ENDBERICHT

FFG Projektnummer	852418	**eCall Antragsnummer**	5914615
Kurztitel	Hybridlokomotive	**FörderungsnehmerIn**	HET
Bericht Nr.	3	**Berichtszeitraum**	01.10.2015 bis 30.06.2017
Bericht erstellt von	Dipl.-Ing. Camelia Serban (HET), Dipl.-Ing. Dr. mont. Herbert Krampl (HET), Ing. Christian Millinger (HET), Dipl.-Ing. Johann Hartl (HET), Professor Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Weiss (MUL)		

Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten *(kann programmspezifisch angepasst werden)*

1. Ziele und Ergebnisse

- Wurden die dem Förderungsvertrag zugrunde liegenden Ziele erreicht? Sind diese Ziele noch aktuell bzw. realistisch? (Achtung: Änderungen von Zielen erfordern eine Genehmigung durch die FFG)
- Vergleichen Sie die Ziele mit den erreichten Ergebnissen.
- Beschreiben Sie „Highlights“ und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.

Entsprechend der Arbeitsteilung der Ingenieur-wissenschaftlichen Kooperation von ÖBB, Montanuniversität Leoben (MUL), Deutschem Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) und HET basierte die Entwicklung einer Elektrolokomotive mit neuem Brennstoffzellen- Energietransform- und Wasserstoffspeichersystem für ausgedehnte Verschubeinsätze mit und ohne Fahrleitung auf Basis der ÖBB-Type 1063. Die Kooperation erwies sich wegen der exzellenten Fachkenntnis der ÖBB-Techniker und -Ingenieure bei Schienenfahrzeugen als erstaunlich erfolgreich, da die Technik auf oft nur schwer für Außenstehende verständlichen Unterlagen dokumentiert war. Anders als bei Lok 1063.039 (TecSol) wurde die Lok 1063.038 (Bild 1) nicht „totgeschaltet“, bzw. über separate (externe) Wechselrichter betrieben, sondern wurde am Gleichrichter des Zwischenkreises angedockt, wodurch ein Auseinandersetzen mit den elektro- und steuerungs-technischen Zusammenhängen unumgänglich wurde was naturgemäß erhöhten Zeitaufwand erforderte, aber auch nachhaltigen KnowHow-Zuwachs im Hinblick auf spätere Überarbeitungen (Modernisierungen) mit sich brachte.

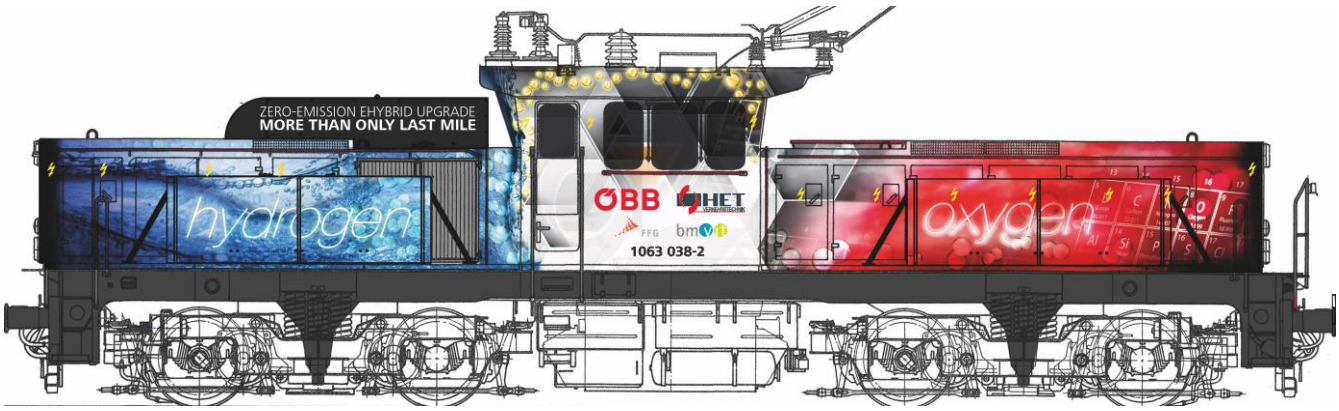


Bild 1: Demoprototyp der 1063.038-2 mit Anbauten gemäß HET-Konzept

Nach verlängerter Planungsphase aber anschließend kaum erwähnenswerten technischen

Problemen konnte die Lokomotive mit dem von HET konzipierten Energietransformsystem in Betrieb genommen werden. Als unerwartet arbeits- und zeitintensiv erwiesen sich die Anstrengungen zur Erfüllung der Auflagen von Seiten des Brandschutzes. Im Hinblick auf eine spätere Kommerzialisierung bzw. ein Refurbishment der Lokreihe 1063 sind die diesbezüglichen Aufwendungen jedenfalls zu rechtfertigen, sind doch die gewonnenen Erkenntnisse essenziell für eine spätere Serienzulassung was Ziel dieses Vorhabens ist.
Dem Energietransformkonzept von HET entsprechend werden die Li-Ionen Batterieakkus im autarken Betriebsmodus mittels Brennstoffzelle geladen. Dadurch werden einerseits die Anzahl der Ladezyklen (Lebensdauer der Batterieakkus) entscheidend erhöht, andererseits die Leistungsdaten der Lok über die Brenndauer der Brennstoffzelle konstant gehalten, was Voraussetzung für die gemäß Ausschreibung notwendigen Bedingung in punkto Anfahrzugkraft (260kN) und maximal zulässiges Lokgewicht (aktuell gewogen 86,4t) ist.

- ➔ Die Fahrleistungen der Lok im autarken Modus entsprachen den Erwartungen (und sind in den Messaufzeichnungen sowie auf Video dokumentiert). Das tatsächlich gefahrene bzw. gemessene Lastkollektiv wurde aber in Bezug auf die ursprüngliche Annahme überschätzt!

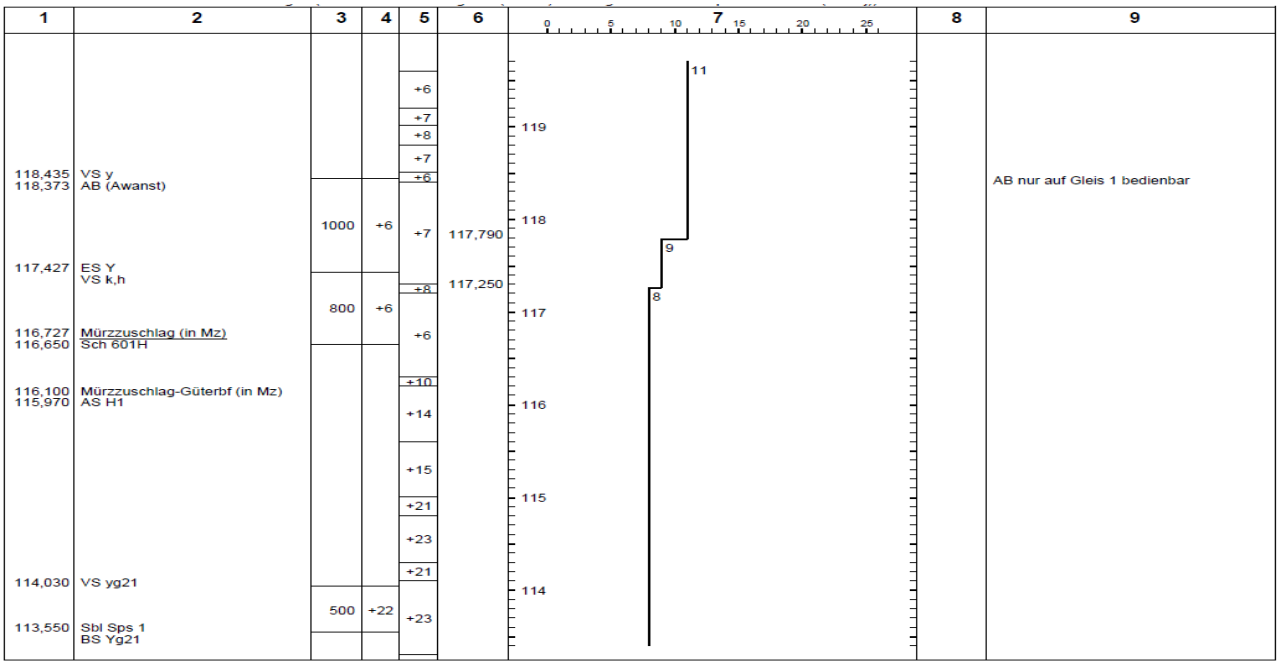
Um ein Wirkungsgradmaximum zu erzielen, bzw. die Brennstoffzelle besser auf die den Lastkollektiva im Verschubeinsatz entsprechenden Akkubelastung anzupassen soll für weiterführende, zukünftige Fahrversuche (in St. Pölten) von HET die aktuell aufgebaute 30kW-Brennstoffzelle (Fa. HYDROGENICS) durch ein größeres Modul (150kW) substituiert werden. Wie die Messungen gezeigt haben kann mit in Serie geschalteten Einheiten (2x75kW) die Leistungskennlinie an die Verbrauchskennlinie angepasst werden. Brennstoffzellenhersteller BALLARD aus Vancouver stellte dafür eine HD6 im Wert von fast 400.000 Euro sowie eingehendes, exklusives KnowHow HET unter strengen Geheimhaltungsauflagen zur Verfügung. Dadurch soll eine Kompensation der aktuell verbrauchten Ladung, ausgehend von „leichtem Verschubbetrieb“ allein durch die Brennstoffzelle erfolgen weil – den Kennlinien der HD6 entsprechend – somit ein markanter Wirkungsgradverlust auch unter „schwerem Verschubeinsatz“ und „längere Fahrt über große Steigung (Semmeringstrecke) mit 4 besetzten CityShuttle Personenwagen“ wohl auch bei unverändert hoher Brennstoffzellenleistung vermieden werden kann. Der Betrieb der Brennstoffzelle am Wirkungsgradmaximum stellt die hinreichende Bedingung (mindestens 4 Stunden autarker Betrieb) sicher. Im HET-eigenen Labor in Neumarkt konnten bereits die stärkere Brennstoffzelle konfiguriert und auch größere Drucktanks von Luxfer montiert werden. Als weitere Synergie soll der höheren Nennspannung der HD6 wegen erstmals wurde auf DC/DC-Wandler verzichtet wodurch neben Kostenersparnis bei serienmäßigem Umbau auch wichtige Erkenntnisse betreffend die weiterführenden Forschungsanstrengungen von HET und DLR hinsichtlich reversiblen Betrieb als Elektrolysezelle (Kombi-Elektrolyse-Brennstoffzelleneinheit für mobile Anwendung) erzielt werden konnten.

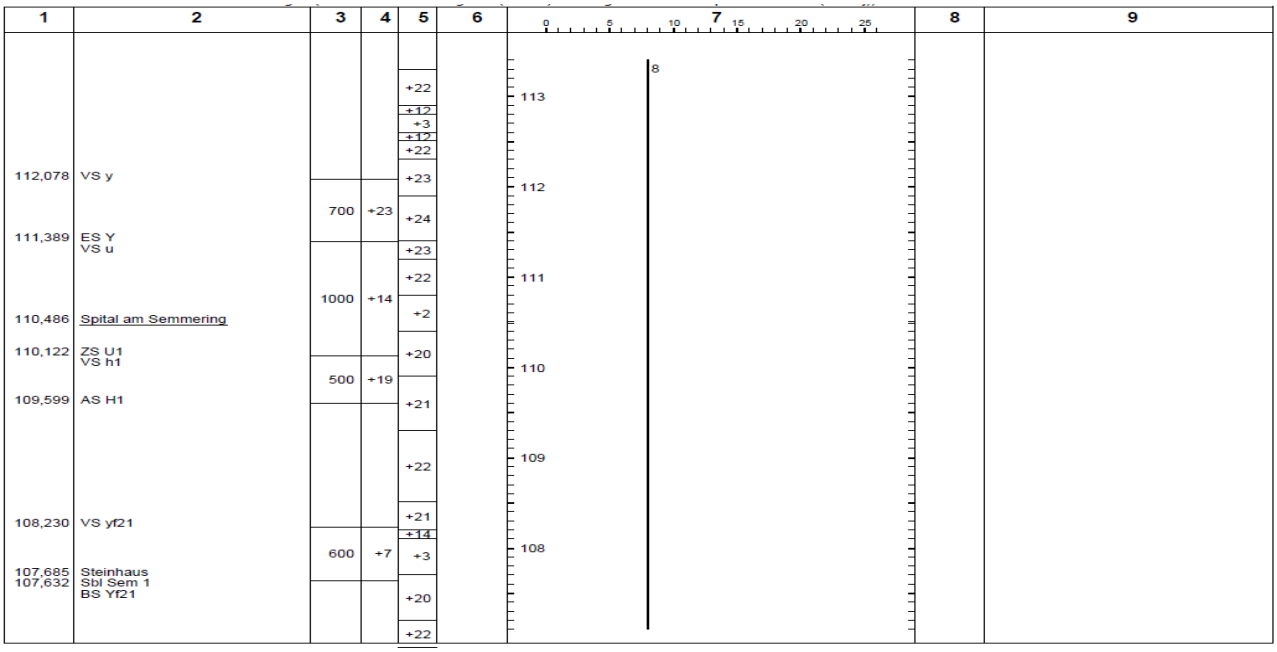
- ➔ Basierend auf den aktuellen Messergebnissen soll die Zielvorgabe „4 Stunden ohne Fahrleitung“ mit einer größeren (150kW) Brennstoffzelle und 30kg Wasserstoff in den (350bar) Drucktanks, um den Faktor 1,5 übertroffen werden!

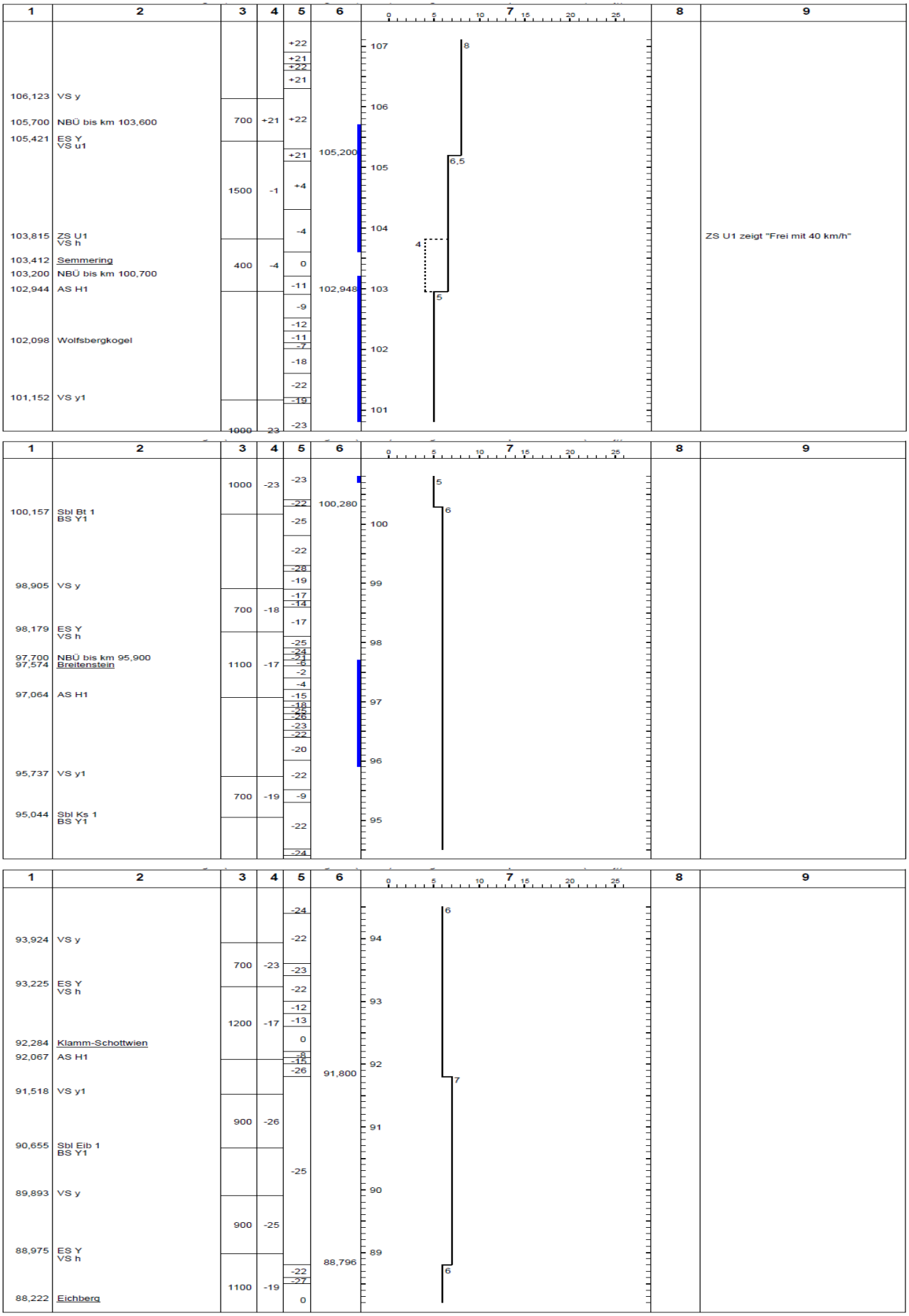
Nach Auswertung der Messungen konnten wesentliche Erkenntnisse betreffend die Dimensionierung des Energietransformsystems hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit gewonnen werden. In diesem Zusammenhang spielt das Computermodell für die Energiemanagement-(Brennstoffzellensteuerungs-)software die entscheidende Rolle.

Die 3 Lastkollektiva („Standards“) repräsentieren die „Vorwahl“ durch den Lokführer und sollen einen ständigen „Stopp and Go“ Betrieb, welcher die Lebensdauer der Brennstoffzellen-Stacks stark negativ beeinflussen würde, vermeiden helfen!

Die Energiemanagementsoftware dient zur wirkungsgrad- und lebensdauermaximierenden Brennstoffzellensteuerung und ermöglicht auch die Einbindung von geodätischen und Streckendaten! Anhand der Streckenkollektiva (Abb. 2) ist auch die energetische Vorabdimensionierung erfolgt, welche nun anhand der Messdaten zu modifizieren ist.






1
2
3
4
5
6
7
8
9
106,123 VS y
105,700 NBÜ bis km 103,600
105,421 ES Y
VS u1
103,815 ZS U1
VS h
103,412 Semmering
103,200 NBÜ bis km 100,700
102,944 AS H1
102,098 Wolfsbergkogel
101,152 VS y1
105,200
102,948
ZS U1 zeigt "Frei mit 40 km/h"
100,157 Sbl Bt 1
BS Y1
98,905 VS y
98,179 ES Y
VS h
97,700 NBÜ bis km 95,900
97,574 Breitenstein
97,064 AS H1
95,737 VS y1
95,044 Sbl Ks 1
BS Y1
100,280
93,924 VS y
93,225 ES Y
VS h
92,284 Klamm-Schottwien
92,067 AS H1
91,518 VS y1
90,655 Sbl Eib 1
BS Y1
89,893 VS y
88,975 ES Y
VS h
88,222 Eichberg
91,800
88,796

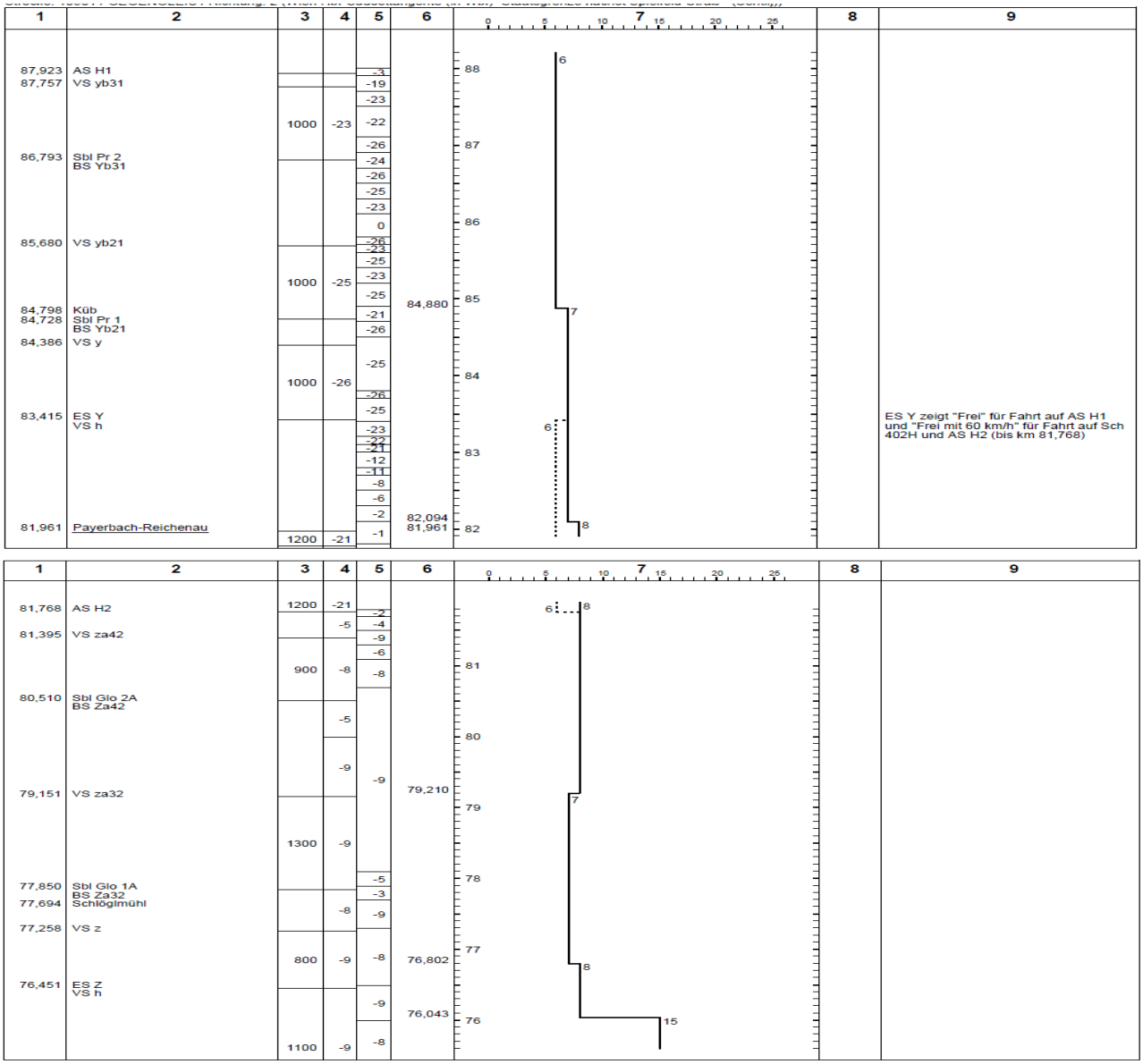


Abb. 2: Streckenkollektiva „Gloggnitz-Mürzzuschlag“ (Semmering), Quelle: ÖBB-Produktion

Spalte 1 = km-Lage
Spalte 2 = Betriebsstelle/Signale
Spalte 5 = tatsächliche Neigung [‰] in 100m-Schritten (Hektometer)
Spalte 6 = km-Lage der Geschwindigkeitsbrüche
Spalte 7 = Geschwindigkeiten – Ziffer in 1/10 (also z.B. 8 ist 80 km/h)

Basierend auf einem vorerst angenommenen Lastkollektiv und einer geschätzten Motordynamik konnte für die 1063 die Dimensionierung der energie- und leistungsbestimmenden Komponenten auf Basis einer 30kW Brennstoffzelle und 4kg, 350bar / H2-Tanks (Fa. Dynetek) vorgenommen werden. Dazu wurde der Einsatz am Computer simuliert, wobei der statistischen Analyse ein Fahrzeuggesamtgewicht der Bo’Bo‘ Lok von 87to zugrunde gelegt wurde.

Gemäß dem Projektziel, Verschiebearbeiten auf Strecken ohne Fahrdraht (weil auf Nebenstrecken unwirtschaftlich, bzw. auf Ladegleisen nicht möglich) und ohne zeitaufwendiges Wechseln auf teure Dieseltraktion (verbunden mit Abgas- und Lärmemission) durchführen zu können wurde die

elektrische Ausrüstung der mittlerweile in die Jahre gekommenen Verschublok im Hinblick auf das neue Energietransformsystem von HET adaptiert.
Mit hohem Engagement wurde von den ÖBB-Ingenieuren Hans Kühn und Benjamin Werzer sowie Herrn Michael Kaiser (Elektrik, ÖBB-TS) die eigentlich an das Leobener Institut für Elektrotechnik vergebene Entwicklung der Hauptstromverschaltungen realisiert.

Entsprechend den Restriktionen des §40-Verantwortlichen, Herrn Ing. Herbert Astleitner (Firma LogServ / voestalpine), mußten die Sichtverhältnisse für den Lokführer vorab am Computer simuliert werden (siehe Abb. 3, bzw. Detailbericht „Sichtfeldanalyse“).

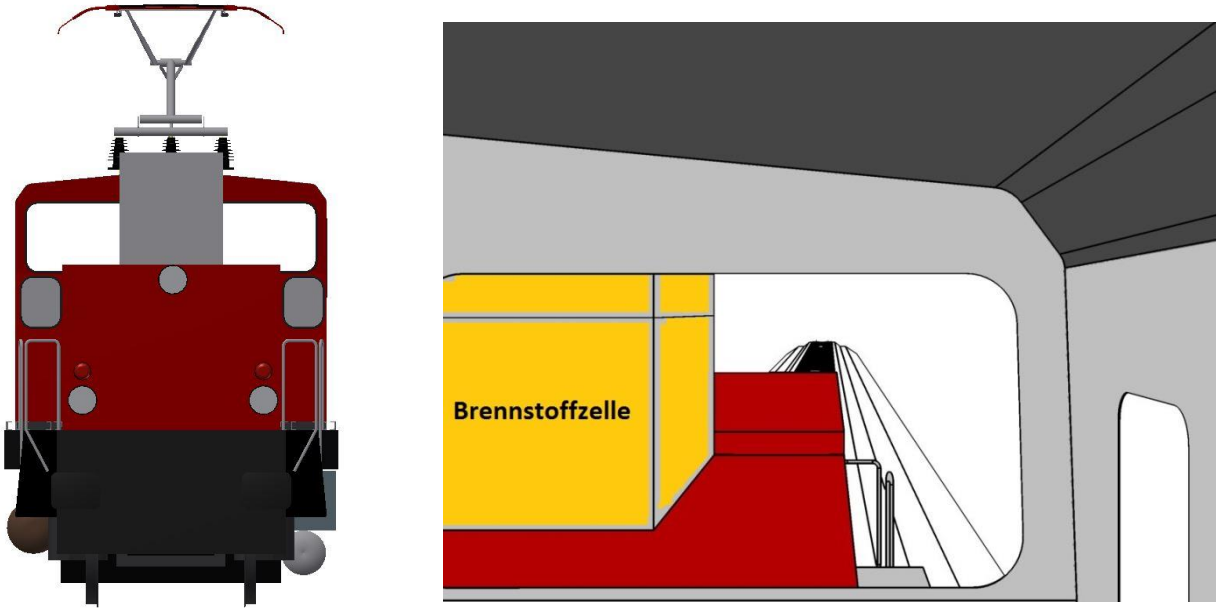


Abb. 3: Sichtfeldanalyse beim Demoprotoyp

Ebenso wurden von der zuständigen Schweißaufsichtsperson der ÖBB eingehende Analysen und Berechnungen gefordert, welche die Zuverlässigkeit der vorhandenen und neu hinzugekommenen Strukturkomponenten auch bei 5g-Pufferstoß dokumentieren (siehe Detailberichte „Festigkeits-analysen“ und „Batteriebefestigung“)!
Zum Schutz der nässeempfindlichen Energiespeicher und Hardwarekomponenten wurden Schutzabdeckungen angefertigt, welche der hohen Spannungen wegen auch Berührschutz bieten. Der, von Herrn Ing. Astleitner hinzugezogenen, Brandschutzbeauftragte, Herr Ing. Zettl, forderte umfangreiche Maßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt, welcher selbstverständlich nachgekommen werden mußte. Dazu zählten einerseits Brandschutzabschnitte, Explosions-klappen (HET konnte diesbezüglich ein Patent einreichen), Rauchabzugskanäle, etc., andererseits Auffangwannen für ggfs. im Brandfall sich verflüssigende und auslaufende Elektrolytmedien betreffend die Batterieakkus. In Bezug auf die Wasserstoff-Brennstoffzelleneinheit wurden Rütteltests gefordert um die Zuverlässigkeit (Dichtheit) der Ventile und Verbindungen unter Stoßbelastung zu dokumentieren. Angesichts des fortgeschrittenen Projektzeitraumes konnte man sich für den Demoprototyp auf einem Maßnahmenkatalog für den Brandfall (siehe Detailbericht „Maßnahmenkatalog für Brandfall“ einigen, wodurch wir Herrn Zettl zu Dank verpflichtet sind!

Dem guten Rad-Schiene Laufverhalten und der tiefen Kraftanlenkung (über Turm) des Typs entsprechend resultiert durch die Anbringung der zusätzlichen Energiespeicher (Abb. 4) eine Verschiebung des Gesamtschwerpunktes um 160mm hin zur Fahrzeugmitte.

Abb. 4: Anordnung der Akkupakete und Brennstoffzelleneinheit beim Demoprototyp

Bei laufender Brennstoffzelle wird die überschüssige Energie zur Ladung der Akkumulatoren (und Kondensatoren) verwendet. Professor Weiß vertritt die Ansicht, daß SuperCaps wenig bis keine Effizienz im vorliegenden Fall bieten würden, weil einerseits die Entladung zu schnell stattfindet, andererseits die Anfahrzugkraft durch die Reibung Rad-Schiene begrenzt ist. *Diesbezüglich wäre ein Erfahrungs- und Austausch von Messdaten mit TecSol von Interesse!*
Zweck der Energiemanagementsoftware von HET (welche auch beim CityLog, jedoch mit anderen „Header-Dateien“ Verwendung findet) ist es, anders als bei hybriden Konzepten üblich, die Brennstoffzelle niemals abzuschalten, bzw. diese gleichmäßig mit maximalem Wirkungsgrad zu betreiben wodurch auch die Lebensdauer dieser maximiert wird. Durch die Einbeziehung von zusätzlichen Informationen (die Reihenfolgeabhängigkeit des Lastkollektivs wird durch ein adaptives System ergänzt) soll vermieden werden dass die Kurzzeitladungsspeicher einen oberen Ladezustand erreichen und somit die Brennstoffzelle vorübergehend auf Standby geschaltet werden muss (Kooperation mit dem Institut for Risk and Uncertainty / Uni Liverpool).

In der chemischen Prozesstechnik wird die Mikroreaktionstechnik intensiv beforscht und weiterentwickelt. Die bisher erzielten Steigerungen der Ausbeute und Produktivität sind beträchtlich. Für zukünftige, technologisch weiterreichende Vorhaben wie der „On-board“ Elektrolysetechnik ist die Miniaturisierung von essenzieller Bedeutung. Bei solchen Apparaturen komplexer Struktur mit den Prozessen Elektrolyse, ionischer Verdichtung und Speicherung von Wasserstoff – und gegebenenfalls auch Sauerstoff – ist sicherheitstechnisch auch die Beherrschung von Vibrationen bedeutsam, wobei diese Thematik speziell die Kompetenz bei HET

tangiert. Diese Erweiterung zur Brennstoffzellennutzung soll modular integrierbar sein, mit der Schnittstelle Speicherung. Des „trägen“ (dichten) Zwischenmediums wegen kann bei Bremsenergierückführung eine hohe Stromstärke „verarbeitet“ werden, wodurch SuperCaps nicht erforderlich wären.

Sieht man von dem Bestreben hinsichtlich Miniaturisierung der Anlagentechnik bei der zukünftig vielversprechenden „on-board“ Elektrolyse, kombiniert mit einer Wasserstoff-Brennstoffzelle ab, so resultieren allein aus der aktuellen Konfiguration des Energietransformsystems, bzw. der essenziellen Energiemanagementsoftware, welche jeweils präzise auf das Lastkollektiv der Lok abgestimmt und somit Über- und Unterladungen vermeiden hilft, eine:

- *erhöhte Lebensdauer von Akku und Brennstoffzelle*
- *gleichbleibend hohe Zugkraft*
- *kompakte Bauweise ohne Einschränkung des Sichtfelds.*

Dem speziellen Lastkollektiv einer Verschublokomotive mit seinen zeitweisen sehr hohen Anfahrzugkräften, anschließend langen Phasen ausschließlich rollender Reibung (wie man bei den Fahrtests gut beobachten konnte) sowie „gedehnten“ Abbremsphasen (mit der Möglichkeit zur Bremsenergierückführung) wegen, lässt sich das träge Brennstoffzellensystem mittels der von HET und seinen Forschungspartnern entwickelten Energiemanagementsoftware derart regeln, sodass die Kurzzeitladungsspeicher Batterieakku und Kondensator sicher und kontinuierlich mit Energie versorgt werden. Die beiden zuletzt genannten sind schließlich maßgebend für das Anfahrmoment und die Leistung der Maschine.

Eine optimale Regelungsstrategie ist von entscheidender Bedeutung für den Energieverbrauch (Wirkungsgrad) und die Lebensdauer von Brennstoffzelle und Kurzzeitladungsspeicher. Unter dem Gesichtspunkt von Über-/Unterladung wurden entsprechende Szenarien am Computer simuliert (Abb. 5).

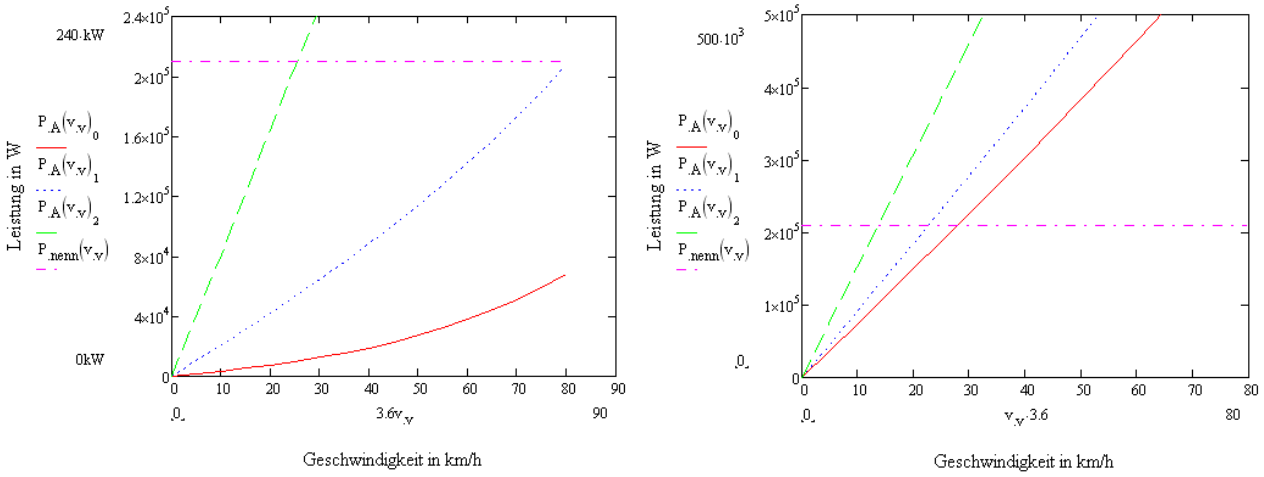


Abb. 5: a) Beschleunigung a = 0m/s^2 b) Beschleunigung a = 0.4m/s^2

➔ Es wurden sämtliche, im Fördervertrag vereinbarten, Ziele erreicht!

Die folgenden Abbildungen (Abb. 6 bis 16) repräsentieren Auswertungen charakteristischer Parameterverläufe für den autarken „leichten Verschubbetrieb“ (*die vollständigen Messdaten und Auswertungen liegen auf elektronischen Speichermedien vor*).

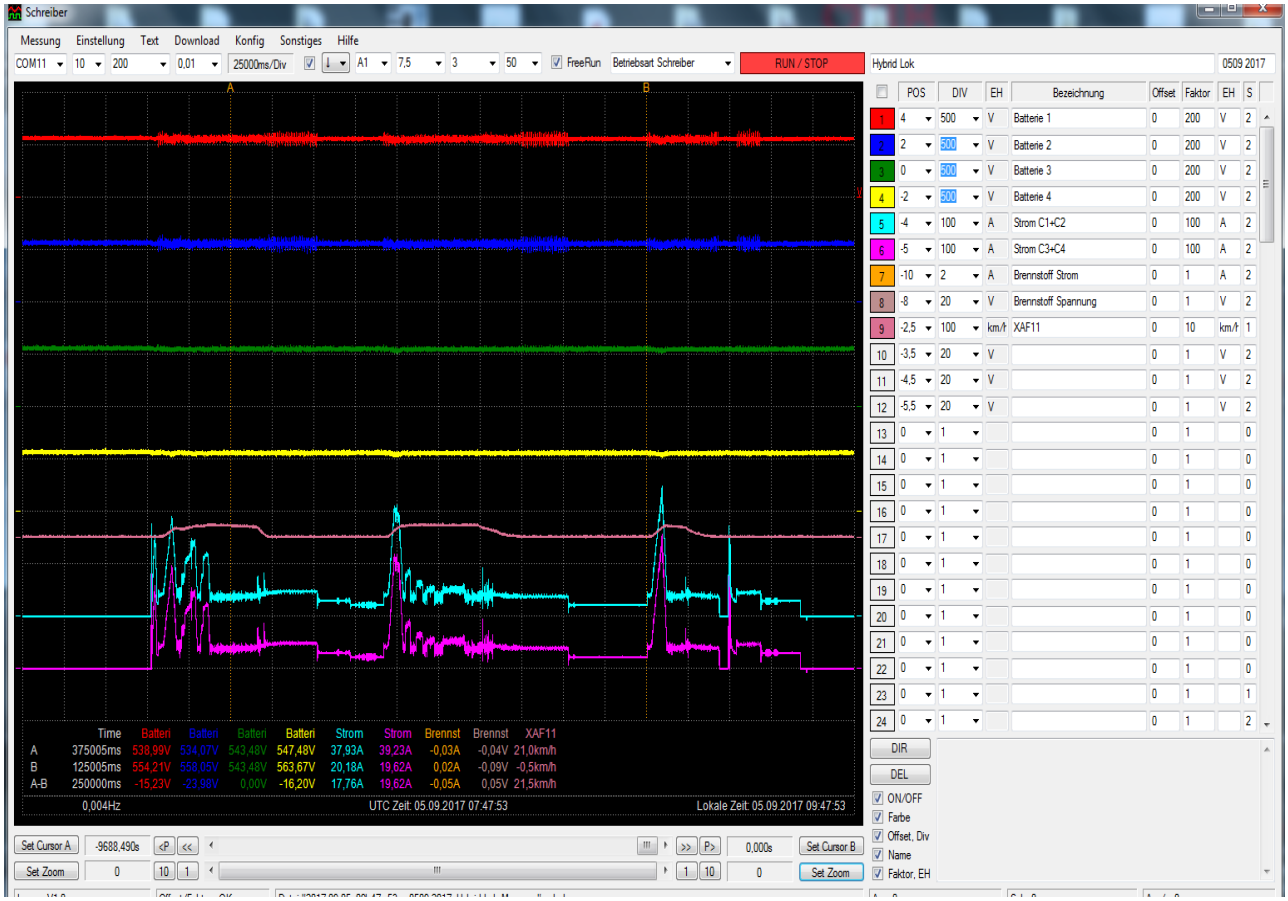


Abb. 6: Batteriebetrieb / Gesamtausschnitt

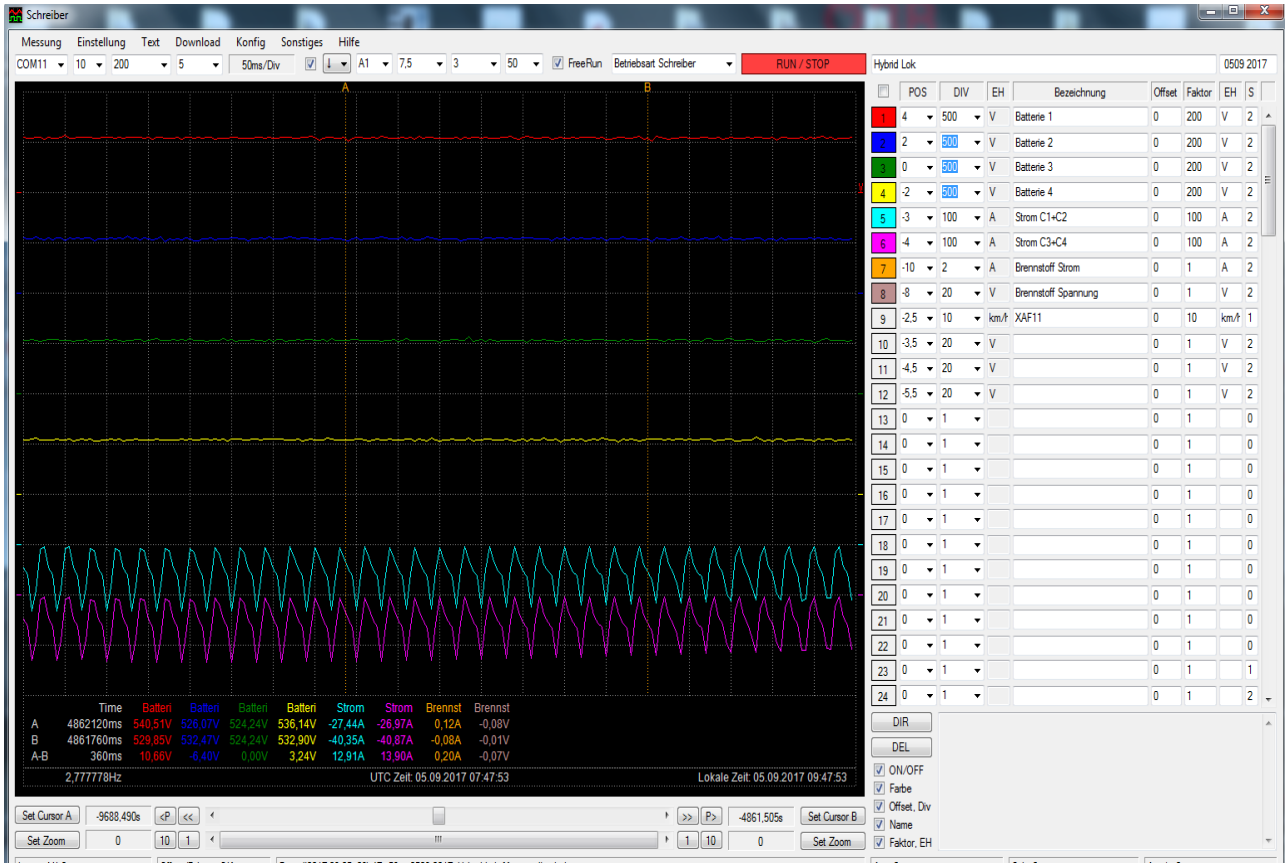


Abb. 7: Fahrdrahtbetrieb / Batterie über die Fahrleitung laden

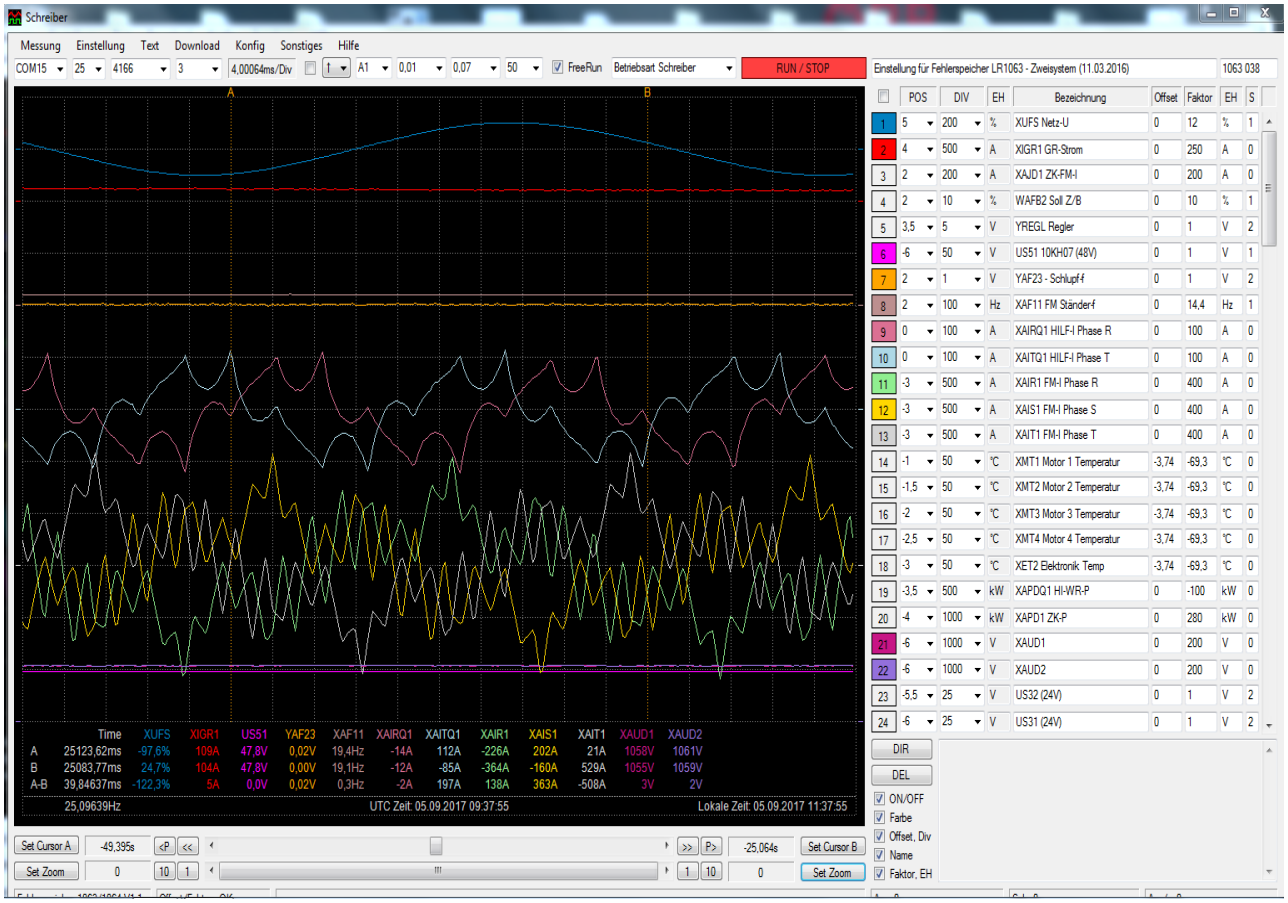


Abb. 8: Batteriebetrieb / Fahrmotorströme

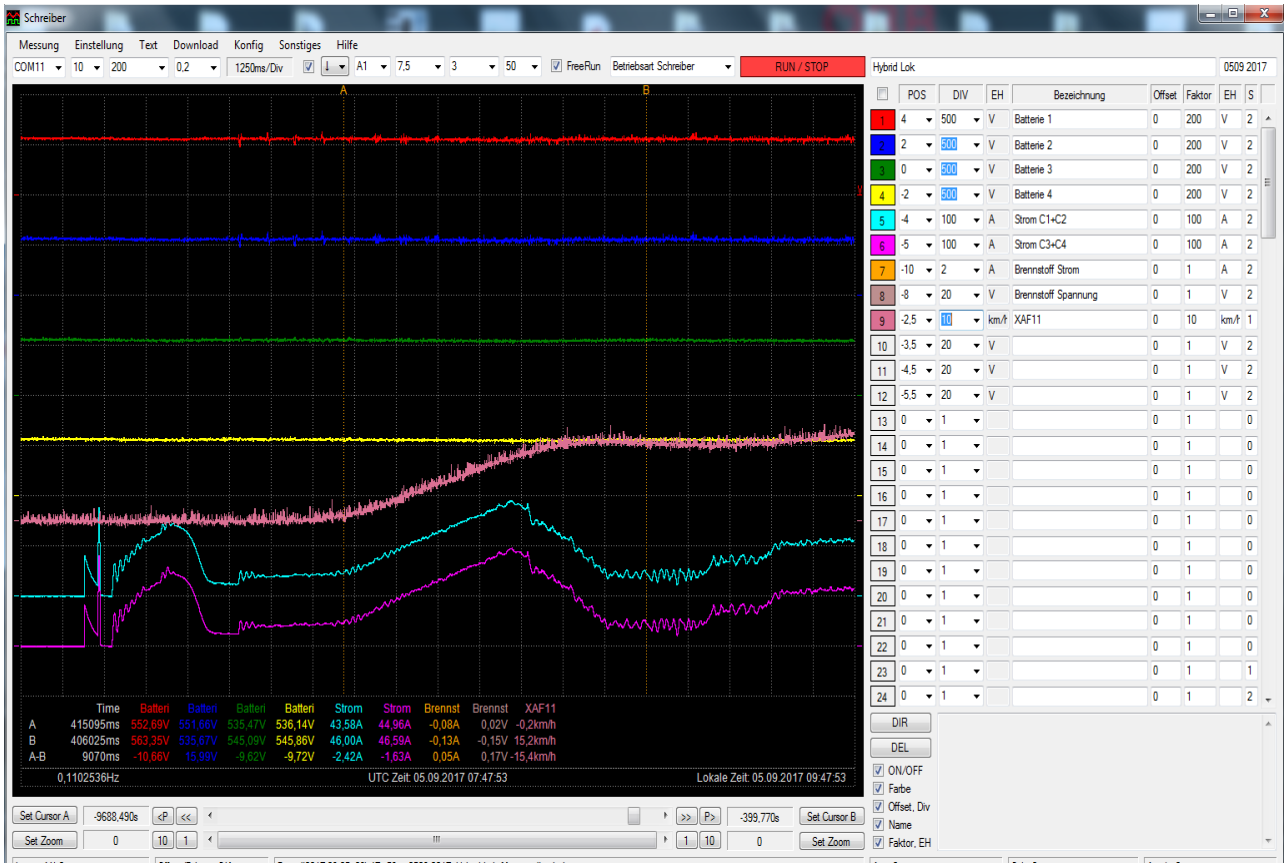


Abb. 9: Batteriebetrieb / Ströme

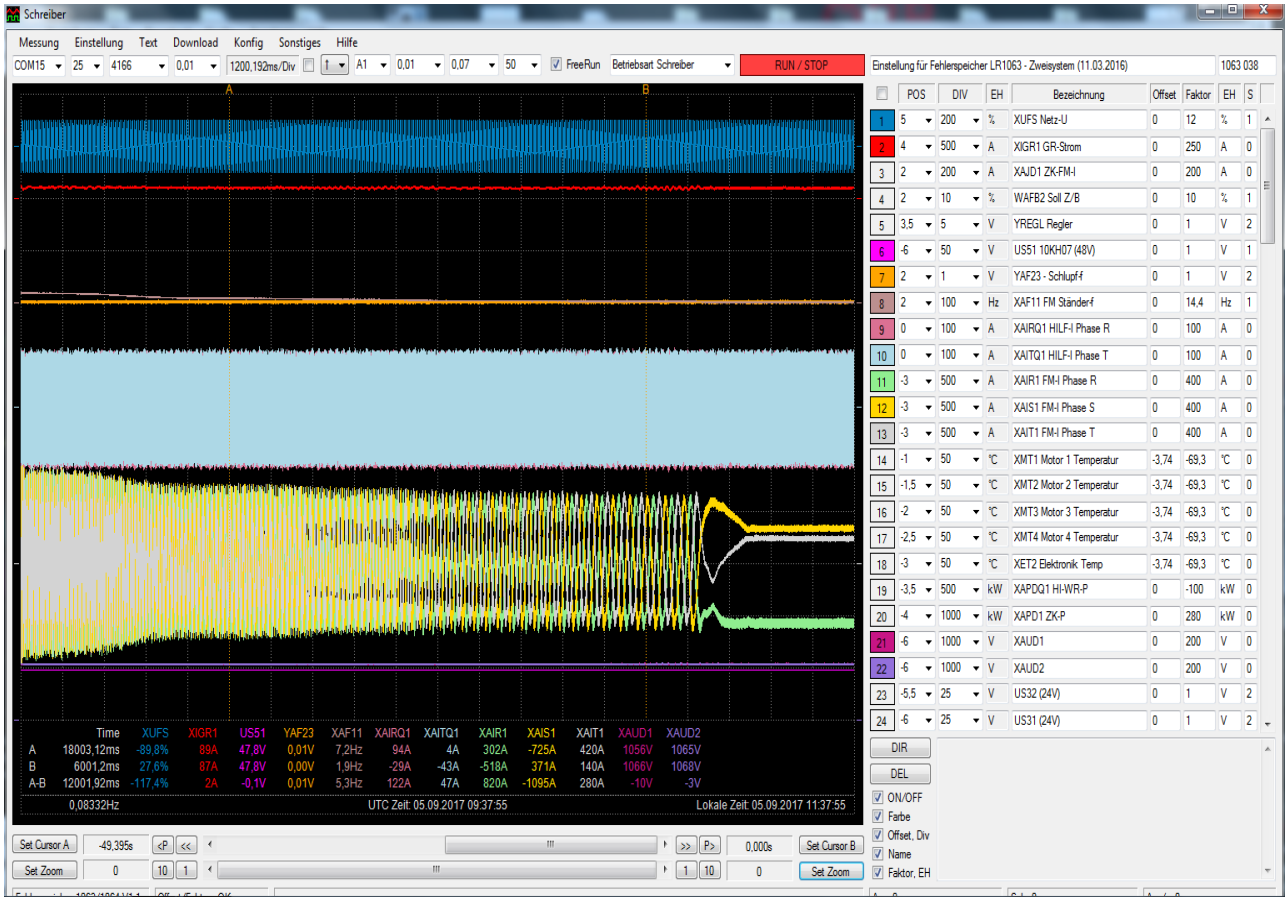


Bild 10: Batteriebetrieb / Übersicht Fahrmotorströme und Zwischenkreisspannung

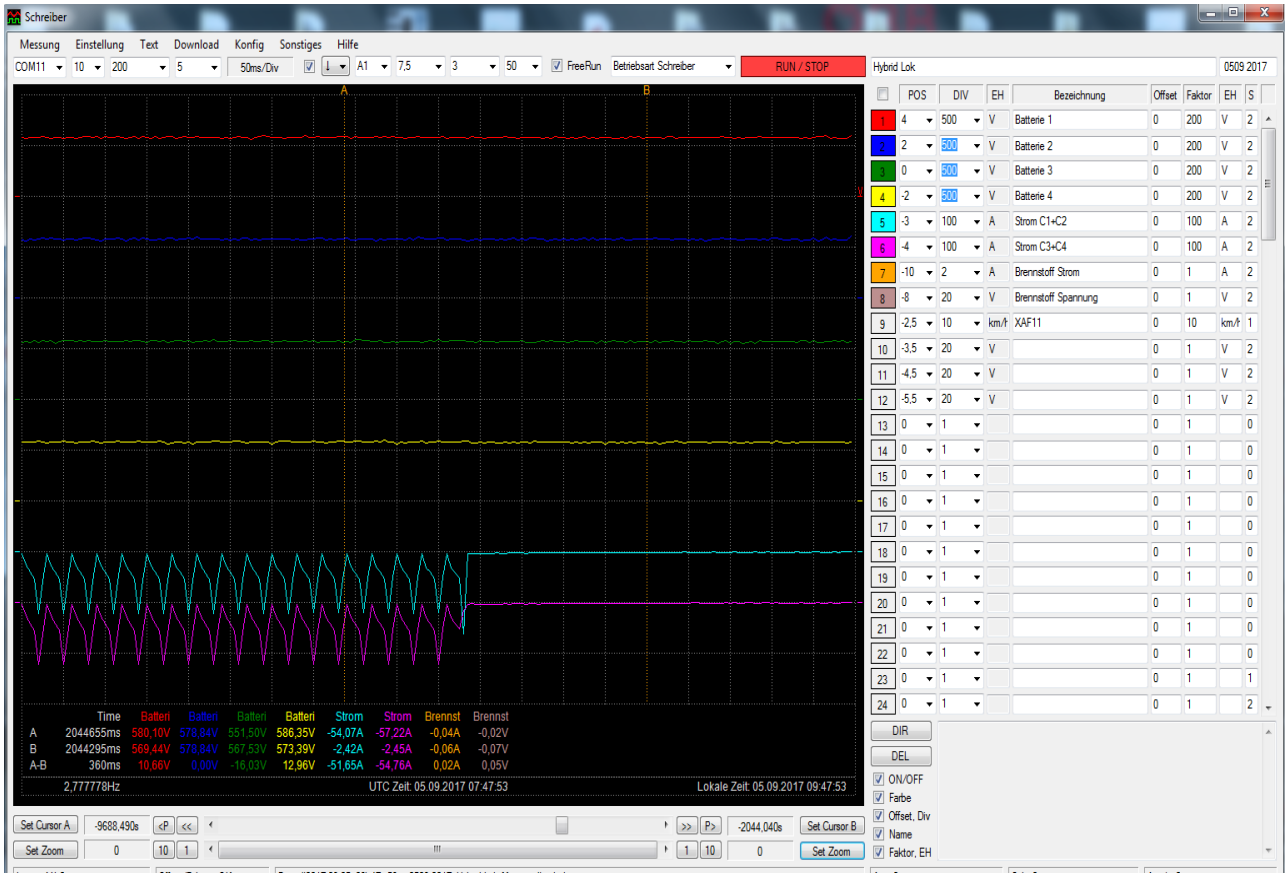


Abb. 11: Batteriebetrieb / Spannungen beim Ausschalten der Ladung

Abb. 12: Fotodokumentation zu den Abbildungen 6 bis 11

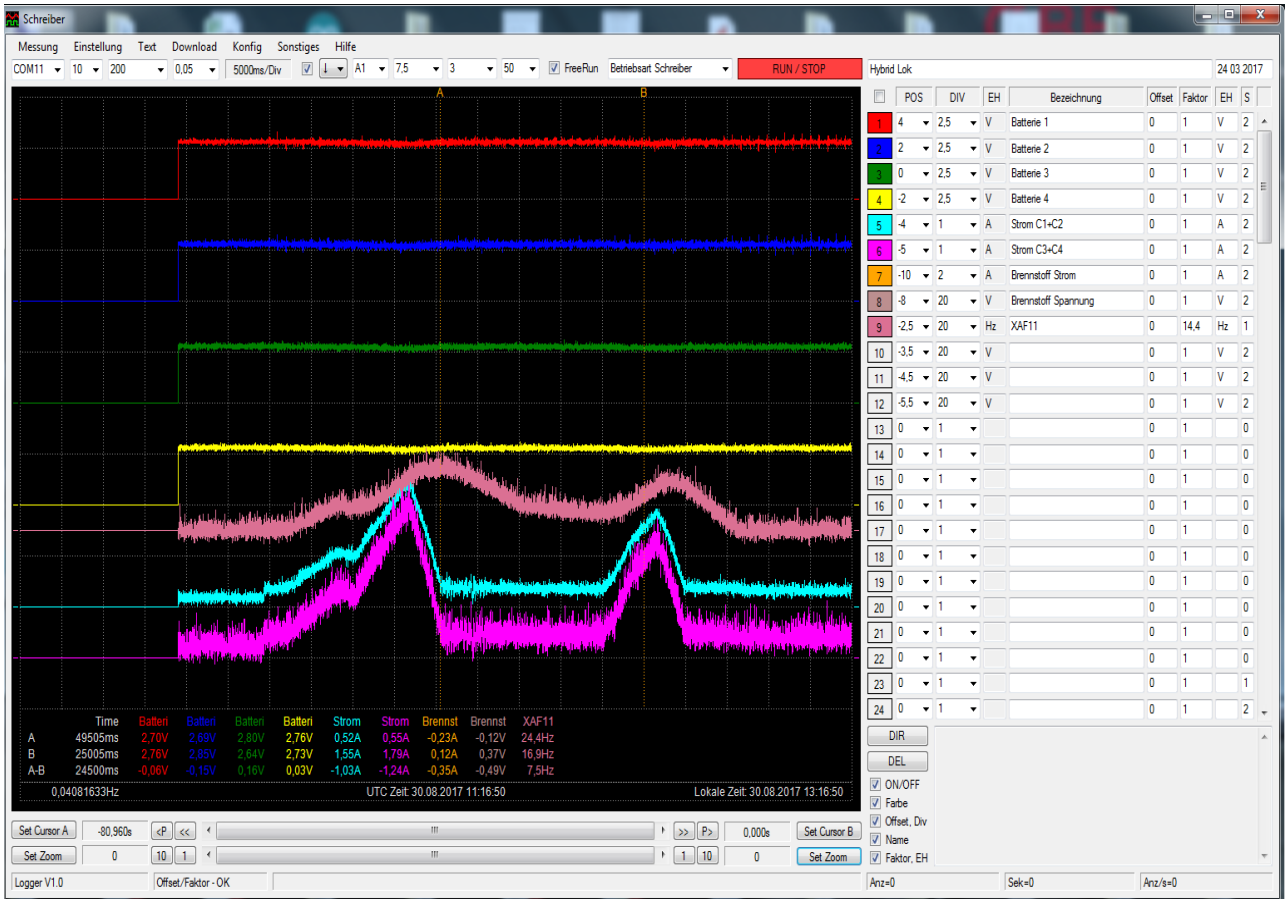


Abb.13: Meßfahrt mit gezogener und voll eingebremster zweiter Lok auf Gelände ÖBB-TS / Linz

Abb.14: Situation zur Meßfahrt mit gezogener Lok auf Gelände ÖBB-TS / Linz

Abb. 15: Meßdatenaufzeichnung und Anzeige zur Überwachung der Ströme und Spannungen

Abb. 16: Schieben einer Garnitur „CityShuttle“ samt Lok

2. Arbeitspakete und Meilensteine

2.1 Übersichtstabellen

- Erläuterung:
  Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut.
  Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan
  Akt. Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anf.	Ende	Anf.	Ende	
1	Erhebung Status Quo	100%	10/15	11/15	10/15	12/16	Analyse der Technik der BR1063 und Abnahme der geometrischen Ist-Abmessungen der Maschine, ohne Abweichungen!
2	Engineering Antriebsstrang	100%	12/15	12/16	11/15	02/17	Terminverzug wegen Personalengpässe infolge Sanierungsverfahren sowie zwischenzeitlich als sinnvoll erachteter entscheidender Verbesserung des technischen Konzeptes in Bezug auf Schnittstelle Zwischenstromkreis!
3	Engineering Leistungsteil	100%	12/15	06/16	12/15	07/17	Großer Terminverzug wegen großer Personalengpässe beim Sublieferanten an der MUL. Batterieakkus konnten erst mit großer Verspätung geliefert werden.
4	Implementierung der Technik	100%	08/16	08/16	10/16	06/17	Die großen, schweren Komponenten erforderten Montagearbeiten in Hallen mit Kranen, welche jedoch oftmals lange Wartezeiten bedingten. Von Seiten des Brandschutzbeauftragen wurden zusätzliche Einbauten notwendig. Oft konnten Arbeiten aus Brandschutzgründen nicht zeitgleich ausgeführt werden, wodurch Terminverzug resultiert.
5	Testläufe und Messungen	100%	10/16	12/16	03/17	09/17	Messungen abgeschlossen, jedoch ergänzende Aufzeichnungen mit leistungsstärkerer Brennstoffzelle außerhalb Projekt (BALLARD HD6) sinnvoll und gewünscht.
6	Rückbau	0%	12/16	12/16	09/17	09/17	Lok soll gemäß ÖBB nicht zurückgebaut sondern gleich anschließend Technik kommerzialisiert werden um Vorsprung gegenüber DB nicht einzubüßen.
7	Abschlussbericht und Projektmanagement	100%	12/16	12/16	06/17	06/17	Vollständig

Tabelle 2: Meilensteine

Meilenstein Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Basistermin	Akt. Planung	Meilenstein erreicht	Anmerkungen zu Abweichungen
1	Abschluss Begutachtung Lok	10/15	06/16	11/16	Terminverzug wegen Personalengpass aufgrund Sanierungsverfahren!
2	Abschluss Engineering Antriebsstrang	11/15	08/16	02/17	Terminverzug wegen Personalengpässe infolge Sanierungsverfahren!
3	Abschluss Engineering Leistungsteil	06/16	12/16	07/17	Großer Terminverzug wegen großer Personalengpässe beim Sublieferanten an der MUL. Batterieakkus konnten erst mit großer Verspätung geliefert werden.

4	Projektabschlusspräsentation	12/16	06/17	06/17	Die großen, schweren Komponenten erforderten Montagearbeiten in Hallen mit Kranen, welche jedoch oftmals lange Wartezeiten bedingten. Von Seiten des Brandschutzbeauftragen und des §40-Verantwortlichen wurden zusätzliche Einbauten notwendig. Oft konnten Arbeiten aus Brandschutz-gründen nicht zeitgleich ausgeführt werden, wodurch Terminverzug resultiert.

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

- Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten, strukturiert nach den Arbeitspaketen.
- Konnten die Arbeitsschritte und –pakete gemäß Plan erarbeitet werden? Gab es wesentliche Abweichungen?
- Die Beschreibung beinhaltet ebenso eine allfällige Änderung der angewandten Methodik (Achtung: Änderungen an der Methodik und wesentliche Änderungen im Arbeitsplan erfordern eine Genehmigung durch die FFG!).

Nach eingehender Auseinandersetzung mit den technischen Unterlagen und zahlreichen Einblicken vor Ort (Herr Ing. Peter Siedl erklärte tiefgreifend die Technik am Objekt und wies auf auch auf Umstände hin welche problematisch, z.B. in Bezug auf nicht mehr verfügbare Unterlagen oder veraltete Technologien ohne vorhandenem Expertenwissen, sind) konnten das notwendige KnowHow für das Engineering betreffend das neue Energietransformsystem von HET gewonnen werden. Es wurde vermieden, originale Software-Steuerungscodes anzutasten, weshalb die Schaltungstechnik für den Demoprototyp „in Hardware“ (Abb. 17, 18, 19) ausgeführt wurde! Bei zukünftigen Modernisierungen soll aber auf die Möglichkeiten mit softwaretechnischen Lösungen (HET hatte ursprünglich auf S7 basierende Modelle programmiert) nicht verzichtet werden.

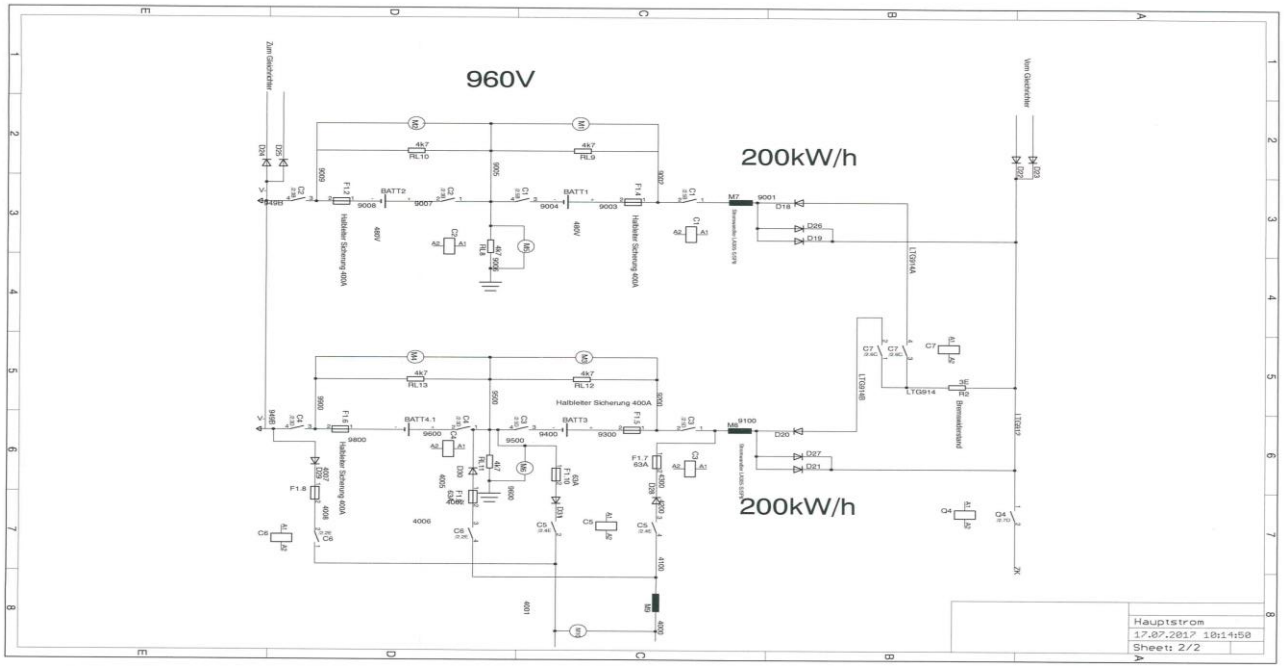


Abb. 17: Hauptstrom (Schaltbild)

Abb. 18: Realisierung Hauptstromverschaltung in Hardware

Abb. 19: Verschaltung Hauptstrom Brennstoffzelle und Hauptrelais am Führerstand der Lok (links) sowie und Monitoring Batteriezustand mittels LED‘s

Um einen komplizierten Eingriff in die Software (wegen dem schwer zu entschlüsselnder HEX-Code und da keine Aufzeichnungen mehr existieren wurde dies von Seiten ÖBB nicht gewünscht) zu vermeiden mußte ein Weg gefunden werden die Steuerung betreffend die Detektierung der Stellung des Stromabnehmers, bzw. das „Vortäuschen“ des Anliegens von 15.000 Volt, bzw. 16 2/3-Hz-Sinus-Wechselspannung zu „überlisten“. Eine von Professor Weiß entwickelte Hilfsschaltung, basierend auf 30 Volt Spannungswandler und 16,7 Hz Frequenzgenerator, erfüllt den Zweck. Für den Batterie-/Brennstoffzellenbetrieb war die Simulation der Wechselspannung des regulären Modus mittels einer „sauberen“ Sinusform von Bedeutung.

Um die autarke Fahrdauer der Lok nicht durch die Kapazität der Pb-Bordbatterie einzuschränken wurde von den ÖBB-Ingenieuren Kühn und Werzer eine spezielle Schaltung zur Ladung dieser entwickelt, ansonsten eine Ladung nur bei „aufgebügelter“ Lok stattfinden würde, was die Aussagekraft der Fahrversuche schmälern würde (Abb. 20).

Abb. 20: Adaptierte Batterieladeeinrichtung

Der Hilfsbetriebe-Wechselrichter muss zwangsläufig im Einsatz sein. Wenn die Motortemperatur nicht sehr hoch ist, läuft der Hilfsbetriebe-Umrichter nur mit etwa 22 Hz und entsprechend abgesenkter Spannung. Die Leistung geht dann von ca. 100kW (Vollbetrieb einschließlich Kompressor) auf geschätzte 20 kW (ohne Kompressor) zurück. Der Kompressor benötigt die volle Spannung und Frequenz, aber nur kurzzeitig. Eine Abschaltung der Lüfter würde daher nur wenig bringen, aber einigen Aufwand erfordern. Um Strom zu sparen soll vor Überführung in die Serie ein intelligentes Regelmodell softwareseitig implementiert werden, wozu die Zeit beim Demoprototyp leider nicht ausreichend war.

Die zur Adaption vorgesehene Lokomotive ÖBB 1063 wurde vor etwa 35 Jahren konzipiert und beinhaltet den damaligen Stand der Technik. Der Antriebsstromrichter ist mit schnellen Thyristoren und Schwingkreislöschung über Hilfsthyristoren realisiert. Diese Schaltungstechnik bedingt im Betrieb eine im Bereich der Nennspannung zu haltende Zwischenkreisspannung. Ein Betrieb mit wesentlich geringeren Werten (etwa 40% bis 50% der Nennzwischenkreisspannung) war damit praktisch ausgeschlossen. Trotz unumgänglicher Restriktionen, z.B. konnte „Stufe 2“ der elektrischen Bremse (um eine Entladung der Hochvoltbatterie zu verhindern) nicht aktiviert werden (Abb. 21), wurden jedoch bereits in der Demoversion der Drehstrom-Lok innovative Konzepte bezüglich Energiebereitstellung, Traktionssystem und Betriebssicherheit mit Redundanzen umgesetzt.

Abb. 21: Energieführung zum Bremsschütz

Batterieauslegung und Batterie-Sicherheitskonzept

➔ *siehe auch Detaillbericht „System_Batterieakkus“*

Es wurden Zellen vom Typ LEV50 in den Traktionsbatterien montiert, welche als hochqualitative Energiespeicher auch für den mobilen Einsatz entwickelt wurden. Die Zellen sind zu 12 Stück in Modulen zusammengefasst (2 Stück parallel, 6 in Serie – Abb. 22). Daraus ergibt sich pro Modul eine Nennspannung (bei 4,6 V je Zelle) von 21,6 V und eine Nennkapazität von 2,16 kWh. Mit 24 Modulen in Serie werden schließlich 518 V(DC) und 51,8 kWh als Nennwerte erreicht. Diese 51,8 kWh (nenn) ergeben eine Modulgesamtmasse von etwa 600 kg.

Insgesamt sind 4 Einheiten zu je 51,8 kWh (nenn) eingeplant. Jede der Einheiten weist eine maximale Spannung (bei 4,2 Volt/Zelle) von 605 V(DC) auf. Aus Gründen der Sicherheit wird betrieblich nur auf 4,1 V / Zelle aufgeladen, woraus eine kleine Reduktion der Kapazität auf etwa 50 kWh pro Einheit folgt.

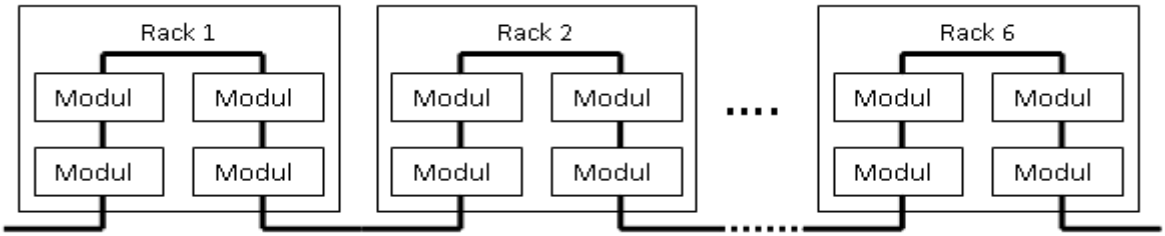


Abb. 22: Jede Batterie-Einheit beinhaltet 6 in Reihe geschaltete Racks zu je 4 Modulen

Die Anordnung der Akkupacks (bestehend aus jeweils 6 Racks zu Modulen a 12 Zellen) auf der Lok ist in Abbildung 24 dargestellt.

Aus Gründen der Zyklenzahl, der Lebensdauer und einer festgelegten Notreserve wurde die reguläre untere Zellenspannung mit 3,3 Volt angesetzt. Die Notreserve (weitere Entladung, bis Zellenspannung von 3,3 Volt auf 3,0 Volt sinkt) beträgt ca. 15% der 50 kWh. Als groben Richtwert bezüglich Zyklenzahl kann angenommen werden, dass 1 vollständige Entladung (bis herunter auf 3,0 Volt/Zelle) denselben Einfluss auf die erreichbare Zyklenzahl einer Zelle ergibt wie 5 reguläre Entladungen (Zellenspannung minimal 3,3 Volt).

Eine Entladung einzelner Zellen auf weniger als 3,0 V / Zelle wird durch den Batterieschütz ohne Umgehungsmöglichkeit verhindert. Die Lokomotive ist dann im Batteriebetrieb nicht mehr selbst fahrfähig. Es muss zuerst die Brennstoffzelle eine Mindestnachladung durchführen (Dauer ca. 10 Minuten) oder die Oberleitung erreicht sein (Nachladung über den Fahrdraht).

Ein neu bei HET entwickeltes Containment soll Sicherheit im Brandfall gewährleisten und gegenseitige Ansteckung einzelner Module verhindern (Abb. 23).

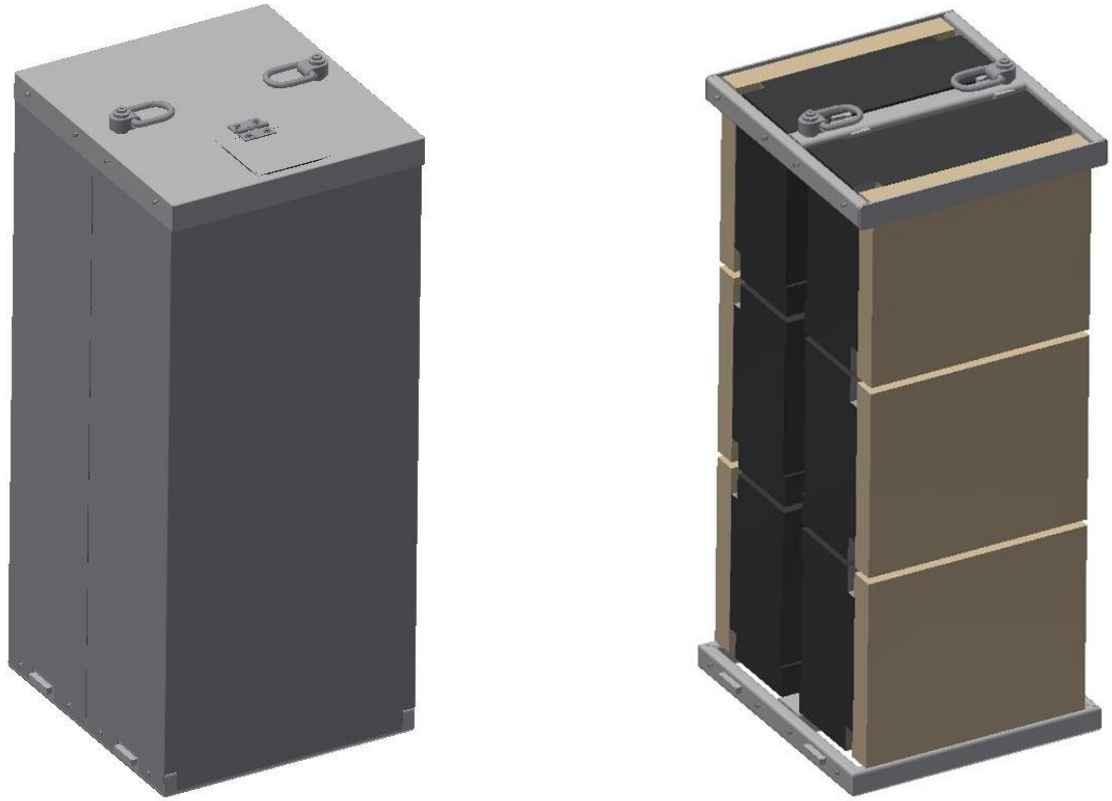


Abb. 23: Akkurack mit und ohne Abdeckung (mit Explosionsschutzklappe)

Zur Überwachung der Akkuzellen wurden PT1000-Temperatursensoren eingesetzt! Bei Erreichen der Temperaturschwelle von 40° wird Nachladen verhindert, der Fahrbetrieb bleibt jedoch bis 60°C offen!

Bild 24: Anordnung der Batterieakkus auf der Lok

Brennstoffzellen-Energietransformsystem

➔ *siehe auch Detaillbericht „System_Wasserstoff und Brennstoffzelle“*

Hierzu sind 2 getrennte und unabhängige Wasserstofftanks vorgesehen (Abb. 25). Der Wasserstoff gelangt über ventilgeschaltete Leitungen in die Brennstoffzelle. Über die 4 individuellen Brennstoffzellen-Gleichstromsteller mit Potentialtrennung wird die elektrische Energie für den Batteriekreis umgewandelt. Hierzu sind Weitbereichs-DC/DC-Wandler wegen des weiten Spannungsbereichs der Brennstoffzelle zwischen Leerlauf und Belastung, sowie wegen des limitierten Bereichs der Batteriespannung (minimal 432 Volt, maximal 590 V) implementiert worden. Die Entladung der Batterie erfolgt aus der Differenz zwischen vom Antrieb geforderter Leistung (betriebliche Vorgabe Zugkraft mal Geschwindigkeit) und von der Brennstoffzelle über die Brennstoffzellen-Gleichstromsteller mit Potentialtrennung nachgelieferte Leistung Abb. 26). Besonders im Bremsbetrieb (Lokomotive führt Nutzbremsung durch) wird die Batterie über Traktionsstromrichter und Brennstoffzellen-Energie wieder geladen, sofern die erforderliche Energie für die Kühlung der Traktionsmaschinen ausreichend niedrig ist.

Der Batteriekreis stellt die antriebsbestimmte Spitzenenergie bereit, ermöglicht das Nutzbremsen und entkoppelt die Energiebereitstellung durch die Brennstoffzellen vom Fahrbetrieb in vollständigem Umfang. Daher kann die Brennstoffzelle im Punkt besten Wirkungsgrads betrieben werden (etwa 1/2 bis 2/3 der Maximalleistung), sofern die Energiebilanz der Batterie dies zulässt.

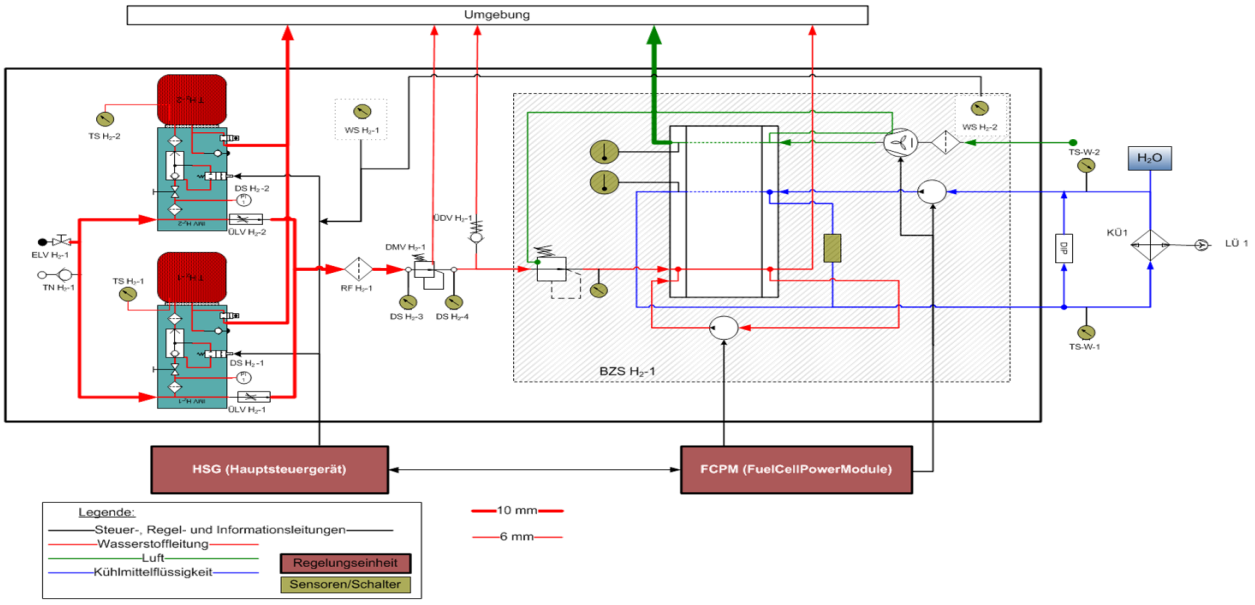
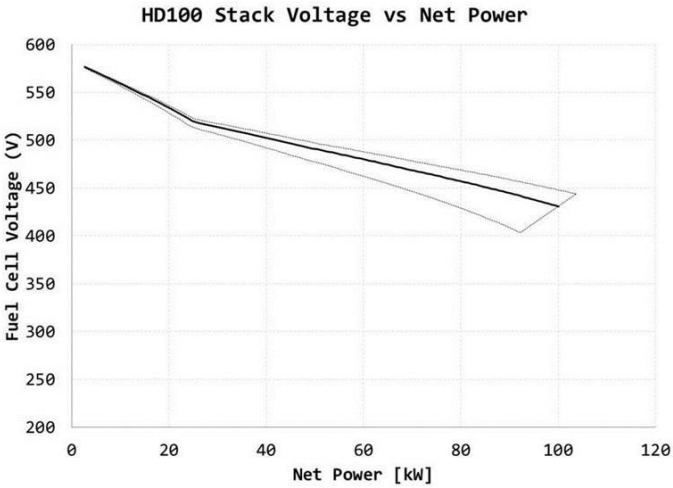


Abb. 25: Verfahrenstechnische Darstellung Brenstoffzellensystem



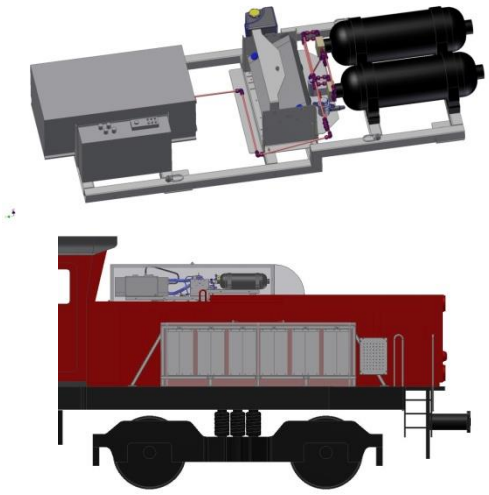


Abb. 26: Brennstoffzelle für ca. 30kW Eintrag in Batterie

Für die Brennstoffzelle existieren aus brandschutztechnischer Sicht noch keine Anhalts-/Erfahrungswerte weshalb das Nachladen der Akkupacks über die Energie des Wasserstoffs vorerst nur auf einer gesondert abgesperrten Strecke (Privatbahn Ampflwang) von Seiten des $40-Verantwortlichen freigegeben wurde.

2.3 Änderungen im weiteren Projektverlauf

- Gibt es Veränderungen? Welche Auswirkungen haben diese? Wie muss die Planung adaptiert werden?

Es gab keine inhaltlichen Änderungen, aber terminliche Verschiebungen!

3. Projektteam und Kooperation

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne Schlüsselmitarbeiter und Drittleister)?
- Bei Konsortialprojekten: Beschreiben Sie die Zusammenarbeit im Konsortium.
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein. Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

Auf Wunsch von Professor Weiß war es erforderlich den Status des Leobener Universitätsinstituts vor Beginn der Feldversuche im September 2016 vom Projektpartner zum Drittleister zu ändern um einerseits deren Entwicklungsrisiko zu minimieren, andererseits HET die exklusiven Verwertungsrechte zu sichern! Der besonderen Bedeutung des Vorhabens für HET wegen wurden weitere Mitarbeiter (Dipl.-Ing. Dr. mont. Herbert Krampl und Dipl.-Ing. Christian Böck) dem Vorhaben hinzugezogen. Während der Karenz von Dipl.-Ing. Camelia Serban wurde die Projektleitung vorübergehend Herrn Dipl.-Ing. Klaus Peböck übertragen.
HET geriet im Zuge der Anschaffung der für das Projekt notwendigen Komponenten in finanzielle Schieflage worauf ein Insolvenz-/Sanierungsverfahren (vom 11. März bis 10. Juni) absolviert werden mußte. Entschärft werden konnte die finanzielle Situation letztendlich durch kostenfreie Ausleihe eines 150kW Brennstoffzellen-Prototyps durch Firma Ballard. Vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt konnte ein entsprechender DC/DC-Steller günstig erworben werden.

Als Subunternehmer für die Antriebstechnik (zeitlich begrenzte Zurverfügungstellung von Batteriebetrieb-Wechselrichter für Traktion und Fahrmotorkühlung, Umschalteinrichtung Traktionskreis / Lüftermotorkreis) war das Institut für Elektrotechnik an der Montanuniversität Leoben vorgesehen, ebenso für die Entwicklung des Batterie-Monitoring. Weil in den Beständen der ÖBB vorhanden wurde nur letzteres am Universitätsinstitut in Auftrag gegeben.

Für die Bereitstellung von gebrauchten Lithium-Ionen-Batterie-Modulen mit insgesamt 200 kWh (die Zellen wurden auf dem Batterieteststand an der MUL hinsichtlich Lade- und Entladezyklen geprüft) wurde Professor Weiß selbst beauftragt.

Wegen Personalmangel konnte das ursprünglich für die Entwicklung der Steuerungstechnik geplante, vom Institut für Elektrotechnik zu stellende, Fachpersonal (Dr. Kaserer, Dr. Schmid) leider nicht für das Vorhaben herangezogen werden weshalb die ÖBB-Ingenieure Hans Kühn und Benjamin Werzer dankenswerter Weise kurzfristig von deren eigentlichem Aufgaben abgezogen werden mußten um das Vorhaben zu retten! Deren Fachkompetenz, Ideenreichtum und Problemlösungskompetenz erwies sich schließlich als glücklicher Umstand welcher wohl anderweitig zu allzu komplexen Lösungen geführt hätte! Neben der Applikation der Wasserstoff-/Brennstoffzelleneinheit unterstützten Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Hartl (HET) und Dipl.-Ing. Herbert Hartl (HET) die Arbeiten zur Steuerungsentwicklung.

Der Projektplan wurde danach angepasst! Die Kosten wurden daraufhin entsprechend umverteilt!

4. nur Endbericht: Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten. Ist eine Verwertung möglich?
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?
- Wie werden die im Projekt geschaffenen Prototypen weiter verwendet?
- *Zusammenfassung für Veröffentlichung (optional)*
- *Programmspezifische Formulierung bezüglich Programmziele*

HET möchte (sehr gerne gemeinsam mit Firma TecSol) die nun vorgestellte Technik unverzüglich auf kommerzielle Füße stellen, wie dies anlässlich des Besuchs von ÖBB-Vorstandsdirektor Karl Zöchmeister am 07.09. „auf der Lok“ angeregt wurde, um das jetzt gewonnene Wissen (bzw. im Zuge des Projektes zutage getretene, aber aus Zeitgründen nicht mehr realisierte Verbesserungen) umzusetzen. Dazu wurde die Lok für weitere Modifikationen und Tests reserviert, weshalb ein Rückbau bis auf Weiteres nicht stattfinden soll! ~~Gemäß dem Zitat von Dipl.-Ing. Tisch „DB hat ein Holzmodell, ÖBB eine funktionsfähige Lok“ soll der in Details steckende Vorsprung ausgebaut werden~~! Insbesondere soll der in den technischen Details verborgene Vorsprung für die Anmeldung von gewerblichen Schutzrechten herangezogen werden, bzw. gesichert werden!
Von Seiten ÖBB wurden auch Pläne diskutiert, für die fahrdrahtfreie Strecke Neumarkt-Braunau am Inn TALENT-Elektro-Personentriebwagen auf emissionsfreies eHybrid-Brennstoffzellen-Energietransformsystem umzurüsten.
Das weltweit einzigartige Dreifach-Energiesystem mit zwischengeschalteter, immer auf optimalem Wirkungsgrad arbeitender, Brennstoffzelle soll laut ÖBB durch ein Patent (PCT: Anmelder sind ÖBB und HET) gewerberechtlich geschützt werden.

Neben dem großen Echo aus dem Inland (Vorstandsdirektor Dipl.-Ing. Schreiner möchte HET kurzfristig mit der Umrüstung eines 4090-Personentriebwagens auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Energietransformsystem für die Zillertalbahn beauftragen, der Auftragswert beträgt knapp 900.000 Euro) überraschte auch der Besuch von Dipl.-Ing. Meinsen, wobei HET aufgefordert wurde, ein Angebot für die Umrüstung von Bombardier-Elektro-Personentriebwägen für die Berliner Verkehrsbetriebe abzugeben.

In ferner Ausgestaltung des HET-Konzepts zur rekuperativen Energietransformation wird an einer Adaptierung der Brennstoffzelleneinheit geforscht, wodurch ein reversibler Betrieb erwirkt werden soll. Den Entwicklungsrisiken in punkto Kombination von PEM und Hochdruckelektrolyse steht mittelfristig großes wirtschaftliches Potenzial, insbesondere hinsichtlich den laufenden Betriebs- und Instandhaltungskosten gegenüber.

Der Lok-Prototyp soll – gemäß den zuletzt bekannt gewordenen Intension seitens des Auftraggebers ÖBB - für weiterreichende Umbauten (nach Modernisierung der Stromrichtertechnik soll der freiwerdende Motorraum genutzt werden um Batterieakkus und Brennstoffzelleneinheit nach

innen zu verlegen) und Fahrtests zur Verfügung stehen und nicht mehr in kommerziellen Verschubeinsatz gehen! Dabei spielten die Erkenntnisse zum Brandschutz wohl eine besondere Rolle!

Zusammenfassung:
Basierend auf der ÖBB-Baureihe 1063 wurde ein neues, hybrides Energietransformsystem demonstriert welches Batterieakkubetrieb sowohl mit Fahrleitungs- als auch mit Wasserstoff-Brennstoffzellenstromversorgung kombiniert. Im autarken Modus werden durch die dritte Komponente überdurchschnittliche Reichweiten, maximaler Gesamtwirkungsgrad und vielfach höhere Ladezyklen erzielt. Im Betrieb und in der Erhaltung teure Dieselverschubloks können damit gänzlich substituiert werden!

Die entsprechend dem PCP-Förderprogramm definierten Ziele (§40-Zulassung, Leistungsfähigkeit, Praxistauglichkeit, Systemzuverlässigkeit, Eignung des Konzepts für Serienproduktion), konnten im Zuge der Fahrtests mit dem von HET entwickelten Energietransformsystem verifiziert werden.

5. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

- Die Abrechnung ist als eigene Datei im Excel-Format hochzuladen. Die Verwendung der im eCall zur Verfügung gestellten Vorlage ist verpflichtend. Beachten Sie den Kostenleitfaden (www.ffg.at/recht-finanzen/kostenleitfaden) bzw. die Ausschreibungsdokumente.
- Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.
- Kommt es zu einer größeren Kostenumschichtung, so ist zusätzlich zu einer Begründung im Bericht die Kostenumschichtungstabelle (www.ffg.at/Kostenumschichtungen) als Anhang zum Bericht hochzuladen.

Es gab keine zum Ansuchen beantragten Kostenabweichungen! Jedoch mußte der Projektstatus des Instituts für Elektrotechnik auf Wunsch von Professor Weiß von Projektpartner auf Drittleister geändert werden!

6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.

Es wurden keine projektspezifischen Sonderbedingungen vereinbart!

7. Meldungspflichtige Ereignisse

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind, z. B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten beim Förderungsnehmer
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen

- Weitere Förderungen für dieses Projekt

Wie bereits in eCall dokumentiert mußte als Folge der Kündigung der Geschäftsbeziehung durch die Hausbank ein Insolvenz-/Sanierungsverfahren beim Landesgericht Salzburg von HET beantragt werden. Die FFG (Herr Dr. Pecharda) und die ÖBB (Herr Dipl.-Ing. Tisch) wurden am 26. Februar 2016 über die Maßnahmen und eine damit drohende Zahlungsunfähigkeit informiert und auch über den Schritt zu Gericht vorab am 10. März (Mag. Dlesk, bzw. Dipl.-Ing. Tisch) in Kenntnis gesetzt. Der langen Lieferzeit von PE-Brennstoffzellen des Typs HD6 wegen war es erforderlich, diese Anfang März zu bestellen und auch eine Anzahlung (50% von 386.000 Euro) zu leisten. Leider wurde die Notwendigkeit der Anschaffung seitens der Hausbank nicht erkannt weswegen das Konto kurzfristig gesperrt wurde.
Andererseits konnte HET die Sanierungsphase nutzen und sein Ingenieurpotenzial auf das visionäre Projekt ansetzen, weswegen die theoretischen Vorarbeiten bereits abgeschlossen und der Umbau der Lok ab Donnerstag, 01. September in Linz gut durchgeplant werden konnte.

Die ÖBB-Lokomotive 1063.038 sollte im Rahmen eines FFG-Projektes für reale Fahrversuche auf Betrieb mit Lithium-Ionen-Zellen (Gesamtzielkapazität 200 kWh) in Kombination mit einem Wasserstoff-Brennstoffzelle-Energietransformsystem als Range-Extender umgebaut werden.
Gemäß Projektantrag und bedingt durch starke Kostenbegrenzungen (Batterieakku-Neupreis 1.900 Euro pro kWh) konnten hierfür nicht Neuzellen verwendet werden, sondern es kamen Re-Use-Zellen des Typs YUASA LEV50 zum Einsatz, welche vom Unternehmen Professor Weiß an HET geliefert wurden. Diese Zellen (3,7 Volt Nennspannung, 50 Amperestunden Nennkapazität) wurden bereits in anderen Projekten des Instituts, auch in der Forschung, mit Erfolg verwendet. Die Zellen wurden einzeln vermessen und in mehreren Experimenten deren Exzess im Brandfall untersucht, was enormen Zeitaufwand erforderte.

Es wurden keine weiteren Förderungen erhalten und auch nicht beantragt!