

**Hybridlokomotive auf Basis H₂-
Brennstoffzelle und Elektrolyse von
Wasser als Range- Extender
vorwiegend für Rangiereinsatz auf
Eisenbahnstrecken mit und ohne
Fahrleitung**

Dokumenteigenschaften

Titel	Hybridlokomotive auf Basis H ₂ -Brennstoffzelle und Elektrolyse von Wasser als Range- Extender vorwiegend für Rangiereinsatz auf Eisenbahnstrecken mit und ohne Fahrleitung
Betreff	Machbarkeitsstudie
Erstellt von	HET, DLR, MU
Datum	26.06.2015
Version	2.1

Inhaltsverzeichnis

Dokumenteigenschaften	2
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	5
Formelverzeichnis.....	6
1. Einleitung	7
2. Systemkonzept Brennstoffzellenhybrid	9
2.1. Anforderungen	9
2.2. Systemtopologie und Betriebsstrategie	13
2.2.1. Topologie Machbarkeitsstudie	13
2.2.1.1. Alternative 1: Kopplung an DC-Zwischenkreis des Fahrzeugs	13
2.2.1.2. Alternative 2: Direkte Kopplung an die Fahrmotoren.....	16
2.2.1.3. Vor- und Nachteile der Alternativen im Vergleich	18
2.2.2. Betriebsstrategie Machbarkeitsstudie	19
2.2.3. Topologie Serienanwendung.....	19
2.2.4. Betriebsstrategie Serienanwendung.....	19
3. Systemauslegung	20
3.1. Betriebliche Auslegung.....	20
3.2. Auslegung Energie- und Wasserstoffsystem	21
3.3. Auslegung Elektrolyseanlage	24
4. Auswahl und Dimensionierung der Teilsysteme	25
4.1. Brennstoffzellensystem.....	25
4.2. Brennstoffzellen-Kühlsystem	26
4.3. Wasserstoff-Tanksystem.....	27
4.4. Elektrolysesystem	28
4.5. Batteriesystem	29
4.6. Batterie-Kühlsystem.....	36
4.7. Leistungselektronik.....	37
4.7.1. DC-DC-Konverter nicht potentialgetrennt.....	38
4.7.2. DC-DC-Konverter Potentialgetrennt (Alternative 1)	39
4.7.3. Pulswechselrichter für den Fahrbetrieb (Alternative 2)	42
4.8. Zugsteuerung	46
4.8.1. Kommunikation und Datenverarbeitung	46

4.9.	Gesamtsystem	47
4.9.1.	Aktuelle geometrische Darstellung der Rangierlokomotive.....	47
4.9.2.	Geometrische Integration mit Brennstoffzellen-Batterien-System	48
4.9.3.	Erläuterung zur geometrischen Integration	49
5.	Prototypenumsetzung	51
5.1.	Allgemein	51
5.2.	Realisierung.....	52
5.2.1.	Batteriedimensionierung (Energie) für Prototyp.....	54
5.2.2.	Sicherheitsaspekte im Prototyp.....	55
5.3.	Kostenaufstellung	57
6.	Ausblick	58
7.	Datenblätter Komponenten.....	59
7.1.	Hydrogenics HyPM HD180	59
7.2.	Brennstoffzellenkühler und Lüfter AKG OLK.CL AL225.....	60
7.3.	Alkalische Elektrolyseanlage McPhy McLyzer 10-10	61
7.4.	PEM-Elektrolysesystem Proton C10	63
7.5.	Wasserstofftanks Luxfer Dynecell	65
7.6.	Bauraum / Massen Brennstoffzelle, H ₂ -Versorgung, Kühlsystem	66
7.7.	Lithium-Ionen Batteriesystem AKASYSTEM 30M	67
7.8.	Lithium-Ionen Batteriesystem Ion-Board Regen 515V-216kW.....	69
7.9.	Lithium-Ionen Batteriesystem Ion-Board Regen 790V-210kW.....	71
7.10.	ApECOR DC-DC-Konverter 200kW.....	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Energiedichte zu Leistungsdichte bei Energiespeicher	9
Abbildung 2: Leistungs- und Energieprofil am Rad und an der Batterie, „worst case“-Anforderung ...	10
Abbildung 3: Radleistungsverläufe und resultierende Batterieenergie- und Leistungsanforderungen bei festgelegter Brennstoffzellenleistung.....	12
Abbildung 4: Systemtopologie Machbarkeitsstudie Alternative 1	15
Abbildung 5: Systemtopologie Machbarkeitsstudie Alternative 2	17
Abbildung 6: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm Rh2016 im Betrieb mit und ohne Fahrdracht	20
Abbildung 7: Geschwindigkeits- und Wegverlauf im Betrieb mit 240 t (links) bzw. 1400 t (rechts) Anhängelast	20
Abbildung 8: Vorauslegung Masse und Volumen des Antriebssystems ohne Elektrolyse	23
Abbildung 9: Vergleich Elektrolyseanlagen, normiert auf eine Wasserstofferzeugung von 1 kg/h	24
Abbildung 10: Beispielhafte geometrische Anordnung der Wasserstofftanks und resultierendes Bauvolumen	28
Abbildung 11: Übersichtsskizze des potentialgetrennten DC-DC-Konverters	40
Abbildung 12: Übersicht Selectron Steuermodule	46
Abbildung 13: Schematische Übersicht CAN Linientopologie	47
Abbildung 14: Aktuelle geometrische Darstellung der Rangierlokomotive 1063.....	47
Abbildung 15: Geometrische Integration mit Zweitsystem I.....	48
Abbildung 16: Geometrische Integration mit Zweitsystem II.....	49
Abbildung 17: Systemtopologie für Prototypenumsetzung	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen Wirkungsgrade.....	21
Tabelle 2: Annahmen Leistungs- und Energiedichten.....	21
Tabelle 3: Hauptkomponenten Brennstoffzellensystem.....	25
Tabelle 4: Hauptkomponenten Brennstoffzellen-Kühlsystem	26
Tabelle 5: Auswahl Wasserstoffspeicher.....	27
Tabelle 6: Vergleich von Batteriesätzen Akasol und Saft	33
Tabelle 7: Zusammenfassung des Vergleichs von Batteriesätzen	34
Tabelle 8: Abmessungen und Gewicht des BTMS von Saft	37
Tabelle 9: Abmessungen und Gewicht des DC/DC-Konverters ApECOR 200kW.....	38
Tabelle 10: Abmessungen und Gewichte der Komponenten für den potential-getrennten DC/DC-Konverters.....	42
Tabelle 11: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße P, luftgekühlt	44
Tabelle 12: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße P, wassergekühlt	44

Tabelle 13: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße U, luftgekühlt	44
Tabelle 14: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße U, wassergekühlt	45
Tabelle 15: Kostenaufstellung Realisierung Prototypenumbau	57

Formelverzeichnis

Formel 1: Energiebedarf Ausgang Brennstoffzellen-DCDC-Wandler	22
Formel 2: Elektrischer Energiebedarf Brennstoffzelle	22
Formel 3: Maximalleistung der Brennstoffzelle	22

1. Einleitung

Das folgende Projekt beschäftigt sich mit der Umrüstung einer elektrischen Verschlusslokomotive des Typs 1063 (ÖBB). Durch Ergänzung einer zusätzlichen Antriebsversorgung, in Form einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle kann das Fahrzeug außerhalb einer Oberleitung angetrieben werden. Mit dem Projekt soll ein erster Schritt in Richtung einer zukunftssträchtigen Bahninfrastruktur geschaffen werden. Anhand des Beibehaltens der Oberleitungskomponenten, ist ein dualer Einsatz der Lokomotive in Bereiche mit und ohne Oberleitung gewährleistet. Der Einsatz einer zusätzlichen On-Bord Elektrolyseanlage garantiert eine Versorgung der Brennstoffzelle mit Wasserstoff.

In Zeiten der Elektromobilität ist dieser Ansatz des Fördergebers FFG (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft) und den ÖBB (Österreichischen Bundesbahnen) ein sehr fortschrittliches Zeichen. Im Straßenverkehr wird die Brennstoffzellentechnologie bereits erfolgreich eingesetzt und diverse Anbieter bieten demnach schon verkaufsbereite Serienfahrzeuge an.

Ziel des Vorhabens sind die Reduzierung von Emissionen, sowie des Energie- und Ressourcenverbrauchs, die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit durch außergewöhnlich niedrige Betriebskosten sowie die Kompetenzführerschaft in einem speziellen Mobilitätsbereich.

State of the Art:

Elektrolokomotiven haben den Vorteil, dass sie über eine kontinuierliche externe Energieversorgung verfügen und daher dauerhaft einsetzbar sind, ohne dem System nach erreichter Strecke wieder Energie zuführen zu müssen. Dazu kommt, dass die Elektrolokomotive selbst keine schädlichen Emissionen erzeugt. Demgegenüber steht der gravierende Nachteil, dass bei einer rein elektrischen Verschlusslokomotive jeder befahrene Bahnabschnitt (d.h. auch Abstell- und Wartungsgleise) mit einer Oberleitung ausgestattet sein muss. Um auch auf Bahnabschnitten ohne Oberleitung den Eisenbahnverschub durchführen zu können, muss man sich daher meist einer Diesellokomotive bedienen. Diese benötigt zwar keine teure und wartungsintensive Oberleitung und ist meist schnell einsetzbar, allerdings muss der Kraftstoff (Diesel) mitgeführt werden. Durch diese zusätzliche Masse erhöht sich der Beschleunigungsaufwand. Bei einer Diesellok ohne elektrischer Leistungsübertragung kommt noch dazu, dass ein aufwendiges System für die Anfahrt aus dem Stillstand, z.B. basierend auf hydraulischen Wandlern, verwendet werden muss, da der Verbrennungsmotor nicht aus dem Stand Leistung abgeben kann.

Verschiedene Eisenbahngesellschaften setzen bereits Hybridlokomotiven für Verschlussarbeiten ein, welche im Normalbetrieb die Leistung aus Batterien beziehen. Aufgeladen werden diese Batterien durch ein Diesellaggregat mit mehreren hundert Kilowatt, welche auch für Traktionszwecke benutzt werden können. Auch die SBB Cargo setzt seit 2013 30 Zweikraftloks mit elektrischer und diesel-elektrischer Leistungsübertragung für Verschluss- und Güterbetrieb ein mit welchen sie bis zu 4000 Tonnen Kohlendioxid im Jahr einspart. Seit 2011 wird im Hamburger Hafen eine Hybridlok für Verschlussarbeiten eingesetzt. Die Nachteile des aktuellen Antriebssystems sind der geringe Wirkungs-

grad und der Wartungsaufwand. Um die Fahrgeschwindigkeit zu steuern, muss der eingesetzte Dieselmotor die Drehzahl variieren. Der Motor läuft daher nicht im optimalen Wirkungsgradbereich. Zusätzlich müssen die Wirkungsgrade von Generator, der beiden Antriebsmotoren und der Getriebe berücksichtigt werden, welche die Leistung zusätzlich verringern. Ein weiterer Nachteil ist die Abhängigkeit vom Rohstoff Diesel und den damit verbundenen Ölpreisschwankungen.

Ziel:

Anhand der Problemstellung ist das wesentliche Ziel, ein Konzept und die zugehörige Auslegung eines Zusatzsystems für den zeitweisen oberleitungsfreien Betrieb der Rangierlokomotive bei verminderter Antriebsleistung zu erarbeiten. Das Zusatzsystem soll den autarken Verschubbetrieb, über wenige Stunden mit bis zu 200 kW Antriebsleistung am Rad ermöglichen. Hierbei spielt die notwendige Dimensionierung des Gesamtsystems eine wichtige Rolle, um die Anforderungen an die Antriebsleistung und –energie zu erfüllen, den vorhandenen Bauraum nicht zu überschreiten und ein gutes Preis/Leistungsverhältnis zu realisieren. Das dazu notwendige Energiemanagementsystem muss sich auf die verschiedensten Einsatzbereiche der Lokomotive einstellen lassen können bzw. die Lastfälle selbständig erkennen und demnach das System regeln.

Um die Hybridvariante der Lokomotive On-Board mit Wasserstoff zu versorgen, müssen auch konstruktive Verbesserungen getroffen werden, um äußere Einflüsse zu minimieren.

Vorgehen:

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wird die Kombination von Brennstoffzellen und elektrischen Energiespeichern zur Erfüllung der Anforderungen untersucht und ausgelegt. Dazu wird zunächst die vorgegebene grobe Anforderungsdefinition analysiert und weiter detailliert. Anhand der hieraus resultierenden Anforderungen werden elektrische Schaltungskonzepte für die Kombination von Brennstoffzelle und Energiespeicher sowie für die Integration in die bestehende Lok entworfen und die zugehörigen Komponenten anhand von Datenblättern marktverfügbarer Systeme ausgelegt. Hierauf aufbauend wird ein mögliches Integrationskonzept anhand der in der 1063-Verschublok verfügbaren Bauräume entwickelt und dargestellt.

2. Systemkonzept Brennstoffzellenhybrid

2.1. Anforderungen

Vorgaben vom Auftraggeber:

- Energiemenge am Rad: 200 kWh
- Leistung am Rad: 150 – 200 kW
- Betriebsdauer ohne Oberleitung: 2 h

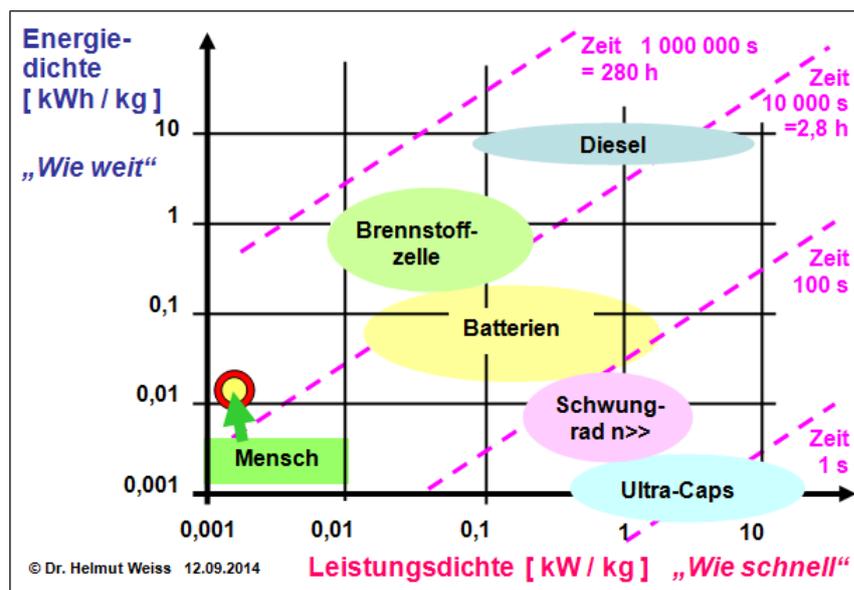


Abbildung 1: Übersicht Energiedichte zu Leistungsdichte bei Energiespeicher

Durch die Betriebsdauer ohne Oberleitung von 2 Stunden stoßen elektrochemische Speicher auch in Ausbildung als Lithium-Ionen-Batterien an technologische Grenzen (Abbildung 1). Die Lithium-Ionen-Batterie als langlebige Hochstrom- und Hochenergiebatterie bietet die Deckung der augenblicklich benötigten Leistung auch bei kurzzeitigen Leistungsspitzen (Beschleunigungsfahrt im Bereich einiger Minuten) an, kann Bremsenergie in der Rückspeisung aufnehmen, muss jedoch komplementär durch die Brennstoffzelle als länger wirkende Energiequelle ergänzt werden, um die gesamte Masse des Systems in Grenzen zu halten. Die Kombination von Brennstoffzelle und Lithium-Ionen-Batterie kann den Bedarf der Hybridlokomotive sowohl an Leistung wie auch an Energie optimal abdecken.

Aus der gesamten umzusetzenden Energie und der Betriebsdauer ergibt sich ein mittlerer Energiebedarf am Rad von 100 kWh pro Stunde bzw. eine mittlere Leistung von 100 kW. Über den zeitlichen Verlauf der Leistungsanforderungen kann daraus keine genauere Aussage gemacht werden. Im Folgenden werden daher Lastzyklen angenommen, das Betriebsverhalten analysiert und entsprechende Auslegungen für die Kombination von Brennstoffzelle und Energiespeicher vorgenommen.

Ein Extremfall für die Auslegung eines Energieversorgungssystems aus Brennstoffzelle und Energiespeicher besteht dann, wenn über eine Stunde konstant die maximale Antriebsleistung von 200 kW benötigt wird. Abbildung 2 links zeigt den Leistungs- und Energieverlauf für den Extremfall, in dem nach einer Stunde Fahrt ohne Antriebsleistung die Maximalleistung für die Dauer von einer Stunde benötigt wird.

Unter der Annahme einer festgelegten elektrischen Brennstoffzellenleistung von beispielsweise 150 kW ergäbe sich unter Einbeziehung aller Einzelwirkungsgrade im Antriebsstrang eine gesamte Versorgungsleistung von ca. 210 kW und damit eine Batterieleistung von ca. 60 kW in der Phase der höchsten Leistungsanforderung (Abbildung 2 rechts). Dieser „worst-case“-Fall erfordert (bei einer festgelegten Brennstoffzellenleistung) die größte Energieentnahme aus der Batterie, da während der Leistungsanforderung kein Nachladen erfolgen kann. Die Batterie muss entsprechend zuvor aufgeladen worden sein, in diesem Beispiel in der gleichen Zeit, also mit der gleichen Leistung, welche durch die Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt wird. Zur Deckung der Verluste ist dies eine Energie von 75 kWh.

Bei Verkürzung der Lastzyklusintervalle wird die von der Batterie bereitzustellende Energiegemenge geringer. Dies ist qualitativ für unterschiedliche Lastzyklusintervalle in Abbildung 3 dargestellt. Dabei sind links die Leistungs- und Energieanforderungen am Rad dargestellt, rechts die resultierende Batterieleistung (Entladen = positive Leistung) und der Energieverlauf. Die angenommene Brennstoffzellenleistung ist in allen Beispielen identisch.

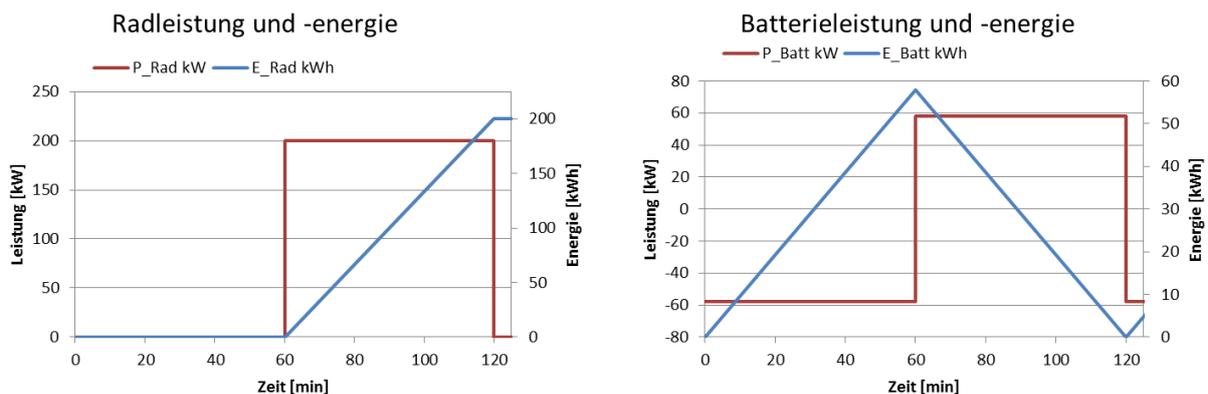


Abbildung 2: Leistungs- und Energieprofil am Rad und an der Batterie, „worst case“-Anforderung

Anhand der gezeigten Verläufe wird deutlich, dass bei dieser angenommenen Leistungsauslegung der Brennstoffzelle die Batterielade- und -entladeleistung unabhängig von der Dauer der Leistungsintervalle am Rad konstant ist. Dagegen ist die notwendige Batterieenergie linear von der Dauer der Leistungsintervalle abhängig.

In der Rangierverkehr-Anwendung *Zugbildung* sind die typischen Intervalldauern mit voller Leistungsanforderung im Bereich von unter einer bis zu wenigen Minuten. Bei der Anwendung *Wagenzustellung* z.B. zu Industriekunden ist anhand der bereitgestellten Datenbasis von Zeitintervallen kleiner 15 Minuten auszugehen. Für die weitere Bearbeitung der Machbarkeitsstudie wird daher davon ausgegangen, dass die maximale Leistung von 200 kW am Rad über nicht mehr als 30 min kontinuierlich angefordert wird.

Die gegebenen Anforderungen enthalten keine Angaben zur Bremsenergieerückspeisung. Für die Systemauslegung wird daher davon ausgegangen, dass keine Bremsenergie in die Batterie zurückgespeist wird. Diese Annahme führt zwar zu einem größeren Energiebedarf aus der Batterie bzw. Brennstoffzelle, stellt andererseits aber die Betriebsfähigkeit des Systems auch unter ungünstigen Umständen sicher. Für den Fall der Energieerückspeisung wird sich demnach eine Verbesserung der Performance einstellen.

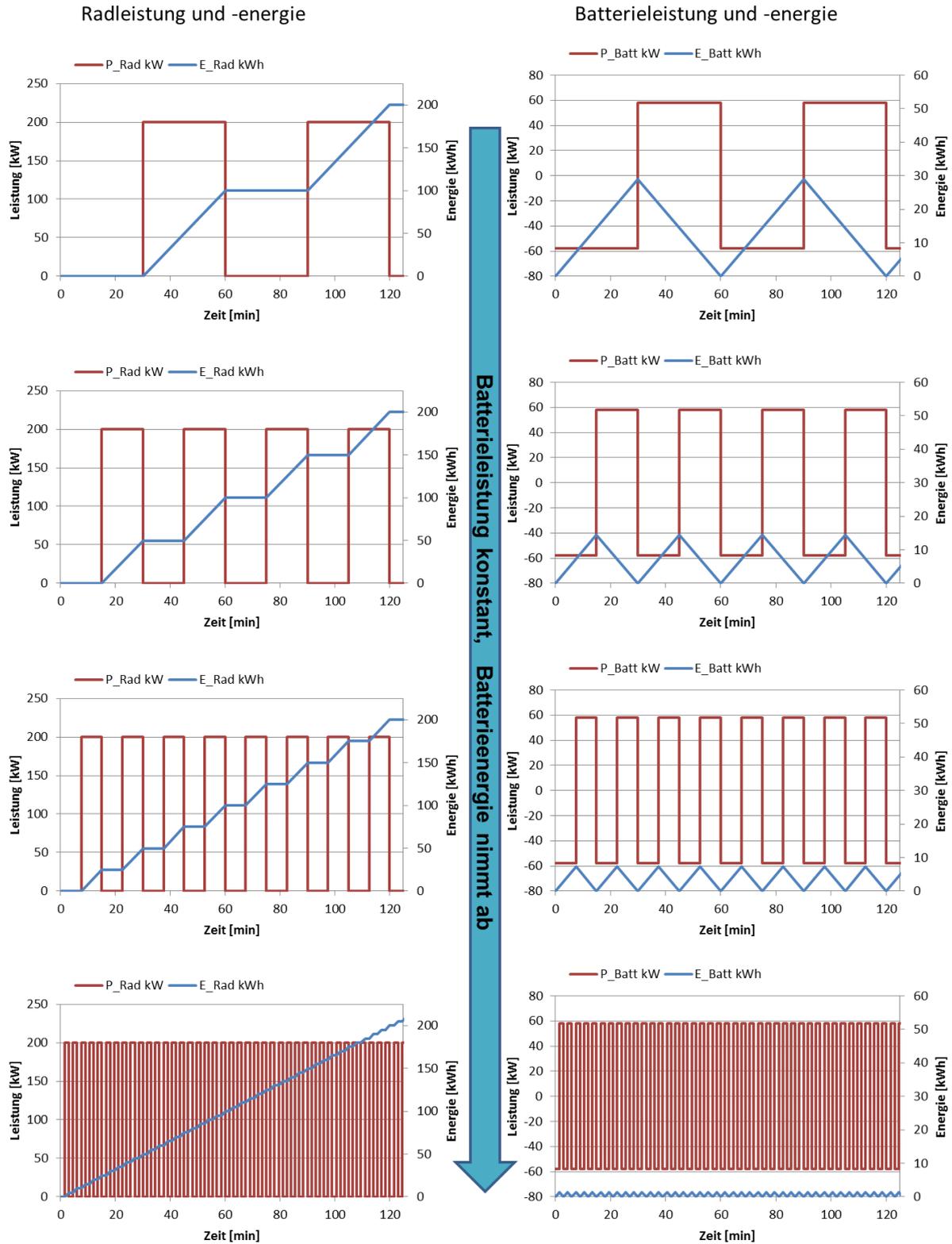


Abbildung 3: Radleistungsverläufe und resultierende Batterieenergie- und Leistungsanforderungen bei festgelegter Brennstoffzellenleistung

2.2. Systemtopologie und Betriebsstrategie

Beim Entwurf der Systemtopologie ist zu unterscheiden zwischen der Topologie für einen Prototypen (Einzelfahrzeug) basierend auf der Rangierlokomotive Rh2016 und der Topologie für eine zukünftige serien- oder seriennahe Anwendung. Für den Prototyp soll eine Topologie gewählt werden, die mit geringem Aufwand die in der Rangierlok bereits vorhandenen Komponenten ergänzt, wobei möglichst geringe Eingriffe in das bestehende Antriebssystem vorgenommen werden. Bei einer zukünftig möglichen serien- oder seriennahen Anwendung ist dagegen davon auszugehen, dass das Antriebssystem neu konzipiert wird und somit auch aufwändigere Integrationskonzepte wie z.B. die direkte Kopplung der Energieversorgungssysteme mit den Antriebsstromrichtern oder die Verwendung der Batterie als Stützelement für die Zwischenkreisspannung umgesetzt werden können.

2.2.1. Topologie Machbarkeitsstudie

Um den Aufwand bei der Umrüstung der existierenden Rangierlokomotive gering zu halten, werden für die Machbarkeitsstudie folgende Randbedingungen festgelegt:

- Antriebsstromrichter und Fahrmotoren bleiben unverändert
- Transformator und Gleichrichter bleiben unverändert
- Zwischenkreisstützkondensatoren bleiben unverändert
- BZ- und Batteriesystem auf Niederspannungsebene < 1000V
- Ladungserhaltungs-Betrieb (Charge-Sustaining) des Energiespeichers, d.h. keine oder nur geringe Änderungen des Batterieladezustands zwischen Beginn und Ende des Lastzyklus

Durch den Charge-Sustaining-Betrieb wird erreicht, dass prinzipiell über beliebig große Zeiträume ohne Oberleitung gefahren werden kann. Dabei kann jederzeit die volle Leistung (200kW am Rad) abgerufen werden. Die Betriebsdauer ohne Oberleitung ist lediglich durch den an Bord verfügbaren Wasserstoffvorrat limitiert und kann somit in weiteren Stufen beliebig erweitert werden.

Aus den Randbedingungen ergeben sich zwei mögliche Topologien für die Integration des Brennstoffzellen-Batteriesystems in die Rangierlokomotive, die im Folgenden vorgestellt werden.

2.2.1.1. Alternative 1: Kopplung an DC-Zwischenkreis des Fahrzeugs

Für die Entwicklung der Prototypen-Systemtopologie Alternative 1 werden die folgenden Randbedingungen definiert:

- Keine Rückspeisung von Bremsenergie in die Energiespeicher
- Batterieladen unter Oberleitung soll möglich sein, wird in der Auslegung vernachlässigt

Es ergeben sich folgende Anforderungen:

- Potentialtrennende Kopplung der Batterie und Brennstoffzelle an den Fahrzeug-Zwischenkreis
- Batterie wird durch die Brennstoffzelle in Zeiträumen mit geringer Traktionsleistungsanforderung geladen

Für die Topologie des Prototypsystems Alternative 1 (Abbildung 4) wird festgelegt:

- Brennstoffzellensystem (20) wird über uni-direktionalen, nicht galvanisch getrennten DC/DC-Wandler (23) mit der Batterie (10) verbunden
- Batterie (10) und DC/DC-Wandler der Brennstoffzelle (23) werden über einen weiteren direktionalen DC/DC-Wandler (40) potentialtrennend mit dem bestehenden Fahrzeugzwischenkreis (33) verbunden
- Elektrolyse-Anlage (10) könnte im OL-Betrieb über einen die Spannung herunter setzenden Spartransformator oder über einen an der Wicklungsanzapfung der Hilfsbetriebe gesteuerten Gleichrichter angeschlossen werden.

2.2.1.2. Alternative 2: Direkte Kopplung an die Fahrmotoren

Für die Entwicklung der Prototypen-Systemtopologie Alternative 2 werden die folgenden Randbedingungen definiert:

- Rückspeisung von Bremsenergie in die Energiespeicher im OL-freien Betrieb ist möglich
- Kein Batterieladen unter Oberleitung
-

Es ergeben sich die folgenden Anforderungen:

- Batterie wird durch die Brennstoffzelle in Zeiträumen mit geringer Traktionsleistungsanforderung geladen
- Brennstoffzellen-Batteriesystem wird nicht mit dem bestehenden Fahrzeugzwischenkreis verbunden

Für die Topologie des Prototypsystems Alternative 2 (Abbildung 5) wird festgelegt:

- Brennstoffzellensystem (20) wird über uni-direktionalen, nicht galvanisch getrennten DC/DC-Wandler (23) mit der Batterie (10) verbunden
- Batterie (10) und DC/DC-Wandler der BZ (23) werden über einen eigenen Antriebsstromrichter (50) direkt an die Fahrmotoren gekoppelt
- Zur Kopplung des BZ-Batteriesystems an die Fahrmotoren werden zusätzliche Schütze in den dreiphasigen Zuleitungen der Fahrmotoren eingebaut, über die sich entweder das bestehende oder das Zusatz-Antriebssystem mit den Fahrmotoren verbinden lässt
- Elektrolyse-Anlage (10) könnte im OL-Betrieb über einen die Spannung herunter setzenden Spartransformator oder über einen an der Wicklungsanzapfung der Hilfsbetriebe gesteuerten Gleichrichter angeschlossen werden.

2.2.1.3. Vor- und Nachteile der Alternativen im Vergleich

Vorteile Alternative 1:

- Laden der Batterie unter Oberleitung möglich
- Topologie könnte mit geringen Abwandlungen auch in einem Serienfahrzeug umgesetzt werden

Nachteile Alternative 1:

- Aufwändige Eingriffe in die Steuerungstechnik des bestehenden Antriebsstromrichters und Neuzulassung der modifizierten Stromrichter-Steuerung notwendig
- Bremsenergieerückspeisung im OL-freien Betrieb steuerungstechnisch aufwändig umzusetzen
- Niedrigere Spannung am Fahrzeugzwischenkreis im OL-freien Betrieb (<1000V)
- Potentialtrennender DC/DC-Wandler mit im Vergleich großer Masse notwendig
- Größere Wirkungsgradverluste aufgrund der Hintereinanderschaltung von potentialtrennendem DC/DC-Wandler und bestehendem Antriebsstromrichter

Vorteile Alternative 2:

- Einfachere Integration in das bestehende Antriebssystem
- Nur geringfügige Eingriffe in die bestehende Antriebssteuerung notwendig
- Bremsenergieerückspeisung im OL-freien Betrieb durch eigenen Antriebsstromrichter vergleichsweise einfach umsetzbar
- Weitgehend unabhängig aufbaubares Zusatzsystem für den OL-freien Betrieb
- Geringere Wirkungsgradverluste, da nur der Antriebsstromrichter zwischen dem Batterie-Zwischenkreis und den Fahrmotoren verlustbehaftet ist

Nachteile Alternative 2:

- Laden des Energiespeichers im OL-Betrieb nicht möglich

Fazit

Da nach derzeitigem Wissensstand die Eingriffsmöglichkeiten in die bestehenden Antriebsstrukturen und deren Steuerung nicht bekannt sind, werden im Folgenden beide Alternativen weiter betrachtet. Beide Alternative können mit der gleichen Betriebsstrategie verwendet werden. Die Auslegung der Komponenten erfolgt anhand der Alternative 1, da hier aufgrund der größeren Wirkungsgradverluste mehr Leistung und Kapazität installiert werden muss. Für Alternative 2 werden sich durch diese Auslegung eine etwas größere Leistung am Rad sowie eine größere Reichweite bei gleicher installierter Batteriekapazität und Wasserstofftankgröße ergeben.

2.2.2. Betriebsstrategie Machbarkeitsstudie

Die Betriebs- oder auch Steuerungsstrategie definiert, wie die Teilsysteme Brennstoffzelle und Batterie gesteuert werden, um die angeforderte Leistung bereitzustellen. Übergeordnete Ziele der Betriebsstrategie sind:

- Variation des Batterieladezustands nur innerhalb eines definierten Bereichs (Charge-Sustaining-Betrieb)
- Am Ende des zweistündigen OL-freien Betriebs soll der Batterieladezustand gleich oder nahe dem Ausgangsladezustand bei Beginn des OL-freien Abschnitts sein

Somit ergibt sich, dass in Zeiträumen mit großer Traktionsleistungsanforderung Batterie und Brennstoffzelle gemeinsam die Leistungsanforderung decken, während in Zeiträumen ohne oder mit geringer Leistungsanforderung die Brennstoffzelle mehr Leistung zur Verfügung stellt, als für die Traktion erforderlich wäre und der Überschuss in der Batterie gespeichert wird.

2.2.3. Topologie Serienanwendung

Für die Serienanwendung bietet es sich an, die Batterie direkt an den Zwischenkreis anzuschließen. Aufgrund der begrenzten Maximalspannung der Batterie ist es dazu jedoch erforderlich, die Zwischenkreisspannung abzusenken. Weiterhin muss die Zwischenkreisspannung auch im Oberleitungsbetrieb gesteuert werden, da es sonst zu unkontrolliertem Laden und Entladen der Batterie kommen kann. Dies ist durch entsprechende Steuerungsverfahren der Primärseite und der Antriebsstromrichter möglich, kann aber dazu führen, dass die Rückspeisung unter Oberleitung eingeschränkt wird. Der in der Topologie der Machbarkeitsstudie vorgeschlagene potentialtrennende DC/DC-Wandler (40) könnte in einer Serienanwendung für die Anbindung der Brennstoffzelle an den von der Batterie gestützten Fahrzeugzwischenkreis verwendet werden.

2.2.4. Betriebsstrategie Serienanwendung

In einer Serienanwendung kann aufgrund der notwendigen Steuerung der Zwischenkreisspannung sowohl im oberleitungsfreien als auch im Betrieb unter Oberleitung Bremsenergie in die Batterie zurückgespeist werden. Weiterhin kann die Batterie im Betrieb unter Oberleitung durch diese geladen werden. Für die Serienanwendung mit veränderter Topologie ist die für die Machbarkeitsstudie vorgeschlagene Betriebsstrategie daher lediglich als Grundlage zu betrachten, die mit in die Ansteuerung von Primärseite und Antriebsstromrichter integriert werden muss.

3. Systemauslegung

3.1. Betriebliche Auslegung

Anhand der vorhandenen Daten zur Rh2016 und der gegebenen Anforderungen zur Leistung am Rad im OL-freien Betrieb wurde ein Zugkraftdiagramm erstellt (Abbildung 6). Das Zugkraftdiagramm enthält die Zugkraftkurve der bestehenden Lok im OL-Betrieb sowie die sich ergebende Zugkraftkurve für den OL-freien Betrieb. Für die eingezeichnete Fahrwiderstandskurve wurde zusätzlich zum Fahrwiderstand der Lokomotive die Wagenzugwiderstandskraft nach Strahl für einen 240 t Zug mit voll beladenen 3 Wagen angenommen.

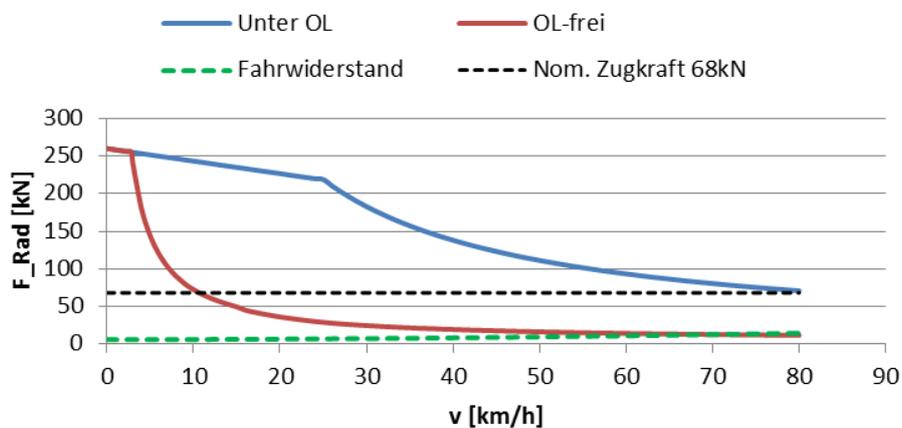


Abbildung 6: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm Rh2016 im Betrieb mit und ohne Fahrdrabt

Abbildung 7 zeigt Geschwindigkeit und zurückgelegte Distanz bei Beschleunigungsvorgängen mit voller Antriebsleistung (200 kW am Rad) in der Ebene. Mit einer Anhängelast von 240 t beschleunigt das Fahrzeug innerhalb von 60 s auf etwa 27,5 km/h und legt dabei eine Distanz von ca. 315 m zurück. Nach 2,5 Minuten wird eine Geschwindigkeit von 41 km/h erreicht, dabei wird ein Weg von 1,19 km zurückgelegt.

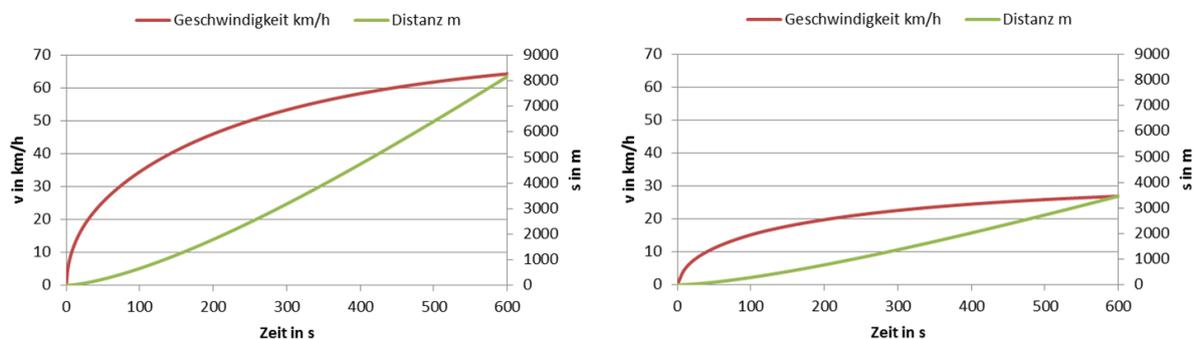


Abbildung 7: Geschwindigkeits- und Wegverlauf im Betrieb mit 240 t (links) bzw. 1400 t (rechts) Anhängelast

Mit 1400 t Anhängelast erreicht das Fahrzeug nach 60 s eine Geschwindigkeit von 12 km/h und legt bis dahin 133 m zurück. Bis zum Erreichen von 20 km/h werden etwa 3,5 min und 800 m Distanz benötigt.

3.2. Auslegung Energie- und Wasserstoffsystem

Aufgabe der Systemauslegung ist, eine sinnvolle Kombination von Brennstoffzellen- und Batteriesystemen zu entwickeln, mit der die längsdynamischen Anforderungen erfüllt werden können. Weiterhin soll das konzipierte System möglichst geringen Bauraumbedarf und geringe Masse aufweisen. Da im Rahmen der vorliegenden Studie aufgrund des Aufwands keine umfassenden Optimierungsrechnungen durchgeführt werden können, wird die Systemauslegung anhand einer Parametervariation vorgenommen. Variiert wird dabei der Parameter Brennstoffzellenleistung. Für eine gegebene Systemtopologie und Betriebsstrategie resultieren die Leistung und die tatsächlich genutzte Energiemenge bzw. der Ladehub der Batterie.

Die Systemauslegung erfolgt anhand von Leistungs- und Energiebedarfsrechnungen unter der Annahme konstanter, mittlerer Komponentenwirkungsgrade. Für die Leistungsübertragung vom Zwischenkreis zum Rad wird ein konstanter, kombinierter Wirkungsgrad von 80 % angenommen. Hieraus resultiert am Zwischenkreis ein Leistungsbedarf von 250 kW und ein Energiebedarf von 250 kWh, die durch das kombinierte System aus Brennstoffzelle und Batterie zu decken sind. Weitere Annahmen für Wirkungsgrad, Leistungs- und Energiedichten sind Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst.

Wirkungsgrade:

η_{BZ}	45,0%
$\eta_{Batt\ Lade}$	94,5%
$\eta_{Batt\ Entlade}$	94,5%
$\eta_{DC/DC}$	97,0%
$E_{H_2} [kWh/kg]$	33,3

Tabelle 1: Annahmen Wirkungsgrade

		Brennstoffzelle	Batterie	DC/DC-Wandler	Wasserstofftanks 350 bar	
Leistungsdichte	kW/dm ³	0,200	0,122	0,5	Spez. Tankmasse gefüllt [kg/kg H ₂]	18,8
Spez. Leistung	kW/kg	0,275	0,118	0,5	Spez. Volumen [dm ³ /kg H ₂]	54,9
Energiedichte	kWh/dm ³	-	0,050	-	-	-
Spez. Energie	kWh/kg	-	0,067	-	-	-

Tabelle 2: Annahmen Leistungs- und Energiedichten

Ein erster Ansatzpunkt für die Auslegung der Brennstoffzelle ist die am Zwischenkreis (Nr. 33) während des OL-freien Betriebs zur Verfügung zu stellende Energiemenge. Mit dem Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers zum Zwischenkreis ergibt sich die am Eingang des DC/DC-Wandlers (Nr. 40) zur Verfügung zu stellende Energiemenge. Für eine ausgeglichene Ladebilanz muss die Brennstoffzelle mindestens diese Energiemenge bereitstellen, d.h. die mittlere Leistung am Ausgang des Brennstoffzellen-DC/DC-Wandlers (Nr. 23) betrüge bei 2 h Betrieb betragsmäßig die Hälfte der zur Verfügung zu stellenden Energiemenge. Damit sind jedoch die Leistungsanforderungen am Eingang des Zwischenkreis-DC/DC-Wandlers (Nr. 40) nicht zu erfüllen.

Für die Ermittlung der kleinstmöglichen Brennstoffzellenleistung hilft ein Gedankenexperiment. Würde die BZ auf die Leistung ausgelegt, mit der die erforderliche Energiemenge exakt bereitgestellt wird, dann müsste im Extremfall (An/Aus-Betrieb mit 200 bzw. 0 kW Leistung am Rad, vgl. Leistungsprofil mit 60 min Anschaltzeit) genau die Hälfte der Energie in der Batterie zwischengespeichert werden. Durch das Zwischenspeichern in der Batterie fallen Verluste an, die zusätzlich durch die Brennstoffzelle aufzubringen sind. Somit ergibt sich ein maximaler Energiebedarf am Ausgang des Brennstoffzellen-DC/DC-Wandlers von

$$E_{DCDC,BZ,out} = \frac{1}{2} \cdot E_{DCDC,ZK,in} + \frac{1}{2} \cdot E_{DCDC,ZK,in} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{Batt,Lade}} \cdot \eta_{\text{Batt,Entlade}}}$$

Formel 1: Energiebedarf Ausgang Brennstoffzellen-DCDC-Wandler

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Brennstoffzellen-DC/DC-Wandlers ist vom Brennstoffzellensystem eine elektrische Energiemenge von

$$E_{BZ,el} = E_{DCDC,BZ,out} \cdot \frac{1}{\eta_{DCDC,BZ}}$$

Formel 2: Elektrischer Energiebedarf Brennstoffzelle

innerhalb der zwei Stunden Betriebszeit bereitzustellen. Hieraus ergibt sich der mittlere elektrische Leistungsbedarf an den Anschlüssen der Brennstoffzelle. Diese Leistung muss mindestens verfügbar sein, um eine ausgeglichene Ladebilanz zu gewährleisten und stellt damit die untere Grenze der sinnvollen Brennstoffzellenleistung dar.

Die obere Grenze der sinnvollen Brennstoffzellenleistung ist anhand der maximalen Leistungsanforderung zu ermitteln: Gäbe es keine Batterie, dann müsste der gesamte Leistungsbedarf durch die Brennstoffzelle gedeckt werden. Somit berechnet sich die maximale elektrische Leistung am Ausgang der Brennstoffzelle mit den angenommenen Wirkungsgraden für die Leistungsübertragung vom Zwischenkreis zum Rad und der beiden DC/DC-Wandler aus:

$$P_{BZ,el,max} = P_{Rad,max} \cdot \frac{1}{\eta_{ASR} \cdot \eta_{DCDC,ZK} \cdot \eta_{DCDC,BZ}}$$

Formel 3: Maximalleistung der Brennstoffzelle

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Grenzwerte für die Auslegung des Energiesystems:

- Anforderung Energiemenge am Zwischenkreis (33): 250 kWh
- Energiemenge am Eingang DCDC-Wandler Zwischenkreis (40): 258 kWh
- Energiemenge am Ausgang DCDC-Wandler Brennstoffzelle (23): 266,1 kWh
- Elektrische Energiemenge am Ausgang Brennstoffzelle (20): 274,3 kWh
- Mittlere elektrische Ausgangsleistung Brennstoffzelle (20): 137,2 kW
- Maximale nutzbare elektrische Ausgangsleistung Brennstoffzelle (20): 265,7 kW

Für die Machbarkeitsstudie sollen soweit möglich kommerziell verfügbare Systeme eingesetzt werden. Brennstoffzellensysteme mit größerer Leistung werden typischerweise durch Kombination mehrerer identischer Brennstoffzellenstacks aufgebaut, wobei als Basissystem häufig 30 kW-Stacks eingesetzt werden. Die Anzahl der zu betrachtenden Varianten reduziert sich folglich auf diskrete Brennstoffzellenleistungen von 137, 150, 180, 210, und 240 kW. Für die Masse und das Volumen des Gesamtsystems aus Batterie, Brennstoffzelle, DC/DC-Wandlern und Wasserstofftank ergeben sich in Abhängigkeit der installierten Brennstoffzellenleistung die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten Werte.

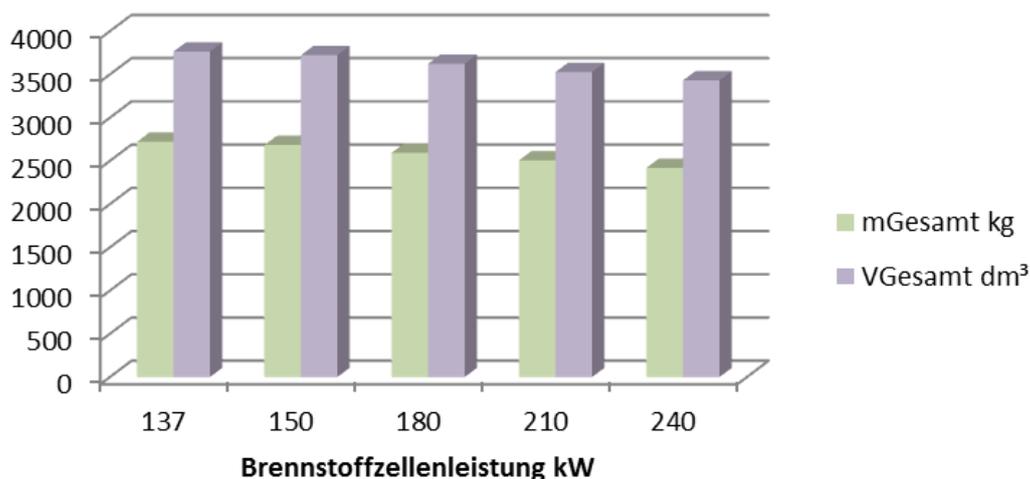


Abbildung 8: Vorauslegung Masse und Volumen des Antriebssystems ohne Elektrolyse

Es wird deutlich, dass eine größere Brennstoffzellenleistung sich positiv auf Bauraum und Masse des Gesamtsystems auswirkt. Aufgrund der Limitierung der Leistungsdynamik von Brennstoffzellen wird darauf verzichtet, dieses Potential komplett auszuschöpfen. Für die Machbarkeitsstudie wird daher eine Brennstoffzellenleistung von 180 kW elektrisch gewählt, die einen guten Kompromiss aus Gesamtmasse und Volumen einerseits und ausreichend Batterieleistung zur Deckung dynamischer Leistungsanpassungen darstellt.

Für die Batterie ergeben sich aus der gewählten Systemauslegung die folgenden Kenndaten:

- Max. Ladeleistung: 86 kW, Max. Entladeleistung: 86 kW

- Maximal nutzbarer Energiehub: 43 kWh

3.3. Auslegung Elektrolyseanlage

Für den Einsatz im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden an die Elektrolyseeinheit die folgenden Anforderungen definiert:

Anhand der Grobauslegung ergibt sich ein täglicher Wasserstoffbedarf von ca. 19 kg, der im Betrieb unter Oberleitung durch eine Elektrolyseanlage erzeugt werden soll. Nach derzeitigem Kenntnisstand werden Elektrolysesysteme ausschließlich stationär eingesetzt. Dabei kommen überwiegend zwei verschiedene Technologien zum Einsatz, alkalische Elektrolyse (AEL) und Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM-EL).

- täglicher Wasserstoffbedarf ~ 18,1 kg
- Wasserstofferzeugung im Betrieb unter Oberleitung, 20h/Tag
- Wassertank ausreichend für einen Tag Wasserstofferzeugung (~220 l Wasser/Tag)
- Notwendige Wasserstofferzeugungsmenge 0,91 kg/h entspricht 10,1 Nm³/h

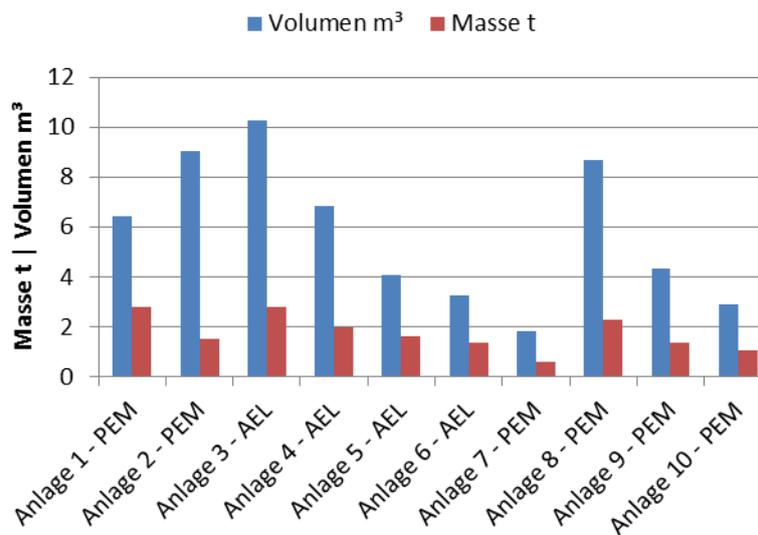


Abbildung 9: Vergleich Elektrolyseanlagen, normiert auf eine Wasserstofferzeugung von 1 kg/h

4. Auswahl und Dimensionierung der Teilsysteme

4.1. Brennstoffzellensystem

Für die Machbarkeitsstudie wurde die elektrische Ausgangsleistung der Brennstoffzelle auf 180 kW festgelegt. Für die Machbarkeitsstudie wurde ein Brennstoffzellensystem der Firma Hydrogenics vom Typ HyPM HD180 (Datenblatt vgl. Kap. 7.1) mit den folgenden charakteristischen Kenndaten ausgewählt:

- Nenn-/Maximalleistung: 180 / 198 kW
- Mittlere Leistung: 137,2 kW
- Ausgangsspannungsbereich: 360 – 720 V_{DC}
- Masse (inkl. Luftversorgung und Kühlmittelpumpe): <720 kg
- BZ-Modul (inkl. Luftversorgung und Kühlmittelpumpe) L x B x H: 1085 x 1582 x 690 mm
- Volumen BZ-Modul (inkl. Luftversorgung und Kühlmittelpumpe): 1122 dm³

Das Brennstoffzellensystem enthält bereits eine integrierte Luftversorgung.

Nicht enthalten sind Kühlmittelpumpe, Kühlkreis und Kühler.

Komponente	Beschreibung
Stack	Anordnung mehrerer Brennstoffzellen
Gebläse / Kompressor	Erzeugung des benötigten Luftmassenstroms
Steuergerät Brennstoffzelle	Steuerungseinheit --> hat auch Zugriff auf das Gesamtsystem (BZ, Kühlung, ggf. Tankmodul)
Druckminderventil	Druckminderung von Mitteldruck- auf Niederdruckniveau
Wasserstoffleitung	Wasserstofftransport
Ausgleichsbehälter	Bevorratung von Wasserstoff zum Ausgleich von Druckschwankungen und zum kontrollierten Abfahren
Luftfilter	Filterung der einströmenden Kathodenluft
Luftleitung	Lufttransport
Abfahrwiderstand	Kontrollierte Spannungsabsenkung bei Systemabschaltung
Magnetventil	Öffnen/Schließen der Wasserstoffleitung zwischen Mitteldruckbereich und BZ-Stack
Wasserstofffilter	Filterung des einströmenden Wasserstoffs
Drucksensor	Messung des Wasserstoffdrucks im Vorlauf zum BZ-Stack
Druckschalter	Überwachung des Wasserstoffdrucks im Vorlauf zum BZ-Stack (optional)
Rezirkulationspumpe	Wasserstoffrückführung auf der Anodenseite
Purge Ventil	Spülung der Anodenseite (=Wasserstoffseite)
Luftmassensensor	Überwachung den Massenstroms
Temperaturschalter	Überwachung der kathodenseitigen Auslasstemperatur, Indikator für Kühlungsverlust (optional)
Stromsensoren	Messung der Stromstärke am Ausgang des BZ-Stacks
Spannungsüberwachung	Messung der Spannung an Einzelzellen
Lastrelais	Freischaltung des Strompfades
Diode	Schutz vor Stromrichtungsumkehr am Ausgang des BZ-System

Tabelle 3: Hauptkomponenten Brennstoffzellensystem

4.2. Brennstoffzellen-Kühlsystem

Bei Brennstoffzellensystemen wird nahezu die gesamte Abwärme über das Kühlmittel abgeführt. Für die Dimensionierung des Kühlsystems gelten die Anforderungen:

- Mittlere abzuführende Wärmeleistung: ca. 169 kW
- Temperaturniveau Kühlmittel am BZ-Eingang: < 60 °C
- Umgebungstemperatur Auslegungsfall: 23°C, Höhe über NN: 0m
- Kühlmittelvolumenstrom (ca. 86,5 l/min pro HD30-System bei 50/50 Wasser-Glykol): 520 l/min (31,2 m³/h)

Das Kühlsystem für die Brennstoffzelle umfasst typischerweise die in Tabelle 4 aufgeführten Komponenten.

Komponente	Beschreibung
Wärmeübertrager	Wärmeabfuhr aus dem Kühlmittel an die Umgebung
Lüfter	Luftzirkulation zur Wärmeabfuhr des Wärmetauschers
Kühlmittelpumpe	Erzeugung eines ausreichenden Kühlmitteldurchflusses
Ausgleichsbehälter	Ausgleich bei steigenden Temperatur
Deionisations-Patrone	Ionenfilterung zur Minderung der Leitfähigkeit des Kühlmittels
Kühlmittleitungen	Kühlmitteltransport
Kühlmittelfilter	Filterung des Kühlmittels
Temperatursensoren	Messung der Temperatur vor und nach dem Kühler bzw. Stack
Durchflusssensoren	Messung des Kühlmitteldurchflusses
Drucksensoren	Messung des Kühlmitteldrucks
Ventile	Steuerung des Kühlmittelflusses
Entlüftungsventil	Druckregulierung im Kühlmittel-System
PTC Heizer	Frostschutz (optional)
Kühler für Kompressor	Regulierung der Lufttemperatur, "Ladeluftkühler" (optional)

Tabelle 4: Hauptkomponenten Brennstoffzellen-Kühlsystem

Die Auslegung des Kühlsystem-Wärmeübertragers erfolgte mit dem Tool *AKG-Line - Auslegungsprogramm* der Firma AKG. Als Kühlmedium wurde Wasser-Glykol angenommen. Von den zwei möglichen Kühlervarianten wurde der Typ OLK.CL-AL225 ausgewählt, da dieser eine größere Leistungsreserve bietet und im Betrieb geringere Schallemissionen verursacht. Das Datenblatt des Kühlers inklusive Lüfter findet sich in Kapitel 7.2. Bei begrenzter Bauraumverfügbarkeit könnten auch andere Varianten, z.B. mehrere kleine Kühler, zum Einsatz kommen.

Die Kühlmittelpumpe wird als optionales Zubehör zum ausgewählten Brennstoffzellensystem angeboten und ist in dessen Masse und Maßen enthalten.

4.3. Wasserstoff-Tanksystem

Die notwendige Wasserstoffmenge pro Tag beträgt 18,1 kg. Bei der Dimensionierung von Wasserstofftanks ist zu berücksichtigen, dass je nach Betankungsanlage und Eingangsdruckniveau des Brennstoffzellensystems im Extremfall nur 85% der gespeicherten Wasserstoffmasse genutzt werden können. Daher ist der Tank entsprechend größer zu dimensionieren, es ergeben sich die Anforderungen:

- speicherbare Wasserstoffmasse: 22,4 kg
- maximaler Betriebsdruck: 350 bar

Die Dimensionierung wird anhand des Datenblatts Dynetec Luxfer (vgl. Kap. 7.5) durchgeführt, wobei die Tanktypen W205H oder W320H betrachtet werden (Tabelle 5). Wie die Auslegung zeigt, können entweder fünf Tanks vom Typ W205H oder drei Tanks vom Typ W320H zum Einsatz kommen.

Hersteller:		Dynetec	Dynetec
Typ:		Luxfer W320H	Luxfer W205H
Anzahl Tanks:		3	5
Gesamtmasse inkl. H ₂ [kg]:		438	500
Gesamtvolumen der Tanks [dm ³]:		1269	1427
Speicherbare H ₂ -Masse [kg]:		23,1	24,45

Tabelle 5: Auswahl Wasserstoffspeicher

Tabelle 5 fasst die Daten der zylindrischen Einzeltanks zum theoretischen Bauvolumen zusammen. Dabei wird nicht betrachtet, dass zwischen den Tanks weitere Leerräume für Halterungen, Einhausung usw. benötigt werden. Bei der Integration ins Fahrzeug entscheidet daher die geometrische Anordnung der Einzeltanks über den tatsächlichen Bauraumbedarf. Abbildung 10 zeigt beispielhaft für beide Tanktypen eine mögliche geometrische Anordnung und die resultierenden Bauvolumina. Für dieses Beispiel wurde davon ausgegangen, dass die Tanks nebeneinander liegend angeordnet werden und jeweils 50 mm Freiraum zwischen den Tanks, 50 mm zwischen den äußeren Tanks und der Einhausung sowie 50 mm zwischen den Stirnseiten der Tanks und der Einhausung notwendig sind. Mit der beispielhaften Anordnung ist für beide Tanktypen der Bauraumbedarf nahezu doppelt so groß wie das eigentliche Tankvolumen.

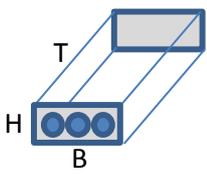
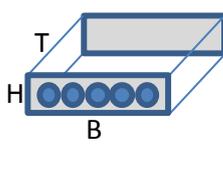
	Luxfer W320H	Luxfer W205H
		
Breite [mm]	1445	2375
Höhe [mm]	515	515
Tiefe [mm]	3228	2210
Gesamtvolumen [dm ³]	2402	2703

Abbildung 10: Beispielhafte geometrische Anordnung der Wasserstofftanks und resultierendes Bauvolumen

4.4. Elektrolysesystem

Für die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse-Prozesse stehen im benötigten Maßstab zwei Verfahren zur Verfügung, die alkalische Elektrolyse und die PEM-Elektrolyse. Ohne auf die Details der Verfahren einzugehen, werden im Folgenden Kenndaten für ein Elektrolysesystem je Verfahren in der benötigten Leistungsklasse dargestellt. In beiden Fällen wird ein Prozesswassertank benötigt mit einem nutzbaren Wasservolumen von ca. 220 l/Tag.

Alternative 1: Alkalische Elektrolyse am Beispiel *MyPhy McLyzer 10-10* (vgl. Kapitel 7.3)

Elektrolysesystem für den stationären Einsatz, Hauptkomponenten:

- Elektrolyse-Modul im Gehäuse, L x B x H: 1,5m x 1,5m x 2,0m
- Energieversorgungsmodul, L x B x H: 2,0m x 0,8m x 2,0m
- Im Datenblatt ist die Wasserstoffreinigung und -trocknung nicht enthalten. Laut Hersteller beträgt deren Volumen ca. 35% des Volumens des Elektrolyse-Moduls. Ohne weitere Maßangaben ist hierfür ein Bauraum von ca. 1,6 m³ vorzusehen
- Kühlsystem und Kältemaschine für Elektrolyse-Modul, Auslegungsdaten unbekannt
- Wasserstoffkompressor, Eingangsdruck 10-12 bar, Ausgangsdruck 350 bar, Datenblatt der Firma Hofer Hochdrucktechnik im Anhang. Daten Kompressor:
L x B x H: 2,1m x 0,6m x 1,7m, ca. 1500kg.
Zusätzlich ist eine Hydraulikeinheit für den hydraulischen Antrieb notwendig.
L x B x H: 0,6m x 0,4m x 0,8m, ca. 400kg.

Alternative 2: PEM-Elektrolyse am Beispiel *Proton C10* (vgl. Kapitel 7.4)

Elektrolysesystem für den stationären Einsatz, Hauptkomponenten:

- Elektrolyse-Modul im Gehäuse, L x B x H: 2,4m x 0,92m x 2,0m
- Energieversorgungsmodul, L x B x H: 1,88m x 0,92m x 2,0m
- Kühlsystem und Kälteanlage für Elektrolyse-Modul, Auslegungsdaten unbekannt
- Wasseraufbereitung, Auslegungsdaten unbekannt

- Wasserstoffkompressor, Eingangsdruck 10-12 bar, Ausgangsdruck 350 bar, Datenblatt der Firma Hofer Hochdrucktechnik im Anhang. Daten Kompressor:
L x B x H: 2,1m x 0,6m x 1,7m, ca. 1500kg.
Zusätzlich ist eine Hydraulikeinheit für den hydraulischen Antrieb notwendig.
L x B x H: 0,6m x 0,4m x 0,8m, ca. 400kg.

Fazit Elektrolyse

Derzeit sind keine für den mobilen Einsatz vorgesehenen Systeme bekannt. Unabhängig von der Bauraumverfügbarkeit muss zunächst der Reifegrad für einen mobilen Einsatz gesteigert werden. Beide Elektrolyse-Systeme benötigen einen großen Bauraumbedarf, der auf der Lokomotive nur schwer ermöglicht werden kann. Die Systeme könnten für den mobilen Einsatz sicherlich verkleinert werden, aber es kommen weitere Komponenten wie Wasseraufbereitung, Kompressor, Kühlsystem und Kälteanlage hinzu, die zusätzlichen Bauraum benötigen. Insgesamt sind beide Varianten verfahrenstechnisch sehr komplex, wobei die PEM-Elektrolyse aufgrund des Verzichts auf einen alkalischen Elektrolyten Vorteile zeigt.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sollte aus den genannten Gründen vorerst auf den Einsatz des Elektrolysesystems verzichtet werden. Dieses kann in weiteren Projekten ausgearbeitet werden.

4.5. Batteriesystem

Ausgehend von den ermittelten Parametern in Kapitel 3.2 sollen nun im Weiteren mögliche Lösungen für den benötigten Batterie-Satz in Lithium-Technologie dargestellt werden. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der ausreichenden Bereitstellung gespeicherter, elektrischer Energie durch die verschiedenen, betrachteten Batterie-Sätze, aber auch auf der maximal möglichen, abgebbaren Leistung. Nachfolgend sind die Eckdaten der Auslegung noch einmal angeführt:

- Maximal nutzbarer Energiehub des Batterie-Satzes: 43 kWh
- Max. Ladeleistung: 86 kW, bzw. max. Entlade-Leistung des Batterie-Satzes: 86 kW

In den folgenden Betrachtungen werden die üblichen Bezeichnungen für die Kapazität eines Batteriesatzes, also die nominal gespeicherte Ladung in Ampere-Stunden – ausgedrückt durch „C“, sowie die maximal möglichen oder maximal angestrebten Entlade-Raten eines Batteriesatzes – $K \times C$ – verwendet (K beliebige Konstante). Die entsprechend gespeicherte Energie und die abgegebene Leistung ergeben sich, vereinfacht betrachtet, durch Multiplikation mit der Nennspannung des Batterie-Satzes.

Modernen Zellentypen in Lithium-Technik sind gewöhnlich in der Lage, über viele Betriebszyklen hinweg ihre nominelle Kapazität C vollständig bereitzustellen. Hinsichtlich einer verlängerten Lebensdauer wäre aber eine begrenzte Entnahme von Energie aus den Zellen zu bedenken. Anstatt die

Zellen im Bereich von 0% bis 100% ihrer Kapazität C zu betreiben, sprich sie in diesem Intervall zu laden und zu entladen, wäre ein beschränkter Betriebsbereich zwischen 10% und 90% überlegenswert. Dies würde auch eine Vereinfachung der Lade-Algorithmen und Lade-Systeme mit sich bringen, da etwa über 90% geladener Kapazität die Problematik des „Balancing“ der Kapazität der einzelnen Zellen beim Laden des Batterie-Satzes vermehrt Aufmerksamkeit verlangt. Natürlich wäre es dann nötig, den Batteriesatz bezüglich seiner nominellen Kapazität C zu vergrößern, um die nötigen Kapazitätswerte zur Erfüllung der Werte der Antriebsauslegung trotz der eingeschränkten Energie-Entnahme zu erreichen. Nimmt man die erwähnten Werte von 10% und 90% an, so müsste die Nennkapazität C des Satzes um etwa 25% erhöht werden, wieder vereinfacht betrachtet mit nomineller Spannung über den ganzen Entlade-Bereich.

Betrachtet man die möglichen Entlade-Raten moderner Zellen, so sind inzwischen maximale Entlade-Raten von bis zu $10-20 \times C$ bei Hochleistungszellen möglich. Für die angestrebte Verwendung sind jedoch Energiezellen angebracht, deren maximale Entlade-Raten bei etwa $5-10 \times C$ liegen. Dies ist aus Werbedaten für neue in Entwicklung und Erstfertigung befindliche Zellen entnommen. Das Ausmaß des nachteiligen Einflusses auf Zyklenzahl und kalendarische Lebensdauer ist in den Werbedaten nicht angegeben und derzeit nicht bestimmbar. Um die dimensionierte Kapazität hinsichtlich der maximal zu entnehmenden Leistung möglichst gut zu nutzen, wäre die maximale Entlade-Rate von $5 \times C$ möglich. Wiederum hinsichtlich einer Erweiterung der Lebensdauer wäre jedoch auch in diesem Fall eine Einschränkung des Betriebsbereichs zu überlegen. Eine begrenzte Rate von $2 \times C$ würde einen wesentlich schonenderen Betrieb der Zellen ermöglichen.

Für die Nennspannungen der Batterie-Sätze würde sich der Bereich von 500-600V eignen. Dies ist der übliche Arbeitsbereich der Gleichspannungs-Zwischenkreise von netzgespeisten Umrichtern, 230/400 V Niederspannung. Damit würden sich marktübliche Geräte und Komponenten für die weitere Verarbeitung der Batteriespannung ohne größere Modifikationen verwenden lassen. Eine weitere Erhöhung der Nennspannungen der Batteriesätze auf Werte von 600-800V würde es erlauben, die Betriebsströme in den Batteriekreisen zu senken und damit die Baugrößen der Komponenten in diesem Bereich zu verkleinern. Dies würde jedoch die Auswahlmöglichkeiten für zu verwendende, kommerzielle Geräte und Komponenten beschränken bzw. umfangreichere Anpassungen erfordern.

Für die ersten Betrachtungen wurden die Produkte der Firmen Akasol und Saft als Basis verwendet. Beide Firmen bieten fertig konfektionierte Batterie-Sätze in Lithium-Technik für mobile Anwendungen an. Diese sind bereits paketierte, mit Gehäuse und Kühlkörpern für Flüssigkeitskühlung versehen und mit einem BMS (Battery Management System) und einem BDS (Battery Disconnect System) ausgerüstet. Diese Systeme übernehmen bereits wichtige Schutzfunktionen wie Kurzschlussschutz und Übertemperaturschutz, sowie das "Balancing" beim Laden der Zellen und sind CAN-Busfähig. Bei den Produkten von Akasol liegt der Schwerpunkt im Bereich Elektro- und Hybrid-Fahrzeuge, entsprechend hoch sind die Energiedichten dieser Batterie-Sätze. Die Firma Saft produziert Batterie-Sätze bereits speziell für Traktions-Anwendungen mit entsprechenden Zulassungen, aber mit geringeren

Energiedichten. Aus den Sortimenten beider Anbieter wurden jeweils zwei Produkte mit Nennspannungen in den oben angeführten Bereichen von 500-600V und 600-800V ausgewählt und miteinander verglichen.

In der nachfolgenden Tabelle 6 sind in den oberen Zeilen die Nominalwerte für die vier verschiedenen, verwendeten Batteriesätze dargestellt. Diese entstammen den Datenblättern der Hersteller (siehe Kapitel 7.7, 7.8, 7.9, 7.10) und sind nicht allen Punkten direkt vergleichbar. Die Angaben für den Kurzzeitbetrieb werden von Akasol für 10 s, von Saft für 30 Sekunden angegeben:

- Kapazität (Zeile 1)
- Energieinhalt (Zeile 2)
- Spannung (Zeile 3)
- Entlade-Strom für kontinuierlichen Betrieb (Zeile 4)
- Entlade-Rate für kontinuierlichen Betrieb (Zeile 5)
- Entlade-Leistung für kontinuierlichen Betrieb (Zeile 6)
- Lade-Strom für kontinuierlichen Betrieb (Zeile 7)
- Lade-Rate für kontinuierlichen Betrieb (Zeile 8)
- Lade-Leistung für kontinuierlichen Betrieb (Zeile 9)
- Entlade-Strom für kurzzeitigen Betrieb (Zeile 10)
- Entlade-Rate für kurzzeitigen Betrieb (Zeile 11)
- Entlade-Leistung für kurzzeitigen Betrieb (Zeile 12)
- Lade-Strom für kurzzeitigen Betrieb (Zeile 13)
- Lade-Rate für kurzzeitigen Betrieb (Zeile 14)
- Lade-Leistung für kurzzeitigen Betrieb (Zeile 15)
- Abmessungen, Volumina und Gewichte (Zeile 16-20)

In den unteren Zeilen erfolgt eine Ergänzung der Tabelle mit den folgenden Daten:

- die notwendigen Anzahl von Batterie-Sätzen für die Erfüllung der Eckdaten der zugrunde liegenden Auslegung, ausgehend von der Nenn-Kapazität und der gespeicherten Nenn-Energie (Zeile 21)
- die sich damit ergebende Nenn-Kapazität des kompletten Batterie-Satzes (Zeile 22)
- die sich damit ergebende gespeicherte Nenn-Energie des kompletten Batterie-Satzes (Zeile 23)
- die gespeicherte Energie bei einem beschränktem Betrieb des kompletten Batterie-Satzes zwischen 10% und 90% Kapazität zur Erhöhung der Lebensdauer (Zeile 24)
- der Entlade-Strom bei einer Begrenzung der Entlade-Rate auf 2C zur Erhöhung der Lebensdauer (Zeile 25)
- die Entlade-Leistung bei einer Begrenzung der Entlade-Rate auf 2C zur Erhöhung der Lebensdauer (Zeile 26)
- Gesamtgewicht und gesamtes, notwendiges Einbauvolumen des kompletten Batterie-Satzes (Zeile 27,28)

Um eine bessere Übersicht zu bieten, findet sich in Tabelle 7 eine Zusammenfassung der relevanten Daten der kompletten Batterie-Sätze. Es sind noch einmal die wichtigsten Nenndaten, sowie die Zahlen zum eingeschränkten Betrieb mit 80% Kapazität und der begrenzten Entladung mit nur 2C angeführt.

Legt man die Nenngößen für Kapazität und gespeicherter Energie zugrunde, erfüllen alle vier Versionen die geforderten 43 kWh der Auslegung. Betrachtet man die Problematik unter den verschärften Bedingungen der beschränkten 80% Ladungsentnahme, so erfüllt der Saft Ion Board Regen 790V diese Bedingung nicht mehr.

Bei einer eingeschränkten Entladung mit nur 2C ist es allen vier ausgelegten Batterie-Sätzen möglich, die geforderten 86 kW kontinuierlich abzugeben. Die kontinuierlichen Nenn-Entlade-Raten der vier verschiedenen Typen liegen bei 3,8C/3,8C/2,5C/3C. Es sollte also die begrenzte Entladung mit 2C eine reduzierte, und damit lebensverlängernde, Belastung der Zellen ermöglichen. Die kontinuierlichen Nenn-Lade-Raten liegen bei 2C/2C/2,5C/3C. Eine kontinuierliche Ladung mit 2C stellt hier bei zwei Typen bereits die mögliche Obergrenze der kontinuierlichen Ladung dar. Bei den beiden anderen Typen bedeuten 2c eine leichte Einschränkung im Ladebetrieb.

	Batterie-System		Akasol Akasystem 24M 53 NMC 6s2p	Akasol Akasystem 30M 53 NMC 6s2p	Saft Ion-Board Regen 515V - 216kW	Saft Ion-Board Regen 790V - 210kW
1	Nenn-Kapazität	Ah	106,0	106,0	60,0	30,0
2	Nenn-Energie	kWh	56,5	70,6	30,9	23,7
3	Nenn-Spannung	V	532,8	666,0	515,0	790,0
4	Entladung kont.	A	400,0	400,0	150,0	90,0
5	Entladerate kont.		3,8	3,8	2,5	3,0
6	Entladeleistung kont.	kW	213,1	266,4	77,0	64,0
7	Ladung kont.	A	212,0	212,0	150,0	90,0
8	Laderate kont.		2,0	2,0	2,5	3,0
9	Ladeleistung kont.	kW	113,0	141,2	77,0	64,0
10	Entladung max.	A	10s 800,0	800,0	30s 420,0	295,0
11	Entladerate max.		10s 7,5	7,5	30s 7,0	9,8
12	Entladeleistung max.	kW	10s 426,2	532,8	30s 216,0	210,0
13	Ladung max.	A	10s 318,0	318,0	30s 250,0	180,0
14	Laderate max.		10s 3,0	3,0	30s 4,2	6,0
15	Ladeleistung max.	kW	10s 169,4	211,8	30s 128,0	128,0
16	Länge	mm	1594,0	1545,0	1714,0	1747,0
17	Breite	mm	600,0	750,0	1385,0	1000,0
18	Tiefe	mm	420,0	420,0	300,0	300,0
19	Gewicht	kg	506,0	629,0	650,0	541,0
20	Volumen	dm ³	401,7	486,7	712,2	524,1
21	Notwendige Anzahl	Stück	1,0	1,0	2,0	2,0
22	Kapazität gesamt	Ah	106,0	106,0	120,0	60,0
23	Energie gesamt	kWh	56,5	70,6	61,8	47,4
24	80% Energie gesamt	kWh	45,2	56,5	49,4	37,9
25	Entladung kont. mit 2C	A	212,0	212,0	240,0	120,0
26	Entladeleistung kont. mit 2C	kW	113,0	141,2	123,6	94,8
27	Gesamtes Gewicht	kg	506,0	629,0	1300,0	1082,0
28	Gesamtes Volumen	dm³	401,7	486,7	1424,3	1048,2

Tabelle 6: Vergleich von Batteriesätzen Akasol und Saft

Batterie-System		Akasol Akasystem 24M 53 NMC 6s2p	Akasol Akasystem 30M 53 NMC 6s2p	Saft Ion- Board Regen 515V - 216kW	Saft Ion- Board Regen 790V - 210kW
Nennspannung	V	532,8	666,0	515,0	790,0
Notwendige Anzahl	Stück	1,0	1,0	2,0	2,0
Kapazität gesamt	Ah	106,0	106,0	120,0	60,0
Energie gesamt	kWh	56,5	70,6	61,8	47,4
80% Energie gesamt	kWh	45,2	56,5	49,4	37,9
Entladung kont. mit 2C	A	212,0	212,0	240,0	120,0
Entladeleistung kont. mit 2C	kW	113,0	141,2	123,6	94,8
Gesamtes Gewicht	kg	506,0	629,0	1300,0	1082,0
Gesamtes Volumen	dm ³	401,7	486,7	1424,3	1048,2

Tabelle 7: Zusammenfassung des Vergleichs von Batteriesätzen

Die sich zeigende, starke Abweichung der Energie-Dichten und Leistungsdichten zwischen den beiden Herstellern ist bemerkenswert. Während Akasol für die Realisierung einer gespeicherten Kilowattstunde an Energie 8,9-9 kg benötigt, sind es bei Saft schon 21-23 kg. Für ein abgegebenes Kilowatt Leistung benötigt Akasol 4,4-4,5 kg Batterie-Masse, Saft bereits 10,5-11,4 kg. Auch eine wesentlich robustere Bauweise für die Verwendung in Traktions-Applikationen erklärt das wesentlich höhere Gewicht der Saft-Komponenten nur in begrenztem Rahmen. Diesem Punkt muss in Phase 2 im Detail noch nachgegangen werden. Eine Messung der Kenndaten von Vergleichsexemplaren beider Hersteller und Analyse des Aufbaus würden hierfür unabhängige Daten als Grundlage für eine ausgewogene Entscheidungsfindung liefern.

Sollten die Kosten für die bisher angeführten Batteriesätze den finanziellen Rahmen der Phase 2 sprengen, wäre als alternative Lösung der Aufbau eines eigenen Batterie-Satzes möglich. Dieser, natürlich technisch einfacher aufgebaute, Batterie-Satz wäre rein für eine Erprobung der Lokomotive unter vereinfachten, klimatischen und logistischen, Bedingungen gedacht, ein Prototyp ohne Möglichkeit einer Zulassung. Der, dafür benötigte, Einbauraum würde sich etwa zwischen dem Bedarf der Batterie-Sätze von Akasol und Saft befinden, wär jedoch in der Anordnung flexibler gestaltbar.

Im Rahmen von Forschungszwecken bei gleichzeitigem Haftungsausschluss eingesetzt werden dürfen. Der Gefahrenübergang erfolgt mit Ausladung am Zusammenbauort der Lokomotive, wo auch diese Module in ein Batteriegehäuse eingebaut werden. Die Zellen in den Modulen sind YUASA LEV50 (50 Ah Nennkapazität) in bester Industriequalität jedoch unbekannter Vorbelastung. 12 Zellen sind in einem Modul verbaut, das Modul hat einen isolierenden Doppelboden, der für Flüssigkeitstemperierung der Zellen vorgesehen ist. Das Modul mit der Nennspannung von 21,6 V speichert 2,16 kWh (Nennwert), hat eine Masse von knapp 25 kg und die Abmessungen 36 cm x 30 cm x 18 cm. Durch konstruktive Teile (Aufbaurahmen, Gehäuse) erhöht sich die Nettomasse um etwa 25% und

das Volumen um zumindest 100%, um auch die Sicherheitsabstände (thermische Isolierung, Abschottung) zur Vermeidung der Fehlerausbreitung im Fehlerfall zu erzielen. Damit die Nutzung der Module in der Lokomotive sichergestellt ist, müssen alle Module einzeln vermessen werden. Heutige Balancer und Batteriemanagementsysteme sind für die Automobiltechnik und dem hier gegenwärtigen Kostendruck ausgelegt, was sich auch in begrenzter Zuverlässigkeit und nicht industriell geprägtem Sicherheitsverständnis widerspiegelt. Für die Prototypenanordnung ist ein eigens angepasstes und um Schutzvorrichtungen erweitertes Balancing- und Batteriemangement- und Monitoring-System vorgesehen. In die Konzeption der Batterieeinheit werden die gesamten Erfahrungen aus institutseigener Forschung (Institut für Elektrotechnik, Montanuniversität) zu Ausfallmechanismen und deren Beherrschung bzw. Folgenminderung auch einbezogen. In den Projektkosten sind KEINE Zellenkosten enthalten (unentgeltliche Zurverfügungstellung für Prototypenforschung über begrenzten Zeitraum) sondern nur die weitaus geringeren Kosten für Vermessung, Transport hin+rück, Mechanik, Balancing und Batteriemanagementsystem einschließlich Schutz.

Insgesamt wird für den Prototyp eine Nennkapazität von etwa 100 kWh empfohlen, wenn unter Einhaltung des Kostenrahmens nur eine 30 kW – Brennstoffzelle verwendet wird. Daraus folgen z.B. 48 Batterie-Module zu je 2,16 kWh. Die gesamte Batterieeinheit wird mit zumindest 1,5 t und 1,9 m³ abgeschätzt (einschließlich Montagemechanik und thermischer Abschottung). Die Batterieeinheit kann aus 2 Strängen zu je 24 Modulen aufgebaut werden. Damit ergeben sich $24 * 6 * 3,6 \text{ V} = 518,4 \text{ V}$ Nennspannung, Maximalspannung $24 * 6 * 4,1 \text{ V} = 590,4 \text{ V}$ (95% - Kapazitätswert) und Minimalspannung $24 * 6 * 3,3 \text{ V} = 475,2 \text{ V}$ (10% - Kapazitätswert). Die über geplant 5000 Zyklen nutzbare Kapazität beträgt zumindest 80 kWh.

4.6. Batterie-Kühlsystem

Die Funktion und Leistungsfähigkeit von Zellen auf Lithium-Basis ist stark von der Betriebstemperatur abhängig. Gängige Zellen sollten für eine uneingeschränkte Funktion zumindest in einem Temperaturbereich von 0-40 Grad betrieben werden. Für optimale Leistungsfähigkeit der Zellen, hinsichtlich abgebarter Energie und Leistung, sollte dieser Bereich noch weiter eingeschränkt werden auf den optimalen thermischen Betriebspunkt der Zellen. D. h. in Betriebsfällen mit hohen Betriebsströmen und/oder hohen Außentemperaturen müssen die Zellen gekühlt werden. Erreicht die Zellentemperatur kritische Werte, kann es nicht nur zu einem Ausfall der Zellen kommen, es ist mit einer sicherheitskritischen, thermischen Zerstörung zu rechnen. Ein Zwischenfall der auf jeden Fall vermieden werden muss, wozu auch eine übergeordnete Überwachung vorzusehen ist. Bei niedrigen Außentemperaturen muss eine Beheizung der Zellen erfolgen, da ansonsten ein erheblicher Einbruch der Leistungsfähigkeit der Zellen nicht zu vermeiden ist. Idealerweise sollte ein eigener, ausreichend dimensionierter, Klimakreislauf für die Batteriesätze vorgesehen werden, um unabhängig von Außentemperaturen und Eigenerwärmung durch die Betriebsströme eine optimale Betriebstemperatur und damit hohe Leistungsfähigkeit der Zellen zu gewährleisten.

Die Firma Saft bietet ein entsprechendes Klimagerät unter der Bezeichnung BTMS für die hauseigenen Batteriesätze an (Battery Thermal Management System - siehe Datenblätter der Saft Batteriesätze Kapitel 7.8 und 7.9). Abmessungen und Gewicht sind in der folgenden Tabelle 8 zusammen gefasst. In den weiteren Betrachtungen wurde für die entworfenen Konzepte dieses Klimagerät für die Temperierung der Batterie-Sätze von Akasol und Saft vorgesehen. Da bei den Ansätzen mit Saft-Batterien das Volumen der Batteriesätze sich im Vergleich zu Akasol praktisch verdoppelt, wurden in diesen Fällen zwei Klimageräte vorgesehen.

Die Versorgung dieser Klimatisierung der Batteriesätze sollte während des gesamten Betriebs permanent aufrechterhalten werden, um jederzeit eine volle Einsatzbereitschaft der Zellen gewährleisten zu können. Eine Umschaltung auf den autarken Betrieb sollte nur erfolgen, wenn die Zellentemperatur sich innerhalb eines idealen Bereichs befindet. Bei Wiederinbetriebnahme nach einer Stillsetzung ist mit Wartephase zu rechnen, bevor autarker Betrieb möglich ist.

Während des Betriebs unter Oberleitung kann die Versorgung über den Hilfsbetriebe-Umrichter der Lokomotive erfolgen, wenn dieser noch Reserven dafür besitzt. Ansonsten muss eine geeignete Leistungsstufe vorgesehen werden, um das Klimagerät über die Heizwicklung des Haupttransformators zu versorgen. Während des autarken Betriebs muss die Versorgung aus dem Gleichspannungsnetz des Batteriekreises erfolgen. Bei kurzen Phasen autarken Betriebs könnte unter Umständen darauf verzichtet werden, unter der Annahme, dass die grundsätzliche Temperierung der Batteriesätze während des Oberleitungsbetriebs erfolgt und die zusätzliche Eigenerwärmung aufgrund der Leistungsentnahme aus den Zellen nur einen geringen Temperaturhub während der kurzen Einsatzdauer verursacht. Dieser Fall müsste aber gesondert noch im Detail beim Entwurf im Rahmen der Phase 2 untersucht werden.

Kühlaggregat		Saft BTMS
Länge	mm	1420,0
Breite	mm	430,0
Tiefe	mm	600,0
Gewicht	kg	145,0
Volumen	dm ³	366,4

Tabelle 8: Abmessungen und Gewicht des BTMS von Saft

Sollte eine Erprobung der Lokomotive unter vereinfachten klimatischen Verhältnissen in einem Zeitraum des Jahres mit gemäßigttem Klima als ausreichend erachtet werden, könnte auf diese Klimageräte zu Gunsten einer einfacheren Flüssigkeitskühlung verzichtet werden. Es muss aber mit eventuellen Einschränkungen gerechnet werden.

4.7. Leistungselektronik

Für die Kopplung der beiden alternativen Quellen, der Brennstoffzelle und des Batterie-Satzes, untereinander und an das bestehende Energiesystem der Lokomotive sind zur Anpassung der verschiedenen Spannungsniveaus und zur Regelung der Leistungsflüsse als Hauptkomponenten zumindest zwei Konverter nötig. Deren Bauweise und Ausführung unterscheiden sich in Abhängigkeit der gewählten Lösung:

- Alternative 1: Kopplung an DC-Zwischenkreis des Fahrzeugs (Kapitel 2.2.1.1.)
- Alternative 2: Direkte Kopplung an die Fahrmotoren (Kapitel 2.2.1.2)

Beiden Lösungen ist gemeinsam als Hauptkomponente ein unidirektionaler DC/DC-Konverter ohne Potentialtrennung (Abbildung 4 & 5, Komponente 23), welcher die Verbindung der Brennstoffzelle mit dem Batteriekreis herstellt. Über diesen ist die Brennstoffzelle in der Lage, das Batterie-System zu laden und über den Batterie-Kreis die Energie für den Antrieb bereit zu stellen. Siehe Kapitel 4.7.1.

Für die Alternative 1 wird ein bidirektionaler DC/DC-Konverter mit Potentialtrennung (Abbildung 4, Komponente 40) benötigt, welcher den Energieaustausch zwischen dem Batteriekreis und dem Zwischenkreis der Antriebsumrichter durchführt. Die Hauptenergierichtung wird vom Batteriekreis zu den Antriebsumrichtern sein. Beim elektrischen Bremsen und während des Betriebs an der Oberleitung soll aber eine Ladung der Batterien möglich sein. Betrachtet man zusätzlich zu diesen Eigenschaften noch die hohe sekundäre Spannung, die das Gerät beherrschen muss, wird erkennbar, dass dieser Konverter ein technisch ungewöhnlich aufwändiges Gerät darstellt, dessen Beschaffung sich als schwierig erweisen könnte. Es wurde deshalb, als erster Ansatz, eine vereinfachte Lösung in Betracht gezogen. Siehe Kapitel 4.7.2.

Für die Alternative 2 wird ein dreiphasiger Pulswechselrichter (Abbildung 5, Komponente 50) benötigt, der im autark versorgten Betrieb die vier Fahrmotoren der Lokomotive aus dem Batteriekreis direkt versorgt. Die internen Antriebsumrichter werden nicht genutzt. Die Motoren müssten dazu über Schütze von den bestehenden Antriebsumrichtern weggeschaltet und auf diesen Pulswechselrichter, den alternativen Fahrumrichter für autarken Betrieb, geschaltet werden. Die Motoren würden in diesem Fall mit reduzierter Spannung betrieben. Da der Hilfsbetriebe-Umrichter der Lokomotive aus dem gemeinsamen Zwischenkreis mit dem eingebauten Antriebsumrichter versorgt wird, müsste in diesem Fall ein Hilfs-Pulswechselrichter für die Versorgung des Hilfsnetzes vorgesehen werden. Siehe Kapitel 4.7.3.

4.7.1. DC-DC-Konverter nicht potentialgetrennt

Für den DC/DC-Wandler der Brennstoffzelle (23) ergeben sich anhand der gewählten Brennstoffzelle die folgenden Kenndaten:

- Unidirektionaler DC/DC-Wandler, nicht potentialtrennend
- Max. Eingangsleistung BZ-seitig: ~198 kW
- Spannungsbereich BZ-seitig: 360 – 720 VDC
- Spannungsbereich Batterie-seitig: 500-600V, gegebenenfalls höher

In Betracht käme zum Bsp. ein Gerät des amerikanischen Herstellers ApECOR. Dieses ist dafür gedacht in Hybrid- und Elektro-Fahrzeugen die Batterie-Spannung auf eine höhere System-Spannung (Zwischenkreise der Antriebsumrichter) hochzusetzen und ist dementsprechend sehr kompakt. Auf der Eingangsseite sind Spannungen von 200-530 Volt möglich, auf der Ausgangsseite 580-800 V. Für den Ausgang ist die Nennleistung von 200 kW definiert. Da das Gerät bidirektional arbeitet, sind Eingang und Ausgang wahrscheinlich austauschbar. Die Topologie des Leistungskreises müsste dahingehend noch näher untersucht werden. Prinzipiell ist für diese Anwendung eine Leistungsrichtung zu sperren. Die Spannungsbereiche des Geräts treffen nicht genau die Anforderungen des Systems. Auch das wäre mit dem Hersteller noch zu klären.

DC-DC-Konverter nicht potentialgetrennt		ApECOR 200kW
Länge	mm	406,0
Breite	mm	343,0
Tiefe	mm	600,0
Gewicht	kg	45,0
Volumen	dm ³	83,6

Tabelle 9: Abmessungen und Gewicht des DC/DC-Konverters ApECOR 200kW

In Tabelle 9 sind die Abmessungen und Gewichte des ApECOR 200 kW DC-DC-Konverters angeführt. Da das Gerät für Hybrid-Anwendungen entwickelt wurde, ist es entsprechend kompakt und leicht.

Der Flüssigkeits-Kühlkreislauf des Geräts könnte mit dem Kühlsystem des Batterie-Satzes kombiniert werden.

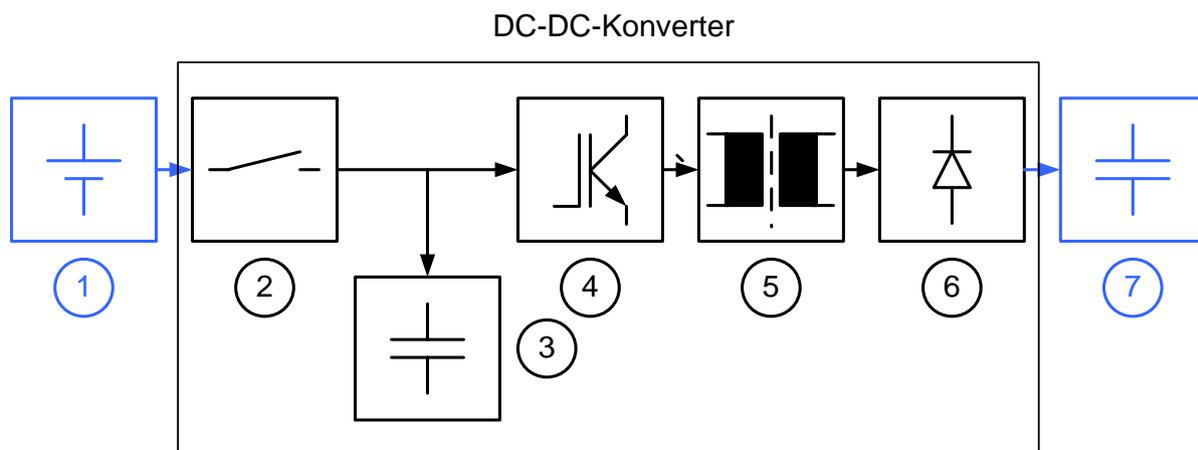
4.7.2. DC-DC-Konverter Potentialgetrennt (Alternative 1)

Um aus dem Batterie-Kreis die Energie in den Zwischenkreis der bestehenden Antriebsumrichter transportieren zu können, ist ein weiterer DC-DC-Konverter mit einer Leistung von 250 kW notwendig. Dieser muss aus der niedrigeren Spannung des Batteriekreises (500-600V Bereich oder gegebenenfalls höher) eine höhere Spannung erzeugen (Zwischenkreisspannung Antriebsumrichter 1200-1400V). Auf der Eingangsseite arbeitet dieser also im Niederspannungsbereich, auf der Ausgangsseite bereits mit Hochspannung. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die Konstruktion, sondern auch auf die dafür geltenden Vorschriften. Aus Sicherheitsgründen muss der Konverter mit Potential-Trennung ausgestattet sein. Dadurch ist ausgeschlossen, dass in einem Fehlerfall Hochspannung in den Komponenten der autarken Hybrid-Versorgung (Brennstoffzelle und Batterie-Satz) auftreten kann. Auch werden Störeinflüsse auf dieses komplexe System minimiert. Für die Erprobung dieses neuen Systems ist dies von Vorteil, da noch keine Aussagen über die Störimpfindlichkeit gemacht werden können. Die Kreise der autarken Versorgung werden nicht geerdet und zugleich mit einer Erdschlusserfassung ausgerüstet, sodass auch im Entstehen befindliche Isolationsfehler frühzeitig detektiert werden können. Durch Wahl des höheren Batteriespannungsniveaus ist eine Erdung nicht zulässig. Diese Maßnahmen würden die Einsatzbereitschaft und Sicherheit des Systems erhöhen. Diesbezüglich sind aber noch die gelten Vorschriften zu überprüfen.

Die speziellen Anforderungen an diese Komponente machen eine Beschaffung schwierig. Diese unterscheiden sich stark von dem, in Industrie und Traktion benötigten, Eigenschaften solcher Geräte. Es ist also anzudenken, dieses Gerät neu zu entwerfen und unter Zuhilfenahme kommerzieller Komponenten, mit entsprechenden Modifikationen, aufzubauen. Ein entsprechender Entwurf wird im Folgenden beschrieben. Dieser wurde vorerst vereinfacht, auf Kosten der Rückspeisefähigkeit beim elektrischen Bremsbetrieb, um eine schnellere Realisierung zu ermöglichen. Natürlich ergeben sich hier wieder die Probleme einer Zulassung für den Bahnbetrieb, diese Anordnung kann nur zur Erprobung auf der Lokomotive eingesetzt werden.

In Abbildung 11 ist der Aufbau des entworfenen DC/DC-Konverters skizziert. Er besteht aus zwei Hauptkomponenten, einem dreiphasigen Pulswechselrichter (4) und einem dreiphasigen Transformator für 400V (5). Die Aufgabe des Pulswechselrichters ist es, aus der Batteriespannung eine dreiphasige Wechselspannung mit einer Frequenz von 400 Hz zu erzeugen. Mit dieser wird die Primärseite des Transformators gespeist, welcher entsprechend seines Windungsverhältnisses die benötigte höhere Ausgangsspannung auf der Sekundärseite erzeugt. Diese wird anschließend gleichgerichtet und an die Zwischenkreiskondensatoren der bestehenden Antriebsumrichter der Lokomotive gelegt. Die Regelung der Ausgangsspannung kann der Pulswechselrichter übernehmen. Die Begründung für die hohe Frequenz von 400 Hz liegt in der dadurch möglichen Verringerung der Baugröße (Masse, Volumen und Verluste) des Transformators, wobei bei sonstiger Standard-Konstruktion gegenüber 50 Hz

zumindest halbe Werte erreicht werden. Aufgrund der Höhe der benötigten elektrischen Leistung kann dieser nur mit klassischer, magnetischer Flussführung im Eisen ausgeführt werden. Durch die erhöhte Betriebsfrequenz lässt sich der Transformator jedoch kleiner ausführen. Höhere Frequenzen sind aufgrund der stark steigenden Eisenverluste jedoch unrealistisch. Weiters sind 400 Hz eine Industriefrequenz, sodass Komponenten dafür erhältlich sind, gegebenenfalls auch Standard-Umrichter eingesetzt werden können, ohne dass Probleme bei der Steuerung und Regelung oder erhöhte Stromverdrängung auftreten.



- ① Batterie-Satz
- ② Leistungsrelais
- ③ Zwischenkreis-Kondensatoren Pulswechselrichter
- ④ Pulswechselrichter
- ⑤ Transformator 3 phasig 400 Hz
- ⑥ Ausgangsgleichrichter
- ⑦ Zwischenkreis-Kondensatoren Antriebsumrichter

Abbildung 11: Übersichtsskizze des potentialgetrennten DC-DC-Konverters

Für den Pulswechselrichter wird ein Standard-Frequenzumrichter entsprechender Leistung modifiziert. Da die Spannungsniveaus der Batteriesätze etwa im üblichen Bereich der Zwischenkreisspannungen von Niederspannungs-gespeisten Umrichtern liegen (532,8 V, 515 V) oder sogar darüber (666 V, 790 V), sollte ein Gerät mit einer Nennleistung von 250 kW für die Anwendung ausreichend sein. Der interne Einbauraum in diesen Geräten wird zum größten Teil vom Ausgangs-seitigen Pulswechselrichter beansprucht. Entfernt man den Eingangs-seitigen Gleichrichter des Frequenzumrichters

und dessen Zubehör verkleinert sich der Platzbedarf des kompletten Gerätes kaum, man erhält den benötigten Pulswechselrichter. Vorzusehen sind ein Leistungsrelais zur galvanischen Trennung vom Batteriesatz, sowie eine geänderte Vorladung der Zwischenkreis-Kondensatoren des Pulswechselrichters (genau definiert gibt es keinen Zwischenkreis in dem Sinn mehr). Diese Elemente können in das Gerät oder extern verbaut werden. Die Steuerung dieser Elemente sollte die übergeordnete Steuerung des autarken Versorgungs-Systems übernehmen. In Betracht kommt, und ist deshalb beispielhaft verwendet worden, ein Gerät der Firma KEB. Die Firma KEB hat in der Vergangenheit bereits im Rahmen eines anderen Projekts einen solchen Umbau an einem ihrer Geräte für das Institut für Elektrotechnik vorgenommen. Ein Gerät der Baureihe F5, Gehäusegröße P mit Nennleistung 250 kW wurde im Weiteren betrachtet. Sollte dieses leistungsmäßig nicht ausreichend dimensioniert sein, gibt es im gleichen Gehäuse noch eine Version mit 315 kW.

Der Transformator muss speziell angefertigt werden. Jedoch können für diese Leistungsklasse Komponenten von Transformator-Standardbaugrößen verwendet werden, welche entsprechend nach Vorgabe anders zusammengebaut und gewickelt werden müssten. Ein entsprechender Fachbetrieb kann damit beauftragt werden.

Mit dieser Anordnung kann, bei bereits erwähnt, Energie nur aus dem autarken Versorgungs-System in den Antrieb geliefert werden. Eine Rückspeisung im Bremsbetrieb ist nicht möglich. Der Batterie-Satz muss über die Brennstoffzelle geladen werden. Soll der Batterie-Satz im Oberleitungsbetrieb aus dem Bahnstromnetz geladen werden, müsste eine der folgenden Erweiterungen implementiert werden:

- Statt dem sekundären Gleichrichter wird ein weiterer Pulswechselrichter vorgesehen. Dieser muss aber auf dem Spannungsniveau des Zwischenkreises der Antriebsumrichter operieren (1200-1400V) und ist somit als kommerzielles Produkt schwerer zu beschaffen. Des Weiteren wird die Regelung des DC/DC-Konverters aufwändiger.
- Es könnte ein eigener DC/DC-Konverter als Laderegler vorgesehen werden. Die einfachste Lösung wäre eine Speisung über den Hilfsbetriebe-Wechselrichter der Lokomotive. Dafür könnte ein kommerzielles Gerät mit Anpassungen verwendet werden. Eine Speisung über die Heizwicklung wäre ebenso denkbar. Die technische Lösung des Ladereglers dürfte sich in diesem Fall aber als komplizierter erweisen.

In Tabelle 10 sind Abmessungen und Gewichte der Hauptkomponenten für den potentialgetrennten DC-DC-Konverter aufgelistet. Der Frequenzumrichter F5 der Firma KEB stellt weder beim Einbauvolumen, noch beim Gewicht ein großes Problem dar. Alternativ sind die luftgekühlte und die wassergekühlte Version angeführt. Der Einbauraum des Geräts mit Wasserkühlung ist etwa um 20% reduziert. Jedoch stellt das nur eine Verbesserung beim Einbauraum dar, wenn das Gerät an einen bestehenden Kühlkreislauf angeschlossen werden kann (eventuell Batterie-Kühlung). Problematischer könnte die Anordnung des Transformators werden, da dessen Gewicht erheblich größer ist. Für den

Transformator wird eine Standard-Trockentrafo-Konzeption mit Lüfter (Bauform AF) vorgesehen, um Masse und Volumen gering zu halten.

DC-DC-Konverter potentialgetrennt		
Wechselrichter zum Bsp.		KEB F5 luftgekühlt Gehäusegröße P
Länge	mm	960,0
Breite	mm	340,0
Tiefe	mm	460,0
Gewicht	kg	97,5
Volumen	dm3	150,1
Wechselrichter zum Bsp.		KEB F5 wassergekühlt Gehäusegröße P
Länge	mm	960,0
Breite	mm	340,0
Tiefe	mm	360,0
Gewicht	kg	96,0
Volumen	dm3	117,5
Transformator		
Länge	mm	710,0
Breite	mm	570,0
Tiefe	mm	500,0
Gewicht	kg	270,0
Volumen	dm3	202,4

Tabelle 10: Abmessungen und Gewichte der Komponenten für den potential-getrennten DC/DC-Konverters

4.7.3. Pulswechselrichter für den Fahrbetrieb (Alternative 2)

Der, für diese Lösung vorgesehene, Pulswechselrichter (50) würde im, autark versorgten Betrieb, die intern verbauten Umrichter der Lokomotive als Antriebsumrichter ersetzen. Da er direkt aus dem Batteriekreis gespeist wird, kann er die Antriebsmotoren aber nur mit reduzierter Spannung betreiben. Für den autarken Betrieb ohne Oberleitung mit der entsprechend eingeschränkten Leistung sollte dies kein Problem darstellen. Da die Lokomotive hier nur mit niedrigen Geschwindigkeiten und damit niedrigen Motordrehzahlen betrieben wird, ist für den Betrieb der Maschinen die volle Nennspannung nicht nötig (siehe auch Abbildung 6). Wegen der Leistungsbegrenzung auf 200 kW erfolgt bereits bei 3-4 km/h der Übergang vom Drehmoment-begrenzten Betrieb auf den leistungsbegrenzten Betrieb, und nicht bei 24-25 km/h, welches die 8-fache Leistung erfordert. Je nach Spannungsni-

veau des verwendeten Batterie-Satzes verringert sich die, zur Verfügung stehende, Spannung im Vergleich zum Oberleitungsbetrieb (1400 V) auf etwa 36%-56%. Dies sollte ausreichen, um obige Bedingung zu erfüllen. Um die volle Zugkraft realisieren zu können, muss der alternative Antriebsumrichter jedoch in der Lage sein, den vollen Motorenstrom liefern zu können. Bei einem Motor-nennstrom von etwa 200 A pro Maschine müsste der Umrichter mit Reserve etwa 820-850 A bereitstellen können. Da sich die benötigte Abgabeleistung des Geräts von etwa 250 kW bei reduzierter Spannung und vollem Motorenstrom ergibt, wird die resultierende Baugröße (gegeben für volle Nennspannung) erheblich größer als die 250 kW ausfallen.

Der Ansatzpunkt für die Beschaffung dieses Pulswechselrichters wäre derselbe, wie in Kapitel 4.7.2 bereits beschrieben, durch Modifikation eines kommerziellen Frequenzumrichters. Deshalb sind in Tabelle 11 wiederum die Abmessungen und Gewichte des Frequenzumrichters F5, Gehäusegröße P von KEB angeführt. Um die Bedingung Motorstrom zu erfüllen, sind jedoch zwei Geräte nötig, die entweder im Master-Slave-Modus operieren und gemeinsam alle vier Fahrmotoren versorgen oder jeweils einer der Umrichter zwei Motoren speist. Damit würden 867 A zur Verfügung stehen. Die Nennbauleistung der Anordnung liegt bei 560 kW. In Tabelle 11 sind die entsprechenden Abmessungen und Gewichte für die luftgekühlten Version, in Tabelle 12 die der wassergekühlten Version aufgelistet. Alternativ könnte man vier Umrichter kleiner Baugröße einsetzen, um jeden Fahrmotor über einen eigenen Umrichter zu versorgen. Aus Sicht der Maschinenregelung wäre dies vorteilhafter. Aus dem Sortiment der Firma KEB wäre geeignet ein Gerät F5 der Gehäusegröße U. Die Ausführung mit der Nennleistung von 110 kW kann einen Dauerstrom von 210 A am Ausgang liefern. Tabelle 13 sind die mechanischen Daten der luftgekühlten Ausführung, in Tabelle 14 die der wassergekühlten Ausführung angeführt. Im aktuellen Fall mit Komponenten von KEB würde sich dadurch keine Einsparung von Einbauraum oder Gewicht ergeben. Die einzelnen Geräte dieser Gehäusegröße U sind jedoch etwas kleiner als die mit Gehäusegröße P und würden so eventuell eine günstigere, alternative Anordnung erlauben.

Da die bestehenden Motorzuleitungen bereits mit Schützen zur Abtrennung von den internen Antriebsumrichtern versehen sind, würde im Weiteren nur ein paralleler Satz von Schützen kleinerer Leistung zur Zuschaltung auf die Motorzuleitungen des alternativen Antriebsumrichter benötigt, sowie die alternativen Motorleitungen selber. Diese Schütze sollten am gleichen Einbauort wie die bestehenden Schütze montiert werden, wenn möglich.

Für den zusätzlich benötigten Hilfs-Pulswechselrichter für die Versorgung der Hilfsantriebe kann man ebenso einen modifizierten Frequenzumrichter verwenden wie für den Antrieb. Da im autarken Betrieb einige der bestehenden Hilfsantriebe der Lokomotive eventuell abgeschaltet oder zumindest mit reduzierter Leistung betrieben werden könnten, könnte dieser Pulswechselrichter auch entsprechend kleiner dimensioniert werden. Da bis jetzt die Datenlage zum Thema Verbrauch der Hilfsantriebe und Hilfssysteme unzureichend ist, müsste dahingehend in Phase 2 diese Problem noch im Detail untersucht werden.

Antriebsumrichter zum Bsp.		KEB F5 luftgekühlt Gehäusegröße P
Länge	mm	960,0
Breite	mm	340,0
Tiefe	mm	460,0
Gewicht	kg	97,5
Volumen	dm ³	150,1
Benötigte Anzahl	Stück	2
Gesamtgewicht	kg	195,0
Gesamtvolumen	dm ³	300,2

Tabelle 11: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße P, luftgekühlt

Antriebsumrichter zum Bsp.		KEB F5 wassergekühlt Gehäusegröße P
Länge	mm	960,0
Breite	mm	340,0
Tiefe	mm	360,0
Gewicht	kg	96,0
Volumen	dm ³	117,5
Benötigte Anzahl	Stück	2
Gesamtgewicht	kg	192,0
Gesamtvolumen	dm ³	235,0

Tabelle 12: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße P, wassergekühlt

Antriebsumrichter zum Bsp.		KEB F5 luftgekühlt Gehäusegröße U
Länge	mm	800,0
Breite	mm	340,0
Tiefe	mm	360,0
Gewicht	kg	75
Volumen	dm ³	97,9
Benötigte Anzahl	Stück	4
Gesamtgewicht	kg	300,0
Gesamtvolumen	dm ³	391,6

Tabelle 13: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße U, luftgekühlt

Antriebsumrichter zum Bsp.		KEB F5 wassergekühlt Gehäusegröße U
Länge	mm	800,0
Breite	mm	340,0
Tiefe	mm	260,0
Gewicht	kg	75
Volumen	dm ³	70,7
Benötigte Anzahl	Stück	4
Gesamtgewicht	kg	300,0
Gesamtvolumen	dm ³	282,8

Tabelle 14: Abmessungen & Gewicht alternativer Antriebsumrichters KEB F5, Gehäusegröße U, wassergekühlt

4.8. Zugsteuerung

Für die Realisierung einer Systemanpassung, ist es erforderlich das bereits bestehende Antriebssystem mit dem adaptierten Brennstoffzellen-Batterie System elektronisch zu verbinden. Um dies gewährleisten zu können und gleichzeitig alle notwendigen Bahnrichtlinien einzuhalten, wird der Einsatz von zertifizierten Bahnsteuerungen notwendig. Dabei erweist sich besonders die Steuerung der Firma Selectron im Bereich der Umrüstung von Lokomotiven als nützlich.

Die Steuerung der Firma Selectron bringt trotz der sehr geringen Abmessung hohe Leistungen und Geschwindigkeiten zusammen. Alle Module dieses Herstellers sind qualifiziert und zertifiziert für den Bahnbereich. Durch erfüllen der Norm EN 50155 sind die einzelnen Module resistent und für harte Umgebungsbedingungen gebaut.

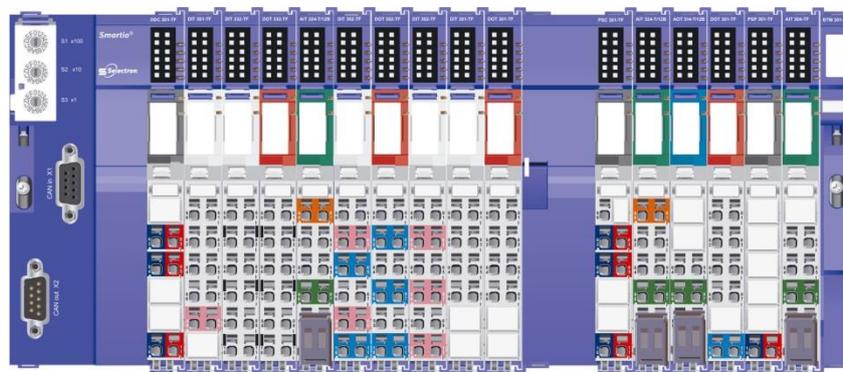


Abbildung 12: Übersicht Selectron Steuermodule

Abbildung 12 zeigt die Hardwarekomponente für den Einsatz im Eisenbahnbereich. Alle Module können variabel aneinander angereicht werden und verfügen, wie bereits erwähnt alle notwendigen Zulassungen im Eisenbahnbereich auf.

4.8.1. Kommunikation und Datenverarbeitung

Da es sich beim umzurüstenden Fahrzeug um eine Lokomotive älteren Baujahres handelt, ist es notwendig, eine Kommunikation zwischen den bestehenden Komponenten und dem adaptierten System zu schaffen. Die notwendigen Informationen des Zugleitstandes werden über digitale und analoge Signale eingelesen und das adaptierte System über ein CAN-Datenprotokoll angesprochen.

CAN (Controller Area Network) ist eine serielle Kommunikationstechnologie, die insbesondere für den zuverlässigen Datenaustausch zwischen elektronischen Steuergeräten im mobilen Bereich eingesetzt wird. Das CAN-Netzwerk setzt sich aus einer Anzahl von CAN-Knoten zusammen, die über ein physikalisches Übertragungsmedium verbunden sind. In der Praxis wird dem CAN-Netzwerk üblicherweise eine Linientopologie zugrunde gelegt (Abbildung 13).

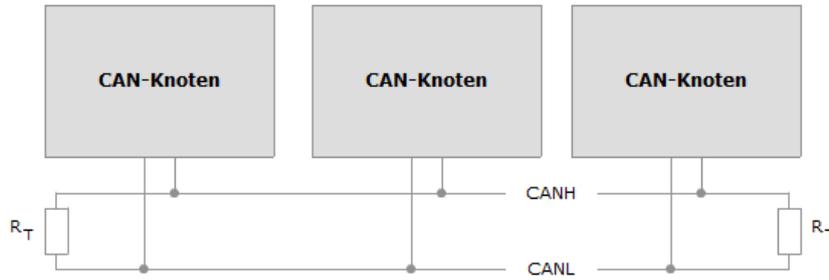


Abbildung 13: Schematische Übersicht CAN Linientopologie

Bei Adaption des Brennstoffzellen-Batterie Systems würden alle Komponenten im CAN-Netzwerk zusammenwirken. Die per CAN übertragenen Daten und die Analogwerte des Zugleitstandes werden ausgewertet und das Triebfahrzeug angetrieben.

4.9. Gesamtsystem

4.9.1. Aktuelle geometrische Darstellung der Rangierlokomotive

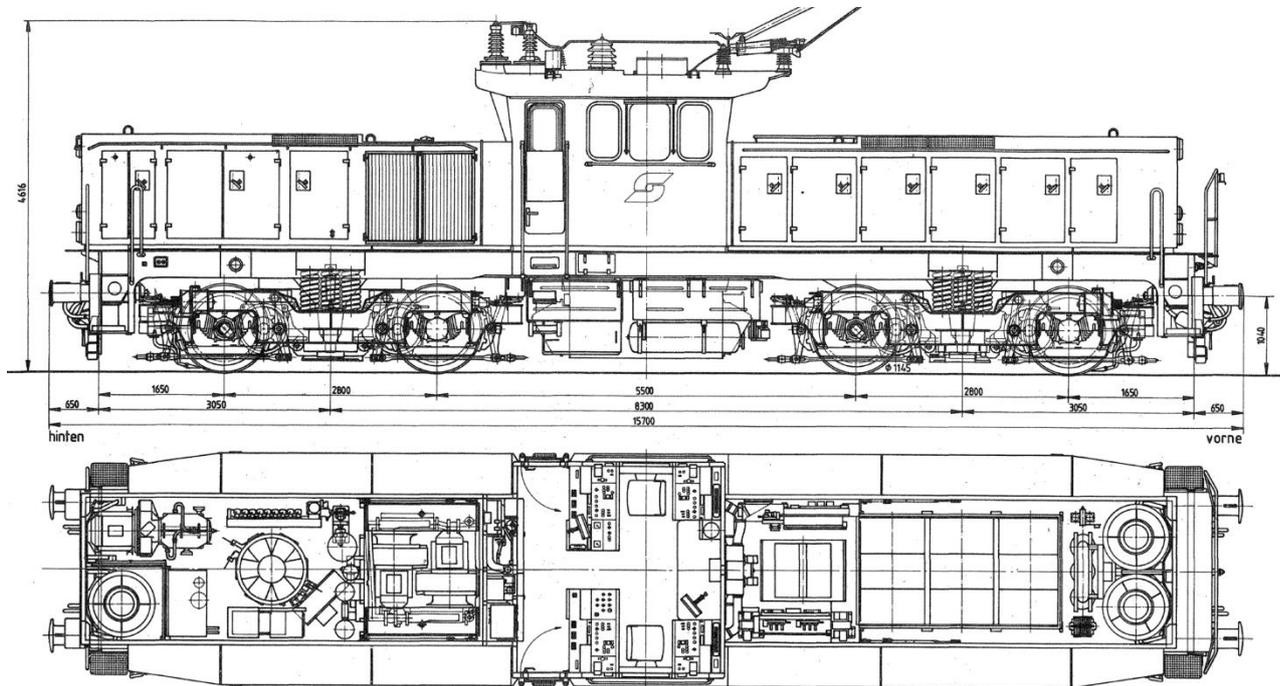


Abbildung 14: Aktuelle geometrische Darstellung der Rangierlokomotive 1063

Die in Abbildung 14 gezeigte Darstellung gibt Einblick in den sehr eingeschränkten Freiraum der Lok für Erweiterungen, hinsichtlich der Adaption eines zweiten Antriebssystems. Die einzelnen Komponenten wie Lüfter, Wechselrichter, aber auch die Transformatoren durften in den letzten Jahrzehnten einige Entwicklungsfortschritte erleben, sodass neue Hardware nicht nur leistungsfähiger ist, sondern zumeist einen geringen Platzbedarf aufweist. Allein durch den Austausch der Wechselrichtertechnik für die Antriebsmotoren, auf neue IGBT-Technologie, könnten bereits markante Platzersparnisse erreicht werden.

4.9.2. Geometrische Integration mit Brennstoffzellen-Batterien-System

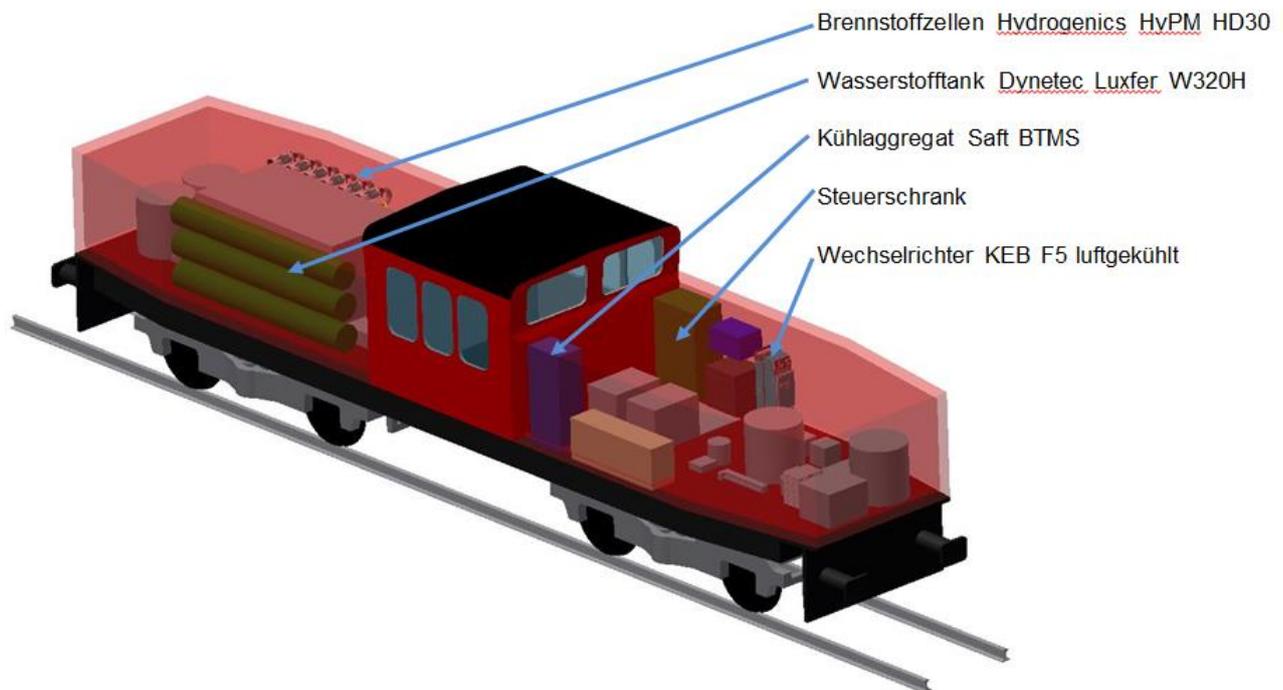


Abbildung 15: Geometrische Integration mit Zweitsystem I

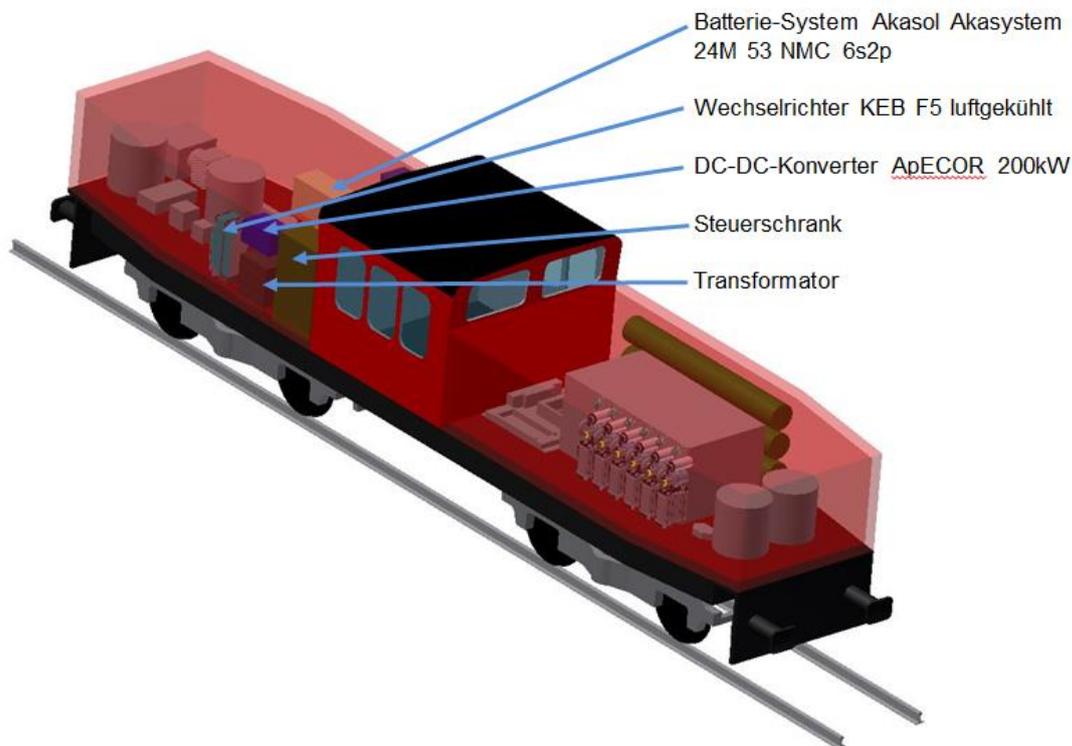


Abbildung 16: Geometrische Integration mit Zweitsystem II

4.9.3. Erläuterung zur geometrischen Integration

Die in Kapitel 4.9.1 gezeigte Darstellung erläutert den momentanen Verbau aller Komponenten, um den Einsatz der Rangierlokomotive unterhalb einer Oberleitung gewährleisten zu können. Anhand der Aufgabenstellung zur Erweiterung der Lokomotive für den Betrieb ohne Oberleitung ist auch ein zusätzliches Antriebs- bzw. Versorgungssystem notwendig, welches gleichzeitig einen definierten Baurahmen benötigt. In Kapitel 4.9.2 ist die Zusammensetzung beider Systeme für einen Betrieb unterhalb und außerhalb einer Oberleitung ersichtlich. Aufgrund des sehr beschränkten Freiraums der Lokomotive, wurden die seitlich vorhandenen Gehwege in Anspruch genommen, um dort das Zweitsystem zu adaptieren.

Der Elektrolyseur wurde aufgrund seiner Baugröße für die erste Prototypenumsetzung vernachlässigt.

Durch die modulare Bauweise eines Brennstoffzellensystems ist es möglich die Komponenten unabhängig voneinander unterzubringen. So kann wie im 4.9.1 ersichtlich, ein Brennstoffzellensystem mit einer Ausgangsleistung von ~200kW in mehrere Einzelsysteme mit kleinerer Ausgangsleistung (hier ~30kW) aufgeteilt werden.

Für die Testphase werden die Komponenten, wie in Kapitel 4.9.2 ersichtlich, seitlich an den Gehwegen angebracht. Sollte es jedoch zwingend sein die beiden Frontseiten einsehen zu können, würde ein Kamerasystem mit Übertragung in den Führerstand die Einsicht in die Bereiche der Lokomotive übernehmen.

Die Masse des Standardtyps der 1063 wird mit 82 t angegeben. Da die Hybridlokomotive unter additiver Ergänzung der bestehenden Lokomotive aufgebaut werden soll, ist für die Unterbringbarkeit der Zusatzkomponenten nicht nur hinsichtlich des Volumens (auf dem begehbaren Bereich links und rechts des Maschinenaufbaus) zu sorgen, sondern es müssen auch Ballastmassen in Höhe von einigen t aus der Lokomotive entfernt werden, um die zulässige Achslast einzuhalten. Diese Anpassungen werden im Auftragsfall zwischen ÖBB und Auftragnehmer im Detail abgestimmt und durchgeführt.

5. Prototypenumsetzung

5.1. Allgemein

Im vorliegenden Bericht wurden zwei Alternativen für die Umrüstung einer existierenden Rangierlokomotive, mit einem Brennstoffzellen-Batterie basierten Hybridantrieb, vorgestellt. Gegenüber einer reinen Batterielösung bietet die Kopplung mit einer Brennstoffzelle den Vorteil, dass die Reichweite prinzipiell nur durch den mitgeführten Wasserstoff begrenzt ist. Um diesen Vorteil bieten zu können, wurde eine Betriebsstrategie entwickelt, die nach dem Charge-Sustaining-Prinzip arbeitet, d.h. der Ladezustand der Batterie wird weitgehend erhalten und ist am Ende des zweistündigen OL-freien Betriebs gleich groß wie zu dessen Beginn.

Für die Systemtopologie wurden zwei Alternativen dargestellt, die beide prinzipiell umsetzbar sind. Die Auswahl der im Prototyp umzusetzenden Alternative muss gemeinsam mit dem Fahrzeugbetreiber ÖBB erfolgen, da sie letztendlich stark davon abhängt, welche Eingriffe in die Steuerung des bestehenden Antriebssystems im Rahmen der Prototypentwicklung realisierbar sind. Wobei die zur Verfügung stehenden Projektkosten eine wesentliche Rolle spielen.

Der Aufbau einer Elektrolyseanlage direkt auf der Lok wird aus verschiedenen Gründen nicht favorisiert. Einerseits ist der notwendige Bauraum für eine solche Anlage nicht vorhanden, andererseits sind bisher keine mobilen Elektrolyseanlagen bekannt, die hier „aus dem Regal“ zum Einsatz kommen könnten. Es ist zu berücksichtigen, dass Elektrolyseanlagen verfahrenstechnisch komplexe Anlagen sind, die z.B. die Aufbereitung des Prozesswassers (Reinigung, De-Ionisierung) und auch des produzierten Wasserstoffs (Reinigung, Trocknung, Komprimierung) beinhalten. Auch aus Sicht der Kosten wäre spätestens bei Einsatz eines zweiten mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugs eine stationäre Anlage wirtschaftlicher als eine mobile Anlage auf dem Fahrzeug. Falls eine mobile Anlage unbedingt gewünscht ist, so könnte diese auf einem zusätzlichen Containerwagen auf Basis existierender stationärer Anlagen entwickelt werden. Diese Entwicklungsleistung war im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie jedoch nicht durchführbar.

5.2. Realisierung

Beginnend mit der Bereitstellung einer vorhandenen elektrischen Rangierlokomotive des Typs 1063 durch den Auftraggeber, kann die Adaptierung des Zweitsystems für den Betrieb außerhalb einer Oberleitung beginnen.

Die Gesamtprojektkosten für die Realisierung eines betriebsfähigen Fahrzeuges betragen 450.000€ abzüglich der entstehenden Kosten des Betreibers, welche in der Höhe von 175.000€ dotiert sind. Somit bleibt ein Betrag von 275.000€ für die Prototypenumsetzung in der Projektzeit von 15 Monaten über.

Durch die sehr hohen Komponentenkosten und dem großen personellen Aufkommen zur Realisierung, haben sich die Ersteller dieser Machbarkeitsstudie eine Strategie überlegt um den Umbau vorantreiben zu können und gleichzeitig den Vorteil von Brennstoffzellen im Bahnbetrieb hervorzuheben. Der Ansatz zur Realisierung umfasst die angedachte Testphase des Betreibers. Wie bereits in der Machbarkeitsstudie erwähnt, kann für die Umsetzung des Prototypen ein Entgegenkommen geschaffen werden, indem diverse Komponenten unentgeltlich zur Verfügung gestellt werden und erst nach der Beendigung der Testphase an die Eigentümer zurückgegeben werden müssen. Durch diesen Ansatz können die Ersteller dieser Machbarkeitsstudie bereits mit dem Kostenaufkommen von 275.000€ eine Umsetzung des Prototypen garantieren. Die exakte Projektkostenaufschlüsselung ist im Kapitel 5.3 nochmal angeführt.

Um die gewünschten Anforderungen in der Prototypenumsetzung zu erfüllen sind vordefinierte Punkte zu erledigen. Bei positiver Rückmeldung zur Umsetzung des vorgeschlagenen Systems ist eine Besichtigung der Lokomotive durch die Projektpartner gemeinsam mit den Know-How Trägern der ÖBB zwingend notwendig. Die in Kapitel 4.9 dargestellten Realisierungsmöglichkeiten hinsichtlich geometrischer Integration, zeigen wie die Rangierlokomotive beim Abschluss der Prototypenumsetzung zusammengestellt sein könnte.

Das erwähnte Problem der hohen Materialkosten für eine Umsetzung, wird durch das Entgegenkommen der Partner gelöst. Da es sich nach Rücksprache mit den Verantwortlichen der ÖBB um eine Testphase mit zeitlicher Begrenzung handelt und die Rangierlokomotive wieder zur Gänze rückgebaut werden soll, erfolgt die leihweise Bereitstellung der notwendigen Batteriemodule (ohne Balancing, Management, Schutz) aus Re-Use-Modulen unter Haftungsausschluss mit Gefahrenübergang bei Ausladung am Aufbauort des Prototyps bzw. der Einladung der Module in das Transportfahrzeug. Die Re-Use-Module, deren Zustand (vorherige Nutzung, Kapazität, Alterung, innerer Zustand) nicht bekannt ist, müssen zuvor entsprechend getestet, mit Balancing, Monitoring und Schutz ausgestattet und an den Aufbauort der Hybridlokomotive transportiert werden. Wie zuvor erläutert, wird für den Prototypen eine Nennkapazität von etwa 100 kWh empfohlen, um die Zieldaten 200 kW am Rad maximal erreichen zu können, und eine entsprechende Energieentnahmefähigkeit sicherzustellen, wenn die wegen Einhaltung des vorgegebenen Kostenrahmens zwangsweise klein dimensionierte Brennstoffzelle durchläuft. Re-Use-Zellen dieses Typs sind bei Versuchen wie einer Elektrofahrzeug-

Fahrt über 200 km am Stück und in verschiedenen Aufladevorgängen getestet und in gutem Zustand befindlich befunden worden.

Grundsätzlich empfehlen wir durch die Gegebenheiten für Phase 2, die beschriebene Variante 2 zu implementieren. Anhand der gegebenen Projektkosten und der Tatsache, dass das Batteriesystem zur Verfügung gestellt wird, müssten nur mehr Komponenten wie Brennstoffzelle und Leistungselektronik zugekauft werden. Um auch hier die Materialkosten gering zu halten, sollte für die Testphase nur eine Brennstoffzelle mit geringer Ausgangsleistung (~30kW) angeschafft werden. Der Grundgedanke der Umsetzung in dieser Machbarkeitsstudie kann trotzdem erfüllt bzw. aufgezeigt werden. Durch die Anschaffung einer Brennstoffzelle mit reduzierter Leistung, sinken auch hier dementsprechend die Preise zur Komponentenumsetzung. Die Brennstoffzelle würde im Prototypen dauerhaft die elektrische Energie an das Batteriesystem liefern. Durch die Variation der verschiedenen Größen des Wasserstofftanks, kann gleichzeitig die Reichweite außerhalb des Oberleitungsnetzes variiert werden.

Nachstehende Abbildung wurde bereits im Rahmen dieser Studie beschrieben und dabei deren Vor- und Nachteile genau erläutert. Für die Umsetzung des Prototypens würde die Brennstoffzelle (20) eine 30 kW Brennstoffzelle der Firma Hydrogenics sein. Die Ausgangsspannung würde durch den DC/DC Wandler (23) auf die notwendige batterie-Zwischenkreisspannung angepasst werden. Dieses Spannungsniveau wäre dann gleichgesetzt mit der Ausgangsspannung des Batteriesystems. Die im Zwischenkreis vorhandene elektrische Energie würde in weiterer Folge über den Wechselrichter in eine drei phasige Spannung umgeformt und so den Antriebsmotoren zur Verfügung stehen. Eine im Triebfahrzeug verbaute Steuerung würde das System inklusive des verbauten Energiemanagements steuern und regeln. Sozusagen wären die beiden Systeme unabhängig voneinander und werden über ein Schaltsystem voneinander getrennt. In Abbildung 17 ist noch der Elektrolyseur (1) ersichtlich. Dieser wird im Rahmen der Prototypenumsetzung allerdings nicht implementiert.

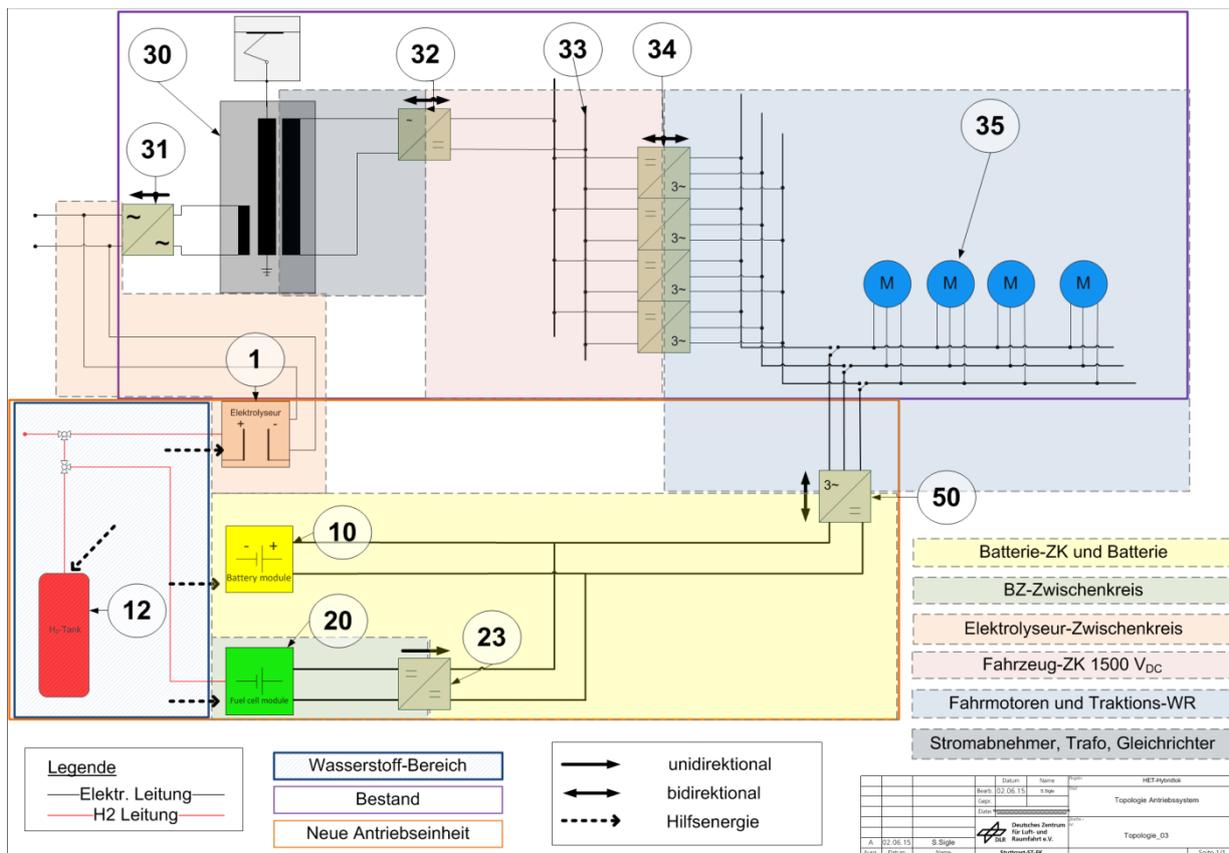


Abbildung 17: Systemtopologie für Prototypenumsetzung

5.2.1. Batteriedimensionierung (Energie) für Prototyp

Standardwerte für die Strombelastbarkeit von Lithium-Ionen-Batterien liegen für Entladen bei 2C (100%-Entladung in 0,5 Stunden) bzw. für Laden bei 1C (100%-Ladung in 1 Stunde). Neue Batterieentwicklungen erreichen bereits die angegebenen deutlich höheren Werte zumindest in Werbedaten, wieder jedoch mit Einschränkung der Zyklenzahl und Lebensdauer. Bedingt durch den engen Kostenrahmen für den Prototyp müssen für diesen Re-Use-Batterien auf Lithium-Ionen-Basis eingesetzt werden, welche einem früheren Entwicklungsstand entsprechen, doch auch bereits strommäßig über die Standardwerte hinausgehen. Zellen des Typs YUASA LEV50 können mit zumindest 3C (100%-Entladung in 0,33 Stunden) belastet werden, auch beim Nutzbremsen (Rekuperation) können 2C ((100%-Ladung in 0,5 Stunden) verkraftet werden. Somit ist die Batterie für den Prototyp aus Kostengründen auf 100 kWh (Nennwert) zu dimensionieren. Dies kommt im betrieblichen Einsatz auch der begrenzten Leistung der Brennstoffzelle beim Prototyp zu Gute.

Um hohe Zyklenzahlen (z.B. 5000) zu erreichen, ist hinsichtlich der genutzten Kapazität der Re-Use-Zellen ein Derating angesetzt, sodass die Batterie-Lade- und Entlade-Kennlinie praktisch nur im linearen Bereich genützt wird. Die somit genutzte Kapazität beträgt 80% der Nennkapazität, die Zyklenzahl erhöht sich Anstelle der üblichen Aufladung bis 4,2 V pro Zelle wird bei den Re-Use-Zellen

bei 4,1 V geendet. Daraus ergibt sich eine Nichtnutzung von 5% der Nennkapazität. Die Entladeschlussspannung der Re-Use-Zellen wird auf ca. 3,3 Volt angesetzt, sodass in diesem Bereich bis herunter zu einer Entladespannung von 3,0 V je Zelle etwas über 10% der Nennkapazität üblicherweise nicht genutzt werden, als Reserve für begrenzte Anzahl von Einsätzen zur Verfügung stehen.

5.2.2. Sicherheitsaspekte im Prototyp

Sicherheit bei Lithium-Ionen-Batterien:

Lithium-Ionen-Batterien stellen die gegenwärtig beste Lösung für elektrochemische Energiespeicher in bezug auf Energieinhalt pro Masse und pro Volumen dar. Gleichzeitig sind auch hohe Leistungsflüsse beim Entladen (Energieabgabe) und Laden (Energieaufnahme durch die Batterie z.B. beim Nutzbremsen) erreichbar und dies in Verbindung mit höchsten Zyklenzahlen. Der innere Aufbau beinhaltet ein Kohlenwasserstoff-Gemisch als Elektrolytträger, da zufolge des Lithiums Wasser ausgeschlossen werden muss. Hierdurch ergibt sich ein gegenüber Batterien z.B. auf Blei/Bleiodioxid/Schwefelsäurebasis völlig unterschiedliches Gefährdungsszenario.

Bleibatterien reagieren bei entsprechendem Kurzschluss mit Funkenbildung in Nähe der Batterie praktisch augenblicklich mit einer heftigen, die Batterie zerstörenden Wasserstoffgasexplosion. Wasserstoff und Sauerstoff entstehen durch die hohen Ströme in Form von Gasblasen auch im Elektrolyten, in die sich die Explosion ausbreitet. Bleibatterien können auch durch Hochohmig-Werden einer Zelle ausfallen. Fließt über diese hochohmige Zelle, getrieben durch die noch funktionsfähigen Zellen der Batterie bei höherer Spannung, ein üblicher Betriebsstrom, können offenes Feuer und Metallschmelzvorgänge auftreten.

Lithium-Ionen-Batterien sind durch ihre Hauptnutzung als Energiespeicher in der Elektromobilität intensiv untersucht. Folgende Ausfallszenarien sind bekannt:

- Dauerkurzschluss: Bedingt durch niedrige Innenwiderstände fließt ein sehr hoher Strom, dessen thermische Wirkung die Zelle im Inneren aufheizt und hierbei innen Druck aufbaut, bis nach einigen zehn Sekunden die Sollbruchstelle öffnet. Hierbei strömt der Kohlenwasserstoff-Elektrolyt aus und kann sich entzünden. Kurzzeitige Kurzschlüsse (bis einige wenige zehn Sekunden) bleiben ohne Folgen.
- Externe Übertemperatur: Wird eine Lithium-Ionen-Zelle sehr hohen Temperaturen (typischerweise über 150°C bis 200°C) ausgesetzt, z.B. durch externes offenes Feuer aufgeheizt, wird mit Öffnen der Sollbruchstelle ebenfalls eine zusätzliche Energie zur weiteren Ausbreitung des Feuers bereitgestellt. Kurzzeitige externe Übertemperaturen, über die Wärmekapazität der Zelle im Inneren gering gehalten, bleiben ohne Folgen. Sicherungen schützen die Batterie, indem der Kurzschluss innerhalb von Millisekunden abgeschaltet wird, und die Kurzschluss-Aushaltigkeit der Batterie einige 10 Sekunden beträgt (Faktor etwa 1000 im Zeitbereich)
- Mechanische Beschädigung: Wird durch Eindringen von spitzen Körpern oder extremen Druckaufbau der Separator innerhalb der Zelle zerstört, ist ein Kurzschluss der Elektroden die Folge. Der Ab-

bau der chemischen Energie wird wiederum den Elektrolyten (Kohlenwasserstoff) entzündet. Zellen- und Batteriegehäuse sind üblicherweise sehr robust. Die Anordnung der Batterie bei Elektrofahrzeugen ist auf die Hintanhaltung mechanischer Beschädigungen der Batterie auch im Crashfall ausgerichtet.

- Überladen: Bei Überladung nimmt die Zelle die bereitgestellte Energie in der Höhe von etwa 50% der Nennergie weiter auf, bis schließlich etwa 5 bis 5,5 Volt pro Zelle erreicht sind. Sodann geht die Zelle elektrochemisch und thermisch durch, die Sollbruchstelle öffnet sich und üblicherweise heftige Feuererscheinungen sind die Folge. Das Überladen wird durch Regelung, Monitoring und Schutz absolut verhindert (redundante Einrichtungen).

- Innerer Defekt: Ein Elektrodenkurzschluss bei Versagen des Separators führt in Folge zur Zerstörung der Zelle ähnlich einem externen Kurzschluss. Die hohe Fertigungsqualität der heutigen Zellen und die Vermessung vor dem Einsatz ergeben eine extrem geringe Wahrscheinlichkeit für diesen Fehlerfall.

Das Sicherheitskonzept für die Hybridlok ist auf die genannten bekannten Ausfallmechanismen abgestellt, um Betriebssicherheit zu erzielen und Schäden bzw. Zerstörungen zu vermeiden (Gehäuse, Abschottung, Aufteilung in getrennte Stränge, sehr eingegrenzte Sauerstoff-Zufuhrmöglichkeit). Grundsätzlich erfolgt ein wie oben beschriebener Batterieausfall in keiner Form explosionsartig, sondern erstreckt sich bei direktem Sauerstoffzugang zur brennenden Batterie auf eine Zeitspanne von z.B. einer Stunde, wie durch Brandversuche (Montanuniversität, Institut für Elektrotechnik) nachgewiesen. Durch Sauerstoff-Verarmung (Abführung der Brandgase über Rohr) wird ein weiterer Verzögerungseffekt (auf einige Stunden) mit entsprechend abgesenktem Temperaturniveau erzielt. Eine druckdichte Kapselung der Zellen ist realisiert, eine zusätzliche druckdichte Kapselung der gesamten Batterieeinheit erscheint kritisch und wird nicht empfohlen, sehr wohl jedoch eine Druckausgleichsmöglichkeit nach außen über ein längeres Rohr.

Die angeführten Maßnahmen gehen über den Stand der Technik hinaus, um bestmögliche und vernünftige Sicherheit zu gewährleisten.

Sicherheit bezüglich Wasserstoffdrucktank:

Selbst bei einem Aufplatzen des Drucktanks würde eine Wasserstoffgas-Explosion unmöglich sein, da sich der auf Umgebungstemperatur befindliche hochgespannte Wasserstoff durch den Druckabbau über das Leck so stark abkühlt, dass ein langsames kontrolliertes Abbrennen eben diese Energie bereitstellt, die für die Erwärmung des Wasserstoffs auf Brenntemperatur notwendig ist. Der Vorgang des Druckabbaus ist daher verzögert und bringt thermodynamisch tiefe Reaktionstemperatur mit sich. Hier ist kein besonderes Gefährdungspotential erkennbar, welches über einen Dieseltank hinausgeht.

5.3. Kostenaufstellung

Kostenstelle	Benennung	Preis	Anmerkung
0	Allgemeinkosten	€	
0.1	Engineering HET - Verkehrstechnik	51.000 €	-
0.2	Engineering Montanuniversität	49.000 €	-
0.3	Beratungsleistung DLR Stuttgart	20.000 €	-
1	Komponentenkosten		
1.1	Lithium Ionen Batterien – 100kWh	-	Wird seitens Auftragnehmer zur Verfügung gestellt
1.2	Batteriemanagement und Schutzeinrichtung	24.000 €	-
1.3	Brennstoffzellensystem	56.000 €	Hydrogenics HD30-500 inkl. Zubehör
1.4	Wasserstofftank	-	Wird seitens Auftragnehmer zur Verfügung gestellt, 2x 34L Tank mit 350 bar
1.5	Wasserstoffamaturen	12.000 €	-
1.6	Steuerungshardware	21.000 €	-
1.7	Leistungselektronik	65.000 €	-
		298.000 €	

Tabelle 15: Kostenaufstellung Realisierung Prototypenumbau

6. Ausblick

Abschließend wird nun in Rahmen dieser Machbarkeitsstudie ein Ausblick zum Thema alternative Antriebssysteme im Eisenbahnbereich gegeben. Grundsätzlich konnten in Phase 1 des Projektes die wesentlichen Ziele erreicht werden und anhand von zwei möglichen Varianten für den Umbau einer 1063-Verschublok dargestellt werden. Beide gezeigten Lösungsansätze spiegeln bereits das hohe Potential von Brennstoffzellen im Eisenbahnbereich wieder.

Folglich beschäftigen sich bereits große Eisenbahnhersteller wie Alstom damit, Eisenbahnfahrzeuge mit dieser serienreifen Technologie auszurüsten. Auch der Automobilmarkt setzt vermehrt auf Brennstoffzellentechnologie. Automobilhersteller wie Toyota, Hyundai oder Mercedes zeigen, wie es funktionieren kann. Die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen steigerte sich durch die erhöhte Nachfrage in letzten Jahren merklich.

Das Unternehmen HET arbeitet derzeit mit Partnern aus Berlin an einem Projekt zur Umrüstung einer 500 kW Dieselrangierlok auf Brennstoffzellentechnologie. Auch Forschungseinrichtungen wie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt oder die Montanuniversität Leoben können auf erfolgreiche Projekte in diesem Themenbereich zurückblicken.

Der Schritt der Fördergeber und des Betreibers zeigt, wie wichtig es ist, umweltfreundlich zu arbeiten und auf die Nachhaltigkeit solcher Technologien zu setzen.

In den folgenden Referenzen können bestehende Projekte und Arbeiten im Bereich Brennstoffzellentechnologie bei Bahnfahrzeugen eingesehen werden:

- 1.) <http://www.taunus-zeitung.de/lokales/hochtaunus/vordertaunus/Die-Brennstoffzelle-kommt;art48711,1106868>
- 2.) <http://railomotive.com/2009/08/leise-lok-dank-brennstoffzellen/>
- 3.) <http://www.alstom.com/de/press-centre/2015/3/absichtserklärung-uber-nutzung-von-brennstoffzellenfahrzeugen-fur-die-hermann-hesse-bahn-unterzeichnet/>
- 4.) <http://www.handelsblatt.com/technik/energie-umwelt/dieselloks-der-zug-der-zukunft-seite-3/2846832-3.html>
- 5.) <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342698/>
- 6.) <http://www.nahverkehrhamburg.de/busverkehr-hamburg/item/1191-hochbahn-laesst-e-busse-mit-brennstoffzelle-entwickeln>
- 7.) <http://www.zukunft-mobilitaet.net/thema/wasserstoff-sauerstoff-brennstoffzelle/>

7. Datenblätter Komponenten

7.1. Hydrogenics HyPM HD180

HYDROGENICS
Advanced Hydrogen Solutions

HyPM™ HD 180

Heavy Duty Fuel Cell Power Module

- Liquid-cooled advanced MEA PEM stack
- Integral Balance of Plant
- Advanced onboard controls and diagnostics
- Comes with low pressure cathode air delivery
- -46°C sub-zero shutdown capability

Technical Data

Rated Electrical Power	198 kW continuous
Operating Current	0 to 500 A _{DC}
Operating Voltage	360 to 720 V _{DC}
Peak Efficiency	55% ¹⁾
Response	< 5 s from off to idle < 3 s from idle to rated power
Fuel	Hydrogen >99.98%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O) or 80% ethylene glycol / DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +55°C operating -40 to +65°C storage (<2°C with automated freeze shutdown feature)
Communication Interface	CAN v2.0A (standard 11 bit)

¹⁾ Efficiency based on LHV of H₂, 25°C, 101.3 kPa, including onboard parasitic loads, excluding radiator fan and water pump

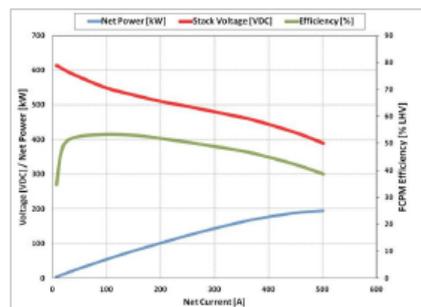


- Rapid start-up and dynamic response
- Unlimited start-stop cycling
- Robust, rugged and reliable
- No water for humidification required
- No nitrogen required for shutdown

Physical

Dimensions L x W x H ²⁾	955 x 1525 x 690 mm
Mass ³⁾	654 kg
Volume ³⁾	1005 L

²⁾ Excluding air delivery and optional water pump
³⁾ Including air delivery and optional water pump



HyPM™ HD180 Typical Performance¹⁾

Actual delivered product may differ in appearance.
Specifications subject to change without prior notification.
Printed in Canada © Hydrogenics Corporation 2012-04-18

HYDROGENICS Corporation
220 Admiral Blvd, Mississauga, Ont. L5T 2N8 Canada
Tel. +1 (905) 361 3660 Fax +1 (905) 361 3626

Includes

- Air delivery unit (low pressure blower)
- Integration and operation manual
- Product Warranty

Options

- Coolant pump
- Thermal management kit
- Diagnostics software
- Power electronics components

Applications

- Urban transit buses
- Heavy duty commercial fleet vehicles
- Industrial trucks
- Marine
- Aerospace

www.hydrogenics.com
fuelcellsales@hydrogenics.com

HYDROGENICS GmbH
Am Wiesenbusch 2, 45906 Gladbeck, Germany
Tel. +49 (2043) 944 133 Fax +49 (2043) 944 146

7.2. Brennstoffzellenkühler und Lüfter AKG OLK.CL AL225

Öl/Luft-Kühler [OLK.CL-AL...]

mit Drehstrom-Motor 230/400V-50Hz

Kühlertyp	D [mm]	E [mm]	H [mm]	I [mm]	K [mm]	N [mm]	O [mm]	U [mm]	W [mm]	d ø [mm]	Leistung [kW]	Drehzahl [min ⁻¹]	db (A)	Gew kg
OLK.CL-AL12	450	391	392	180	220	410	G1"	217	107	290	0,37	1500	68	20
OLK.CL-AL16	440	402	382	240	280	440	G1"	205	123	290	0,37	1500	70	24
OLK.CL-AL25	600	496	571	180	220	500	G1½"	322	105	440	0,37	1000	71	32
OLK.CL-AL35	700	601	642	180	220	510	G1½"	428	104	524	0,37	1000	72	43
OLK.CL-AL45	690	613	632	240	280	540	G1½"	415	123	530	0,37	1000	73	60
OLK.CL-AL60	790	666	732	240	280	605	G1½"	460	123	600	0,37	1000	74	69
OLK.CL-AL75	940	791	882	340	380	760	G1½"	463	205	660	0,37	1000	74	81
OLK.CL-AL105	990	884	932	340	380	630	SAE2"	460	255	660	1,1	1000	75	100
OLK.CL-AL120	1040	992	982	340	380	650	SAE2"	565	255	856	1,1	1000	77	128
OLK.CL-AL135	1090	989	1032	410	450	680	SAE2"	545	261	856	1,1	1000	77	148
OLK.CL-AL225	1240	1220	1182	410	450	810	SAE3"	705	296	1070	3,0	1000	85	217
OLK.CL-AL330	1340	1532	1282	410	450	885	SAE3"	1010	296	1070	7,5	1000	89	343

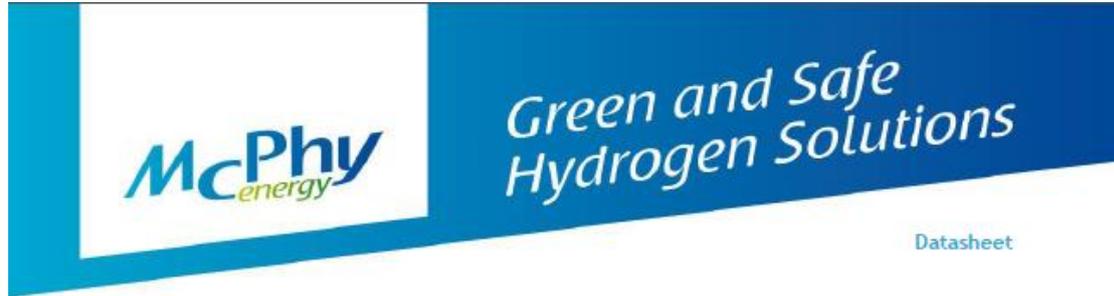
Betriebsdruck
 OLK.CL-AL12 bis OLK.CL-AL120 p max 26 bar
 OLK.CL-AL135 bis OLK.CL-AL330 p max 17 bar

die Größen: OLK.CL-AL120 ... AL330 sind mit stabiler Motoraufnahme ausgeführt
 weitere Motor-/Drehzahlvarianten auf Anfrage
 weiter Anschlussspannungen auf Anfrage
 Kühler mit Gleichstromgebläse (12/24V DC) siehe Datenblatt OLK.CL-D...
 Kühler mit Hydraulik-Motor siehe Datenblatt OLK.CL-H...

SLB GmbH Industriekühler; Konrad-Zuse-Straße 16; D-74343 Sachsenheim
 Tel. 0(049)7147/27672-0; Fax 0(049)7147/27672-25; www.slb-gmbh.de; mail: info@slb-gmbh.de

OLK.CL-AL-001-120612

7-3. Alkalische Elektrolyseanlage McPhy McLyzer 10-10



McLyzer 10-10
10 Nm³/h @ 10 barg

Hydrogen generator

Electrolyser model	McLyzer 10-10
General features	
Nominal hydrogen flow rate	10 Nm ³ /h
Operation range	25 – 100 % of nominal flow rate
Operating pressure	10 - 12 barg
Operating temperature	< 70 °C
Hydrogen purity	< 0.5 % O ₂ in dry H ₂
	After purification
	O ₂ < 5 ppmv H ₂ O < 5 ppmv or Atmospheric dew point < -65 °C
Specific energy consumption stack	5.2 kWh/Nm ³
Overall specific energy consumption	5.5 kWh/Nm ³
Demineralized water consumption	0.82 L/Nm ³
Electrolyte	Approx. 80 L / 20 %wt NaOH
Cooling requirements	Chilled water (Gas cooling)
	Cooling water (Electrolyte cooling)
Power Supply	400 V / 3 phases + N + G / 50 Hz
Installation	Indoor
	Temperature between +5 and +35 °C
Dimensions (LxWxH)	1.5 x 1.5 x 2 m (process module)
	+ 2 x 0.8 x 2 m (electrical cabinet)
Certification	McPhy products are CE certified

All McPhy's offices, agents and distributors contacts are available on our website: www.mcphy.com
Worldwide sales contact: contact@mcphy.com

The content of this leaflet is the property of McPhy Energy S.A. The values stated can change without prior notice. It is prohibited to use the content for any purpose without the written permission of McPhy Energy S.A. The content is protected by copyright. It is prohibited to modify, copy, distribute, transmit, display, publish, sell, license, and create derivative works or to use the content for commercial or public purposes. © McPhy Energy S.A.

7.4. PEM-Elektrolysesystem Proton C10

C Series Hydrogen Generation Systems



Model	C10	C20	C30
DESCRIPTION			
	On-site hydrogen generator in two integrated, automated, site-ready enclosures. Dual-mode Operation (Selectable): <ul style="list-style-type: none"> • Load Following mode automatically adjusts output 0-100% to match demand. • Tank Filling mode operates with power-conservation mode during standby. 		
ELECTROLYTE			
	Proton Exchange Membrane (PEM) - caustic-free		
HYDROGEN PRODUCTION			
Net Production Rate: Nm ³ /hr @ 0° C, 1 bar SCF/hr @ 70° F, 1 atm SLPM @ 70° F, 1 atm kg per 24 hours	10 Nm ³ /hr 380 SCF/hr 179 SLPM 21.6 kg/24hr	20 Nm ³ /hr 760 SCF/hr 359 SLPM 43.3 kg/24hr	30 Nm ³ /hr 1140 SCF/hr 538 SLPM 65.0 kg/24hr
Delivery Pressure - Nominal	30 barg (435 PSIG)		
Power Consumed per Volume of Mass H ₂ Gas Produced*	6.2 kWh/Nm ³ 16.3 kWh/100 ft ³ 68.9 kWh/kg	6.0 kWh/Nm ³ 15.8 kWh/100 ft ³ 66.7 kWh/kg	5.8 kWh/Nm ³ 15.2 kWh/100 ft ³ 64.5 kWh/kg
Purity (Concentration of Impurities)*	ISO 14687-1 Type 1 grade C ISO 14687-2 Type 1 grade D 99.9998% Water Vapor < 2 PPM, -72°C (-98°F) Dewpoint, N ₂ < 2 PPM, O ₂ < 1 PPM, All others undetectable		
Turndown Range	0 to 100% Net Product Delivery (Automatic)		
Upgradeability	Field Upgradeable to a maximum of 30 Nm ³ /hr (1140 SCF/hr)		N/A
DI WATER REQUIREMENT			
Rate at Max. Consumption Rate	9 L/hr (2.4 gal/hr)	17.9 L/hr (4.7 gal/hr)	28.9 L/hr (7.1 gal/hr)
Temperature	+5°C to 40°C (41°F to 104°F)		
Pressure	1.0 to 4.1 barg (10 to 60 PSIG)		
Input Water Quality	ASTM Type II Deionized Water required, < 1 micro Siemen/cm (>1 MegOhm-cm) ASTM Type I Deionized Water recommended, <0.1 micro Siemen/cm (> 10 MegOhm-cm)		
HEAT LOAD AND COOLANT REQUIREMENT*			
Coolant	Liquid Cooled; Non-Fouling*		
Max. Heat Load	33.5 kW (114,307 BTU/hr) (9.6 tons refrigeration)	66.8 kW (227,931 BTU/hr) (19.0 tons refrigeration)	100.2 kW (341,897 BTU/hr) (28.6 tons refrigeration)
Coolant Temperature	5°C to 40°C (41°F to 104°F)		
Coolant Flowrate	Up to 110 L/min (24 gal/min)	Up to 229 L/min (50 gal/min)	Up to 411 L/min (90 gal/min)
Pressure Drop (at full flow)	Up to ~3.0 barg (~45 PSIG)	Up to ~3.0 barg (~45 PSIG)	Up to ~3.0 barg (~45 PSIG)

* Consult Proton Applications Engineering Department for specific requirements and options.



www.protononsite.com | T 203.949.8097 | F 203.949.8016 | Proton OnSite, 10 Technology Drive, Wallingford, CT 06492 | customerservice@protononsite.com

7.5. Wasserstofftanks Luxfer Dynecell

Luxfer Cylinders - Luxfer: Setting The Standard Worldwide

Product: Luxfer Dynecell



Units: Metric

Service pressure	H2 capacity	Diameter	Length	Water volume	Weight	Total weight tank and fuel	Thread size	Neck mount	Part number
bar	kg	mm	mm	l	kg	kg			
350	0.74	298	700	30.7	18.4	19.1	2.000-12 UN	No	M030H
350	1.02	340	740	42	25.6	26.6	2.000-12 UN	No	Q042H
350	1.80	400	900	74.2	38.9	40.7	2.000-12 UN	No	V074H
350	4.89	415	2110	202	95	99.9	2.000-12 UN	Yes	W205H
350	7.7	415	3128	318	138	145.7	2.000-12 UN	Yes	W320H
700	1.63	327	920	40	41	42.6	1.500-12UN	Yes	M040H
700	4.27	541	900	105	102	106.3	1.500-12UN	No	X104H

Custom cylinder lengths and size configurations are available upon request with minimum order. Approved pressure relief device must be used for fire protection. Cylinder specifications are nominal values and are subject to change without notice.

(10/31/2013)

7.6. Bauraum / Massen Brennstoffzelle, H₂-Versorgung, Kühlsystem

Systemeinheit	Bauteile	Funktion	Relevanz	Anzahl	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Massen [kg]	Preis [€]	Bemerkungen
BZ-System	Stack	Anordnung mehrerer Brennstoffzellen	1	1	1582	1085	690	720		Masse inkl. Luftversorgung und Kühlmittelpumpe
BZ-System	Gebläse / Kompressor	Erzeugung des benötigten Luftmassenstroms	1	6	257	205	190			Masse und Bauraum im System HD180 enthalten
BZ-System	Steuergerät Brennstoffzelle	Steuerungseinheit -> hat auch Zugriff auf das Gesamtsystem (BZ, Kühlung, ggf. Tankmodul)	1							Masse und Bauraum im System HD180 enthalten
BZ-System	Druckminderventil	Druckminderung von Mitteldruck- auf Niederdruckniveau	2							
BZ-System	Wasserstoffleitung	Wasserstofftransport	2							
BZ-System	Ausgleichsbehälter	Bevorratung von Wasserstoff zum Ausgleich von Druckschwankungen und zum kontrollieren Abfahren	2		400	120	120			Schätzwert ist zu prüfen (Hydrogenics?)
BZ-System	Luftfilter	Filterung der einströmenden Kathodenluft	2	6	466	165	165			Masse und Bauraum im System HD180 enthalten
BZ-System	Luftleitung	Lufttransport	2							
BZ-System	Abfahrwiderstand	Kontrollierte Spannungsabsenkung bei Systemabschaltung	2		600	200	200	100		Schätzwert ist zu prüfen (Hydrogenics?)
BZ-Kühlsystem (flüssig)	Wärmeübertrager	Wärmeabführung aus dem Kühlmittel an die Umgebung	1	1	1240	1100	1220	217	4450	Alternativ auch OLK-CL AL35: kleiner, leichter, billiger, aber lauter
BZ-Kühlsystem (flüssig)	Lüfter	Luftzirkulation zur Wärmeabfuhr des Wärmetauschers	1							Lüfter im Kühler integriert
BZ-Kühlsystem (flüssig)	Kühlmittelpumpe	Erzeugung eines ausreichenden Kühlmitteldurchflusses	1	6	190	190	156			Masse und Bauraum im System HD180 enthalten
BZ-Kühlsystem (flüssig)	Ausgleichsbehälter	Ausgleich bei steigenden Temperatur	1							geschätzt < 20 ltr Volumen
BZ-Kühlsystem (flüssig)	Deionisations-Patrone	Ionenfilterung zur Minderung der Leitfähigkeit des Kühlmittels	1							geschätzt < 10 ltr Volumen
BZ-Kühlsystem (flüssig)	Kühlmittelleitungen	Kühlmitteltransport	2							Volumen vernachlässigbar
BZ-Kühlsystem (flüssig)	Kühlmittelfilter	Filterung des Kühlmittels	2							Maße und Gewicht für Kombination aus 3 Tanks, Masse inkl. H ₂
H ₂ -Tanksystem	Wasserstofftank Variante 1	inkl. Intank-Ventil, Bleed-Ventil, Sensoren für Druck und Temperatur (==>Füllstand)	1	1	3228	1445	515	438		
H ₂ -Tanksystem	Wasserstofftank Variante 2	inkl. Intank-Ventil, Bleed-Ventil, Sensoren für Druck und Temperatur (==>Füllstand)	1	1	2210	2375	515	500		Maße und Gewicht für Kombination aus 5 Tanks, Masse inkl. H ₂

7-7. Lithium-Ionen Batteriesystem AKASYSTEM 30M



High Performance Battery Systems

AKASYSTEM 30M

533 kW • 71 kWh • 666 V • 629 kg



SKALIERBAR. PRAXISBEWÄHRT. EINSATZBEREIT.

- Frei skalierbares System mit variabler Anzahl an AKAMODULES
- Flexibles Packaging (Conversion Design, Purpose Design)
- Hohe Energie- und Leistungsdichte
- Einfache Systemanbindung / Ready-to-Install
(Abgestimmte Anbindungspunkte, standardisierter CAN-Bus, wahlweise VDA/SAE-Kühlanschlüsse)
- Hervorragendes Preis-Leistungs-Verhältnis durch Serienreife
- Konsequente Flüssigkühlung für gleichmäßige Temperierung
- Kompakt und leicht, deutliche Volumenreduzierung dank Flüssigkühlung
- Lange Lebensdauer durch aktives und passives thermisches Management
- Außergewöhnlich robust, wartungsfreier Einsatz
- Serienprodukt, EMV-tauglich mit umfassender Antriebssystemkompatibilität

SICHER UND AUTOMOTIVE ZERTIFIZIERT.

- Entwicklung zertifizierbar nach ISO 26262 bis ASIL C / EN 61508 SIL2
- Getestete Sicherheit (USABC, IEC, SAE, UN 38.3) und umfangreiche „Real World“ Erfahrung
- Mehrstufiger Kurzschlusschutz auf Zell-, Modul- und Systemebene
- Zusätzliche Betriebssicherheit durch redundantes Batteriemanagementsystem
- Hervorragende Eignung für Mehrtrogsysteme mit voller Überwachung auf Einzeltrug- und Gesamtsystembasis
- Schutzklassen IP67 (IP6K9K möglich)
- Robustes und bewährtes BMS-Master Steuergerät (SIL2-fähige Hardware TTC90)
- Lokale redundante Überwachungselektronik (SCU = Safety Control Unit) in jedem Trug
- Spannungs- und Temperaturüberwachung
- SOC/SOH Analyse
- Balancing (Ladungsausgleich zwischen den Zellen)



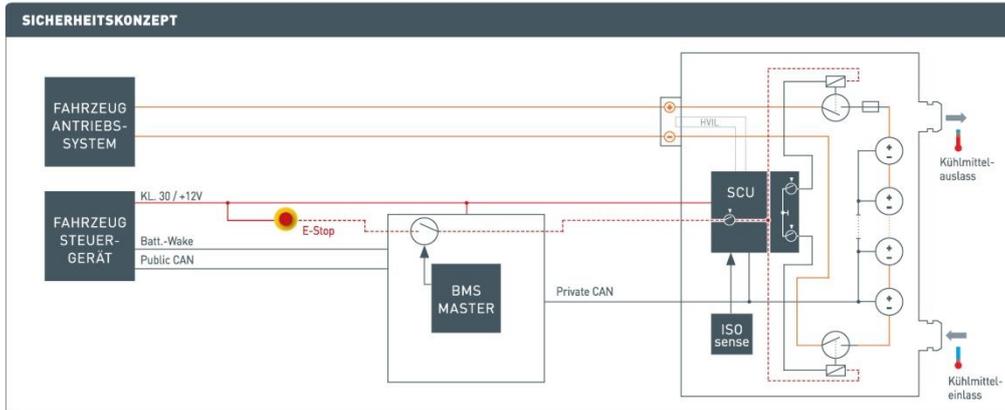
WWW.AKASOL.COM



High Performance Battery Systems

BASISDATEN ELEKTRIK	30M 53 NMC		30M 46 NANO NMC	
Zellverschaltung im Modul	6s2p	4s3p	6s2p	4s3p
Kapazität	106 Ah	159 Ah	92 Ah	138 Ah
Energie	70,6 kWh	70,6 kWh	61,3 kWh	61,3 kWh
Technologie	Li-Ion NMC	Li-Ion NMC	Li-Ion Nano NMC	Li-Ion Nano NMC
Nennspannung	666,0 V	444,0 V	666,0 V	444,0 V
Spannung max.	756,0 V	504,0 V	756,0 V	504,0 V
Spannung min.	486,0 V	324,0 V	486,0 V	324,0 V
Entladestrom / -leistung max. [10s]	800 A / 532,8 kW	800 A / 355,2 kW	800 A / 532,8 kW	800 A / 355,2 kW
Entladestrom / -leistung cont.	400 A / 266,4 kW	400 A / 177,6 kW	400 A / 266,4 kW	400 A / 177,6 kW
Ladestrom / -leistung max. [10s]	318 A / 211,8 kW	477 A / 211,8 kW	460 A / 306,4 kW	690 A / 306,4 kW
Ladestrom / -leistung cont.	212 A / 141,2 kW	318 A / 141,2 kW	276 A / 183,8 kW	400 A / 177,6 kW
Interne HV-Sicherung	400 A	500 A	400 A	500 A
Stromverbrauch im Standbymodus	15,0 W	15,0 W	15,0 W	15,0 W
Lebenserwartung [bei 80% DoD]	> 3.100 Zyklen	> 3.100 Zyklen	> 6.800 Zyklen	> 6.800 Zyklen

BASISDATEN MECHANIK	30M 53 NMC		30M 46 NANO NMC	
Druck Kühlmedium max. @ Durchflussmenge	1,0 bar	1,0 bar	1,0 bar	1,0 bar
Druckverlust Kühlmedium bei Nenndurchfluss und T _{coolant} = 25°C (Wasser/Glykol = 50/50) @ Durchflussmenge	400 mbar @ 1.000 l/h			
Betriebstemperaturbereich beim Entladen	-15 bis 55° C			
Betriebstemperaturbereich beim Laden	0 bis 45° C			
Schutzklassen	IP67 (IP6K9K möglich)	IP67 (IP6K9K möglich)	IP67 (IP6K9K möglich)	IP67 (IP6K9K möglich)
Gewicht (inkl. Schützbox)	629 kg	629 kg	674 kg	674 kg
Abmessungen (L x B x H) in mm	1545 x 750 x 420	1545 x 750 x 420	1545 x 750 x 432	1545 x 750 x 432



AKASOL

HIGH PERFORMANCE BATTERIESYSTEME.
MADE IN GERMANY MIT ÜBER 20 JAHREN ERFAHRUNG.

Das deutsche Unternehmen AKASOL mit Sitz in Darmstadt gehört zu den weltweit führenden Entwicklern und Produzenten von mobilen und stationären Hochleistungs-Batteriesystemen. Einsatzgebiete der bereits mehrfach ausge-

zeichneten Speicherlösungen sind die Nutzfahrzeug- und Automobilindustrie, der Schiffbau sowie die Windenergie-, Wasserkraft- und Solarwirtschaft.

AKASOL GmbH
Landwehrstraße 55, 64293 Darmstadt / Germany
Tel. +49 6151 800500, info@akasol.com, www.akasol.com

Stand: September 2013

7.8. Lithium-Ionen Batteriesystem Ion-Board Regen 515V-216kW

Ion-Board® Regen 515 V – 216 kW Lithium-ion battery system

Innovative battery system for regenerative rail hybrid traction applications

Saft's **Ion-Board®** Regen 515 V – 216 kW battery unit has a nominal voltage of 515 V and is able to provide high discharge capability up to 216 kW in 30 s and store 128 kW of regen power in 30 s.

One battery system consists of:

- 26 Saft **Modul'ion®**-12 (Mi 12-20.60 PFe) Super-Phosphate™ (SLFP) connected in series
- Power box equipped with a manual switch, contactor and fuses
- Liquid cooling system and, as an option, a BTMS⁽¹⁾ for battery management

The **Modul'ion®**-12 and the power box are placed in a metallic box 'Long' type.



Applications

- For light rail systems: trams, streetcars and tram-trains
- To supply autonomous traction power for catenary free
- To store kinetic braking energy (regenerative braking) and reuse it for autonomous traction
- To maintain power quality for the local distribution network

Features

- Quick and high recharge capabilities (e.g. regenerative braking application)
- High life cycle performance
- Light weight and compact design for rail applications
- Robust construction withstanding onboard vehicle shocks and vibrations
- Liquid cooled system

Benefits

- High rate charge and discharge capability for an always available system
- Easy installation (roof mounted assembly)
- Minimum maintenance
- Reduced CO₂ footprint and saved energy

⁽¹⁾ BTMS: Battery Thermal Management System

Nominal characteristics	Values for 1 box
Li-ion module	Modul'ion® -12 20.60 PFe
Number of modules in series	2 rows of 13
Voltage (Min/Max)	390 V – 593 V
Nominal voltage	515 V
Typical capacity in C ₅	60 Ah
Rated capacity in C ₅	56 Ah
Nominal energy	30.9 kWh
Mechanical characteristics	
Dimensions (without BTMS) L x W x H (mm)	1,714 x 1,385 x 300
Weight (without BTMS) (kg)	650
Cooling	Liquid cooled
Electrical characteristics at + 25°C	
Nominal continuous current/power in charge/discharge	150 A*/77 kW
Maximum pulse power:	
- in 30 s in charge	250 A*/128 kW
- in 30 s in discharge	420 A*/216 kW
Operating conditions	
Operating temperature	- 25°C to +45°C (with BTMS)
Temperature for transport and storage	
- recommended	- 10°C to +30°C
- possible	- 30°C to +70°C
Maximum relative humidity	Up to 90%
Maximum sound power level	< or= 84.5 dB(A)

* Typical values. To be sized according to customer load and cycle profile



BMM ⁽²⁾ communication

- 2 power connections to railway equipment
- CAN Open bus communication protocol carrying:
 - State Of Charge (SOC)
 - State Of Health (SOH)
 - Alarms
 - Operating conditions (voltage, temperature)
 - Operating limits (maximum voltage and current values in charge and in discharge)
- CAN Black box registering alarms (overcurrent, overvoltage, high temperature) and the number of charge and discharge cycles

BTMS



Electrical connections	
Data bus connection	CAN Open bus
Protection class for the battery box	IP 65
Protection class for the BTMS	IP 24
Fuse protection*	315 A
Electrical power connection	Pfisterer P2PS

Compliance to standards	
Cell safety	UL 1642
Module safety	EN 50 178 / IEC 60 950
Shock and vibration	IEC 61 373 Cat 1 Class B
Fire and smoke	EN 45 545 / NFPA 130
Electrical insulation	NF EN 50 124-1
IP Protection	NF EN 60 529
Electrical safety	NF EN 50 155
E M C	NF EN 50 121-3-2
Welding	AWS D 1.1
Transportation qualification	UN 3480 - Class 9

* Typical values. To be sized according to customer load and cycle profile

Cooling system	
Power	6 kW
Concentration of ethylene glycol	50%
Temperature control range	+ 15°C to +45°C
Filling capacities	10 l
Operating weight	145 kg
Dimensions L x W x H (mm)	1,420 x 430 x 600

Battery box 'Long' type

Different numbers of **Modul'ion**[®]-12 Power (Mi -12-20.60 PFe) can be configured in the same battery box 'Long' type. Following characteristics can be achieved:

Number of modules	2 X 12	2 X 11
Mi 12 20-60 PFe		
Nominal voltage	475 V	436 V
Maximum voltage	547 V	502 V
Minimum voltage	360 V	330 V
Nominal energy	28.5 kWh	26.1 kWh

Safety

Safety driven design for cells, modules and systems guarantees safe behavior in case of abuse usage or component failure. This includes:

- Stringent design rules and qualification
- Implementation of redundant safety features
 - at cell level (e.g. shutdown effect separator and mechanical vent)
 - at module level (e.g. electronic board, voltage and temperature monitoring, balancing)
 - at battery level (e.g. electronic board, power switch and current sensor)

⁽²⁾ BMM: Battery Management Module



Saft
 Industrial Battery Group
 12, rue Sadi Carnot
 93170 Bagnole - France
 Tel. : +33 1 49 93 19 18
 Fax : +33 1 49 93 19 64
 www.saftbatteries.com

Doc No.: 21882-2-0714
 Edition: July 2014
 Data in this document is subject to change without notice and becomes contractual only after written confirmation.
 Société par Actions Simplifiée au capital de 31 944 000 €
 RCS Bobigny B 383 703 873
 Produced in the UK by Arthur Associates Limited

7.9. Lithium-Ionen Batteriesystem Ion-Board Regen 790V-210kW

Ion-Board® Regen 790 V – 210 kW Lithium-ion battery system

Innovative battery system for regenerative rail hybrid traction applications

Saft's **Ion-Board®** Regen 790V–210kW battery unit has a nominal voltage of 790 V and is able to provide high discharge capability up to 210 kW in 30 s and store 128 kW of regen power in 30 s.

One battery system consists of:

- 20 Saft **Modul'ion®-12** (Mi 12-40.30 PFe) Super-Phosphate™ (SLFP) connected in series
- Power box equipped with a manual switch, contactor and fuses
- Liquid cooling system and, as an option, a BTMS ⁽¹⁾ for battery management

The **Modul'ion®-12** and the power box are placed in a metallic box 'Medium' type.



Applications

- For light rail systems: trams, streetcars and tram-trains
- To supply autonomous traction power for catenary free
- To store kinetic braking energy (regenerative braking) and reuse it for autonomous traction
- To maintain power quality for the local distribution network

Features

- Quick and high recharge capabilities (e.g. regenerative braking application)
- High life cycle performance
- Light weight and compact design for rail applications
- Robust construction withstanding onboard vehicle shocks and vibrations
- Liquid cooled system

Benefits

- High rate charge and discharge capability for an always available system
- Easy installation (roof mounted assembly)
- Minimum maintenance
- Reduced CO₂ footprint and saved energy

⁽¹⁾ BTMS: Battery Thermal Management System

Nominal characteristics	Values for 1 box
Li-ion module	Modul'ion®-12 40.30 PFe
Number of modules in series	2 rows of 10
Voltage (Min/Max)	600 V – 910 V
Nominal voltage	790 V
Typical capacity in C ₅	30 Ah
Rated capacity in C ₅	28 Ah
Nominal energy	23.7 kWh
Mechanical characteristics	
Dimensions (without BTMS) L x W x H (mm)	1,747 x 1,000 x 300
Weight (without BTMS) (kg)	541
Cooling	Liquid cooled
Electrical characteristics at + 25°C	
Nominal continuous current/power in charge/discharge	90 A*/64 kW
Maximum pulse power:	
- in 30 s in charge	180 A*/128 kW
- in 30 s in discharge	295 A*/210 kW
Operating conditions	
Operating temperature	- 25°C to +45°C (with BTMS)
Temperature for transport and storage	
- recommended	- 10°C to + 30°C
- possible	- 30°C to + 70°C
Maximum relative humidity	Up to 90%
Maximum sound power level	< or= 84.5 dB(A)

* Typical values. To be sized according to customer load and cycle profile.



BMM ⁽²⁾ communication

- 2 power connections to railway equipment
- CAN Open bus communication protocol carrying:
 - State Of Charge (SOC)
 - State Of Health (SOH)
 - Alarms
 - Operating conditions (voltage, temperature)
 - Operating limits (maximum voltage and current values in charge and in discharge)
- CAN Black box registering alarms (overcurrent, overvoltage, high temperature) and the number of charge and discharge cycles

BTMS



Electrical connections

Data bus connection	CAN Open bus
Protection class for the battery box	IP 65
Protection class for the BTMS	IP 20
Fuse protection*	200 A
Electrical power connection	Harting (HAN Modular) Pfisterer P2PS

Compliance to standards

Cell safety	UL 1642
Module safety	EN 50 178 / IEC 60 950
Shock and vibration	IEC 61 373 Cat 1 Class B
Fire and smoke	EN 45 545 / NFA 130
Electrical insulation	NF EN 50 124-1
IP Protection	NF EN 60 529
Electrical safety	NF EN 50 155
E M C	NF EN 50 121-3-2
Welding	EN 15 085 / EN ISO 13 918
Transportation qualification	UN 3480 - Class 9

* Typical values. To be sized according to customer load and cycle profile.

Cooling system

Power	6 kW
Concentration of ethylene glycol	50%
Temperature control range	+15°C to +45°C
Filling capacities	10 l
Operating weight	145 kg
Dimensions L x W x H (mm)	1,420 x 430 x 600

Battery box 'Medium' type

Different numbers of **Modul'ion**[®]-12 Power (Mi 12-40.30 PFe) can be configured in the same battery box 'Medium' type. Following characteristics are achieved:

Number of modules	2 X 9	2 X 8
MI 12-40.30 PFe		
Nominal voltage	713 V	634 V
Maximum voltage	819 V	728 V
Minimum voltage	540 V	480 V
Nominal energy	21.4 kWh	19.0 kWh

Safety

Safety driven design for cells, modules and systems guarantees safe behavior in case of abuse usage or component failure. This includes:

- Stringent design rules and qualification
- Implementation of redundant safety features
 - at cell level (e.g. shutdown effect separator and mechanical vent)
 - at module level (e.g. electronic board, voltage and temperature monitoring, balancing)
 - at battery level (e.g. electronic board, power switch and current sensor)

⁽²⁾ BMM: Battery Management Module



Saft
 Industrial Battery Group
 12, rue Sadi Carnot
 93170 Bagnole - France
 Tel. : +33 1 49 93 19 18
 Fax : +33 1 49 93 19 64
 www.saftbatteries.com

Doc No.: 21883-2-0714
 Edition: July 2014
 Data in this document is subject to change without notice and becomes contractual only after written confirmation.
 Société par Actions Simplifiée au capital de 31 944 000 €
 RCS Bobigny B 383 703 873
 Produced in the UK by Arthur Associates Limited

7.10. ApECOR DC-DC-Konverter 200kW



EV Bi-Directional DC-DC

Features

- ◆ Seamless Bi-Directional Power Flow
- ◆ Modular Design
- ◆ 100°C Coolant Temperature
- ◆ Digitally Controlled
- ◆ High Power Density
 - >8 kW/L
 - >4 kW/kg
- ◆ Wide Battery and Bus Voltage Range
- ◆ Multi-Level Fault Protection
- ◆ Thermal Derating and Shutdown
- ◆ Voltage and Current Limiting
- ◆ High Efficiency
 - >97% efficiency above 15% load
 - >93% efficiency at 2.5% load
- ◆ CAN & USB Communication
- ◆ Programmable PID Controllers
 - Allows for better system integration by OEM



200 kW Bidirectional DC-DC

Description

The EV Bi-Directional DC-DC converter is a highly efficient modular bidirectional DC-DC converter system. The converter is composed of 50 kW modules that can be paralleled for up to 200 kW power, achieving a nearly flat efficiency curve. By allowing up to 100°C coolant, the converter can operate on a single high temperature coolant loop in-line with an engine or motor drive electronics. The DC-DC converter system is a commercial-off-the-shelf (COTS) solution for electric vehicle manufacturers and designers. The system is highly redundant and robust, allowing it to continue to operate in non-ideal conditions. The system utilizes CAN communication to the vehicle controller which will allow for selection of proper operational modes, battery charging/discharging current levels, and voltage limits. Since the system is digitally controlled, the OEM of the vehicle can integrate their own PID controller values or use the default values already installed. The PC communication interface allows for easy in-system testing and customization through a USB connection. The converter is housed in a sealed aluminum enclosure, ready to be mounted to the vehicle chassis.

Preliminary

www.apecor.com



EV Bi-Directional DC-DC

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Unit
V_{bat}	Battery Voltage	580	V
V_{bus}	Bus Voltage	800	V
T_{cool}	Coolant Temp.	100	°C
P_{out}	Output Power	200	kW

Recommended Operating Conditions

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
V_{bat}	Battery Voltage	200	-	530	V	
V_{bus}	Bus Voltage	580	-	800	V	
V_{supply}	Supply Voltage	12	-	24	V	
I_{supply}	Supply Current	1.8	-	3.6	A	(1)
P_{out}	Output Power	-	-	200	kW	
η	Converter Efficiency	97	-	-	%	(2)
		93	-	-	%	(3)
T_{cool}	Coolant Temperature	-	100	-	°C	
P_{abs}	Absolute Coolant Pressure	-	-	75	PSI	
ΔP	Coolant Pressure Drop	-	3	-	PSI	(4)
Q	Coolant Flow Rate	-	12.5	-	L/min	

Notes:

- (1) 12V controller voltage
- (2) Operation in Buck mode from 600V to 450V from 15% to full load
- (3) Operation in Buck mode from 600V to 450V at 2.5% load
- (4) At 12.5 L/min coolant flow rate

Dimensions (200kW DC-DC)

	Parameters	Typ.	Units
L	Length	406	mm
		16	inch
W	Width	343	mm
		13.5	inch
H	Height	178	mm
		7	inch
W	Weight	45	kg

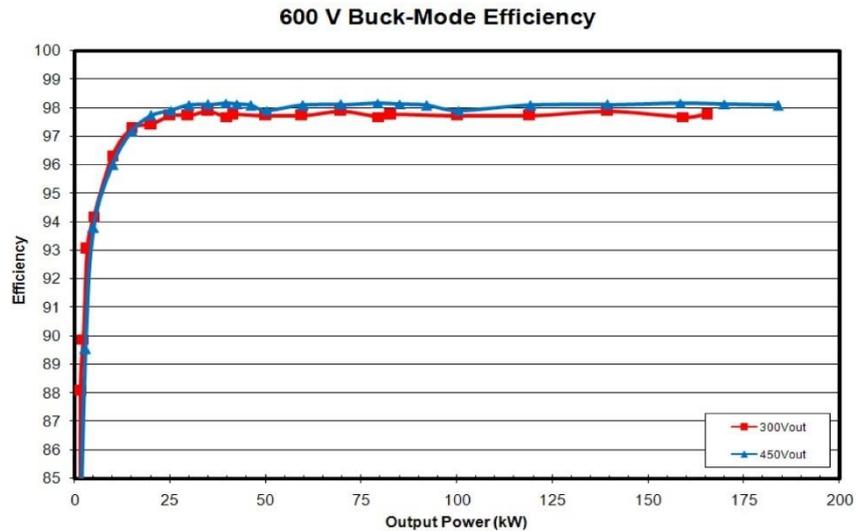
Preliminary

www.apecor.com



EV Bi-Directional DC-DC

Typical Efficiency Characteristics



CAN Commands and Setpoints

1. Converter Mode Select (Buck only, Boost only, Bidirectional, off)
2. Average Battery Charge Current Limit
3. Average Battery Discharge Current Limit
4. Peak Battery Charge Current Limit
5. Peak Battery Discharge Current Limit
6. Battery Current Limit Type (circuit-breaker, power limiting)
7. Battery Under-Voltage Limit
8. Battery Over-Voltage Limit
9. Bus Under-Voltage Limit
10. Bus Over-Voltage Limit
11. Bus Under-Voltage Fault Level
12. Bus Over-Voltage Fault Level
13. Fault Reset Level 1
14. Fault Reset Level 2

CAN Feedback

1. Converter Mode
2. Battery Voltage
3. Bus Voltage
4. Battery Current
5. Converter Temp 1
6. Converter Temp 2
7. Converter Temp 3
8. Fault Codes

Preliminary

www.apecor.com