

Abschlussbericht

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

ZE (Zuwendungsempfänger):

NUCELLSYS
THE FUEL CELL SYSTEM COMPANY

Neue Straße 95
73230 Kirchheim/Teck-Nabern

Förderkennzeichen:

03BV248A

Vorhabens Bezeichnung:

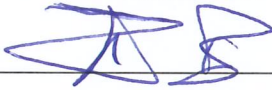
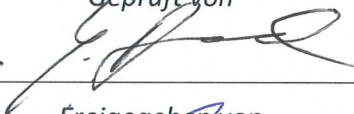
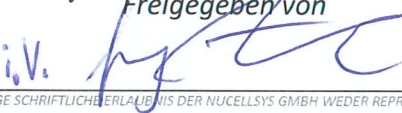
Entwicklung eines BZ-Hybridstadtbus der 4. Generation (BZ-Bus Gen. 4)

Laufzeit des Vorhabens:

01.03.2015 – 31.12.2016

Berichtszeitraum:

01.03.2015 – 31.12.2016

	Datum, Unterschrift
Autor	<i>Erstellt von</i> Rainer Bauer 
Prüfer	<i>Geprüft von</i> Guido Bunzel <i>i.A.</i> 
Freigabe	<i>Freigegeben von</i> Dr. Georg Frank <i>i.V.</i> 
<small>DIESES DOKUMENT ENTHÄLT FIRMENEIGENE INFORMATIONEN, DIE OHNE VORHERIGE SCHRIFTLICHE ERLAUBNIS DER NUCCELLSYS GMBH WEDER REPRODUZIERT NOCH IN ANDERE DOKUMENTE ÜBERTRAGEN NOCH AN ANDERE WEITERGEGEBEN NOCH FÜR PRODUKTIONS- ODER ANDERE ZWECKE VERWENDET WERDEN DÜRFEN./ THIS DOCUMENT, SUBMITTED IN CONFIDENCE, CONTAINS PROPRIETARY INFORMATION WHICH SHALL NOT BE REPRODUCED OR TRANSFERRED TO OTHER DOCUMENTS OR DISCLOSED TO OTHERS OR USED FOR MANUFACTURING OR ANY OTHER PURPOSE WITHOUT PRIOR WRITTEN PERMISSION OF NUCCELLSYS GMBH.</small>	

Abschlussbericht des Vorhabens Entwicklung eines BZ-Hybridstadtbus der 4. Generation
Förderkennzeichen: 03BV248A



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Aufgabenstellung	2
3	Voraussetzungen	4
4	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
5	Wissenschaftlicher und technischer Status	10
6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
7	Ergebnisse des Vorhaben	11
8	Nachweis der wichtigsten Positionen	35
9	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	36
10	Nutzen, Verwertbarkeit	37
11	Fortschritt bei anderen Stellen	37
12	Veröffentlichungen	38
13	Referenzen	38
14	Abbildungsverzeichnis	39
15	Abkürzungen	40



1 Einleitung

Dieser Bericht beschließt ein Vorhaben auf dem Weg zu einer effizienten und emissionsfreien Technologie für eine zukünftige Antriebstechnik im Bus (öffentlichen Nahverkehr). Inhalte des letzten Halbjahres sind Teil dieses Abschlussberichts.

2 Aufgabenstellung

Ziel dieses Vorhabens war es mit der zukünftigen vierten BZ-Stadtbusgeneration eine vollumfängliche serienfähige BZ-Busgeneration zu verkörpern. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse haben in Kleinflotten bewiesen, dass sie heute nahezu alle die betrieblichen Anforderungen der Verkehrsbetriebe erfüllen.

Grundlage waren daher in einem ersten Schritt umfangreiche Analysen und Auswertungen der bestehenden Daten der Vorgängergeneration, um die Erfordernisse für die Entwicklung bus-spezifischer Komponenten (galvanische getrennte DC/DC-Leistungselektronik, Steuergeräte, Betriebssoftware, langzeitaugliche Membranelektrodeneinheit) und den dazugehörigen Prüfmitteln zu definieren. Ein weiteres Ziel war die Entwicklung eines geeigneten Packagingkonzepts zur effizienten Anordnung von Wasserstofftankbehältern.

Aufbauend auf den hier gewonnenen Erkenntnissen sollte eine innovative Nachfolgefahrgeneration entwickelt werden. Dieses BZ-Bus-Konzept sollte, neben dem Antrieb von Solostadtbussen, erstmals auch den lokal emissionsfreien Antrieb von Gelenkbussen ermöglichen. Durch die Vernetzung von Energie- und Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs mit dem BZ-Antriebssystem sollten Synergien optimal genutzt und die Effizienz somit deutlich erhöht werden.

Gleichzeitig wurde das Ziel verfolgt, die Kosten der Komponenten erheblich zu senken, und die Zuverlässigkeit / Robustheit des BZ-Antriebstrangs deutlich zu erhöhen und somit den Serviceaufwand gering zu halten.

Trotz der bereits erzielten Fortschritte vorheriger Projekte muss die Verfügbarkeit der Fahrzeuge von heute 60 - 70% erheblich erhöht werden.

Die Forderung der Busbetreiber an einen zuverlässigen Betrieb von bis zu 50.000 Stunden, bei Einhaltung der Betriebskosten (TCO), stellt an alle Komponenten eines Bus-BZ-Systems eine Herausforderung dar. Hierbei kommt der Entwicklung des Herzstücks eines BZ-Systems, einer leistungsfähigen, robusten und langlebigen, Membranelektrodeneinheit besondere Be-



deutung zu. Im Sinne einer umweltgerechten Produktentwicklung wurden entwicklungsbegleitende Ökobilanz Untersuchungen für die Komponenten BZ-System und H₂-Tankanlage durchgeführt. Durch die Forschung –und Entwicklungsaktivitäten soll ein weiterer Schritt für die Erreichung der technischen und wirtschaftlichen Ziele eines wettbewerbsfähigen, emissionsfreien Antriebsstrangs für die Integration in einen Stadtbus in Solo- und Gelenkausführung vollzogen werden.

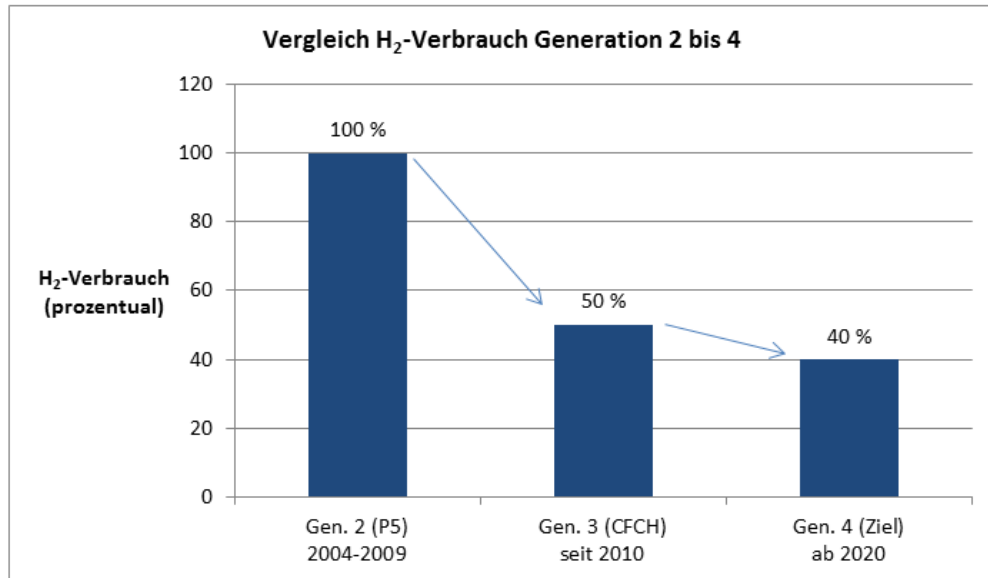


Abbildung 1 H₂Verbräuche der unterschiedlichen BZ-Bus Generationen



3 Voraussetzungen

Mit der gezielten Förderung im Rahmen des von den Bundesministerien für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bildung und Forschung (BMBF), sowie Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gemeinsam formulierten „Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP) hat die Bundesregierung die Weichen für die Weiterentwicklung und Einführung dieser Technologien gestellt.

Somit wird auch dem öffentlichen Interesse nach emissionsfreier Technologie für den Stadtverkehr Rechnung getragen. Deutschland wird als Technologiestandort gestärkt, Arbeitsplätze werden erhalten, bzw. die Basis für zukünftige Arbeitsplätze geschaffen.

Als Entwickler und Hersteller von Brennstoffzellensystemen für die Anwendung im Automobil und Zulieferer der Daimler AG und der EvoBus GmbH verfügt die NuCellSys GmbH über sämtliche, für die erfolgreiche Durchführung dieses Vorhabens, wesentlichen Voraussetzungen, nämlich:

- einer ausgewogenen Organisation, erfahrener hoch qualifizierter Ingenieure in den Bereichen System Engineering, Komponentenentwicklung, Softwareentwicklung, Testing, Qualitätssicherung und Produktion,
- einer langjährigen Erfahrung in der Entwicklung, den Betrieb und der Herstellung von Brennstoffzellensystemen,
- einer Infrastruktur für Wasserstoff, Prüfstände mit entsprechenden Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen,
- einer guten Zusammenarbeit mit einer sich entwickelnden Zulieferindustrie,
- der Verwertung der Ergebnisse in den Fahrzeugentwicklungsbereichen bei der Daimler AG und der EvoBus GmbH,
- der Zertifizierung nach ISO/TS 16949 (allgemeine Forderungen an die Qualitätsmanagementsysteme der Automobilindustrie) und Automotive Spice ISO/IEC 15504.



4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeitspaketstruktur:

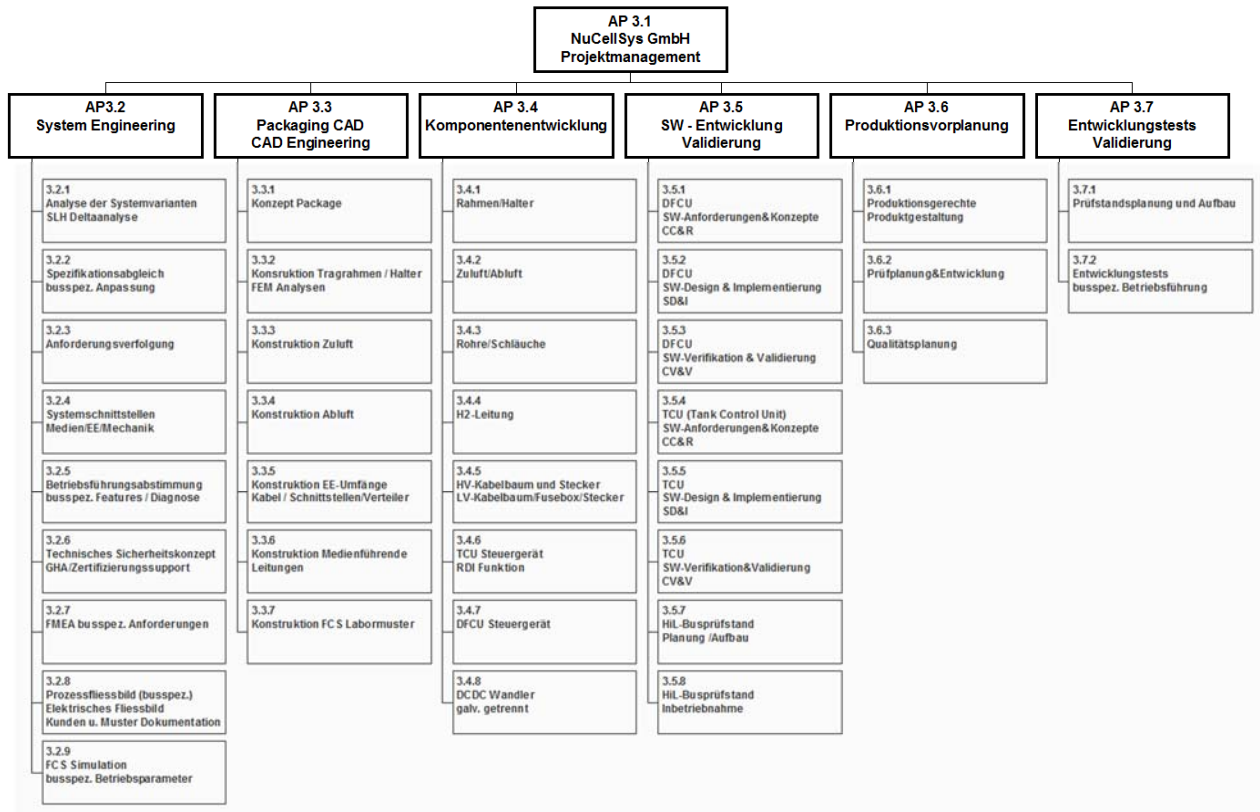


Abbildung 2 Projektstruktur NuCellSys GmbH

Arbeitspakete:

AP 3.1: Projektmanagement:

- Planen, Steuern, Kontrollieren und Abschließen des Vorhabens
- Fachliche Führung und Lenkung der Arbeitspakete sowie Initiieren von Innovationen
- Erreichung der Vorhabenziele sicherstellen
- Berichterstattung zum technischen Fortschritt
- Sicherstellen des genehmigten Mittelabflusses
- Sicherstellen des Informationsflusses zwischen den Arbeitspaketen
- Abstimmen der Arbeitsinhalte und Ergebnisse



AP 3.2: System Engineering:

- Erstellen und Abstimmen der technischen Konzepte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen von PKW und Bus
- Deltaanalyse der PKW und Busanforderungen. Untersuchen der Einflüsse auf das BZ System (z.B. Kaltstartverhalten, Kühlsystemanforderungen vom Bus, Startup/Shutdown-Verhalten, Stop-Mode-Betrieb, Streckenlastprofil)
- Erstellen der busspezifischen BZ-Umfänge als Spezifikation in der Anforderungsmanagementsoftware (Doors).
- Erstellen von Schnittstellendokumenten für die Verfahrenstechnischen, elektrischen und die Betriebsführungsumfänge in enger Abstimmung mit den Fahrzeugschnittstellen.
- Ausarbeiten der notwendigen Änderungen und Anforderungen für die Komponenten-Lastenhefte
- Analyse des funktionalen Sicherheitskonzeptes auf BZ-System-Ebene. Mitarbeit am technischen Sicherheitskonzept auf Fahrzeugebene. Darstellung der Einflüsse ggfs. Anpassungen auf BZ- und Fahrzeug-Ebene
- Erstellen des Prozess- und elektrischen Fließbildes für die Busapplikation sowie der notwendigen technischen Unterlagen innerhalb des Arbeitspaketes.

AP 3.3: – Packaging und Design:

- Erstellen von Packagingkonzepten für die Plattformen Solo und Gelenkbus mit Anforderungen bezüglich Montage, Service und Wartung.
- Konstruktion einer kostengünstigen Befestigung für das BZ-System und der busspezifischen Komponenten im vorgegebenen Bauraum unter Berücksichtigung der vorgegebenen Befestigung am Bustorso und unter Erfüllung der Anforderungen bezüglich Festigkeit und Eigenfrequenzanregung durch die Straßenbeschaffenheit
- Konstruktion der Verrohrung inkl. Befestigung für die Medienversorgung Wasserstoff, Luft, Abluft und Kühlwasser.
- Konstruktion der Leitungsverlegung und 12 Volt Verteilung inklusive Befestigung mit Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen bei den Hochvoltleitungen.
- Konstruktion einer Abluftleitung mit integriertem Wassermanagement zur Abführung des Produktwassers aus den Brennstoffzellen.



AP 3.4 – Komponentenentwicklung

- A-Muster Spezifikationen für die busspezifischen Hardwareumfänge erstellt und abgestimmt
- Lieferanten für Entwicklungsumfänge über den Einkauf angefragt und ausgewertet
- Tanksteuergerät (TCU) spezifiziert und busspezifische Anpassungsentwicklung bei einem Lieferanten beauftragt
- Erste Musterteile für den Rahmen, die Zuluft- und Abluftanlage beauftragt (Montage / Shakertest)
- Basis Softwareanpassung für Gate Way Steuergerät (DFCU) beauftragt

AP 3.5 – Software Entwicklung

- Spezifikation, und Design der Betriebsführungssoftware für das Bus-Tanksteuergerät als Variante der PKW TCU, mit den Anforderungen des Bustanksystems
- Spezifikation, und Design der Betriebsführungssoftware für das Gate Way-Steuergerät (DFCU) für den Einsatz eines Dual-BZ-Systems, welches aber auch als Single-System betrieben werden kann mit den Funktionen
- Signalrouting-Diagnose und Powermanagement Planung, Aufbau und Inbetriebnahme des Bus-HV-HiL-Prüfstands

AP 3.6 – Produktionsvorplanung

- Identifizierung von Potentialen zur Senkung von Produktions- und Bauteilkosten anhand der Reifegraderhöhung für produktionsgerechtes Produktdesign der busspezifischen Komponenten und dem Gesamtsystem.
- Qualitätsseitige Absicherung und Entwicklung der Lieferanten für busspezifische Komponenten und Bauteile
- Aufbau eines C-Muster BZ-Laborsystems für den Einsatz im Busprüfstand. Spezifikation und Design der Betriebsführungssoftware für das Bus-Tanksteuergerät

AP 3.7 – Test / Verifikation Bus-BZ-System

- Mechanische und elektrische Anpassung des bestehenden Busteststandes für das vorgesehene BZ-System
- Anpassen der Labview-Software auf die neusten BZ- und Teststandsanforderungen
- Abnahme des umgebauten Teststandes nach Maschinenrichtlinie
- Konfigurieren des Laborsystems für den Busprüfstand
- Einbau und Inbetriebnahme des Bus-BZ-Systems
- Sicherstellen der Messgenauigkeit



Der Zeitplan:

Untenstehender Meilensteinplan beinhaltet die Meilensteine, sowie inhaltliche und zeitliche Änderungen.

Aufgrund des noch nicht festgelegten Gesamtkonzeptes auf der Bus-Fahrzeugseite, konnten die Umfänge nicht wie geplant bearbeitet werden. Dadurch kam es beim Mittelabfluss zu Veränderungen, sodass Umfänge die in 2015 geplant waren, erst in 2016 begonnen werden konnten. Ein Änderungsantrag mit dem Wunsch der Mittelverschiebung und inhaltlicher Änderungen wurde am 20.07.2016 [6] versendet.

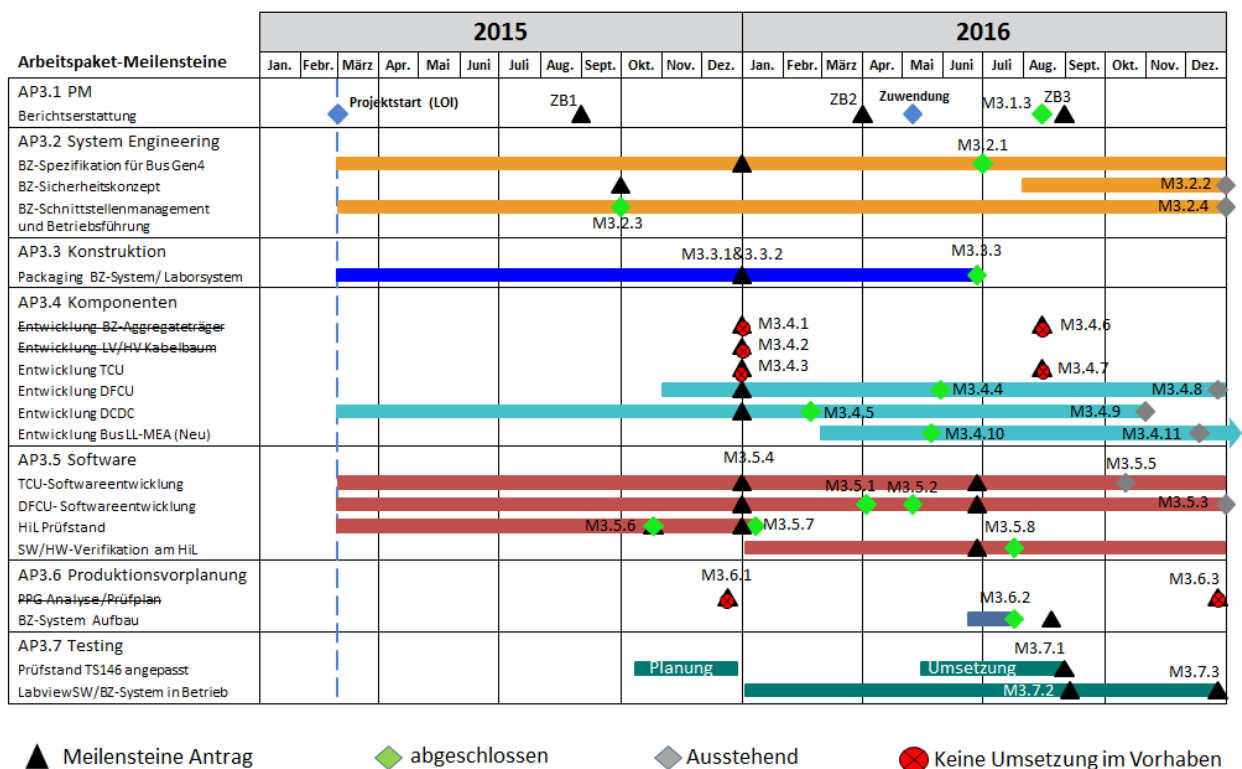


Abbildung 3 Meilensteinplan (aktuell)

Wesentliche Änderungen:

- Das Sicherheitskonzept wurde terminlich auf 12/2016 verschoben, da der Fahrzeugsystemaufbau (Designfreeze) noch nicht abgeschlossen war.
- Die FEM Analyse kann innerhalb des Vorhabens nicht umgesetzt werden. Die geplanten Stunden wurden nicht in Anspruch genommen
- Entwicklung des BZ-Aggregateträgers wurde gestrichen und zu einem späteren Zeitpunkt umgesetzt. Die dafür geplanten Fremdleistungen wurden für die Weiterentwicklung des DC/DC Wandlers verwendet.



-
- Die Entwicklung und Fertigung des Kabelbaumes wird zu einem späteren Zeitpunkt umgesetzt. Die dafür geplanten Personalstunden wurden im Vorhabens Zeitraum nicht benötigt.
 - Neue geplante Meilensteine zur Entwicklung der Long Life MEA für den Busbetrieb.



5 Wissenschaftlicher und technischer Status

Allgemeines:

Brennstoffzellen haben im Vergleich zu Verbrennungsmotoren und anderen Kraftwandlern einen überdurchschnittlich hohen Wirkungsgrad. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die chemische Energie des Brennstoffs direkt in elektrische Energie umgewandelt wird und nicht dem Carnot-Kreisprozess unterliegt.

Brennstoffzellenfahrzeuge eignen sich daher nicht nur wegen des überdurchschnittlichen Wirkungsgrades, sondern dank ihrer großen Reichweite und ihrer kurzen Betankungszeiten auch für Langstrecken, da sie den Fahrstrom mithilfe von Wasserstoff selbst an Bord erzeugen. Sie fahren lokal sauber und ohne schädliche Emissionen, denn Brennstoffzellen erzeugen aus der chemischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff Strom. Es entsteht lediglich reiner Wasserdampf als Reaktionsprodukt.

Zum Vorhaben:

Basis für das Vorhaben bildete das PKW PEM-BZ-System. Durch geeignete Betriebsweisen und Strategien für den Busbetrieb sollten Komponenten geschont und dadurch eine längere Betriebsdauer ermöglicht werden. Der Nachweis wurde mit einem Dauerläufer gestartet.

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Basis-Entwicklung des DC/DC-Wandler und deren Weiterentwicklung wurden von einer externen Firma durchgeführt. Des Weiteren wurden bei einem Lieferanten verschiedene Varianten einer leistungsfähigen Membranelektrodeneinheit beauftragt und diese für „CAT-CELL“-Messungen geliefert. Durch hauseigene Messungen und Analysen gelang es in Zusammenarbeit mit dem Lieferanten Verbesserungen bei der Lebensdauer zu erreichen.



7 Ergebnisse des Vorhabens

Im Berichtszeitraum vom 01.03.2015 bis 31.12.2016 wurden folgende Ergebnisse erreicht:

Analysieren und bewerten von technischen Konzepten der Tanksystemanlage und des Brennstoffzellensystems bei unterschiedlichen Bauraumgegebenheiten.

Erstellung einer technischen Spezifikation mit Beschreibung aller notwendigen Schnittstellen für die aktuellste Generation der Brennstoffzelle.

Durchführen einer Design for Six Sigma Studie für den Einsatz einer speziell für die Busanwendung entwickelten Elektroden-Membran-Einheit (MEA) mit dem Ziel die Lebensdauer des Stacks auf 25.000 Stunden zu erhöhen.

Aufbau und Inbetriebnahme eines High Voltage High Power Hardware in the loop Teststands (HV-HIL), sowie Integration der zu prüfenden HV Komponenten

Entwicklung der Modelle für das Gatewaysteuergerät (GCU) mit Ansteuerung der HV Komponenten sowie die Umsetzung der Modelle in ein Rapid Controls Prototyping (RCP) System für den Einsatz am HV-HIL. Entwicklung der Modelle der Bus-TCU sowie Umsetzung auf das RCP System am HV-HIL.

Erstellen von Testplänen und durchführen der geplanten Vorentwicklungstests am HV-HIL

Erstellung einer Komponentenspezifikation für die Weiterentwicklung des busspezifischen DC/DC Wandlers in galvanisch getrennter Ausführung bei einem Lieferanten

Weiterentwicklung des galvanisch getrennten DC/DC Wandler (GIC246) vom Musterstand A0 zu Musterstand A02 mit Einarbeitung der gewonnenen Erkenntnisse die im HV-HIL mit dem A0 Muster gemessen wurden.

Fertigstellung des im Vorhaben 03BV114A gestarteten Lebensdauertest, um die gewonnenen Erkenntnisse für das aktuelle Vorhaben zu verwerten.

Umbau des vorhandenen Busteststandes für den Einsatz der aktuellsten BZ-Generation.

Aufbau des BZ-Systems zu einem Laboraggregat und Integration in den dafür umgebauten Busteststand. Planung eines Dauerlauftests mit dem BZ-Laboraggregat und einem Einsatzprofil eines bus-spezifischen Range Extenders mit 30kW konstanten Betrieb.

Nachfolgend sind die Arbeitsinhalte der einzelnen Arbeitspakete aus AP 3 beschrieben.



AP 3.1 Projektmanagement:

Die Koordination der Aktivitäten in den Arbeitspaketen AP 3.2 bis AP 3.7 war eines der Schwerpunkte dieses Arbeitspakets. In wöchentlichen Projektsitzungen erfolgte die Ausrichtung und Abstimmung der Tätigkeiten der Arbeitspaketverantwortlichen mit der Projektleitung, um die Erreichung der technischen, terminlichen und finanziellen Vorhabenziele sicherzustellen.

Des Weiteren wurden alle relevanten Informationen kommuniziert und bereitgestellt. In mehreren Projektreviews wurde der Geschäftsleitung der jeweilige aktuelle Status des Projekts dargestellt und erläutert.

Berichterstattung, Änderungsantrag und Budgetüberwachung beinhalteten dieses Arbeitspaket und wurden durchgeführt.

AP 3.2 System Engineering:

Hier wurden unter anderem Spezifikationen, Konzeptvergleiche und Schnittstellenanbindungsdokumente erstellt, damit eine reibungslose Einbindung des BZ-Aggregats im Bus Bereich möglich ist. Dazu gehören des Weiteren die Bauraumbetrachtung sowie das Wassermanagement und das Kühlverhalten des BZ-Kühlkreislaufes.

Da für den Busbetrieb eine erhöhte Lebensdauer des Stacks erforderlich wurde, wurden die Stack Komponenten (Abbildung 4) untersucht.

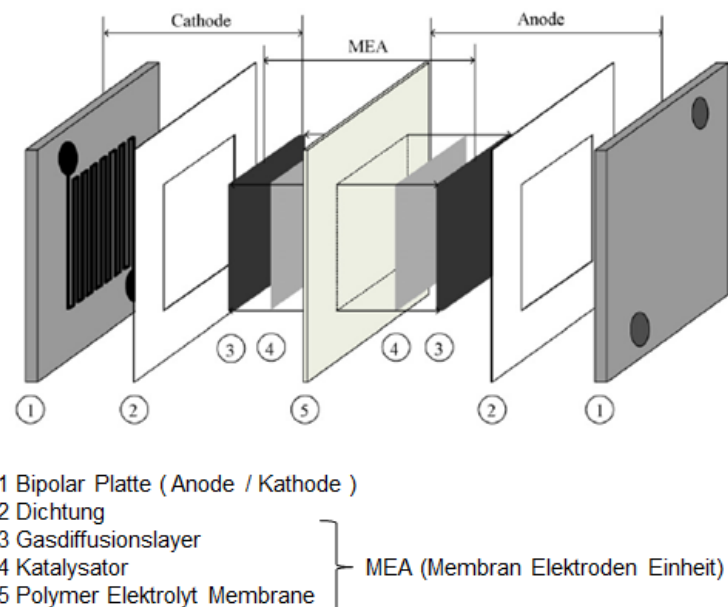


Abbildung 4 Aufbau BZ- Einzelzelle



Dazu wurde die DFSS Methode (Design for Six Sigma) angewendet. DFSS steht dabei für eine strukturierte Vorgehensweise zur systematischen Unterstützung der Entwicklungsarbeit im Laufe einer Produkt- und Prozessentwicklung. Ziel dieser Methode des Qualitätsmanagements ist es, robuste, d.h. möglichst fehlerfreie Produkte und Prozesse zu erzeugen. Zunächst wurden dazu, im ersten Schritt, zahlreiche Kriterien und Einflussgrößen in einem P-Diagramm festgelegt. Danach miteinander verglichen, und unter Berücksichtigung geltender Normen, Sicherheitsvorschriften und Erfahrungswerte, zueinander gewichtet und entsprechend ausgewertet.

Technische Bedeutung der Komponentenmerkmale der Brennstoffzelle

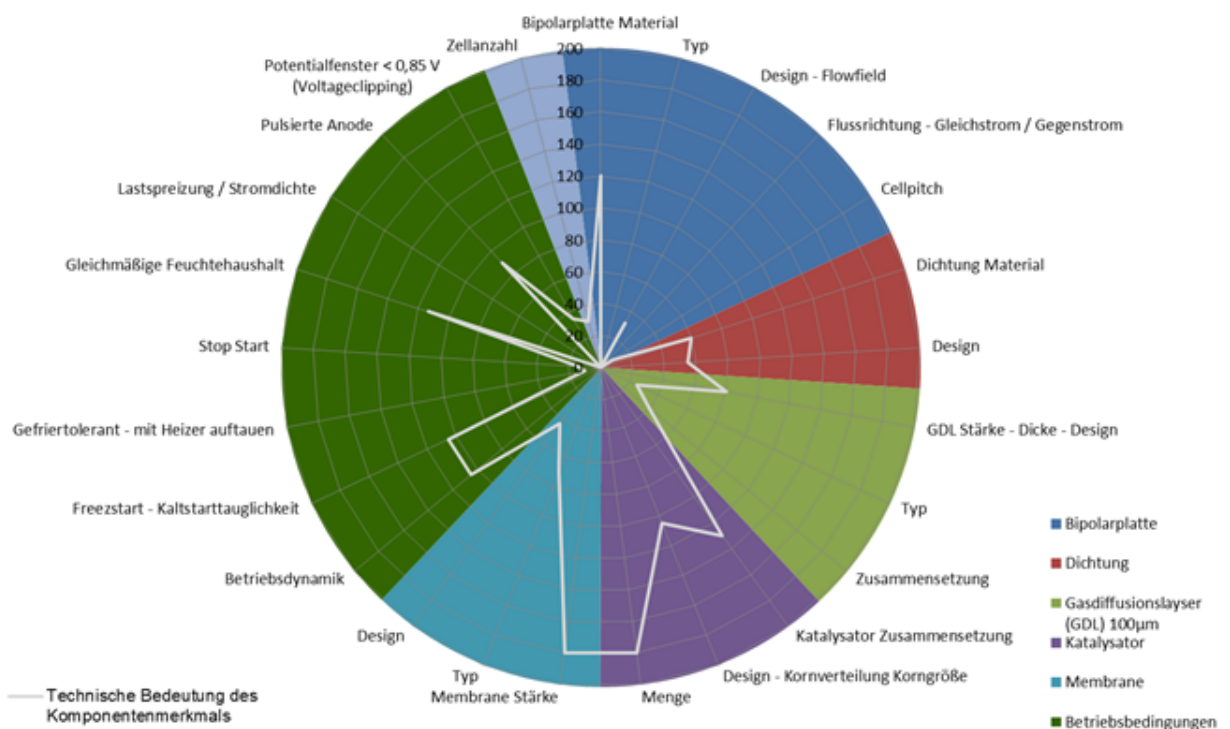


Abbildung 5 Spinnendiagramm

Teil dieser Auswertung ist das Spinnendiagramm. Es zeigt in einer übersichtlichen Darstellung die wesentlichen Einflussfaktoren, die für eine lange Betriebsdauer des BZ-Stacks verantwortlich sind.

Je weiter die weiße Linie vom Kreismittelpunkt entfernt ist desto größer ist der Einfluss jedes einzelnen Bauteiles bzw. jeder Komponente im Stack auf dessen störungsfreie Funktionsweise.

In diesem Fall sind es der Katalysatortyp, die Menge des Katalysators, die Stärke der Membran, sowie die Korrosionsfestigkeit der Bipolarplatte.



Weiterer Einflussfaktor für einen wartungsarmen Einsatz der Brennstoffzelle im Busbetrieb sind die Betriebsbedingungen und Betriebsweisen.

Eine gute Befeuchtung, homogene Medienverteilung im BZ-Stack, sowie eine Transienten arme Betriebsweise gepaart mit geringen Lastschwankungen sind unerlässliche Voraussetzungen, um das Stack Modul über lange Zeiträume zu betreiben.

Ebenso haben die Außentemperaturen einen maßgeblichen Anteil an der Langlebigkeit des BZ-Stacks. Jeder Gefrierstart wirkt sich auf das „Innenleben“ des BZ-Stacks aus.

Beim Busbetrieb besteht jedoch die Möglichkeit mit der Batterie das Gesamtsystem auf Betriebstemperatur zu bringen. Mit einer geeigneten Betriebsstrategie ist diese Herausforderung relativ einfach zu beherrschen.

Entwicklung einer langzeitauglichen Membranelektrodeneinheit

Für die Entwicklung einer langzeitauglichen Membranelektrodeneinheit, kurz als „Long Life MEA (LLMEA)“ bezeichnet, wurden mehrere Entwicklungspfade gleichzeitig begonnen. Zum einen wurden bereits am Markt käufliche MEAs erworben, in Testeinrichtungen geprüft und mit verschiedenen GDLs variiert. Zum anderen wurde hausintern ein geeigneter Aufbau (Materialstärke) und Katalysator-Zusammensetzung der MEA ermittelt. Die Ergebnisse wurden mittels sogenannten Core Automotive Test Cells (CAT-Cells) dann ausgewertet. Im Anschluss sollte nun der Aufbau von kleinen Stackeinheiten, sogenannten Short Stacks erfolgen. Das nachfolgende Bild zeigt einen Kennlinienvergleich verschiedener Messergebnisse der LLMEAs.

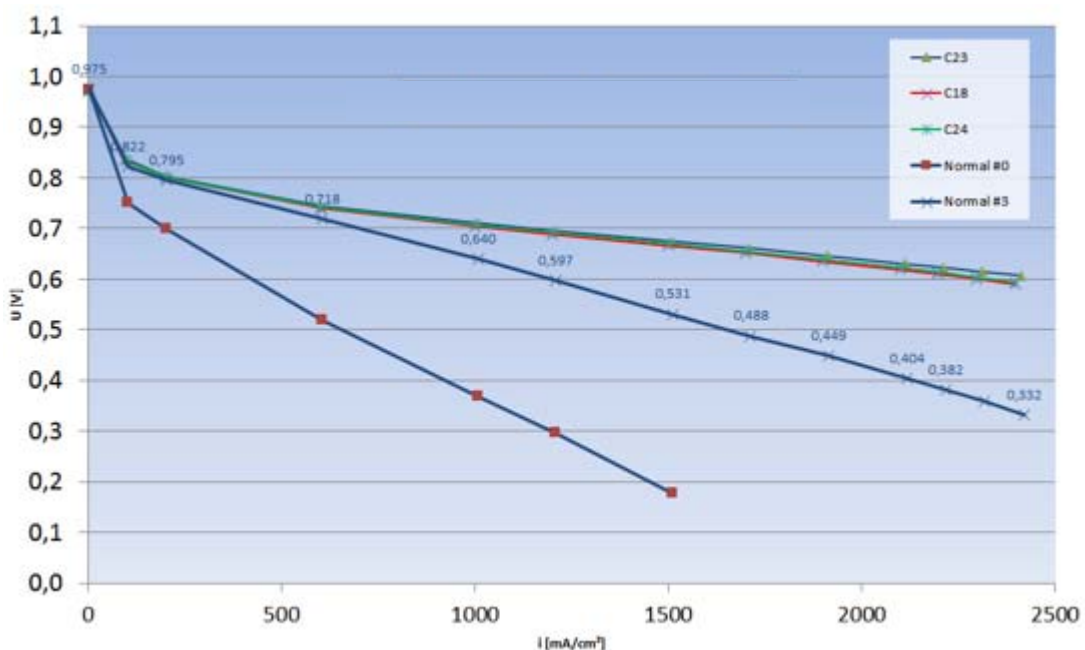


Abbildung 6 Kennlinienvergleich



Dabei zeigten die Kennlinien C23, C24 und C18 ähnliche Verhaltensweisen im Kinetik Bereich (geringe Stromlast). Im Vollastbetrieb zeigte C 23 die beste Verhaltensweise. Die beiden anderen Membranproben (Normal #0 und Normal #3) hatten trotz vergleichbarer Beladung deutliche Defizite bei der Katalysatornutzung und im ohmschen Bereich (mittlere Stromlast). So das diese beiden Konzepte nicht weiterverfolgt wurden.



AP 3.3 Packaging CAD Engineering:

a.) Laborpackaging

Um das BZ-System in einem Teststand betreiben zu können müssen die BZ-Systemkomponenten sowie die Messtechnik dazu in einen Labortragrahmen konstruiert werden.

Bei der Konstruktion des Trägerrahmens wurde eine gute Zugänglichkeit auf alle Komponenten am Brennstoffzellensystem berücksichtigt.

Der Trägerrahmen bietet neben der Aufnahme des Brennstoffzellensystems zusätzlich die Möglichkeit weitere Anbauteile, wie Sensoren oder Zu- und Ableitungen anzubringen.

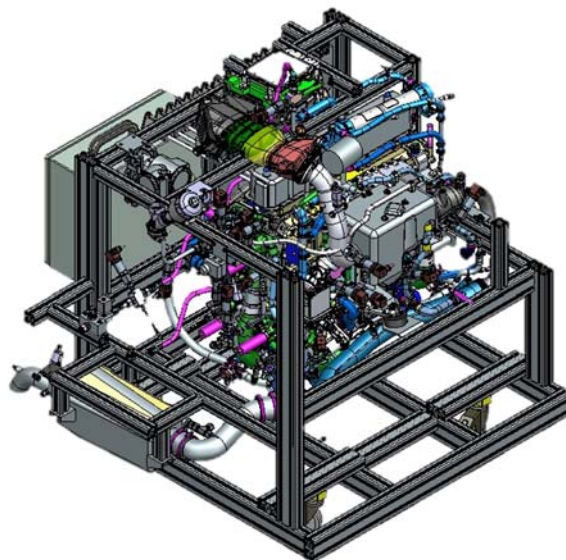


Abbildung 7 Zusammenbau Laborsystem

Die aufgenommenen Daten der Laborsensoren liefern weitere Kenntnisse über das Betriebsverhalten in verschiedenen Betriebssituationen (Altitude, Temperaturen,...). Ziel ist es die entsprechenden Betriebsparameter zu ermitteln, um eine lange Betriebsdauer des BZ- Systems zu ermöglichen.



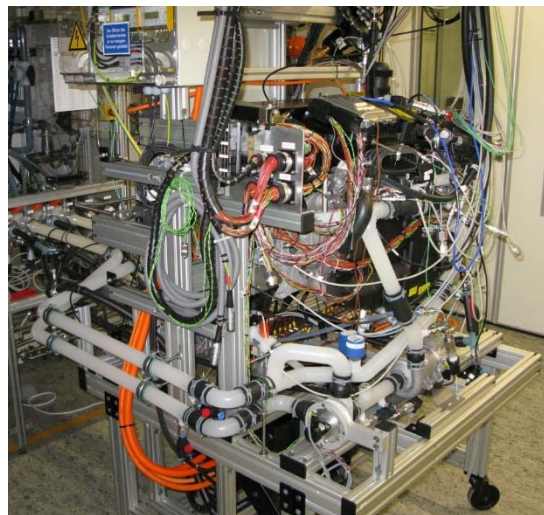


Abbildung 8 Gesamtsystem mit Teststandssensorik

Abbildung 8 zeigt das eingebaute Gesamtsystem im Teststand inklusive der zusätzlichen Laborsensorik.

b.) Fahrzeugpackaging

Der ursprünglich im Bus vorgesehene Bauraum für das BZ- System, im sogenannten „Motorturm“ wurde im Laufe der Projektierungsphase geändert. Die verschiedenen elektrischen Antriebskonzepte (BZ-Bus, reiner Batteriebus) im Bus sollten einen gemeinsamen und damit kostengünstigen Rohbau erhalten. Das bedeutete, dass der rein elektrisch betriebene Batteriebus den gleichen Rohbauaufbau erhalten sollte, wie der Brennstoffzellenbus. Da im Batteriebus der Motorraum (Motorturm) vollständig mit Hochvolt Aggregaten versehen ist, wurde der neue Bauraum für das Brennstoffzellensystem auf das Dach verlegt. Damit mussten neue Vorgaben und Abmessungen eingehalten werden, um die Gesamthöhe des Busses nicht zu überschreiten (siehe Abbildung 9).

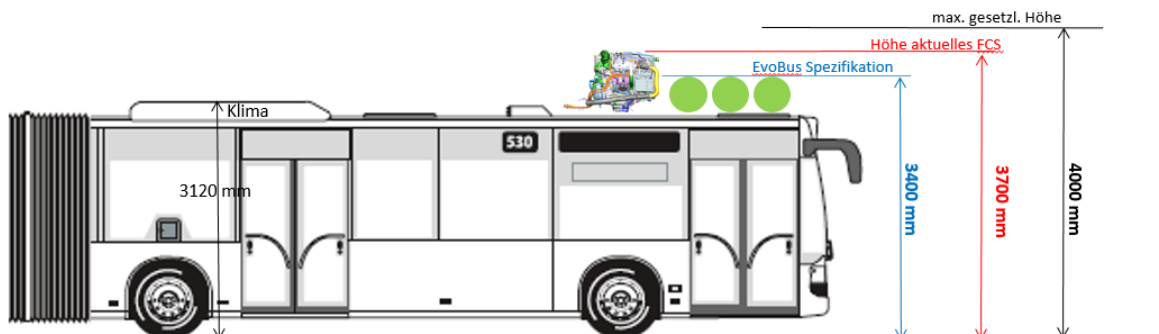


Abbildung 9 Packagingvorgaben



Aus der bisherigen Bauhöhe des Brennstoffzellensystems von ca. 80 cm musste eine flachere Anordnung der einzelnen BZ-Komponenten gefunden werden, was nur durch ein komplettes Re-Packaging zu erreichen war, anderenfalls würde das System ca. 40 cm ins Dach eintauchen (siehe nachfolgende Abbildung).

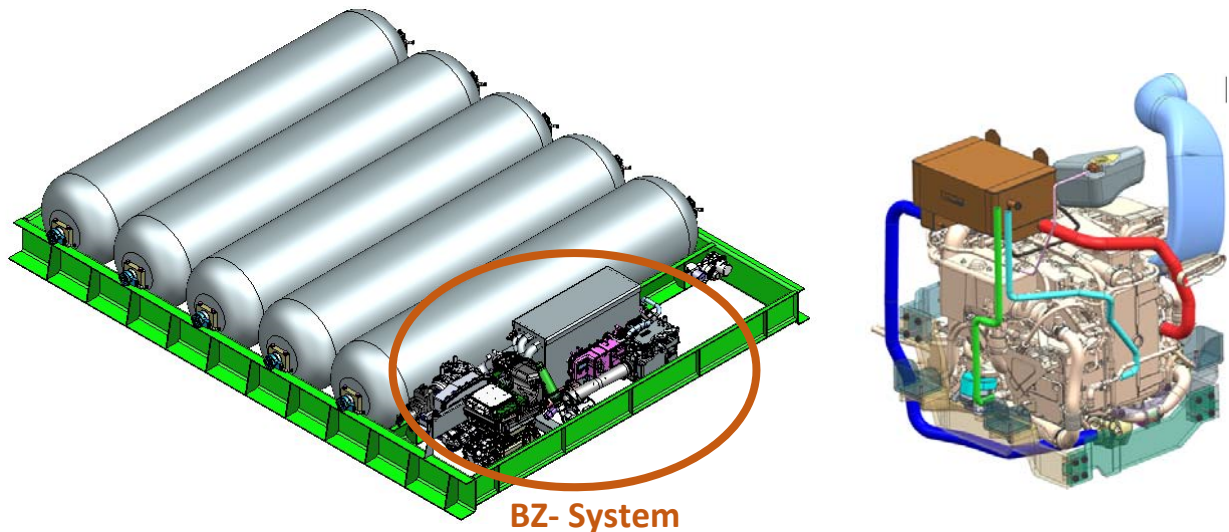


Abbildung 10 Tankanlage mit geänderten BZ-Packaging (links) vs. Motorraum Packaging (rechts)

Darüber hinaus sollte aus dem reinen BZ-System mit 80 kW ein Range Extender (Batterieladegerät) mit ca. 30 kW in Kombination mit einer großen Batterie werden. Damit war das bisher für den PKW entwickelte BZ-System – hinsichtlich Leistung und den damit einhergehenden Kosten - überdimensioniert. Ein Re-engineering wurde dadurch notwendig.

Schließlich war auch die spezifizierte Betriebsdauer für Busanwendungen und die ebenfalls damit einhergehenden Kosten für den Tausch von Komponenten ein Parameter, der verbessert wurde (Lebensdauer: hoch, Kosten: runter).

Die von Nucellsys GmbH entwickelte Tankanlage für die Busanwendung wird mit dem neuen Packaging des Brennstoffzellensystems als eine Einheit für die Aufdachlösung Evobus unterbreitet.

Abbildung 10 zeigt den aktuellen Entwicklungsstand zum Projektende 12/2016 für das Aufdach Design.



AP 3.4 Komponentenentwicklung:

GIC –Wandler (Galvanic Isolated Converter)

Der Aufbau und die Funktionsweise (Topologie) des galvanisch getrennten Wandlers ermöglichen einen kontinuierlichen Energietransfer über die elektromagnetische Entkopplung beider HV-Kreise 1 und 2 (siehe nachfolgende Abbildung) und haben zusätzlich eine dämpfende Wirkung auf hochfrequente Störungen (Schwingungen). Dadurch wurde eine möglichst optimale schwingungsarme, hochdynamische Leistungsübertragung (Energie Transport) durch den Wandler ermöglicht.

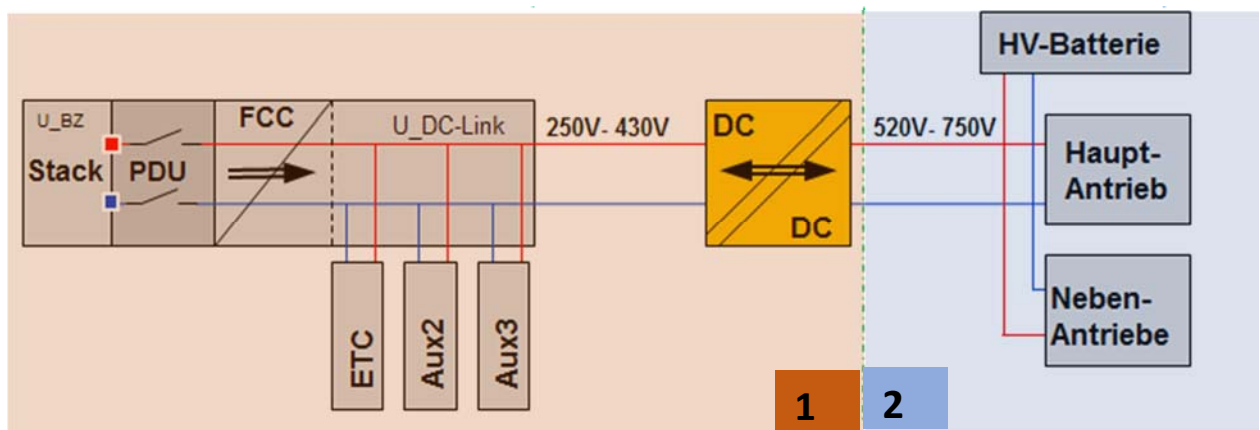


Abbildung 11 HV-Topologie für den Bus

Für die Entwicklung des GIC wurden entsprechende Konzeptanalysen und Spezifikationen in mehreren Iterationsschritten erstellt. Dazu gehörte neben der Durchführung von zahlreichen Review Terminen, ebenso die Prüfung und Bewertung der Entwicklungsdokumente.

Um die vorgegebenen Kostenziele zu erreichen wurden sogenannte Design to Cost Workshops mit Lieferanten durchgeführt und Kostenanalysen erstellt.

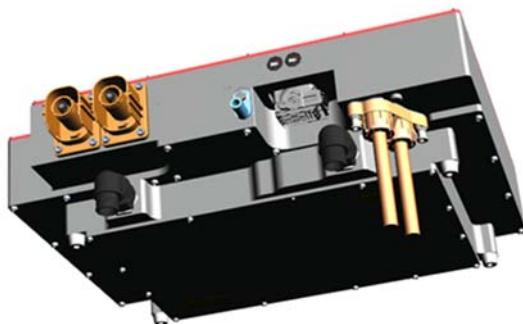


Abbildung 12 GIC 246 A02 Muster

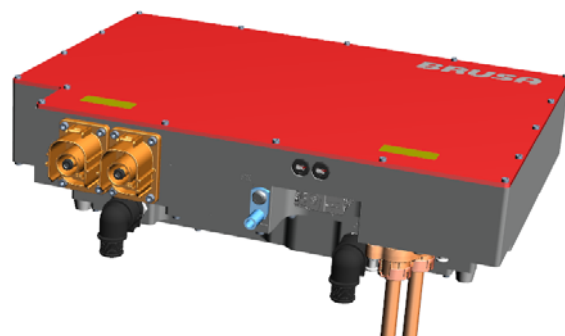


Abbildung 13 Draufsicht



Zur Test Vorbereitung für den HIL Prüfstand, der im nachfolgenden Kapitel beschrieben ist, wurden die elektronischen Schnittstellen und Funktionen bewertet und dazu zahlreiche Testsequenzen für den Testbetrieb vorbereitet.

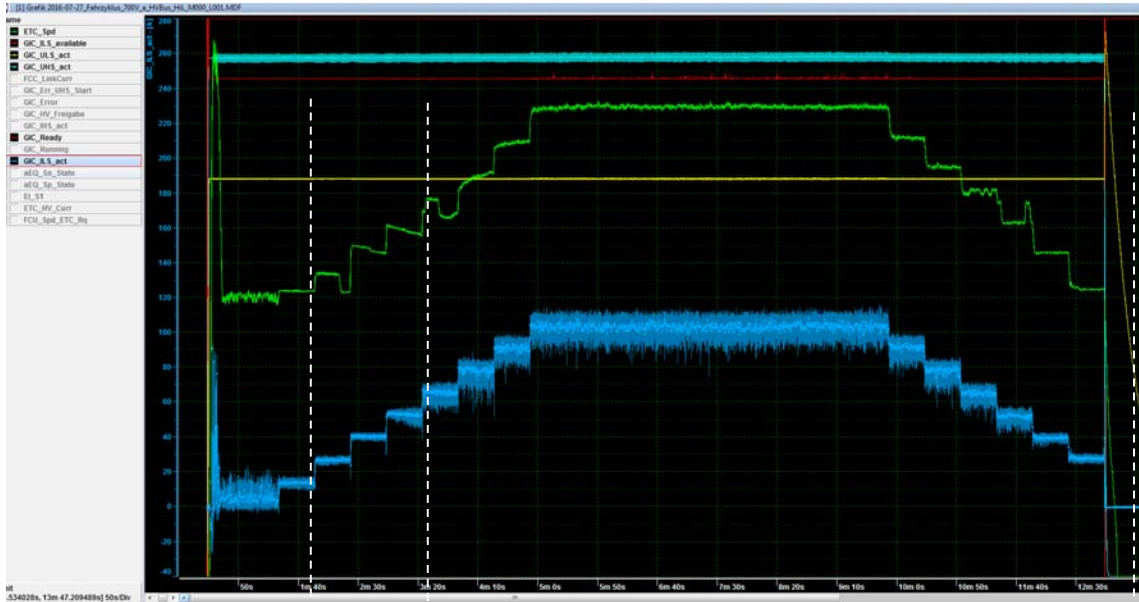


Abbildung 14 Lastphasen und deren Schwingungsverhalten

In der Abbildung 14 zeigten sich bei dynamischen Leistungsänderungen der Hilfsantriebe Über- bzw. Unterschwinger, aufgrund veränderter Lastanforderungen an das Gesamtsystem. Im Verlauf der Entwicklung konnten diese durch Optimierungen von Parametern und SW Anpassungen beseitigt werden (Abbildung unten).

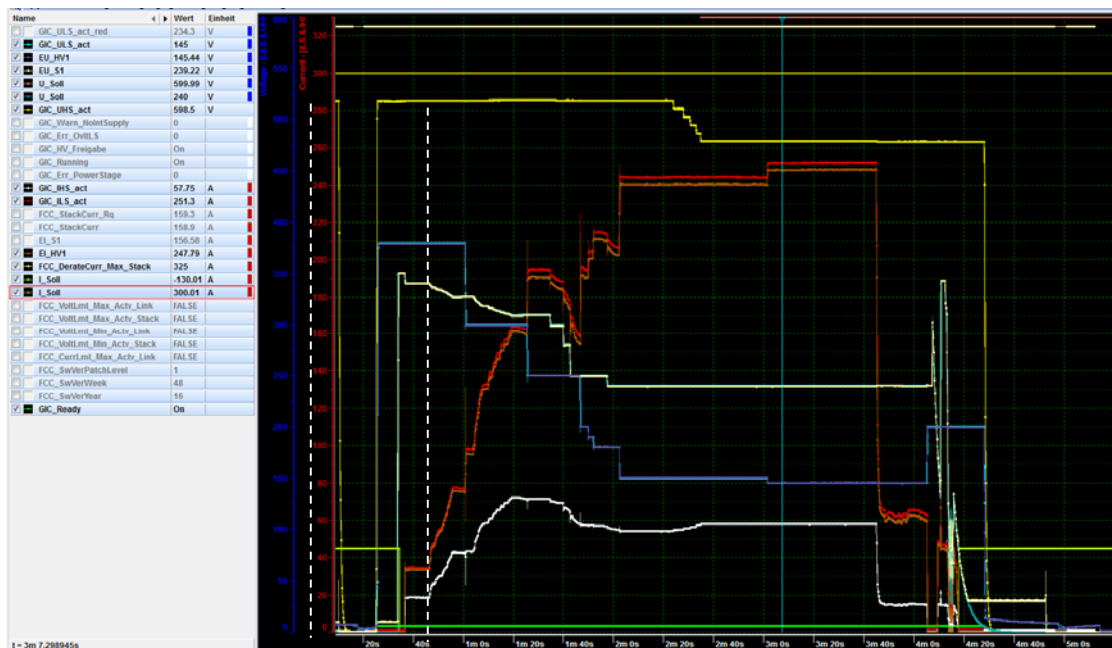


Abbildung 15 Lastsprünge und an der unteren Spannungsgrenze



Das Testprogramm selbst bestand aus einer Vielzahl von Tests welches nachfolgend auszugswise dargestellt wird (siehe nachfolgende Abbildung).

Test part: I) @DC Link Spannung = 380 V (GIC LowSide),

Action:
 10 x SU – NO (mit Lastvariation a) – SD
 10 x SU – NO (mit Lastvariante b) – SD
 10 x SU – NO (mit Lastvariante c) – SD
 10 x SU – NO (mit Lastvariante d) – SD

Bitte Manual für S01 des GIC beachten! Und Excel Sheet: Technische-Eigenschaften_GIC246A-01_SM01_Validierung berücksichtigen.

Alles Aufzeichnen incl. des GIC Diag CAN und die **KwT Grenze für Vorlauf 35°C** beachten der Rücklauf darf gerne bis 50°C steigen.
P. Max 70 kW beachten, Kw Flussrate mit aufzeichnen soll 15l/min.

@DC Link Spannung = 380 V (GIC LowSide), Stromobergrenzen beachten I_{HS max} = +140A, I_{LS max} = +280:

Lastvariation (Netto am GIC (HighSide) Ausgang bei 700 V):

- 1kW @ 30s, 5kW@30s, 10kW@30s, 15kW@30s, 20kW@30s, 25kW@30s, 30kW@30s, 35kW@30s, 40kW@5min, umgekehrt wieder runter auf 1kW
- 1kW Rampe mit 1kW/s bis 40kW, halten für 5 min umgekehrt wieder runter auf 1kW
- 1kW @ 1min, 20kW@1min, 40kW@1min, umgekehrt wieder runter auf 1kW
- 1kW @ 1min, 40kW@1min, umgekehrt wieder runter auf 1kW

Lastvariation (Netto am GIC Ausgang bei 600 V):

- 1kW @ 30s, 5kW@30s, 10kW@30s, 15kW@30s, 20kW@30s, 25kW@30s, 30kW@30s, 35kW@30s, 40kW@5min, umgekehrt wieder runter auf 1kW
- 1kW Rampe mit 1kW/s bis 40kW, halten für 5 min umgekehrt wieder runter auf 1kW
- 1kW @ 1min, 20kW@1min, 40kW@1min, umgekehrt wieder runter auf 1kW
- 1kW @ 1min, 40kW@5min, umgekehrt wieder runter auf 1kW

Abbildung 16 Auszug aus der Testspezifikation

Zusammenfassend waren die Testergebnisse positiv zu bewerten, ebenso, dass der entwickelte GIC 246 von Beginn an, ohne Optimierungen, seine grundlegende Funktion erfolgreich unter Beweis stellte.



GCU Steuergerät

Bei der GCU handelt es sich um ein Gateway Steuergerät. Aufgabe der GCU ist die Schnittstellenanbindung des BZ-Systems an den Antriebsstrang des Busses. Gleichzeitig soll neben der Lastanforderung vom Bus an das BZ-System auch eine Diagnosemöglichkeit des BZ-System ausführbar sein.

Ziel war es sowohl eine Basis-Software inklusive der CAN- Gateway Funktionen als auch die zugehörige Hardware geliefert zu bekommen.

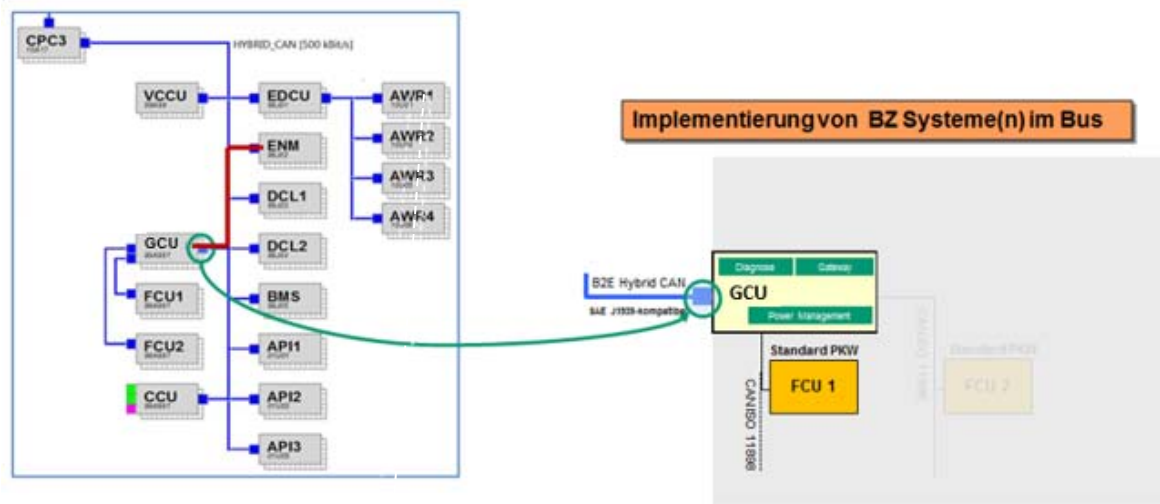


Abbildung 17 Einbindung BZ System in den Antriebsstrang

Der Gesamtumfang setzte sich wie folgt zusammen:

- Konfiguration und Integration der Standard Software-Komponenten
- Entwicklung und Integration der kundenspezifischen Software-Komponenten zur Umsetzung der CAN-Gateway Funktion und ggf. einer Simulation, die die Schnittstellen mit der Kundenapplikation abdeckt.

Für die Umsetzung wurden verschiedene Hersteller angefragt, die entweder bereits Steuergeräte im Portfolio hatten, die eingesetzt werden konnten, oder welche die noch entwickelt werden mussten.

Nach Bewertung der Angebote mit den Lieferanten wurde eine Firma ausgewählt.

Dieser Lieferant konnte eine Basis-Software liefern, die Hardware-unabhängig war. Dadurch wurden alle Optionen für eine potentielle Serienvergabe offen gehalten. Zusätzlich gab es Synergien bzgl. der Software-Toolkette zu bestehenden und zukünftigen Projekten. Dazu hatte die Firma das technische Know-How, die Anforderungen innerhalb des angespannten Zeitrahmens umzusetzen zu können.



Eine erste Softwarelieferung erfolgte im Dezember. Die dazugehörige NCS-Teststands-Software wurde bereits im Labor erfolgreich entwickelt.

TCU (Tank Control Unit)

In zahlreichen Workshops wurden verschiedene Tankkonzepte mit unterschiedlichen Voraussetzungen erarbeitet.

Dabei wurde das BZ-System sowohl als Einzelsystem als auch als Dualsystem und unterschiedlicher Anzahl an Tankbehältern betrachtet und bewertet und für eine Entscheidung durch den OEM vorbereitet.

Diese Entscheidung des OEM wurde noch nicht getroffen, da dieser noch in der Findungsphase ist. Abhängig von diesem Ergebnis wird dann eine entsprechende Umsetzung erfolgen.

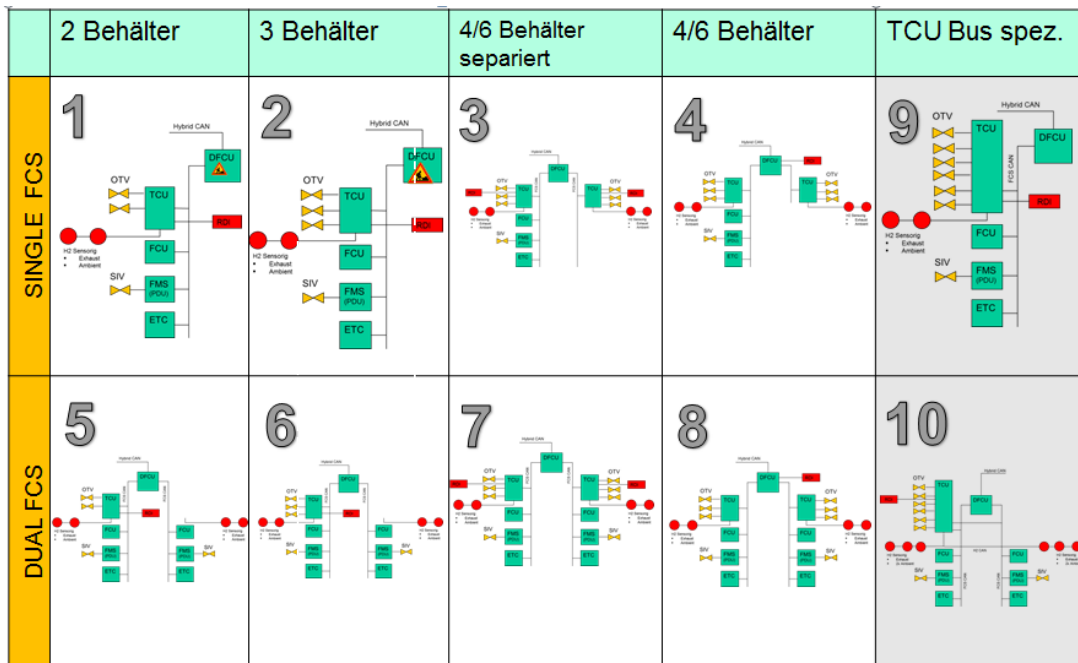


Abbildung 18 TCU Konzeptauswahl



AP 3.5 Software-Entwicklung:

Bei der Software-Entwicklung wurden die busspezifischen Entwicklungsumfänge für das Tank- und Gate Way-Steuergerät entwickelt und verifiziert. Dazu wurde die benötigte Testumgebung (Hardware) geplant und aufgebaut. Ein sogenanntes Rapid Control System ermöglicht es Software Änderungen und Parametersätze als Experimentalsoftware zu testen.

Um den Antriebsstrang fahrzeugnah zu testen, wurde zusätzlich ein HV-HIL (Hardware in the Loop) Teststand mit 80 kW aufgebaut und in Betrieb genommen.

Nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau der Testeinrichtung:

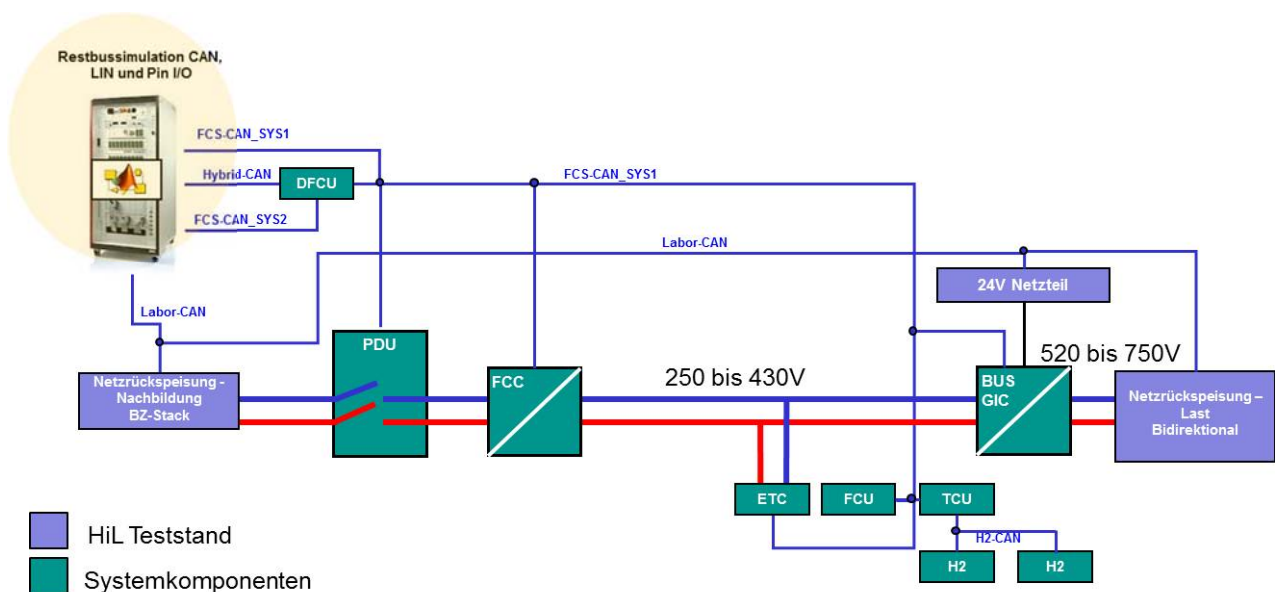


Abbildung 19 HV- und Steuergeräte-Topologie des HiL Teststandes

Das Grundkonzept für die Bus Anwendung war, das Brennstoffzellensystem aus dem PKW Programm weitestgehend für die Bus Anwendung zu übernehmen. Das Spannungsniveau im Busbetrieb war jedoch nicht dasselbe, wie das beim PKW. Einzig großer Unterschied ist Bus die Spannungslage für den-Elektroantrieb. Dieser liegt beim Bus zwischen 520 bis 750V, das PKW Spannungsniveau nach dem FCC Wandler (Fuel Cell Converter) liegt zwischen 250 und 430V DC.

Um das vom Bus geforderte Spannungsniveau zu erreichen und die gegebenen Sicherheitsvorschriften einzuhalten musste ein galvanisch getrennter DC/DC Wandler zwischengeschaltet werden. Dieser ist in der Abbildung 20 als Bus GIC (Galvanisch Isolated Converter) gekennzeichnet. Die Reihenschaltung der beiden Wandler (FCC & GIC) kann, bereits im vorigen Kapitel erwähnt, zu gegenseitigen Beeinflussungen führen. Diese Wechselwirkungen zeigten



sich zunächst in Form von Schwingungen im Stromkreis, die dann durch Parameter –und Softwareanpassungen gelöst wurden.

Im Teststandsaufbau wurden sowohl die Brennstoffzelle, als auch der elektrische Antrieb durch je eine NetZRückspeisung ersetzt, die dann als Strom-/Spannungsquelle bzw. Strom-/Spannungssenke genutzt werden.

Abbildung 20 zeigt den fertiggestellten Teststand.

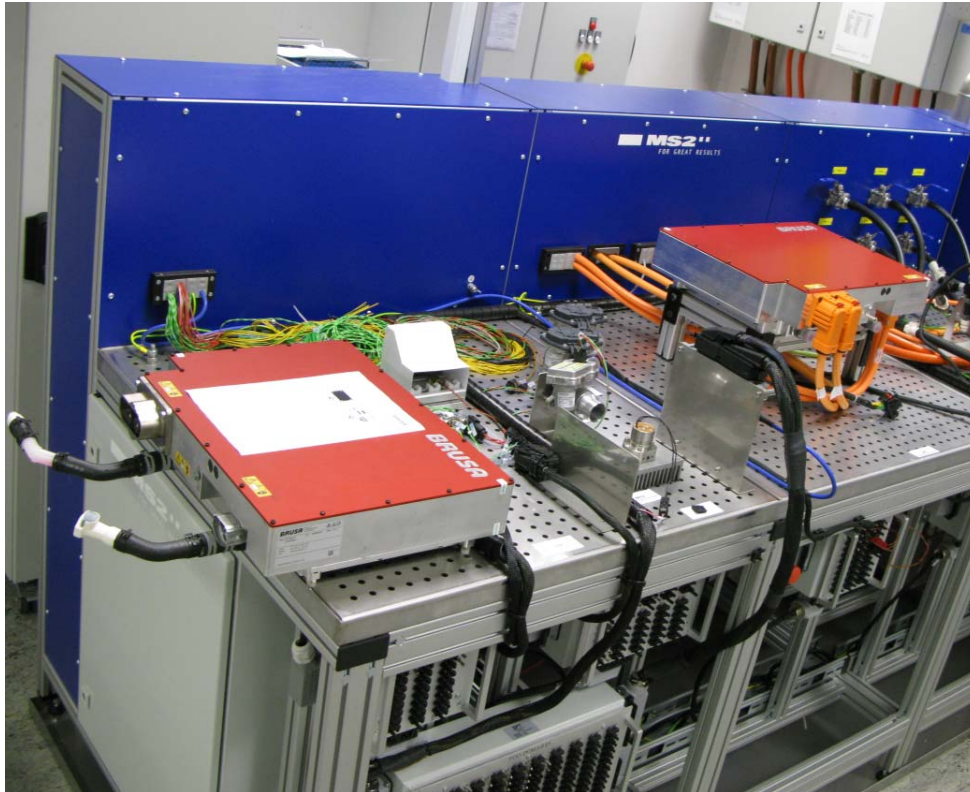


Abbildung 20 GIC246-A01 Muster (links) und weiterentwickeltes GIC246-A02 (rechts)

Vor Inbetriebnahme der Testanlage mussten zahlreiche Vorarbeiten durchgeführt werden. Zunächst wurde die Kommunikationsschnittstellen des MatLab-Modell des Gateway-Steuergerätes an die Simulationsumgebung des Teststandes angepasst. Dazu wurde eine Automatisierung entwickelt, was es ermöglichte, die sich häufig ändernde Kommunikationsinhalte komfortabel und schnell zu aktualisieren.

Zusätzlich wurden für den Prüfstand zahlreiche Dokumentationen inklusive Teststandbeschreibung [1], Instandhaltung und Wartung, Schaltplan und Risikobeurteilung [2] und das Abnahmeprotokoll [3] erstellt bzw. durchlaufen.

Zur Steuerung des Teststandes wurde eine Spezialsoftware (GUI graphical user interface) eingesetzt und eine bedienungsfreundliche grafische Benutzeroberfläche entwickelt.



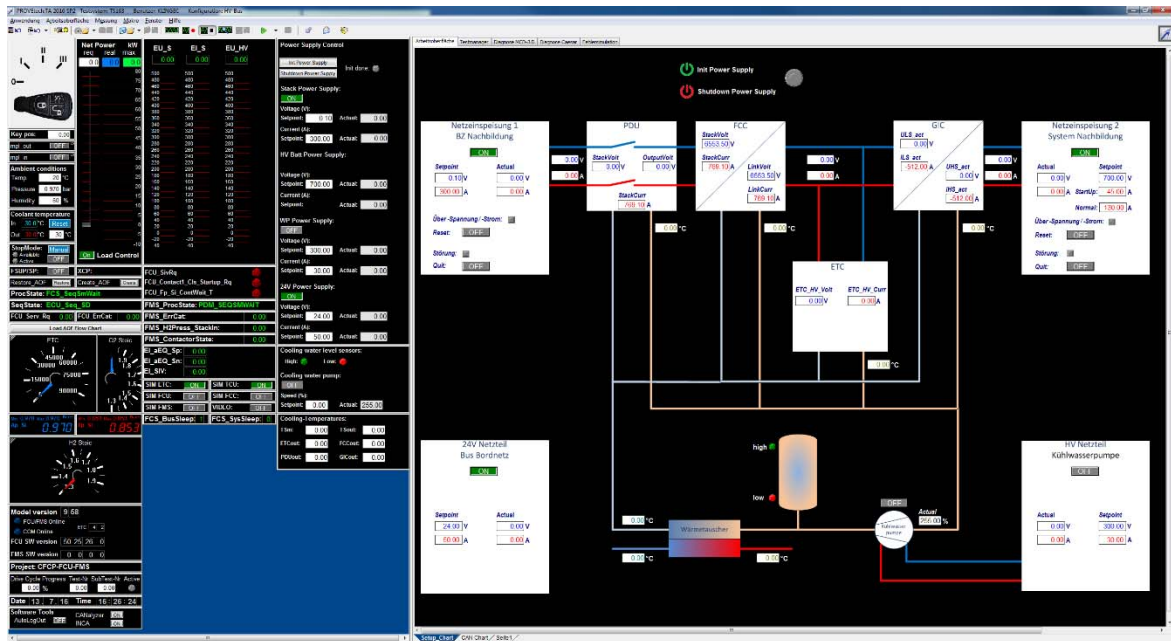


Abbildung 21 GUI – Teststands-Arbeitsoberfläche

Bei der Netzurückspeisung wurden sowohl Konfigurationsänderungen bei der Hardware, als auch bei der Softwareansteuerung des Simulators durchgeführt, um das erforderliche Spannungslevel von bis zu 800 V zu erreichen.

Für das GIC-Testprogramm wurden Fahrzyklen nachgebildet und ein Betriebsführungskonzept gefertigt, das unter anderem das Vorladen und Entladen enthält.

Des Weiteren wurden die entsprechenden Lastenhefte erstellt und in einer Datenbank eingepflegt. Dazu wurde die aus dem PKW-Program vorhanden Lastenheftstruktur adaptiert. Diese besteht aus zwei übergeordneten Systemlastenhefte für das Tanksystem (Tank-SLH) und für das Brennstoffzellensystem (FCS-SLH), aus diesen wiederum die Komponentenlastenhefte für die Komponenten der beiden Systeme generiert wurden. Für die Softwareentwicklung relevant sind die Software-Komponentenlastenhefte, in der Abbildung 22 als „FCU-SW-KLH“ dargestellt ist. Alle dort beschriebenen Anforderungen sind in der Datenbank mit dem übergeordneten Systemanforderungen (Tank SLH und FCS SLH) verlinkt. Da die meisten Anforderungen an die FCU auch im Bus bestehen bleiben, wurden die bestehenden Anforderungen lediglich ergänzt. Ist die Anforderung auch für die Bus FCU relevant wurde diese entsprechend gekennzeichnet. Waren Änderungen oder Ergänzungen erforderlich, wurden diese aus dem übergeordneten Bus-SLH (Systemlastenheft) abgeleitet. Für das Bus-spezifische Lastenheft der GCU (GCU-KLH) ergaben sich alle Anforderungen ausschließlich aus dem übergeordneten Bus-SLH.



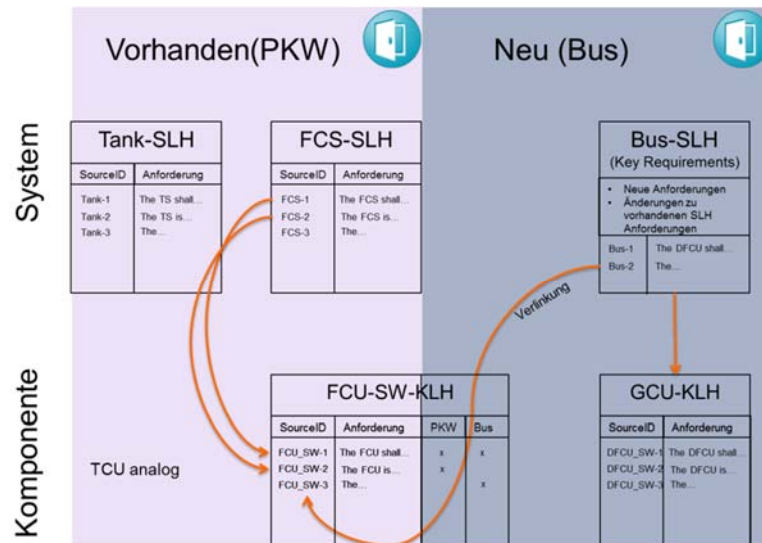


Abbildung 22 Lastenheftentwicklung

Aufgabe der GCU war es, das CFCEP PKW-BZ-System für darüber hinausgehende Anwendungen verfügbar zu machen. Hierzu wurde das Steuergerät, die GCU, als zentrale Ansteuerungseinheit eingesetzt.

GCU hat die grundlegenden Aufgaben:

- Ansteuerung des PKW-BZ-Systems
- Ansteuerung des GIC, um die erzeugte elektrische Energie auf Bus-HV- Spannungsniveau bereit zu stellen.
- die Möglichkeit zur Diagnose

Im RCP-Modell wurden die Schnittstellenverbindungen des BZ-Steuergerätes mit der GCU und dem Steuergerät des Busses abgebildet.

In dem Softwaremodul „GCU-Zustandsautomat“ wurde das „BZ-System“ entsprechend dem Lastanforderungsprofil betrieben. Ebenso erfolgte in diesem Modul die gezielte Abschaltung des „BZ-Systems“.

Im Softwaremodul „GIC-Controls“ wurde die Ansteuerung des GIC-Wandlers realisiert. Dieses umfasste zum einen das Setzen der Strom- und Spannungsgrenzen, sowohl auf der Brennstoffzellensystem- als auch auf der Fahrzeugseite. Abhängig vom Betriebszustand des GIC-Wandlers (Temperaturgrenzen beachten!) wurden diese Grenzwerte durch einen entsprechen



Algorithmus automatisch (sogenanntes Derating) angepasst. Beim Derating wurden die maximal möglichen Strom- und Spannungsgrenzen automatisch herabgesetzt. Des Weiteren wurden in diesem Modul die Aktivierung, die HV-Freigabe und der Sollwert des Wandlers zum Fahrzeug realisiert. Zusätzlich ist die Überwachung des jeweiligen Betriebszustands gesichert.

Das Softwaremodul „FCC-Controls“ steuert den Betrieb des FCC (Fuel Cell Converters). Genauso wie im Softwaremodul „GIC-Controls“ beinhaltet dieses Modul auch die Ansteuerung der HV-Strom- und HV-Spannungsgrenzen. Zusätzlich wurden neben der FCC-Aktivierung selbst auch noch die PKW-spezifischen Sicherheitsmechanismen (Not-Aus usw.) eingebunden. Als Sollwert des FCC-Wandlers dienten die ausgangsseitigen Spannungsgrenzen (HV-Zwischenkreis zwischen FCC und GIC). Eine Softwareregelung sorgt dafür, dass die entnommene elektrische Leistung vom GIC-Wandler aus dem Zwischenkreis durch den FCC-Wandler über die Brennstoffzelle angefordert und übertragen wird.

AP 3.6 Produktionsvorplanung

Das AP3.6 für die Produktionsvorplanung ist nicht Bestandteil des Vorhabens



AP 3.7 Entwicklungstest und Validierung

Zunächst wurde der im Vorgängervorhaben (03BV114A) gestarteter Dauerlaufversuch weitergeführt. Dazu wurden Testphasen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen definiert. Nach einer definierten Laufzeit wurde das Degradationsverhalten analysiert um Rückschlüsse der umgesetzten Maßnahmen zu erhalten. Dazu wurden Rahmenbedingungen für die BZ- Systeme definiert.

- Spannungsbegrenzung (Voltage Clipping):
Die maximale Zellspannung wurde von 1,1 V auf 0,825 V reduziert. Dies wurde durch eine Strom/-Spannungs-Regelung erreicht, indem ein äquivalenter Mindeststrom dem Brennstoffzellenstack entnommen wird.
- Anodendruck während des Abschaltvorgangs (Shut-down):
Der Anodendruck nach dem Abschaltvorgang wurde von 1,45 bara auf 2,1 bara erhöht, um die H₂-Schutzzeit (Protection Time) zu erhöhen.
- Anpassung der Trocknungszeit in der Anode während des Abschaltvorgangs (Shut-down):
Der Software Parameter der die Länge der Trocknungszeit der Anode bestimmt, wurde von 140 Sekunden auf 20 Sekunden reduziert.
- Anpassung des Befeuchterbypass-Kennfeldes:
Lastpunkte ab 200 A wurden stärker befeuchtet. Dies wurde dadurch realisiert, dass die Befeuchterbypass-Klappe um 5% weiter geschlossen wurde.
- Anpassung des Purgekennfeldes:
Für die Lastbereiche von 0 A bis 210 A wurde die „Purgerate“ erhöht, um die H₂-Konzentration in dem unteren Lastbereich zu erhöhen.
- Anpassung des Kennfeldes der Luftstoichiometrie:
Für BZ-Kühlwassertemperaturen unterhalb von 60°C und für Lastbereiche von 0 bis 18 A wurde der Parameter für die Luftstoichiometrie um den Faktor 1,5 erhöht. Für die Lastbereiche zwischen 30 A und 150 A wurde der Parameter dagegen nur um ein 0,35-faches angehoben.
- Anpassung der Drehzahl des Wasserstoffrezirkulationsgebläses:
Die Drehzahl des Wasserstoffrezirkulationsgebläses wurde für den 60 A Lastpunkt von 12.000 U/min. auf 13.000 U/min. erhöht, um in diesem Betriebspunkt die Wasserstoffkonzentration zu erhöhen.



Der ausführliche Testablauf wurde in der VESPA-Datenbank unter Versuch 0934a abgelegt und im Versuchsbericht [5] dokumentiert.

Die nachfolgende Übersicht zeigt den Versuchsverlauf der beiden BZ-Systeme:

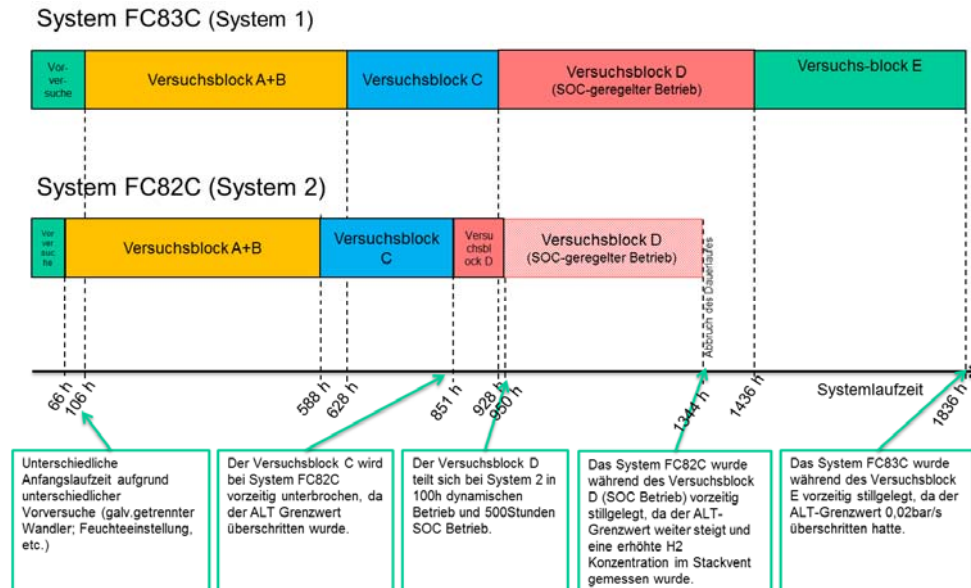


Abbildung 23 Testablauf

Ergebnis:

Beide Systeme konnten über einen Zeitraum von 1.344 h bzw. 1.836 h unter verschiedenen Betriebsweisen getestet werden. Diese Laufzeiten waren durch die Reife des zur Verfügung stehenden Musterstands bestimmt. Nach genannten Betriebsstunden zeigten sich erste mechanische Undichtigkeiten, die letztendlich zur Überschreitung der zulässigen Grenzwerte führten. Somit kam der Langzeitversuchs des Vorgängerprojektes 03BV114A zum Abschluss. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Parametervariationen [5] waren die unerlässliche Grundlage für weiterführende Tests bzw. die Aktualisierung der Betriebsstrategie.

Es folgte ein vollständiger Umbau der Testumgebung zugunsten des aktuellen Musterstands bzw. Gegenstand dieses Vorhabens.

Dazu wurde die Teststandsoftware in LabVIEW für den Betrieb des neuen BZ-Systems erstellt sowie die CAN-Topologie und das elektrische Schaltbild für den Prüfstand festgelegt.



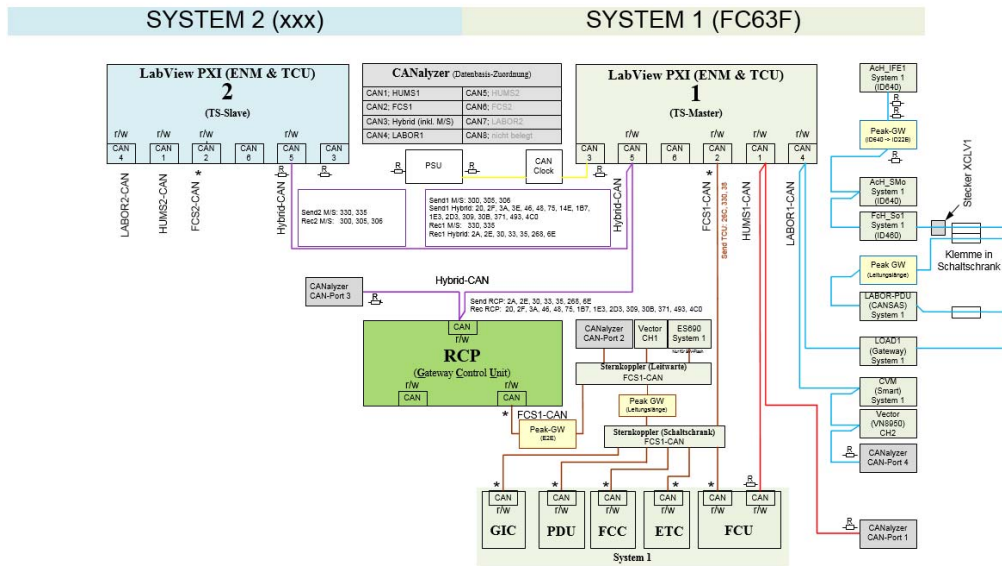


Abbildung 24 CAN-Topologie (Teststand #146)

Mit den neuen Anforderungen an das BZ System wurden elektrische, mechanische und verfahrenstechnische Anpassungen vorgenommen.

Die Medienversorgung (Kühlung, H₂, Luft) wurde vollständig demontiert und gemäß dem folgenden Fließbild neu aufgebaut (siehe folgende Abbildung).



Abbildung 25 Umbauphasen der Medienversorgung (Original, Rückbau, Neuaufbau)



Des Weiteren wurden die Hochspannungs- und ein Niederspannungsschaltschrank umgerüstet.

Nach dem Umbau hatten die Schaltschränke folgenden Aufbau ebenfalls für ein System:



Abbildung 26 Hochvolt- und Niederspannungsschaltschrank (rechts) nach Umbau

Das Gesamtsystem wurde dann im Teststand integriert und die notwendigen Sicherheitsprüfungen durchgeführt. Danach konnte mit dem Dauerlauf begonnen werden.



Abbildung 27 BZ System im Teststand integriert



Für den Dauerlauf wurde ein Zyklus festgelegt.

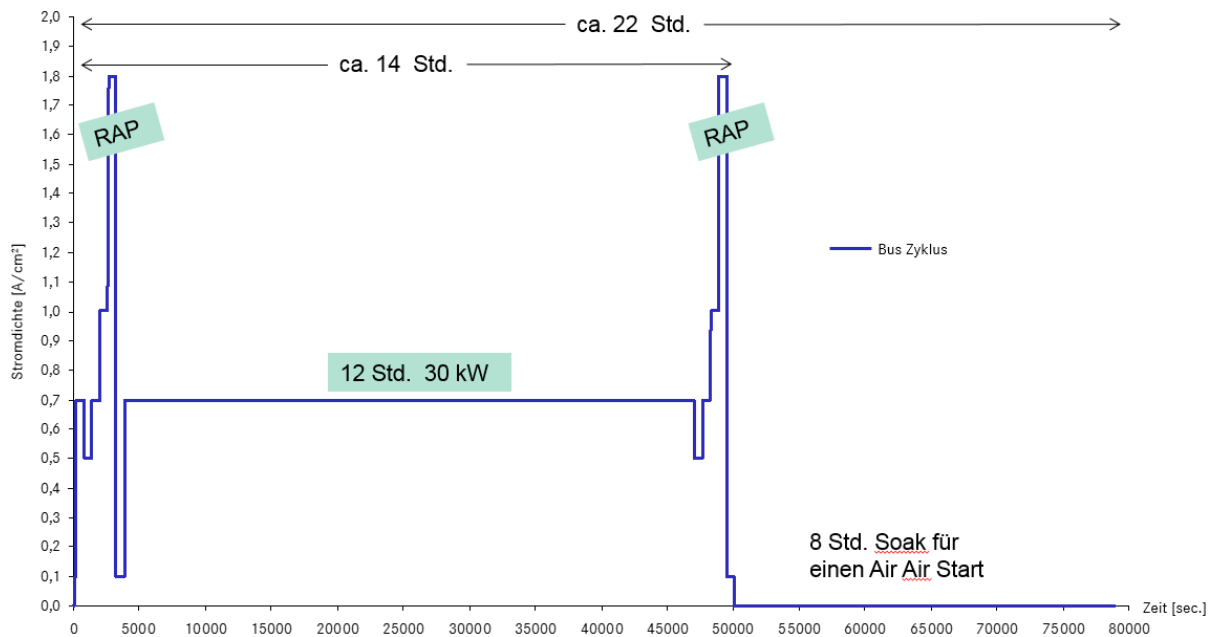


Abbildung 28 Zyklus

Um eine Vergleichbarkeit und Charakterisierung des BZ-Systemverhaltens zu erhalten wurden sogenannte Regular Assessment Point (RAP-Referenzprozedur) Referenz- bzw. Lastpunkte in einem Betriebszyklus definiert. Der Zyklus bildete des Weiteren einen Busbetrieb mit einer Laufzeit von insgesamt 14 Stunden nach. Über 12 Stunden wurden konstant 30 kW als Last angefordert. Das BZ-System diente in dieser Betriebsweise als „Batterielader“ (Range Extender).

Mit den Referenzpunkten wurde regelmäßig das Verhalten des BZ-Stack analysiert und mit Hilfe von Extrapolationskurven prognostiziert. Somit konnten frühzeitig Einflussgrößen auf die Stabilität des Stacks ermittelt werden, um mit geänderten Betriebsweisen zu erwartenden schädlichen Einflüssen entgegen wirken zu können.

Abbildung 28 zeigt den Degradationsverlauf über der Zeit. Die mit „Baseline“ gekennzeichneten grünen Markierungen weisen jeweils auf geänderte Systemparameter hin. „Soak“ steht dabei für Stillstandzeiten. Gut zu erkennen ist eine zunehmende Degradation über das Betriebszeitfenster der ersten 800 Stunden. Danach wurde beim Startvorgang des BZ-Systems eine Betriebsweise, die aus den Ergebnissen der Langzeit-Vorläufer entwickelt wurde, angewandt, um dem degressiven Verlauf der Stack- bzw. Systemspannung entgegenzuwirken. Ab-



bildung 28 zeigt die erfolgreich umgesetzte Maßnahme der Spannungs- bzw. Leistungsrückgewinnung. Der Betrieb dieses BZ-Systems konnte weit über das Ende dieses Vorhabens hinaus fortgesetzt werden.



Abbildung 29 Degradationsverlauf bei 291A



8 Nachweis der wichtigsten Positionen

Die folgenden Tabellen zeigen den aktuellen Stand der Kosten in 2015 und 2016 im Vergleich zur Jahresvorkalkulation.

Soll/Ist-Vergleich mit Jahresvorkalkulationen (03BV248A)

Laufzeit: 01.03.2015 - 31.12.2016 -- Förderrate 46%

		Gesamtvorkalkulation	Gesamt Ist	Bemerkungen
0813	Material	324.756,00	264.454,32	
0823	FE-Fremdleistungen	639.340,00	636.536,65	
	Personaleinzelkosten	806.410,45	724.253,34	
	Personalgemeinkosten	967.692,55	869.104,02	
0837	Σ Personalkosten	1.774.103,00	1.593.357,36	
0838	Reisekosten			
0847	AfA für vorhabensspezifische Anlagen	11.800,00	5.950,00	
0848	AfA für sonst. Anlagen des FuE-Bereichs			
0850	Sonst. unmittelbare Vorhabenskosten	111.943,00	34.718,96	
0855	Gesamte unmittelbare Vorhabenskosten	2.861.942,00	2.535.017,29	

Tabelle 1 Aktuelle Kosten 31.12.2016

Bemerkungen:

0813 Material: Erhöhung der Materialkosten durch Entwicklung einer für den Bus spezifischen Long Life MEA. Siehe auch Änderungsantrag vom 20.07.2016

0823 FE Fremdleistungen: Die Fremdleistungen werden nicht in geplanter Höhe benötigt, da die Konstruktionsumfänge im AP3.3 bei der Rahmenträgerentwicklung im Vorhaben nicht umgesetzt werden können.

0837 Personal: Aufgrund des noch nicht festgelegten Designs bei FCS und Tanksystem, können geplante Umfänge vorwiegend im Arbeitspaket AP3.4 Komponentenentwicklung und AP3.5 Softwareentwicklung im Vorhaben nicht umgesetzt werden.

0850 Sons. unm. Vorh.Kosten: Die Konstruktionsunterstützung im AP3.3 wurde aufgrund der Stornierung der Rahmenträgerentwicklung im AP3.4 im Vorhaben nicht benötigt.



9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der immer stärker werdende Druck auf die Automobilindustrie emissionsarme Fahrzeuge bereitzustellen verlangt einen Technologiewechsel, hin zu elektrochemischen Energiequellen wie der Batterie oder der Brennstoffzelle.

NuCellSys als Entwickler und Lieferant von BZ-Systemen für das Automobil unterstützt die ehrgeizigen und innovativen Pläne der Daimler AG / EvoBus GmbH, emissionsfreie Omnibusse für den Stadtverkehr zu entwickeln und bereitzustellen.

Um in der Lage zu sein, emissionsfreie Stadtbusse mit alternativer Antriebstechnik anbieten zu können, müssen im Vorfeld Schlüsselkriterien wie z.B. Lebensdauer von Komponenten, Zuverlässigkeit etc. erfüllt und abgesichert sein. Diese Kriterien waren Gegenstand dieses Vorhabens.

Es wurden des Weiteren kritische Komponenten, wie auch die Betriebssoftware –und Strategie, zur Erfüllung der Busanforderungen weiterentwickelt.

Die Unterstützung durch Fördermittel versetzte NuCellSys in die Lage dieses Vorhaben durchzuführen und einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zur Kommerzialisierung zu realisieren. Die Erreichung der technischen und technologischen Ziele dieses Vorhabens bildet unerlässliche Grundsteine für alle nachfolgenden BZ-Systementwicklungsprogramme, deren Ziele die Darstellung großer Stückzahlen sind.

Ohne Zuwendung wäre dieses Vorhaben nur auf die im Rahmen der Eigenmittel möglichen Aktivitäten beschränkt gewesen. Die Folge wäre gewesen, dass die Innovationstiefe um ein Vielfaches geringer gewesen wäre und die damit verbundenen technischen Ziele in dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen nur sehr bedingt hätten erfüllt werden können. Die notwendigen weiteren Entwicklungsschritte für die Kommerzialisierung würden auf das nächste bzw. die nächsten Brennstoffzellenfahrzeugprogramme verschoben werden, was zu einer verspäteten Verfügbarkeit von emissionsfreien BZ-Bussen für den ÖPNV führen würde, wodurch wiederum zeitliche, nationale Ziele verfehlt werden würden. Auch wäre die Bereitschaft von Zulieferern, diese Technologie unterstützen, bescheidener ausgefallen. Nicht zu vergessen, die Position Deutschlands als Vorreiter in der BZ-Technologie würde im weltweiten Konkurrenzkampf gegenüber den ehrgeizigen Plänen der großen Automobilhersteller aus den USA (GM, Ford), Japan (Toyota, Honda, Nissan), Korea (Hyundai Kia) und China Schaden nehmen.



10 Nutzen, Verwertbarkeit

Für die Entwicklung von BZ-Systemen für die Anwendung im Bus bzw. Stadtbus im ÖPNV sind die Ergebnisse, wie auch die angepasste Betriebsstrategie unerlässliche Beiträge zur Verbesserung der Robustheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Die Ergebnisse haben in dem bereits angelaufenen Entwicklungsprogramm der nächsten Generation Berücksichtigung gefunden (siehe Verwertungsplan der Abschlussdokumentation) bzw. werden in den weiteren nachfolgenden Entwicklungsprogrammen verwertet.

Mit der Betrachtung verschiedener Konzepte zum Tanksystem, dem Hybridisierungsgrad und Anzahl der BZ-Systeme im Verbund konnten erste wichtige Grundlagen für kostenoptimierte und kundenorientierte zukünftige Stadtbusse geschaffen werden.

Sämtliche in diesem Vorhaben identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten und Fehlerursachen, sowie die Definition der entsprechenden Abstellmaßnahmen und deren Verifikation, bewirken eine deutlich reduzierte Auftrittswahrscheinlichkeit der BZ-Systeme.

Des Weiteren bot dieses Vorhaben eine Plattform, um für den Pkw ausgelegte Komponenten, Anpassungen für die Anwendung im Bus vorzunehmen und unter busspezifischen Bedingungen zu erproben und verifizieren bzw. die Leistungsgrenzen der Komponenten zu ermitteln.

Mit der Entwicklung einer busspezifischen Software bzw. Betriebsführungsstrategie konnte erstmals die Grundlage für den kombinierten Betrieb mehrerer BZ-Systeme (in diesem Vorhaben zwei) geschaffen werden. Eine Erweiterung (Kaskadierung von BZ-Systemen) für den Einsatz im marinen Bereich, der Bahn etc. wären damit möglich.

Darüber hinaus soll erwähnt sein, dass die in diesem Vorhaben entwickelten und aufgebauten Prüf- und Testeinrichtungen unerlässliche Grundlagen für zukünftige Entwicklungstätigkeiten darstellen.

11 Fortschritt bei anderen Stellen

Sämtliche Aktivitäten des Markts, relevante Messen und Konferenzen, sowie der Stand der Technik, wurden und werden kontinuierlich beobachtet, überwacht und gegenüber der eigenen Technologie und der beabsichtigten Entwicklung geprüft und bewertet. Im Laufe des Vorhabens wurden die Ergebnisse des CHIC Projekt CHIC (Clean Hydrogen in European Cities; 2010 bis 2016) mit 54 Brennstoffzellenbussen von 5 verschiedenen Herstellern vorgestellt.

Die Fahrzeuge legten mehr als 9,3 Mio. km zurück. Ihre Effizienz hat sich gegenüber der Vorgängergeneration unter anderem durch die Hybridisierung deutlich verbessert. Für die 12-m-Busse wurde eine Energieeinsparung von 26 % gegenüber äquivalenten Modellen mit Dieselantrieb erzielt. Während 12-m-Brennstoffzellenbusse in CHIC im Mittel 9 kg H₂/100 km benötigten (300 kWh/100 km), waren es in HyFLEET:CUTE mit über 18 kg H₂/100 km noch mehr als doppelt so viel.



12 Veröffentlichungen

Im Zeitraum des Vorhabens wurden keine Veröffentlichungen getätigt.

13 Referenzen

- [1] Teststandsbeschreibung 1504-011_BA_HIL-PS_150925.pdf
- [2] 1504-011_HIL_PS_Risiko_151123.pdf
- [3] Abnahmeprotokoll_Elektrotechnik_fuer_Teststaende_TS163_2016_07_04.pdf
- [4] Zwischenbericht: 1.Zwischenbericht_BZ-BusGen-403BV248A.pdf
- [5] 20160226_Ausarbeitung.docx
- [6] 03BV248A_Anschreiben_Änderungsantrag.docx



14 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1 H ₂ Verbräuche der unterschiedlichen BZ-Bus Generationen	3
Abbildung 2 Projektstruktur NuCellSys GmbH	5
Abbildung 3 Meilensteinplan (aktuell)	8
Abbildung 4 Aufbau BZ- Einzelzelle	12
Abbildung 5 Spinnendiagramm	13
Abbildung 6 Kennlinienvergleich	14
Abbildung 7 Zusammenbau Laborsystem	16
Abbildung 8 Gesamtsystem mit Teststandssensorik	17
Abbildung 9 Packagingvorgaben	17
Abbildung 10 Tankanlage mit geänderten BZ-Packaging (links) vs. Motorraum Packaging (rechts)	18
Abbildung 11 HV-Topologie für den Bus	19
Abbildung 12 GIC 246 A02 Muster	19
Abbildung 13 Draufsicht	19
Abbildung 14 Lastphasen und deren Schwingungsverhalten	20
Abbildung 15 Lastsprünge und an der unteren Spannungsgrenze	20
Abbildung 16 Auszug aus der Testspezifikation	21
Abbildung 17 Einbindung BZ System in den Antriebsstrang	22
Abbildung 18 TCU Konzeptauswahl	23
Abbildung 19 HV- und Steuergeräte-Topologie des HiL Teststandes	24
Abbildung 20 GIC246-A01 Muster (links) und weiterentwickeltes GIC246-A02 (rechts)	25
Abbildung 21 GUI – Teststands-Arbeitsoberfläche	26
Abbildung 22 Lastenheftentwicklung	27
Abbildung 23 Testablauf	30
Abbildung 24 CAN-Topologie (Teststand #146)	31
Abbildung 25 Umbauphasen der Medienversorgung (Original, Rückbau, Neuaufbau)	31
Abbildung 26 Hochvolt-und Niederspannungsschaltschrank (rechts) nach Umbau	32
Abbildung 27 BZ System im Teststand integriert	32
Abbildung 28 Zyklus	33
Abbildung 29 Degradationsverlauf bei 291A	34



15 Abkürzungen

ACC	Air Condition Compressor
AP	Arbeitspakete
APU	Air Processing Unit
BZ	Brennstoffzelle
BZ-ZK	Brennstoffzellenzwischenkreisspannung (Stackspannung)
BZ-SYS-ZK	Brennstoffzellen System Zwischenkreisspannung (Hilfsantriebsspannung)
CAD	Computer Aided Engineering
CAN	Controler Area Network
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CAT	Core Automotive Tests
CPC	Common Power Controller
CFCP	Common Fuel Cell Project
CBX	Converter Box
DBS	Duales Brennstoffzellensystem
DC/DC	Gleichstrom Wandler
DFCU	Dual Fuel Cell Control Unit
EA	Entwicklungsaggregat
DFSS	Design for Six Sigma
EIA	Elektrische Impedanz Analyse
ESD	Electrical Schematic Diagram
ETC	Electric Turbo Charger
FPGA	Field Programmable Gate Array
F&E	Forschung & Entwicklung
FMEA	Failure Mode & Effect Analysis
FCC	Fuel Cell Controller
FCS	Fuel Cell System
FCU	Fuel Cell Control Unit
GCU	Gateway Control Unit
G2G	Gas to Gas Humidifier
GDL	Gas Diffusion Layer
GIC	Galvanic isolated converter



GUI	Graphical User Interface
HD	Heavy Duty
HIL	Hardware in the Loop
HUMS	Healths Usage Monitoring System
HRB	Hydrogen Recirculation Blower
HDCU	Hybrid Drive Control Unit (ehemals HD-CPC)
HFR	High Frequency Resistance
HV	High Voltage
HV-ZK	Hochvoltzwischenkreisspannung (500-750V)
HW	Hardware
IAS	Integrated Anode Structure
ID	Identifier (CAN)
KLH	Komponenten Lastenheft
LAN	Local Area Network
NLCT	New Life Cycle Test
LIN	Local Interconnect Network
LE	Leistungselektronik
LV	Low Voltage (12V)
LMM	Last Management
RAP	Regular Assessment Points (Referenzprozedur)
RCP	Rapid Controls Prototyping (Prototypensteuergerät mit Rechnersystem)
MEA	Membrane Electrode Assemblies
MiL	Model in the Loop
MSM	Master Slave Management
NCS	NuCellSys
NIP	Nationales Inovations Programm
NR	Netzurückspeisung
NT	Netzteil
NW	Netzwerk
OSE	Off-Spec-Event (Alarmmatrix)
OSEK	Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kraftfahrzeug
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PKW	Personenkraftwagen
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram

Abschlussbericht des Vorhabens Entwicklung eines BZ-Hybridstadtbuss der 4. Generation

Förderkennzeichen: 03BV248A



PXI	PCI (eXtensions for Instrumentation)
QA	Qualifizierungsaggregat
SW	Software
SCXI	Signal Conditional Extension For Instrumentation
TCU	Tank Control Unit
TCO	Total Costs of Ownership
VEH	Vehicle
WEH	Water Electric Heater

