

# Abschlussbericht

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

ZE (Zuwendungsempfänger):

**NUCELLSYS**  
THE FUEL CELL SYSTEM COMPANY

**Neue Straße 95**

**73230 Kirchheim/Teck-Nabern**

Förderkennzeichen:

03BV114A/03BV114B

**EvoBus**

**Neue Straße 95**

**73230 Kirchheim/Teck-Nabern**

Vorhabenbezeichnung:

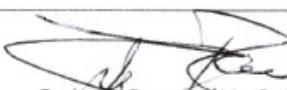
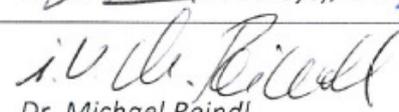
**Heavy-Duty-Brennstoffzellensystem der 3.Generation für die Anwendung im Bus**

Laufzeit des Vorhabens:

**01.09.2009 – 31.10.2014**

Berichtszeitraum:

**01.09.2009 – 31.10.2014**

	Datum, Unterschrift
Autor	Erstellt von  i.V.  Rainer Bauer (NuCellSys), Dr. Helmut Warth (EvoBus)
Prüfer	Geprüft von  Dr. Michael Reindl
Freigabe	Freigegeben von  Dr. Joachim Blum

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.

Abschlussberichtbericht: Förderkennzeichen: 03BV114A



---

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Aufgabenstellung.....	3
3. Voraussetzungen .....	4
4. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
5. Wissenschaftlicher und technischer Status.....	9
6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
7. Ergebnisse des Vorhabens.....	11
8. Nachweis der wichtigsten Positionen .....	40
9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	41
10. Nutzen, Verwertbarkeit.....	41
11. Fortschritt bei anderen Stellen.....	42
12. Veröffentlichungen.....	42
13. Weitere Dokumente.....	43
14. Abkürzungen .....	44
15. Abbildungsverzeichnis.....	46



## 1. Einleitung

Dieser Bericht beschließt ein Vorhaben auf dem Weg zu einer effizienten und emissionsfreien Technologie für eine zukünftige Antriebstechnik im Bus (öffentlichen Nahverkehr).

Ermöglicht wurde dieser Meilenstein, auch durch zwei budgetneutrale Verlängerungen dieses Vorhabens. Im Zuge der Genehmigung des Verlängerungsantrags wurde auch vereinbart, dass Inhalte des letzten Halbjahres Teil dieses Abschlussberichts, gemeinsam mit dem Konsortialpartner EvoBus, sein werden.

## 2. Aufgabenstellung

Als Teil des Gesamtvorhabens NaBuZ (Nachhaltige Bussysteme der Zukunft) verfolgte die NuCellSys GmbH gemeinsam mit der EvoBus GmbH das Ziel, fertig entwickelte PKW-Brennstoffzellensysteme (BZ-System) der neuesten Generation in Form eines Doppel-Systems (Dual-BZ-Systems) auf dessen Anwendungspotenzial als serientauglicher Brennstoffzellenantriebsstrang in einem Stadtbuss darzustellen.

Die Zusammenführung zweier Brennstoffzellensysteme zu einem Doppel-System erfordert auch eine Abwandlung der bisherigen Betriebsstrategie des Pkw-Einzelsystems.

Des Weiteren steht eine technische Anpassung wichtiger Komponenten an das erhöhte Bus-Betriebsspannungsniveau und den zusätzlich einhergehenden erhöhten Anforderungen für die Lebensdauer von Busfahrzeugen, im Vordergrund.

Alle aus dem Projekt erlangten Erkenntnisse fließen in die Entwicklung nachfolgender, noch effizienterer Brennstoffzellensystemgenerationen ein. Damit soll sichergestellt werden, dass die wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse über einen Verkauf von Fahrzeugen erfolgen kann.

Folgende Aufgaben wurden definiert

- Aufbau eines Dual-BZ-Prüfstands für die Integration eines Dual-BZ-Systems
- Konzeptuntersuchung und Entwicklung einer Leistungsschnittstelle zwischen Brennstoffzellensystem und Hybridsystem mit unterschiedlichen Spannungslagen
- Entwicklung und Verifikation einer Betriebsführungsstrategie für das Dual-BZ-System, sowie das Powermanagement und Regelung der entwickelten Leistungselektronik
- Optimierung und Nachweis geeigneter BZ-System-Komponenten (Befeuchter und Luftversorgung) für 12.000 h Betrieb
- Bauraumuntersuchung und Packaging eines Dual-BZ-Systems für die Integration in einen Citaro Solobus und Gelenkzug unter Berücksichtigung von Service- und Wartungsaspekten
- Entwicklung und Aufbau einer Hochvolttestumgebung für die Verifikation der entwickelten Leistungselektroniken (DC/DC-Wandler)
- Dauerlauf am Busprüfstand



### 3. Voraussetzungen

Mit der gezielten Förderung im Rahmen des von den Bundesministerien für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Wirtschaft und Technologie (BMWt), 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.

Die Entwicklung eines busspezifischen Brennstoffzellensystems kam aufgrund zu hoher Kosten nicht in Frage. Somit entstand das Konzept mit einem „Pkw-Doppelsystem“ durch Nutzen von Synergien und Anpassungen, den Nachweis deutlich verlängerter Laufzeit für die Eignung im Bus zu erbringen. Mit Hilfe der Förderung, und aufbauend auf die bestehenden Entwicklungsstrukturen im Pkw-Bereich, war es möglich die Anstrengungen der EvoBus GmbH nach alternativer Antriebstechnologie zu unterstützen und gemeinsam die Weichen für ein nachfolgendes umweltfreundliches Produkt zu stellen.

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

### Planung

Die Arbeitspakete und ihre Inhalte:

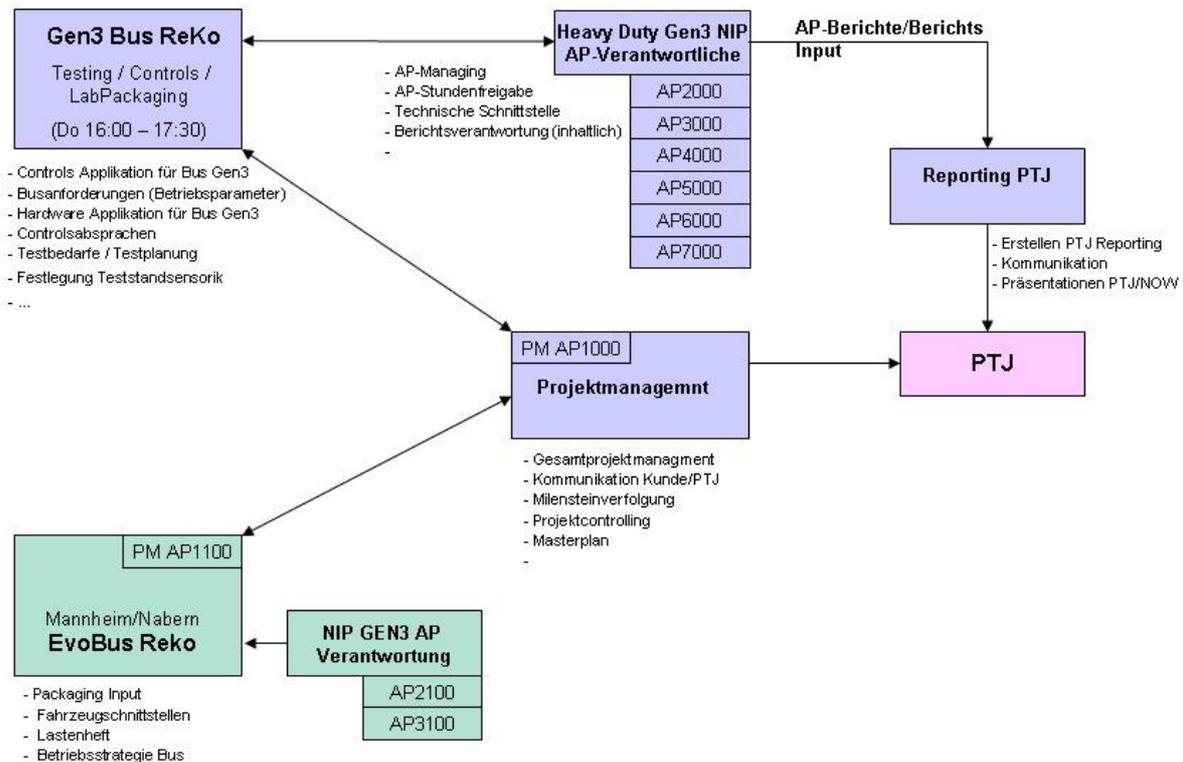


Abbildung 1 Projekt Aufgabenverteilung, Arbeitspakete und Kommunikationswege

### AP 1000: Projektmanagement:

- Planung, Koordination, Überprüfung und Steuerung sämtlicher Aktivitäten in den Arbeitspaketen AP 2000 bis AP 7000 zur Sicherstellung der Erreichung der technischen und finanziellen Ziele.

### AP 1100: EvoBus Projektmanagement:

- Planung, Koordination, Überprüfung und Steuerung sämtlicher Aktivitäten in den Arbeitspaketen AP 2100 und AP 3100.

### AP 2000: System Engineering:

- Konzeptanalyse eines Heavy-Duty-BZ-Systems bezüglich der unterschiedlichen Anforderungen von Pkw und Bus.
- Entwicklung, Simulation und Test von Betriebsstrategien für die Busapplikation inklusive Energiespeicher unter Berücksichtigung der lebensdauerbegrenzenden Größen und den gegebenen Anforderungen.



- Auswertung und Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Laborsystem in die Softwareentwicklung.
- Erstellen aller notwendigen Spezifikationen und Dokumentationen für den Betrieb des Heavy-Duty-BZ-Systems sowohl im Laborbetrieb als auch für einen Bus.

#### **AP 2100: System Engineering Citaro (EvoBus):**

- Definition der erforderlichen Busecktypen für den Einsatz des Heavy-Duty-BZ-Systems.
- Synchronisation der Anforderungen im Bereich Elektrik/Elektronik- und Hochvolt-Architektur zwischen Brennstoffzellenantrieb (Heavy-Duty-BZ-System) und Gesamtfahrzeug einschl. Hybrid-Antriebstrang.

#### **AP 3000 Packaging CAD Engineering**

- Machbarkeit des Packaging-Designs darstellen
- Konstruktion von Tragstruktur und Verbindungskomponenten

#### **AP 3100: Fahrzeugpackaging Citaro (EvoBus):**

- Untersuchung verschiedener Varianten zur Integration des Heavy-Duty-BZ-Systems

#### **AP 4000 FCS-Komponenten Anpassungsentwicklung**

- Erarbeitung und Auswahl eines geeigneten Konzepts für eine FCS-Leistungselektronik (FCS-LE), zur Anwendung im Bus, auf der Basis der PKW-Entwicklungsanwendungen
- Erstellung eines Hardware- und Software-Lastenheftes für eine angepasste FCS-LE
- Identifikation von Lebensdauer kritischen Komponenten und Stressfaktoren (z.B. Befeuchter)
- Komponenten- und Verbundtests im HiL-Teststand sowie Tests im Gesamtsystem

#### **AP 5000 Software Entwicklung**

- Anpassungsentwicklung der FCS-Betriebsführung für die busspezifische Anforderungen
  - a) Zur Erhöhung der Lebensdauer des FCS
  - b) Zur Vorbereitung der Betriebsart in einem Heavy-Duty-BZ-System
- Entwicklung und Erprobung eines Power-Management inkl. Ansteuerung der LEs im Laborbetrieb, sowie eines Last-Managements in verschiedenen Betriebsphasen des FCS
- Evaluierung eines ECU-Master-Slave Konzept
- Verifizierung / Validierung der Heavy-Duty-BZ-System-Betriebsstrategie-Software

#### **AP 6000 Montage, Prüfung und Prozessentwicklung**

- Aufbau des Heavy-Duty-BZ-Laborsystemprototypen (inkl. Tragstruktur) und dessen Integration in den Laborsystemteststand
- Lebensdauertest-Systemaufbau und Integration in den Dauerlauf-teststand
- Prozesssichere Montage und Prüfung für das Heavy-Duty-BZ-System

Abschlussberichtbericht: Förderkennzeichen: 03BV114A



- Aufbau und Prüfen (FAT) des Heavy-Duty-BZ-Systems inkl. der Tragstruktur zur Integration
- Aufbau und Prüfen (AT) von Ersatzteilen: Luftmodul, Befeuchter, Anode, Leistungselektronik, BZ-Stack, E/E-Komponenten)
- Service, Wartung und Reparatur des Heavy-Duty-BZ-Labsystemprototypen, des Heavy-Duty-BZ-System Dauerlaufstests, sowie des Heavy-Duty-BZ-Systems für den Demonstrator.

**AP 7000 Test/Verifikation Heavy-Duty-BZ-System**

- Planung, Aufbau und Betrieb des Heavy-Duty-BZ-System-Prüfstands

**Der Zeitplan:**

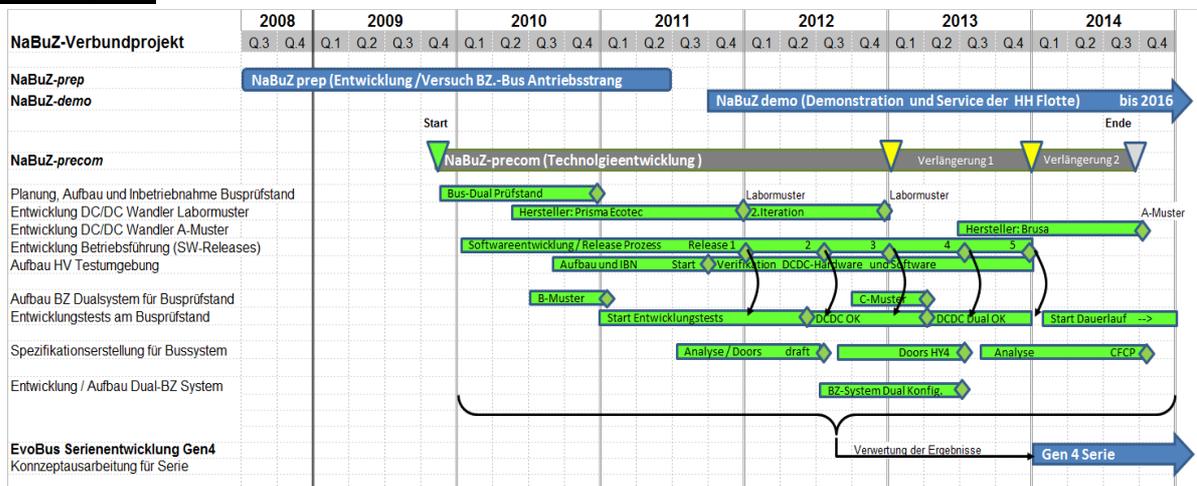


Abbildung 2 Detaillierter Zeitplan mit AP/ Übersicht

Aufgrund von Lieferverzögerungen im Rahmen der Entwicklung des DC/DC-Wandlers musste der Zeitplan angepasst werden.

**Ablauf:**

Zunächst musste eine geeignete Testeinheit für ein BZ-Doppelsystem für die zukünftige BZ- Bus-Applikation aufgebaut werden. Dafür wurde innerhalb des Vorhabens ein Bus-Dual-Teststand geplant, aufgebaut und mit 2 BZ-Systemen in Betrieb genommen.

Parallel dazu wurden die notwendigen busspezifischen Komponenten, wie DC/DC-Wandler, Dual Fuel Cell Controller, sowie die Softwarebetriebsführung entwickelt und verifiziert. Dies wurde in einem eigens dafür entwickelten HV-Hardware-in-the-Loop-(HiL)-Prüfstand realisiert. Dabei stand die Steuerung und Regelung der neu entwickelten Leistungselektronik im Vordergrund.

In einem zweiten Schritt wurden die entwickelte und verifizierte Soft-und Hardware in den realen BZ-Prüfstand implementiert und auf deren Funktionalitäten getestet. Hier wurden erste Erkenntnisse bezüglich des dynamischen Verhaltens des DC/DC-Wandlers in Kombination mit dem hochdynamischen Verhalten des elektrischen Turboladers des BZ-Systems gewonnen.

Abschlussberichtbericht: Förderkennzeichen: 03BV114A



Eine Besonderheit des neu entwickelten DC/DC-Wandlers liegt in der galvanisch getrennten Ausführung für eine BZ-Leistung bis 100 kW. Die galvanische Trennung ist erforderlich um die geringere BZ-Spannung von der höheren Bustraktionsspannung sicher zu trennen und den Gesamtisolationswiderstand des Fahrzeugs im spezifizierten Bereich, vor allem beim Einsatz eines Dual-BZ-Systems in einer Parallelschaltung, zu halten.

Um den Einbau eines Doppelsystems mit seinen zusätzlichen busspezifischen Komponenten zu ermöglichen mussten intensive Einbauuntersuchungen im „Hinterwagen“ des Busses durchgeführt werden.

Ziel war es, den gegebenen Bauraum des Dieselaggregates für den zukünftigen Einsatz des Brennstoffzellenaggregates, sowohl für den Solobus, als auch den Gelenkzug zu nutzen. Die Montagefähigkeit in der Produktion, sowie die Service und Wartungsanforderungen wurden dabei mit berücksichtigt.

Nach der Festlegung des Konzepts, wurde ein erstes A-Muster-Dual-BZ-System aufgebaut und in Bezug auf Eignung für den Zusammen- und Einbau der Komponenten untersucht. Das CAD-Modell dieses Aggregat wurde EvoBus für erste Einbauuntersuchungen im Hinterwagentorso zur Verfügung gestellt.

In Bezug auf die hohen Lebensdaueranforderungen für den Stadtbus, wurden für die Komponenten der Luftversorgung und der Befeuchtung spezielle Dauerlaufuntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelten Komponenten von hohen Lebensdaueranforderungen gerecht werden.

Es hat sich gezeigt, dass eine 2-3 fache längere Lebensdauer als für den Pkw spezifiziert erreichbar ist. Für das BZ-Stackmodul ist ein Faktor von maximal 2 realistisch, da dieses Modul sehr starken den „Design to Cost“-Anforderungen ausgesetzt ist. Deshalb ist ein gutes Wartungs- bzw. Austauschkonzept beim Einsatz von Pkw-Stacks erforderlich.

### **Herausforderungen und Lerneffekte**

Die Entwicklung des DC/DC Wandlers in galvanisch getrennter Ausführung war die größte Herausforderung innerhalb des Vorhabens. Zum einen gab es bisher noch keine Erfahrungen mit galvanisch getrennten DC/DC Wandlern in dieser Leistungsklasse, zum anderen war die Abstimmung im Verbund mit den BZ-Systemen und die dynamischen Anforderungen der Brennstoffzellen-Luftversorgung sehr hoch. Dies erforderte intensive Testphasen und Analysen im Labor, die immer wieder durch Ausfälle der Komponenten unterbrochen wurden. Sehr häufig musste der Wandler vom Hersteller überarbeitet werden was zu starken Zeitverzügen im Projekt führte.

Dennoch konnte der Betrieb erfolgreich mit einem Dual-BZ-System mit den spezifizierten Anforderungen nachgewiesen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Weiterentwicklung vom Labormuster zum A-Muster berücksichtigt. Das A-Muster wurde mit einem deutlich höheren Reifegrad für die aktuellste BZ-Generation entwickelt und bildet die Basis für die nächste Generation von BZ-Bussen bei der EvoBus GmbH.



## 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.

Brennstoffzellenautos 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. Dabei entsteht lediglich reiner Wasserdampf als sogenanntes Abgas.

### Zum Vorhaben:

Basis für das Vorhaben bildeten zwei für den Pkw entwickelte PEM-BZ-Systeme.

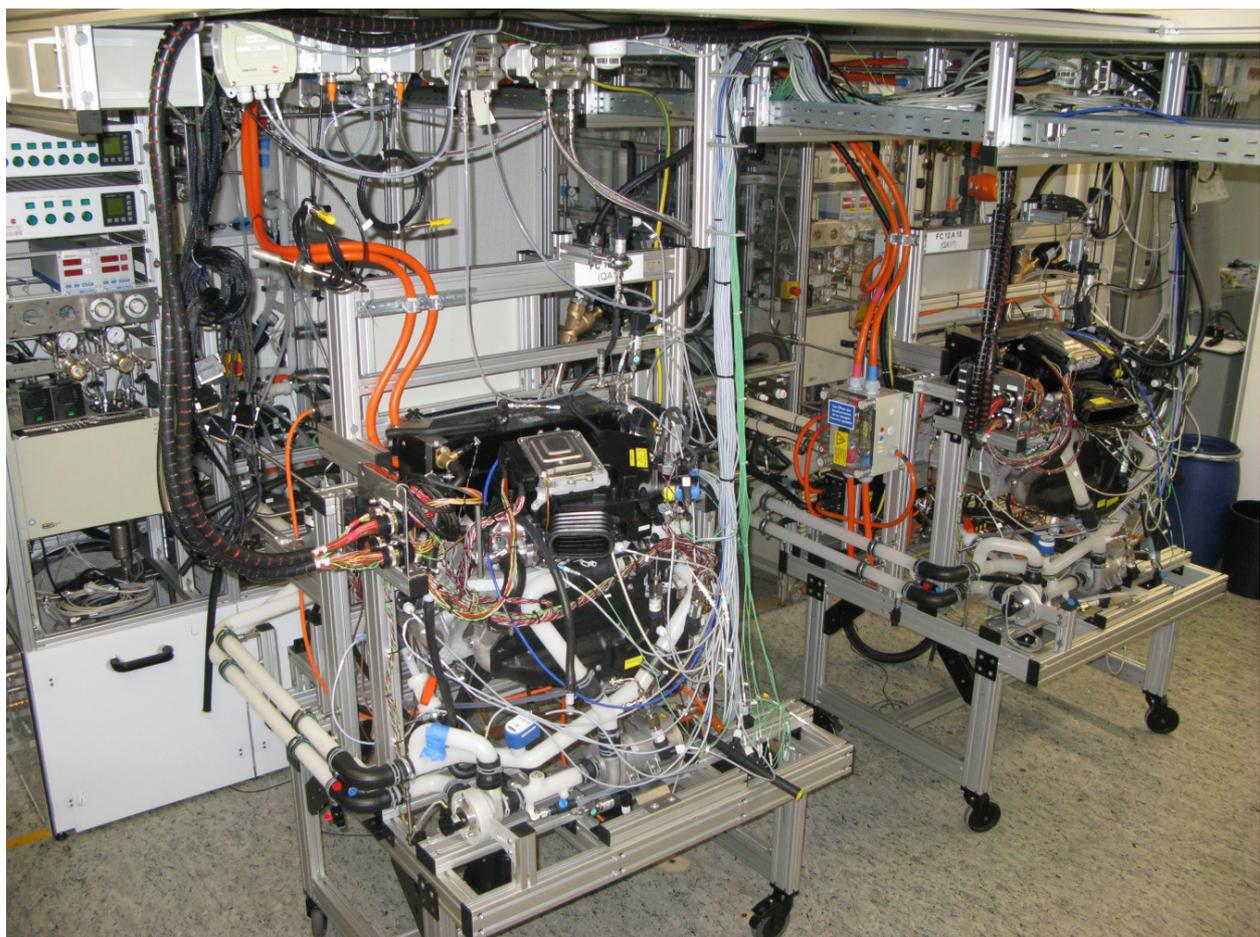


Abbildung 3 Bus-Dual-Prüfstand mit 2 BZ-Systemen



Mit der Anpassung und Optimierung der Betriebsstrategie und der Weiterentwicklung wichtiger peripherer Komponenten sollten die notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden die Anforderungen in Bezug auf Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu erfüllen. Für die Anwendung im Bus und der dazu geforderten Antriebsleistung wird das Konzept der Parallelschaltung zweier Pkw-BZ-Systeme in Verbindung mit einem Energiespeicher und einem intelligenten Energiemanagementsystem verfolgt.

## 6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Basis-Entwicklung des DC/DC-Wandler und deren Weiterentwicklung wurden von zwei externen Firmen durchgeführt. Des Weiteren waren beim Lebensdauertest der Kernkomponenten (ETC, Befeuchter) die entsprechenden Zulieferer mit eingebunden. Dabei wurden gemeinsam die Themen Fehleranalysen, Verbesserungen und Stresstests behandelt und erfolgreich vorangetrieben.

Für die Auslegung für die Aufnahme der BZ-Systeme wurden die erforderlichen Berechnungen und Simulationsläufe iterativ bei lokalen Dienstleistern beauftragt und durchgeführt. Daraus ergaben sich Potenziale für notwendige Anpassungen bzw. Verbesserungen. Es folgte die Umsetzung zu einem Mock-ups für Einbauuntersuchungen in den Hinterwagen eines Busses und für Präsentationen.



## 7. Ergebnisse des Vorhabens

### AP 1000: Projektmanagement:

Die Koordination der Aktivitäten in den Arbeitspaketen AP 2000 bis AP 6000 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 regelmäßigen Abständen mit dem Projektpartner EvoBus Informationen, Ziele und Zieländerungen ausgetauscht und justiert.

In mehreren Projektreviews wurde der Geschäftsleitung der jeweilige aktuelle Status des Projekts dargestellt und erläutert. Sämtliche Ergebnisse dieser Projekttreffen wurden in entsprechenden Protokollen festgehalten und in das Dokumentationssystem eingestellt

### AP 2000: System Engineering:

Ziel im AP 2000 war es eine Leistungselektronik zu entwickeln, die den Energiefluss des Brennstoffzellensystems (400 V) auf den Antriebsstrang des Busses (750 V) überträgt.

Dafür wurde ein DC/DC Wandler so konzipiert, dass er die beiden unterschiedlichen Spannungsniveaus sicher voneinander trennt. Dies dient einerseits zur Sicherheit der Komponenten des BZ-Systems in Bezug auf das erhöhte Spannungsniveau von 750 V, andererseits, um die geforderte Mindestgröße des Isolationswiderstands für das Gesamtsystem von 100 Ohm/Volt einzuhalten.

Abbildung 4 zeigt das Konzept des DC/DC-Wandler. Dabei wurde die BZ-seitige (400 V) Spannung galvanisch vom Antriebsstrang der Hochvolt-Seite (750 V) entkoppelt. Ein weiterer DC/DC Wandler, der ebenfalls galvanisch getrennt ausgeführt ist, versorgt die Hilfsaggregate des BZ-Systems mit.

In einem anderen Ansatz (Abbildung 5) wurde mit den bereits bestehenden Komponenten (CBX + HV-DC/DC) die elektrische Kopplung der beiden System vorgenommen. Ziel war es das Verhalten zweier in Serie geschalteter DC/DC Wandler zu testen. Der Aufbau und die Ausführung dieser Testvariante fanden in einer Projektphase statt, in der zeitgleich die Entwicklung des galvanisch getrennten Wandlers durch den Zulieferer durchgeführt wurde.



**Konzept mit busspezifischer Leistungselektronik**

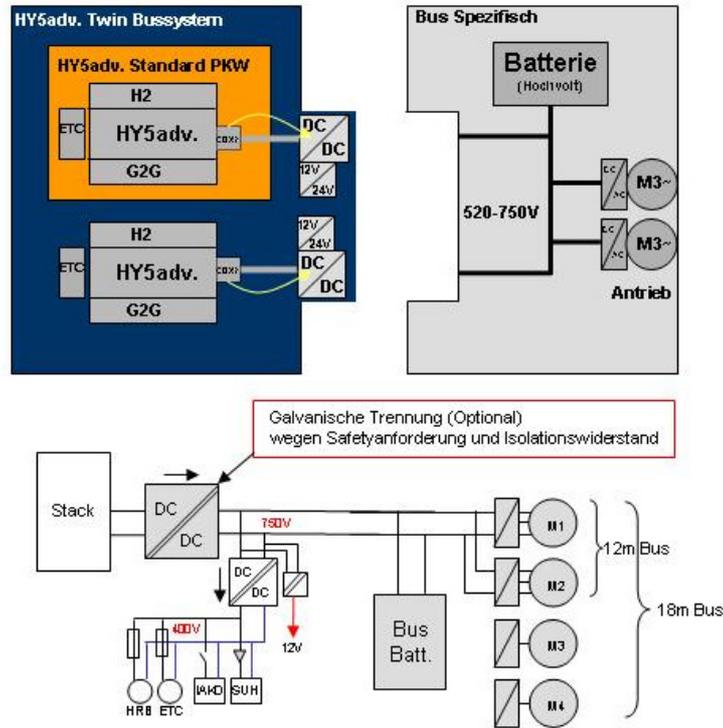


Abbildung 4 Busspezifisches LE Konzept

**Konzept mit vorhandenen Komponenten (CBX/750VDC/DC)**

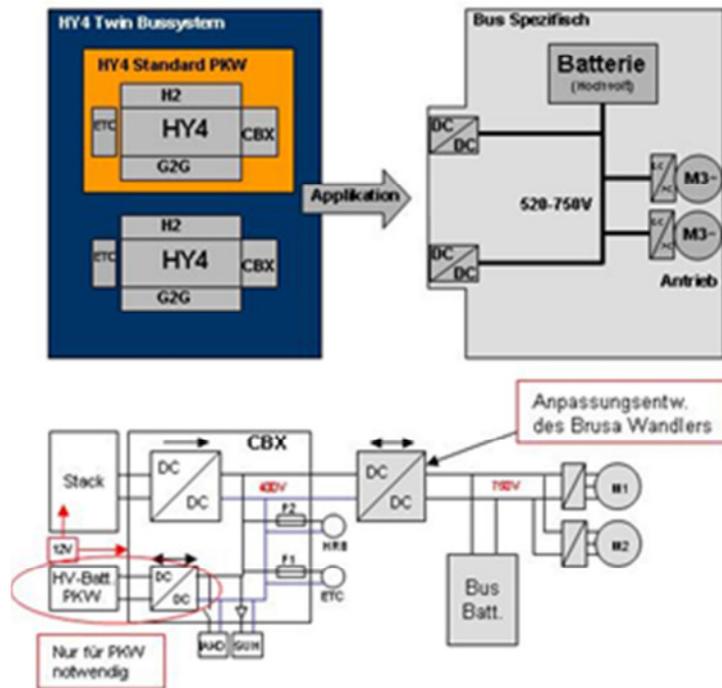


Abbildung 5 Vorhandenes LE Konzept



**AP 2100: System Engineering Citaro (EvoBus):**

Aufgaben von EvoBus im Rahmen des Projektes NaBuZ-precom war es zunächst in AP 2100, die CITRAO-Busecktypen für die Anwendung des Heavy-Duty-BZ Systems festzulegen mit anschließender Analyse der unterschiedlichen Heavy-Duty-BZ-Systeme auf Eignung in den definierten Busecktypen. Dabei wurden ebenfalls Änderungsbedarfe bei der Elektrik/Elektronik- und Hochvolt-Architektur für den bestehenden Hybridbaukasten des CITARO aufgezeigt. Erste BZ-Kühlungskonzepte aus dem zukünftigen CITARO Baukasten wurden auf Kompatibilität mit dem neuen Heavy-Duty-BZ System geprüft. Ferner wurde ein Rahmenheft für die Heavy-Duty-BZ-Systeme für diese Stadtbusbaureihe unter Berücksichtigung der Ecktypen erstellt.

Elektrische Schnittstellen zwischen Fuel Cell System und Fahrzeug wurden zu Beginn des Projektes in Workshops definiert, die als Basis der Fuel Cell Systementwicklung dienen. Es wurde zudem ein Längsdynamik-Simulationsmodell zur Gesamtfahrzeug-Simulation eines seriellen Brennstoffzellen-Hybrid-Stadtbusses (Solobus / Gelenkzug) aufgebaut.

Im Bereich der Elektrik / Elektronik-Entwicklung wurden die Randbedingungen festgelegt, die die Anpassungsentwicklung der Fuel Cell Systeme unterstützten. Des Weiteren wurden die Schnittstellenparameter der HV-Wandler, sowie die Steuergerätekommunikation und Steuergerätearchitektur definiert.

Bei der Betriebsstrategie wurden Grundparameter des Fahrzeugs und einige Komponenten an die aktuellen Fahrzeug-, bzw. Komponentenparameter angepasst. Die HV-Komponenten (z.B. Lithonenbatterie) und das Energiemanagement (Leistungsaufteilung zwischen Brennstoffzelle und Batterie) wurden angepasst.

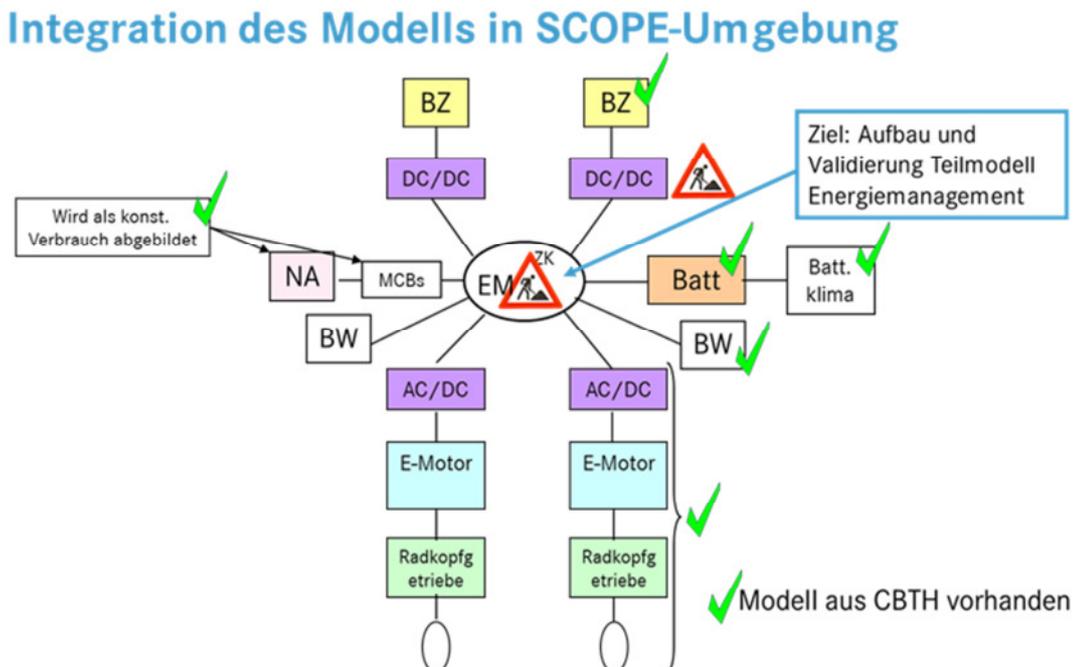


Abbildung 6 Übernahme Pkw-Modell und Umbau / Anpassung an Stadtbus



Für die Entwicklung der Leistungselektronik mussten Themen, wie der Berührungsschutz, der Überstromschutz, die aktive Entladung, etc. betrachtet werden. Generell wurden Vereinbarungen getroffen, um eine Transparenz in den Spezifikationen auf System- und Komponentenebene zu schaffen.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen am Kühlsystem konzentrierte sich auf die Entwicklung eines neuen separaten BZ-Kühlsystems und einer adaptiven Anwendung des künftigen CITARO-Kühlsystems aus einem bestehenden Baukasten. Das Kühlkonzept aus dem Baukasten „EURO VI“ wurde in Rahmen einer Funktionsanalyse auf die Belange des BZ-Systems angepasst.

Die Schnittstellen zum Energiemanagement wurden intensiv behandelt. Dabei konnten durch Workshops übergreifende Energiemanagementthemen, wie z.B. effiziente Hochvolt-Energieverteilung, Leistungsverteilung durch Steuerung der Energiequellen, situatives und bedarfsgerechtes Ein-/Ausschalten der steuerbaren Energiequelle untersucht werden.

Diese Entwicklungsarbeiten zum BZ-Antrieb der nächsten Generation wurden kontinuierlich mit den Ergebnissen der übrigen alternativen Stadtbuss-Antriebskonzepte (Dieselhybrid, Batteriebus) abgeglichen, um ein Höchstmaß an Synergien (Komponenten, Regelung und Softwareentwicklungen) zu erreichen. Gleichzeitig fand ein enger Informationsaustausch mit der Brennstoffzellensystementwicklung im Pkw-Bereich von Daimler statt.

Die Neuausrichtung der Konzernaktivitäten in Bezug auf die Brennstoffzellentechnologie und der daraus resultierenden Einflüsse auf die wirtschaftlichste Auslegung des Brennstoffzellenbusses der nächsten Generation wurden in die Analyse einbezogen. In diesem Zusammenhang wurden auch die Rahmenbedingungen geschaffen um alternative Betriebskonzepte, wie ein Range-Extender und die Auswirkung auf die Fahrzeugeigenschaften zu analysieren. Zur Identifikation möglicher Einflüsse auf die Lebensdauer des BZ-Systems wurden geeignete Prüfmethode definiert.

### **AP 3000 Packaging CAD Engineering**

In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene Packagingvarianten in Zusammenarbeit mit der Konstruktionsabteilung von EvoBus erarbeitet. Ziel war es, die beiden BZ-Systeme mittels eines Integralträgers in dem zur Verfügung gestellten Bauraum zu implementieren. Dabei wurden diese Integrationsentwürfe sowohl für den Citaro 12 m, als auch für Gelenkzug 18 m durchgeführt.

Des Weiteren mussten in der Planung, die für den Betrieb der BZ-Systeme notwendigen Medien-schnittstellen (u.a. Kühlung) und Versorgungseinrichtungen (z.B. H<sub>2</sub>-Tankanlage) berücksichtigt werden.

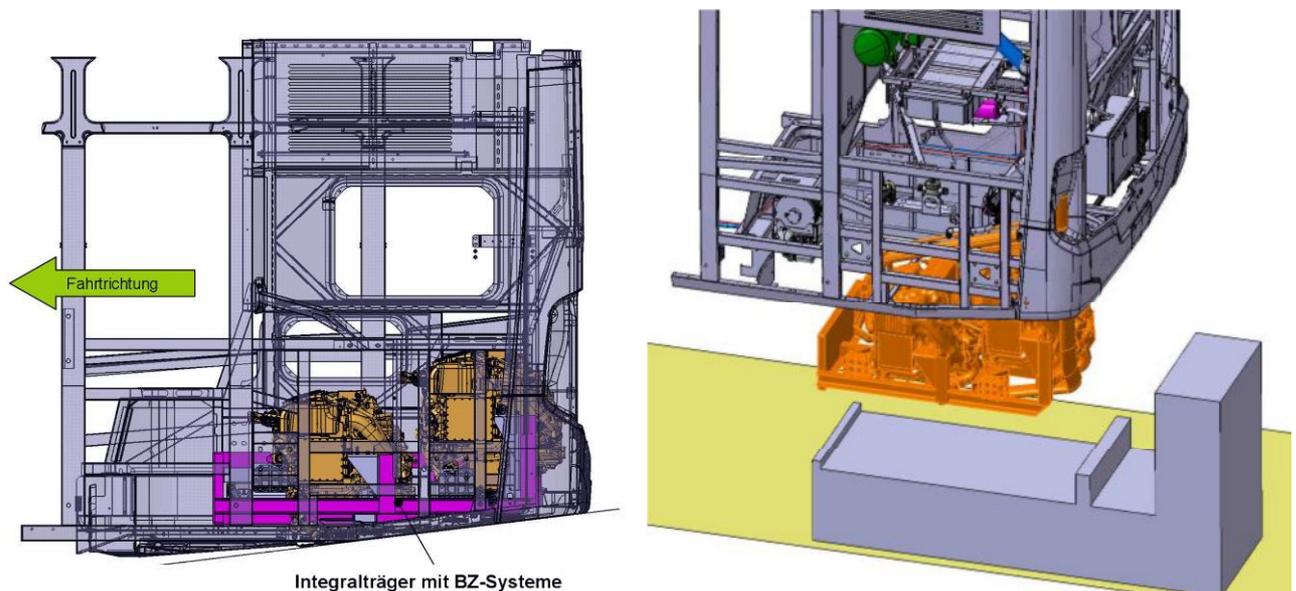
Folgende Rahmenbedingungen galt es zu berücksichtigen:

- Ausreichende Festigkeit des Rahmenträgers
- Wartungsfreundlichkeit
- Kosten
- Schnittstellenzugänglichkeit (Kühlung, Medienversorgung, Zu –und Abluft,..)
- Einfache Montage bei Fahrzeugaufbau

Abschlussberichtbericht: Förderkennzeichen: 03BV114A



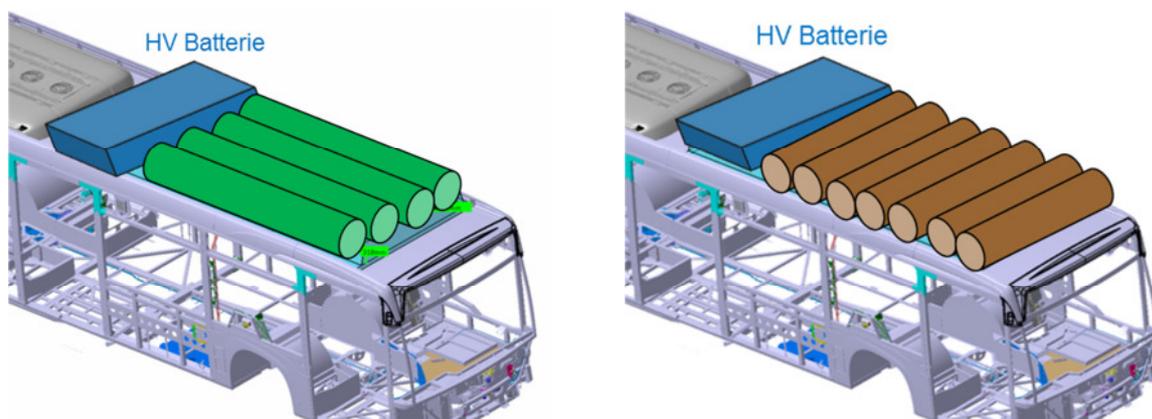
Die nachfolgende Abbildung zeigt den Bauraum und die Anordnung der BZ-Systeme im Fahrzeug, sowie dessen Montagekonzept für den Fahrzeugaufbau.



**Abbildung 7 Positionierung der BZ-Systeme mit Integralträger und Montagekonzept**

Für die Unterbringung der Wasserstoffversorgung auf dem Busdach wurden verschiedene Konzepte, unter Berücksichtigung der notwendigen Reichweite und der Busausführung erarbeitet.

Nachfolgend sind Optionen für die Anordnung der H<sub>2</sub>-Tanks dargestellt.



**Abbildung 8 Tankvarianten**

Bei der Anordnung der Tanks in Längsausrichtung, können Tanks größer und damit mit mehr Volumeninhalt gefertigt werden. Bei gleichen Volumen müssten daher bei der Anordnung quer zur Fahrtrichtung mehr Behälter angebracht werden. Dies wiederum hätte zur Folge, dass in dieser Anordnung mehrere SIV-Ventile, SG-Ausgänge und Ansteuerungsleitungen usw. zu berücksichti-



gen sind. Deshalb gilt es hier die Synergieeffekte aus dem Pkw Programm (vorhandene Tankbehältergrößen) mit den für den Bus notwendigen Anforderungen unter Marktgegebenheiten (Zulieferer für große Tankbehälter) abzugleichen.

Um für beide Brennstoffzellensysteme die notwendige Kühlleistung im Bus sicherzustellen wurde im Hinterwagen eine entsprechend große Kühlanlage platziert.

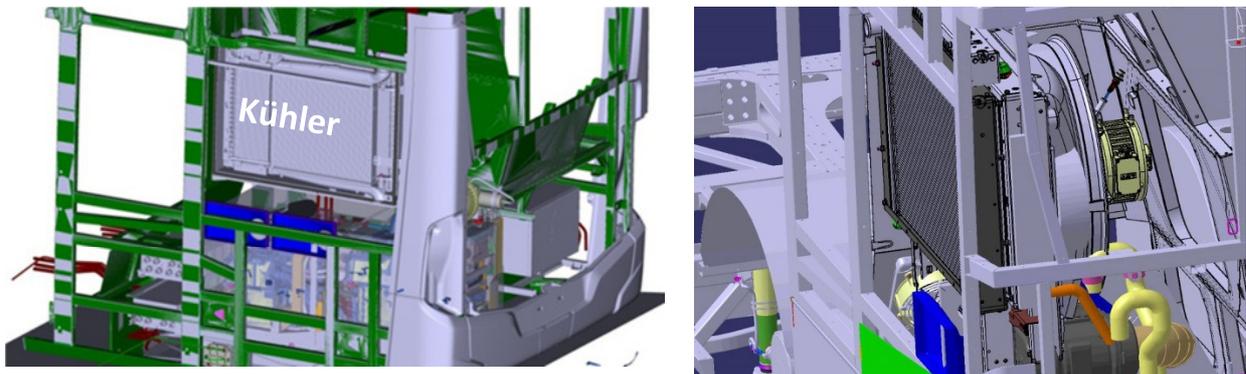


Abbildung 9 Kühlanlage Bus Hinterwagen

Das Kühlkonzept sieht vor, dass beide BZ-Systeme über ein gemeinsames Kühlaggregat mittels Wärmetauscher angebunden werden.

Für den Aufbau und Fertigung des Eingangs bereits erwähnten Integralträgers wurden neben dem CAD-Modell aufwendige Analysen vorgenommen, um die vorgegebenen Anforderungen zu erfüllen. Dazu wurden entsprechende FEM-Berechnungen (Finite Elemente Methoden) durchgeführt und in mehreren Iterationsschritten die Rahmenkonstruktionen optimiert.

Zum Abschluss des Arbeitspaketes wurde noch ein Demonstrationsmodell aufgebaut. Dieses sogenannte „Mock-up“ dient einerseits als Anschauungsobjekt, andererseits für zukünftige Einbauuntersuchungen des EvoBus Citaro Chassis.

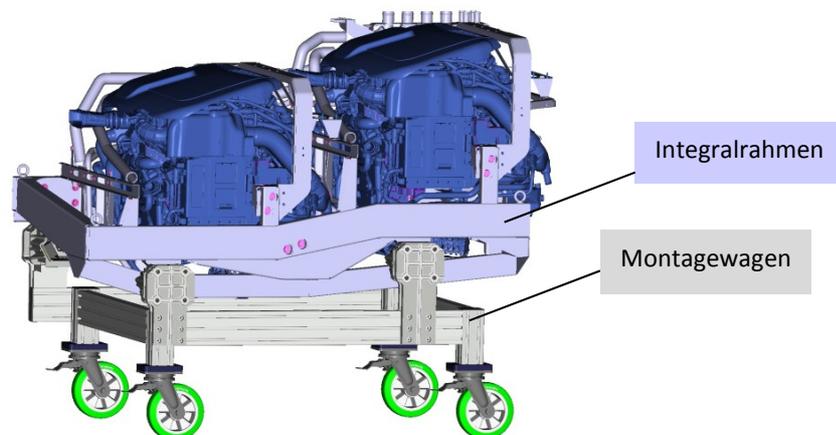


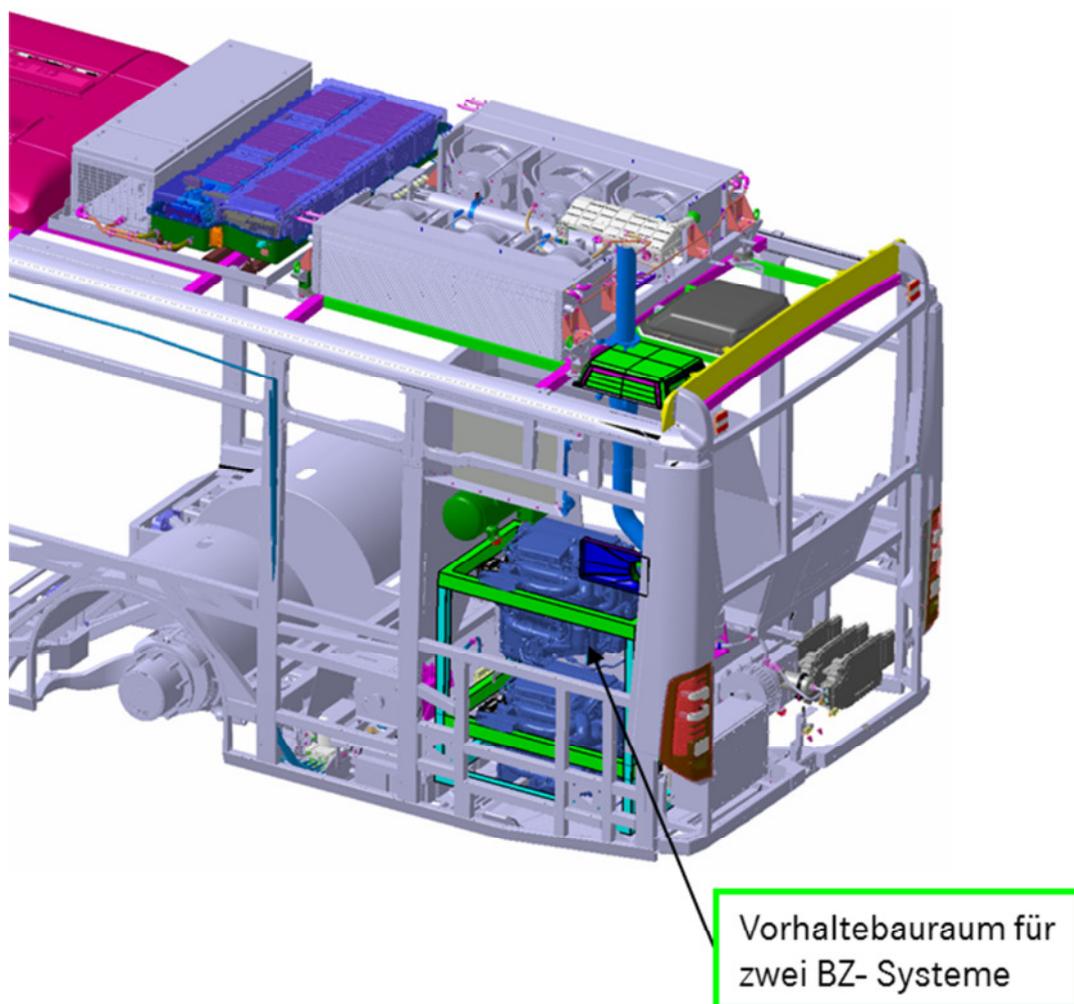
Abbildung 10 Demonstrationsmodell – Mock-up



### **AP 3100: Fahrzeugpackaging Citaro (EvoBus)**

In AP 3100 wurden dann für alle definierten Busecktypen Bauraum- und Packaging-Untersuchungen zur Integration des Heavy-Duty-BZ-Systems durchgeführt.

Das Packaging wurde in Bezug auf bus- und bauraumspezifische Randbedingungen (Servicefreundlichkeit, Erstmontage) optimiert. In Zusammenarbeit mit NuCellSys wurde ein Leitungsverlegungskonzept erarbeitet und die Systemschnittstelle zum Gesamtfahrzeug definiert. Der Aggregateträger wurde an die Packagingänderungen angepasst und ein Konzept für die fahrzeugseitige Anbindung ("Motorlagerung") erarbeitet



**Abbildung 11 Einheitsmotorraum für Solobus und Gelenkzug**



## AP 4000 FCS-Komponenten Anpassungsentwicklung

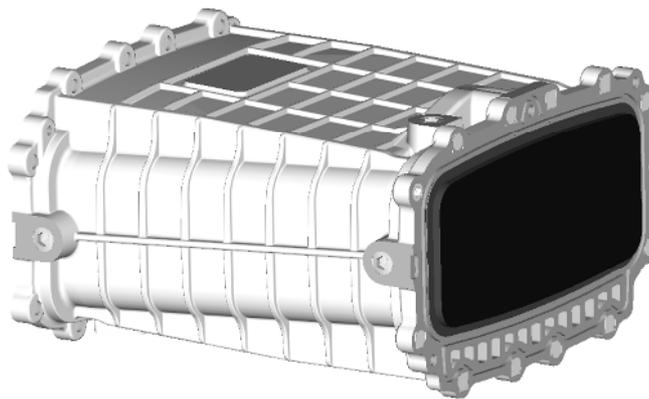
Zusätzlich zur Entwicklung eines galvanisch getrennten DC/DC Wandlers wurden folgende Komponenten, als lebensdauerkritische Bauteile weiterentwickelt und geprüft:

- Befeuchter
- ETC (Electric Turbo Charger)

Beides sind zentrale Bauteile des BZ-Systems und haben einen direkten Einfluss auf die Degradationsmechanismen des BZ-Stackmoduls.

### Befeuchter:

Ziel war es den Befeuchter so auszulegen, dass einerseits die Degradation über die Lebensdauer des Systems so gering wie möglich ausfällt und andererseits die spezifizierten Betriebsbedingungen des Brennstoffzellenstacks unter den gegebenen Anforderungen über die gesamte Lebensdauer eingehalten werden.



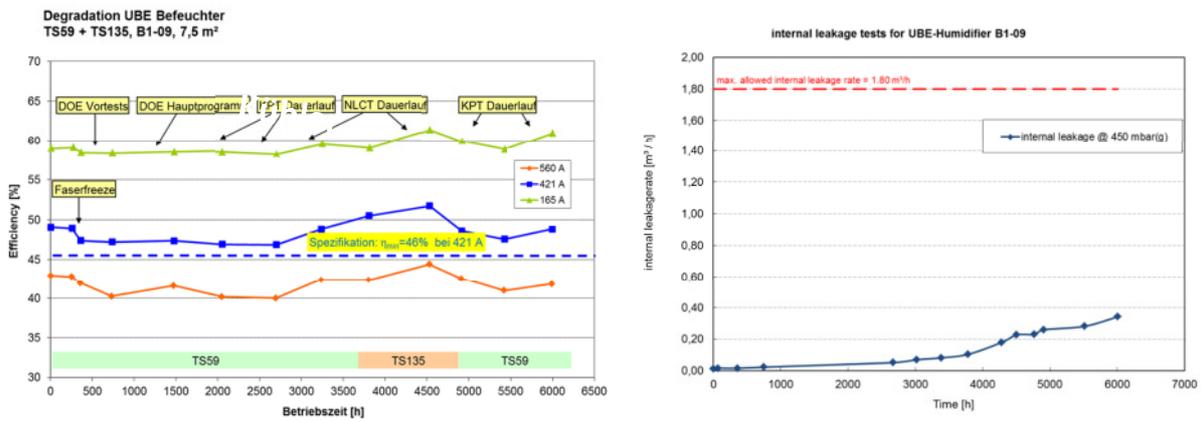
**Abbildung 12 B1-Muster Befeuchter**

Die untersuchten Kernparameter des Befeuchter sind die Druckverluste der Frisch- und Abluftseite, der Wirkungsgrad der Wasserübertragung und die interne Leckage Rate:

- Die Wasserübertragungsrate beschreibt die Hauptfunktion das Wasser aus der Abluft auf die Frischluft zu übertragen.
- Die interne Leckage gibt an, wie viel der Frischluft im Befeuchter auf die Abluftseite verloren geht.
- Die Druckverluste der Frischgasseite (trockene Seite) und der Abluftseite (nasse Seite) spielen für den Gesamtwirkungsgrad des Systems eine wichtige Rolle

Dazu wurde ein Befeuchtermodul 6.000 Stunden (inklusive Kaltstarts) lang auf einem Teststand betrieben, regelmäßige interne Auswertungen (Abbildung 13) und Analysen bezgl. der Parameter gemacht und danach zur Befundung an den Hersteller verschickt.

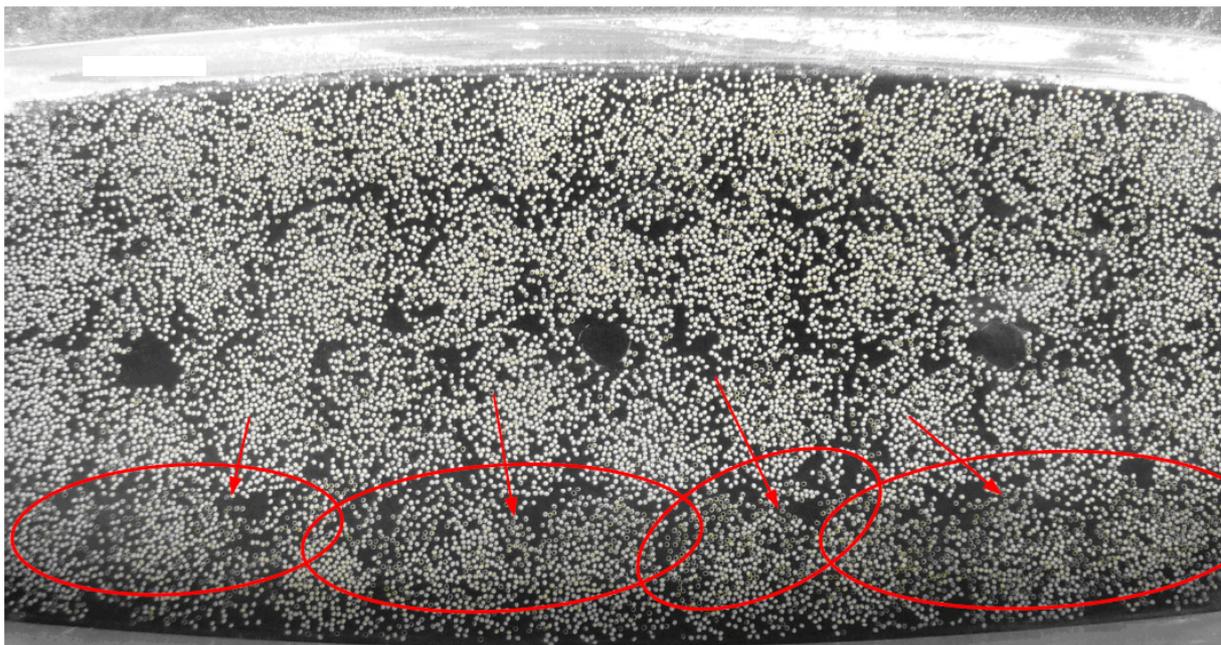




**Abbildung 13 Degradation und interne Leckage des Befeuchters**

Beim Hersteller bzw. Lieferant wurde der Befeuchter ebenfalls einem Leckagetest und einem Entfeuchtungstest unterzogen.

Zusätzlich wurde ein Pulveraustragstest (Abbildung 14) durchgeführt der eine detaillierte Analyse zur Leckage des Bauteiles und den Zustand der Fasern ermöglichte.



**Abbildung 14 Stirnfläche des Befeuchters mit geschädigten Fasern**

Ein ausführlicher Ergebnisbericht wurde vom Lieferant [16] erstellt.

Zusammenfassend lässt sich folgendes Fazit ziehen: Aufgrund der Ergebnisse im Teststand und der Befundung beim Lieferanten ist der Einsatz des Befeuchters für die hohen Lebensdauernforderungen in Bussen geeignet.



Der ETC (Electric Turbo Charger)

Der ETC dient zur Luftversorgung der Brennstoffzelle und zeigt sich vorteilhaft gegenüber anderen Luftversorgungskonzepten, vor allem durch die Leistungsdichte, die Bauraum- und Gewichtsvorteile, dem Geräuschverhalten, sowie der Energierückgewinnung aus der Abluft.



Abbildung 15 ETC B-Muster im Prüfstand

Die Abbildung 15 zeigt den ETC im Testbetrieb. Ziel der Tests war es den ETC diversen Betriebs- und Stressfaktoren auszusetzen, um damit die Tauglichkeit für den Busbetrieb nachzuweisen.

Dazu wurden zu den entsprechenden Betriebszuständen die einhergehenden potenziellen Stressfaktoren definiert, um dies dann in unterschiedlichen Testzyklen zu verifizieren.

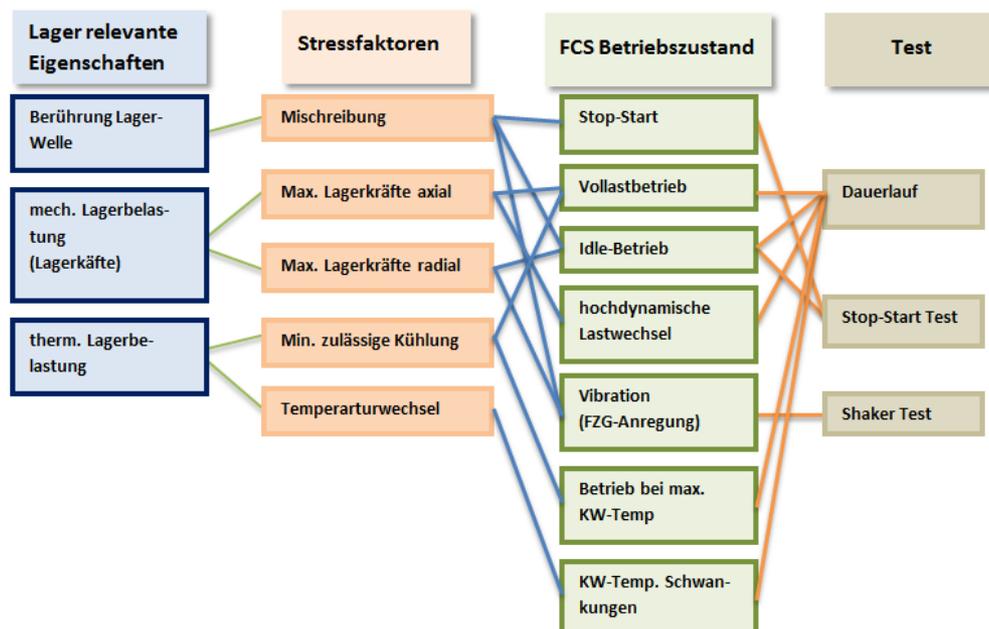


Abbildung 16 Betriebszustände und Stressfaktoren ETC



An Teststand wurde der ETC insgesamt über 2.658 Stunden betrieben, davon 1.912 Stunden im NLCT-Lebensdauerzyklus. Anschließend wurden für die verbliebenen 746 Stunden über 102.000 Start-Stopp-Zyklen durchgeführt.

Der Begriff NLCT steht für New Life Cycle Test. Er kombiniert sämtliche für die jeweilige Komponente relevanten Stressfaktoren, aus einer Vielzahl von Standard Fahrzyklen, in „einem“ Testzyklus. Hierbei werden die Anteile aus den Standardfahrzyklen, die die Stressfaktoren enthalten und am besten repräsentieren selektiert und zu einem Gesamtzyklus integriert, der letztendlich in einem „beschleunigten“ Testzyklus resultiert. D.h. durch kürzere Testzeiten können längere reale Laufzeiten abgebildet werden.

Nach Ablauf des oben beschriebenen Tests wurde eine umfangreiche Qualitätsanalyse des ETCs mit dem Lieferanten durchgeführt. Diese wurde in Form eines 8D-Reports, dokumentiert.

Nachfolgende Bilder (Abbildung 17 und Abbildung 18) zeigen aufgetretene Axiallagerschädigungen des ETCs.

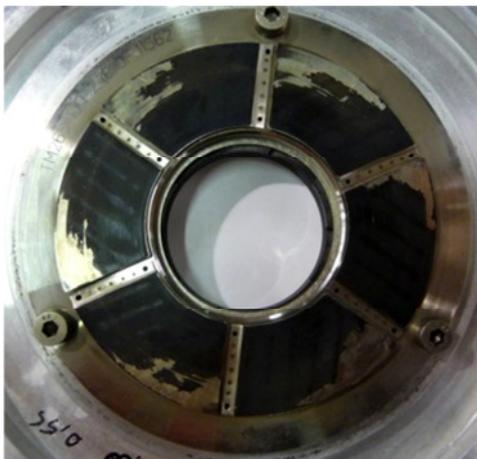


Abbildung 17 Abgelöste Teflon Schicht (B-Muster)

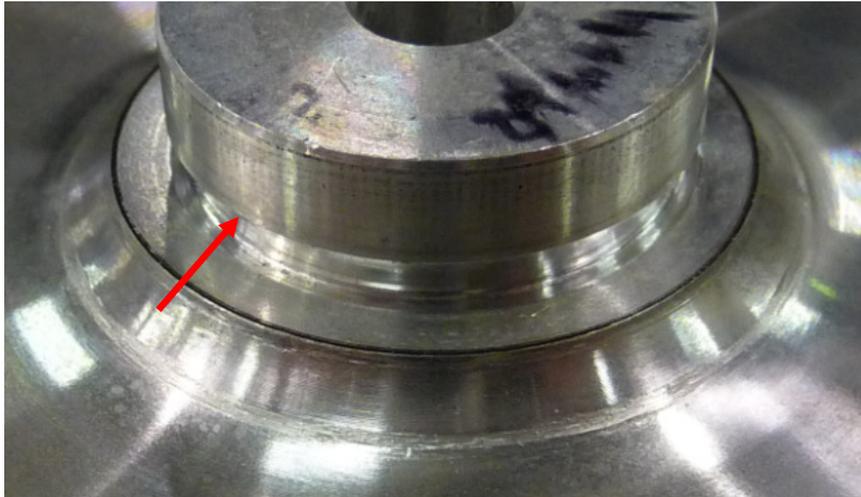


Abbildung 18 zerstörte Lagerflächen

Folgende Ursachen wurden im B-Musterstand festgestellt:

- Ablösung der Teflon Schicht aufgrund von Temperatureinflüssen
- Mechanische Berührung des Kompressorads mit der Teflonschicht
- Gebrochene Lagerdichtung aufgrund von Berührung zwischen Welle und Passscheibe
- Unzureichende Kühlung aufgrund von teilblockiertem Kühlauslass





**Abbildung 19 Mechanische Berührung Kompressor Rad mit der Teflon Schicht**

Durch eine Überarbeitung des Designs konnten diese Fehler behoben werden.

Die Wirksamkeit der Abstellmaßnahmen für die Lagerschäden wurden mit einem 300 h Volllasttest (300 h Dauerbetrieb bei maximaler Drehzahl) nachgewiesen. Dazu wurden zwei Testreihen mit und ohne Abstellmaßnahmen bei Volllast durchgeführt.

### **Ergebnis:**

In der ersten Testreihe gab es keine Ausfälle. In der zweiten Testreihe ohne Abstellmaßnahmen gab es nach kurzer Zeit Ausfälle der Komponenten zu verzeichnen. Ein ETC wies dabei eine Verschleißausprägung der Dichtungen aus, wie sie bereits an anderen baugleichen Komponenten festgestellt wurden.

Die ETCs mit Abstellmaßnahmen durchliefen den Volllasttest ohne Fehler. Somit ist in den Testreihen mit Abstellmaßnahmen keiner der ETCs ausgefallen. Damit wurden die Entwicklungsarbeiten am ETC innerhalb des Arbeitspaketes für eine Busapplikation erfolgreich abgeschlossen.



## Hardwareentwicklungen für den Hochvoltkreis

Es wurden mehrere Hardwareentwicklungen im AP 4000 durchgeführt:

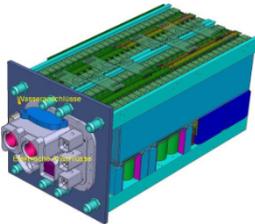
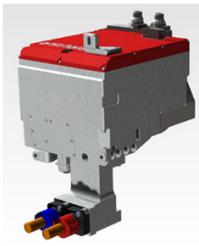
Name	HD-Wandler-Box	GIC246	BDC 546	CBX
Layout				
Aufgabe	Spannungsanhebung von BZ (170 - 400V)- auf das Bus (750V)-Spannungsniveau - galvanische Trennung -		Kopplung (mittels bestehender Komponenten) und Spannungsanhebung von BZ (170 – 400 V)- auf das Bus (750 V)- Spannungsniveau. - galvanisch <b>nicht</b> getrennt -	

Abbildung 20 Die Hardwareentwicklung im Überblick

Mit dem DC/DC-Konverter BDC 546 und der CBX wurden vorhandene Komponenten aus dem Pkw Entwicklungsprogramm – wie bereits im AP 2000 beschrieben - benutzt, um die BZ-HV-Anbindung an das Bus-Spannungsniveau zu realisieren. Für die Busanwendung wurden die Komponenten entsprechend modifiziert.

Der HV-DC/DC-Konverter BDC546 wurde mittels einer vorgegebenen Spezifikation [11] aufgebaut, getestet und geliefert. Bei diesem Wandler wurde beispielsweise das Regelungskonzept zu einer Spannungsregelung abgeändert und die Kommunikationsebene zusätzlich ausgebaut.

Die HD-Wandler-Box stellte die Vorentwicklungsstufe (Funktionsmuster), des GIC246 dar. Zahlreiche Erfahrungen der HD-Wandler-Box, wie ein geeignetes Packaging, konnten dann im GIC246 umgesetzt werden.

Durch die modulare Gestaltung des Wandlers konnte ein EMV-gerechter Aufbau (Trennung der Leistungs- und Steuerungsbereiche) erreicht werden. Weiterhin wurde beim Design eine möglichst gute Wärmeableitung der empfindlichen Halbleiterbauelemente berücksichtigt.



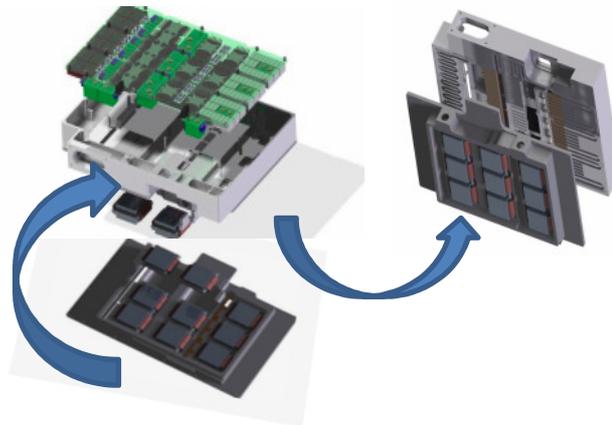


Abbildung 21 Modulares Packaging des GIC 246

Des Weiteren zeichnet sich die Neuentwicklung des GIC-Wandlers gegenüber der HD-Wandler-Box durch Reduzierungen des Gewichtes und des Volumens um ca. 40% aus, wie die folgende Abbildung zeigt:

	HD-Wandler-Box	GIC246
<b>Design</b>		
<b>Gewicht</b>	60 kg	ca. 28 kg
<b>Volumen</b>	33,8 l	ca. 20 l

Abbildung 22 DC/DC-Wandler im Vergleich

Ebenso wurde der GIC an das aktuelle BZ-Konzept bei der Entwicklung angepasst, d.h. er wurde auf einen bidirektionalen DC/DC-Wandler, mit galvanisch trennender Trafostufe reduziert (siehe Abbildung 24). Im Vergleich dazu beinhaltete die HD-Wandler-Box noch zwei unidirektionale Trafostufen.



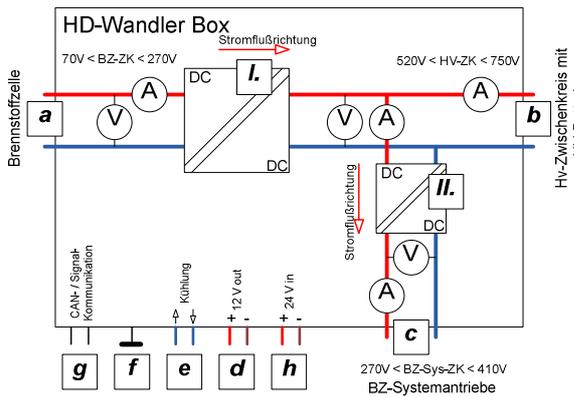


Abbildung 23 Schematischer Aufbau der HD-Wandler-Box

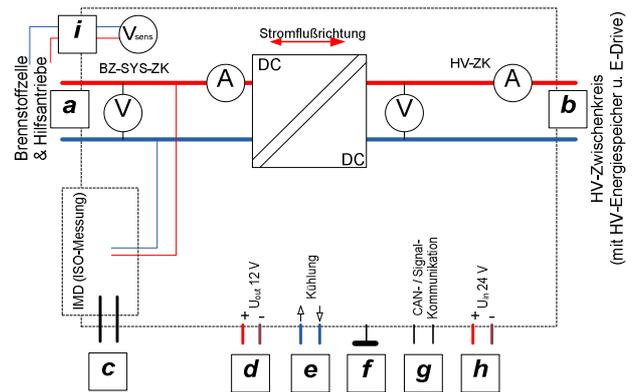


Abbildung 24 Schematischer Aufbau des GIC246 Wandlers

Um letztendlich das geeignete Leistungselektronikkonzept (galvanisch getrennt/gebunden für den Bus zu identifizieren, wurden die Konzepte mit Hilfe der DFSS-Methodik (Design for Six Sigma) betrachtet. 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.

0		TOP Kriterien:																		1						
		Regelgüte im BZ-Sys-ZK	Spannungsgradient BZ Hilfsantriebe	Isolationswiderstand	Spannungsgr. Bus HV Zwischenkreis	elektrischer Wirkungsgrad	Gewicht	Volumen	Kühlleistung	Reifegrad	geringere Komplexität	Entwicklungskosten	Produktkosten	Lebensdauer	Zuverlässigkeit	Reparaturfähigkeit	HV Sicherheitsmesstechnik	Verblockung	Verfügbarkeit der Konzepte	Robustheit	HV Sicherheit	Übertragbarkeit auf HY5adv /CFCP	Summe	Faktor	Rang	
Cluster																										
techn. Realisierbarkeit	Regelgüte im BZ-Sys-ZK	1	1	0	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1	0	2	31	7,8	5
techn. Realisierbarkeit	Spannungsgradient BZ Hilfsantriebe	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1	0	2	32	8,0	3
Homologation	Isolationswiderstand	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	39	9,8	2	
techn. Realisierbarkeit	Spannungsgr. Bus HV Zwischenkreis	1	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1	0	2	30	7,5	6
techn. Realisierbarkeit	elektrischer Wirkungsgrad	0	0	0	0	1	2	2	1	1	1	1	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	2	17	4,3	13
Packaging	Gewicht	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,3	21	
Packaging	Volumen	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,8	20	
techn. Realisierbarkeit	Kühlleistung	0	0	0	0	1	2	2	1	1	0	2	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	13	3,3	16	
Entwicklungsdauer	Reifegrad	0	0	0	0	1	2	2	1	1	0	2	1	1	1	2	2	2	1	1	0	0	20	5,0	11	
Packaging	geringere Komplexität	0	0	0	0	1	2	2	2	2	1	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	1	16	4,0	14	
Kosten	Entwicklungskosten	0	0	0	0	1	2	2	0	0	2	1	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0	13	3,3	16	
Kosten	Produktkosten	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	32	8,0	3	
Qualität	Lebensdauer	0	0	0	0	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	0	0	2	25	6,3	9	
Qualität	Zuverlässigkeit	1	1	0	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	0	2	29	7,3	8	
Packaging	Reparaturfähigkeit	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	7	1,8	18	
Kosten	HV Sicherheitsmesstechnik	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5	1,3	19	
Kosten	Verblockung	0	0	0	0	0	2	2	0	1	1	0	1	1	2	2	1	0	0	0	1	1	16	4,0	14	
Entwicklungsdauer	Verfügbarkeit der Konzepte	1	1	0	1	2	2	2	2	1	2	2	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0	23	5,8	10	
Qualität	Robustheit	1	1	0	1	2	2	2	2	1	2	2	0	2	1	2	2	2	2	1	0	2	30	7,5	6	
Homologation	HV Sicherheit	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	40	10,0	1	
techn. Realisierbarkeit	Übertragbarkeit auf HY5adv /CFCP	0	0	0	0	0	2	2	2	1	2	0	0	0	0	2	2	1	2	0	0	1	19	4,8	12	

Abbildung 25 Paarweiser Konzeptvergleich nach der DFSS Methode



Zunächst wurden dazu, im ersten Schritt, zahlreiche Kriterien definiert, miteinander verglichen, und unter Berücksichtigung geltender Normen, Sicherheitsvorschriften und Erfahrungswerten, zueinander gewichtet (siehe Abbildung 25).

Abbildung 26 weißt als Resultat dieser Vorgehensweise eine Rangfolge dieser Kriterien aus. In diesem Fall steht dabei die HV-Sicherheit an erster Stelle, gefolgt vom Isolationswiderstand usw.

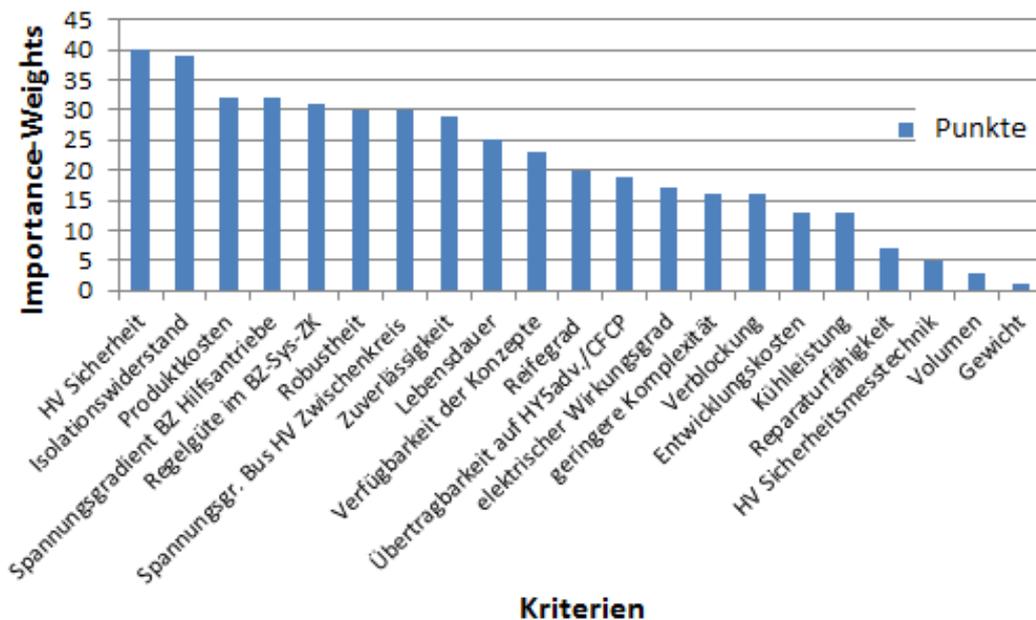


Abbildung 26 Rangfolge der Kriterien

Diese Kriterien wurden nun im Detail analysiert und bezüglich ihres Einflusses auf das entsprechende Konzept bewertet. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 27 graphisch aufbereitet. Die Kriterien sind in Cluster (farblich unterschiedlich) unterteilt, wobei die techn. Realisierbarkeit und das Packaging zusammengefasst wurden.

Das Konzept (CBX + BDC 546 Wandler/750 V Wandler) diene als Grundlage des Vergleichs.

Das LE-Konzept 3 besteht aus 2 galvanisch gebundenen Wandlern je BZ-System. Es bietet abweichend von der Basis einen verbesserten Wirkungsgrad, einen leichten Vorteil bei der Entwicklungsdauer und eine etwas bessere Zuverlässigkeit.

Im Cluster Homologation / Isolationswiderstand dagegen weißt dieses Konzept, vergleichsweise, seine Schwächen auf.

Das LE-Konzept 2 mit galvanisch getrennten Wandlern zeigt sich nachteilig im Bereich Wirkungsgrad und Reifegrad. Der Wirkungsgrad wird, physikalisch bedingt, immer eine geringere Effizienz als ein galvanisch gekoppeltes System aufweisen. Der Reifegrad hingegen kann zukünftig durchaus das Niveau der gekoppelten Systeme erreichen. Die Entwicklungskosten werden aufgrund des frühen Musterstandes etwas höher bewertet.



Die Vorteile des Konzepts 2 liegen in der HV-Sicherheit, dem Isolationswiderstand sowie der technischen Realisierbarkeit und der Qualität. Aufgrund der klaren Vorteile in diesen Kernbereichen ist dieses Konzept zukünftig zu favorisieren.

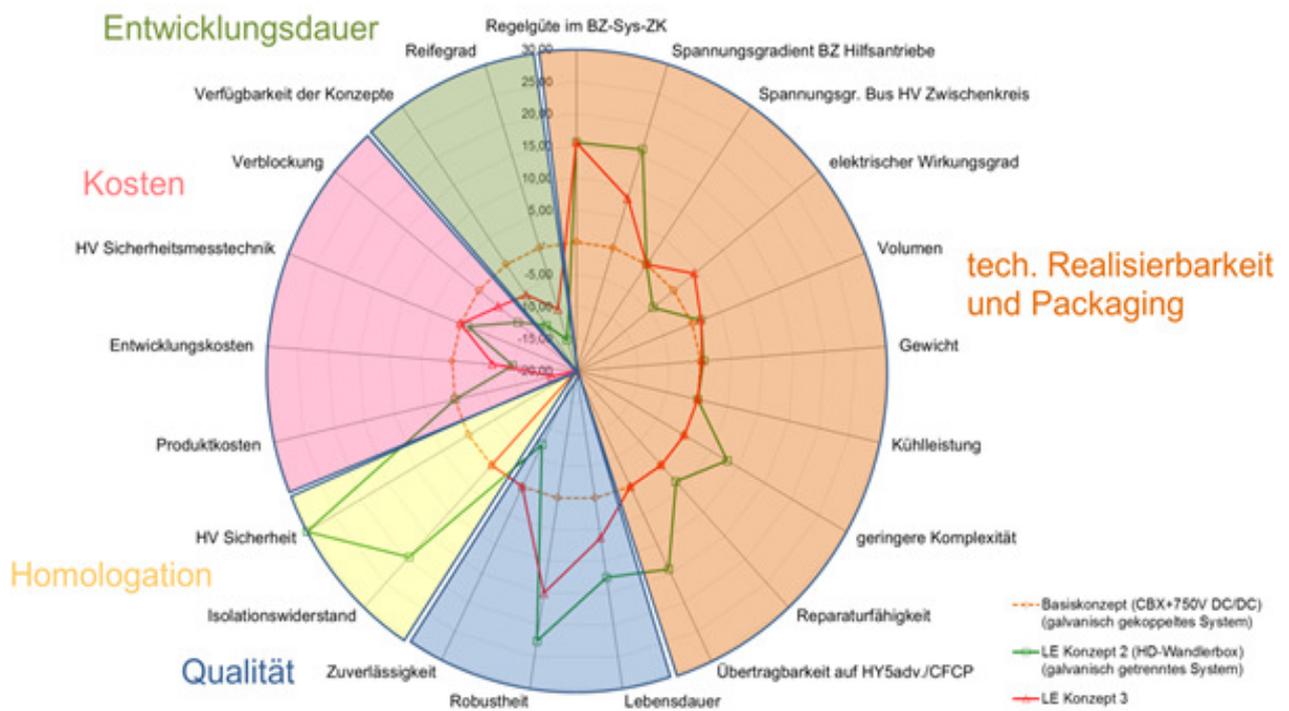


Abbildung 27 Konzeptvergleich im Netzdiagramm



## **AP 5000 Software Entwicklung**

Ziel des AP 5000 war es, die Software für den Betrieb eines Doppelbrennstoffzellensystems in einem neu aufgebauten Teststand zu erstellen. Des Weiteren wurden zahlreiche Softwareanpassungen für entsprechende „Zwischenlösungen“ bzw. geänderte Testbedingungen bei dem schrittweisen Aufbau des Teststandes und bei Komponententest erstellt. Ebenso wurden in diesem Arbeitspaket busspezifische Umfänge der Betriebsführung spezifiziert, entwickelt und geprüft.

Die Erstellung der SW-Spezifikation wurde entsprechend dem NuCellSys-Anforderungsmanagementprozess durchgeführt, der zu den elementaren Prozessen in der Software-Entwicklung gehört und auf den System-Reifegrad-Modellen CMMI und ISO/IEC 15504 (SPICE) basiert.

Die Erfordernisse wurden in dem Anforderungsmanagementwerkzeug DOORS (Server basierte Datenbank) eingepflegt und können im Sinne einer Rückverfolgbarkeit in Beziehung gesetzt werden. Das Werkzeug unterstützt die zentrale Steuerung, Kontrolle und Verwaltung von Anforderungen, also Risikomanagement, Änderungsmanagement und Umsetzungsmanagement.

Die Anforderungsdokumentation wurde während des gesamten Projektverlaufs aktualisiert und diente am Ende als Grundlage für die Erstellung von Testfällen.

Eine wesentliche Kernaufgabe liegt im Betrieb von zwei parallel eingesetzten Brennstoffzellensystemen, in der Verteilung der angeforderten Gesamtlast auf die einzelnen Systeme, dem sogenannten Last-Management.

Die Aufgaben des Last-Managements sind die Vorhersage der möglichen Brennstoffzellensystemleistung, die Berechnung des systeminternen Sollwerts für die Brennstoffzellenversorgung und die Freigabe der angeforderten Nettoleistung.

Zunächst lag die Annahme zu Grunde eine Gleichverteilung auf beide Systeme sei die bevorzugte Betriebsform. D.h. nur bei Beschränkungen eines Systems, wie z.B. Überhitzung eines Wandlers, wurde die Last, sofern möglich (maximale Last nicht erreicht), vom anderen, zweiten System bereitgestellt.

Um diese Annahme zu bestätigen wurde eine andere Form der Lastverteilung, nämlich die wirkungsgradoptimierte Lastverteilung geprüft.

Aufgabe war es, die Lastverteilung über den ganzen Lastbereich so festzulegen, damit das Optimum für den Gesamtwirkungsgrad des Dualsystems erreicht wird.

Für diese Aufgabenstellung wurde im ersten Schritt der Wirkungsgrad vom gesamten Brennstoffzellensystem mit den Wandlern ermittelt.



Die Vorgehensweise ist in Abbildung 28 dargestellt.

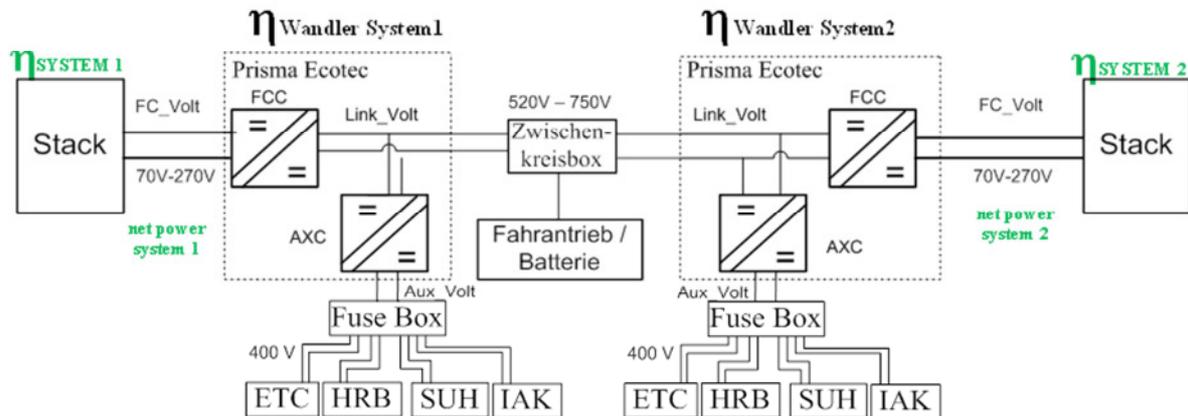


Abbildung 28 Wirkungsgrade des Dual-Brennstoffzellensystems

Danach wurden in mehreren Iterationsschritten die Wirkungsgrade eines einzelnen Systems mit und ohne Wandler (Abbildung 29) berechnet:

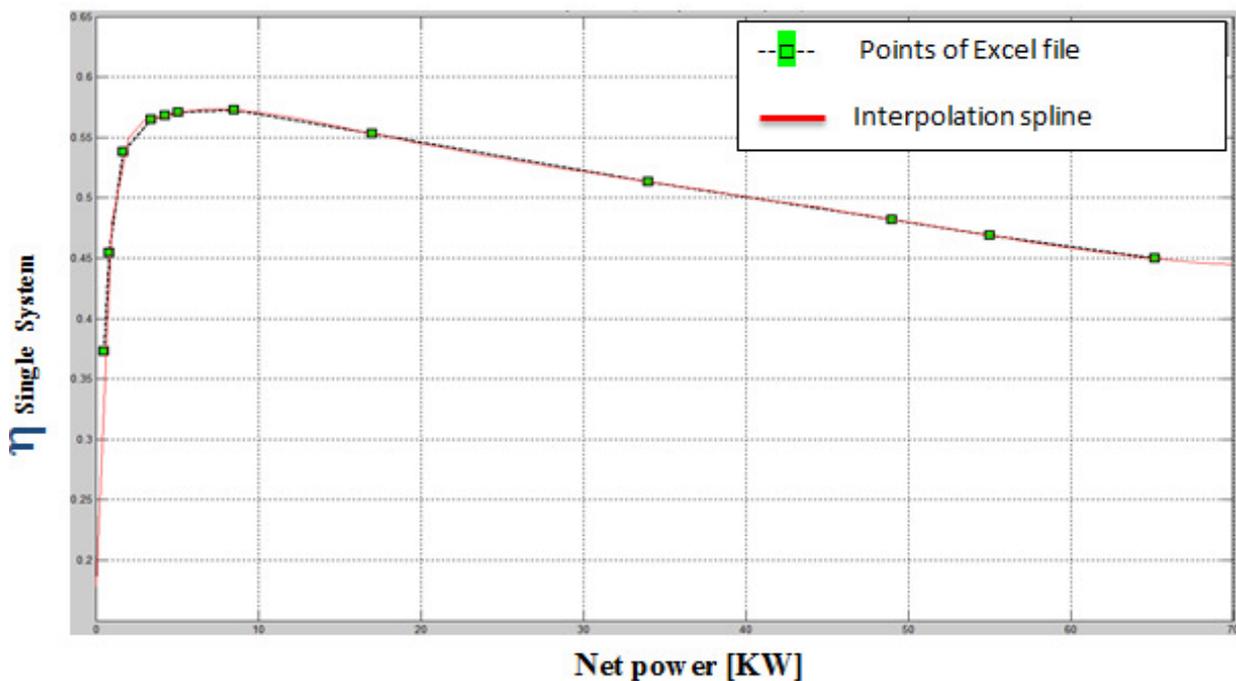


Abbildung 29 Wirkungsgrad eines BZ-Single-Systems

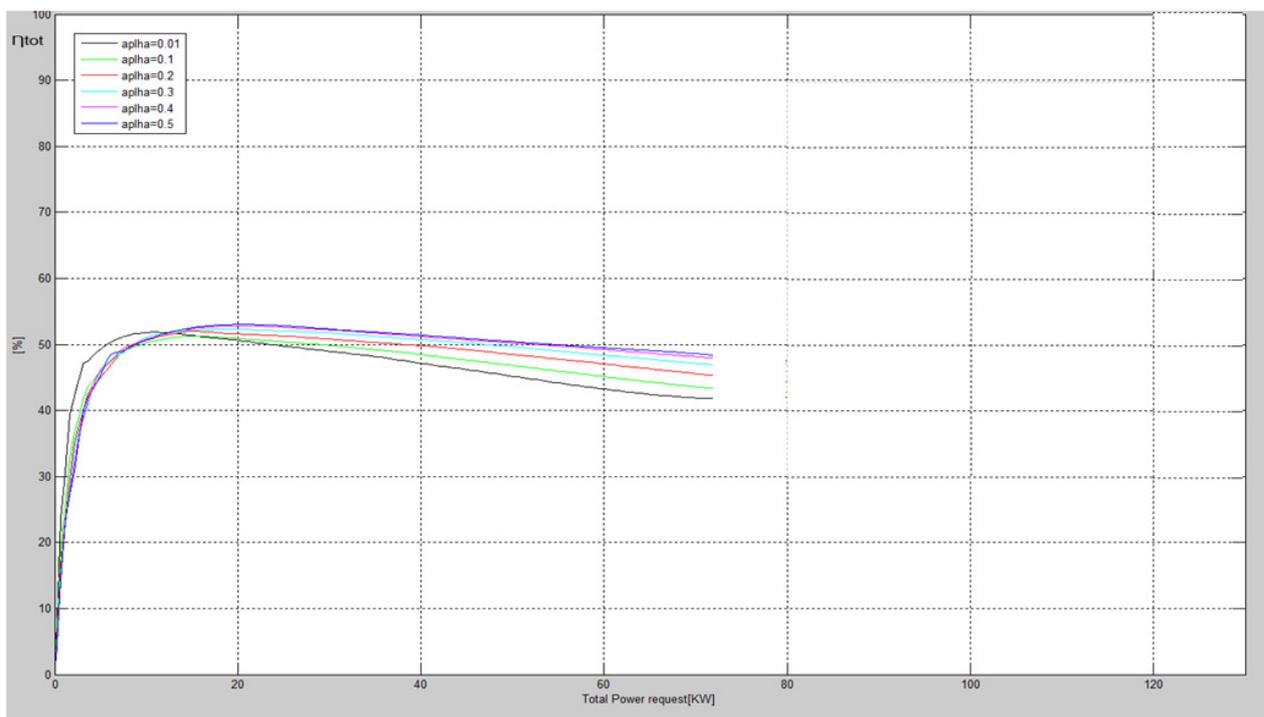
Im zweiten Schritt wurde ein Simulationsmodell mit Matlab/Simulink entworfen. Mit Hilfe dieses Modells wurde dann die Gesamtlastanforderung für die beiden Systeme schrittweise (in Schritten von 0,5 kW) von 0 kW bis 130 kW erhöht.



Dieses wirkungsgradoptimierte Lastverteilungsprofil ist in Abbildung 30 dargestellt. Dabei wird der Gesamtwirkungsgrad  $\eta$  des Dualsystems in prozentualer Abhängigkeit von „alpha“ (Verteilung der Last auf die beiden Systeme) über den Lastbereich dargestellt.

Ein „alpha“ von 0,5 bedeutet somit, dass beide Systeme mit derselben Last beaufschlagt werden. D.h. bei z.B. 70 kW Gesamtlastanforderung, werden von jedem System 35 kW bereitgestellt.

Es zeigte sich hierbei, dass der größte Wirkungsgrad über den gesamten Lastbereich, bei einer Gleichverteilung auf die beiden Brennstoffzellensysteme (50:50) erreicht wird. In Abbildung 30 wird dies anhand der blauen Kurve deutlich.



**Abbildung 30 Wirkungsgradoptimierte Lastverteilung**

Als Software-Entwicklungsumgebung wurde ein auf Matlab/Simulink basierendes Rapid Controls Prototyping (RCP) Echtzeit-System eingesetzt.

Die Funktionssoftware wurde beim RCP-System, mittels der xPC-Target-Software der Firma MathWorks in einen echtzeitfähigen Code gewandelt und auf einem PC ausgeführt.

Ein zusätzlich benötigtes Steuergerät (Gateway), diente einerseits dem Einlesen der Sensoren und andererseits der Ansteuerung der Aktuatoren.

Der Realtime-PC selbst besitzt keine Ein- und Ausgangstreiber.

Als Kommunikationsinstrument zwischen dem Gateway und dem Realtime-PC diente der CAN-Bus.



Der Aufbau des RCP-Systems ist nachfolgend grafisch dargestellt:

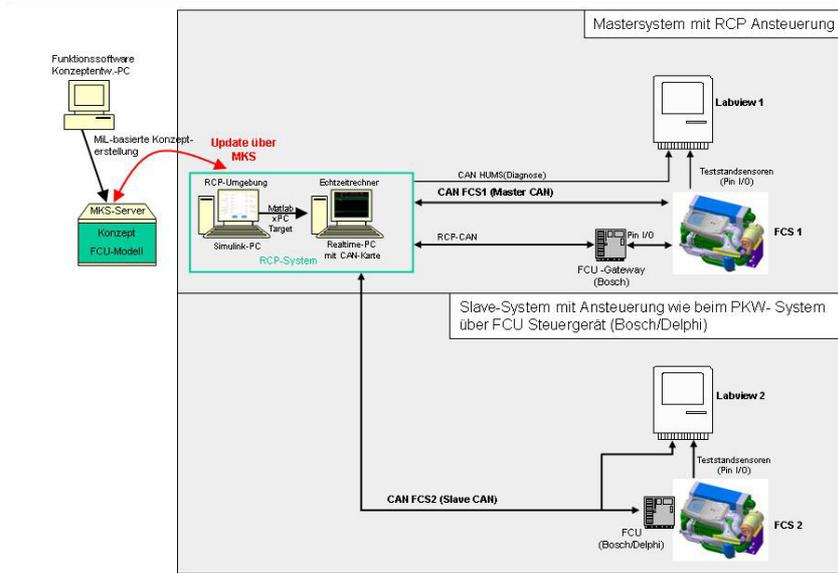


Abbildung 31 RCP-System

Als Testumgebung für die Hardware diente der HiL-(Hardware in the Loop)-Prüfstand.

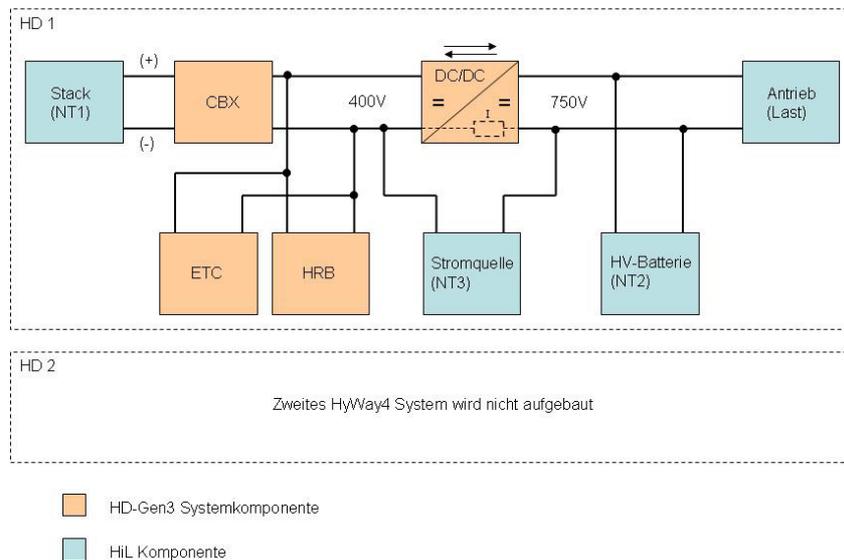


Abbildung 32 Schaltbild HiL-Konzept

Dieses diente einerseits für Vortests der angelieferten Wandler (aus AP 4000), um deren Eignung für den Teststandbetrieb nachzuweisen (Schwingverhalten, Spannungsfestigkeit, etc.) und andererseits, um erstellte Softwaremodule (CAN-Signale usw.) zu verifizieren. Der Antrieb wurde hierbei durch eine NetZRückspeisung (NR) realisiert. Die HV-Batterie, die Brennstoffzelle und die Stromquelle wurden durch Netzteile (NT) simuliert, um die Leistungselektroniken mit realen Spannungen und Strömen belasten zu können.

Abschlussberichtbericht: Förderkennzeichen: 03BV114A

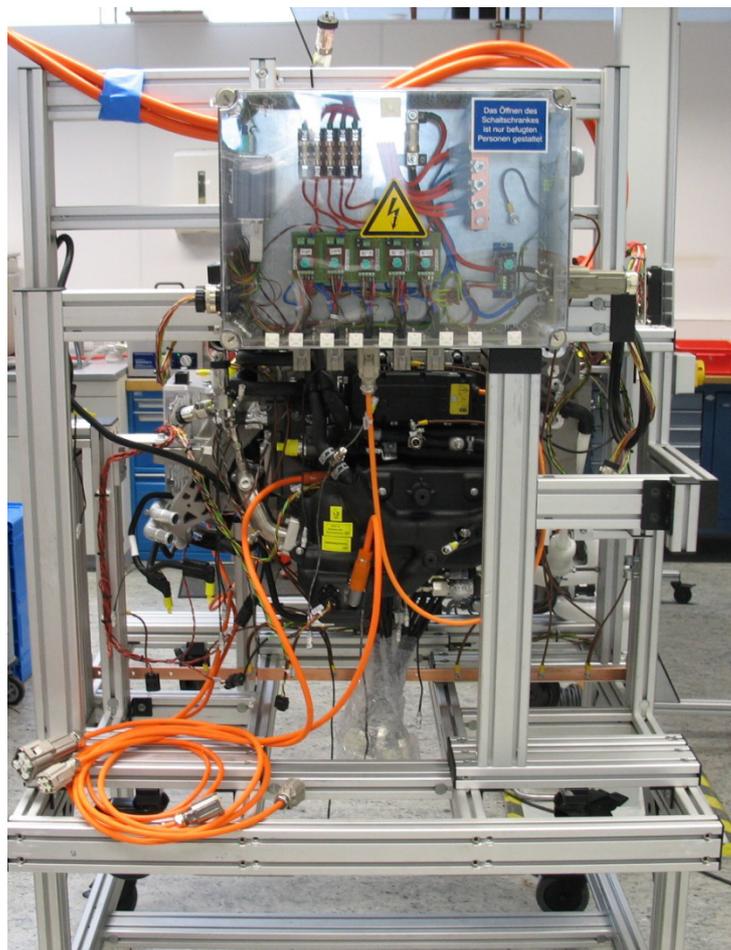


## **AP 6000 Montage, Prüfung und Prozessentwicklung**

Im AP 6000 wurden die Aufbauten (Montage) im Prototypenbau errichtet. Ebenfalls wurden Reparaturen, Prüfungen und Ein-/Umbauten auf neue Entwicklungsmusterstände im und um das BZ-System ausgeführt.

Nachfolgende Abbildung 33 zeigt den Aufbau eines Brennstoffzellensystems, bestehend aus dem Stack und dessen weiteren Komponenten im Rahmenträger.

Die Verkabelung und die Rohrleitungsverbindungen, sowie die Anschlüsse der Messsensoren wurden nach Angaben aus dem verfahrenstechnischen Fließbild erstellt.



**Abbildung 33 BZ-System in B2-Muster-Konfiguration**

Gegen Ende des Projektes wurde ein Demonstrationsmodell angefertigt. Dabei wurden die originalen B-Muster BZ Systeme aus dem Busprüfstand verwendet. Die Komponenten wurden mit den zugehörigen Schläuchen (Rapid Prototyping) und den Aluminium Rohrleitung versehen. Ebenso wurde die komplette elektrische Verkabelung hochvoltseitig und 12 V seitig umgesetzt.

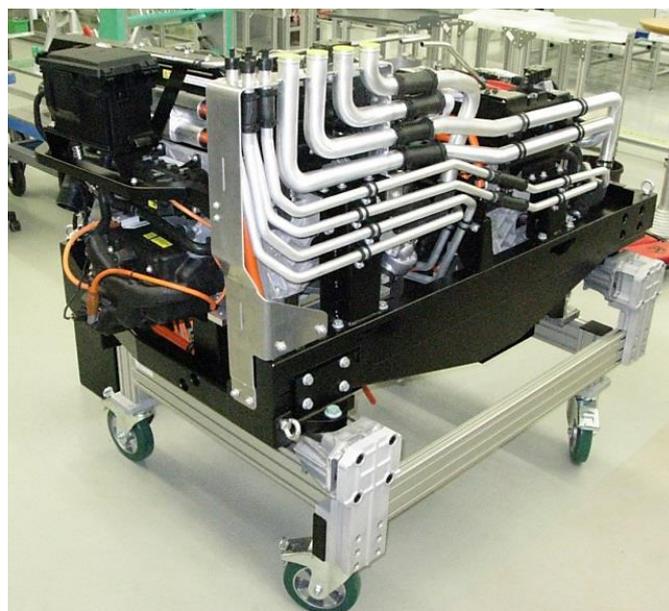


Beim Zusammenbau wurde die Gesamtkonstruktion auf Zugänglichkeit und Servicefreundlichkeit untersucht.

Der Ausbau des kompletten BZ-Systems im späteren Fahrzeugeinsatz (Busbetrieb) wird unumgänglich sein. Der hohe Packaginggrad des BZ Systems, beim vorgegebenem Bauraum, ermöglicht nicht den Austausch jeder Komponente bei eingebautem Komplettsystem im Bus Hinterwagen. Ziel ist es, bei zukünftigen Konzepten die Zugänglichkeit und somit die Servicefreundlichkeit weiter zu erhöhen, da bei der Busapplikation die geforderte Lebensdauer über den Nutzungszeitraum nur durch Tausch von Komponenten erreicht werden kann.



**Abbildung 34 Demo-System**



**Abbildung 35 Schnittstellenansicht des Demo-Systems**



## AP 7000 Test/Verifikation Heavy-Duty-BZ-System

Aufgabe im AP 7000 war der Aufbau eines Dualteststandes für die anschließenden Tests der beiden Brennstoffzellensysteme im Dualbetrieb. Die beiden nachfolgenden Bilder zeigen den Teststand in der frühen Aufbauphase.

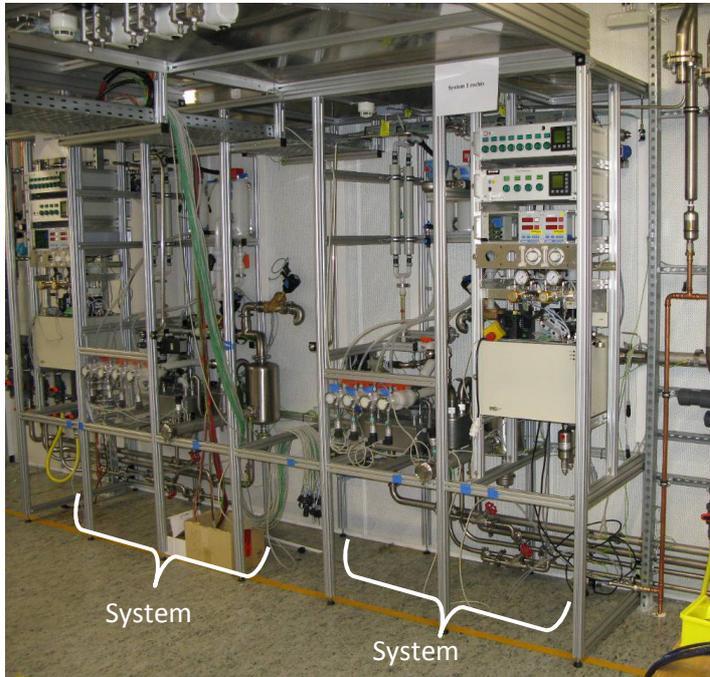


Abbildung 36 Teststand in der Aufbauphase



Abbildung 37 Leitwarte

Und Abbildung 38 zeigt bereits den komplett aufgebauten Teststand TS146.

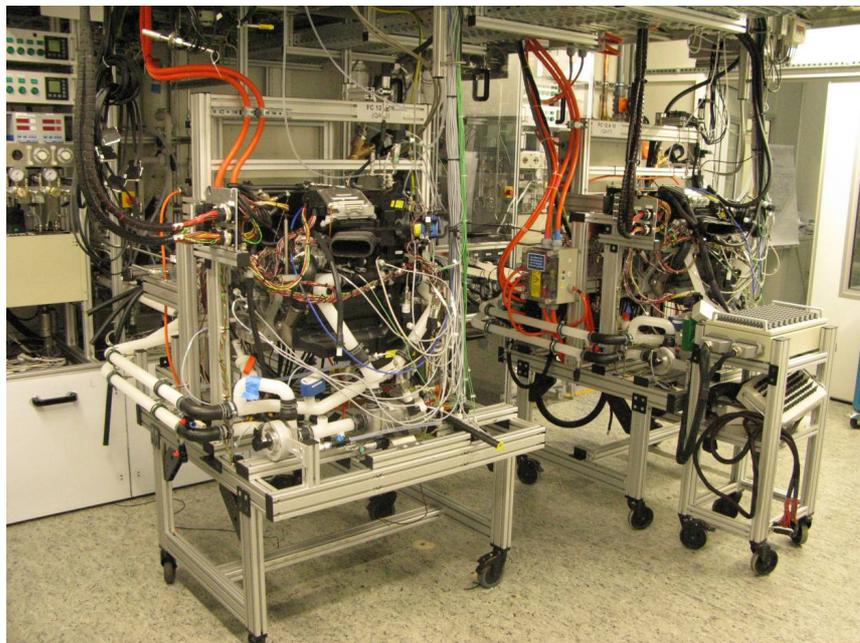


Abbildung 38 Teststand mit Dual-BZ-System



Alle durchgeführten Teststandsversuche wurden in einer Versuchsplanungsdatenbank (VESPA), beschrieben und dokumentiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Testabschnitt des Dual-Prüfstands für die Inbetriebnahme der DC/DC-Wandler und der Isolationsmessung.

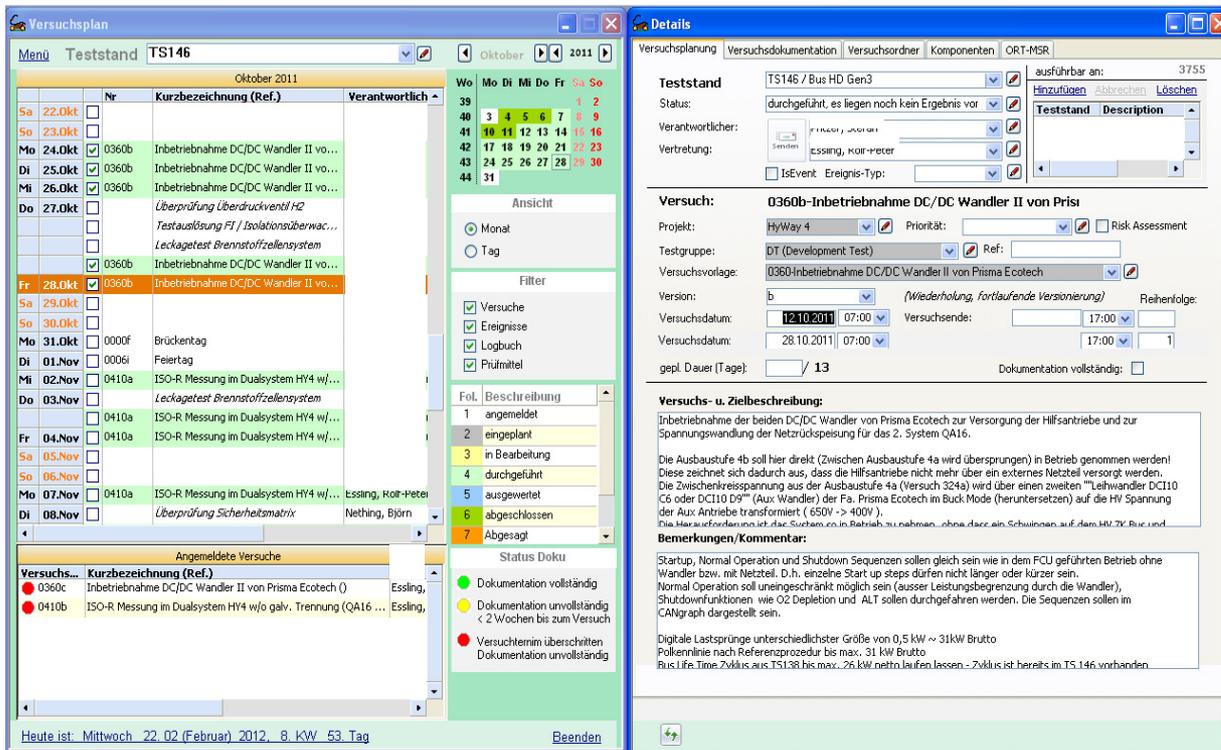


Abbildung 39 Auszug aus VESPA der Versuchsplanungsdatenbank

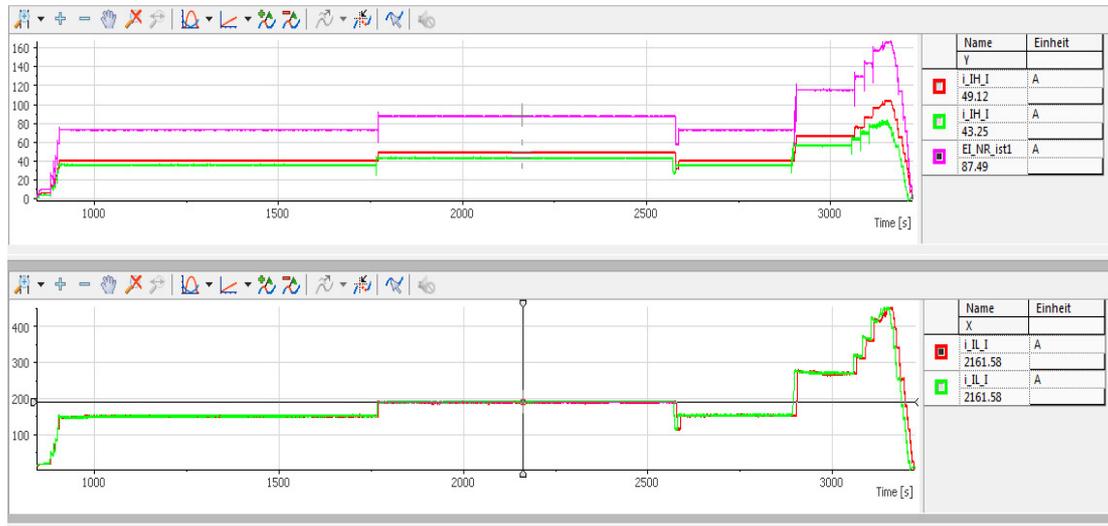
Wie Abbildung 39 zeigt wurden (linksseitig) die Termine der geplanten Versuche, sowie der Status der angemeldeten Versuche mit Kurzbezeichnung erfasst. Die rechte Bildhälfte zeigt die dazugehörigen Versuchs- und Zielbeschreibungen der Tests. Dadurch konnten jederzeit alle Arbeiten und Tests lückenlos zurückverfolgt werden.

Nach den zahlreichen Vorabtests und einigen Zeitverschiebungen aufgrund von Schwierigkeiten mit den Wandler-Boxen (wie eingangs bereits erwähnt) konnte der Dualbetrieb inkl. HD-Wandler-Boxen, begonnen werden. Abbildung 40 zeigt im oberen Diagramm einen zeitlichen Ausschnitt des Dualbetriebs der beiden Systeme.

System 1 (rote Kennlinie) und System 2 (grüne Kennlinie) haben dabei nahezu identische Zwischenkreisstromverläufe. Der elektrische Gesamtstrom (Kennlinie in magenta) ist die Summe der beiden einzelnen FCS-Systeme.

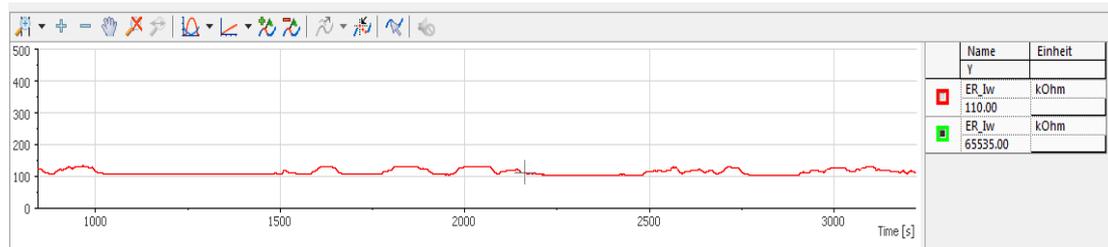


Das Gesamtsystem wurde dabei erstmals im Volllastbetrieb getestet. Im unteren Diagramm sind die „reinen“ Stackströme der beiden Systeme dargestellt.



**Abbildung 40 Dualbetrieb Stromverlauf**

Das nachfolgende Diagramm zeigt den Isolationswiderstand des HV-Zwischenkreises. Es bestätigt die Funktion der galvanischen Trennung der BZ-Systeme vom HV-Zwischenkreis.



**Abbildung 41 Dualbetrieb Isolationsmessung**

Nach einer kurzen Teststandslaufzeit zeigten die HD-Wandlerboxen diverse Schwächen (Über-temperatur, Isolationleckagen, Defekte an Thyristoren etc.). Diese wurden daher zur Reparatur an den Lieferanten zurück gesendet.

Um jedoch keine weiteren Verzögerungen im Testablauf zu verursachen wurde die Konfiguration des Teststands geändert:

- Die Versorgung der Hilfsaggregate findet mittels einem HV-Netzteil statt.
- Der Stackstrom wird direkt an die NetZRückspeiseeinheit geführt



# TS146: SYSTEM 1 & 2

Baustufe 1) ohne Wandler  
nur Single-Betrieb möglich – dargestellt ist Single-System 1

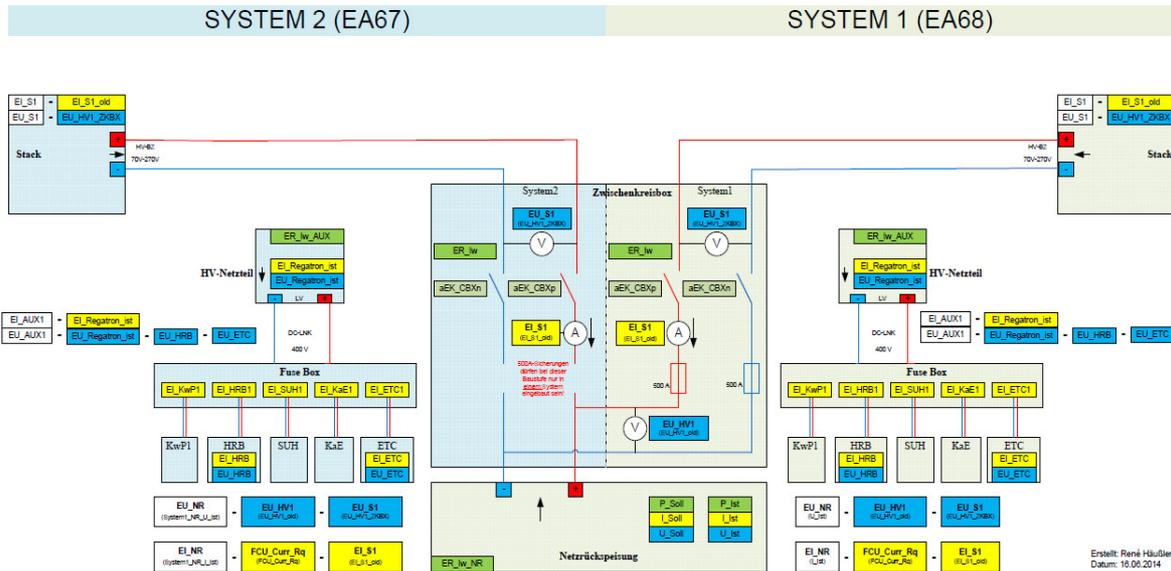


Abbildung 42 Schematischer Aufbau des dualen Prüfstandes mit BZ-Systemen

In dieser Konfiguration war jedoch kein Dualbetrieb mehr möglich. So dass der geplante Langzeit-test mit den Brennstoffzellensystemen sequentiell durchgeführt werden musste. Der Testablauf wurde daher neu terminiert und auf die geänderten Rahmenbedingungen angepasst.

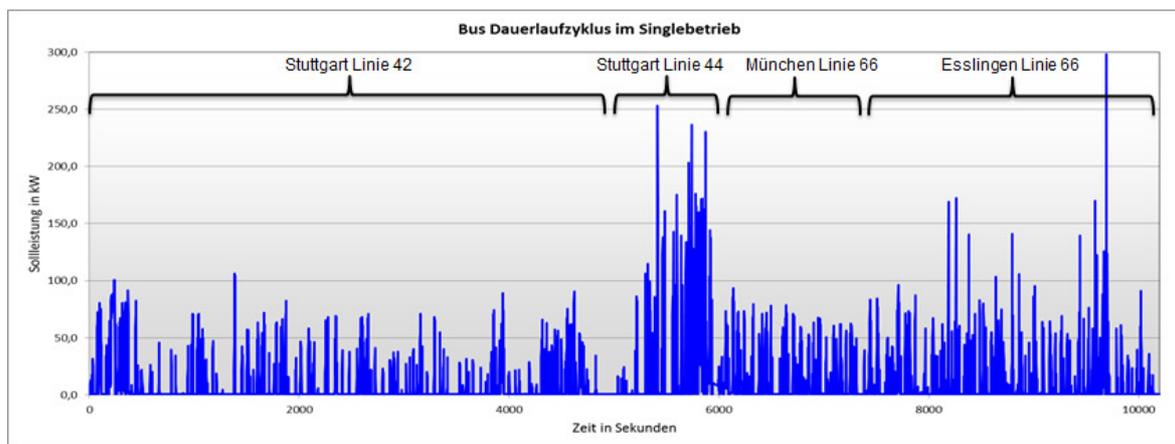


Abbildung 43 Dauerlaufzyklus

Abbildung 43 zeigt den Zyklus für den Dauerlaufstest, dieser setzt sich aus 4 Buslinienprofilen zusammen, die täglich gefahren werden. Dadurch wird der Test sehr realitätsnah durchgeführt.

Ebenfalls wurden die realen Pausenzeiten in den Zyklus implementiert, die in der nachfolgenden Abbildung als „Soak“ bezeichnet werden.



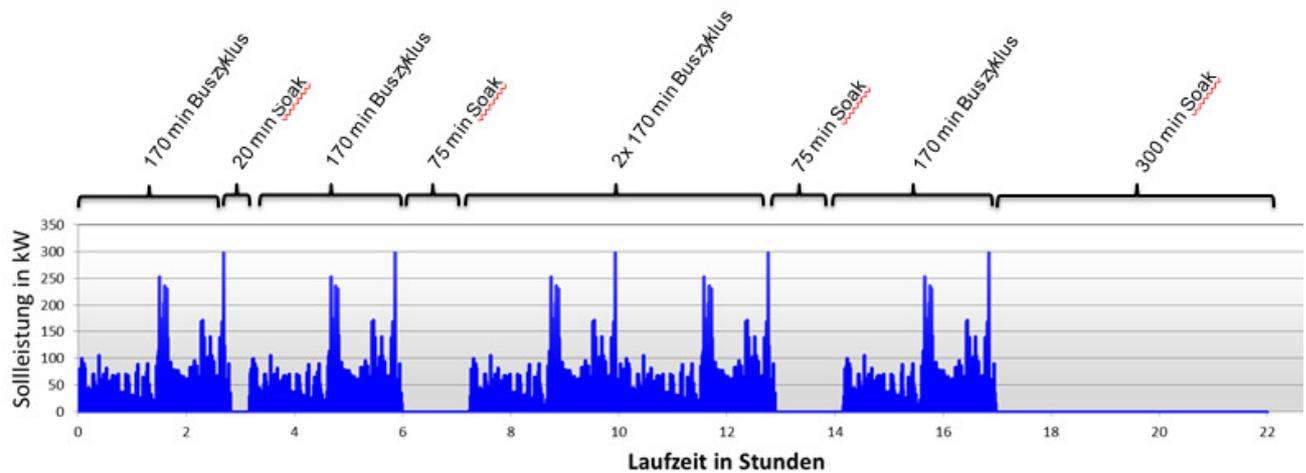


Abbildung 44 Laufzeit über 24 Stunden

Abbildung 45 zeigt eine Zusammenfassung der definierten Maßnahmen, sowie den Plan der durchgeführten Tests.

Measures	System 1 (FC83C)	System 2 (FC82C)	Duration[h]	Sum[h]	Parameterchange
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage Clipping</li> <li>Dry Shutdown</li> <li>less cold AAS / Soak Protection</li> <li>cooling water temperature reduction</li> </ul>	Yes Yes Yes 60°C Testblock 0934a ✓	Yes Yes Yes 60°C Testblock 1148a ✓	24 (1Tageszyklus)	24	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standard settings: dynamic: 1,7 sec.</li> <li>SD time reduced to 20 sec.</li> <li>close valve exhaust line (soak-time)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage Clipping</li> <li>Dry Shutdown</li> <li>less cold AAS / Soak Protection</li> <li>cooling water temperature reduction</li> </ul>	Yes Yes Yes 60°C Testblock 0934b	Yes Yes Yes 68°C Testblock 1148b	500*	524	<ul style="list-style-type: none"> <li>adapt humidifier characteristic curve</li> <li>change cooling water temperature</li> <li>close valve exhaust line (Soak)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage Clipping</li> <li>Dry Shutdown</li> <li>less cold AAS / Soak Protection</li> <li>cooling water temperature reduction</li> </ul>	Yes Yes Yes 60°C Testblock 0934c	Yes Yes Yes 60°C Testblock 1148c	300*/ 300**	824	<ul style="list-style-type: none"> <li>adapt humidifier characteristic curve</li> <li>Change cooling water temperature</li> <li>close valve exhaust line (soak-time)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage Clipping</li> <li>Dry Shutdown</li> <li>less cold AAS / Soak Protection</li> <li>cooling water temperature reduction</li> <li>Dynamic: Steady State-controls (SOC)</li> </ul>	Yes Yes Yes 60°C Yes (20 sec.) Testblock 0934d	Yes Yes Yes 60°C 1,7 sec. Testblock 1148d	300**	1124	<ul style="list-style-type: none"> <li>close valve exhaust line (soak-time)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage Clipping</li> <li>Dry Shutdown</li> <li>less cold AAS / Soak Protection</li> <li>cooling water temperature reduction</li> <li>Dynamic (max. load)</li> </ul>	Yes Yes Yes 60°C 1,7 sec. (unchanged) Testblock 0934e	Yes Yes Yes 60°C 1,7 sec. Testblock 1148e	300**	1424	<ul style="list-style-type: none"> <li>dynamic change to 1,7 sec. (standard)</li> <li>close valve exhaust line (soak-time)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage Clipping</li> <li>Dry Shutdown</li> <li>less cold AAS / Soak Protection</li> <li>cooling water temperature reduction</li> </ul>	Yes Yes Yes 60°C Testblock 0934f	Yes Yes No 60°C Testblock 1148f	300**	1724	<ul style="list-style-type: none"> <li>open valve exhaust line EA 67</li> <li>close valve exhaust line (soak-time) EA 68</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltage Clipping</li> <li>Dry Shutdown</li> <li>less cold AAS / Soak Protection</li> <li>cooling water temperature reduction</li> </ul>	Yes Yes Yes 60°C Testblock 0934g	Yes Yes Yes 60°C Testblock 1148g	300**	2024	<ul style="list-style-type: none"> <li>close valve exhaust line (soak-time)</li> </ul>

Abbildung 45 Dauerlaufstest

Bis zum Abschluss des Berichtszeitraums konnten sowohl mit System 1, als auch mit System 2 Betriebszeiten von über 500 Stunden demonstriert werden.



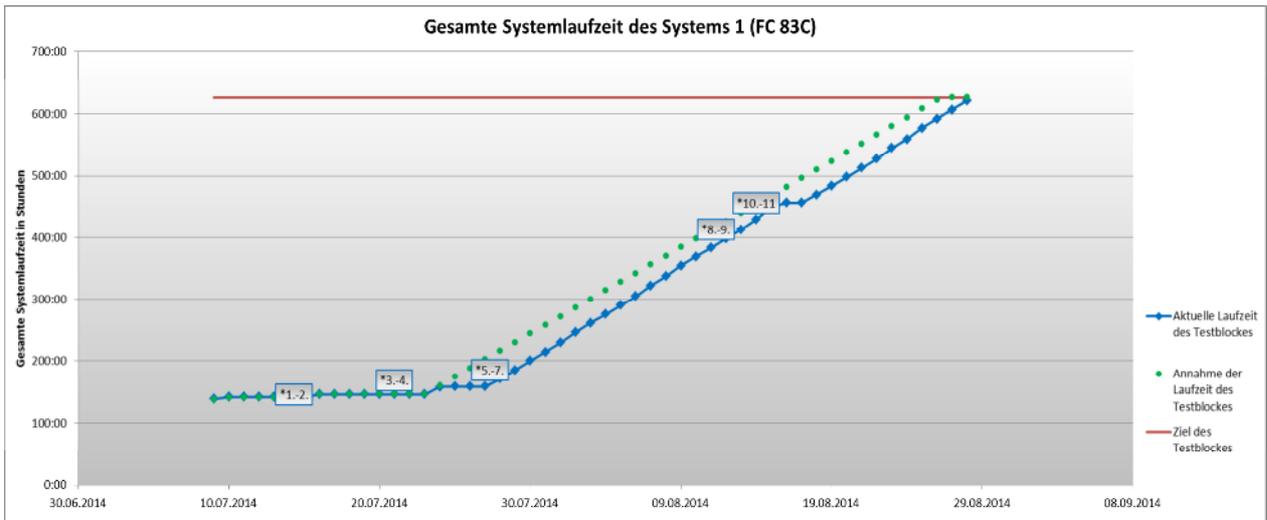


Abbildung 46 Systemlaufzeit System 1

In den Grafiken ist der nahtlose Übergang des Testablaufes von System 1 zu System 2. erkennbar. Der Test von System 2 beginnt ohne zeitliche Verzögerung im Anschluss an jenen von System 1.

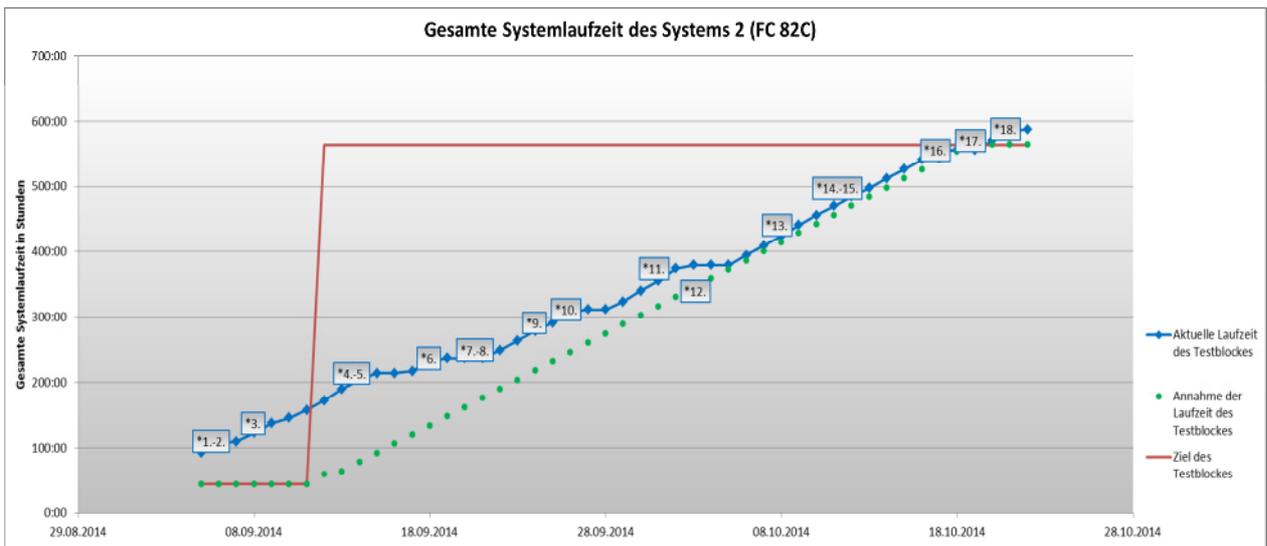


Abbildung 47 Systemlaufzeit System 2

Abschließend lässt sich feststellen, dass es trotz erheblicher Schwierigkeiten in der Entwicklung der DC/DC-Wandler-Box und der damit verbundenen zeitlichen Verzögerungen letztendlich zufriedenstellende Langzeittests durchgeführt werden konnten. Darüber hinaus wird erwartet, dass die geänderten Betriebsbedingungen eine weitere Verlängerung der Lebensdauer der Komponenten und des BZ-Stacks bewirkt.



## 8. Nachweis der wichtigsten Positionen

In Tabelle sind die wichtigsten Positionen des Vorhabens zusammengefasst. Die Gesamtvorkalkulation enthält alle während der Laufzeit beantragten bzw. bewilligten Änderungen. Zwei Anträge auf Verlängerung der Projektzeitlaufzeit bis zum 31. Oktober 2014 wurden budgetneutral realisiert. Die tatsächlich angefallenen Kosten zeigen die untenstehenden Tabellen. Die Details hierzu enthalten die Verwendungsnachweise von NuCellSys und EvoBus.

Vorhabenlaufzeit: 01.09.2009 - 31.10.2014 -- Förderrate 48%

		Gesamtvorkalkulation	Gesamt Ist	Bemerkungen
0813	Material	1.209.471,00	1.221.330,76	
0823	FE-Fremdleistungen			
	<i>Personaleinzelkosten</i>	<i>2.707.722,73</i>	<i>2.747.030,07</i>	
	<i>Personalgemeinkosten</i>	<i>3.249.267,27</i>	<i>3.296.436,08</i>	
0837	Σ Personalkosten	5.956.990,00	6.043.466,15	
0838	Reisekosten			
0847	AfA für vorhabensspezifische Anlagen	164.450,00	165.766,00	
0848	AfA für sonst. Anlagen des FuE-Bereichs			
0850	Sonst. unmittelbare Vorhabenskosten	1.575.000,00	1.716.437,22	
<b>0855</b>	<b>Gesamte unmittelbare Vorhabenskosten</b>	<b>8.905.911,00</b>	<b>9.147.000,13</b>	

Tabelle 1 Gesamtvorkalkulation im Vergleich zu den Ist-Kosten, NuCellSys

		Plan 2013 (Gesamtvorkalkulation)	Plan 2013 (Gesamtnachkalkulation)	IST 2009-2013* (Zwischennachweis)	Bemerkungen
0813	Material				
0823	FE-Fremdleistungen	44.388,00 €	45.122,94 €	45.122,94 €	
	<i>Personaleinzelkosten</i>				
	<i>Personalgemeinkosten</i>				
0837	Personalkosten	494.829,00 €	534.820,92 €	534.820,92 €	
0838	Reisekosten	15.426,00 €	576,61 €	576,61 €	
0847	AfA für vorhabensspezifische Anlagen				
0848	AfA für sonst. Anlagen des FuE-Bereichs				
0850	Sonst. unmittelbare Vorhabenskosten	- €	- €		
<b>0855</b>	<b>Summe unmittelbare Vorhabenskosten</b>	<b>554.643,00 €</b>	<b>580.520,47 €</b>	<b>580.520,47 €</b>	

Status NaBuZ precom auf Basis Verwendungsnachweis PTJ,

\*) ohne (0860) Verwaltungskosten 17.332,26 €

Tabelle 2 Gesamtvorkalkulationen im Vergleich zu den Ist-Kosten, EvoBus



## 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. Eine Neuentwicklung eines eigenen „Bus-BZ-Systems“ ist zum jetzigen Zeitpunkt aus unternehmerischer Sicht nicht vertretbar.

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 angelauten 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 (BZ-Doppelteststand, HiL-Prüfstand) 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 konnte nur ein Bericht zum Thema Langlebigkeit bzw. Langzeitbetrieb eines BZ-Systems eruiert werden.

## 12. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse dieses Vorhabens wurden bei folgenden Gelegenheiten präsentiert:

- Poster anlässlich des Besuchs von Herrn Staatssekretär Rainer Bomba in Kirchheim-Nabern, März 2010,
- Clean Mobility Insight in Berlin-Tempelhof, September 2010,
- Marktplatz „Zulieferer“ in Berlin, Mai 2011,
- Poster anlässlich der NIP-Vollversammlung in Berlin, November 2011,
- NOW-Beiratssitzung in Berlin, Dezember 2012,
- NIP-Vollversammlung in Berlin, Juni 2013,
- „F-Cell“ in Stuttgart, Oktober 2013,
- Besuch des Landesumweltministers von Baden-Württemberg Franz Untersteller in Kirchheim-Nabern, September 2014.



## 13. Weitere Dokumente

- [1] Vorhabenbeschreibung „Heavy-Duty-Brennstoffzellensystem der 3. Generation für die Anwendung im Bus (Phase 3 – NaBuZ pre-commercial)“
- [2] Labormusterspezifikation für HD-Wandler-Box
- [3] Teststandsschnittstelle\_VXX.doc
- [4] 2012-12-31\_Abweichung\_zum\_MasterMeilensteinplanGen3.xls
- [5] 1.Zwischenbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [6] 2. Zwischenbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [7] 3. Zwischenbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [8] 4. Zwischenbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [9] 5. Zwischbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [10] Verlängerungsantrag (SAP Dok.Nr. 004-17055)
- [11] BDC-LS Wandler Spezifikation
- [12] 20111209\_ST\_1045\_550\_01.pdf (FEM-Basis)
- [13] HD\_Gen3\_Konzeptbeschreibung\_v1.doc
- [14] 20120209\_ST\_1045\_550\_02.pdf (FEM-Iteration1)
- [15] 20120405\_ST\_1045\_550\_03.pdf (FEM-Iteration2)
- [16] SAP 004/22110/000/00\_120405 INVESTIGATIVE REPORT (Befeuchter)
- [17] SAP 22526 Software Spezifikation
- [18] SAP 102/22885/000/00 Arbeitspakete (ETC)
- [19] 6. Zwischbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [20] Konzeptanalyse\_galvanisch getrennter Wandler
- [21] 130412\_Degradation\_Gegenmassnahmen.xlsx
- [22] 7. Zwischbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [23] 2013-09-02-Simulationsergebnis.pptx
- [24] 03BV114A\_Änderungsbescheid-08-2013.pdf
- [25] 8. Zwischbericht\_NaBuZ\_03BV114A.doc
- [26] 03BV114A\_Änd\_Bescheid\_Laufzeitverlängerung\_140617.pdf
- [27] 03BV114A\_NIP\_HD\_Gen3\_Verwertungsplan.pdf
- [28] NaBuZ ZB10-1HJ.doc
- [29] NaBuZ ZB10-2HJ.doc
- [30] NaBuZ ZB11-1HJ.doc
- [31] NaBuZ ZB11-2HJ.doc
- [32] NaBuZ ZB12-1HJ.doc
- [33] NaBuZ ZB13-1HJ.doc
- [34] NaBuZ ZB13-2HJ.doc
- [35] NaBuZ ZB14-1HJ.doc
- [36] SAP 004/18698/000/00 ETC LTS 8D Bearing Failure



## 14. Abkürzungen

ACC	Air Condition Compressor
APU	Air Processing Unit
BZ	Brennstoffzelle
BZ-SYS-ZK	Brennstoffzellen System Zwischenkreisspannung (Hilfsantriebsspannung)
BZ-ZK	Brennstoffzellenzwischenkreisspannung (Stackspannung)
CAD	Computer Aided Design
CAN	Control Area Network
CBX	Converter Box
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CPC	Common Power Controller
DBS	Duales Brennstoffzellensystem
DC/DC	Gleichstrom Wandler
DFCU	Dual Fuel Cell Control Unit
EA	Entwicklungsaggregat
EIA	Elektrische Impedanz Analyse
ETC	Electric Turbo Charger
FCC	Fuel Cell Controller
FCS	Fuel Cell System
FCU	Fuel Cell Control Unit
FPGA	Field Programmable Gate Array
FMEA	Failure Mode & Effect Analysis
G2G	Gas to Gas Humidifier
GIC	Galvanic isolated converter
HD	Heavy Duty
HDCU	Hybrid Drive Control Unit (ehemals HD-CPC)
HiL	Hardware-in-the-Loop
HFR	High Frequency Resistance
HUMS	Health Usage Monitoring System
HV	High Voltage
HV-ZK	Hochvoltzwischenkreisspannung (500-750V)



HW	Hardware
IAS	Integrated Anode Structure
ID	Identifier (CAN)
KLH	Komponenten-Lastenheft
LAN	Local Area Network
LE	Leistungselektronik
LIN	Local Interconnect Network
LMM	Last Management
LV	Low Voltage (12V)
MiL	Model in the Loop
MSM	Master Slave Management
NCS	NuCellSys
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NLCT	New Life Cycle Test
NR	Netzurückspeisung
NT	Netzteil
OSE	Off-Spec-Event (Alarmmatrix)
PXI	PCI (eXtensions for Instrumentation)
QA	Qualifizierungsaggregat
RAP	Regular Assessment Points (Referenzprozedur)
RCP	Rapid Controls Prototyping (Prototypensteuergerät mit Rechnersystem)
SCXI	Signal Conditional Extension For Instrumentation
SG	Steuergerät
SIV	Systemisoliationsventil
SW	Software
VEH	Vehicle
WEH	Water Electric Heater



## 15. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Projekt Aufgabenverteilung, Arbeitspakete und Kommunikationswege	5
Abbildung 2 Detaillierter Zeitplan mit AP/ Übersicht	7
Abbildung 3 Bus-Dual-Prüfstand mit 2 BZ-Systemen	9
Abbildung 4 Busspezifisches LE Konzept	12
Abbildung 5 Vorhandenes LE Konzept	12
Abbildung 6 Übernahme Pkw-Modell und Umbau / Anpassung an Stadtbus	13
Abbildung 7 Positionierung der BZ-Systeme mit Integralträger und Montagekonzept	15
Abbildung 8 Tankvarianten	15
Abbildung 9 Kühlanlage Bus Hinterwagen	16
Abbildung 10 Demonstrationsmodell – Mock-up	16
Abbildung 11 Einheitsmotorraum für Solobus und Gelenkzug	17
Abbildung 12 B1-Muster Befeuchter	18
Abbildung 13 Degradation und interne Leckage des Befeuchters	19
Abbildung 14 Stirnfläche des Befeuchters mit geschädigten Fasern	19
Abbildung 15 ETC B-Muster im Prüfstand	20
Abbildung 16 Betriebszustände und Stressfaktoren ETC	20
Abbildung 17 Abgelöste Teflon Schicht (B-Muster)	21
Abbildung 18 zerstörte Lagerflächen	21
Abbildung 19 Mechanische Berührung Kompressor Rad mit der Teflon Schicht	22
Abbildung 20 Die Hardwareentwicklung im Überblick	23
Abbildung 21 Modulares Packaging des GIC 246	24
Abbildung 22 DC/DC-Wandler im Vergleich	24
Abbildung 23 Schematischer Aufbau der HD-Wandler-Box	25
Abbildung 24 Schematischer Aufbau des GIC246 Wandlers	25
Abbildung 25 Paarweiser Konzeptvergleich nach der DFSS Methode	25



---

Abbildung 26 Rangfolge der Kriterien	26
Abbildung 27 Konzeptvergleich im Netzdiagramm	27
Abbildung 28 Wirkungsgrade des Dual-Brennstoffzellensystems	29
Abbildung 29 Wirkungsgrad eines BZ-Single-Systems	29
Abbildung 30 Wirkungsgradoptimierte Lastverteilung	30
Abbildung 31 RCP-System	31
Abbildung 32 Schaltbild HIL-Konzept	31
Abbildung 33 BZ-System in B2-Muster-Konfiguration	32
Abbildung 34 Demo-System	33
Abbildung 35 Schnittstellenansicht des Demo-Systems	33
Abbildung 36 Teststand in der Aufbauphase	34
Abbildung 37 Leitwarte	34
Abbildung 38 Teststand mit Dual-BZ-System	34
Abbildung 39 Auszug aus VESPA der Versuchsplanungsdatenbank	35
Abbildung 40 Dualbetrieb Stromverlauf	36
Abbildung 41 Dualbetrieb Isolationsmessung	36
Abbildung 42 Schematischer Aufbau des dualen Prüfstandes mit BZ-Systemen	37
Abbildung 43 Dauerlaufzyklus	37
Abbildung 44 Laufzeit über 24 Stunden	38
Abbildung 45 Dauerlaufzeit	38
Abbildung 46 Systemlaufzeit System 1	39
Abbildung 47 Systemlaufzeit System 2	39

