter angeschlossen. Energetisch und hinsichtlich Massen- und Bauraumbedarf ist diese Variante ungünstiger, aber sie ist steuerungstechnisch einfacher umzusetzen.

Im Folgenden wird Variante 2 betrachtet. Aus der Auswertung der Messzyklen ergibt sich, dass 85% der Zyklen am Zwischenkreis weniger als 200 kWh elektrische Energie pro Tag vom Dieselgenerator benötigen. Da keine Informationen zu Zwischenlademöglichkeiten im Betrieb unter Oberleitung vorhanden sind, wird angenommen, dass auch für die restlichen 15% der Zyklen ein nutzbarer Energieinhalt von 200 kWh ausreicht, wenn im Oberleitungsbetrieb Zwischenladungen durchgeführt werden. Die Auslegung der Batteriekapazität ist insgesamt eher konservativ, bei vielen Fahrzyklen wäre eine kleinere Kapazität ausreichend. Als Batterie-Leistung werden identisch zum Dieselgenerator 290 kW am Rad (300 kW am ZK) angenommen.

Basierend auf den im Zusatzbericht dargestellten Annahmen und typischen Kennwerten der Antriebskomponenten ergibt sich für die Batterietechnologien NiMH, NiCd und NMC die in Tabelle 5.5 gezeigte Bauraum-, Massen- und Kostenabschätzung.

Tabelle 5.5: Systemauslegung Zweikraft OL-Energiespeicher Eem 923

Systemauslegung:

Batteriekapazität und Leistung:	NMC	NiCd	NiMH
Installierte Batteriekapazität [kWh]	262	269	269
Batterie-Klemmenleistung [kW]	323	323	323
Batterie:			
Masse [kg]	2617	13445	7683
Bauraumbedarf [m ³]	2,91	10,76	6,72
Kosten [CHF]	392594	340248	366421
DC-DC-Wandler:			
Masse [kg]	69	69	69
Bauraumbedarf [m ³]	0,04	0,04	0,04
Kosten [CHF]	77520	77444	77444
Masse, Bauraum und Kosten Gesamtsystem:			
Masse Batterie [kg]	2617	13445	7683
Masse DC/DC-Wandler [kg]	69	69	69
Massenzuschlag 10% [kg]	269	1351	775
Resultierende Gesamtmasse [kg]	2955	14865	8527
Bauraum Batterie [m ³]	2,91	10,76	6,72
Bauraum DC/DC-Wandler [m ³]	0,04	0,04	0,04
Bauraumzuschlag 10% [m ³]	0,29	1,08	0,68
Resultierender Gesamtbauraum [m³]	3,24	11,88	7,44
Kosten Batterie [CHF]	392594	340248	366421
Kosten DC/DC-Wandler [CHF]	77520	77444	77444
Resultierende Investitionskosten [CHF]	470114	417691	443864

Mit den getroffenen Annahmen hinsichtlich verfügbarem Bauraum und Gewicht sind NMC-Batterien integrierbar, NiMH und NiCd-Batterien dagegen nicht. Die gezeigten Batteriekosten für den ersten Batteriesatz sind eine obere Abschätzung, größere Abnahmemengen können zu deutlich reduzierten Kosten führen. In der Berechnung ist der Tausch von Batterien nicht berücksichtigt. Es ist unabhängig von der Batterie-Technologie davon auszugehen, dass über 30 Jahre Lebensdauer zwei bis fünf zusätzliche Batteriesätze benötigt werden, so dass hier zusätzliche Kosten entstehen.

Die beispielhafte Auslegung für Variante 2 mit DC/DC-Wandler ist aus Kosten-, Bauraum- und Gewichtsaspekten die ungünstigere Variante. Es lässt sich leicht nachvollziehen, dass nicht der DC/DC-Wandler, sondern hauptsächlich die Energiespeicher Masse und Bauraumbedarf bestimmen, so dass ein direkt an den Zwischenkreis angebundenes Batteriesystem hier nur einen geringen Vorteil hat. Die Kosten des DC/DC-Wandlers sind dagegen nicht zu vernachlässigen, durch den direkten ZK-Anschluss bei Variante 1 könnten hier Investitionskosten eingespart werden.

Erwartete Verbrauchseinsparung:

Der mittlere Jahresdieselvebrauch eines Fahrzeugs beträgt 8652 l. Daraus ergeben sich bei einem durchschnittlichen Dieselpreis in den Jahren 2020-2050 von 2,74 CHF/l und einer Fahrzeuglebensdauer von 30 Jahren Kraftstoffkosten in Höhe von ~710 TCHF, welche durch den Verzicht des Dieselmotors eingespart werden können.

Dem gegenüber stehen die Energiekosten für das Laden des Energiespeichers. Es wird angenommen, dass der Energiespeicher ausschließlich aus der Oberleitung geladen wird. Die Bremsenergierekuperation wird nicht betrachtet, da aus den Messdaten die im OL-freien Betrieb zur Verfügung stehende Bremsenergie nicht ermittelt werden konnte. Somit wird der für die Speicherauslegung ungünstigste Fall untersucht, eine detaillierte Betrachtung von Zwischenlademöglichkeiten und Bremsenergieerückspeisung wird zu einem kleineren Speicher führen. Tabelle 5.6 stellt die entstehenden Energiekosten dar. Die zugrundeliegenden Annahmen können dem Zusatzbericht entnommen werden.

Tabelle 5.6: Kosten für Jahresenergiebedarf Zweikraft OL-Energiespeicher Eem923

Kosten für Jahres-Energiebedarf elektrisch, nur NMC

Berechnung Energiebezug ab OL:

zu speichernde Energie in Batterie [kWh]	29516
Energiebedarf ab OL für Batterieladung [kWh]	32690
Energiekosten elektrisch [CHF/Jahr]	5230
Energiekosten elektrisch [CHF/30 Jahre]	156913

Der Vergleich der über die gesamte Lebensdauer aufzuwendenden Diesel-Energiekosten des Diesel-Zweikraft-Fahrzeugs zum Zweikraft-Fahrzeug mit Energiespeicher zeigt eine Kosteneinsparung in Höhe von etwa 553 TCHF. Dies entspricht einem Einsparpotential von 77% der Energiekosten für Diesel.

Dem gegenüber stehen Investitionskosten von ~470 TCHF für eine NMC-Batterie und den DC/DC-Wandler. Unter diesen Annahmen wäre eine Wirtschaftlichkeit gegeben.

Fazit:

Das vorgeschlagene Konzept bietet:

- Keine direkten Emissionen beim Betrieb der Eem 923 / Einsparung von 100 % CO₂
- 100 %ige Reduzierung des Dieselkraftstoff
- Lärmreduzierung durch Verzicht auf Dieselmotor
- Entfall von Betankungsvorgängen und Betankungsinfrastruktur
- Im oberleitungsfreien Betrieb zwei bis dreimal mehr Traktionsleistung als das Bestandsfahrzeug, da die Auslegung der NMC-Batterie auf die benötigte Energiemenge größere Entladeleistungen erlaubt, als der Dieselgenerator bereitstellen kann.
- Für viele Fahrzyklen ist die Batterie überdimensioniert, Potential für Kapazitätsreduzierung und damit Kostenreduzierung durch detaillierte Betrachtung der Nachlademöglichkeiten vorhanden

Eine detaillierte Betrachtung des Konzepts und verschiedener Integrationsvarianten wird empfohlen.

Risiken:

- Batterietauschintervalle unbekannt

Mögliche nächste Schritte

- Batterieauslegung muss mit Hersteller abgesichert werden, zu klären insbesondere Tauschintervalle

- Wirtschaftlichkeitsberechnung ist in Abstimmung mit Batterieherstellern zu konkretisieren
- Festlegung der zu installierenden Batteriekapazität ist zu prüfen, ggf. kann in vielen Fahrzeugen eine kleinere, günstigere Batterie eingesetzt werden
- Thermomanagement für Batterien berücksichtigen (E-Bedarf und Kosten)
- Analyse der OL-Verfügbarkeit zur Absicherung von Nachlademöglichkeiten für die Batterie
- Detaillierung Bauraumuntersuchung und Erstellung Packaging-Konzept

5.1.4 LRZ 08

Vorbemerkung

Da kein Fahrzyklus für den LRZ vorliegt, wurde technologieunabhängig eine Analyse der Kraftstoffkosten-Einsparung bei verschiedenen angenommenen prozentualen Verbrauchseinsparungen vorgenommen (Abbildung 5.3). Dabei wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

1. Lebensdauer: 25 a
2. Laufleistung: 18300 km/a
3. Mittlerer spez. Kraftstoffpreis 2020 - 2045: 2,58 CHF/l

Einsparungen über Lebensdauer in CHF									
angenommener Verbrauch in l/km		angenommene Kraftstoffeinsparung in %							
		1	2	3	5	10	15	20	25
	2,5	29.509	59.018	88.526	147.544	295.088	442.631	590.175	737.719
	2,9	34.230	68.460	102.690	171.151	342.302	513.452	684.603	855.754
	3	35.411	70.821	106.232	177.053	354.105	531.158	708.210	885.263
	3,5	41.312	82.625	123.937	206.561	413.123	619.684	826.245	1.032.806
	3,7	43.673	87.346	131.019	218.365	436.730	655.094	873.459	1.091.824
	4	47.214	94.428	141.642	236.070	472.140	708.210	944.280	1.180.350
	4,5	53.116	106.232	159.347	265.579	531.158	796.736	1.062.315	1.327.894
	5	59.018	118.035	177.053	295.088	590.175	885.263	1.180.350	1.475.438

Abbildung 5.3: Einsparungen LRZ über Lebensdauer

Der rote Bereich markiert die berechneten typischen Verbräuche der LRZ und die bei verschiedenen prozentualen Einsparungen resultierenden Kraftstoffkosteneinsparungen über die Fahrzeuglebensdauer. Bei einem Verbrauch von 2,9 bis 3,7 l / km und 5 % Kraftstoffeinsparung resultieren über 25 Jahre Lebensdauer Kraftstoffkosteneinsparungen zwischen 171 TCHF und 218 TCHF. Ohne Betrachtung der Abzinsung ergeben sich somit maximale Investitionskosten zwischen 171 und 218 TCHF für das gesamte Fahrzeug.

5.1.4.1 Alternative Kraftstoffe

Wie bereits in Kapitel 3.2.4 dargestellt, sind die reinen Verbrauchskosten der alternativen Kraftstoffe fast durchweg geringer als die des konventionellen Diesels. Lediglich bei einem Einsatz von GtL ergeben sich höhere Verbrauchskosten. Auch hinsichtlich der direkten Emissionen sind abgesehen von Biodiesel die alternativen Kraftstoffe dem konventionellen Diesel überlegen. Dem gegenüber stehen die Mehrkosten für Fahrzeug- und Infrastrukturanpassungen. Tabelle 5.7 stellt die potentiellen Einsparungen beim Einsatz der betrachteten alternativen Kraftstoffe gegenüber. Hierbei wird ein Verbrauch von 2,9 bis 3,7 l / km berücksichtigt, wodurch jeweils der mittlere jährliche Dieserverbrauch von 52.500 - 67.500 l betrachtet wird.

Tabelle 5.7: potentielle Einsparungen von Kraftstoffkosten pro Fahrzeug für LRZ

	LRZ08							
Einsatzjahre	25	25						
mittlerer jährlicher Dieserverbrauch [l]	52.500	67.500						
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	3.386	4.354						
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	3.432	4.412						
	Biodiesel		LNG / CNG Monofuel		LNG / CNG Dualfuel		LPG Monofuel	
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	2.695	3.465	1.195	1.537	1.743	2.241	1.610	2.071
Einsparung ggü. Diesel [TCHF]	691	888	2.191	2.817	1.643	2.113	1.776	2.283
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	3.524	4.531	2.431	3.126	2.682	3.448	3.023	3.886
CO2 Einsparung [%]	-3	-3	29	29	22	22	12	12
	LPG Dualfuel		BtL		GtL			
Kosten über Einsatzjahre [TCHF]	2.792	3.589	2.718	3.494	3.488	4.485		
Einsparung ggü. Diesel [TCHF]	595	765	669	860	-102	-131		
direkte CO2 Emissionen über Einsatzjahre [t]	3.294	4.235	---	---	---	---		
CO2 Einsparung [%]	4	4	---	---	---	---		

Fazit

Die Kosten für die Fahrzeug-Umrüstung auf LPG und Erdgas sind aufgrund der Anpassungen des Tanksystems deutlich höher als die Kosten für Umrüstungen auf XtL und Biodiesel. Konkrete Kostendaten für Erdgas- und LPG-Serienmotoren sind derzeit jedoch nicht bekannt. Die Umrüstung auf die beiden genannten Kraftstoffe erfordert zusätzliche Investitionen für die Betankungsinfrastruktur, die im Rahmen einer alternativen Kraftstoffstrategie für alle thermisch betriebenen Fahrzeugtypen untersucht und bewertet werden sollten.

Daher wird bei vergleichsweise geringen Gesamtausgaben für den Kraftstoff für LRZ-Bestandsfahrzeuge empfohlen, kurzfristig die Zumischung von Biodiesel und längerfristig den Einsatz von (biomassebasiertem) synthetischem Diesel detailliert zu untersuchen. Für den Einsatz von Biodiesel ist zunächst mit den Herstellern des Fahrzeugs und der Motoren zu prüfen, bis zu welchem Mischungsverhältnis Biodiesel eingesetzt werden kann. Im Gegensatz zur Tm 234 sind die Gesamt-Verbrauchskosten der LRZ größer und damit auch die realisierbaren Einsparungen z.B. durch den Einsatz von Erdgas. Es wird daher empfohlen, die Kosten für die Bereitstellung der Tankstelleninfrastruktur zu prüfen und den realisierbaren Kraftstoffkosteneinsparungen gegenüberzustellen.

5.1.4.2 Abgaswärmenutzung

Fazit

Anhand der vorliegenden Daten des LRZ lassen sich keine qualifizierten Aussagen zur Bewertung der Abgaswärmenutzung ableiten. Qualitativ lässt sich einschätzen, dass aufgrund der häufigen Fahrten mit hoher Leistung Potentiale zur Abgaswärmenutzung vorhanden sind.

Um die Abgaswärmenutzung vertieft untersuchen zu können, sind zumindest zeitbasierte Leistungsverläufe der mechanischen Leistung am Dieselmotor erforderlich. Idealerweise sollten Messungen der Abgasmassenströme und Abgastemperaturen vorliegen.

5.1.4.3 *Hydraulischer Hybrid*

Fazit

Mangels Kenntnis von Geschwindigkeits- und Leistungsprofilen ist keine qualifizierte Aussage über das Rekuperationspotential der LRZ möglich. Davon ausgehend, dass die Fahrzeuge typischerweise zügig beschleunigt werden und dann mit möglichst hoher Geschwindigkeit zum Einsatzort fahren, wird von einem geringen Rekuperationspotential ausgegangen. Somit wird eine detaillierte Untersuchung des hydraulischen Hybrids nicht empfohlen, da dieser nur bei häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen große Kraftstoffeinsparungen ermöglicht.

5.1.4.4 *Effizienzsteigerung durch Getriebetausch*

Aufwand

Beim Austausch hydrodynamischer durch hydromechanische Getriebe ist die mechanische Integration in den Antriebsstrang anzupassen. Das umfasst z.B. Anpassungen der mechanischen Schnittstellen (Befestigungspunkte) und der Gelenkwellen. Abhängig von der bisherigen Ausführung der Wendegetriebe kann auch hier eine Anpassung erforderlich sein. Weiterhin sind die Schnittstellen zum Kühlsystem zu prüfen und bei Bedarf anzupassen. Im Rahmen der Studie wird davon ausgegangen, dass der Kühlbedarf aufgrund der höheren Effizienz des Getriebes tendenziell geringer ist, so dass die bestehende Kühlsystemauslegung eher überdimensioniert ist, eine Anpassung wird daher nicht betrachtet. Weitere Modifikationen betreffen die Antriebssteuerung von Getriebe und Verbrennungsmotor sowie die Konfiguration der Schaltpunkte entsprechend der effizientesten Motorbetriebspunkte.

Basierend auf dem im Kapitel 4.7 dargestellten Getriebevergleich wird davon ausgegangen, dass die Getriebemasse durch den Austausch um mindestens 40 % reduziert werden kann.

Für die Investitionskosten hydromechanischer Getriebe wird davon ausgegangen, dass gegenüber hydrodynamischen Getrieben ein Einsparpotential von mehr als 15 % besteht.

Erwartete Verbrauchseinsparung

Anhand der vorliegenden Daten des LRZ lässt sich das Potential zur Verbrauchseinsparung nicht berechnen. Daher wird auf Grundlage des bereits dargestellten Getriebevergleichs, der Kraftstoffeinsparungen bis 20 % ausweist, konservativ eine Verbrauchseinsparung von 15 % (Dieselkraftstoffeinsparung zwischen 197.000 und 253.000 l sowie CO₂-Einsparung zwischen 515 und 660 t über Lebensdauer) angenommen. Aus der Einsparung von Getriebemasse resultierende Verbrauchseinsparungen werden nicht berücksichtigt. Weitere potentielle Verbrauchseinsparungen aufgrund reduzierter Verlustwärmeströme und resultierendem geringerem Kühlaufwand sowie aus der Vermeidung der Drehzahlanhebung beim Bremsen werden ebenfalls vernachlässigt.

Bezogen auf die gesamten Kraftstoffkosten von zwischen etwa ~3,4 – 4,4 Millionen CHF über 25 Einsatzjahre beträgt das Einsparpotential zwischen etwa 510 und 650 TCHF pro Fahrzeug. Somit stehen als Ergebnis dieser konservativen Betrachtung für den Getriebetausch jedes PowerPacks mindestens 127 TCHF zur Verfügung.

Fazit

Für das Bestandsfahrzeug wird die detaillierte Analyse der Umrüstkosten (Modifikation der mechanischen, thermischen und steuerungstechnischen Schnittstellen) auf hydromechanische Getriebe empfohlen. Weiterhin ist zu ermitteln, bei welcher Abnahmemenge welche Investitionskosten für die hydromechanischen Getriebe entstehen.

Es wird davon ausgegangen, dass auch nach einer Detaillierung der Wirtschaftlichkeitsberechnung großes Potential zur Kostensenkung besteht, das auch auf Neufahrzeuge übertragbar ist.

5.1.4.5 *Parallelhybrid elektrisch*

Fazit

Der Einsatz eines elektrischen Parallelhybrids ist nur sinnvoll bei einem gleichzeitigen Getriebetausch, da mit einem hydrodynamischen Getriebe keine effiziente Rekuperation möglich ist. Nach Herstellerangaben ist ein MTU Hybridpowerpack ca. 50 % schwerer als das bisher verwendete Powerpack. Durch die Masse- und Bauraumrestriktionen ist daher eine Betrachtung des Powerpack-Gesamtumbaus nicht sinnvoll. Die Investitionskosten für ein neues MTU-Hybrid-Powerpack sind mit ca. 600 TCHF etwa 50 % höher als für die bisher verbauten konventionellen Powerpacks (~400 TCHF). Bei einer Umrüstung der bestehenden hydrodynamischen Powerpacks auf Hybrid-Powerpacks fallen mindestens die Differenzkosten von 200 TCHF, insgesamt 800 TCHF an, wobei weitere Modifikationen nicht berücksichtigt sind. Um diese sehr wohlwollend abgeschätzten Investitionskosten zu kompensieren müssten nach Abbildung 5.3 Kraftstoffeinsparungen von mehr als 20% realisiert werden. Wie bereits bei der Bewertung für den hydraulischen Hybrid beschrieben wird davon ausgegangen, dass das Rekuperationspotential der LRZ dafür nicht ausreichend ist.

5.2 Neufahrzeuge

5.2.1 Baudienst

5.2.1.1 *Mehrmotorenkonzept*

Fazit

Die Analyse der Fahrzyklen hat gezeigt, dass bei dem bisher eingesetzten Fahrzeug Tm 234 große Anteile des Dieselmotors bei geringen Leistungen bzw. im Leerlauf stattfinden. Für ein Neufahrzeug sollte daher die konsequente Umsetzung einer Start-Stop-Strategie für den Dieselmotor fokussiert werden.

Soll weiterhin ein hydrostatischer Fahrantrieb eingesetzt werden, ist zu untersuchen, ob ein Mehrmotorenkonzept beispielsweise dadurch umgesetzt werden kann, dass jeder Motor eine eigene Achse antreibt. Somit könnte bei geringer

Leistungsanforderung (Baustellenbetrieb) ein Dieselmotor deaktiviert werden, wodurch der andere Dieselmotor in einem effizienteren Bereich des Verbrauchskennfelds betrieben werden könnte. Dabei muss die Leistung der Dieselmotoren nicht identisch sein, ein Motor könnte als „Arbeitsmotor“ kleiner dimensioniert und direkt mit der Versorgung des Kranantriebs und des Stromaggregats verbunden werden.

Ein dieselelektrischer Mehrmotoren-Antrieb ist ebenfalls denkbar, z.B. kleines Genset mit ~100 kW für den Betrieb auf der Baustelle (Kran, Stromaggregat, Fahrbetrieb mit geringen Geschwindigkeiten) und zusätzlich ein großes Genset mit ~400 - 600 kW als reiner Fährantrieb. Bei großen Leistungsanforderungen im Fahrbetrieb könnte durch den gleichzeitigen Betrieb die Gesamtleistung beider Motoren genutzt werden.

5.2.1.2 Zweikraft Oberleitung - Diesel

Aufwand

Für die technische Umsetzung eines Zweikraftantriebs ist der Aufbau eines Fahrzeugs mit einer elektrischen Leistungsübertragung erforderlich (analog Eem 923). Für eine erste Abschätzung der technischen Machbarkeit wird geprüft, ob und welche Masserestriktionen vorliegen. Dafür wird eine Abschätzung der Massen und Kosten der Hauptkomponenten des Zweikraftantriebs vorgenommen (vgl. Tabelle 5.8). Aus dem aktuellen Fahrzeugeinsatzkonzept für diesen Fahrzeugtyp wurde die Leistung des Dieselmotors von 500 kW übernommen. (106)

Tabelle 5.8: Abschätzung Hauptkomponenten Zweikraftausrüstung Baudienst

Komponente	Masse (kg)	Kosten (CHF)
<u>Elektrisches Antriebssystem (Basis Eem 923)</u>		
Stromabnehmer, Hauptschalter und Isolatoren	400	15.000
Transformator wie Eem 923	3.950	60.000
Netz- und Antriebsstromrichter	1.900	200.000
Tatzlagergetriebe 2 Stück à 590 kg, 50 CHF/kW	1.180	55.000
Fahrmotoren jeweils 550 kW (2x), wie Eem 923	4.300	110.000
Dieselmotor, 500 kW, 0,33 kW/kg, 150 CHF/kW	1.500	75.000
Generator, 500 kW, 100 CHF/kW	1.400	50.000
Kraftstofftank 1000l (gefüllt)	1.090	10.000
Abgasanlagen	102	20.000
Partikelfilter (1x), Ansatz 1 kg/kW DM-Leistung	500	25.000
Summe	16.322	620.000

Erwartete Verbrauchseinsparung

Der mittlere Jahresdieselvebrauch eines Fahrzeugs beträgt 12.480 l, bei einer Fahrzeuglebensdauer von 25 Jahren ergeben sich daraus Kraftstoffkosten in Höhen von ~805 TCHF. Im Folgenden wird für die Berechnung der Einsparpotentiale eine Energiebedarfsdeckung durch die Oberleitung von 95 % angenommen.

Die Einsparpotentiale werden für den schlechtesten Fall abgeschätzt, d.h. es werden konservative Annahmen für die mittleren Wirkungsgrade der elektrischen Komponenten und optimistische Annahmen für die Wirkungsgrade des Dieselmotors und der hydrostatischen Leistungsübertragung angesetzt. Weiterhin wird das Potential für Energierückspeisung im OL-Betrieb nicht betrachtet. Die resultierenden Kosten- und Energieeinsparpotentiale zeigt Tabelle 5.9. Die zugrundeliegenden Annahmen können dem Zusatzbericht entnommen werden.

Tabelle 5.9: Energiekosten Baudienstfahrzeug für OL-D-Antrieb

Energiekosten Tm 234 für OL-D-Antrieb

durchschnittlicher Dieserverbrauch/d [l]	41,6
Dieselpreis [CHF/l]	2,58 ²
Einsatztage / a	300
Einsatzjahre	25
Dieselskosten über Einsatzjahre [CHF]	804.960
CO ₂ Ausstoß über Einsatzjahre [t]	815
Traktionsenergiebedarf am Rad [kWh/d]	114
Traktionsenergiebedarf am Rad [kWh/25a]	856.128
Energiebedarf OL (bei 100% OL-Fahrt) [kWh/25a]	1.174.387
Energiebedarfsdeckung durch OL:	95%
Reduzierung Dieserverbrauch / d [l]	39,5
Reduzierung Dieserverbrauch / 25a [l]	296.400
Dieselskosteneinsparung über Einsatzjahre [CHF]	764.712
CO ₂ Einsparung über Einsatzjahre [t]	775
Berechnungen:	
Energiebedarf ab OL [kWh/25a]	1.115.667
Energiekosten elektrisch [CHF/25 Jahre]	167.350
Gesamtenergiekosten über Einsatzjahre [CHF]	207.598
Gesamteinsparung Energiekosten [CHF]	597.362

Fazit:

Der vorgeschlagene Zweikraftantrieb OL-Diesel bietet theoretisch die Möglichkeit signifikanter Energiekosten- und direkter CO₂-Einsparungen. Diese betragen ~600 TCHF. Dem gegenüber stehen Beschaffungskosten der Hauptkomponenten des Antriebssystems von 620 TCHF, womit eine Wirtschaftlichkeit nicht gegeben ist. Wie sich weiterhin aus obiger Berechnung ergibt, erhöht sich die Masse des Antriebssystems durch den Zweikraftantrieb um mehr als 10 t gegenüber dem vorher eingebauten hydrostatischen Antrieb (vgl. Kapitel 2.3.1). In der untersuchten Fahrzeugkonfiguration kann diese Masse nicht untergebracht werden.

² Mittlerer spezifischer Energiepreis 2020 - 2045

5.2.1.3 *Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher*

Fazit

Für das Baudienstfahrzeug wird davon ausgegangen, dass auch ohne Nachlademöglichkeit oder Oberleitungsverfügbarkeit der Betrieb über mehrere Tage sichergestellt sein muss. Dies ist mit einem Zweikraftantrieb Oberleitung - Energiespeicher nicht zu gewährleisten.

5.2.1.4 *Energiespeicherantrieb*

Fazit

Für das Baudienstfahrzeug wird davon ausgegangen, dass auch ohne Nachlademöglichkeit oder Oberleitungsverfügbarkeit der Betrieb über mehrere Tage sichergestellt sein muss. Dies ist mit einem Energiespeicherantrieb nicht zu gewährleisten.

5.2.1.5 *Brennstoffzellenhybrid*

Aufwand

Die technische Grobauslegung (Annahmen können dem Zusatzbericht entnommen werden) eines Brennstoffzellenantriebs (Tabelle 5.10) geht von 448 kW max. Leistung am Rad (vgl. Bericht Auswertung der Messdaten) und einem mittleren Tagesenergiebedarf am Rad von 93,4 kWh aus. Dabei wird die Brennstoffzelle auf die größte mittlere Leistung von 52 kW ausgelegt. Diese Daten wurden in der Auswertung der SBB-Fahrzyklen über den Dieserverbrauch ermittelt, wodurch sich Abweichungen zum realen Leistungs- und Energiebedarf am Rad ergeben. Bei der Auslegung wird berücksichtigt, dass die Brennstoffzellenenergie immer in der Batterie zwischengespeichert wird. Weiterhin wird die Möglichkeit der Rekuperation nicht berücksichtigt. Für die Betriebsdauer zwischen zwei Betankungsvorgängen werden sieben Tage angenommen. Die Anbindung der Batterie erfolgt direkt an den Zwischenkreis, die der Brennstoffzelle über einen DC/DC-Wandler.

Tabelle 5.10: Grobauslegung Brennstoffzellenantrieb Baudienst

Tm 234 Auslegung BZ-Hybrid

Ansatz: Worst-Case-Auslegung

BZ auf größte mittlere Leistung

Batterieleistung auf max. Leistung abzgl. BZ-Leistung

Batterie direkt am ZK, BZ über DC/DC-Wandler

BZ- und Batterieauslegung auf mittl. Tagesenergiebedarf am Rad ohne Leerlauf

Wasserstofftankauslegung auf 7 Tage mit mittlerer Tagesenergie

Brennstoffzellenenergie wird immer zwischengespeichert in Batterie

Keine Berücksichtigung von Rekuperationsenergie

Randbedingungen Auslegung

Max. Leistung am Rad [kW]	448
Mittlere Leistung am Rad [kW]	52
Mittlerer Tagesenergiebedarf am Rad [kWh]	69,8
Betriebsdauer zwischen zwei H ₂ -Tankungen [Tage]	7

Brennstoffzellen-Auslegung

Brennstoffzellenleistung elektrisch [kW]	62
Mittlerer Tagesenergiebedarf BZ elektrisch [kWh]	88
Tagesbedarf Wasserstoff [kg]	5,9
Notwendige Wasserstoffmasse für Tankintervall [kg]	41
BZ-Masse [kg]	174
BZ-Volumen [dm ³]	186
BZ-Kosten [CHF]	74472

Wasserstoff-Drucktank-Auslegung

Tankmasse inkl. Wasserstoff-Füllung [kg]	778
Tankvolumen [dm ³]	2271
Kosten [CHF]	69786

Batterie-Auslegung

Batterieleistung entladen [kW]	463
Batteriemasse [kg]	463
Batterievolumen [dm ³]	634
Batteriekapazität [kWh]	46,3
Batteriekosten [CHF]	69474

DCDC-Wandler-Auslegung

Masse [kg]	12,9
Volumen [dm ³]	7,8
Kosten [CHF]	14894

Fahrmotoren, Antriebsstromrichter, Radsatzgetriebe

Masse Fahrmotoren [kg]	1946
Masse Antriebsstromrichter [kg]	953
Masse Radsatzgetriebe [kg]	481
Kosten Fahrmotoren [CHF]	49778
Kosten Antriebsstromrichter [CHF]	69864
Kosten Radsatzgetriebe [CHF]	22400

Zusammenfassung Masse und Kosten der Systemkomponenten

BZ, Batterie, DC/DC-Wandler, Fahrmotoren, Stromrichter und Radsatzgetriebe	
Gesamtmasse [kg]	4807
Gesamt-Komponentenkosten [CHF]	370667

Wasserstoffkosten vs. Dieselskosten

Jahresbedarf Wasserstoff [kg]	1771
Mittlerer Wasserstoffpreis 2020 - 2045 [CHF/kg]	14,19
Einsatzdauer [a]	25
Wasserstoffkosten über Lebensdauer [CHF]	628437
Vergleichskosten Diesel über Lebensdauer [CHF]	804960
Resultierende Energiekosteneinsparung [CHF]	176523

Fazit

Es zeigt sich, dass mit einem Brennstoffzellenhybrid eine Einsparung der Energiekosten in Höhe von ~176 TCHF erzielt werden kann und die direkte CO₂-Emission komplett vermieden wird. Allerdings ist die Energiekosteneinsparung auf die Vermeidung der Leerlaufzeiten des Dieselmotors zurückzuführen, d.h. in einem dieselhydraulischen Antrieb mit Motor Start-Stop-Funktion könnte eine ähnliche Verbrauchseinsparung erreicht werden. Wird ausschließlich die verrichtete Traktionsarbeit am Rad betrachtet, so ergeben sich nahezu identische Energiekosten für Brennstoffzellenhybrid und konventionelles Fahrzeug. Hierbei ist allerdings die Möglichkeit der Rekuperation noch nicht berücksichtigt, wodurch weitere Energieeinsparungen und eine Verkleinerung der Batterie möglich sind. Den Energiekosteneinsparungen von ~176 TCHF stehen Komponentenkosten von ~370 TCHF gegenüber.

Der Brennstoffzellenhybrid ist ein Konzept, mit dem weiterhin ein von der Fahrleitung autarker Betrieb gewährleistet werden kann. Durch die Grobauslegung hat sich gezeigt, dass bei einem Betankungsintervall von sieben Tagen die Komponentenmassen technisch umsetzbar sein sollten. Der BZ-Hybrid ist im Falle der Anforderung an einen autarken Betrieb ohne direkte CO₂-Emissionen ein vielversprechendes Konzept. Aufgrund der notwendigen Investitionskosten für den Aufbau der Betankungsinfrastruktur wird eine weitere Untersuchung nur empfohlen, wenn ein Schwerpunkt auf CO₂-freien autarken Betrieb gelegt wird.

5.2.1.6 Zusammenfassung

Basierend auf den in Kapitel 5 durchgeführten Analysen und Bewertungen alternativer Antriebskonzepte für Bestands- und Neufahrzeuge, stellt Tabelle 5.11 die vielversprechendsten Konzepte für den Einsatz im Baudienst gegenüber.

Tabelle 5.11: Zusammenfassung Baudienst-Optionen

	Erstausrüstungs-kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO ₂ -Emissionen je Fahrzeug über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
	[TCHF]	Dieselbedarf [m ³]	Energiekosten [TCHF]	CO ₂ [t]	
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 möglich, keine direkten Emissionen, leiser Betrieb (Nachteinsätze, Tunnel) --> für autarken, emissionsfreien Betrieb

*Kosten der Antriebs-Hauptkomponenten und Speicher je Fahrzeug

Eine Umstellung auf alternative Kraftstoffe ermöglicht prinzipiell die Erhaltung von bestehenden Antriebsstrukturen. Die reinen Verbrauchskosten und direkten CO₂-Emissionen sind je nach verwendetem Kraftstoff meist geringer als bei konventionellem Diesel.

Mit dem Konzept einer manuellen Start-Stop-Funktion lässt sich mit vergleichsweise geringem Aufwand eine Reduzierung des Dieselbedarfs um ~64.000 l

(20 %) auf 248.000 l über die Lebensdauer realisieren. Hierdurch ergibt sich ein Einsparpotential von 165.000 CHF (-20 %) und eine Reduzierung der CO₂-Emissionen von 167 t (-20 %) über eine Lebensdauer von 25 Jahren.

Weiterhin wird eine detaillierte Untersuchung eines Mehrmotorenkonzepts für Neufahrzeuge empfohlen, welches als hydrostatische oder dieselelektrische Variante ausgelegt werden kann.

Der Einsatz eines Brennstoffzellenhybrids verspricht keine direkten Emissionen sowie ein Dieseleinsparpotential von 100 %. Die Energiekosten ließen sich dabei um 22 % reduzieren.

5.2.2 Rangierverkehr

5.2.2.1 Mehrmotorenkonzept

Aufwand

In der Leistungsklasse der Am 843 sind Mehrmotorenkonzept-Fahrzeuge (z.B. Bombardier Traxx ME, Alstom H3) am Markt erhältlich. Auf die detaillierte Beschreibung des Aufwands wird daher verzichtet.

Erwartete Verbrauchseinsparung

Die Analyse der Fahrzyklen hat gezeigt, dass bei dem bisher eingesetzten Fahrzeug Am 843 mehr als 30% der Dieselbetriebszeiten nur geringe Leistungen zwischen 0- 250 kW abgegeben werden, wodurch der Dieselmotor häufig bei geringen Wirkungsgraden betrieben wird. Hieraus lässt sich ableiten, dass mit dem Mehrmotorenkonzept Einsparungen realisierbar sein sollten. Anhand der vorhandenen Daten ist jedoch keine Quantifizierung des Einsparpotentials möglich.

Fazit

Ist für ein Neufahrzeug weiterhin ein vollständig von der Oberleitung unabhängiger Betrieb gefordert, dann ist das Mehrmotorenkonzept eine vielversprechende Alternative zum klassischen Konzept mit einem Großdieselmotor. Für eine detaillierte Betrachtung sind weitere Analysen von Fahrzyklen notwendig, um eine realistische Aussage zum Einsparpotential machen zu können. Danach könnten die potentiellen Energieeinsparungen für den konkreten Einsatzfall den Anschaffungskosten einer Mehrmotorenlokomotive gegenübergestellt werden, um die Wirtschaftlichkeit zu ermitteln.

5.2.2.2 Zweikraft Oberleitung - Diesel

Aufwand

Für die technische Umsetzung eines Zweikraftantriebs ist der Aufbau eines Fahrzeugs mit einer elektrischen Leistungsübertragung erforderlich (ähnlich Eem 923: 1.500 kW am Rad elektrisch über OL bei vier Achsen, zwei Diesel-Gensets mit jeweils 360 kW). Für eine erste Abschätzung der technischen Machbarkeit wird geprüft, ob und welche Masserestriktionen vorliegen. Dafür wird eine Abschätzung der Massen und Kosten der wichtigsten Hauptkomponenten des Zweikraftantriebs vorgenommen (Tabelle 5.12).

Tabelle 5.12: Abschätzung Hauptkomponenten Zweikraftausrüstung Rangierlok

Komponente	Masse (kg)	Kosten (CHF)
<u>Elektrisches Antriebssystem (Basis Eem 923)</u>		
Stromabnehmer, Hauptschalter und Isolatoren	400	15.000
Transformator	3.950	60.000
Netz- und Antriebsstromrichter (2x)	1.900	200.000
Tatzlagergetriebe 4 Stück à 590 kg, 50 CHF/kW	2.360	75.000
Fahrmotoren jeweils 375 kW (4x), 0,35 kW/kg, 100 CHF/kW	4.290	150.000
<u>Dieselgeneratoren (Basis 2x Eem GenSet), 1000 ltr Kraftstofftank</u>		
2 x Diesel-GenSet inkl. Nebenaggregate (350 CHF/kW)	5.262	252.000
Kraftstofftank 1000l (gefüllt)	1.090	10.000
Abgasanlagen (2x)	204	40.000
Partikelfilter (2x), Ansatz 1 kg/kW DM-Leistung	720	50.000
Summe	20.176	852.000

Erwartete Energieeinsparung

Der mittlere Jahresdieselvebrauch eines Bestandsfahrzeugs im Rangierverkehr beträgt 84.375 l; bei einer Fahrzeuglebensdauer von 25 Jahren ergeben sich daraus Kraftstoffkosten in Höhen von ~5.440.000 CHF. Da der Anteil der elektrifizierten Strecken bei den verschiedenen Rangierbahnhöfen nicht bekannt ist, werden im Folgenden drei Varianten betrachtet:

1. 30% des Energiebedarfs werden durch OL gedeckt
2. 60% des Energiebedarfs werden durch OL gedeckt
3. 90% des Energiebedarfs werden durch OL gedeckt

Die Einsparpotentiale werden für einen energetisch eher ungünstigen Fall ermittelt, d.h. es werden konservative Annahmen für die mittleren Wirkungsgrade der elektrischen Komponenten und optimistische Annahmen für die Wirkungsgrade des Dieselmotors und der hydrodynamischen Leistungsübertragung angesetzt (können dem Zusatzbericht entnommen werden). Weiterhin wird das Potential für Energierückspeisung im OL-Betrieb nicht betrachtet. Die resultierenden Kosten- und Energieeinsparpotentiale zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 5.13: Abschätzung der Einsparpotentiale OL-D-Verkehr / Rangierverkehr

Energiekosten Am 843 für OL-D-Antrieb

Ansatz: konservative Abschätzung der Mindesteinsparung

Reale Einsparung sollte größer sein, da mittlere Wirkungsgrade von DM und hydrodyn. LÜ optimistisch angesetzt sind und Rekuperation im E-Betrieb nicht betrachtet wird.

durchschnittlicher Dieserverbrauch/d [l]	281,3			
Dieselpreis [CHF/l]	2,58			
Einsatztage / a	300			
Einsatzjahre	25			
Dieselskosten über Einsatzjahre [CHF]	5.442.188			
CO2 Ausstoß über Einsatzjahre [t]	5.515			
Traktionsenergiebedarf am Rad [kWh/d]	801			
Traktionsenergiebedarf am Rad [kWh/25a]	6.005.180			
Energiebedarf OL (bei 100% OL-Fahrt) [kWh/25a]	8.237.558			
Energiebedarfsdeckung durch OL:	30%	60%	90%	
Reduzierung Dieserverbrauch / d [l]	84,4	168,8	253,1	
Reduzierung Dieserverbrauch / 25a [l]	632.813	1.265.625	1.898.438	
Dieselskosteneinsparung über Lebensdauer [CHF]	1.632.656	3.265.313	4.897.969	
CO2 Einsparung über Einsatzjahre [t]	1.654	3.309	4.963	
Berechnungen:				
Energiebedarf ab OL [kWh/25a]	2.471.267	4.942.535	7.413.802	
Energiekosten elektrisch [CHF/25 Jahre]	370.690	741.380	1.112.070	
Gesamtenergiekosten über Einsatzjahre [CHF]	4.180.221	2.918.255	1.656.289	
Gesamteinsparung Energiekosten [CHF]	1.261.966	2.523.932	3.785.898	

Fazit

Die Massenabschätzung im Vergleich zum Bestandsfahrzeug zeigt ein Potential zur Reduzierung des Antriebssystemgewichts. Die konservativ berechneten Energiekosten-Einsparpotentiale zeigen, dass sich je nach Anteil der OL-Verfügbarkeit die Energiekosten über die Lebensdauer des Fahrzeugs zwischen 1,25 Millionen CHF und 3,8 Millionen CHF reduzieren lassen. Unter der Annahme, dass ein Zweikraftfahrzeug ca. 50 % teurer (Mehrkosten von 1.250 TCHF bei einem Beschaffungspreis von 2.500 TCHF) ist als ein dieselhydraulisches Fahrzeug, ergibt sich schon bei 30% Energiebezug aus der Oberleitung eine Amortisation der Ausrüstungsmehrkosten durch die Energiekosteneinsparung. Damit ist in den drei betrachteten Fällen der Zweikraft-OL-Dieselantrieb wirtschaftlich.

Für Neufahrzeuge wird daher eine detaillierte Betrachtung dieser Option empfohlen.

5.2.2.3 *Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher*

Aufwand

Analog zur Auslegung des Zweikraftfahrzeugs Diesel-OL wird der elektrische Teil des Antriebssystems basierend auf den Kennwerten der Eem 923 ausgelegt. Tabelle 5.14 zeigt die Auslegung dieser Komponenten. Anstelle der Dieselmotoren sieht das Konzept ein Batteriesystem mit einer Leistung von ebenfalls 680 kW vor.

Tabelle 5.14: Komponentenmassen des elektrischen Antriebssystems

Komponente	Masse (kg)	Kosten (CHF)
<u>Elektrisches Antriebssystem (Basis Eem 923)</u>		
Stromabnehmer, Hauptschalter und Isolatoren	400	15.000
Transformator	3.950	60.000
Netz- und Antriebsstromrichter (2x)	1900	200.000
Tatzlagergetriebe 4 Stück à 590 kg, 50 CHF/kW	2.360	75.000
Fahrmotoren jeweils 375 kW (4x), 0,35 kW/kg, 100 CHF/kW	4.300	150.000
Summe	12.910	500.000

Erwartete Energieeinsparung

Analog zur Berechnung der Einsparpotentiale des Zweikraftfahrzeugs Diesel-OL wird in Tabelle 5.15 eine Energiebedarfsdeckung durch die Oberleitung von 30, 60 und 90 % angenommen. Die entsprechenden Annahmen können dem Zusatzbericht entnommen werden.

Tabelle 5.15: Abschätzung der Einsparpotentiale OL-E-Verkehr / Rangierlok

Mittlerer Strompreis 2020 - 2045 [CHF/kWh]	0,15
durchschnittlicher Dieselverbrauch/d [l]	281,3
Dieselpreis [CHF/l]	2,58
Einsatztage / a	300
Einsatzjahre	25
Dieselskosten über Einsatzjahre [CHF]	5.442.188

Berechnung Energiebedarfe:

Traktionsenergiebedarf am Rad [kWh/d]	801		
Traktionsenergiebedarf am Rad [kWh/25a]	6.005.180		
Energiebedarf OL (bei 100% OL-Fahrt) [kWh/25a]	8.214.739		
Energiebedarfsdeckung durch OL:	30%	60%	90%
Energiebedarf aus Batterie am Rad [kWh/d]	560	320	80
Energiebedarf Batterie [kWh/d]	672	384	96
Ladeenergie Batterie ab OL [kWh/d]	807	461	115

Bewertung alternativer Antriebskonzepte

Einsparpotentiale:

Energiebedarf ab OL [kWh/25a]	8.513.408	8.385.407	8.257.406
Energiekosten elektrisch [CHF/25 Jahre]	1.277.011	1.257.811	1.238.611
<u>Gesamteinsparung Energiekosten [CHF]</u>	<u>4.165.176</u>	<u>4.184.376</u>	<u>4.203.577</u>

Batterieauslegung (worst case ohne Zwischenladen):

Gesamtkapazität Batterie [kWh]	840	480	120
Batteriemasse (Energieauslegung) [kg]	8.404	4.802	1.201
Batteriemasse (Leistungsauslegung) [kg]	678	678	678
==> Energieauslegung erforderlich			
Kosten Batterie [CHF]	1.260.647	720.369	180.092
Vergleich: Kosten bei Leistungsauslegung [CHF]	101.754	101.754	101.754

Fazit

Die Massenabschätzung zeigt im Vergleich zum Bestandsfahrzeug ein Potential zur Reduzierung des Antriebssystemgewichts. Die konservativ berechneten Energiekosten-Einsparpotentiale zeigen, dass sich die Energiekosten über die Lebensdauer des Fahrzeugs in den drei Auslegungsvarianten jeweils um rund 4,2 Millionen CHF reduzieren lassen. Dabei sind mögliche Erträge durch Rückspeisung im Oberleitungsbetrieb nicht berücksichtigt. Dem gegenüber stehen die Beschaffungskosten des Batteriesystems (ohne Berücksichtigung von Tauschintervallen), welche sich für die drei Auslegungsvarianten stark unterscheiden und zwischen 0,2 und 1,3 Millionen CHF betragen. Durch die Umstellung auf einen rein elektrischen Antrieb entstehen keine direkten CO₂-Emissionen.

Die kalendarische Lebensdauer eines NMC-Batteriesystems wird mit ~5 Jahren angegeben. Durch die Energiekosteneinsparungen wäre ein Tauschintervall von 8 Jahren möglich.

Die berechneten Batteriegrößen und – kosten stellen Abschätzungen des schlechtesten Einsatzszenarios dar. Eine detaillierte Auslegung mit Berücksichtigung von Bremsenergierekuperation und Zwischenladung unter OL würde zu deutlicher Reduzierung der Batteriekapazität und damit der Kosten führen.

Hierzu wären weitere Messdaten erforderlich, die auch Aussagen über die Oberleitungsverfügbarkeit erlauben. Für eine konkrete Auslegung des Batteriesystems sollten zunächst Gespräche mit Batterieherstellern geführt werden, die auf Basis von Lastprofilen, Lebensdauieranforderungen und weiteren Randbedingungen eine Batterieauslegung inklusive Wartungs- und Austauschintervallen durchführen können.

Ob der Zweikraft-OL-Energiespeicherantrieb im Rangierverkehr letztendlich wirtschaftlich ist, hängt maßgeblich von der Dimensionierung und Lebensdauer der Batteriespeicher ab. Für Neufahrzeuge wird daher eine detailliertere Betrachtung dieser Option empfohlen.

5.2.2.4 *Energiespeicherantrieb*

Aufwand

Ausgehend von einem durchschnittlichen Dieserverbrauch von 281,3 l/d bei reinem Rangierdienst ergibt sich ein benötigter Traktionsenergiebedarf von 772 kWh/d am Rad. Bei einem nutzbaren SOC von 80 % der Batterie ergibt sich eine installierte Gesamtkapazität von 1188 kWh.

Für eine erste Abschätzung der technischen Machbarkeit wird geprüft, ob und welche Masserestriktionen vorliegen. Dafür wird eine Abschätzung der Massen der Hauptkomponenten eines Energiespeicherantriebs getroffen (Tabelle 5.16). Es werden vereinfachend alle Komponenten auf eine Nennleistung von 1.500 kW dimensioniert (analog der Leistung des Dieselmotors des Bestandsfahrzeugs).

Tabelle 5.16: Masse der Hauptkomponenten eines Energiespeicherantriebs für Am 843 bei Dimensionierung auf 1500 kW Nennleistung

Komponente	Masse [kg]	Kosten [TCHF]	Annahmen
Batteriesystem	11.879	1.782	1188 kWh, 100 Wh/kg, 1.500 CHF/kWh
Antriebsstromrichter	1.700	225	Masse geschätzt, 150 CHF/kW
Fahrmotoren	4.300	150	4 Fahrmotoren á 375 kW, 100 CHF/kW
Radsatzgetriebe	2.360	75	Tatzlagergetriebe wie in Eem 923, 4 Stück á 590 kg,
Summe	20.239	2.232	

Ein Vergleich der Reichweite (Tabelle 5.17) auf Grundlage des ausgewerteten Fahrprofils zeigt, dass sich bei einer Batterielok eine deutliche Einschränkung der betrieblichen Flexibilität im Vergleich zu einer Dieselrangierlok ergibt, da der Energiespeicherantrieb nur auf 9 h Betriebsdauer ausgelegt ist und täglich geladen werden muss. Bei einer täglichen Einsatzdauer von 9 h könnte das umsetzbar sein, jedoch wäre ein Mehrschichtbetrieb mit dieser Lok nicht mehr ohne weiteres möglich.

Tabelle 5.17: Vergleich Antriebs- und Energiespeichersystem batterieelektrisch vs. dieselhydraulisch (107)

Am 843-Antriebsalternativen	Masse [kg]	Kosten [TCHF]	Reichweite (Tage)
Dieselhydraulisch	28.335	2.500 (gesamte Lok)	12,8
Batterieelektrisch (Antrieb u. Speicher)	20.239	2.232	1,0

Das Laden des Energiespeichers ist generell eine Herausforderung, für deren Lösung verschiedene Alternativen bestehen, z.B. könnte die Batterie durch eine stationäre elektrische Zugvorheizanlage geladen werden. Üblicherweise sind hier Ladeleistungen von bis zu 250 kW möglich, welches ein Laden der oben ausgelegten Batterie in etwa 5 h ermöglichen würde. (108) Ein weiteres Konzept zur Ladung der Batterie stellt ein auf der Lok installiertes Ladegerät mit

OL-Anschluss dar, wobei hier der Grundgedanke des Zweikraftfahrzeugs aufgenommen wird und als sinnvoller erscheint.

Risiken:

- Batterietauschintervalle unbekannt

Fazit

Den Erst-Beschaffungskosten der Hauptkomponenten von 2.232 TCHF steht eine Gesamteinsparung der Energiekosten von ~4.400 TCHF gegenüber. Hierzu kommen weitere Kosten für den regelmäßigen Batterietausch, die aufgrund des unbekannten Tauschintervalls nicht beziffert werden können. Typische Obergrenze ist jedoch ein Austauschintervall von maximal 10 Jahren, womit für zwei weitere Batteriesätze ~3.400 TCHF weitere Kosten anfallen. Unter diesen Annahmen ist der Energiespeicherantrieb nicht wirtschaftlich.

Aufgrund der im Vergleich zum Zweikraftantrieb OL-Energiespeicher sehr hohen Beschaffungskosten und der betrieblichen Einschränkungen, die durch das Laden entstehen, ist ein reiner Energiespeicherantrieb nicht für die geforderten Einsatzbedingungen geeignet. Nicht zuletzt aufgrund des hohen Elektrifizierungsgrads der Schweizer Rangierbahnhöfe bestehen keine Vorteile gegenüber einem Zweikraftfahrzeug OL-Energiespeicher oder OL-Diesel.

5.2.2.5 Brennstoffzellenhybrid

Aufwand

Die technische Grobauslegung (Annahmen können dem Zusatzbericht entnommen werden) eines Brennstoffzellenantriebs (Tabelle 5.18) geht von 1.170 kW max. Leistung am Rad und einem mittleren Tagesenergiebedarf am Rad von 475 kWh aus. Dabei wird die Brennstoffzelle auf die größte mittlere Leistung von 42 kW ausgelegt. Analog zur Grobauslegung eines Brennstoffzellensystems werden die gleichen Randbedingungen berücksichtigt.

Tabelle 5.18: Grobauslegung (worst case) Brennstoffzellenantrieb Rangierverkehr

Randbedingungen Auslegung

Max. Leistung am Rad [kW]	1170
Mittlere Leistung am Rad [kW]	42
Mittlerer Tagesenergiebedarf am Rad [kWh]	475
Betriebsdauer zwischen zwei H ₂ -Tankungen [Tage]	7

Brennstoffzellen-Auslegung

Brennstoffzellenleistung elektrisch [kW]	50
Mittlerer Tagesenergiebedarf BZ elektrisch [kWh]	596
Tagesbedarf Wasserstoff [kg]	40,2
Notwendige Wasserstoffmasse für Tankintervall [kg]	281
BZ-Masse [kg]	140
BZ-Volumen [dm ³]	150
BZ-Kosten [CHF]	60150

Wasserstoff-Drucktank-Auslegung

Tankmasse inkl. Wasserstoff-Füllung [kg]	5293
Tankvolumen [dm ³]	15442
Kosten [CHF]	474588

Batterie-Auslegung

Batterieleistung entladen [kW]	1319
Batteriemasse [kg]	1319
Batterievolumen [dm ³]	1807
Batteriekapazität [kWh]	131,9
Batteriekosten [CHF]	197895

DC/DC-Wandler-Auslegung

Masse [kg]	10,4
Volumen [dm ³]	6,3
Kosten [CHF]	12030

Fahrmotoren, Antriebsstromrichter, Radsatzgetriebe

Masse Fahrmotoren [kg]	5082
Masse Antriebsstromrichter [kg]	2488
Masse Radsatzgetriebe [kg]	1255
Kosten Fahrmotoren [CHF]	130000
Kosten Antriebsstromrichter [CHF]	182456
Kosten Radsatzgetriebe [CHF]	58500

Zusammenfassung Masse und Kosten der Systemkomponenten

BZ, Batterie, DC/DC-Wandler, Fahrmotoren, Stromrichter und Radsatzgetriebe

Gesamtmasse [kg]	15589
------------------	-------

Gesamt-Komponentenkosten [CHF]	1115619
--------------------------------	---------

Wasserstoffkosten vs. Dieselkosten

Jahresbedarf Wasserstoff [kg]	12047
-------------------------------	-------

Mittlerer Wasserstoffpreis 2020 - 2045 [CHF/kg]	14,19
---	-------

Einsatzdauer [a]	25
------------------	----

Wasserstoffkosten über Lebensdauer [CHF]	4273753
--	---------

Vergleichskosten Diesel über Lebensdauer [CHF]	5442188
--	---------

Resultierende Energiekosteneinsparung [CHF]	1168435
---	---------

Fazit

Zunächst zeigt sich, dass mit einem Brennstoffzellenhybrid eine Einsparung der Energiekosten von etwa 1.200 TCHF erzielt werden kann und sich zudem die Möglichkeit bietet, eine direkte CO₂-Emissionsreduzierung von 100 % zu erreichen. Weiterhin gewährleistet dieses Antriebskonzept einen autarken Betrieb auf Rangierbahnhöfen mit einem geringen Anteil der Oberleitungsverfügbarkeit. Durch die Grobauslegung hat sich ergeben, dass keine signifikanten Unterschiede durch die Komponentenmassen entstehen. Hierbei ist die Möglichkeit der Rekuperation noch nicht berücksichtigt, wodurch eine Verkleinerung der Batterie möglich ist.

Aufgrund der hohen Investitionskosten von ca. 1,1 Millionen CHF für das Antriebssystem und den notwendigen Investitionskosten für den Aufbau der Betankungsinfrastruktur wird eine weitere Untersuchung nur empfohlen, wenn ein Schwerpunkt auf CO₂-freien autarken Betrieb gelegt wird.

5.2.2.6 Zusammenfassung

Basierend auf den in Kapitel 5 durchgeführten Analysen und Bewertungen alternativer Antriebskonzepte für Bestands- und Neufahrzeuge stellt Tabelle 5.19 die vielversprechendsten Konzepte für den Einsatz im Rangierverkehr gegenüber.

Tabelle 5.19: Zusammenfassung Rangierverkehr-Optionen

	Erstausrüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO ₂ -Emissionen je Fahrzeug über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
	[TCHF]	Dieselbedarf [m ³]	Energie- kosten [TCHF]	CO ₂ [t]	
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 Rangierbahnhof-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 möglich, keine direkten Emissionen, leiser Betrieb (Nachteinsätze, Tunnel) --> für autarken, emissionsfreien Betrieb

* Kosten Antriebs-Hauptkomponenten und Speicher je Fahrzeug ** bei 60 % Energieinhalt aus Fahrdrabt

Eine Umstellung auf alternative Kraftstoffe ermöglicht prinzipiell die Erhaltung von bestehenden Antriebsstrukturen. Dabei sind die reinen Verbrauchskosten und direkten CO₂-Emissionen je nach verwendetem Kraftstoff meist geringer als bei konventionellem Diesel.

Das Konzept eines Zweikraftantriebes zeigt im Einsatzzweck Rangierverkehr ein hohes Potential zur Einsparung von Dieseldieselkraftstoff und -kosten. Da der Anteil der elektrifizierten Strecken nicht bekannt ist, wurden drei Varianten eines Elektrifizierungsgrades untersucht. Dargestellt für die Kombination aus OL und Diesel sind die Ergebnisse für die Deckung von 60 % des Energiebedarfs aus der Oberleitung, welche entsprechend einer OL-Verfügbarkeit variieren. Im abgebildeten Fall ergibt sich eine Reduzierung des Dieselbedarfs um 1.266.000 l über die Lebensdauer des Fahrzeugs, welches einem Kosteneinsparpotential von 46 % entspricht.

Der Einsatz eines Zweikraft OL-Energiespeicher-Antriebs bzw. eines Brennstoffzellenhybrids verspricht keine direkten Emissionen sowie ein Dieseleinsparpotential von 100 %. Die Energiekosten ließen sich dabei um 71 % bzw. 21 % reduzieren.

5.2.3 Einzelwagenladungsverkehr

5.2.3.1 *Mehrmotorenkonzept*

Fazit

Da der Betrieb im Einzelwagenladungsverkehr zu einem sehr großen Teil unter Oberleitung erfolgt, ist ein Fahrzeug mit mehreren Dieselmotoren aus ökonomischer und ökologischer Sicht ungeeignet. Diese Aussage gilt jedoch nicht, wenn der fahrdrahtlose Betrieb im Vordergrund steht, z.B. im fahrdrahtlosen schweren Rangierverkehr.

5.2.3.2 *Zweikraft Oberleitung - Diesel*

Fazit

Das Konzept ist bereits umgesetzt und ermöglicht eine hohe Flexibilität bei geringem CO₂-Ausstoss und geringen Energiekosten.

5.2.3.3 *Zweikraft Oberleitung - Energiespeicher*

Fazit

Das Konzept wurde bereits für Bestandsfahrzeug untersucht (vgl. Kapitel 5.1.3.2) und hat Potential, da die CO₂ Bilanz gegenüber der Diesel-Zweikraft besser ausfällt und die Energiekosten reduziert werden können.

Da Energiespeicher einen geringeren Reifegrad als Verbrennungsmotor und Generator aufweisen, wird empfohlen, dieses Antriebskonzept zunächst anhand eines Bestandsfahrzeugs Eem 923 weiter zu entwickeln. Dabei ist auch eine prototypische Realisierung z.B. mit der einfacher umzusetzenden Variante mit DC/DC-Wandler denkbar. Aufbauend auf diesen Erfahrungen kann dann die Auslegung eines Neufahrzeugs erfolgen.

5.2.3.4 *Energiespeicherantrieb*

Fazit

Da der Betrieb im Einzelwagenladungsverkehr zu einem sehr großen Teil unter Oberleitung erfolgt, ist ein Fahrzeug mit Energiespeicher aber ohne Oberleitungsversorgung aus ökonomischer und betrieblicher Sicht ungeeignet.

5.2.3.5 *Brennstoffzellenhybrid*

Fazit

Da der Betrieb im Einzelwagenladungsverkehr zu einem sehr großen Teil unter Oberleitung erfolgt, ist ein Fahrzeug mit Brennstoffzellenhybridantrieb, aber ohne Oberleitungsversorgung aus ökonomischer und betrieblicher Sicht ungeeignet.

5.2.3.6 *Zusammenfassung*

Basierend auf den in Kapitel 5 durchgeführten Analysen und Bewertungen alternativer Antriebskonzepte für Bestands- und Neufahrzeuge, stellt Tabelle 5.20 die vielversprechendsten Konzepte für den Einsatz im Einzelwagenladungsverkehr gegenüber.

Tabelle 5.20: Zusammenfassung EWLK-Optionen

	Erstausrüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO ₂ -Emissionen je Fahrzeug über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
	[TCHF]	Dieselbedarf [m ³]	Energie- kosten [TCHF]**	CO ₂ [t]	
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

* Kosten Antriebs-Hauptkomponenten und Speicher je Fahrzeug ** nur Diesel- bzw Batteriebetrieb

Eine Umstellung auf alternative Kraftstoffe ermöglicht prinzipiell die Erhaltung von bestehenden Antriebsstrukturen. Dabei sind die reinen Verbrauchskosten

und direkten CO₂-Emissionen je nach verwendetem Kraftstoff meist geringer als bei konventionellem Diesel.

Im Einzelwagenladungsverkehr ergab sich, dass das Konzept eines Zweikraft OL-Energiespeicherantriebs als zielführende Variante in Bezug auf das Einsparpotential von Energie und Kosten. Durch den vollständigen Verzicht des Dieselmotors ließen sich entsprechend 100 % des Dieselenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen sowie 77 % der Energiekosten einsparen.

5.2.4 Lösch- und Rettungsdienst

5.2.4.1 Effizienzsteigerung durch Getriebetausch

Fazit

Anhand der für das Bestandsfahrzeug durchgeführten Bewertung (vgl. Kapitel 5.1.4.4) wird empfohlen, bei Neufahrzeugen hydromechanische Getriebe einzusetzen und die damit verbundenen Massen- und Effizienzvorteile gegenüber den bisher verwendeten hydrodynamischen Getrieben zu nutzen.

5.2.4.2 Parallelhybrid elektrisch

Fazit

Aufbauend auf der Analyse des Bestandsfahrzeuges wird empfohlen, bei Neufahrzeugen auf Basis konkreter Fahrprofile die realisierbare Kraftstoffeinsparung zu berechnen und diese den vom Lieferanten anzugebenden Mehrkosten für die Hybridisierung gegenüberzustellen.

5.2.4.3 Mehrmotorenkonzept

Fazit

Das im Bestandsfahrzeug eingesetzte Antriebskonzept mit vier Powerpacks ist bereits ein Mehrmotorenkonzept. Für ein Neufahrzeug sollte es dahingehend verbessert werden, dass effiziente Getriebe verwendet und eine Dieselmotor-Start-Stop-Funktion im Betrieb bei mittleren und geringen Lasten konsequent umgesetzt wird.

5.2.4.4 *Zweikraft OL – Diesel und OL - Energiespeicher*

Fazit

In beiden Fällen ist der autarke Betrieb des LRZ nicht über längere Dauer zu gewährleisten. Die notwendige Mehrfachinstallation von Antriebsleistung führt zu größerer Masse des Antriebssystems und geringerer Nutz- bzw. Aufbaulast. Basierend auf den vergleichbaren Berechnungen für die anderen Referenzfahrzeuge kann für das LRZ abgeleitet werden, dass Zweikraftantriebe nicht geeignet sind.

5.2.4.5 *Energiespeicherantrieb*

Fazit

Durch einen Energiespeicherantrieb ist der geforderte autarke Betrieb des LRZ nicht weiter möglich. Daher ist ein reiner Energiespeicherantrieb nicht geeignet.

5.2.4.6 *Brennstoffzellenhybrid*

Fazit

Aufgrund des derzeitigen Reifegrads von Brennstoffzellen-Hybridantrieben wird empfohlen, zunächst Erfahrungen mit Erprobungsträgern zu sammeln. Aufgrund der hohen Fahrzeugkosten und der erforderlichen Verfügbarkeit trotz langer Standzeiten ist ein LRZ als Erprobungsträger nicht geeignet.

5.2.4.7 *Zusammenfassung*

Basierend auf den in Kapitel 5 durchgeführten Analysen und Bewertungen alternativer Antriebskonzepte für Bestands- und Neufahrzeuge, stellt Tabelle 5.21 die vielversprechendsten Konzepte für den Interventions-Einsatz gegenüber.

Tabelle 5.21: Zusammenfassung Intervention-, LRZ-Optionen

	Erstausrüstungs- kosten*	Energiebedarf, -kosten, CO ₂ -Emissionen je Fahrzeug über 25 Jahre			Einschätzung, nächste Schritte
	[TCHF]	Dieselbedarf [m ³]	Energie- kosten [TCHF]	CO ₂ [t]	
Status quo	?	1.500	3.870	3.992	
Alternative Kraftstoffe	?	?	?	?	--> Flottenstrategie erarbeiten
Effizienzsteigerung Getriebe	?	1.225 (-225) -15%*	3.289 (581) -15%*	3.404 (-588) -15%*	Massen- und Investitionskostenvorteile, --> Einsatz für Bestands- und Neufahrzeuge anstreben
Abwärmee-nutzung	?	?	?	?	Keine Leistungsverläufe vorhanden --> Potentialeinschätzung anhand von detaillierten Messdaten (Abgastemperaturen, Abgasmassenströme)
Hybridisierung	~ 4*200 zusätzlich	?	?	?	Rekuperationspotential unbekannt, hohe Investitionskosten, Amortisation unklar --> Datengrundlage verbessern

* Literaturwert, da keine Leistungsverläufe vorhanden

Eine Umstellung auf alternative Kraftstoffe ermöglicht prinzipiell die Erhaltung von bestehenden Antriebsstrukturen. Dabei sind die reinen Verbrauchskosten und direkten CO₂-Emissionen je nach verwendetem Kraftstoff meist geringer als bei konventionellem Diesel.

Der Austausch hydrodynamischer durch hydromechanische Getriebe bei Bestandsfahrzeugen ergibt im Mittel eine Dieselmotorkraftstoffeinsparung von 225.000 l über die Lebensdauer des Fahrzeuges. Dies entspricht einem Einsparpotential der Energiekosten sowie der CO₂-Emissionen von 15 %.

Auf Grundlage der vorliegenden Daten lässt sich für den LRZ keine qualifizierte Aussage zur Bewertung der Abgaswärmenutzung ableiten. Es lässt sich jedoch qualitativ einschätzen, dass aufgrund der häufigen Fahrten mit hoher Leistung Potentiale zur Abgaswärmenutzung vorhanden sind.

Auf Basis konkreter Fahrprofile wird empfohlen, die realisierbare Kraftstoffeinsparung zu berechnen und diese den vom Lieferanten anzugebenden Mehrkosten für die Hybridisierung gegenüberzustellen

6 Empfehlungen für eine detaillierte Betrachtung und mögliche Pilotversuche

In dieser Studie wurden alternative Antriebskonzepte für dieselbetriebene Fahrzeuge der SBB analysiert und für die charakteristischen Einsatzprofile der SBB-Fahrzeuge vielversprechende Konzepte identifiziert. Im Folgenden werden Empfehlungen für die tiefergehende technische Betrachtung und prototypische Umsetzung im Rahmen von möglichen Folgeprojekten diskutiert. Nicht weiter betrachtet werden die Abgaswärmenutzung, der hydraulische Hybrid und der Energiespeicherantrieb, da mit den getroffenen Annahmen durch den Einsatz dieser Konzepte in den gegebenen Betriebsszenarien keine signifikanten Kraftstoff- oder CO₂-Einsparungen zu erwarten sind.

6.1 Alternative Kraftstoffe

Wie sich in der Betrachtung der alternativen Kraftstoffe gezeigt hat, sind die reinen Verbrauchskosten und die direkten CO₂-Emissionen meist geringer (vgl. Abbildung 6.2) als bei der Verwendung von konventionellem Diesel. Erdgas und Flüssiggas bieten im Vergleich das größte Kraftstoffkosteneinsparpotential. Biodiesel und biomassebasierter synthetischer Kraftstoff (BtL) stellen unter der Prämisse, dass eine komplette Mineralölsteuerbefreiung nach der TrÖbiV erreicht werden kann, ebenfalls eine Kostenreduzierung in Aussicht. Aus Erdgas gewonnener synthetischer Kraftstoff (GtL) ist hingegen derzeit wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig gegenüber konventionellem Diesel. In Abbildung 6.1 ist das Kraftstoffeinsparpotential der Flotte der in dieser Studie untersuchten Fahrzeuge dargestellt. Dabei wird für die Am 843 angenommen, dass diese jeweils zu 50 % im Rangierverkehr (RV) und im Einzelwagenladungsverkehr (EWLV) eingesetzt wird. Beim LRZ wird ein Verbrauch von 2,9 bis 3,7 l / km berücksichtigt, woraus sich ein mittlerer jährlicher Dieserverbrauch von 52.500 - 67.500 l ergibt. Für die weiteren Darstellungen wird der Mittelwert von 60.000 l angenommen.

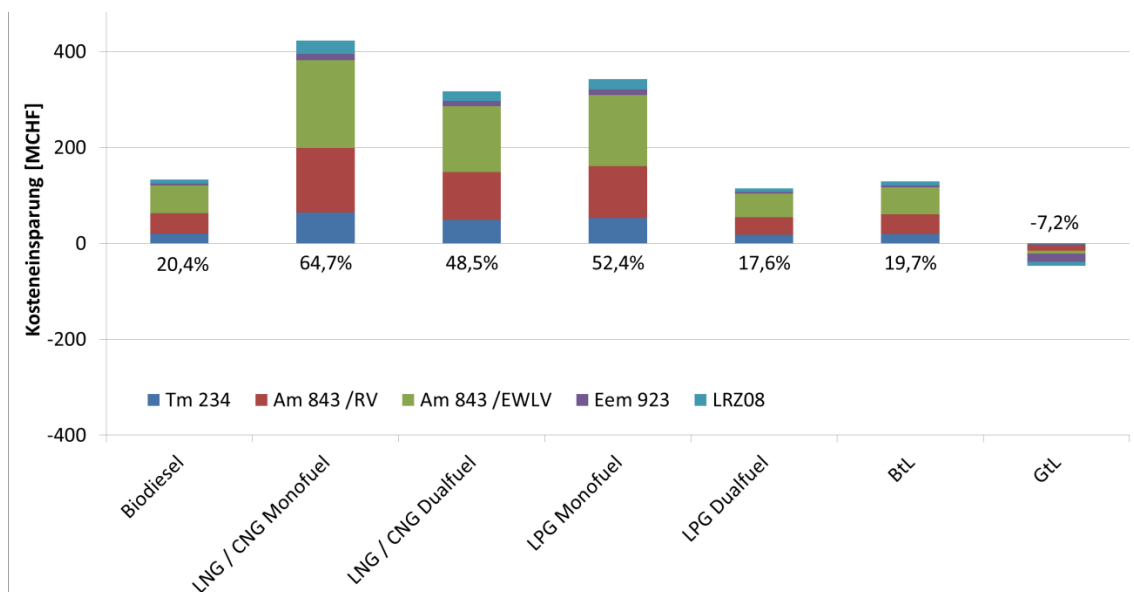


Abbildung 6.1: Kraftstoffkosteneinsparung der betrachteten Flotte gegenüber. Diesel über Lebensdauer

Die errechneten Einsparungen in Abbildung 6.1 basieren auf den in Kapitel 2 dargelegten Annahmen zu Kraftstoffpreisen. Bei einer Betrachtung über die Lebensdauer der Fahrzeuge (25-30 Jahre) ist die weitere Entwicklung der Energiepreise naturgemäß unsicher und damit auch die Höhe der resultierenden Einsparungen.

Ein Vorteil der Umstellung auf alternative Kraftstoffe ist, dass die bekannten Antriebsstrangstrukturen und die Leistungscharakteristik der Fahrzeuge prinzipiell erhalten bleiben (eine Ausnahme bildet das brennstoffzellengetriebene Wasserstofffahrzeug). Insbesondere bei gasförmigen Kraftstoffen ist allerdings mit einem größeren Bauraumbedarf für die Kraftstofftanks oder einer geringeren Reichweite pro Tankfüllung zu rechnen.

Der Umstieg auf einen alternativen Kraftstoff stellt eine weitreichende Entscheidung dar. Für eine Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen wird daher empfohlen, zunächst die Investitionskosten für die Anpassung der Energieversorgungsinfrastruktur detailliert zu untersuchen. Diese könnten durch das hohe Kraftstoffkosteneinsparpotential der Erdgas- und Flüssiggasfahrzeugen amortisiert werden (im Falle der Nutzung einer Tankstelle durch mehrere Fahrzeuge). Weiterhin ist zu prüfen, ob auf Insellösungen z.B. an einzelnen Rangierbahnhö-

fen oder aber auf die flächendeckende Einführung im Rahmen einer langfristigen Kraftstoffstrategie abgezielt wird. Insellösungen bieten die Möglichkeit, zunächst in kleinem Umfang Versuche mit einzelnen Fahrzeugen und unterschiedlichen Kraftstoffen durchzuführen, um für eine langfristige Strategie notwendige Erfahrungen zu sammeln.

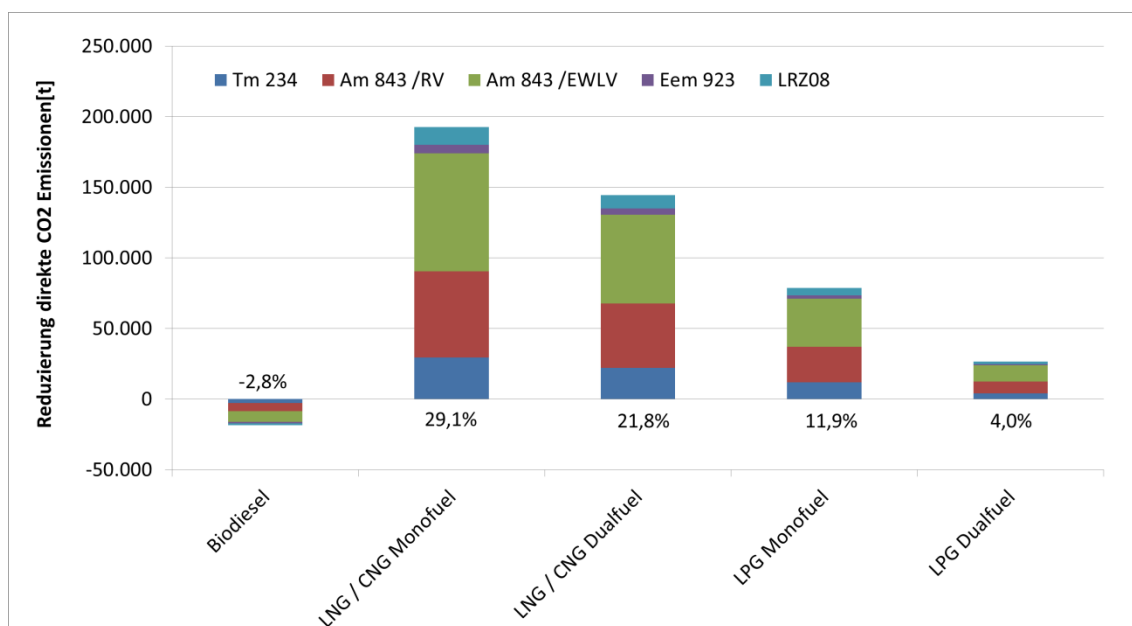


Abbildung 6.2: Reduzierung direkte CO₂-Emissionen der betrachteten Flotte ggü. Diesel über Lebensdauer

6.2 Parallelhybrid elektrisch

Die Umsetzung des Konzepts eines elektrischen Parallelhybrids, welches am Markt durch mehrere Hersteller angeboten wird, ist in dieser Studie bei Bestandsfahrzeugen der Am 843 und des LRZ 08 betrachtet worden. Aufgrund von Masserestriktionen ist dieses Konzept im Falle der Am 843 nicht zu realisieren.

Eine Hybridisierung des LRZ wird aufgrund der geringen Fahrleistungen kaum rentabel umsetzbar sein. Dennoch wird empfohlen, bei Neufahrzeugen auf Basis konkreter Fahrprofile die realisierbare Kraftstoffeinsparung zu berechnen

und diese den vom Lieferanten anzugebenden Mehrkosten für die Hybridisierung gegenüberzustellen.

6.3 Mehrmotorenkonzept

Das Konzept der Mehrmotorentechnologie ist ebenfalls am Markt verfügbar. Bei den hier untersuchten Fahrzeugklassen wurde im Vergleich zu den Zweikraftfahrzeugen ein geringeres Potential zur Reduzierung von CO₂ und Verbrauchskosten ermittelt. Allerdings empfiehlt sich das Mehrmotorenkonzept sehr gut für Fahrzeuge, bei denen ein autarker Betrieb mit hoher Antriebsleistung gefordert ist. Da der LRZ zwar kein klassisches Mehrmotorenkonzept ist, aber mehrere Dieselmotoren installiert sind, wird eine detaillierte Betrachtung der Betriebsstrategie und Motor Start-Stop-Funktion sowohl im Bestands- als auch für Neufahrzeuge empfohlen. Das Baudienstfahrzeug Tm 234 verfügt ebenfalls bereits über einen zweiten Dieselmotor. Hier wird die Umsetzung einer Start-Stop-Funktion für den Hauptdiesel zur Vermeidung des Leerlaufverbrauchs empfohlen.

6.4 Zweikraft OL-Diesel

Die Betrachtung eines Zweikraftantriebes (Oberleitung - Diesel) hat gezeigt, dass hier im Vergleich zu einem Zweikraftantrieb mit Energiespeicher mit geringeren Investitionskosten, aber auch geringerem CO₂-Einsparpotential zu rechnen ist. Eine detaillierte Betrachtung wird besonders für Neufahrzeuge im Rangierverkehr empfohlen, da hier ein großes Potential zur Einsparung von Energiekosten und zur Reduktion von CO₂-Emissionen besteht.

6.5 Zweikraft OL-Energiespeicher

Ein Zweikraftantrieb (Oberleitung - Energiespeicher) bietet im Vergleich zum Oberleitung-Diesel-Zweikraftantrieb ein großes Einsparpotential an CO₂-Emissionen und Energiekosten. Allerdings ist hier mit vergleichsweise hohen Investitionskosten zu rechnen. Unsicherheiten existieren bei der zukünftigen Entwicklung der Batteriepreise. Technisch-betrieblich ergibt sich allerdings der Vorteil, dass im Betrieb ohne Fahrleitung eine größere Leistung am Rad als bei

Zweikraft Diesel-OL realisierbar ist. Daher wird insbesondere für Fahrzeuge im Rangierverkehr eine detaillierte Untersuchung empfohlen. Hierbei sind anhand von Leistungsverläufen Nachlademöglichkeiten im laufenden Betrieb unter OL und durch Rekuperation zu prüfen, was zu einer deutlichen Reduzierung der Batteriegröße führen wird. Durch Gespräche mit Batterieherstellern können weiterführend eine konkrete Batterieauslegung inklusive Wartungs- und Austauschintervallen erfolgen und Preise bei verschiedenen Mengen konkret angegeben werden. Als Pilotprojekt wird hier die Umrüstung der Eem 923 empfohlen, da dieses Fahrzeug mit vergleichsweise geringem Aufwand umgerüstet werden kann.

6.6 Brennstoffzellenhybrid

Ein Brennstoffzellenhybrid bietet die Möglichkeit, unabhängig von der Oberleitungsverfügbarkeit über mehrere Tage CO₂-freien Betrieb zu gewährleisten. Die abgeschätzten Investitionskosten für das Antriebssystem sind kleiner als die eines reinen Energiespeicherantriebs, aber die Energiekosten bezogen auf die Traktionsenergie am Rad sind größer als die Kraftstoffkosten konventioneller Dieselfahrzeuge. Die verwendeten Wasserstoffpreise sind jedoch eher konservativ geschätzt. Im Falle einer unter Nutzung günstiger erneuerbarer Energie deutlichen Reduzierung der Wasserstoffgestehungs- und Distributionskosten gegenüber dem heutigen Stand, kann sich das Kostendifferential Diesel-/Wasserstofffahrzeug auch zugunsten des Letzteren verschieben.

Von den untersuchten Antriebskonzepten ist der Brennstoffzellenhybrid das einzige Konzept, das über mehrere Tage CO₂- und emissionsfreien Betrieb ohne Oberleitung oder Zwischenladen eines Energiespeichers ermöglicht. Falls diese Anforderung besteht, sollten im nächsten Schritt zunächst die Kosten für die Betankungsinfrastruktur ermittelt werden. Zudem muss die Vorkette (Erzeugung, Transport und Speicherung des Wasserstoffs) hinsichtlich Wirkungsgrad und Emissionen betrachtet werden, da hier indirekte Emissionen und zusätzliche Energieverluste auftreten (siehe auch Kapitel 8.6).

6.7 Effizienzsteigerung durch Getriebetausch

Für LRZ-Neufahrzeuge wird empfohlen, den Einsatz hydromechanischer Getriebe anstelle hydrodynamischer Getriebe zu prüfen. Aufgrund geringerer Masse und Investitionskosten ist eine Amortisation gegeben.

7 Literaturverzeichnis

1. **SBB CFF FFS.** *Studienantrag: Alternative Antriebskonzepte für Rangier- und Baufahrzeuge.* Zollikofen : s.n., 2014.
2. —. *Bedienerhandbuch Tm234.* 2009. I-43420.
3. —. *Bedienerhandbuch Am 843.* 2009. I-43290.
4. —. *Eem 923 Bedienerhandbuch.* 2012.
5. —. *LRZ 08 Übersicht (Leistungsdaten).* s.l. : SBB Infrastruktur, 2012.
6. **Bower, Ed, et al., et al.** *GB Rail Powertrain Efficiency Improvements.* s.l. : Department of Transport, 2012.
7. **Möller, Kai-Christian.** Zukunft der Akkutechnologien. *ATZ elektronik.* 6. Jahrgang, 2011, 03.
8. **Jossen, Andreas und Weydanz, Wolfgang.** *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen.* München : Ubooks Verlag, 2006.
9. **Gellerich, Wolfgang.** *Akkumulatoren, Grundlagen und Praxis.* Aachen : Shaker Media, 2011.
10. **Sauer, Prof. Dirk Uwe.** *Marktanreizprogramm für dezentrale Speicher insbesondere für PV-Strom.* Aachen : RWTH Aachen, 2013.
11. **Hofmann, Peter.** *Hybridfahrzeuge.* Wien : Springer Verlag, 2010.
12. **Linden, David und Reddy, Thomas B.** *Linden's Handbook of Batteries.* New York : McGraw-Hill Companies Inc., 2011. 978-0-07-162421-3.
13. **Bady, R.** *Technisches Einsatzpotential von Elektrofahrzeugen mit Hochtemperaturbatterien im städtischen Alltagsbetrieb.* Aachen : Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH, 2001.
14. **RWTH Aachen.** *Storage Technologies for Hybrid Electric Buses, Subject: ZEBRA Battery.* Aachen : RWTH Aachen, 2006.
15. **Sauer, Prof. Dirk Uwe.** *Elektrische Energiespeicher in Hybrid- und Elektrofahrzeugen.* Aachen : RWTh Aachen, 2009.

16. **Zahoransky, Richard.** *Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung.* Wiesbaden : Springer Verlag, 2013. 978-3-8348-1869-0.
17. **Wosnitz, Franz und Hilgers, Hans Gerd.** *Energieeffizienz und Energiemanagement - Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten.* Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2012.
18. **de Guibert, Anne.** *Advances of Li-ion use in industrial applications.* s.l. : Saft, 2013.
19. **Sauer, Prof. Dirk Uwe.** *Die Batterie - Engpass der E-Mobilität?* Aachen : RWTH Aachen, 2009.
20. **Kokam Co., Ltd.** *Cell Specification Data.*
21. **Bühler, G.** *Ultracaps - Eigenschaften und Einsatzgebiete.* TU Braunschweig. 2000.
22. **Pesaran, Ahmad, et al., et al.** *Ultracapacitors and Batteries in Hybrid Vehicles.* San Diego : National Renewable Energy Laboratory, 2005.
23. **Burke, Andrew.** *The Present and Projected Performance and Cost of Double-layer and Pseudo-capacitive Ultracapacitors for Hybrid Vehicle Applications.* s.l. : IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion, 2005.
24. **Karlsruhe, Fachinformationszentrum.** *Kinetische Speicherung von Elektrizität.* Karlsruhe : BINE Informationsdienst, 2003.
25. **Burg, Dr. sc.tech. Peter von.** *Moderne Schwungmassenspeicher – eine alte Technik in neuem Aufschwung.* Zürich : VDI, 1998.
26. **Flywheel Energy Systemy Inc.** *Performance Verification of a Flywheel Energy Storage System for Heavy Hybrid Vehicles.* Ottawa : Flywheel Energy Systems Inc., 2010.
27. **Schmidt, Matthias.** *Auswahl und Betrieb von Hydrospeichern.* Mainz : Vereinigte Fachverlage GmbH, 2007.
28. **Korkmaz, Feridum.** *Hydrospeicher als Energiespeicher.* Berlin : Springer Verlag, 1982. 3-540-11109-3.

29. **Rummich, Erich.** *Energiespeicher*. Renningen : expert Verlag, 2009.
30. **Käsler, Richard und Stingl, Konrad.** *Möglichkeiten glichkeiten der Rückgewinnung potentieller Energie in der Mobilhydraulik*. Hannover : Weber - Hydraulik, 2011.
31. **Kache, Martin.** *Simulation und Vergleich parallel-hybrider Antriebskonfiguration für dieselhydraulische Triebwagen*. Dresden : TU Dresden, 2014.
32. **Täubner, Dr. Frank.** *Druckgasspeicher als Alternative zur Bleibatterie*. Internationale Fachmesse für Energie, Leipzig : rosseta Technik GmbH, 2005.
33. **Siemens AG.** *Sitras HES*. Erlangen : Siemens AG Sektor Industrie Division Mobility, 2010.
34. **Thelen, R.F.** *A 2MW Flywheel for Hybrid Locomotive Power*. Austin : The University of Texas, 2003.
35. **Miller, A.R., et al., et al.** *Analysis of Fuelcell Hybrid Locomotives*. Colorado, USA : Journal of Power Sources, 2006.
36. **Bombardier Transportation.** *MITRAC Energy Saver*. Zürich, Schweiz : s.n.
37. **Mes-Dea.** *ZEBRA Batteries*. Stabio, Schweiz : s.n., 2008.
38. **Akasol.** *AKA-System 45M*. Darmstadt : s.n., 2013.
39. **Bundesamt für Umwelt BAFU.** Bundesamt für Umwelt BAFU. *Thema Luft*. [Online] Schweizerische Eidgenossenschaft, 24. Mai 2012. [Zitat vom: 20. Oktober 2014.]
40. —. *Entwicklung der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich Abgasemissionen von Motorfahrzeugen und Maschinen*. Bern : Schweizerische Eidgenossenschaft, 2013.
41. **Bundesamt für Umwelt.** *Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors - Studie für die Jahre 1980 - 2020*. Bern : Schweizerische Eidgenossenschaft, 2008.

42. **Künzel, Thomas.** *Antriebsanlage C.L.E.A.N. Diesel - Emissionsarme Züge für eine saubere Zukunft.* Hannover : Bombardier Transportation, 2009.
43. **Voith Turbo GmbH & Co. KG.** *Marktbereich Schiene - Produktübersicht.* Heidenheim : s.n., 2009.
44. **MTU .** *PowerPacks with 6H1800 for Rail Applications.* 2010.
45. **MAN Engines.** *Off-Road Rail - Produktprogramm.* Nürnberg : s.n., 2012.
46. **Hohmann, Dr. Ing Hugo und Steiner, Dr. Ing. Michael.** *Energiespeicher für Straßen- und Stadtbahnen.* Bautzen : Bombardier Transportation, 2005.
47. **Siegmann, Prof. Dr.-Ing. habil. J.** Einsatz alternativer Kraftstoffe im Schienenverkehr. *Forschungsinformationssystem.* [Online] 17.. März 2014. [Zitat vom: 20.. Juni 2014.] <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/343598/?clsld0=0&clsld1=0&clsld2=0&clsld3=0>.
48. **Bacher, Anne-Kathrin.** *Erfahrungen mit biogenen Kraftstoffen im Schnienenverkehr.* s.l. : Prignitzer Eisenbahn GmbH.
49. **Siegmann, Prof. Dr. J.** Forschungsinformationssystem. *Einsatz von Biodiesel im Schienenverkehr.* [Online] [Zitat vom: 21. Juli 2014.] <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/343542/>.
50. **Schweizerische Eidgenossenschaft.** *Treibstoffökobilanz-Verordnung, Verordnung des UVEK über den Nachweis der positiven ökologischen Gesamtbilanz von Treibstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen.* s.l. : Schweizerische Eidgenossenschaft, 2009.
51. —. Mineralölsteuer. [Online] Eidgenössische Zollverwaltung . [Zitat vom: 20.. Juni 2014.] http://www.ezv.admin.ch/zollinfo_firmen/04020/04256/04263/index.html?lang=de.
52. **Cecil, Leopold.** *Möglichkeiten des Biodieseleinsatzes im Schienenverkehr.* s.l. : ÖBB Holding.

53. **Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union.** *Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur.* s.l. : Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, 2006.
54. **Pabst, K., et al., et al.** *Neuartige Kraftstoffe und zukünftige Abgasemissionen bei Kraftfahrzeugen - eine Übersicht.* Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 2007.
55. **Fischedick, Manfred und Arnold, Karin.** *Einführung synthetischer Kraftstoffe (Gas-to-Liquid) in NRW.* Wuppertal : Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2009.
56. **Albrecht, Uwe, et al., et al.** *Kraftstoffstudie - Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen.* Frankfurt am Main : Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), 2013.
57. **Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union.** *Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.* 2009.
58. **Özdemir, Enver Doruk.** *The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in German Transport Sector, Dissertation.* Stuttgart : Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2011.
59. **BMW.** *H2 -Mobilität der Zukunft.* München : s.n., 2001.
60. **Egger, Peter.** *Alternative individuelle Mobilität.* s.l. : Magna, 2009.
61. **Shell.** *Shell LKW Studie / Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030.* Hamburg : Shell Deutschland Oil GmbH, 2010.
62. **Meyer, Prof. Freerk.** *Methanverluste beim Einsatz von LNG als Kraftstoff für Otto-Gas und Dual-Fuel-Motoren auf Schiffen.* s.l. : LNG Initiative Nordwest, 2013.

63. **Shell.** *Erdgasstudie.* 2013.
64. **Uhle, Martin und Peschka, Sönke.** *DUAL FUEL - Potential kombinierter Verbrennung von Erdgas und Dieselkraftstoff.* Hamburg : Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2013.
65. *Verbrauchsreduktion durch alternative Kraftstoffe.* **Martin, Lionel.** s.l. : Bosch Engineering GmbH, 2014.
66. **Firedl, Peter.** *Bosch Engineering GmbH.* Friedrichshafen : MTU, 2014.
67. **TÜV Süd.** *Expertenkreis „CNG/H2-Round Table“.* München : s.n., 2006.
68. **Landesverwaltung, Fürstentum Liechtenstein.** Bericht der Regierung. *Berichte und Anträge der Regierung an den Landtag.* [Online] [Zitat vom: 2014. Juli 3.]
<http://bua.gmg.biz/BuA/default.aspx?year=2000&nr=39&content=1282981980>.
69. **Staffell, Iain.** *The Energy and Fuel Data Sheet.* Brimingham, UK : University of Birmingham, 2011.
70. **Fraunhofer ISI.** Rahmenbedingungen für LPG-Fahrzeuge. *Elektromobilität.* [Online] [Zitat vom: 9. Juli 2014.] http://www.fraunhofer-isi-cms.de/elektromobilitaet/Media/forschungsergebnisse/13062437956641-10.92.21.153-Forschungsergebnisse_Alternative_Antriebe_Fossile_Alternativen.pdf.
71. **Robert Bosch GmbH.** *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch.* 27. Auflage. Plochingen : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. 978-3-8348-1440-1.
72. **Heidt, C., et al., et al.** *CNG und LPG - Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs.* Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig : Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2013.
73. *Camping-Gas für Volumentransporte.* **Transport.** 1-2, 2011.
74. **Vossloh Locomotives.** *Company Presentation.* 2014.

75. **Treffinger, Peter und Brinner, Andreas.** *Der alternative Antrieb – wie macht man Autos der Zukunft sicherer?* s.l. : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2004.
76. **Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.** *Wasserstoff- Tankstellen.* Wiesbaden : HA Hessen Agentur GmbH, 2011.
77. **Schneider, Jesse.** SAE J2601- Worldwide Hydrogen Fueling Protocol: Status, Standardization & Implementation. *California Energy Commission.* [Online] [Zitat vom: 23. Oktober 2014.] http://www.energy.ca.gov/contracts/notices/2012-07-10_workshop/presentations/SAE_Jesse_Schneider_Fueling_Protocol.pdf.
78. **Ludwig-Bölkow-Systemtechnik.** *Sicherer Wasserstoffinfrastruktur, Endbericht für das BMVBS München.* 2011.
79. **Schnell, Patrick.** Wasserstofftankstellen für Deutschland. *mobility2.0 - Automobil und Vernetzung.* [Online] 2014. [Zitat vom: 27. Juni 2014.] <http://www.mobility20.net/pi/index.php?StoryID=1392&articleID=230275>.
80. **Braess, H.-H. und Seifert, U.** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 7. Auflage. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2013. 978-3658016906.
81. **Eichelseder, Helmut und Klell, Manfred.** *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung.* s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 2010. 978-3834810274.
82. **Umweltbundesamt Österreich.** Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger. *Umweltbundesamt.* [Online] Februar 2014. [Zitat vom: 11. Juli 2014.] <http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.htm>.
83. **Huss, Arno, Maas, Heiko und Hass, Heinz.** *TANK-TO-WHEELS Report Version 4.0.* s.l. : European Commission, 2013.

84. **Röthlisberger, Regine.** *Faktenblatt - CO2-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz.* s.l. : Schweizerische Eidgenossenschaft - Bundesamt für Umwelt - Abteilung Klima, 2014.
85. **Foulds, Bill und Guzy, Chris.** *Putting Fuel Cells to Work.* s.l. : Ballard Power Systems, 2012.
86. **Ahluwalia, R., Wang, X. und Kumar, R.** *Fuel Cell Transit Buses.* Argonne, Illinois, USA : Argonne National Laboratory, 2012.
87. **Schimke, Robert.** *Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von dieselektrischen Lokomotiven.* Dresden : TU Dresden, 2012.
88. **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.** Stuttgart : s.n., 2014.
89. **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) / Institut für Werkstoff-Forschung, Thermoelektrische Materialien und Systeme.** Thermoelektrischer Generator spart Kraftstoff . [Online] 20.. September 2009. [Zitat vom: 16.. Juni 2014.] http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-5964/9712_read-19300/.
90. **Holloh, K.-D.** *Technologien für einen energieeffizienten Straßenverkehr.* s.l. : Daimler, 2008.
91. **Pfeiffer, Peter.** *Integration eines Thermoelektrischen Generators in den Kühlkreislauf eines Verbrennungsmotors.* Renningen : expert Verlag, 2009.
92. **Liebl, Johannes.** Der thermoelektrische Generator von BMW macht Abwärme nutzbar. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift.*
93. **Friedrich, Prof. Dr.-Ing. Horst, et al., et al.** Strom aus Abgasen - Fahrzeuggerechte Entwicklung Thermoelektrischer Generatoren. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift.* Volume 112, April 2010, Issue 4, S. 292-299.
94. **Voith Turbo GmbH & Co. KG.** *SteamTrac-System - Abwärmenutzungssystem mittels Dampfkreisprozess.* Heidenheim : Voith Turbo GmbH & Co. KG.

95. **Freymann, Raymond.** Der Turbosteamer der Zweiten Generation. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*. Volume 73, 2.
96. **Berger, Jörg.** *Das SteamDrive System - Hochtemperatur AWP mittels Wasserdampf Kreisprozess (CRC) im BHKW*. 2013.
97. **Blesl, M., et al., et al.** *Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität*. Stuttgart : Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendungen, 2009.
98. **Hydac International.** *Hydac meets Hybrid Technology*.
99. **Hoffrichter, Andreas, Hillmansen, Stuart und Roberts, Clive.** *Review and assessment of hydrogen propelled railway vehicles*. Birmingham, UK : s.n., 2009.
100. **BNSF Railway.** *Fuelcell Locomotives for zero-emission urban rail*. El Monte, California, USA : s.n., 2007.
101. **Fujii, Taketo, Teraya, Nobutsugu und Osawa, Mitsuyuki.** *Development of an NE train*. s.l. : JR East, 2004.
102. **Janicki, Jürgen und Reinhard, Horst.** *Schienenfahrzeugtechnik*. Heidelberg : Bahn Fachverlag, 2008.
103. **Voith Turbo.** *Die Leistungsübertragung von Dieselfahrzeugen*. Heidenheim : s.n., 2004.
104. **ZF Friedrichshafen AG.** *Repowering - Mit dem Wechselwendegetriebe ZF-EcoLife Rail*. Friedrichshafen : s.n.
105. **Lerjen, Markus.** *Batterieladung ab Stromerzeuger beim Tm 234*. Wettingen : emkamatik, 2013. Dokument 13-0476.
106. **SBB.** *E-Mail Korrespondenz*. Berlin / Bern : s.n., 9. Oktober 2014.
107. **SBB Cargo.** *cargo - Das Logistikmagazin von SBB Cargo*. Basel, Schweiz : SBB Cargo, 2004.
108. **A.S.T. Verkehrstechnik.** *Reisezugwagen und Triebfahrzeuge vorwärmen, klimatisieren und frostsicher abstellen*. Wolznach : s.n.

109. **Lindenmaier, Jochen.** *Untersuchung eines von Doppelschichtkondensatoren unterstützten Zweispannungsboardnetzes für Mikro-Hybrid-Fahrzeuge.* Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Ulm. 2010. Dissertation.
110. **A123.** *High Power Lithium Ion ANR26650.* 2008. Datenblatt.
111. **Kalhammer, Fritz R.** *Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology.* Sacramento, California : Report of the ARB Independent Expert Panel 2007, 2007.
112. **Reading, M.** *Flywheel Energy Storage System.* Livermore : Bericht für California Energy Comiision, 2004.
113. **Heghmanns, Alexander.** *Energiespeicher in Schienenfahrzeuganwendungen.* Professur für Dynamik und Mechnismendesign, Fakultät Maschinenwesen. Dresden : TU Dresden.
114. **Weck, W., et al., et al.** *Power Supply Systems for ETC Type Launchers - Demonstration of laboratory setup.* Starnberg : Magnet-Motor GmbH, 1999.
115. **Seliger, G.** *Alternative Abwärmenutzungskonzepte bei Schiffs- und Bahnbetrieb und Blockheizkraftwerken.* 2008. 978-3-7983-2073-4.
116. **Rau, Michael.** GreenGear. *Elektrischer Antrieb - Brennstoffzelle.* [Online] [Zitat vom: 1. Juli 2014.] <http://www.greengear.de/wp-content/uploads/2010/01/Brennstoffzelle-Typen1.jpg>.
117. **MTU.** *Leise auf die Gleise.* 2012.
118. **Lehmann, Ingo.** Ein Hybrid auf Schienen. *Mobility 2.0.* 2012, 4.
119. **Bomke, Thorsten.** *H3 Hybrid Locomotive.* 2014.
120. **Dittmann, Detlef.** *Alstom Hybridlokomotiven im Vershubeinsatz.* Graz : s.n., 2013.
121. **Alstom Transportation.** *Standort Stendal und die H3-Rangierlokomotivplattform.* Magdeburg : s.n., 2013.
122. **General Electric Company.** *Hybrid Locomotive.* 2005.

123. **Hitachi.** *Towards Sustainable Technology in Transport Sector.* 2008.
124. **Abiko, Hiroshi.** *Development of Hybrid Railcars and Catenary and Battery-powered Hybrid Railcar System.* s.l. : JR EAST Technical Review-No.23, 2010.
125. **Shimada, M. und Kaneko, T.** *The Energy Control of the fuel Cell Hybrid Traction System for Railcars.* Yokohama, Japan : s.n., 2006.
126. **Miller, A.R., et al., et al.** *Zero-Emission, Hydrogen-Fuelcell Locomotive for Urban Rail.* Denver, USA : s.n., 2007.
127. **Söffker, C.** *Konzeption und Erprobung eines Schwungmassenspeichers in einem dieselelektrischen Triebzug.* Clausthal : Technische Universität Clausthal, 2005.
128. **Bartosch, S. und Berger, J.** ECOpack – Innovatives Antriebskonzept für Schienenfahrzeuge. *Eisenbahntechnische Rundschau.* 2007, Nr. 5, S. S.287-293.
129. **Smith, Kevin.** International Railway Journal. *LNG: fuel of the future.* [Online] 9. Dezember 2013. [Zitat vom: 29. Juli 2014.] <http://www.railjournal.com/index.php/locomotives/lng-fuel-of-the-future.html>.
130. **Hamacher, Thomas.** Wasserstoff als strategischer Sekundärenergieträger. [Buchverf.] Johannes Töpler und Jochen Lehmann. *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven.* Berlin : Springer Verlag, 2014, S. 1-23.
131. **e-Mobil BW GmbH.** *Wasserstoff-Infrastruktur - Für eine nachhaltige Mobilität: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf.* Stuttgart : s.n., 2013.
132. **Pregger, Thomas.** *Perspektiven solarthermischer Verfahren zur Wasserstofferzeugung.* Stuttgart : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / Institut für technische Thermodynamik, 2008.
133. **Cazzola, Pierpaolo, et al., et al.** *Production Costs of alternative Transportation Fuels.* Paris, France : International Energy Agency, 2013.

134. **Wansart, Jörg.** *Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO₂-Flottenemissionen und zur Markteinführung von alternativen Antrieben.* Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2012. 978-3-8349-4498-6.
135. **Gärtner, Ekkehard Prof.** *Antriebstechnik der Schienenfahrzeuge.* Fachgebiet Schienenfahrzeuge, TU Berlin. Berlin : s.n., 2008. Vorlesungsskript.
136. Thermoelectrics. [Online] [Zitat vom: 18.. Juni 2014.] <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/engineering.html>.
137. **Cummins Emission Solutions.** *Off-Highway Emissions Regulations.* Columbus, USA : Cummins Emission Solutions, 2012.
138. **Russfrei fürs Klima.** *Rußemissionen von Diesellokomotiven.* Berlin : s.n., 2012.
139. **Schuppe, Axel.** *Reduzierung von Partikel- und sonstigen Emissionen bei Schienenfahrzeugen.* s.l. : VDB - Verband der Bahnindustire in Deutschland e.V., 2005.
140. **Wind, Dr. J.** *Antriebssysteme für elektrisch angetriebene Fahrzeuge.* Stuttgart : Daimler AG, 2012.
141. **Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.** Land Brandenburg. *Synthetische Kraftstoffe.* [Online] Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 24. Juni 2014. [Zitat vom: 21. Oktober 2014.] <http://www.mugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.294917.de>.
142. **Neumann, Bernhard.** *Wasserstofftechnologie - Sicherheit.* Hamburg : Technische Universität Hamburg-Harburg, 2001.
143. **Deutz.** *Werkstatthandbuch B/FM 1008/F.* 2001.

8 Anhang

8.1 Elektrochemische Energiespeicher

Elektrochemische Energiespeicher basieren auf dem Prinzip der elektrochemischen Zelle (galvanisches Element), in der elektrische Energie durch chemische Umwandlungsprozessen erzeugt wird. Das galvanische Element (Abbildung 8.1) ist eine Kombination aus zwei verschiedenen Elektroden, unterschiedlichen Aktivmaterialien, einem ionenleitenden Elektrolyt und einem Separator (elektrischer Isolator, der das Durchdringen von Ionen erlaubt). Wesentliche Unterschiede (z.B: Klemmenspannung, spezifische Energie) der Speicher ergeben sich durch die Bauweise, die verwendeten Aktivmaterialien und Elektrolyte. Die Aktivmassen sind der eigentliche Speicher der chemischen Energie, welche bei der Entladung freigesetzt wird.

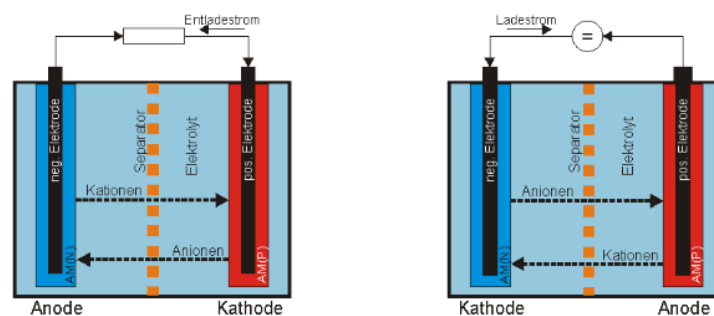


Abbildung 8.1: Prinzip der Energiespeicherung in einem galvanischen Element (109)

Die Vielzahl der Batterietypen weist prinzipiell eine ähnliche Entladecharakteristik auf. Abbildung 8.2 zeigt beispielhaft eine Entladekurve einer Lithium-basierten-Hochleistungszelle der Firma A123. Batterietypisch ist das während der Entladung stabile Spannungsniveau, bis diese zum Ende der Entladung absinkt.

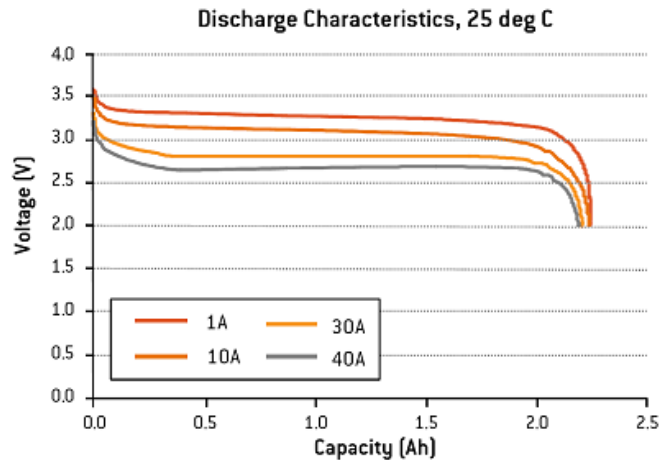


Abbildung 8.2: Beispiel der Entladecharakteristik einer Batterie (110)

Bei höheren Entladeströmen sinkt die Klemmenspannung der Zelle deutlich ab, womit eine kleinere Energiemenge der Batterie entnommen werden kann. Die Umgebungstemperatur hat einen großen Einfluss auf die Energie- und Leistungscharakteristik, da mit sinkender Temperatur die Geschwindigkeit der elektrochemischen Reaktion abnimmt. Bei gleichem Entladestrom stellt sich bei einer geringeren Temperatur eine niedrigere Spannung ein und die Entladeschlussspannung wird schneller erreicht, womit die nutzbare Kapazität sinkt. Eine Ausnahme stellt hier die NaNiCl-Batterie dar, da bei dieser Hochtemperaturbatterie die Zellen im Gehäuse weitgehend thermisch von der Umgebung isoliert sind.

Die Lebensdauer einer Batterie kann kalendarisch oder als maximale Zyklenzahl in Abhängigkeit der Entladetiefe (DoD) angegeben werden. Nach DIN 43539 / Teil 4 wird das Ende der Batteriebensdauer als 80 % Verlust der Nennkapazität definiert. Die Lebensdauer ist von vielen Faktoren abhängig. Dazu zählen unter anderem die Betriebstemperatur, die Entladetiefe, die Entladeschlussspannung und das Belastungskollektiv. Abhängig von der Batterietechnologie sind diese Faktoren unterschiedlich stark ausgeprägt. Beispielhaft für eine Lithium-basierte-Hochenergie-Zelle zeigt Abbildung 8.3 die Anzahl der erreichbaren Zyklen in Abhängigkeit von der gewählten Entladetiefe.

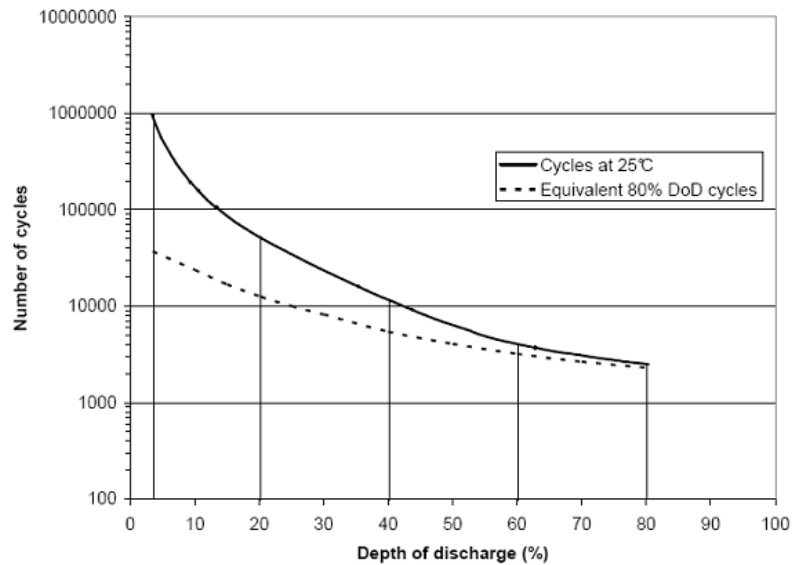


Abbildung 8.3: Zyklusfestigkeit einer Batterie als Funktion der Entladetiefe (111)

Das Diagramm zeigt, dass mit abnehmender Entladetiefe nicht nur die Anzahl der Zyklen, sondern auch die Anzahl der äquivalenten 80 %-Ladezyklen progressiv steigt. Werden beispielsweise 40 % DoD genutzt, dann erreicht die Batterie mehr als 10000 Zyklen. Der über die Lebensdauer akkumulierte Energiedurchsatz entspricht 6000 Zyklen bei 80 % DoD. Im Vergleich zu den 3000 Zyklen, die bei Nutzung von 80 % DoD möglich gewesen wären, hat sich der Energiedurchsatz der Batterie über die Lebensdauer verdoppelt. Aufgrund der progressiven Abhängigkeit nimmt dieser Effekt bei kleineren Entladetiefen noch stärker zu.

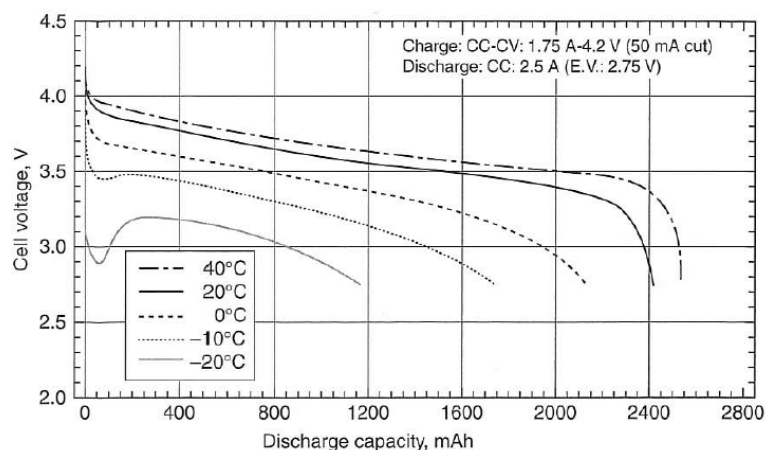


Abbildung 8.4: Entlade-Temperaturcharakteristik (1C) einer Sanyo LCO-Zelle (12)

Ein typischer Spannungsverlauf einer LCO-Zelle ist in Abbildung 8.4 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass die Zellen am besten im Bereich von 0 - 40 °C funktionieren und niedrige Temperaturen zu geringeren Entladespannungen führen. Durch die geringere Spannung wird die Entladeschlussspannung früher erreicht und die genutzte Kapazität sinkt. Weiterhin sind in diesem Bereich die Entladekurven am wenigsten temperaturabhängig. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass Temperaturen oberhalb von 30 °C einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer haben.

8.2 Elektrostatistische Energiespeicher

In einem Doppelschichtkondensator (DSK, auch Supercaps oder Ultracaps) erfolgt die Energiespeicherung durch Ladungstrennung und basiert auf der Speicherung von Energie im elektrischen Feld zwischen zwei geladenen Elektroden. Die Doppelschicht besteht aus einer porösen Kohlenstoffelektrode und den Ionen des Elektrolyts, die sich bei Anlegen einer Spannung an der Oberfläche der Elektrode absetzen. Durch die große Oberfläche und sehr dünne Elektrolytschichten ergibt sich eine für Kondensatoren besonders hohe Kapazität bei diesem Kondensatortyp.

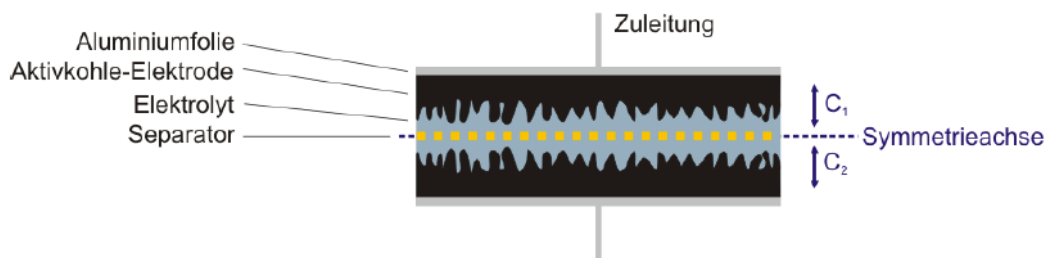


Abbildung 8.5: Aufbau eines Doppelschichtkondensators (109)

Die maximale Spannung eines DSK beträgt typischerweise 2,5 V bis 2,7 V. Für den Bereich der mobilen Anwendung im Fahrzeug werden jedoch höhere Spannungen benötigt. Daher werden durch die Kombination von Reihen- und Parallelschaltungen gleicher Kondensatoren Module aufgebaut. Diese werden

so zusammengeschaltet, dass Leistung und Energieinhalt an die jeweilige Anwendung angepasst sind. Aufgrund von fertigungsbedingten Toleranzen kommt es zu unterschiedlichen Spannungen in den einzelnen DSK, welche durch eine aktive oder passive Symmetrierschaltung ausgeglichen werden.

Entscheidende Nenngößen bei einem DSK sind die Nennspannung, die Kapazität und der Innenwiderstand. Dabei ist die gespeicherte Energiemenge linear von der Kapazität und quadratisch von der Spannung abhängig (vgl. Abbildung 20). Bei einem zu 50 % genutzten Spannungsbereich sind 75 % der gespeicherten Energie nutzbar sind.

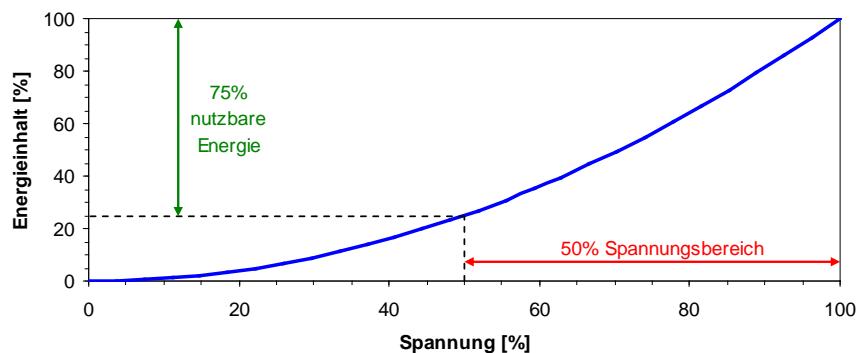


Abbildung 8.6: Energieinhalt eines DSK als Funktion der Spannung

Ein DSK-Speichersystem besteht aus den DSK-Modulen, der Symmetrierschaltung und einem Kühlsystem. Alle Komponenten sind in einem Gehäuse untergebracht in welchem gleichzeitig elektrische Lüfter integriert sind. Zur Anbindung an den Zwischenkreis wird ein DC/DC-Wandler benötigt.

Der Temperaturbereich, in dem DSK eingesetzt werden können, liegt zwischen -40 °C und +65 °C. Dabei ist die Kapazität eines DSK weitgehend unabhängig von der Temperatur (vgl. Abbildung 21).

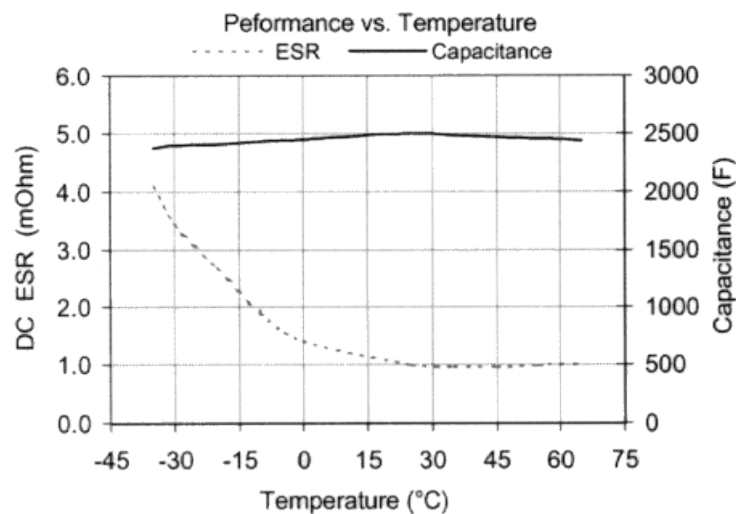


Abbildung 8.7: Kapazität und Innenwiderstand eines DSK in Abhängigkeit von der Temperatur (21)

Bei Temperaturen über 0 °C ist der Innenwiderstand annähernd konstant. Sinkt die Temperatur unter 0 °C so steigt der Innenwiderstand stark an.

Die kalendarische Lebensdauer von DSK wird abhängig vom Hersteller mit 10 bis 20 Jahren angegeben. Dabei können zwischen 500.000 bis 1.000.000 Lade- und Entladezyklen realisiert werden, wobei die Einhaltung der maximalen Zellspannung sowie des maximalen Lade- und Entladestroms und die Umgebungstemperatur von 25 °C von großer Bedeutung sind. Abbildung 22 veranschaulicht die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Zellspannung und der Betriebstemperatur.

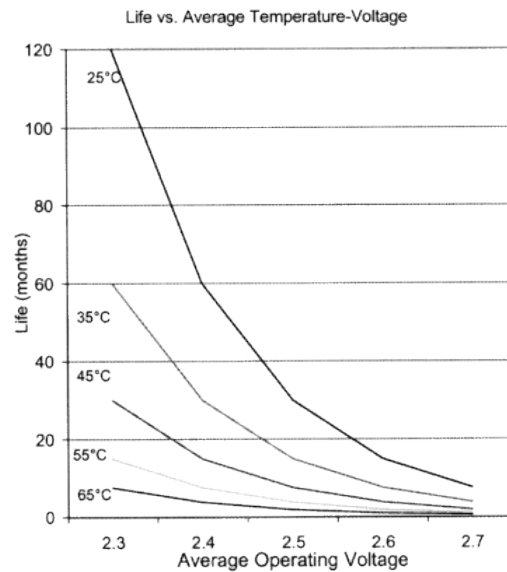


Abbildung 8.8: Lebensdauer eines DSK in Abhängigkeit der Zellspannung und der Betriebstemperatur (21)

8.3 Schwungmassenspeicher

Bei Schwungmassenspeichern (SMS) erfolgt die Energiespeicherung durch Bewegungs- bzw. Rotationsenergie. Durch das Einspeisen von Energie wird die Drehgeschwindigkeit erhöht und bei der Entnahme verringert. Der Energieinhalt eines SMS errechnet sich aus:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

Die Gleichung zeigt die lineare Abhängigkeit des Energieinhalts vom Trägheitsmoment J des Rotors und die quadratische Abhängigkeit von der Roter-drehzahl ω . Daraus lässt sich ableiten, dass größere Energiemengen durch höhere Drehzahlen erreicht werden können. Die maximale Drehzahl wird durch die maximale Umfangsgeschwindigkeit des Rotors, letztendlich also durch die Zugfestigkeit des Rotorwerkstoffes, begrenzt. Aktuell verfügbare Rotoren werden aus faserverstärkten Kunststoffen hergestellt und erreichen Drehzahlen von 2.000 bis 25.000 1/min.

Ein SMS-System besteht aus einem Schwungrad, in das der Rotor integriert ist. Häufig werden hier magnetische (bei sehr hohen Drehzahlen bis 100.000 1/min notwendig) oder keramische Lager eingesetzt, die die Reibung der rotierenden Teile minimieren. Gemeinsam mit dem Stator der elektrischen Maschine sind die genannten Teile in einem Vakuumgehäuse untergebracht, welches gleichzeitig als Sicherheitsgehäuse dient (Abbildung 20).

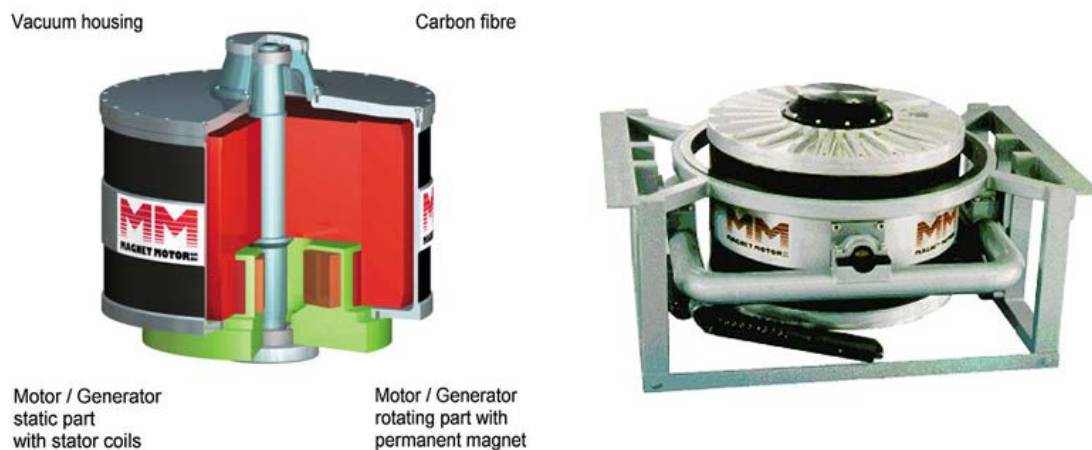


Abbildung 8.9: Aufbau eines Schwungmassenspeichers

Durch eine Vakuumpumpe wird hier ein Druck von ca. 0,01 mbar erzeugt. Außerhalb des Vakuumgehäuses befinden sich die Systemkomponenten Wechselrichter, Vakuumpumpe, elektronische Überwachung und Kühlsystem. (112) (113)

In Abbildung 21 ist beispielhaft eine Lade- und Entladekennlinie eines SMS dargestellt. Zwischen den Drehzahlen n_{\min} und n_{knick} steigt die Lade- und Entladeleistung proportional mit der Drehzahl an. Die maximale Leistung ist oberhalb der Knickdrehzahl n_{knick} durch die verwendeten leistungselektronischen Komponenten begrenzt. Bei der Drehzahl n_{\max} ist der maximale Energieinhalt erreicht.

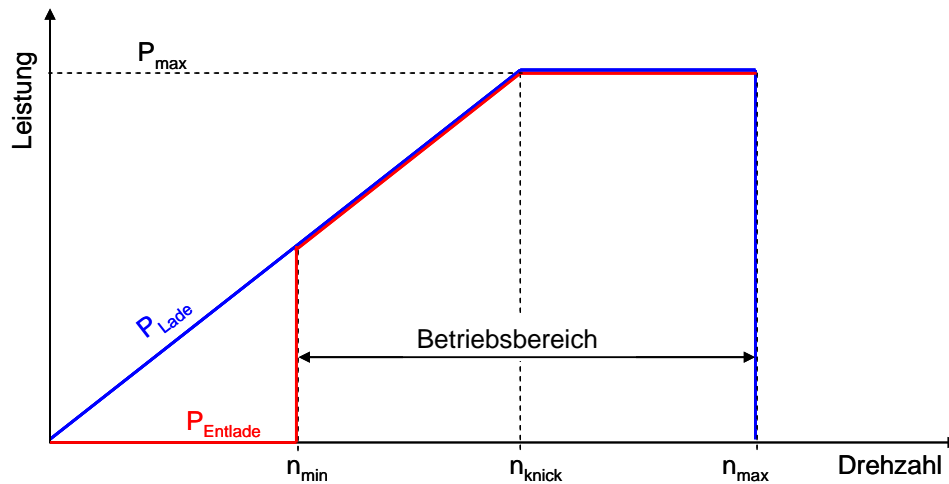


Abbildung 8.10: Lade- und Entladekennlinie eines SMS

Schwankende Umgebungstemperaturen haben keine Auswirkungen auf die Leistungscharakteristik und den Energieinhalt eines SMS: Die üblichen Betriebstemperaturen liegen bei -40 °C bis $+65\text{ °C}$.

Für den sicheren Betrieb eines SMS ist eine elektronische Überwachung und Steuerung notwendig. Hierbei werden der Lade- und Entladevorgang, die maximale Drehzahl und der aktuelle Speicherladezustand überwacht. Weiterhin werden zur Gewährleistung der Systemsicherheit die Temperaturen von Stator, Lagern und Kühlwasser, Rotordrehzahl, Vakuumdruck usw. durch Sensoren ermittelt. Bei einem Rotorversagen kommt es zu einer unkontrollierten Freisetzung der kinetischen Energie, welche eine erhebliche Gefahr für Menschen und Anagen in unmittelbarer Nähe darstellt. Das Gefahrenpotential hängt dabei von der Größe des SMS ab.

Die Einbindung eines SMS erfolgt direkt an den Gleichspannungszwischenkreis des Fahrzeugs. Der Wechselrichter wandelt die Zwischenkreisgleichspannung in die für die elektrische Maschine benötigte Wechselspannung. Dabei ist die Anordnung im Fahrzeug sehr eingeschränkt, da der Bauraumbedarf des SMS fest vorgeschrieben ist. Die räumliche Trennung und Anordnung von Wechselrichter und Speichereinheit ist möglich, sofern die elektrischen Leitungen keine EMV-Probleme verursachen.

zeigt als Überblick charakteristische Daten einiger Schwungmassenspeicher, die als Produkt oder als Prototyp aufgebaut wurden. Der Vergleich der verschiedenen Systeme zeigt, dass die spezifische Energie und spezifische Leistung von Systemen kleiner Leistung und Kapazität geringer als bei leistungsstarken Systemen mit großer Kapazität sind.

Tabelle 8.1: Charakteristische Daten verschiedener SMS (34) (114) (26)

	spez. Energie Speicher (System) Wh/kg	spez. Leistung Speicher (System) W/kg	Drehzahlen 1/min	Wirkungsgrad %	Energieinhalt (nutzbar) kWh	Dauerleistung (Maxi- mal) kW	Masse Speicher (Gesamtsystem) kg
ALPS Flywheel	11,7 (7,4)	233 (111)	7500 - 15000	90	133 (100)	2000	8600 (18000)
Flywheel Energy Systems Inc.	5,1	800	15500 - 31000	86	0,77	50 (120)	150
Magnet Motor K3	5 (1,7)	375 (125)	bis 12000	---	2	150	400 (1200)
Magnet Motor K6	14,6 (4,9)	1125 (375)	bis 21000	---	5,83	450	400 (>1200)
Magnet Motor M1	14,8	1500	bis 18000	---	8,89	900	600

8.4 Abgaswärmenutzung

Wie die in Abbildung 8.11 beispielhaft dargestellten Energieströme eines Dieselfahrzeugs (Stand 1999) zeigen, werden im Nennleistungspunkt des Dieselmotors 34 % der im Kraftstoff zur Verfügung gestellten Wärmeenergie über das Abgas und 33 % über das Kühlmedium ungenutzt an die Umgebung abgeführt. Bei neueren Motoren können sich laut SBB Industriewerk Biel die Abgas- und Kühlwasserverluste jeweils auf bis zu 31 % reduzieren und die nutzbare Antriebsleistung auf 28 % erhöht werden. Das bedeutet, dass mit der Verbesserung des Wirkungsgrads neuerer Motoren der Energieanteil im Abgas und damit das Potential zur Nutzung der Abgasenergie im Vergleich zum gezeigten Energieflussdiagramm kleiner werden.

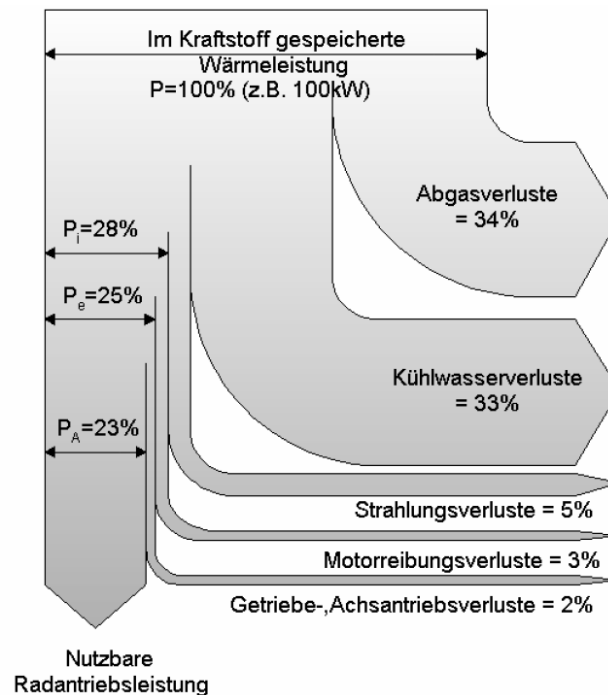


Abbildung 8.11: Energieströme eines Dieselfahrzeugs im Nennleistungspunkt (115)

Für die Nutzung dieser Abwärme ist jedoch nicht der Energie-, sondern der Exergiestrom relevant. Der Exergiestrom ist der technisch nutzbare Teil des Energiestroms. Die Exergiebilanz eines Dieselmotors zeigt, dass im Nennleistungspunkt lediglich etwa 25 % der eingesetzten Kraftstoffenergie als nutzbarer Exergiestrom zur Verfügung stehen (Abbildung 8.12). Hieraus folgt direkt, dass die Abgaswärmenutzung (AWN) ein größeres Potential als die Kühlmittelwärmenutzung aufweist.

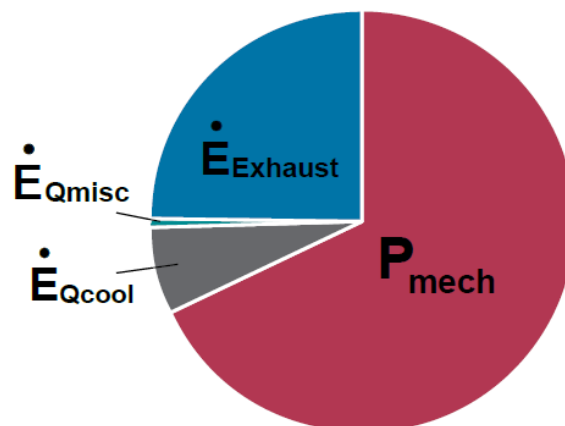


Abbildung 8.12 Exergiebilanz Dieselmotor im Nennleistungspunkt (88)

Für die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie definiert der Carnot-Wirkungsgrad den theoretisch höchst-möglichen Wirkungsgrad (Gleichung(2)). Es wird deutlich, dass die höchste Prozesstemperatur T_H (Abgas) und die niedrigste Prozesstemperatur T_K (Kühlmittel) entscheidend für den Wirkungsgrad und damit die tatsächlich umgesetzte Wärmeleistung sind. Da die Kühlmitteltemperatur zwischen 80 °C bis maximal 120 °C liegt, sind für eine effiziente Nutzung der Abgaswärme hohe Abgastemperaturen notwendig.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_K [K]}{T_H [K]} \quad (2)$$

Das theoretische Potential für die Abgaswärmenutzung wird anhand der Abgastemperatur und Motorleistung für einen 500 kW Dieselmotor (Abbildung 8.13) abgeschätzt. Bei 500 kW Motorleistung (100 % P_{Nenn}) beträgt die Abgastemperatur 770 K und die Kühlmitteltemperatur 373 K. Mit einem resultierenden Carnot-Wirkungsgrad von 46,7 %, d.h. ohne die bei der technischen Umsetzung auftretenden Verluste (Wärmeübertragungsverluste, Wirkungsgrad der Abwärmenutzungssysteme, etc.), könnten theoretisch 230 kW mechanische Leistung gewonnen werden. Dagegen steht bei einer Motorleistung von 75 kW (15 % P_{Nenn}) lediglich eine Abgastemperatur von 480 K zur Verfügung und der Carnot-Wirkungsgrad sinkt bei gleicher Kühlmitteltemperatur auf 22,3 %, wodurch die theoretisch mögliche Leistungsentnahme auf 16,7 kW fällt.

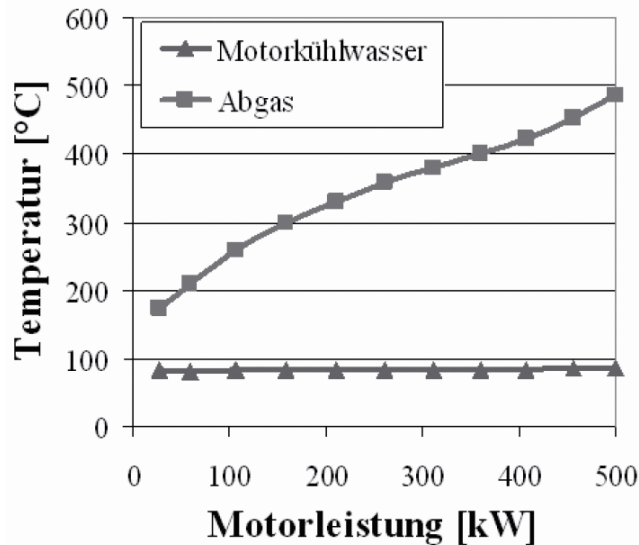


Abbildung 8.13 Temperaturverläufe über der Motorleistung (88)

Die theoretischen Potentiale sind in mobilen Anwendungen nicht erreichbar. Ursachen hierfür sind (unabhängig von der Art der Wärmenutzung):

- Zur Vermeidung von Kondensation im Abgastrakt soll die Mindest-Abgastemperatur von 170 °C nicht unterschritten werden, somit kann nur ein Teil des zur Verfügung stehenden Wärmestroms genutzt werden.
- Die für die Wärmeübertragung notwendigen Flächen steigen mit zunehmender Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Wärmestroms überproportional an. Bauraum- und Massenbeschränkungen limitieren die Größe der verwendeten Wärmeübertrager, so dass nur ein Teil des Wärmestroms genutzt werden kann.
- Für einen effizienten Betrieb ist ein kontinuierlicher Wärmestrom mit hohen Abgastemperaturen vorteilhaft. In Fahrzeugen sind Abgastemperaturen und –massenströme häufig sehr dynamisch, bei geringer Motorlast stehen nur geringe Abgastemperaturen zur Verfügung.

Eine Herausforderung in der Entwicklung von AWN-Systemen ist der Wärmeübertrager und dessen Integration in den Abgasstrang. Wünschenswert ist eine motornahe Position, um möglichst hohe Abgastemperaturen nutzen zu können. Dabei kommt es zu Konflikten, da Abgasnachbehandlungssysteme (Partikelfil-

ter, SCR-Katalysatoren) ebenfalls hohe Abgastemperaturen benötigen. Bei der Auslegung des Wärmeübertragers ist der zusätzliche Abgasgegendruck möglichst gering zu halten, was wiederum die effiziente Wärmeübertragung erschwert.

8.5 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen werden nach ihrer Betriebstemperatur und nach der Art des verwendeten Elektrolyten eingeteilt. Hinsichtlich der Betriebstemperatur wird zwischen Niedertemperatur- (NT), Mitteltemperatur- (MT) und Hochtemperaturbrennstoffzellen (HT) unterschieden. (Abbildung 8.14).

Einteilung	Brennstoffzellentyp	gängiger Elektrolyt	Arbeitstemperatur
Niedertemperatur	Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran BZ	sulfoniertes Tetrafluorethylen-Polymer	40-100°C
	Alkalische BZ	Kaliumhydroxidlösung	50-200°C
Mitteltemperatur	Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran BZ	Phosphorsäure in PBI Matrix	120-180°C
	Phosphorsäure Brennstoffzelle	Phosphorsäure	150-220°C
Hochtemperatur	Schmelzkarbonatbrennstoffzelle	Alkalicarbonat-Mischschmelze	580-650°C
	Festoxidbrennstoffzelle	Zirkoniumoxid (Yttrium stabilisiert)	500-1000°C

Abbildung 8.14: Vergleich von Brennstoffzellensystemen (Betriebstemperatur)

Hochtemperaturbrennstoffzellen bieten den Vorteil der Multibrennfähigkeit, wodurch ihre Abhängigkeit von Wasserstoff als Energieträger sinkt. Der große Vorteil von Niedertemperaturbrennstoffzellen ist ihre Schnellstartfähigkeit, da ihr Arbeitsbereich bei Temperaturen um die 100 °C liegt und somit keine zusätzlichen Systeme für einen Systemstart bei Umgebungstemperatur notwendig sind. Außerdem besitzen sie eine höhere Akzeptanz gegenüber Kohlenmonoxid.

Hinsichtlich der Klassifizierung des verwendeten Elektrolyts ergeben sich weitere Merkmale der Brennstoffzelle, welche in Abbildung 8.15 zusammengefasst sind.

Der Wasserstoff wird an der Anode ionisiert. Die positiv geladenen H^+ -Ionen wandern durch den für Ionen durchlässigen Elektrolyten zur Kathode, während die Elektronen über einen elektrischen Verbraucher dorthin wandern. Der an

der Kathode zugeführte Sauerstoff wird zunächst unter Aufnahme der Elektronen reduziert und reagiert dann mit den H^+ -Ionen zu Wasser.

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Arbeitstemperatur	Elektrischer Wirkungsgrad	Brenngas (Oxydant)
AFC (Alkalische Brennstoffzelle)	Kalilauge	Raumtemperatur bis 90 °C	60-70 Prozent	H ₂ (O ₂)
PEMFC (Membranbrennstoffzelle)	Protonleitende Membran	Raumtemperatur bis 80 °C	50-70 Prozent	H ₂ (O ₂ , Luft)
DMFC (Direkt-Methanol-brennstoffzelle)	Protonleitende Membran	Raumtemperatur bis 130 °C	20-30 Prozent	CH ₃ OH* (O ₂ , Luft)
PAFC (Phosphorsäure-brennstoffzelle)	Phosphorsäure	180-220 °C	55 Prozent	Erdgas, Biogas, H ₂ (O ₂ , Luft)
MCFC (Karbonatschmelzen-brennstoffzelle)	Alkalicarbonat-schmelzen	620-660 °C	65 Prozent	Erdgas, Kohlegas, Biogas, H ₂ (O ₂ , Luft)
SOFC (Oxidkeramische Brennstoffzelle)	Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid	800-1000 °C	60-65 Prozent	Erdgas, Kohlegas, Biogas, H ₂ (O ₂ , Luft)

* CH₃OH – Methanol

Abbildung 8.15: Vergleich von Brennstoffzellensystemen (Elektrolyt) (116)

8.6 Alternative Antriebe in Schienenfahrzeugen

8.6.1 MTU Hybrid Powerpack

Der Dieselmekanische Triebzug der Baureihe VT 642 ist mit einem Hybridpowerpack des Typs 6H 1800 R75 der Firma MTU Friedrichshafen GmbH ausgestattet. Dieses als Parallelhybrid ausgelegte Powerpack besteht aus einem 315 kW Dieselmotor und einem 200 kW Elektromotor (Spitzenleistung: 400 kW). Als Speicher kommen hier Lithium Eisen Phosphat Batterien mit einer Kapazität von 4,7 kWh zum Einsatz. Der Kraftstoffverbrauch und die Kohlendioxidemissionen lassen sich laut Hersteller um 25 % reduzieren. Seit Mai 2012 erfolgen Mess- und Probefahrten, wobei aktuell noch keine endgültige Zulassung des EBA vorliegt. Eine erste Kleinserienproduktion (Umrüstung von Bestandsfahrzeugen) ist ab 2014 geplant. (117) (118)

Die elektrischen Kernkomponenten sind modular aufgebaut. Entsprechend hängt die leistungsbezogene und damit bauraumbezogene Dimensionierung der Komponenten von den konkreten Bedarfen des Fahrzeugbetriebs ab.

8.6.2 Alstom H3 Lokomotivplattform

Die Alstom H3 ist eine dieselelektrische Lokomotive, welche in verschiedenen Konfigurationen erhältlich ist. Eine Hybridvariante ist als serieller Hybrid ausgelegt. Dabei kommen NiCd-Batterien der Firma Hoppecke mit einer Nennkapazität von 170 Ah, einer Nennspannung von 600 V bei einem Gewicht: von 6,5 t zum Einsatz, welche eine Leistung von 350 kW zur Verfügung stellen. Bei Bedarf werden diese durch das Genset geladen. Zusätzlich kommt ein 350 kW starker Dieselmotor, welcher die Abgasnorm Stage III B erfüllt, zum Einsatz. Die maximale Anfahrzugkraft beträgt 240 kN. Der Hersteller gibt einen durchschnittlichen Verbrauch von 9 - 20 l/h für leichte Rangierfahrten an. Bei Teilbelastung kann die Lokomotive aus der Batterie betrieben und somit bis zu 50 % Dieselmotorkraftstoff eingespart werden.



	H3 Akku	H3 Hybrid	H3 Dual Engine	H3 Single Engine
Power supply	external	350 kW generator	2 x 350 kW generator	1000 kW generator
Energy storage	NiCad Battery	NiCad Battery	-	-
Power	600 kW	700 kW	700 kW	1000 kW
Tank volume	-	2.000 l	2.000 l	2.000 l
Consumption	-	9-20l/h	15-20l/h	25-40l/h
Field of operation	Light shunting operation	Medium shunting operation	Heavy shunting operation	Medium distance mainline operation
Key advantage	Emission free	30-50% diesel savings, autonomy	15% diesel savings, redundancy	8% diesel savings, high power

Abbildung 8.16: Konfigurationen der Alstom H3 (119)

Eine weitere Konfiguration ist ein reiner Batterieantrieb für den leichten Rangierbetrieb mit einer Gesamtleistung von 600 kW. Diese muss im Halt über

einen externen Anschluss geladen werden. Durch die gänzliche Substitution des Dieselmotors ergibt sich kein direkter CO₂-Auststoß. Eine Zulassung der Hybridvariante liegt seitens des Eisenbahnbundesamtes bereits vor. Eine erste Auslieferung von drei Fahrzeugen an VW wird Ende 2014 erfolgen. Fünf weitere Hybridfahrzeuge werden im Jahr 2015 an die DB ausgeliefert. (120) (121) (119)

8.6.3 Hybrid Locomotive von GE Transportation

Eine diesel-elektrische Schwerlast-Streckenlokomotive mit einer Leistung von 4.400 PS wurde zur Speicherung von Bremsenergie mit Batterien (Natrium-Nickel-Chlorid) ausgerüstet. Dadurch werden laut Hersteller bei Bedarf zusätzliche 2.000 PS generiert. Die Folge ist eine Kraftstoffeinsparung von 15% und eine Emissionsreduzierung von 50%. (122)

8.6.4 Hitachi Hybrid Diesel Train

2007 startete Hitachi den Erprobungsbetrieb eines seriellen Hybrids in einem umgebauten British Rail Class 43 HST (Hochgeschwindigkeitstriebzug). Dabei wurden Lithium-Ionen-Batterien (48 kWh) zur Speicherung rekuperierter Energie verwendet, wodurch der Beschleunigungsvorgang durch Batterie unterstützt wird. Laut Hersteller sind eine Kraftstoffeinsparung von 20 % und eine Reduzierung der Abgase Stickstoffoxid (NOx) und Dieselrußpartikel (PM) um 50 % möglich. (123)

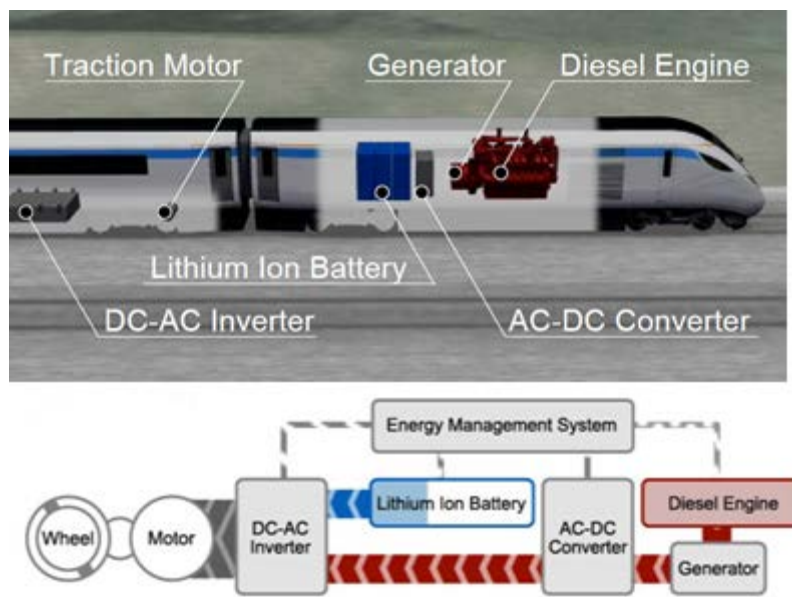


Abbildung 8.17: Hitachi Hybrid HST (123)

8.6.5 New Energy Train von JR East

2002 begann die erste Projektphase für den New Energy Train der East Japan Railway Company (JR East) als Teil ihrer Bemühungen für umweltfreundliche Schienenfahrzeuge. In Abbildung 8.18 ist der Antriebsstrang des Diesel-Hybrids schematisch dargestellt. (124)

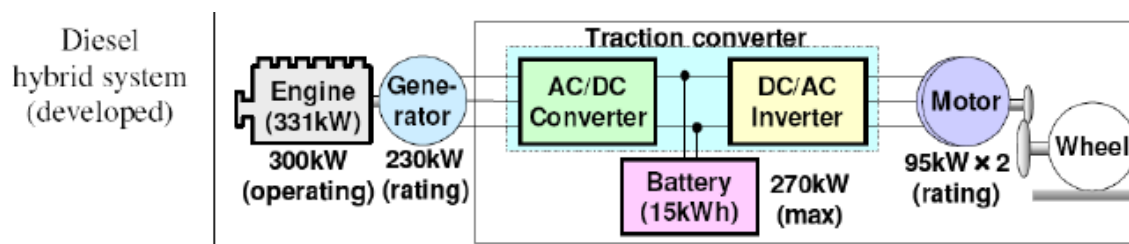


Abbildung 8.18: Schematische Darstellung des seriellen Diesel-Hybrid-Antriebssystem JR East (125)

Das Fahrzeug war für den Einsatz auf teilelektrifizierten Strecken vorgesehen und sollte aus der Batterie bis zu 30 km/h beschleunigen. Dabei kamen Lithium-basierte Batteriesysteme zum Einsatz, welche eine Gesamtkapazität von 15 kWh verteilt auf 4 Batteriemodule bereitstellten. Der Leistungshub lag bei 25% SOC (von 30 bis 55 % SOC). Für die Diesel-Hybrid-Variante konnte in

Versuchen auf unterschiedlichen Strecken ein Verbrauchsvorteil von 14-33% gegenüber einem konventionellen Dieseltriebwagen nachgewiesen werden. (124)

In einer zweiten Projektphase wurde der Dieselmotor durch zwei PEM (Proton Exchange Membrane) Brennstoffzellen mit je 65 kW Leistung ersetzt. Bei diesem als serieller Hybrid konzipierten Fahrzeug wurden sechs Wasserstofftanks mit einem Gesamtfassungsvermögen von 270 l installiert. Die Zwischenspeicherung der Bremsenergie in einem Lithium-basierten Batteriesystem (19kWh). Getestet wurde dieser Prototyp 2007 in Nagano. In Abbildung 8.19 ist der Brennstoffzellen-Antriebsstrang schematisch dargestellt.

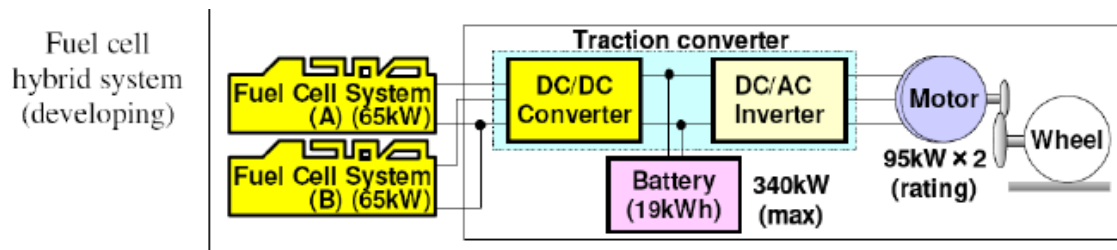


Abbildung 8.19: Schematische Darstellung des Brennstoffzellen-Antriebssystems JR East (125)

8.6.6 „Green Goat“/ BNSF Railway

Die 125 Tonnen schwere Brennstoffzellen-Hybrid-Verschublokomotive basiert auf einer Green Goat. Die PEM (Proton Exchange Membrane) Brennstoffzelle vom Typ Mark 900 des kanadischen Herstellers Ballard, besteht aus zwei 125 kW Modulen. Der zum Betrieb der Brennstoffzelle benötigte Wasserstoff wird gasförmig in 14 CFK Druckbehältern gespeichert. Beim Fülldruck von 350 bar fassen die Druckbehälter 70 kg Wasserstoff. Weiterhin kommen als Energiespeicher Blei-Akkumulatoren mit einer Kapazität von 840 kWh zum Einsatz.

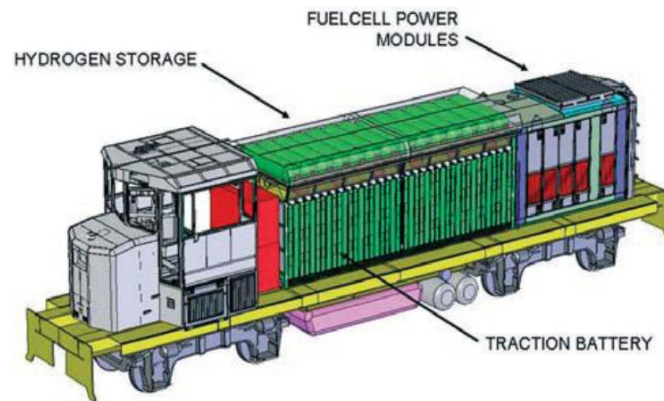


Abbildung 8.20: Anordnung Brennstoffzelle, Wasserstoffdruckbehälter, Batterien (126)

Die Antriebskomponenten decken im Betrieb Leistungsspitzen von bis zu 1,2 MW ab und stellen über einen Zeitraum von 10 h ca. 800 kWh zu Verfügung. (126)

8.6.7 Siemens Vectron - Mehrsystemlokomotive

Das modulare Konzept der Vectron, welche erstmals auf der Innotrans 2010 vorgestellt wurde, beinhaltet elektrische Varianten für bis zu vier verschiedene europäische Spannungssysteme sowie eine dieselelektrische Variante. Mitte 2014 erhielt eine Mehrsystem-Variante (Zweikraft) die Zulassung für das deutsche Schienennetz.

8.6.8 Alstom Lirex Experimental

Der Lirex (Leichter Innovativer Regionalexpress) wurde 2002 als Experimentalzug in Kooperation zwischen der Deutschen Bahn und Alstom in Betrieb genommen. Der als serieller Hybrid konzipierte Triebwagen ist mit zwei Schwungmassenspeichern (MDS K5 der Firma Magnet-Motor GmbH) mit einem Energiegehalt von je 2 kWh bei 12.000 U/min ausgerüstet (vgl. Abbildung 8.21).

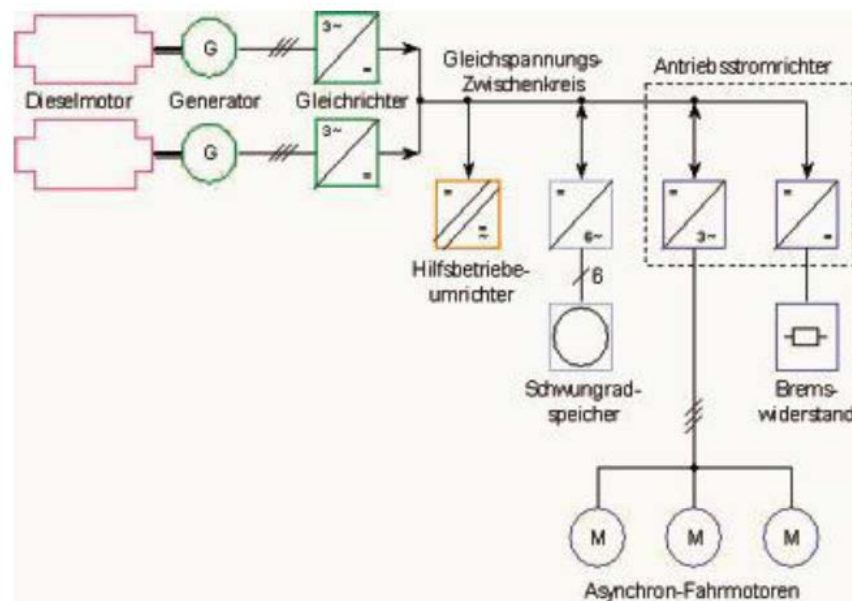


Abbildung 8.21: Antriebssystem eines Lirex-Halbzuges (127)

Durch den Einsatz der Schwungmassenspeicher sollten einerseits die Betriebskosten des Regionalexpress verringert und andererseits dessen Umweltverträglichkeit verbessert werden. Die Energieeinsparung fällt aufgrund der relativ kleinen Energiespeicher mit 10 % sehr gering aus. Das Fahrzeug befindet sich seit 2006 nicht mehr im Dienst. Die Gründe dafür liegen laut Alstom u.a. in den zusätzlichen Kosten für die Wartung eines Einzelgängers.

8.6.9 Voith Turbo Eco Pack

Aufbauend auf einem in Serie befindlichen Railpack wurde auf der Innotrans 2006 die Konzeptstudie des ECOpack vorgestellt. Dabei kommen eine Reihe unabhängig voneinander einsetzbarer Module zum Einsatz unter anderem ein System zur hydraulischen Rekuperation. Abbildung 8.22 zeigt hierzu den prinzipiellen Aufbau und den Hydraulikschaltplan.

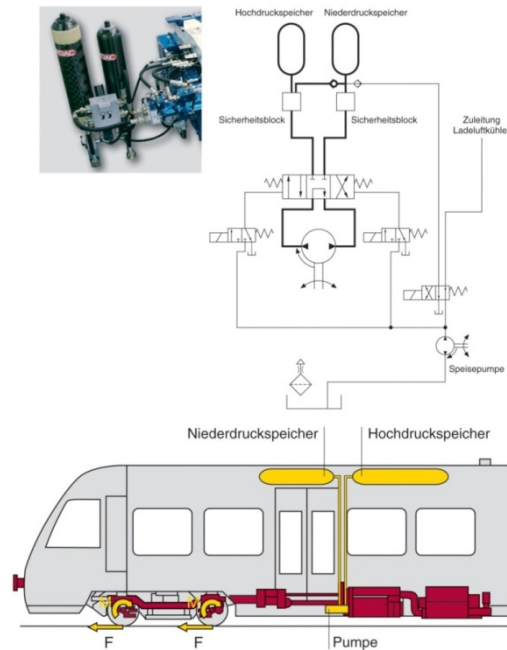


Abbildung 8.22: Prinzipieller Aufbau und Hydraulikschaltplan des Voith Turbo Eco Pack (128)

Beim Bremsvorgang wird Hydraulikflüssigkeit vom Niederdruckspeicher in den Hochdruckspeicher gepumpt und dort gespeichert (~ 300 bar). Die im Hochdruckspeicher gespeicherte Energie kann dabei zum Antrieb des Fahrzeugs (bis 25 km/h) und der Hilfsaggregate verwendet werden. Das System ermöglicht eine einfache Hybridisierung von Schienenfahrzeugen mit hydraulischem Getriebe. (128)

8.6.10 BNSF-Railway Lokomotiven mit LNG-Antrieb

2013 wurden von BSNF zwei SD40-25 Lokomotiven mit modifizierten Bi-Fuel Motoren ausgerüstet, welche mit einem Mischverhältnis von 80 % Erdgas und 20 % Diesel angetrieben werden. Dabei besteht die Möglichkeit bei LNG-Nichtverfügbarkeit auf den Betrieb mit 100 % Dieselbetrieb zurückzukehren. Ein 27.000 Gallonen-Tender mit doppelwandigen Kraftstofftanks stellt den Kraftstoff bereit. Die Testphase soll 2014 beginnen, da neue Sicherheitsbestimmungen für die Benutzung von LNG noch nicht ausgearbeitet sind. (129)

8.7 Wasserstoffgewinnung

Wasserstoff kommt nur in gebundener Form in Kohlenwasserstoffen und Wasser vor und muss verfahrenstechnisch gewonnen werden. Dabei wird zwischen einer dezentralen (on-site) und zentralen (off-site) Erzeugung unterscheiden. Die Hauptidezeugungsarten sind Dampfreformierung von Erdgas bzw. Methan, die Elektrolyse, die Vergasung bzw. Reformierung von Kohle oder Biomasse und der Verwendung von Wasserstoff, das als industrielles Nebenprodukt anfällt. (130) (131) Die Dampfreformierung stellt das derzeit wirtschaftlichste Verfahren dar. Dabei werden kohlenstoffreiche Gase (z.B. Erdgas oder Biogas) unter hohem Druck katalytisch in H_2 und CO_2 umgesetzt. Bei der Elektrolyse wird Gleichstrom in einem Elektrolyseur in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Die Elektrolyse ist die CO_2 -ärmste Erzeugungstechnologie, im Fall, dass regenerativ erzeugter Strom zum Einsatz kommt. (131)

Falls Wasserstoff zentral in Großanlagen erzeugt wird, muss er zur Tankstelle transportiert werden. Dies erfolgt üblicherweise durch Druckgasbehälter (vgl. Kapitel 3.2.3.5). Für die Betankung ist eine geeignete Infrastruktur erforderlich. Auf Grund der bei LH_2 auftretenden Boil-off-Problematik (Flüssigwasserstoff diffundiert durch die Behälterwand / 2 - 4 % am Tag) insbesondere bei geringer Nutzungsintensität der Anlagen wird überwiegend komprimiertes CH_2 eingesetzt. (130)

Für CH_2 sind Kompressoren zur Erzeugung des durch das Fahrzeug notwendigen Wasserstoffdrucks und ggf. Vorkühleinrichtungen sowie Dispenser erforderlich. Im Falle von LH_2 muss dem Dispenser ein Verdampfer vorgeschaltet werden. Wasserstoffanlagen erfordern hohe Anforderungen an die Dichtheit der Anlagen. (132) Fragen der Normierung und Standardisierung sowie der Zulassung im Bahnbereich sind derzeit noch offen. Eine umfassende Analyse der Vorschriften und der Gesetzeslage in Bezug auf Sicherheitsbestimmungen beim Transport (Einordnung in Gefahrgutkategorien), der Speicherung und Abgabe von Wasserstoff ist entsprechend notwendig.

8.8 Energiepreise

Im Folgenden sind die in dieser Studie angesetzten **Annahmen zu den Preisen** von **LPG, GtL, BtL, Biodiesel und Wasserstoff** für den Schienenverkehr in der Schweiz im Jahr 2014 näher beschrieben. Die Kosten für die erforderliche Tankstelleninfrastruktur sind in den Preisen nicht mit eingerechnet. Die jährlichen Preisänderungsraten bis 2050 von LPG, GtL und BtL folgen vereinfachend der Preisentwicklung von Dieselkraftstoff. Die jährliche Preissteigerung von Wasserstoff beträgt 0,5 % pro Jahr.

LPG

Für LPG lagen keine Preisdaten der SBB vor. Deshalb wurde basierend auf den durchschnittlichen Abgabepreisen an deutschen Tankstellen am 12.09.2014 (CNG 8,4 €-cent/kWh und LPG 10,5 €-cent/kWh, Quelle: www.gas-tankstellen.de) der zwischen CNG und LPG bestehende Differenzfaktor von 1,25 für die Ermittlung der LPG-Preise in der Schweiz angewendet. Für LPG wird in dieser Studie also mit einem um 25 % höheren spezifischen Preis gegenüber Erdgas gerechnet.

Biodiesel

Der Preis von Biodiesel ergibt sich aus dem Einkaufspreis des Biokraftstoffs selbst sowie der Energie- und Mehrwertsteuer. Eine Befreiung von der Energiesteuer nach TrÖBiV (vgl. Kapitel 3.2.3.1) bei Nachweis der ökologischen Vorteilhaftigkeit reduziert die Kosten um 75,87 Rappen je Liter Dieselkraftstoff (Stand 2014). Der Preis von Biokraftstoffen ist im Regelfall allerdings vor Steuern höher als der konventionellen Dieselkraftstoffs. Die konkreten Biodieselproduktionskosten hängen von der Art des verwendeten Grundstoffs, der Prozesstechnik und den produzierten Mengen ab. In dieser Studie wird der auf den Energieinhalt bezogene Preis von Biodiesel um 25 % geringer angesetzt als der des konventionellen Dieselkraftstoffs.

Synthetische Kraftstoffe (GtL, BtL)

Als synthetische Kraftstoffe werden *GtL* (Gas to Liquid) und *BtL* (Biomass to Liquid) in dieser Studie betrachtet. Der Preis für *GtL* hängt von den Kosten für den Grundstoff Erdgas, den Kosten für die Erzeugung des Treibstoffes in den Fischer-Tropsch-Synthese-Erzeugungsanlagen und den Distributionskosten sowie der steuerlichen Behandlung ab. Nach (133) sind die Produktionskosten (inkl. Erdgas-, Synthese- und Distributionskosten) von *GtL* umgerechnet um etwa 0,08 – 0,12 CHF/l höher als die von Benzin (bei einem Rohölpreis von 60 USD je Barrel). In dieser Studie wird mit einem um 0,10 CHF/l, bzw. 6 % höheren Preis gegenüber Dieselkraftstoff gerechnet.

Die Erzeugung von *BtL* ist mit einer großen Vielfalt an verschiedenen Biomasse-Grundstoffen (z. B. Stroh oder Restholz) möglich. In Abhängigkeit der verwendeten Grundstoffe, der Verfahren und der Größe der Anlagen ergeben sich unterschiedliche Kostenspannen für die Herstellung von BtL-Kraftstoffen. IEA (133) rechnet mit *GtL*-Produktionskosten (inkl. Erdgas-, Synthese- und Distributionskosten), die um umgerechnet etwa 0,26 CHF/l Dieseläquivalent höher als die von Benzin sind (bei einem Rohölpreis von 60 USD je Barrel). (58) berechnet für BtL etwa 0,60 CHF/Liter Dieseläquivalent höhere Produktions- und Distributionskosten gegenüber Dieselkraftstoff. Für die vorliegende Studie gehen wir für CtL von um 0,40 CHF/l höheren Kosten vor Steuern gegenüber Dieselkraftstoff aus. Gemäß der TrÖBiV (vgl. Kapitel 3.2.3.1) kann wie bei Biodiesel auch für BtL ein Entfall der Energiesteuer erfolgen, wenn die ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber konventionellen Kraftstoffen nachgewiesen ist. In dieser Studie wird ein um 20 % geringerer Preis von BtL gegenüber Dieselkraftstoff angesetzt.

Wasserstoff

Die Preise für den Bezug von Wasserstoff variieren stark je nach Primärenergieträger, Art der Erzeugung und Belieferung und anderer Faktoren. Auf Basis von vorliegenden Energiepreisdaten für die Abnahme von Wasserstoff in der Schweiz (aus zentraler Erdgasreformationsanlagen bzw. Prozesswasserstoff)

wird ein Preis von 13 CHF/kg (2014) angesetzt. Es wird mit leicht ansteigenden Preisen gerechnet (einerseits ist von Skalen- und Lerneffekten in der Produktion und Verteilung des Wasserstoffs und damit sinkenden Herstellungs- und Distributionskosten, andererseits aber mit steigenden Erdgas- bzw. Biogaspreisen zu rechnen). Bei der Verwendung von regenerativ erzeugtem Elektrolyse-Wasserstoff ist mit abweichenden Preisen zu rechnen.

Optional zur Verwendung von Wasserstoff aus der chemischen Industrie oder aus Erdgasreformationsanlagen kann der Wasserstoff auch unter Verwendung von regenerativ produziertem Strom erzeugt werden. Derzeit ist diese Art der Wasserstoffherstellung noch mit höheren Kosten verbunden als bei der konventionellen Wasserstofferzeugung auf Basis fossiler Energieträger. Auf Grund von technischen Weiterentwicklungen, steigenden Preisen fossiler Kraftstoffe und Skaleneffekten ist von in Zukunft deutlich sinkenden elektrolysebasierter Wasserstoffgestehungskosten zu rechnen, sodass auch die in dieser Studie angesetzten Erdgasbasierten Wasserstoffpreise durch erneuerbaren Elektrolyse-Wasserstoff unterschritten werden könnten.