



Schlussbericht vom 29. Januar 2019 'public' Version

15 kW USV mit CH Brennstoffzelle

Integration einer Schweizer PEM Brennstoffzelle
in eine Unterbrechungsfreie Stromversorgungs-
anlage für dreiphasige Lasten





15 kW USV mit CH Brennstoffzelle

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur
FH Zentralschweiz



Datum: 29. Januar 2019

Ort: Bern



Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw
www.hslu.ch

bis 1.7.2015 :

Belenos Clean Power Holding Ltd
Seevorstadt 6, CH-2502 Biel/Bienne
www.belenoscleanpower.com

Ab 2.7.2015:

Swiss Hydrogen SA
Passage du Cardinal 1, CH-1700 Fribourg
www.swisshydrogen.ch

Autoren:

Ulrike Trachte, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, ulrike.trachte@hslu.ch
Peter Sollberger, Hochschule Luzern – Informatik, peter.sollberger@hslu.ch
Uwe Hannesen, Swiss Hydrogen SA, uwe.hannesen@swisshydrogen.ch

BFE-Programmleitung:

Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/501058-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Eine Schweizer PEM-Brennstoffzelle wurde in eine dreiphasige kommerzielle Unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage für eine Leistung bis 15 Kilowatt integriert und getestet. Der Stapel wurde mit Unterstützung des Paul- Scherrer- Instituts (PSI) für den Einsatz im Automobilbereich entwickelt. Im Projekt wurde das System mit zusätzlicher Entwicklungsarbeit für eine stationäre Anwendung angepasst. Ein Mittelabgriff des Stapels wurde erstmalig entwickelt und im Labor getestet. Die Funktionalität konnte erfolgreich nachgewiesen werden.

Das Gesamtsystems erfüllte jedoch nicht die für den Anwender erforderliche Zuverlässigkeit. Nach drei Labortestserien und einem Umbau der Systemarchitektur war eine Weiterführung des Projekts aufgrund einer mittlerweile überholten Technik nicht mehr sinnvoll. Positiv ist dennoch festzuhalten, dass wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung des Wasserhaushalts und der Systemkomponenten für die zukünftige Weiterentwicklung des Systems gewonnen wurden. Das Projekt hat unter anderem massgeblich zur Beantragung der Energie-System-Integrations-Plattform (ESI) am PSI beigetragen, die als Beitrag zur Realisierung der Klimaziele des Bundes eine hohe politische Bedeutung hat mit internationaler Ausstrahlung.

Résumé

Une pile à combustible (PàC) du type PEM était intégrée dans une alimentation sans interruption triphasée d'une puissance de 15 kW. Le système était mis en service et testé. La PàC était développée en collaboration avec le Paul Scherrer Institut (PSI), initialement pour le domaine automobile. Au sein de ce projet le système était configuré et adapté pour l'utilisation stationnaire. Une prise de tension supplémentaire au milieu de la pile était ajoutée pour la première fois et était testée avec succès au laboratoire.

La fiabilité du système complet n'était pas encore suffisante pour une application dans une alimentation sans interruption. Après trois séries de test en laboratoire et un changement d'architecture fondamental on s'est rendu compte qu'une continuation du projet n'était plus raisonnable car la technologie des convertisseurs et aussi du system PàC était entre temps dépassé. Malgré ça les travaux au niveau de l'optimisation de la gestion d'eau et sur les composants ont contribué essentiellement à l'amélioration du système PàC avec l'utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène pur. Par conséquent ce projet a contribué dans la réalisation du projet ESI au PSI qui a une ampleur important pour la stratégie d'énergie du Conseil fédéral.

Abstract

The fuel cell Stapel had been developed in collaboration with the Paul Scherrer Institute (PSI), originally for automotive applications. Within this project the system has been adapted for the use in a stationary application. A third current collector in the middle of the Stapel has been added to meet the needs of the first inverter stage of the Uninterruptible Power Supply System (UPS). This configuration has been tested successfully in the lab.

Unfortunately the reliability of the overall system was not sufficient for a UPS application. After three series of lab testing and a fundamental change of system architecture it has been decided to discontinue the project since the inverter technology as well as the fuel cell system are not state of the art anymore. Nevertheless the optimization work on the water management of the fuel cell system and the component development has given very valuable input for the next generation fuel cell system with hydrogen and pure oxygen usage as it has been installed on the ESI platform at the PSI. In such manner this project has contributed significantly to a demonstration platform with a high technical and political impact on the Federal government's energy strategy.



Take-home messages

- Brennstoffzellensysteme als Ersatz für Dieselgeneratoren leisten einen Beitrag zur Klimapolitik des Bundes mit dem Ziel, die Treibhausgase bis 2030 zu reduzieren.
- Mit dem Projekt wurde ein in der Schweiz entwickeltes und gefördertes Brennstoffzellensystem für den mobilen Sektor weiterentwickelt für eine stationäre Anwendung als Ersatz für Dieselgeneratoren im Notstrombereich.
- Die Funktionalität eines Mittelabgriffs am Stapel wurde erfolgreich nachgewiesen und das Stapel- und Systemkonzept (Wasserhaushalt und Systemkomponenten) wurden umfassend weiterentwickelt.
- Das Projekt hatte massgeblichen Einfluss auf die Beantragung der ESI-Plattform am PSI, welche eine hohe politische Bedeutung hat mit internationaler Ausstrahlung. Weitere Optimierung des Brennstoffzellensystems im Rahmen der ESI-Plattform und im BFE-Folgeprojekt KANGOO.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Abstract	3
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Ausgangslage.....	8
2.1 Hintergrund / Stand der Technik	8
2.2 Motivation des Projekts	10
2.3 Ziele der Arbeit.....	11
3 Vorgehen und Methode	12
3.1 Vorgehen und Arbeitsorganisation.....	12
3.2 Konzeption	13
3.3 Systemarchitektur 1	16
3.4 Systemarchitektur 2	18
3.5 Messkonzept	19
3.5.1 Messprotokoll.....	20
3.5.2 Messkomponenten.....	23
3.6 Brennstoffzellen Hardware Anpassungen.....	27
4 Resultate	28
4.1 System Performance und Wirkungsgrad	30
4.2 Stapel History.....	32
4.3 Start-up-Verhalten	34
4.4 Erkenntnisse aus den Messungen	34
5 Diskussion der Ergebnisse	35
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	37
6.1 Nächste Schritte nach Projektabschluss.....	40
7 Referenzen	41
8 Anhänge	42
8.1 Anhang 1: Graphische Darstellung der Testzyklen	42
8.2 Anhang 2: System Performance verschiedener Testtypen	45



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
BZ	Brennstoffzelle
CVM	Cell Voltage Monitoring (Zellspannung-Überwachung)
ESI-Plattform	<u>E</u> nergy <u>S</u> ystem <u>I</u> ntegration
PSI	Paul-Scherrer-Institut, Villigen
MEA	Membrane Electrode Assembly (Membran Elektroden Einheit)
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage

1 Einleitung

Zahlreiche technische Anwendungen werden mit Hilfe von Notstromanlagen gegen unerwartete Stromausfälle abgesichert, um den Betrieb aufrechtzuerhalten. Kurze Ausfallzeiten werden üblicherweise mit Batterien überbrückt, für länger anhaltende Stromausfälle werden Dieselgeneratoren eingesetzt. In Ergänzung oder als Ersatz dieser bekannten Technologien versprechen Brennstoffzellen (BZ) technische und ökologische Vorteile.

Brennstoffzellensysteme sind effiziente Energiewandler, die unter Zufuhr von Wasserstoff Gleichstrom erzeugen. Im Gegensatz zu Dieselgeneratoren arbeiten Brennstoffzellensysteme leise und mit einem hohen elektrischen Wirkungsgrad ohne lokale Emissionen. Das Brenngas Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen hat als Ersatz für Dieselgeneratoren ein hohes Potenzial zur Verringerung des CO₂-Ausstosses.

Konventionelle Notstromanlagen mit Batterien in einem Leistungsbereich von 15 – 30 kW werden in der Regel für eine Autonomiezeit von 10 bis 20 Minuten ausgelegt. Mit einer Brennstoffzelle kann diese Autonomiezeit vor Ort deutlich verlängert werden durch die individuell an die Bedürfnisse der Anwender angepasste lokale Bereitstellung von Wasserstoff. Die verfügbare Autonomiezeit und der Anlagenzustand können jederzeit remote kontrolliert werden. Darüber hinaus sind Brennstoffzellensysteme im Gegensatz zu Batterien in einem weiten Temperaturbereich einsetzbar.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über den Projektablauf gegeben.

Kurzüberblick über das Projekt

Eine in der Schweiz entwickelte PEM-Brennstoffzelle wurde in eine Unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage (USV) für eine Leistung von 15 – 20 kW und einer dreiphasigen Spannung integriert. Die Brennstoffzelle wurde mit den Reaktanden Wasserstoff und Sauerstoff betrieben und zeichnete sich durch sehr gute Starteigenschaften auch bei grossen Leistungen und nach längeren Standby-Zeiten aus. Es war vorgesehen, die Anlage als Notstromversorgung für einen Server im Feldtest einzusetzen.

In einer ersten Projektphase wurde ein Konzept zur Systemintegration entwickelt, dass möglichst gut alle Anforderungen der beteiligten Partner berücksichtigte. Ein Schwerpunkt des Integrationskonzepts war es, so wenig zusätzliche Teile wie möglich einzusetzen. Das bedeutete, keine neuen Schalter, Dioden oder DC-DC-Konverter sollten verwendet werden. Erreicht wurde dieses Ziel durch ein zweites modifiziertes USV-Modul. Eine zweite wichtige Anforderung seitens der USV-Architektur erforderte das Einfügen eines Mittelabgriffs im Brennstoffzellenstapel. Um diesen Spannungsabgriff in der Mitte des Brennstoffzellenstapels zu ermöglichen, wurden das Verspannkonzert und das Gehäuse des Stapels umkonstruiert. Des Weiteren wurde das vorhandene System insbesondere im Bereich der Gasrezirkulation umgebaut und das Gasversorgungssystem und das Kühlsystem mussten neu entwickelt werden. Sämtliche Komponenten sowie Regelungsstrategien wurden neu konzipiert. Im Rahmen der ersten Projektphase wurde das neu designte Brennstoffzellensystem gefertigt und aufgebaut.

In der zweiten Projektphase, den Labortests, wurde das System in Betrieb gesetzt und getestet. Während den Tests kam es mehrfach zu Unterbrechungen durch fehlerhafte Bauteile. In der Folge wurde der Stapel durch einen Reservestapel ersetzt und das System wieder in Betrieb genommen. Während dieser zweiten Inbetriebsetzungsphase mit dem neuen Stapel konnte als erster Meilenstein die Funktionalität des Mittelabgriffs erfolgreich nachgewiesen werden.

Die Labortestserie gemäss einem spezifisch ausgearbeiteten Testprogramm wurde gestartet. Während dieser Testphase hat sich jedoch herausgestellt, dass die gewählte Systemarchitektur sich



nicht bewährt. Die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems war mit dem modifizierten USV-Modul nicht ausreichend gewährleistet. Aus diesem Grund wurde entschieden, den Betrieb der USV-Module und der Brennstoffzelle zu entkoppeln durch zwei zusätzlich eingebaute DC-DC-Konverter als Schnittstelle zwischen USV-Modulen und Brennstoffzelle. Dies erforderte einen grösseren Umbau der Anlage. Die DC-DC-Konverter mussten systemspezifisch evaluiert und als Einzelanfertigung bestellt werden. Nach erfolgreicher Integration wurde das System wieder in Betrieb gesetzt.

In einer dritten Labortestphase hat jedoch die Zuverlässigkeit des modifizierten Systems auch nicht die gewünschten Ergebnisse gezeigt. Mit einem Spannungsabfall in einzelnen Zellen und dem Auftreten erhöhter Wasseransammlungen in den Randzellen hatte das Brennstoffzellensystem die für den Einsatz im Feld ausreichende Funktionsfähigkeit nicht erfüllt. Weitere Anpassungen wurden nicht durchgeführt, da diese noch deutlich mehr Kapazitäten sowohl auf Seiten der Brennstoffzellen Hardware als auch Software erfordert hätten. Angesichts einer mittlerweile überholten Technik sowohl des Brennstoffzellensystems als auch der USV war eine Fortführung der Tests nicht sinnvoll. Die Feldtests, die in einer weiteren Projektphase geplant waren, wurden nicht durchgeführt und das Projekt wurde nach zwei kostenneutralen Projektverlängerungen beendet.

Positiv lässt sich dennoch festhalten, dass die Neuentwicklung des Stapelgehäuses mit funktionierendem Mittelabgriff erfolgreich nachgewiesen wurde und dass das Brennstoffzellensystem über gute Sicherheitssysteme verfügt, die jederzeit zuverlässig reagiert haben. Swiss Hydrogen und auch das PSI konnten von der Weiterentwicklung der Brennstoffzelle im Rahmen des Projekts wichtige Kenntnisse gewinnen und unter anderem damit die Basis für die ESI-Plattform¹ am PSI legen.

2 Ausgangslage

2.1 Hintergrund / Stand der Technik

Die Vorteile von Brennstoffzellensystemen gegenüber herkömmlichen Technologien versprechen seit mehreren Jahren einen Durchbruch dieser Technologie und weltweit wird an der Optimierung dieser Technik geforscht.

Die Vorteile von Brennstoffzellen für eine Anwendung im Notstrombereich sind von verschiedenen Herstellern erkannt worden und es gibt einige Anbieter von Brennstoffzellen basierten Notstromsystemen im internationalen Umfeld. Die Anbieter kommen aus den USA (PlugPower, ReliOn), Kanada (Ballard, Hydrogenics), Asien (Hyundai, Toyota) oder dem übrigen Europa (FutureE / Deutschland, Electro PowerSystems / Italien, Serenergy, Dantherm / Dänemark). In der Schweiz gibt es bisher keinen vergleichbaren Mitbewerber in diesem Umfeld.

Hohe Investitionskosten waren und sind Hemmnisse für einen sichtbaren Markteintritt und viele Systemhersteller sind noch auf Projektförderungen und Investoren angewiesen. So liegen die Investitions-

¹ ESI steht für Energy System Integration www.psi.ch/media/ueberblick-esi-plattform. Mit der ESI-Plattform stellt das PSI eine Versuchsplattform zur Verfügung, auf der Lösungsansätze im Rahmen des vom Bund erarbeiteten Massnahmenpakets zur Energiestrategie 2050 getestet werden können.

kosten für ein Brennstoffzellensystem pro Kilowatt elektrischer Leistung bei etwa 4'000 Euro. Bei vergleichbarer elektrischer Leistung sind Dieselgeneratoren für etwa 1'500.- CHF auf dem Markt erhältlich².

Zukünftig ist zu erwarten, dass die Kosten für Brennstoffzellensysteme, unter anderem durch den vermehrten Einsatz im mobilen Sektor, weiter sinken werden. Zusätzlich wird der Bedarf an Notstromlösungen bei potentiellen Anwendern steigen, da immer höhere Leistungen abgesichert werden müssen. Vor allem im Serverbereich für die Speicherung von Daten ist bei Banken, Versicherungsunternehmen und Behörden mit einem steigenden Anwendungspotential zu rechnen, da die zu sichernde Datenmenge ständig wächst und eine zuverlässige und gegebenenfalls redundante Absicherung der Daten eine zentrale Anforderung ist. Brennstoffzellenbasierte Notstromlösungen können hierzu einen wichtigen Beitrag leisten.

Projektfeld

Im Bereich der Notstromversorgung mit Brennstoffzellen wurden in der Schweiz bereits mehrere durch das BFE und eines von der EU geförderten Projekte durchgeführt³. Diese wurden von der Hochschule Luzern – Technik & Architektur abgeschlossen beziehungsweise werden noch durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Antragstellung waren neun dieser Notstromversorgungssysteme in der Schweiz im Mobilfunkbereich installiert, aktuell sind es noch vier Installationen. Die Leistung dieser Systeme beträgt zwischen 2 und 6 kW. Die Brennstoffzellensysteme für diese Projekte kamen respektive kommen aus dem EU oder US-Raum. Die Spezifikationen des im Projekt entwickelten Systems heben sich von den bereits installierten Systemen dahingehend ab, dass es für eine grössere Leistung von 15 kW ausgelegt und für dreiphasige Lasten konzipiert wurde.

Darüber hinaus wurde mit diesem Projekt zum ersten Mal eine in der Schweiz entwickelte und vom BFE geförderte Brennstoffzelle für eine Anwendung im Notstrombereich eingesetzt. Das BFE hatte in den Jahren zuvor sowohl für die Entwicklung der Brennstoffzelle als auch für den Kompetenzaufbau an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur unabhängig voneinander Fördergelder bereitgestellt. Dieses Projekt bot die Gelegenheit beide Kompetenzen zusammenzuführen, so dass alle Beteiligten von der Arbeit profitieren konnten.

Projektpartner

Projektpartner aus dem Industrieumfeld sind der Hersteller des Brennstoffzellensystems *Swiss Hydrogen SA*, ehemals *Belenos Clean Power Holding Ltd*, sowie der Hersteller der USV-Anlage *Newave SA* / A member of the ABB Group und die Fa. *PanGas AG* als Anwenderin. Die Fa. *Belenos* wurde im Jahr 2007 vom Gründer der Swatch Group *Nicolas Hayek* in Biel gegründet, um die Entwicklung nachhaltiger Energiegewinnungs- und Energieverwendungstechnologien voranzutreiben. Auf dem Gebiet der Brennstoffzellensysteme besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem Paul-Scherer-Institut (PSI). Der Brennstoffzellenstapel wurde von *Belenos* mit Unterstützung des PSI entwickelt und als eigenständiges System aufgebaut. Eine erste kommerzielle Nutzung der entwickelten Brennstoffzelle sollte innerhalb eines Antriebskonzepts für ein Kleinfahrzeug erfolgen. Da in diesem Sektor eine kommerzielle Nutzung von sehr komplexen Rahmenbedingungen abhängig ist, suchte *Belenos* parallel zu dieser Tätigkeit eine zweite mögliche Anwendung im Notstrombereich für den Brennstoffzellenstapel.

Die Fa. *Newave SA* ist ein international tätiger Schweizer Hersteller von USV-Systemen mit Sitz in Quartino im Tessin. *Newave* hat sich mit dem Konzept einer transformerlosen USV erfolgreich am

² Zu Betriebs- und Wartungskosten liegen keine vergleichbaren Aussagen vor, da keine verlässlichen Langzeitstudien zur Anwendung der Brennstoffzellen im Notstrombereich verfügbar waren.

³ Gelistet in Referenzliste Kapitel 7.



Markt etabliert und wurde im Jahr 2012 von der ABB Group übernommen. Newave sieht für Notstromanwendungen ein gutes Marktpotential bei Industriekunden, vor allem im Bereich der Öl- und Gaswirtschaft. Auf Ölplattformen wird die gesamte Energie über Generatoren geliefert. Fallen diese aus, braucht es geeignete Back-up-Lösungen, die in der Regel über Batterien sichergestellt werden. Diese haben jedoch einen hohen Platzbedarf, der auf Plattformen nur begrenzt vorhanden ist. Für Leistungen im Bereich von 10 – 40 kW oder höher könnte eine Kombination von Batterien mit einer Brennstoffzellen-USV eine erfolgversprechende Alternative sein. Zusätzlich gab es zum Zeitpunkt der Antragstellung einen bestehenden Auftrag für die Notstromversorgung von Kommunikationssystemen für 80 Gaspipeline-Stationen mit einer geforderten Autonomiezeit von 24 Stunden bei 7 – 15 kW. Auch für diese Anwendung wäre eine Brennstoffzellen-USV geeignet.

Als Anwender des zu entwickelnden Systems konnte die Fa. PanGas mit Sitz in Dagmersellen für das Projekt gewonnen werden. Pangas ist Gaslieferant und dadurch mit dem Handling und den Sicherheitsvorschriften für Wasserstoff und Sauerstoff bestens vertraut. PanGas ist daran interessiert, das Know-How durch die Anwendung der neuen Technologie am eigenen Standort zu erweitern.

Darüber hinaus haben die beteiligten Industriepartner ihren Sitz in drei verschiedenen Sprachregionen der Schweiz, so dass das Projektkonsortium ideal war.

2.2 Motivation des Projekts

Diese geeignete Konstellation der Projektpartner und der Zusammenführung der in Vorgängerprojekten mit Fördermitteln des BFE aufgebauten Kompetenzen erlaubte es, dass alle Beteiligten von der Anwendung profitieren und die Kompetenzen zusammengeführt werden konnten.

Eine Motivation war, dass das geplante System sich von den in der Schweiz bereits installierten Systemen dahingehend abhob, dass es für eine grössere Leistung von 15 kW ausgelegt und für dreiphasige statt einphasige Lasten konzipiert wurde.

Eine weitere Motivation war, dass sich die meisten auf dem Markt erhältlichen Brennstoffzellen-USV auf Systeme mit Wasserstoff und Luft als Reaktanden bezogen, hingegen das im Projekt eingesetzte System mit Wasserstoff und Sauerstoff betrieben wurde. Die Vorteile der entwickelten Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle waren eine schnelle Startzeit, auch nach längeren Standby-Zeiten. Die Reaktionsgase Wasserstoff und Sauerstoff wurden direkt zugeführt, was einen hohen Wirkungsgrad gewährleistete und ein grosses Kostensparpotential versprach, da die Leistungsdichte pro aktive Fläche deutlich höher ist als bei den herkömmlichen PEM-Brennstoffzellen, die mit Wasserstoff und Luft arbeiten.

Abbildung 1 zeigt die Polarisationskennlinie des Stapels mit Sauerstoff verglichen mit einem Stapel mit Luft. Es ist ersichtlich, dass bei gleicher Stromstärke die Spannung des Stapels deutlich höher ist als bei einem mit Luft betriebenen Stapel.

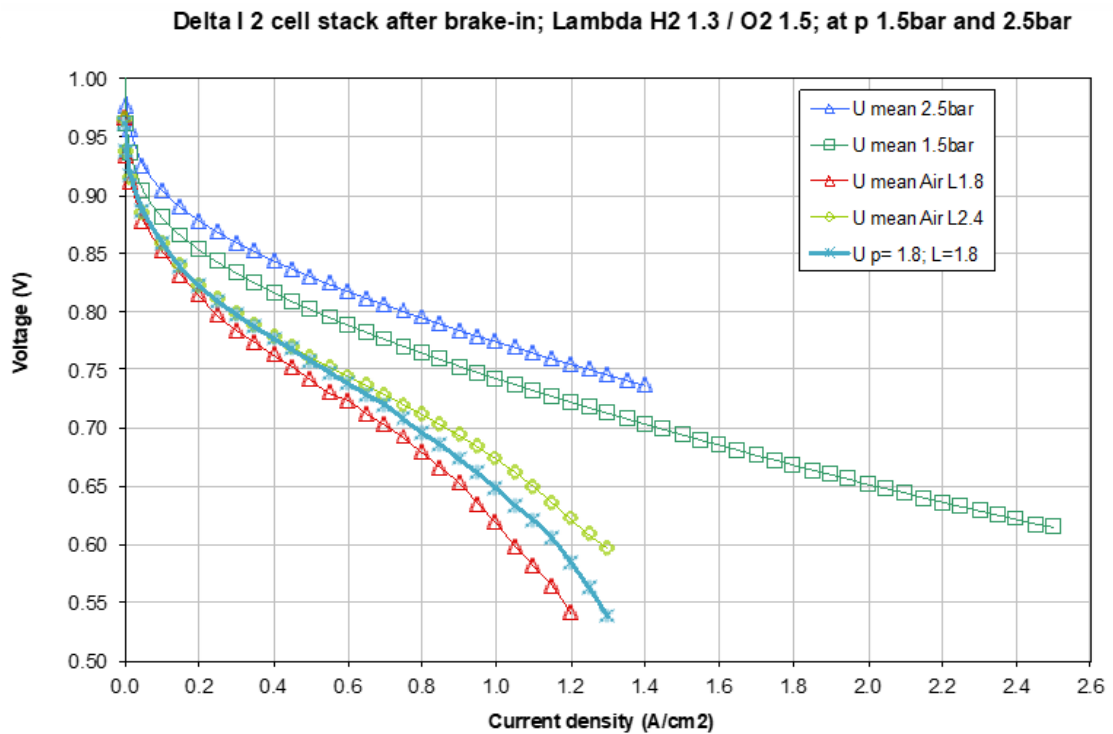


Abbildung 1: Belenos BZ-Polarisationskurven. Im Betrieb mit reinem Sauerstoff kann bei gleicher Zellspannung (= Wirkungsgrad) in etwa die doppelte Leistungsdichte erzielt werden, wie im Betrieb mit Luft (Quelle: Belenos AG)

Für die Integration des Brennstoffzellensystems in die Newave USV für eine stationäre Anwendung war weitere Entwicklungstätigkeit erforderlich.

2.3 Ziele der Arbeit

Ziele des Projekts waren es,

- das für eine mobile Anwendung entwickelte Brennstoffzellensystem für eine stationäre Anwendung im Notstrombereich weiterzuentwickeln.
- die Brennstoffzelle in das USV System der Fa. Newave zu integrieren unter Berücksichtigung der spezifischen Schnittstellen und Bedingungen der USV (Mittelabgriff⁴).
- das System für dreiphasige Lasten zu konzipieren.
- die Funktionsfähigkeit des Mittelabgriffs nachzuweisen.
- die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Systems in Labortests aufzuzeigen.
- die Zuverlässigkeit und Praxistauglichkeit der Anwendung im Feldtest aufzuzeigen mit simulierten messtechnisch überwachten Stromausfällen.

Die Ziele sind erreicht, wenn das System im Labor und im Feld zuverlässig startet und die Brennstoffzelle die benötigte Leistung bei jedem Start erbringt.

⁴ Spannungsabgriff in der Mitte des Brennstoffzellenstapels. Der Begriff des Mittelabgriffs wird in Kapitel 3.2 näher beschrieben.



3 Vorgehen und Methode

3.1 Vorgehen und Arbeitsorganisation

Die Aufgaben im Projekt wurden in verschiedene Arbeitspakete aufgeteilt:

Systemarchitektur (alle Partner)

Die Systemarchitektur und die Leistungsparameter wurden von den Projektpartnern gemeinsam besprochen und definiert und eine Anlagenspezifikation erstellt. Die Teilkomponenten (Rektifizier, Booster, Brennstoffzellenstapel, Batterien, Inverter) wurden ausgelegt.

Entwicklung Brennstoffzellenstapel und Produktion (Fa. Swiss Hydrogen/Belenos)

Um den spezifischen Anforderungen der USV zu entsprechen, wurde das Design des Brennstoffzellenstapels angepasst. Aufgrund der USV-Schnittstelle durfte die maximale Stromstärke der Brennstoffzelle 100 A nicht überschreiten. Das bereits vorhandene Stapeldesign war mit dieser Vorgabe stark überdimensioniert. Um eine optimale Funktionsfähigkeit im Bereich zwischen 10 und 100 A zu erzielen, wurde das System insbesondere im Bereich der Gasrezirkulation umgebaut.

Das bestehende Design der Bipolarplatten und MEA wurde in Vorversuchen überprüft und konnte für das Projekt übernommen werden. Angepasst werden musste aber das Verspannkonzept und das Gehäuse des Stapels, um den Spannungsabgriff in der Mitte des Brennstoffzellenstapels, den sogenannten Mittelabgriff, zu ermöglichen. Dies ist eine wichtige Anforderung seitens der USV-Architektur. Ausserdem mussten das Gasversorgungssystem und das Kühlsystem neu entwickelt werden. Hier dienten das Wasserstoff-Subsystem und das Kühlsystem des Belenos Demofahrzeugs von 2013 und das Sauerstoffsystems des Belenos Demofahrzeugs von 2011 als Grundlage. Sämtliche Komponenten sowie Regelungsstrategien mussten jedoch neu entwickelt werden.

Gasversorgung im Feld (Fa. Pangas)

Die Infrastruktur für die Wasserstoff- und Sauerstoffversorgung wurde entsprechend der geforderten Autonomiezeit ausgelegt und von der Fa. PanGas am Anlagenstandort bereitgestellt.

Messtechnik und Messkonzept (HSLU T&A)

Die Messgrössen und das Messverfahren wurden entsprechend einem gemeinsam definierten Messkonzept bestimmt, nach welchem die Auswahl und Auslegung der Komponenten erfolgte. Ein detailliertes Messkonzept mit Messprotokollen für verschiedene Lastanforderungen wurde für die Durchführung der Labortests und die geplanten Feldtests von der HSLU T&A erstellt.

Die Durchführung, das Aufzeichnen und das Auswerten der Ergebnisse wurden so weit wie möglich automatisiert.

Labortest (HSLU T&A)

Die Inbetriebsetzung und die Durchführung der Labortests des von Swiss Hydrogen/Belenos weiterentwickelten Brennstoffzellensystems erfolgten im Labor der HSLU T&A. Die Testserien wurden gemäss dem im Projekt definierten Testprogramm durchgeführt und die Lastprofile in Übereinstimmung mit üblichen Anwendungen festgelegt.

Als erstes Ergebnis wurde die Funktionsfähigkeit des Mittelabgriffs erfolgreich überprüft. Nach Durchführung der Testserie wurde entschieden, ob das System im Feldtest betrieben werden kann.

Feldtest (Fa. PanGas)

Pangas hat im Rahmen des Konzepts eigens für die Durchführung der geplanten Feldtests eine USV des Projektpartners erworben und installieren lassen. Die USV wurde vorbereitet für die Durchführung der Feldtests. Stromausfallsimulationen waren geplant nach erfolgreichem Verlauf der Labortests.

Auswertung (HSLU T&A)

Alle Messdaten wurden über einen Projektserver übertragen und wurden kontinuierlich ausgewertet. Die Auswertung erfolgte in Bezug auf Startverhalten, Leistung und Zuverlässigkeit. Die Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Bedürfnissen der Anwender wurde überprüft.

3.2 Konzeption

Systemintegration: Anpassung des Brennstoffzellensystems an USV-Typ

Als Voraussetzung für die Integration der Brennstoffzelle in die USV wurden die Anforderungen der USV mit den Spezifikationen des Brennstoffzellenstapels in Vorabgesprächen überprüft. Die transformerlose USV der Firma Newave arbeitet mit Booster-Technologie sowie mit einem Batteriepack mit Mittelabgriff⁵. Durch dieses innovative USV-Design konnte Newave den Wirkungsgrad der USV im Vergleich zu herkömmlichen Bauarten deutlich steigern.

Gemäss den Vorgaben des USV-Herstellers muss die Systemintegration so erfolgen, dass so wenige zusätzliche Teile wie möglich verwendet werden. Das heisst, es sollen keine weiteren Schalter, Dioden oder DC-DC-Konverter eingebaut werden. Dies wird durch das **Einfügen eines Mittelabgriffs im Brennstoffzellenstapel** erreicht, wodurch die Brennstoffzelle ohne zusätzliche Elektronik direkt an den Zwischenkreis des USV Moduls geschaltet werden kann. Für diese Arbeiten war zusätzliche Entwicklungsarbeit erforderlich.

Auf Basis dieser Schnittstellen wurden zwei verschiedene Varianten für die Systemarchitektur erarbeitet. Bei dem ersten, intuitiven Lösungsansatz wird die Brennstoffzelle parallel zu den Batterien geschaltet. Dabei sind jedoch zusätzliche Dioden zur Kontrolle des Stromflusses erforderlich, welche eigentlich vermieden werden sollten. Abbildung 2 zeigt schematisch den Lösungsansatz.

⁵ Für das Projekt waren eingesetzt: 30 Batterien à 12 V, 28 Ah → ± 180 V; der Booster, der in das USV Modul integriert war, erhöht intern die Batteriespannung, so dass der nachfolgende Wechselrichter (Inverter) eine für ihn optimale Spannung erhält.

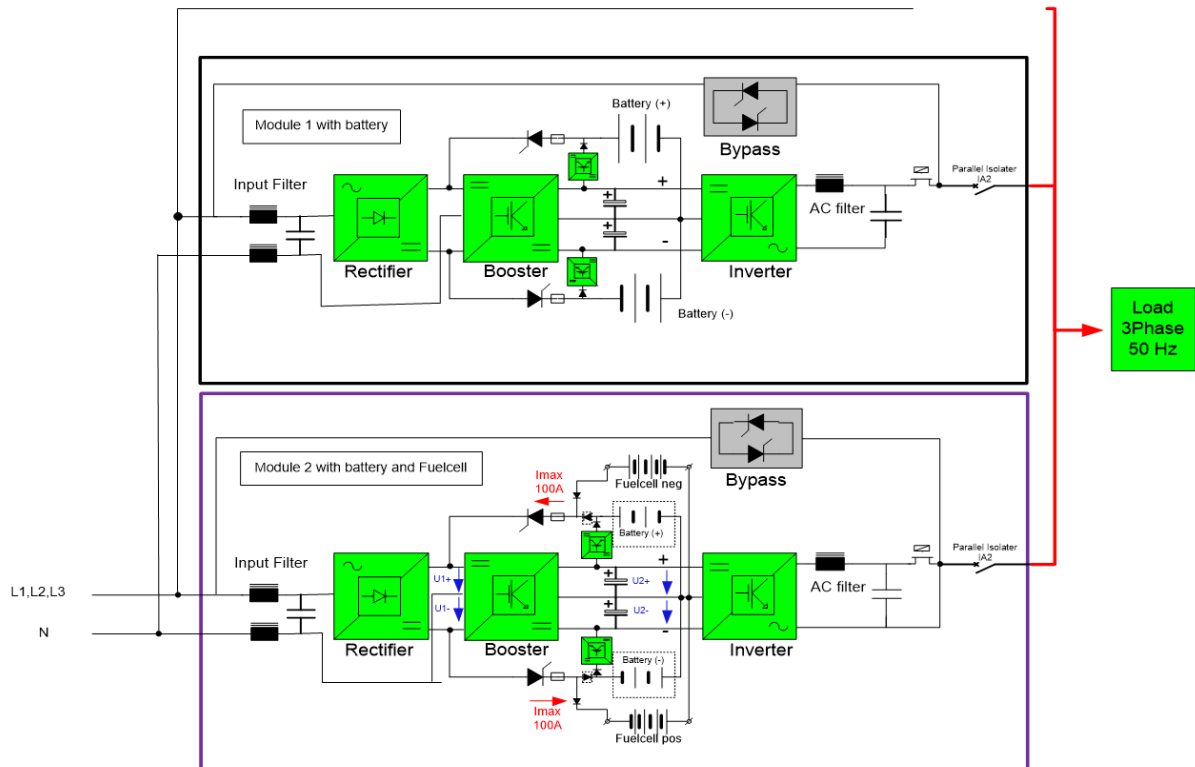


Abbildung 2: Erste intuitive Systemarchitektur

Durch den parallelen Anschluss der Brennstoffzelle zu den Batterien haben sich Szenarien ergeben, die genauer betrachtet werden mussten:

1. Die Kennlinien der Batterien und der Brennstoffzelle sind nicht identisch. Wenn die Batteriespannung grösser als die Stapelspannung ist, müssten die Batterien während dem Betrieb der Brennstoffzelle unterbrochen werden, damit sie sich nicht entladen. Im umgekehrten Fall, wenn die Stapelspannung grösser als die Batteriespannung ist, könnten die Batterien überladen werden. Dieses Verhalten der Batterien wurde durch eine Simulation verifiziert.
2. Die Anzahl Zellen der Brennstoffzelle für das Erreichen der erforderlichen Batteriespannung von ± 180 V ist zu hoch. Von der Mechanik her ist es nicht möglich, einen so grossen Stapel zu bauen. Und auch die Beherrschung der Materialflüsse innerhalb des Stapels wäre eine grosse Herausforderung.

Als Lösung wurde deshalb beschlossen, ein zweites USV-Modul einzubauen. Bei dieser Systemarchitektur, in Abbildung 3 dargestellt, startet das erste USV-Modul mit Batterie direkt bei Stromunterbruch, an das zweite USV-Modul ist die Brennstoffzelle angeschlossen, mit einer verglichen mit dem Batteriestrang geringeren Spannung. Das zweite Modul übernimmt dann nach und nach die Versorgung der Last.

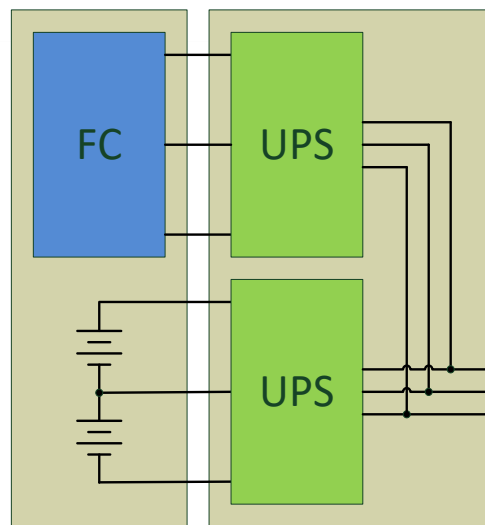


Abbildung 3: Prinzipielle Systemarchitektur

Für die Integration der Brennstoffzelle ergeben sich durch diese Architektur zwei Randbedingungen:

1. Der Booster (Input $\pm 50 - 340$ VDC, max. 100 A; Output ± 700 VDC) ist das leistungsbegrenzende Bauteil, welches für die Auslegung der Brennstoffzelle entscheidend ist. Der Booster ist auf einen Maximalstrom von 100 A begrenzt, was zur Folge hat, dass das Brennstoffzellensystem maximal 100 A liefern darf.
2. Die zweite Randbedingung ist durch die Anzahl Zellen gegeben, die den Brennstoffzellenstapel bilden. Diese bestimmen die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle (der maximale Strom wird durch den Querschnitt der Zellen bestimmt).
Der Boostereingang der USV erwartet eine positive und eine negative Eingangsspannung; so soll auch der Brennstoffzelle-Stapel über einen Mittelabgriff verfügen oder es müssen zwei Brennstoffzellenstapel in Serie geschaltet werden.
Ein zweiter Brennstoffzellenstapel soll jedoch aus Kostengründen vermieden werden, ausser es zeigt sich, dass der Mittelabgriff ungünstige Auswirkungen auf die Lebensdauer des Brennstoffzellenstapels hat.

Um den spezifischen Anforderungen der USV zu entsprechen, wurde das Design des Brennstoffzellenstapels angepasst. Die maximale Stromstärke der Brennstoffzelle darf 100 A nicht überschreiten aufgrund des USV-Modul-Designs. Das bereits vorhandene Stapeldesign ist mit dieser Vorgabe stark überdimensioniert. Um eine optimale Funktionsfähigkeit im Bereich 10 .. 100 A zu erzielen, wurde das Brennstoffzelle-System insbesondere im Bereich der Gasrezirkulation umgebaut.

Mit einer Anzahl von ~220 Zellen (bei 100 A ca. 0.8 V/Zelle) kann der Brennstoffzellenstapel in einer Art ‚Komfortzone‘ betrieben werden im Hinblick auf Zusammenbau, Gasfluss und Kühlung. Es ergibt sich damit eine Stapelspannung von $\sim \pm 88$ V pro Teilstapel und eine maximale Leistung des Brennstoffzellenstapels von ~17 kW.

Fallback-Szenario

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Brennstoffzellensysteme gebaut. Ein System für die Benchmarkttests im Labor, das zweite System für den Feldtest. Bei der Inbetriebsetzungs- und Testphase im Labor wurde das Prinzip des Mittelabgriffs überprüft. Sollte sich herausstellen, dass dieses Prinzip zu



einer asymmetrischen Belastung der beiden Teilstapel führt, wäre dies unvorteilhaft für die Lebensdauer der Brennstoffzelle. Für diesen Fall wurde ein Fallback-Szenario vorgesehen. Beide Stapel würden in Serie geschaltet und für den Feldtest eingesetzt. Das heisst, aus zwei Systemen würde eines gebaut.

3.3 Systemarchitektur 1

Grundsatzüberlegung für die gewählte Systemarchitektur 1 war es also, möglichst wenig neue Teile einzusetzen. Dies wurde dadurch erreicht, dass zwei USV-Module auf AC Lastseite parallel verbunden wurden: Ein USV Modul bezieht den Notstrom aus Batterien, an den DC Zwischenkreis des zweiten USV Moduls ist die Brennstoffzelle angeschlossen. Das Parallelschalten von zwei USV Modulen auf AC-Seite ist ein Standardverfahren, wenn redundante USV Systeme gefordert sind und bedingt keine neue Entwicklung auf Seite der USV-Module.

Das USV Modul mit Batterien liefert dann bei einem Netzausfall das Signal zum Starten der Brennstoffzelle.

Dennoch hat der Einsatz eines USV-Moduls, bei dem die Zwischenkreisspannung durch eine Brennstoffzelle erzeugt wird, etwas Spezielles: Im Normalbetrieb ist die Brennstoffzelle ausgeschaltet und das USV-Modul ist stromlos, also komplett ausgeschaltet. Erst im Notstromfall, nachdem die Brennstoffzelle gestartet ist, erhält das USV-Modul die Zwischenkreisspannung und kann erst dann starten und nach und nach die volle Last übernehmen. Dieses Startverhalten, '**Blackstart**' genannt, ist ebenfalls ein im USV-Modul vorgesehenes Szenario. Neu im Einsatz mit einer Brennstoffzelle ist lediglich, dass das Modul erst dann Last übernehmen kann, wenn die Brennstoffzelle dazu bereit ist. Dieses zusätzliche Signal bedingte eine kleine Anpassung des Brennstoffzellen-USV-Moduls, die durch die Fa. Newave vorgenommen wurde.

Die Tests in der ersten Periode zeigten, dass der Mittelabgriff prinzipiell so funktioniert.

Bei den Systemtests in der zweiten Testperiode zeigte sich aber, dass es für den Brennstoffzellenstapel besser ist, wenn er ohne Last aufstarten kann, da dann generell die Stapelspannung etwas höher ist. Dies kann nur durch den Einsatz von zusätzlichen Schaltern/Relais erfüllt werden, welche durch den Brennstoffzellenstapel kontrolliert werden. Diese Schalter/Relais sind im Layout der Systemarchitektur 1 in Abbildung 4 nicht eingezeichnet, weil sie integrierter Bestandteil des Brennstoffzellensystems sind.

Bei der Gasversorgung mussten nachträglich noch Expansionsgefässe à 3.75 l in die Niederdruckleitungen eingebaut werden, da die Brennstoffzelle die Gase pulsartig bezieht und dadurch die Druckreduzierventile überbeansprucht wurden und auch die Durchflussmessung nicht zuverlässig funktionierte.

Abbildung 5 zeigt den Aufbau der Anlage im Labor.

Systemarchitektur 1

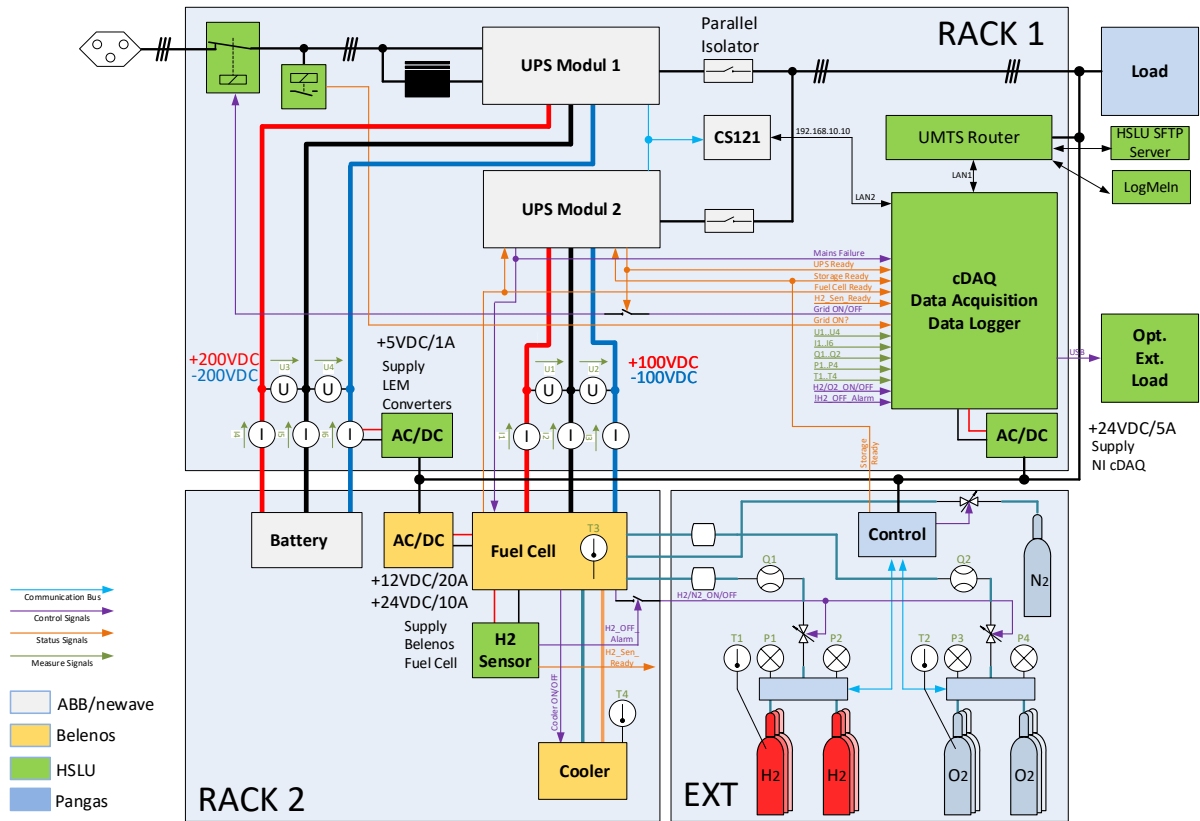


Abbildung 4: Schema Systemarchitektur 1 und Messkonzept

Brennstoffzellenstapel



Abbildung 5: Aufbau der Anlage gemäss Systemarchitektur 1: Rack 1 mit den zwei UPS Modulen (links), Rack 2 mit Brennstoffzellensystem und Batterien (rechts).

3.4 Systemarchitektur 2

In der dritten Testperiode zeigt sich, dass die beiden Systeme elektrisch nicht zusammenpassen. Die Spannung der Brennstoffzelle unterschritt zwischendurch die minimale Eingangsspannung des Boosters im USV-Modul 2, so dass sich das USV-Modul 2 ausschaltete. Die niedrigere Stapelspannung und die Probleme mit dem Wasserhaushalt hatten auch direkt Auswirkungen auf die maximale Ausgangsleistung: Es war nicht möglich, mehr als 12 kW Last zu speisen.

Diese Erkenntnis führte zum Entschluss, DC-DC Wandler in Rack 2 einzubauen.

Damit war es nun möglich, die Brennstoffzelle via DC-DC Wandler parallel zu den Batterien anzuschliessen. Der Einsatz eines zweiten USV Moduls war dadurch hinfällig.

Diese neue, in Abbildung 6 dargestellte Systemarchitektur 2 hatte ausserdem den Vorteil, dass bei einer Störung der Brennstoffzelle die Verbraucher noch für eine kurze Zeit gespeisen werden können.

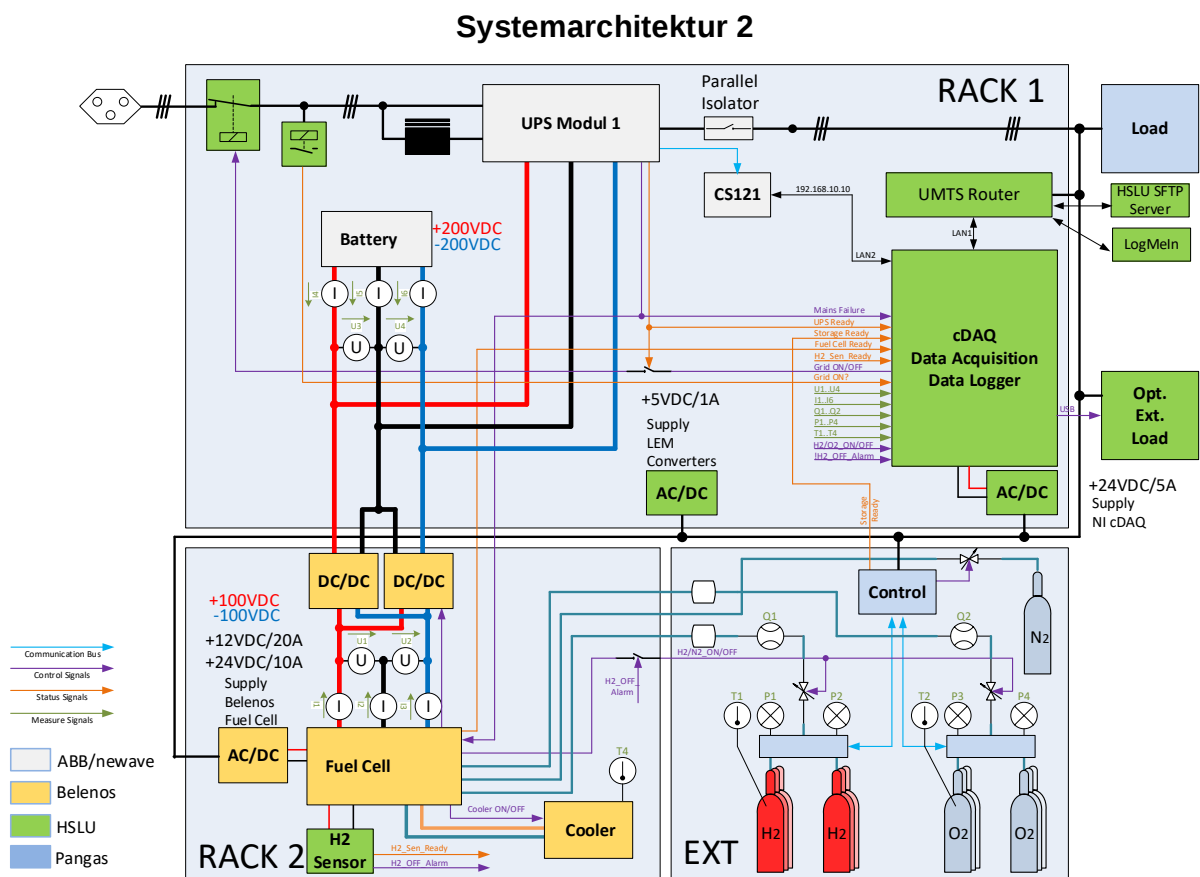


Abbildung 6: Schema Systemarchitektur 2 mit DC-DC-Wandlern

Mit dem Umbau wurden die Batterien aus Rack 2 demontiert und in Rack 1 mit den USV Modulen eingebaut. Dies wurde notwendig, weil sich durch die Abwärme der Brennstoffzelle die thermische Belastung ungünstig auf die Lebensdauer der Batterien auswirkt und der Platz für die DC-DC Wandler benötigt wurde.

Das nun erstellte Brennstoffzellensystem mit DC-DC Wandlern, integriert in Rack 2, kann jetzt wie ein zweiter Batteriestrang eingesetzt werden und ist somit für viele andere Typen von USV's einsetzbar. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen den neuen Aufbau und die DC-DC-Wandler.



Abbildung 7: Rack 2 der Systemarchitektur 2 mit Brennstoffzellensystem und DC-DC Wandlern



Abbildung 8: DC-DC-Wandler

3.5 Messkonzept

Das Konzept sah als ersten Meilenstein nach der Inbetriebsetzung im Labor vor, die Funktion und das Prinzip des Mittelabgriffs zu überprüfen. Sollte sich herausstellen, dass dieses Prinzip zu einer asymmetrischen Belastung der beiden Teilstapel führt und dadurch unvorteilhaft für die Lebensdauer der Brennstoffzelle wäre, würden beide Stapel für den Feldtest in Serie geschaltet. Dies wäre das Fall-back-Szenario, wie in Kapitel 3.2 beschrieben.

In einer anschließenden intensiven Testphase war vorgesehen, das System mit Stromausfallsimulationen zu stressen, um die Funktionsfähigkeit und Belastbarkeit des Systems in stressigen Situationen aufzuzeigen.

In einer zweiten Phase war die Installation beim Endanwender PanGas vorgesehen mit der Durchführung von Feldtests über den Zeitraum eines Jahres. Die Praxistauglichkeit des Systems im realen Einsatz sollte hiermit nachgewiesen werden. Tabelle 1 zeigt zusammengefasst den geplanten Ablauf der Testaktivitäten.



Phase	Testaktivität	Meilenstein	Bemerkung
1	Inbetriebsetzung der integrierten USV mit BZ mit neuem Stapeldesign	MITTELABGRIFF funktioniert	Falls nein, ist Fallback-Szenario vorgesehen mit zweitem Stapel in Serie
2	Labortest	System funktioniert zuverlässig im Labor	Durchführung gemäss Testprotokoll
3	Feldtest bei PanGas	System funktioniert zuverlässig im Feld	

Tabelle 1: Zusammenfassung der geplanten Testaktivitäten

Die wesentlichen **Messgrößen** sind die Stromstärke von Brennstoffzelle und Batterie über der Zeit, sowie die Spannungen. Des Weiteren wurden verschiedene Temperaturen erfasst und die Drücke in den Sauerstoff- und Wasserstoffzylindern wurden überwacht. Auch die Durchflussmengen von Wasserstoff und Sauerstoff wurden aufgezeichnet.

Die **Durchführung der Stromausfallsimulationen** war remote geplant, indem die AC Speisung des Gesamtsystems mit Hilfe eines Relais unterbrochen wird.

Eine **Messdatenerfassungs**-Software wurde auf der Basis von National Instruments LabVIEW erstellt, welche alle Messwerte kontinuierlich aufzeichnet (unabhängig davon, ob ein Test läuft oder nicht). Mit dieser Software hat die Hochschule Luzern – Technik & Architektur bereits Erfahrung aus zwei Vorgängerprojekten.

Die Messeinrichtung wurde im Labor installiert und sollte für den Anlagenstandort übernommen werden.

Bei den Labortests wurde eine **elektronische** Last eingesetzt, welche ebenfalls durch die Messdatenerfassungssoftware in mehreren Leistungsstufen eingestellt werden konnte. Damit die Last bei Systemarchitektur 2 weiterhin mit sieben Stufen schaltbar blieb, wurde mit einem dazwischengeschalteten Variac⁶ eine reduzierte Spannung an den Heizlüfter angelegt.

Zur **Analyse der Messdaten** wurde eine Auswertungssoftware auf der Basis von National Instruments DIAdem verwendet.

3.5.1 Messprotokoll

Für die Tests wurde ein eigenes Testprogramm entwickelt, in welchem die Lastprofile auf der Basis von Stromausfallstatistiken in Übereinstimmung mit typischen Anwenderbedürfnissen definiert wurden. Dabei waren die Markt Erfahrungen des Projektpartners Newave SA / A member of the ABB Group hilfreich. Zusätzlich wurden Testzyklen aus Vorgängerprojekten integriert.

Folgende Aspekte bildeten die Schwerpunkte für das Messprotokoll:

- Kurze Stromausfälle
- Länger andauernde Stromausfälle
- Dynamische Stromausfälle mit wechselnden Lasten
- Stresstests

⁶ Ein Variac ist ein Stelltransformator, mit dem Wechselspannungen und Ströme unter Last verlustarm eingestellt werden können.

Gemäss diesen Vorgaben wurden verschiedene Testzyklen definiert, die nach Testtyp benannt wurden. In Tabelle 2 sind die einzelnen Testtypen benannt und zusammenhängend dargestellt.

	Testtyp	Bemerkung	Häufigkeit der Durchführung (für kompletten Testdurchgang)
1	Ref Referenztest	Vergleichstests, Aufnahme der Kennlinie (U/I)	8
2	A1 fix	Je 15 min mit 5 konstanten Lasten; Je 1 min Netz ON zwischen Ausfällen	5
3	A1 dynamisch	Je 15 min mit 5 dynamischen Lasten	5
	A2 fix		5
	A2 dynamisch	Mit Lastsprüngen	5
	D1 kurze Stromausfälle	Stresstest, kurze Ausfälle von 2 min 5x nacheinander	5
	D2 lang andauernder Stromausfall (2h)	Dauertest, kontinuierlicher Betrieb ohne Lastwechsel	3
	C1 kurze Stromausfälle gefolgt von lang andauerndem Stromausfall (4h)	Entspricht Schwankungen im Netz gefolgt von lang andauerndem Ausfall	2

Tabelle 2: Auflistung der verschiedenen Testtypen in komplettem Testzyklus

Der Referenztest diente als Ausgangs- und Vergleichstest und wurde am häufigsten durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wurde jeweils eine Kennlinie erstellt. Nach 15 Minuten unter Volllast wurde die Last stufenweise in 5 Minuten Abständen reduziert. Abbildung 9 zeigt den Testzyklus graphisch.

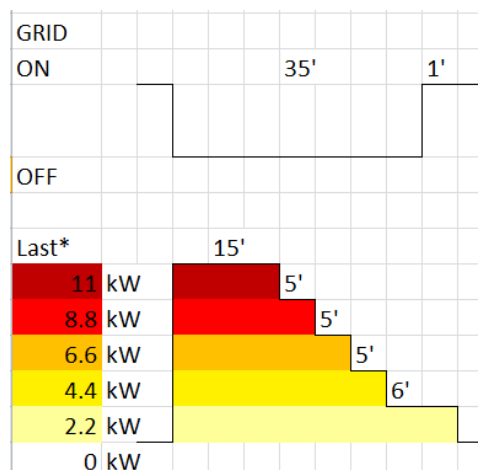


Abbildung 9: Referenztest



Alle weiteren Testtypen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Eine grössere Darstellung der Graphiken befindet sich in ANHANG 1.

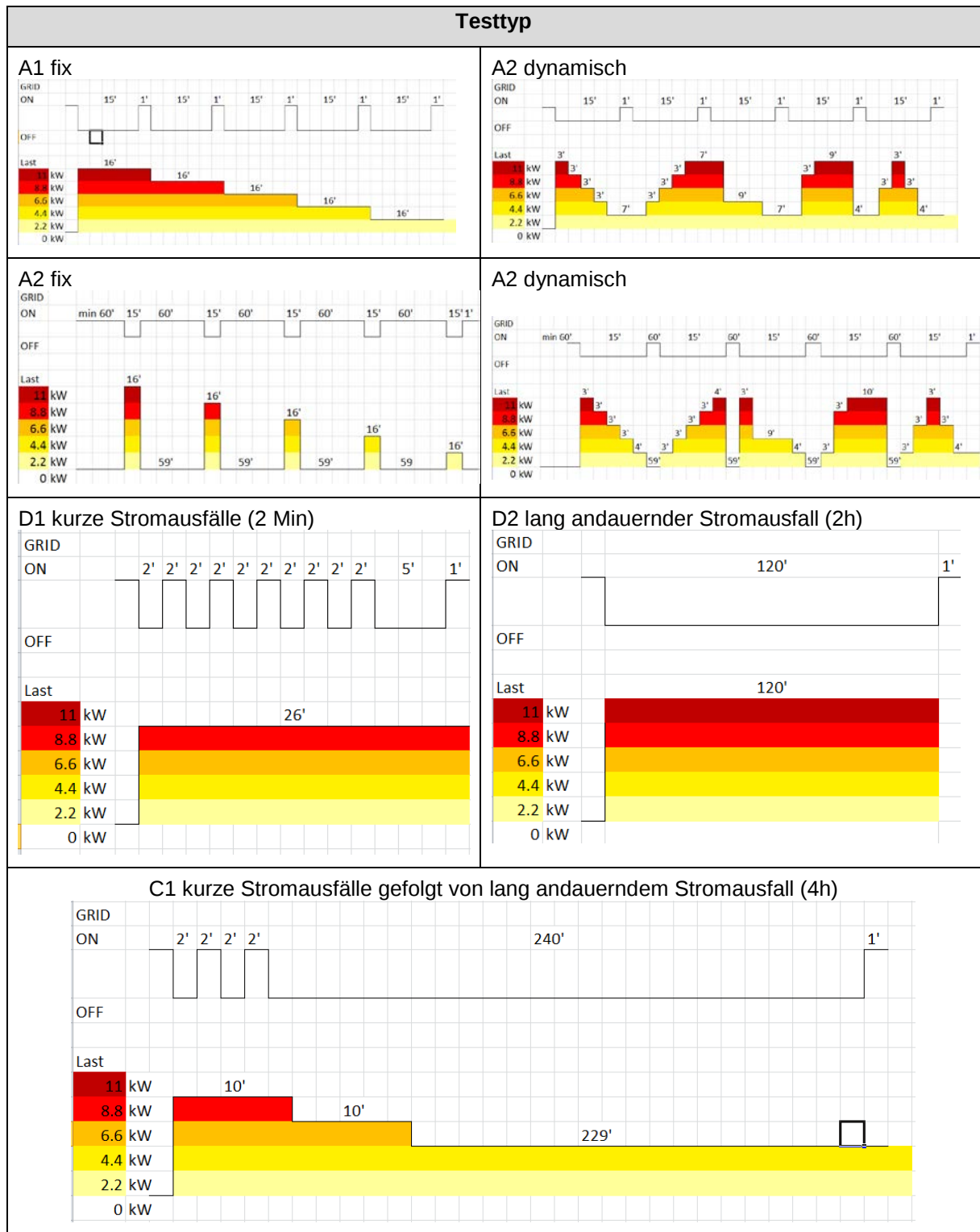


Tabelle 3: Graphische Darstellung der Testtypen



3.5.2 Messkomponenten

Das integrierte USV System mit Brennstoffzelle wurde mit Messtechnik ergänzt.

Nachfolgende Tabelle listet alle Messwerte und die dazu verwendeten Sensoren auf. Die genauen Positionen der Sensoren sind jeweils im Layout der Systemarchitektur ersichtlich.

Zusätzlich wurde die an der externen Last verbrauchte Leistung aufgezeichnet via 4..20 mA Strominterface und einem auf dem Camille Bauer Siamex A210 aufbauenden Messmodel.

BESCHREIBUNG	SENSOR	MESSBREICH	GAIN	NI MODUL
POS. DC SPANNUNG BZ	Spannungsteiler 10:1	+100V	10V/V	NI 9239
NEG. DC SPANNUNG BZ	Spannungsteiler 10:1	-100V	10V/V	NI 9239
POS. DC SPANNUNG BAT	Spannungsteiler 10:1	+100V	10V/V	NI 9239
NEG. DC SPANNUNG BAT	Spannungsteiler 10:1	-100V	10V/V	NI 9239
STROM POS. POL BZ	LEM HO100	±2V	125A/V	NI 9201
STROM MITTELABGRIFF BZ	LEM HO100	±2V	125A/V	NI 9201
STROM NEG. POL BZ	LEM HO100	±2V	125A/V	NI 9201
STROM POS. POL BAT	LEM HO100	±2V	125A/V	NI 9201
STROM MITTELABGRIFF BAT	LEM HO100	±2V	125A/V	NI 9201
STROM NEG. POL BAT	LEM HO100	±2V	125A/V	NI 9201
TEMPERATUR GASFLASCHE H ₂	PT100	-20 - 100°C		NI 9217
TEMPERATUR GASFLASCHE O ₂	PT100	-20 - 100°C		NI 9217
TEMPERATUR BZ STAPEL	PT100	-20 - 100°C		NI 9217
TEMPERATUR KÜHLER	PT100	-20 - 100°C		NI 9217
DRUCK GASFLASCHE H ₂	GEMS_Drucktransmitter 22IC	4-20mA	18.75Bar/mA	NI 9203
DRUCK GASFLASCHE H ₂	GEMS_Drucktransmitter 22IC	4-20mA	18.75Bar/mA	NI 9203
DRUCK GASFLASCHE O ₂	GEMS_Drucktransmitter 22IC	4-20mA	18.75Bar/mA	NI 9203
DRUCK GASFLASCHE O ₂	GEMS_Drucktransmitter 22IC	4-20mA	18.75Bar/mA	NI 9203
DURCHFLUSS H ₂	Digitaler Massendurchfluss- messer Bronkhorst F-113AC- M50-AFD-00-V	4-20mA		NI 9203
DURCHFLUSS O ₂	Digitaler Massendurchfluss- messer Bronkhorst D-6360- HFD-CC-AV-99-0-S-DR	4-20mA		NI 9203



BESCHREIBUNG	SENSOR	MESSBREICH	GAIN	NI MODUL
TEMPERATUR DURCHFLUSS H ₂	Digitaler Massendurchflussmesser Bronkhorst F-113AC-M50-AFD-00-V	4-20mA		NI 9203
TEMPERATUR DURCHFLUSS O ₂	Digitaler Massendurchflussmesser Bronkhorst D-6360-HFD-CC-AV-99-0-S-DR	4-20mA		NI 9203
LASTLEISTUNG 0 – 20 KW	Camille Bauer SINEAX A210	4-20mA		NI 9203
H ₂ ON/OFF	Digital Input			NI 9375
O ₂ ON/OFF	Digital Input			NI 9375
H ₂ OFF ALARM	Digital Input			NI 9375
UPS READY	Digital Input			NI 9375
STORAGE READY	Digital Input			NI 9375
FUEL CELL READY	Digital Input			NI 9375
FUEL CELL START	Digital Input			NI 9375
AC SUPPLY OFF	Digital Output			NI 9375

Tabelle 4: Messgrößen und Sensoren

Herzstück des Messequipments bildete der NI cDAQ-9138 Controller, auf welchem die LabVIEW Messdatenerfassungssoftware installiert wurde. Abbildung 10 zeigt den Testaufbau des Messequipments.

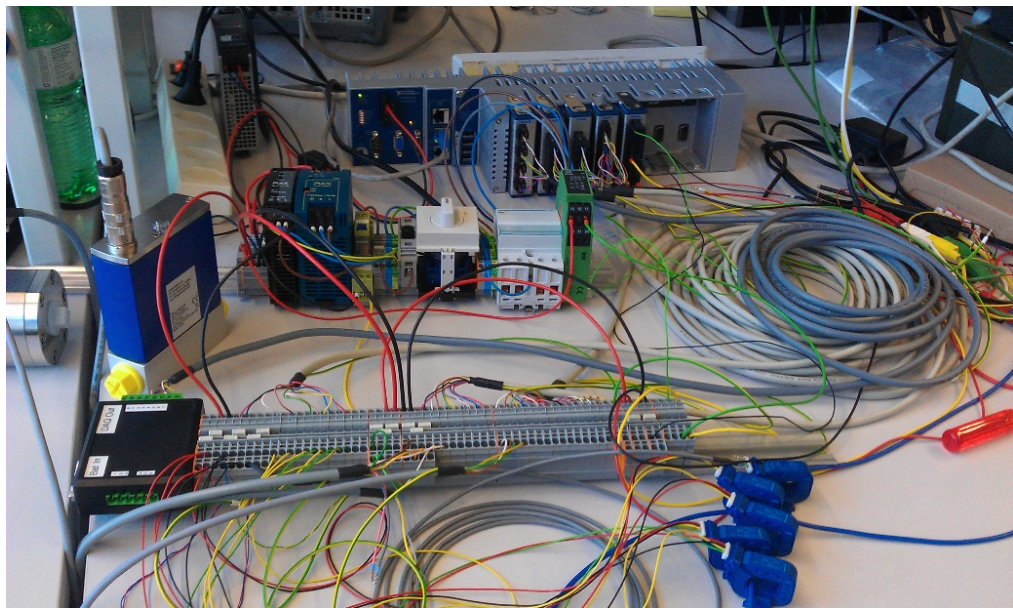


Abbildung 10: Testaufbau des Messequipments im Labor

Durch die Messsoftware wurden alle Messwerte über der Zeit mit einer Auflösung von 1 Sekunde aufgezeichnet. Die Werte konnten in Echtzeit am Monitor betrachtet werden, wie in Abbildung 11 gezeigt.

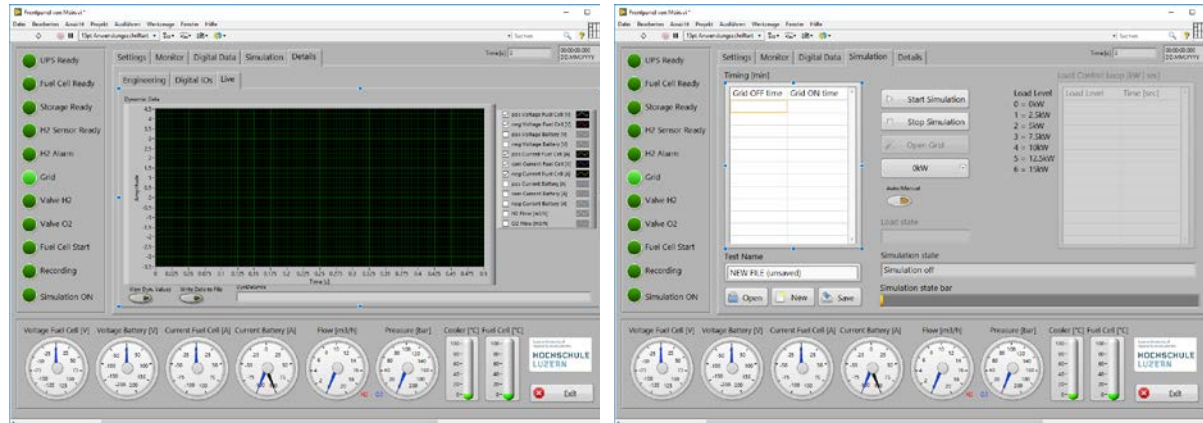


Abbildung 11: Screenshots der Mess- und Simulationssoftware

Die elektronische Last konnte ebenfalls über die Messsoftware via USB Schnittstelle gesteuert werden.



Abbildung 12: Modifizierter Heizlüfter als 'elektronische' Last

Die Leistung des Heizlüfters 'Frico Eltemperator Tiger P153' konnte über 7 Stufen im Bereich von 0 kW bis 15 kW in 2.5 kW Schritten eingestellt werden. Die Modifikationen des Heizlüfters wurden im Rahmen einer IPA⁷ durch einen Elektroniker-Auszubildenden vorgenommen. Abbildung 12 zeigt den Heizlüfter.

Die im Messkonzept beschriebenen Lastprofile sind in der Messsoftware hinterlegt, so dass die Systemtests automatisch ausgeführt und die dazugehörigen Daten aufgezeichnet werden konnten.

⁷ individuelle praktische Arbeiten (IPA) im Rahmen der Abschlussprüfung im Qualifikationsverfahren der beruflichen Grundbildung



Für die Auswertung der Messdaten wurde die Software DIAdem verwendet. Spezifische Skripts für die Analyse und graphische Darstellung der Ergebnisse wurden geschrieben und vorprogrammiert. Für jeden Testtyp wurde die System Performance mit Darstellung von Stromstärke, Spannung und Leistung aufgezeichnet. Nachfolgende Abbildung zeigt ein Beispiel der DIAdem Oberfläche für eine Auswertung.

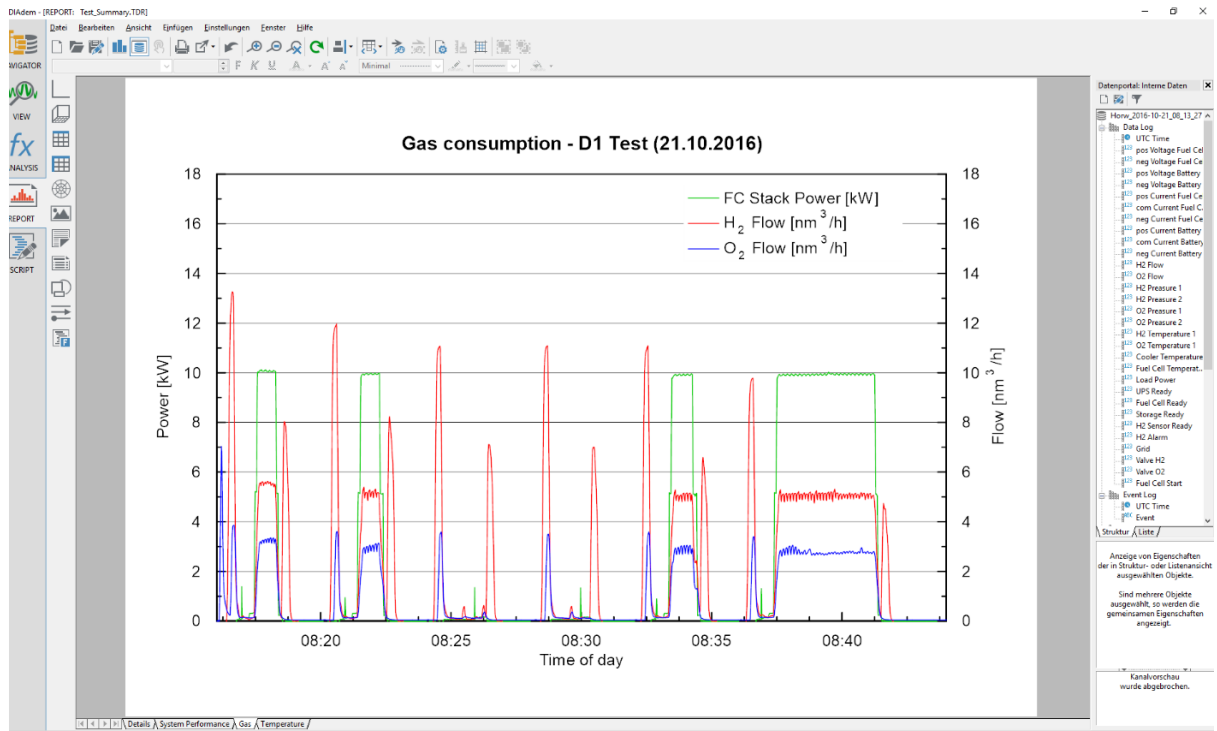


Abbildung 13: DIADEM Oberfläche

3.6 Brennstoffzellen Hardware Anpassungen

Im Laufe des Projekts wurden einige Anpassungen der Brennstoffzellen Hardware vorgenommen, um aufgetretene Probleme zu beheben.

Insbesondere wäre da die Integration der sogenannten **Cell Voltage Monitoring-Einheit (CVM)** zu nennen, das ist eine Elektronik, die seitlich an den Stapel geklemmt wird, um die Zellspannungen zu messen. Um den Verkabelungsaufwand zu reduzieren, wurde die CVM mit federnden Pins ausgestattet, die, an den Rand der Bipolarplatte gedrückt, den Kontakt zu den einzelnen Zellen herstellen. Abbildung 14 zeigt die federnden Pins der neuen CVM.

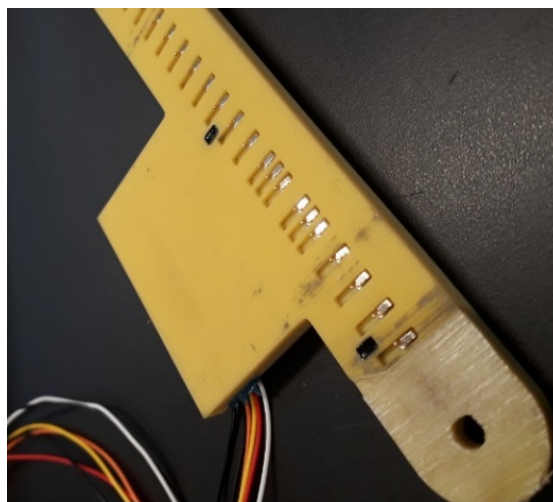


Abbildung 14: Federnde Pins der CVM-Halterung

Um eine gleichmässige Andruckkraft zu erzielen musste ein auch bei einer Temperatur von 80°C noch ausreichend biegesteifer Halter konstruiert werden. Dieser Halter wurde zunächst aus Aluminium hergestellt, der mit einer speziellen Beschichtung elektrisch isoliert werden sollte. Eine leichte Beschädigung der Beschichtung hat dann aber zu einem *Kurzschluss der Brennstoffzelle* geführt. Der Halter wurde daraufhin mit einer dicken Isolierfolie beklebt und nach aufwändiger Reparatur des Stapels wurde der Betrieb wiederaufgenommen.

Aufgrund eines durch einen Montagefehler hervorgerufenen Kühlwasserlecks ist am oberen Ende des Stapels dann Kühlwasser ausgetreten, welches nach einiger Zeit eine Kriechstrecke überbrückt hat. Anschliessend kam es zu einem *erneuten Kurzschluss*. Daraufhin wurde das **Halterungskonzept** komplett überarbeitet. Nun wurde das CVM durch mehrere elektrisch isolierte Halteklammern gegen den Stapel gedrückt. Die Montage war allerdings relativ aufwändig, da es schwierig war die federnden Pins richtig zu den Zellen auszurichten und dabei noch den richtigen Winkel der CVM einzustellen. Dieser Winkel war notwendig, um den festgelegten Zellabstand an der CVM auf den toleranzbedingt leicht veränderlichen Zellabstand des Brennstoffzellenstapels anzupassen.

Aufgrund der negativen Erfahrungen in diesem Projekt wurde die **Kontaktierung der CVM** komplett geändert. Es werden jetzt Stecker verwendet, die gleichzeitig mehrere Zellen kontaktieren und die dafür in eine in der Bipolarplatte eingelassene Vertiefung eingesteckt werden. Die Stecker werden zum Ausgleich der Toleranz der Zelldicke mit flexiblen Leiterplatten an die geradestehende CVM verbunden.



Nachfolgende Tabelle fasst die verschiedenen Massnahmen zur Brennstoffzellen Hardware Anpassung zusammen.

	Massnahme	
Brennstoffzelle	Neuer Kühler für höhere Leistung (vorher 7.5 statt 12 kW) Einbau 2x Leistungsrelais 100 A CVM Halter CVM Halterung neues Konzept (Kontaktierung) Zyklon für H ₂ O-Abscheidung neu mit Schwanenhals Statusdisplay Tool für Darstellung der einzelnen Zellspannungen	 
USV	Eingangssicherung USV-Modul wurde ersetzt, Feststellung: 80 A statt 100 A → Last auf 12.5 statt 15 kW reduziert	
Mess-einrichtung	Reparatur Gassensoren Zusätzliche Messgrössen eingebaut Externe Last Umbau von 2.5 auf 2.2 kW Abstufung	
System-architektur	2x DC-DC Wandler: Evaluation, Einbau, Verdrahtung, Programmierung Umbau Batteriemodule in USV Rack	
	Diverse Softwareanpassungen BZ → zur Regelung des Betriebs (Gasverbrauch, Purge and drain, Temperatur etc) USV → zur Synchronisation der Lastübergaben, Startverhalten	

Tabelle 5: Zusammenfassung der einzelnen Positionen der Hardware Anpassung

4 Resultate

Es liegen Resultate aus insgesamt drei Inbetriebsetzungen im Labor und einer komplett durchgeführten Labortestserie mit Systemarchitektur 1 vor. Nach der ersten Inbetriebsetzung mit den neu konstruierten Systemkomponenten konnte die **Funktion des Mittelabgriffs erfolgreich bestätigt** werden. Dies war ein erster wichtiger Meilenstein des Projekts und eines der Projektziele.

Während der ersten Testphase kam es zunehmend zu Ausfällen durch undichte Zellen. Wie schon im vorherigen Kapitel 3.6 'Brennstoffzellen Hardware Anpassungen' beschrieben wurde nach einem ersten Kurzschluss der Stapel repariert und einzelne Zellen wurden ausgetauscht. Nach Wiederaufnahme der Tests mit dem reparierten Stapel kam es jedoch zum zweiten Kurzschluss durch undichte

Stellen. Daraufhin waren umfassendere Massnahmen notwendig und Swiss Hydrogen hat das Halterungskonzept der Cell Voltage Monitoring Einheit (CVM) komplett neu überarbeitet und eine neue Halterung eingebaut.

Nach der erneuten Inbetriebsetzung konnte ein kompletter Testzyklus gemäss dem ausgearbeiteten Testprotokoll durchgeführt werden mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems nachzuweisen. Bei dieser Testserie hat die weiterentwickelte Brennstoffzelle zuverlässig funktioniert. Jedoch konnte das Ziel auch dieses Mal nicht erreicht werden, da die Lastübergaben zwischen der USV und der Brennstoffzelle für eine Anwendung im Feld nicht ausreichend gut funktionierten und es immer wieder zu Ausfällen kam.

Eine elektrische Entkopplung von USV und Brennstoffzellensystem wurde beschlossen wie bereits in Kapitel 3.4 'Systemarchitektur 2' näher beschrieben. Zwei DC-DC-Wandler wurden in das System integriert. Nachfolgende Tabelle fasst die Abläufe zusammen.

	Zeit	Durchgeführte Tätigkeiten	Resultat	Bemerkung
1	April 2014  Dez 2015	Erster Stack Fertigung, Aufbau Stack am PSI Montage, Verdrahtung und IBS in Horw Erste Testperiode Funktions-tests	MITTELABRIFF ok! 2x Kurzschluss Zellen undicht, Flamme! Wasser in Randzellen	Nach 1. Kurzschluss Austausch 12 Zellen; Nach 2. Kurzschluss Neukonstruktion CVM
2	Jan 2016  Juni 2016	Zweiter Stack (Reserve) Umbau, Einbau Systemanpassungen und IBS	Konzept der CVM Halterung komplett überarbeitet	1. kostenneutrale Projektverlängerung
	Juni/Juli 2016	Zweite Testperiode	Ausfälle Zusätzl Einbau von 2 Leistungsrelais	Dadurch lastfreier BZ Start möglich
	August 2016  Okt 2016	Dritte Testperiode Durchführung Tests gemäss Testprogramm	Zuverlässigkeit für Feldtest nicht gewährleistet	Entscheidung: Änderung der Systemarchitektur → Einbau DC-DC-Wandler
3	Jan - April Mai 2017	Umbau DC/DC-Wandler, IBS in Horw	Evaluation/Bestellung Einbau	2. kostenneutrale Projektverlängerung
	Juni – Nov 2017	Vierte Testperiode Durchführung Tests	Ausfälle, Wasseransammlung in Randzellen, Spannungsabfall	Tests und Projekt werden beendet Kein Feldtest

Tabelle 6: Zeitlicher Ablauf der Umbauten und Testperioden



4.1 System Performance und Wirkungsgrad

Ziel des Projekts war eine USV, die eine 15 kW Last während mehreren Stunden speisen kann. Der eingesetzte Brennstoffzellenstapel konnte die geforderte Lastleistung jedoch nie erbringen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Leistung des Brennstoffzellenstapels selbst aufgrund des Eigenbedarfs der Umsysteme (Pumpen, Lüfter, Controller etc.) und Wandlungsverlusten noch etwas höher angesetzt werden muss. Dass die Leistung nicht erbracht werden konnte, basiert hauptsächlich auf diversen Problemen mit der Regelung des Brennstoffzellenstapels.

Die vom Stapel erbrachte Leistung wurde zu verschiedenen Zeitpunkten durch Aufnahme einer U/I Kennlinie dokumentiert. Abbildung 15 zeigt die verschiedenen Kennlinien.

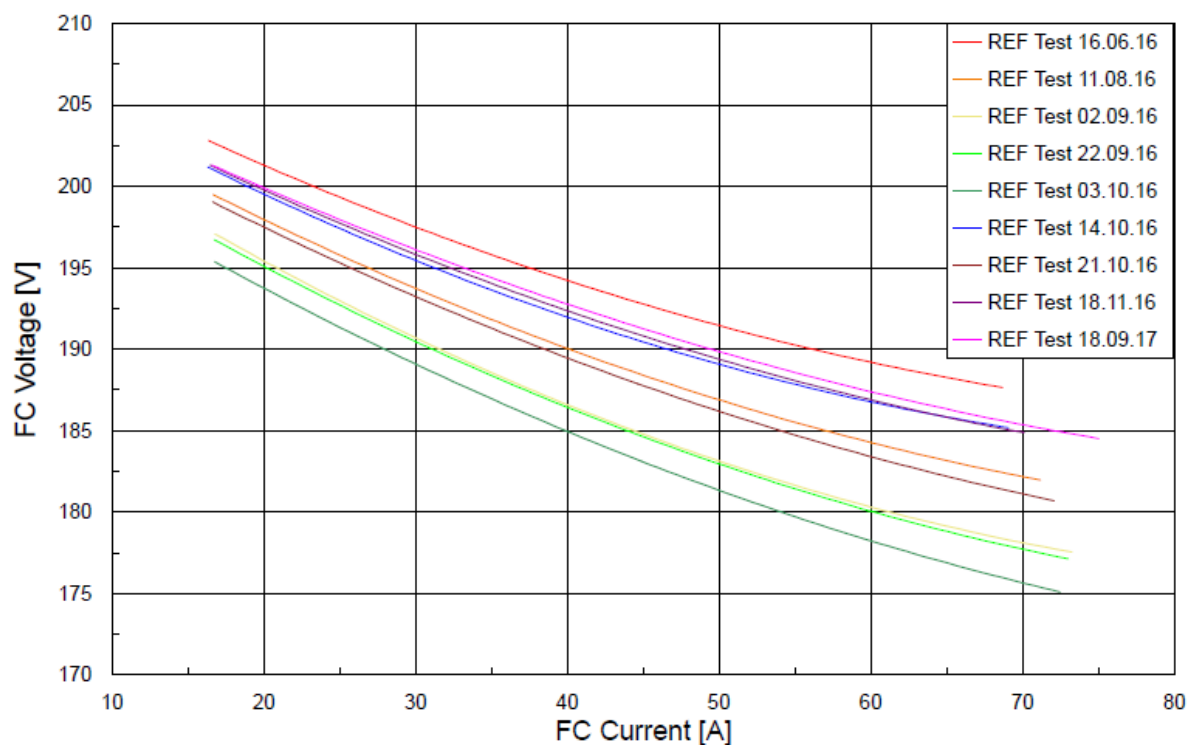


Abbildung 15: U/I-Kennlinie des Brennstoffzellenstapels zu verschiedenen Zeiten

Die in diesen Tests gemessene maximale Leistung des Brennstoffzellenstapels war 13.8 kW (gemessen am 18. Sept. 2017, 184 V bei 75 A). Wenn die AC Last weiter erhöht wurde, wurde der Stapel entweder durch die Zellspannungsüberwachung ausgeschaltet oder die Spannung sank unter den vom Booster geforderten Minimalwert.

Für das Erfassen der U/I-Kennlinie wurden Referenztest Zyklen eingesetzt.

Die in den Abbildungen 16 und 17 gezeigten Auswertungen zweier Referenztests zeigen auf, dass die Leistungen der Brennstoffzelle durch Optimierungen in der Regelung und mit Systemarchitektur 2 etwas besser waren.

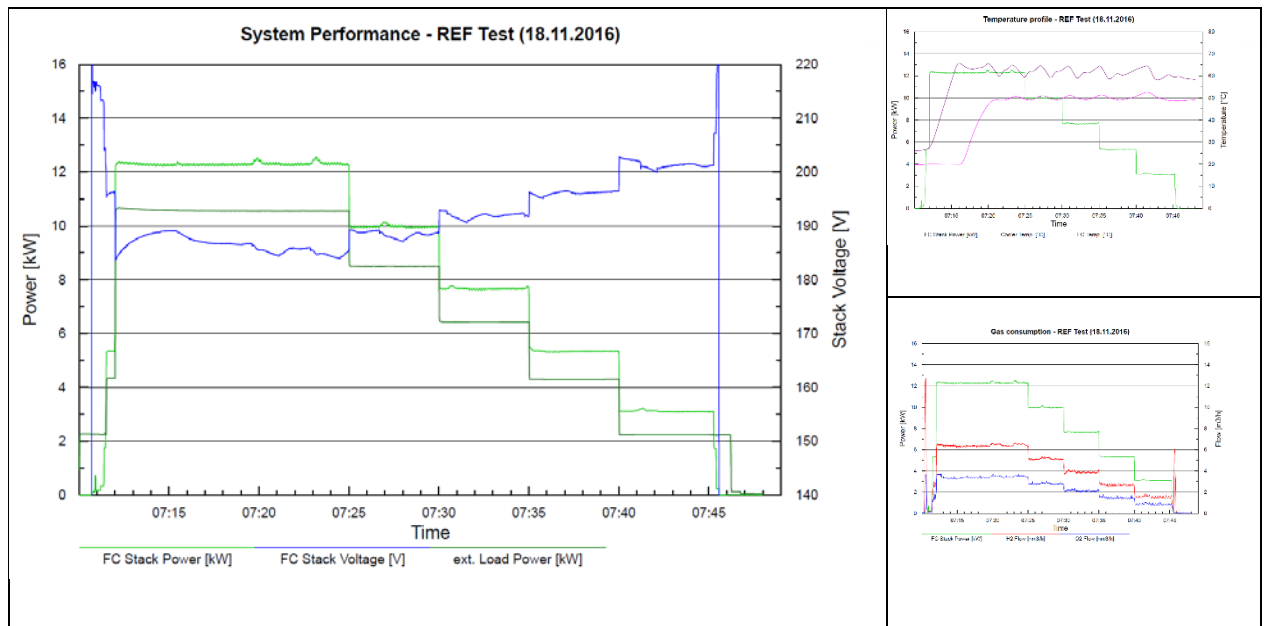


Abbildung 16: Ergebnisse des Referenztests mit Systemarchitektur 1 am 18. Nov. 2016

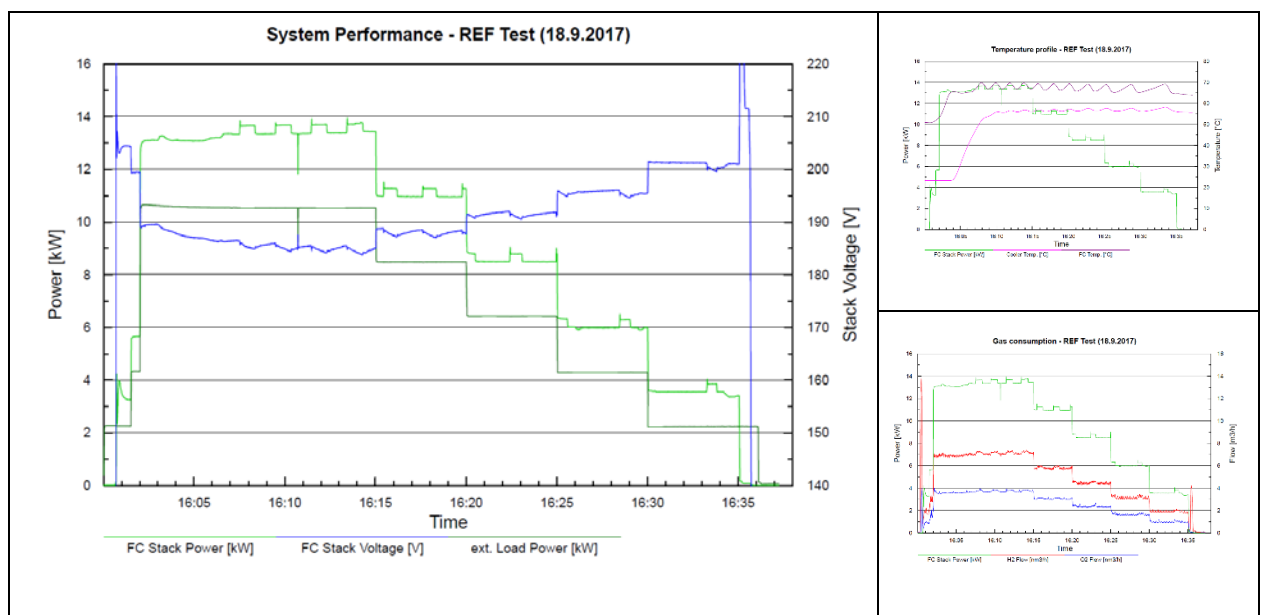


Abbildung 17: Ergebnisse des Referenztests mit Systemarchitektur 2 am 18. Sept. 2017

Aus den oben gemessenen Werten können weitere Kenngrößen für die Leistung des Stapels und des Gesamtsystems hergeleitet werden, unter anderen auch den Wirkungsgrad des Stapels und die Effizienz des Gesamtsystems:



	REF Rest 18.11.2016	REF Test 18.9. 2017
Durch den Stapel produzierte Energie	4.91 kW	5.41 kW
Durch die Last verbrauchte Energie	4.13 kW	4.14 kW
Stapel Effizienz ⁸	53.3%	52.4%
BZ –USV Effizienz ⁹	44.9%	39.9%
Elektr. BZ-USV Effizienz ¹⁰	84.1%	76.2%
BZ Laufzeit	0.578 h	0.574 h

Tabelle 7: Kenngrößen des Stapels und des Gesamtsystems

Diese Werte, auszugsweise dargestellt in Tabelle 7, zeigen eine Verbesserung der Stapelleistung als Folge der kontinuierlichen Verbesserungen in der Stapelregelung. Sie zeigen aber auch, dass der Gesamtwirkungsgrad der Anlage durch den zusätzlichen Einbau der DC-DC Wandler abgenommen hat.

Weitere beispielhafte Auswertungen für jeden Testtyp sind in Anhang 2.

4.2 Stapel Historie

Mit dem ersten Stapel wurden während der Testperiode insgesamt 101 Start-Stopp-Zyklen durchgeführt, bei einer Laufzeit von rund 10 Stunden und 85 kWh produzierter elektrischer Energie.

Mit dem zweiten Stapel konnte die komplette Testserie durchgeführt werden. Das System startete 419 Mal mit einer Gesamtlaufzeit von knapp 68 Stunden und 534 kWh produzierter elektrischer Energie. Dabei beinhaltet die Tabelle sowohl die Tests ohne DC-DC-Wandler als auch die mit neuer Systemarchitektur mit DC-DC-Wandlern.

Nachfolgende Tabelle fasst die Daten für beide Stapel zusammen; in den Abbildung 18 und 19 ist der Testverlauf für beide Stapel graphisch dargestellt.

Phase	Anzahl Start-Stopps gesamt	Laufzeit Brennstoffzelle gesamt	Produzierte elektrische Energie
Stapel 1	101	10.4 h	85 kWh
Stapel 2	419	67.7 h	534 kWh

Tabelle 8: Durchgeführte Start-Stopp-Zyklen, Laufzeit und produzierte elektrische Energie

⁸ Wirkungsgrad der Brennstoffzelle: Chemische Energie von H₂ zu elektr. Energie

⁹ Wirkungsgrad der Gesamtsystems: Chemische Energie von H₂ zu elektr. Energie an der Last

¹⁰ Wirkungsgrad USV: Elektrische Energie der BZ zu Energie an der Last

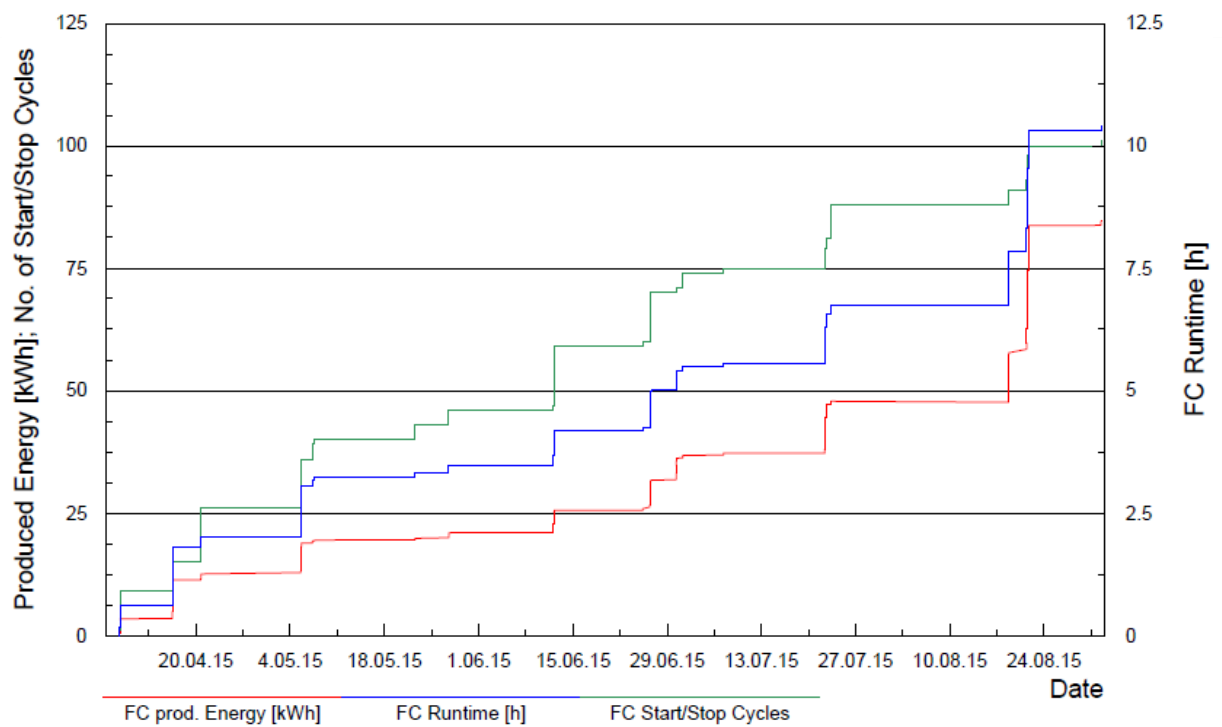


Abbildung18: Stapel Historie des ersten Stapels

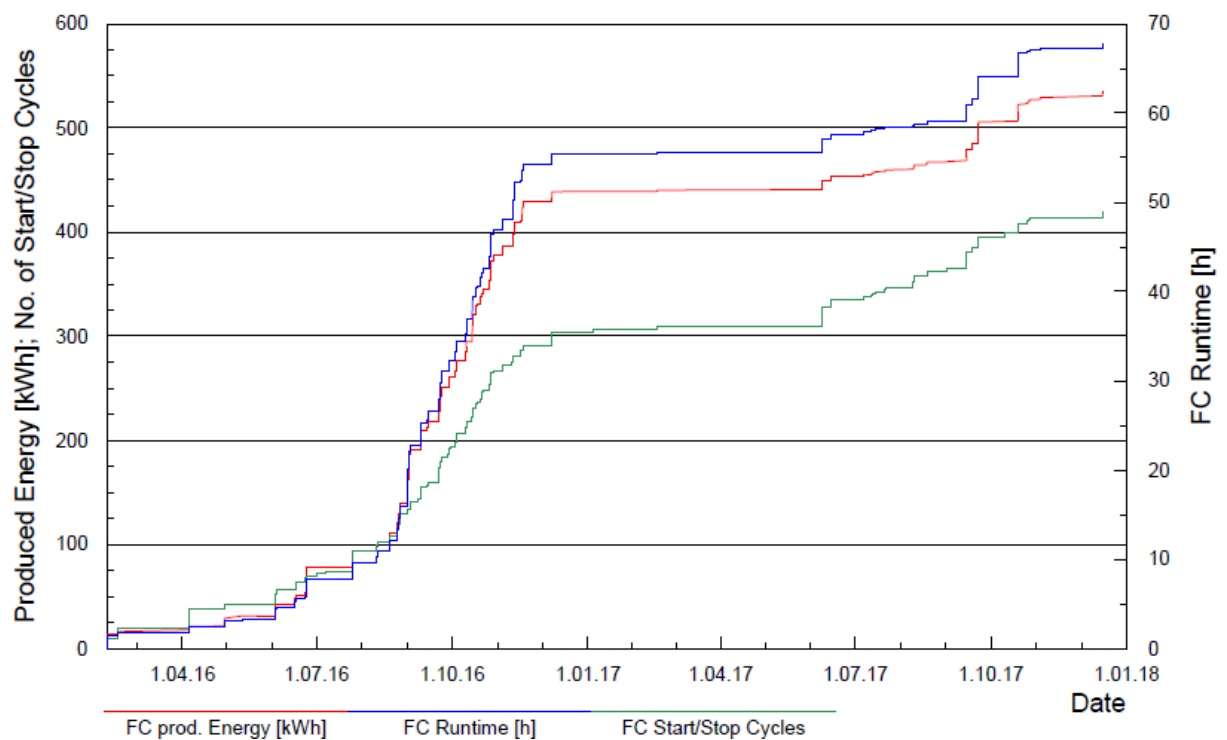


Abbildung19: Stapel Historie des zweiten Stapels



4.3 Start-up-Verhalten

Die Messergebnisse zum Start-up-Verhalten der Brennstoffzelle sind unspektakulär: Nach dem Start-signal 'Fuel Cell Start' meldete die Brennstoffzelle immer nach 40 Sekunden 'Stapel ready'.

Sobald die Brennstoffzelle meldet, dass sie bereit ist, startet das USV-Modul, welches mit der Brennstoffzelle gekoppelt ist. Dies ist unabhängig von der Last, da die Brennstoffzelle lastlos startet.

Dieses Verhalten lässt sich leicht erklären, wenn man den Startprozess der Brennstoffzelle analysiert. Dieser mehrstufige Prozess arbeitet mit fixen Zeiten. Nach Ablauf der definierten Zeit werden verschiedene Bedingungen überprüft. Wenn diese in Ordnung sind, wird der nächste Prozessschritt initiiert. Bei Abweichungen wird der Startvorgang abgebrochen und ein Fehler angezeigt. Das Startverhalten basiert somit auf einem fixen sequenziellen Ablauf.

4.4 Erkenntnisse aus den Messungen

Die Messungen wurden von den Projektpartnern laufend analysiert. Der Wert der Messergebnisse war enorm wichtig für die kontinuierliche Weiterentwicklung des Stapels. Aus den Ergebnissen wurden vielfältige Rückschlüsse auf Gasverbrauch, Gasflussverläufe, Temperaturbereiche, Wasserhaushalt und Konstruktion des Gehäuses gezogen. Nicht alle dieser Erkenntnisse werden in diesem Bericht im Detail erläutert. Aber unter anderem wurde im Projektverlauf ein Programm zur Zellspannungs-Überwachung und Darstellung entwickelt, mit dem die Spannung jeder einzelnen Zelle während des Betriebs der Brennstoffzelle überwacht werden kann.

Beispielhaft wird in den Abbildungen 20 und 21 die Programmoberfläche während einem der letzten Testläufe gezeigt. Deutlich ist der Spannungsabfall im Testverlauf in der ersten Zelle zu erkennen. Dies war auf eine Wasseransammlung in den ersten Zellen zurückzuführen.

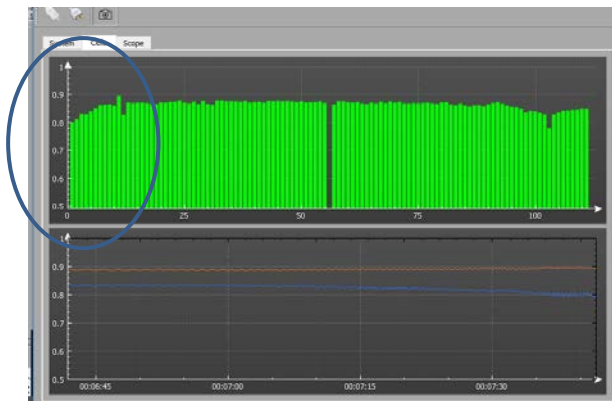


Abbildung 20: Tiefe Zellspannung in den ersten Zellen

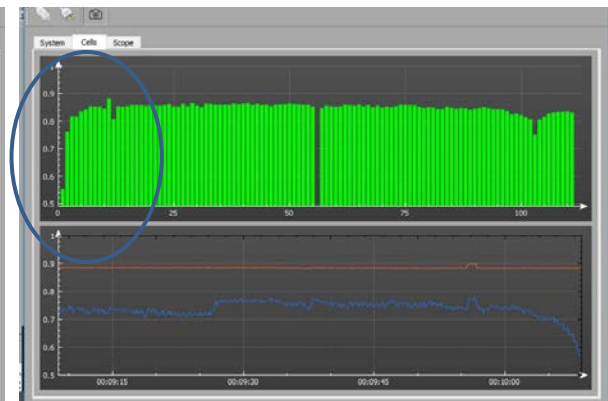


Abbildung 21: Zellspannung sinkt in den ersten Zellen weiter ab aufgrund von Wasseransammlungen

5 Diskussion der Ergebnisse

Positiv kann festgehalten werden, dass

- der Mittelabgriff erfolgreich integriert wurde und funktionierte.
- das Stapel-Design prinzipiell gut und kompakt ist.
- entscheidende Verbesserungen des CVM Verspannkonzpts erreicht wurden.
- das Konzept für Einzelzellmessungen optimiert wurde.
- die Sicherheitsvorkehrungen im System zuverlässig funktionieren.
- gute Betriebsergebnisse der Brennstoffzelle bei optimalem Wasserhaushalt vorliegen.
- die Systemarchitektur mit DC-DC Wandler sich bewährt hat.

Für die kontinuierlichen Anpassungen der Regelung, der Konstruktion der CVM-Halterung und des Gehäuses sowie der Optimierung des Wasserhaushalts musste noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden, da die ersten Tests nach Inbetriebsetzung des für die USV Integration angepassten Systems nicht die erforderliche Zuverlässigkeit ergaben. Die eigentliche Testserie konnte erst nach diesen erneuten Anpassungen durchgeführt werden. Dabei stellte sich heraus, dass auch die Lastübergabe zwischen USV und Brennstoffzelle verbessert werden musste.

Mit der zweiten Systemarchitektur mit DC-DC Wandlern wurden die Startbedingungen der Brennstoffzelle optimiert und die Lastübergabe zwischen USV und Brennstoffzelle war besser definiert. Der Zeitpunkt der Lastübergabe konnte nun durch die Brennstoffzellenregelung bestimmt werden. Dabei wurde eine Verringerung des Systemwirkungsgrads in Kauf genommen.

Trotz dieser Verringerung hat sich die zweite Systemarchitektur aber abschliessend bewährt, die Last wurde problemlos übergeben. Im Endergebnis lieferte das System jedoch auch mit dieser Massnahme nicht die ausreichende Zuverlässigkeit und Leistung, die für einen Einsatz im Feld erforderlich gewesen wäre. Massgeblich lag dies gemäss der letzten Testserie am Wassermanagement der Brennstoffzelle. Dieser Punkt ist für den Stapel zentral und wird im folgenden Absatz näher erläutert.

Wasserhaushalt

Die Wasserabscheidung hat nicht über einen konstanten Zeitraum optimal funktioniert, was zu einer Verschlechterung der Kennlinie beziehungsweise einem Ausfall des Systems vor allem bei höheren Lasten ab ca. 10 kW führte. Hauptursache war, wie sich rückblickend aufgrund von Weiterentwicklungen im ESI-Projekt sagen lässt, dass der Zyklon-Wasserabscheider falsch angeordnet und ungünstig konstruiert worden war.

Die Zykclone waren am Eingang der Anoden beziehungsweise Kathodenseite angeordnet, um eine möglichst hohe Eintrittsfeuchte zu erzielen, die für die Lebensdauer der MEA förderlich ist. Dies hat im Labor bei Leistungen bis 10 kW sehr gut funktioniert. Im vorliegenden Projekt wurde dann die Leistung auf 17 kW erhöht und es traten erhebliche Probleme auf. Grössere Mengen an flüssigem Wasser wurden in den Stapel gespült und haben dort (insbesondere an den Randzellen, die etwas kälter sind, sowie an einzelnen Zellen, die aufgrund von Fertigungstoleranzen einen leicht unterdurchschnittlichen Gaszufluss haben) die Gaskanäle verstopft. Somit wurde sowohl die Stabilität des Betriebs gestört als auch die Lebensdauer der MEA drastisch reduziert.



Eine nochmalige Anpassung der Konstruktion der Wasserabscheidung und eine Optimierung der Stapelregelung wäre notwendig geworden. Dies hätte jedoch zu weiterem grösserem Entwicklungsaufwand und beträchtlichen Mehrkosten geführt. Am Ende der Testserie waren die Projektgelder weitgehend aufgebraucht und es wurde beschlossen, das Projekt auf diesem Stand zu beenden. Die wichtigen Erkenntnisse aus diesem Projekt sind in die Weiterentwicklung des Brennstoffzellensystems für die ESI-Plattform eingeflossen.

Im Projekt ESI konnte basierend auf den Erkenntnissen dieses Projektes die Wasserabscheidung erheblich verbessert werden. Allerdings waren dafür nochmals zwei Entwicklungsschritte notwendig. In einem ersten Schritt wurde der Zyklon auf der Eingangsseite neu konstruiert. Dazu wurde eine auf Zyklonabscheider spezialisierte Beratungsfirma mit einbezogen. Die Geometrie der Zuströmung wurde komplett verändert.

In einem zweiten Iterationsschritt wurden dann noch zusätzliche Zyklone an den Ausgängen des Stapels angeordnet und es wurden Sammelvolumen hinzugefügt, die die abgeschiedene Wassermenge für eine gewisse Zeit speichern können, um die Gasverluste beim Ablassen des Wassers zu reduzieren und somit die Gasausnutzung zu verbessern.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Für den Bau eines Prototyps in diesem Projekt war die technische Reife des Systems nicht ausreichend fortgeschritten. Das Brennstoffzellensystem hat aber ein gutes Potential, sich zukünftig am Markt zu positionieren. Es kann positiv festgehalten werden, dass durch die Testergebnisse der Projektpartner Swiss Hydrogen einen entscheidenden Schritt in der Brennstoffzellenstapel- und Systementwicklung weitergekommen ist. Das Verspannkonzert der Stapel und das Wassermanagement in den Zellen konnten dank der Erfahrungen mit diesem Projekt entscheidend verbessert werden, ebenso die Servicefreundlichkeit durch schnellen Austausch der Brennstoffzelle.

Das Projekt hatte auch massgeblich Einfluss darauf, dass die ESI-Plattform am PSI bewilligt wurde und vorbereitet werden konnte. Das ESI-Projekt hat eine hohe politische Bedeutung mit internationaler Ausstrahlung. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen bildeten eine gute Basis für die am PSI beteiligten Forscher aus dem Brennstoffzellenbereich, um die ESI-Plattform zu lancieren und den Aufbau vor Ort und die Weiterentwicklung des Systems voranzutreiben. Nachfolgende Abbildung zeigt den Einsatz von vier Modulen mit überarbeitetem Stapeldesign im ESI-Projekt.



Abbildung 22: Einbau von vier Swiss Hydrogen Brennstoffzellen-Modulen mit neuem Design im ESI-Projekt

Im Verlauf des ESI-Projekts waren dann weiterführende Massnahmen im Bereich des Wasserhaushalts notwendig. Es wurden einige Komponenten optimiert und neue Ejektoren eingesetzt. Die neuen Wasserabscheider wurden im vorliegenden Projekt entwickelt und für ESI weiter optimiert. Die Einzelzellspannungsmessung konnte grundsätzlich übernommen werden, die Kontaktierung und die elektrische Isolation zum Gehäuse wurden aber weiter verbessert.

Die grösste Herausforderung bei grösseren Leistungen über 10 kW war und ist es, das Wasser kathodenseitig auszutragen. Zusätzlich hat die vertikale Position des Stapels Einfluss auf die Wasseransammlungen. In der Rückschau sind die Ergebnisse aus dem vorliegenden Projekt logisch und hätten nicht auf die Schnelle behoben werden können.

Eines der Projektziele, welches die Weiterentwicklung eines in der Schweiz entwickelten Brennstoffzellensystems war, ist jedoch vollumfänglich erreicht. So kann trotz der fehlenden Umsetzung im Feld



ein insgesamt positives Fazit gezogen werden. Das Projekt hat nicht zuletzt dank der Weiterentwicklung in diesem Projekt die Basis für die schon genannten und die folgenden weiterführenden Projekte gelegt und dazu beigetragen, das Thema Brennstoffzellen im Schweizer Umfeld weiter zu verankern.

Einsatz des weiterentwickelten Brennstoffzellensystems in folgenden Projekten:

- **Teilnahme an der Solarboat Race for Water¹¹** (Abbildungen 23 und 24)

Für dieses Projekt wurden das Konzept des neuen Wasserabscheiders sowie Teile der Anodenrezirkulation übernommen.



Abbildung 23: Solarboot mit Brennstoffzellensystem



Abbildung 24: Eingebautes Brennstoffzellsystem im Solarboot

¹¹ www.swisshydrogen.ch/2017/04/09/race-for-water-solar-vessel/

- **Brennstoffzellen-Lastwagen COOP** (Abbildungen 25 und 26)

Für dieses Projekt wurden das Konzept des neuen Wasserabscheiders sowie Teile der Anodenrezirkulation übernommen.



Abbildung 25: COOP Lastwagen mit eingebautem Brennstoffzellensystem (Bildquelle: www.coop.ch)



Abbildung 26: Brennstoffzellensystem (Bildquelle: www.coop.ch)

- **KANGOO, BFE-Projekt** (Abbildungen 27 und 28)

Für dieses Projekt wurden das Stapel Verspannkonzert und das Konzept des neuen Wasserabscheiders übernommen sowie Teile der Anodenrezirkulation.



Abbildung 27: Kangoo an Tankstelle



Abbildung 28: Eingebautes Brennstoffzellensystem

6.1 Nächste Schritte nach Projektabschluss

Mit Abschluss des Projekts wurde die Demonstrationsanlage abgebaut. Das Brennstoffzellensystem ist weiterentwickelt und hat einen höheren technischen Reifegrad erreicht. Das im Projekt getestete System ist nicht mehr auf dem aktuellen Stand.

Swiss Hydrogen wird ein neues Wasserstoff-Luft-basiertes Brennstoffzellensystem konzipieren, bei welchem der Stapel in horizontaler Lage ausgerichtet wird. Das BFE unterstützt im Projekt 'FC Horizon' diese neue Entwicklung. Abbildung 29 zeigt einen Entwurf des neuen Stapels.

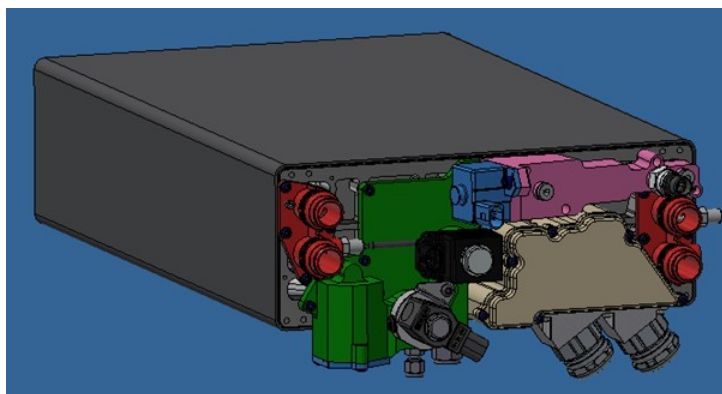


Abbildung 29: Entwurf des neuen horizontalen Stapels im Projekt FC Horizon

Das System wird für den mobilen Sektor konzipiert. Swiss Hydrogen wurde im Dezember 2017 vom französischen Autozulieferer Plastic Omnium übernommen und die zukünftige Ausrichtung der Entwicklungen sind logischerweise auf den Automobilsektor fokussiert. Eine Weiterentwicklung der Systeme mit Wasserstoff-Sauerstoff-Betrieb über das ESI-Projekt hinaus ist derzeit nicht angedacht. Eine Lizenzierung der Technologie an einen interessierten Dritten könnte aber in Betracht gezogen werden.

Bei Newave SA / A member of the ABB Group besteht nach wie vor Interesse an der neuen Technologie. Unser Projektpartner erhält immer wieder Anfragen seitens Kunden aus der Öl- und Gasindustrie, die an alternativen Lösungen zu reinen Batterie-USV interessiert sind. Aktuell ist ABB aber nicht aktiv in dieser Sache engagiert, die Entwicklung der Technologie wird jedoch weiterhin mit grossem Interesse verfolgt. Sobald für die spezifischen Anwendungen preislich interessante Brennstoffzellen-USV erhältlich sind, könnte sich die Situation schnell ändern.

Für die PanGas AG ist der zukünftige Einsatz einer Brennstoffzellen-USV derzeit kein Thema; für die nächsten Jahre wurde wieder eine herkömmliche Lösung gewählt. Das Projekt wäre eine gute Chance gewesen, die Technologie am Standort in Dagmersellen einzuführen.

Die Hochschule Luzern – Technik & Architektur wird sich weiterhin auf stationäre Anwendungen im USV-Umfeld und auf die Durchführung von Labor- und Feldtests fokussieren. Es ist eine gute Laborinfrastruktur für Leistungen bis 30 kW vorhanden. Für das Jahr 2019 sind Anfragen für Feldmessungen in Abklärung.

7 Referenzen

U. Trachte: Erste kommerzielle Brennstoffzellen im Notstrombereich. Bulletin SEV / VSE, Heft 19, Okt. 2008, 17-21 (2008)

U. Trachte, B. Wellig, E. Lüthi: Folgeprojekt USV für GSM/UMTS-Basisstationen mit Brennstoffzellen. Bundesamt für Energie BFE, Projektnummer 102256 (2010)

U. Trachte, M. Kleingries, B. Wellig: Uninterruptible Power Supply with PEM Fuel Cell Technology. European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, June 28-July 1 (2011)

* K. Zellweger: Brennstoffzellen für den Notfall. Hochschule Luzern, Das Magazin, Okt. 2012, S. 8-10 (2012)

* M. Buchs: Brennstoffzellen für die Kommunikation im Notfall. energiea, Nr. 2, Mrz. 2013, S. 12-13 (2013)

U. Trachte, P. Sollberger, B. Wellig: FITUP – Fuel Cell Field Test Demonstration of Economic and Environmental Viability for Portable Generators, Backup and UPS Power System Applications. 4th European PEFC and H₂ Forum, Lucerne, 2nd -5th July (2013)

Christian Peter: Präsentation, f-cell Messe, PSI. Stuttgart, Oktober 2014

U. Trachte, P. Sollberger, B. Wellig: PEM Fuel Cell Systems as Backup Solution for POLYCOM Applications. 5th European PEFC and H₂ Forum, Lucerne, 30th June - 3rd July (2015)

F. Runtsch, C. Peter, M. Ammann, U. Hannesen, M. Birrer, C. Zumbühl, U. Trachte, P. Sollberger, F.N. Büchi: H₂/O₂ PEFC system in an Uninterruptible Power Supply application with extended autonomy time. Jahresbericht Paul-Scherrer-Institut (2015)

Fuel Cells Bulletin: Race for Water electric catamaran sets off with Swiss Hydrogen tech. Volume 2017, Issue 4, April 2017, S. 5-6 (2017)

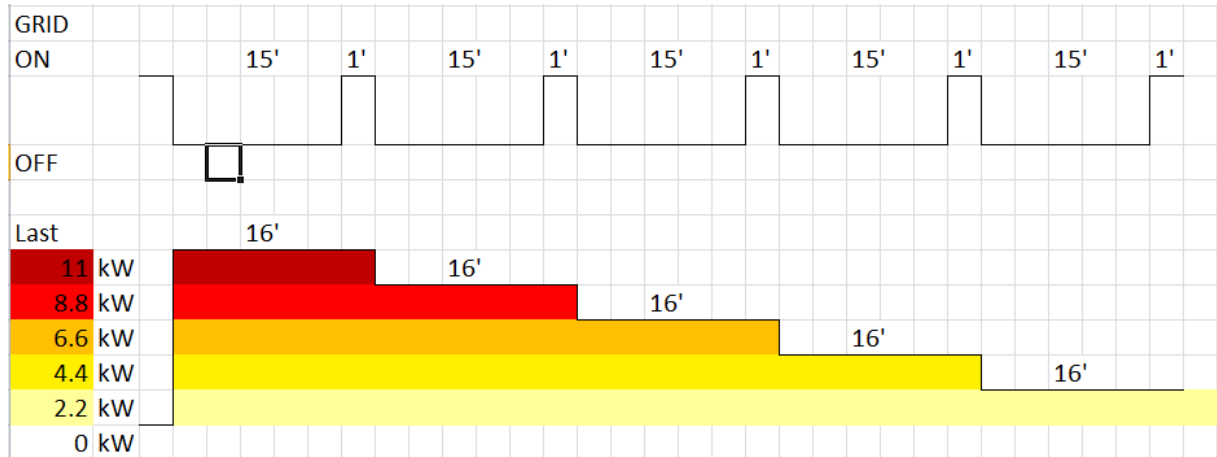
U. Trachte, P. Sollberger: Long Term Field Testing of PEM Fuel Cell Backup Applications in the Field of Communication. 6th European PEFC and H₂ Forum, Lucerne, 4th - 7rd July (2017)



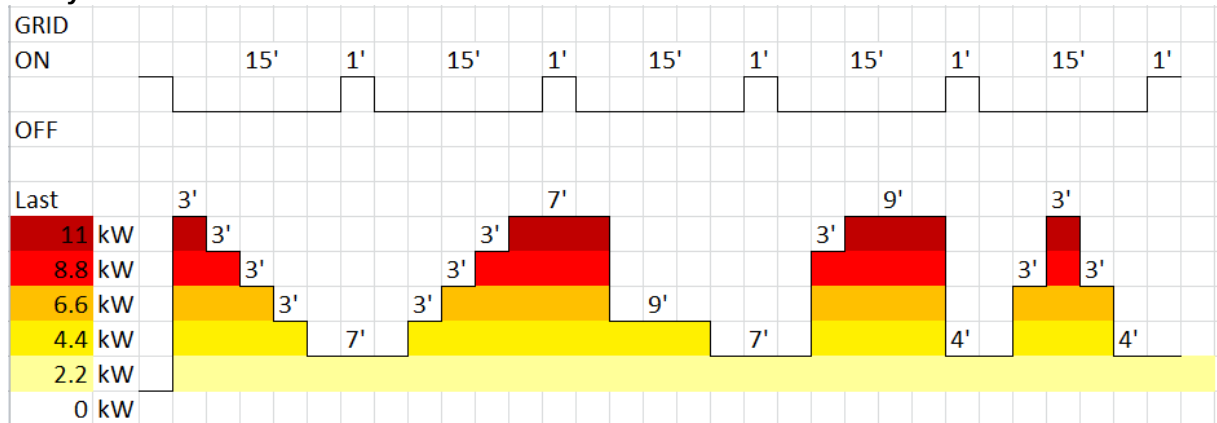
8 Anhänge

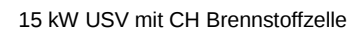
8.1 Anhang 1: Graphische Darstellung der Testtypen

A1 fix

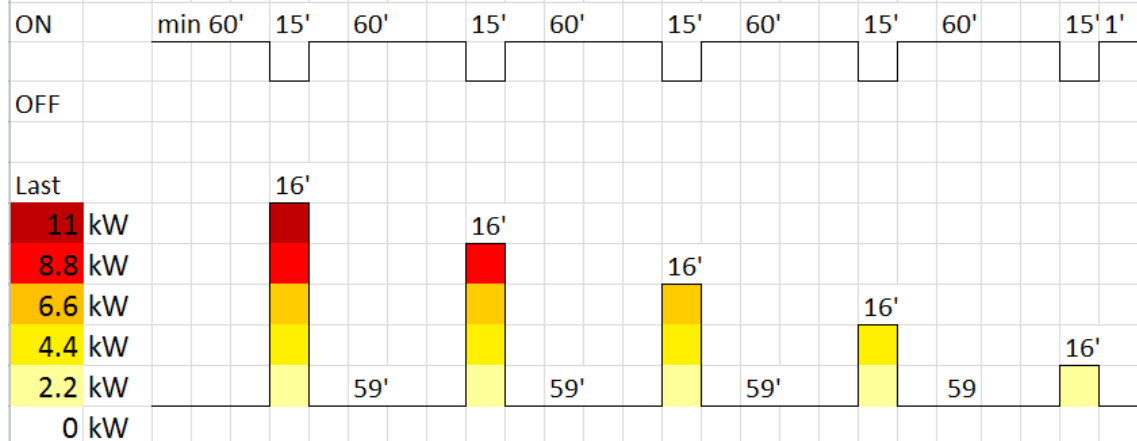


A1 dynamisch

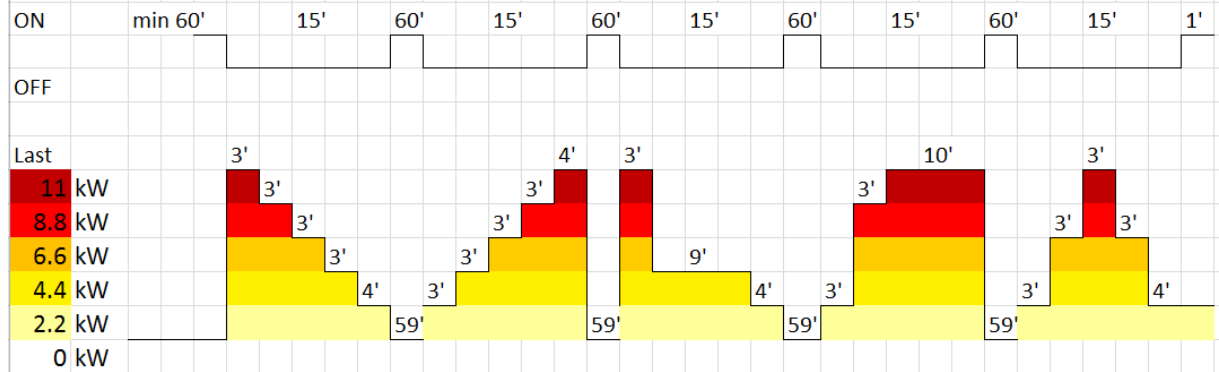




GRID

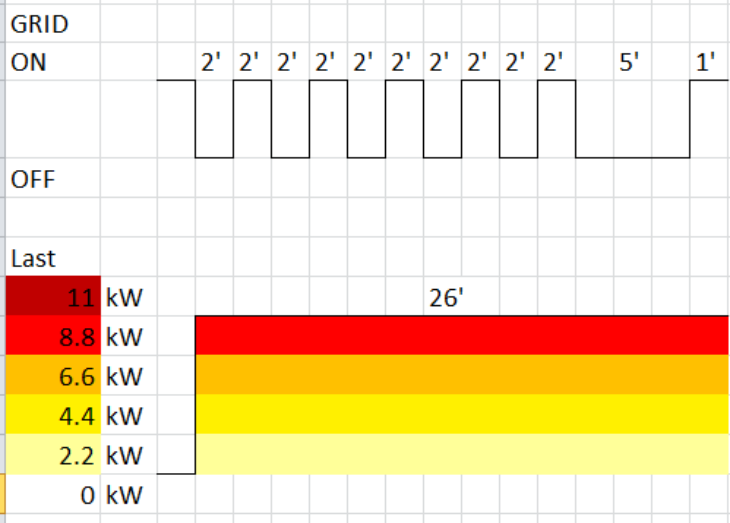


GRID			
------	--	--	--

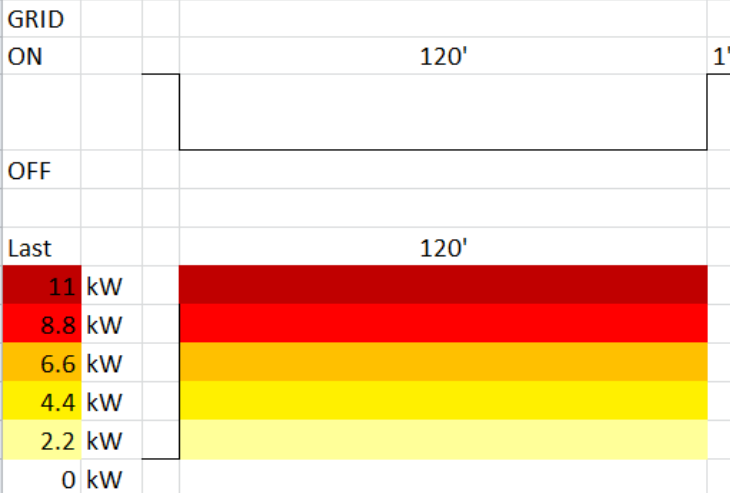




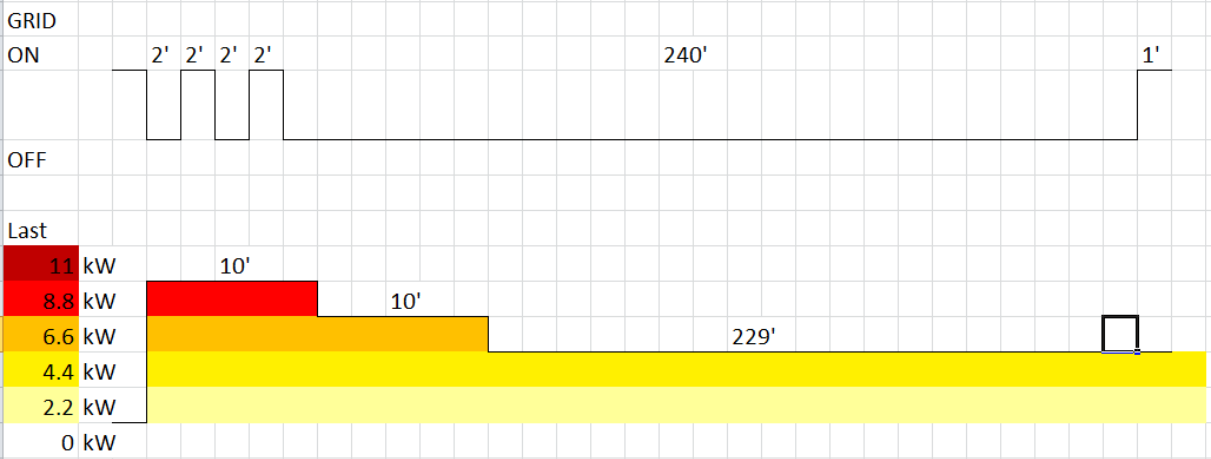
D1 kurze Stromausfälle



D2 lang andauernder Stromausfall (2h)



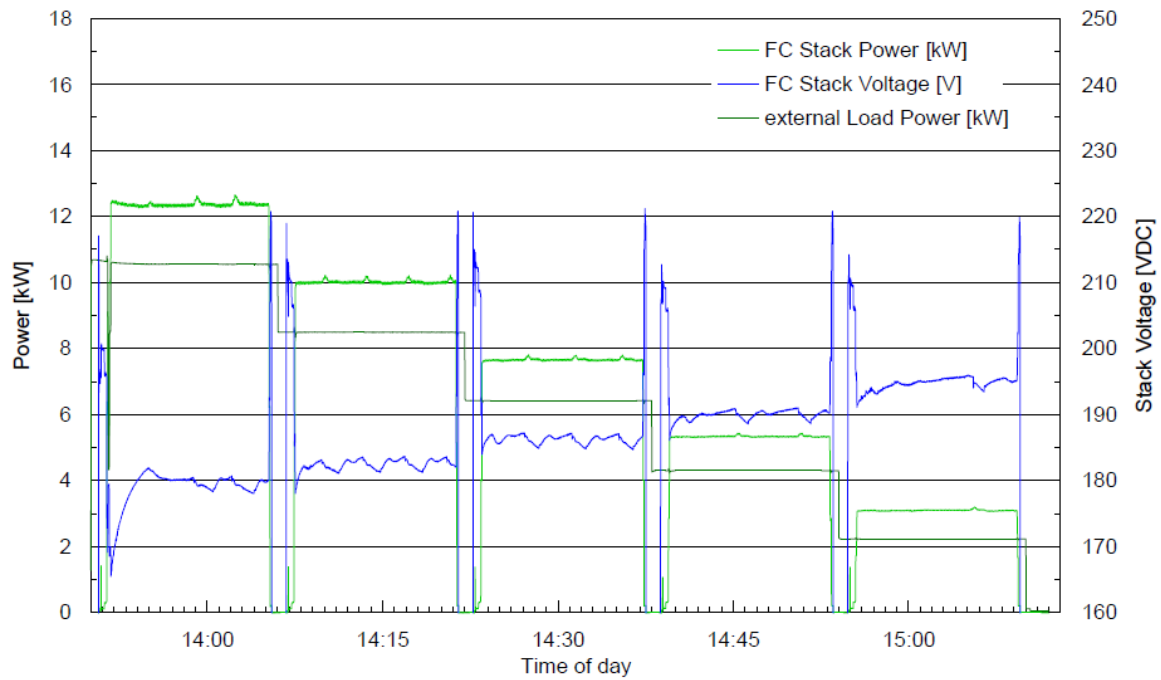
C1 kurze Stromausfälle gefolgt von lang andauerndem Stromausfall (4h)



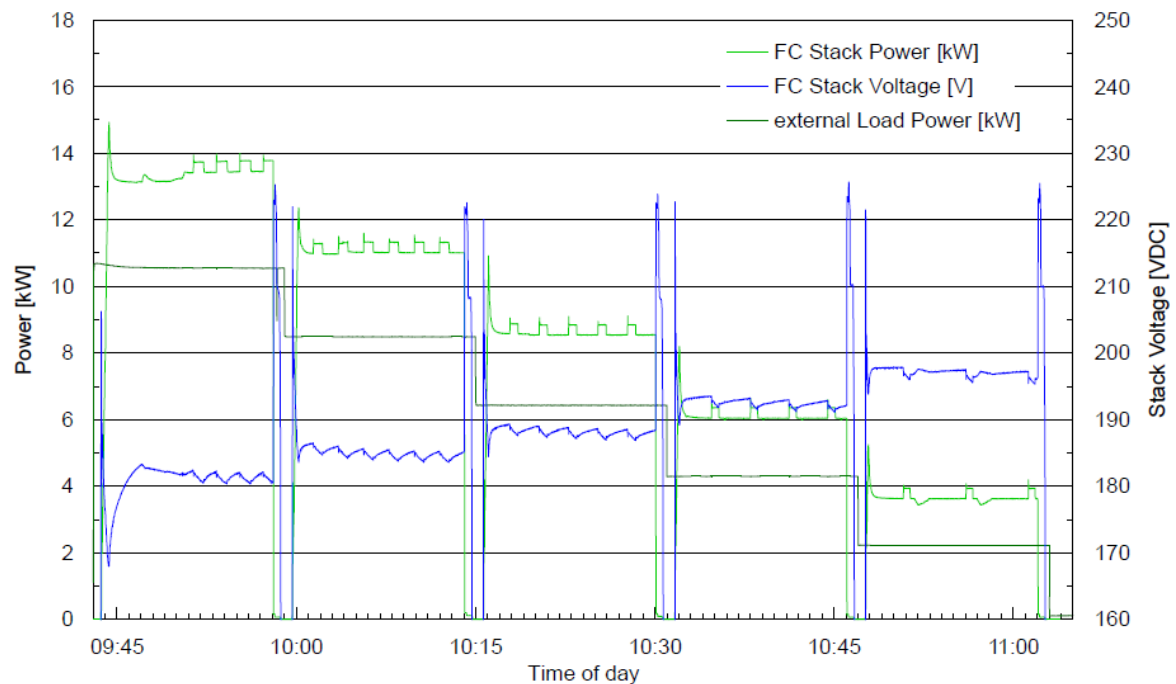
8.2 Anhang 2: System Performance verschiedener Testtypen

Beispiele

A1 fix Test (26.10.2016) ohne DC-DC Wandler

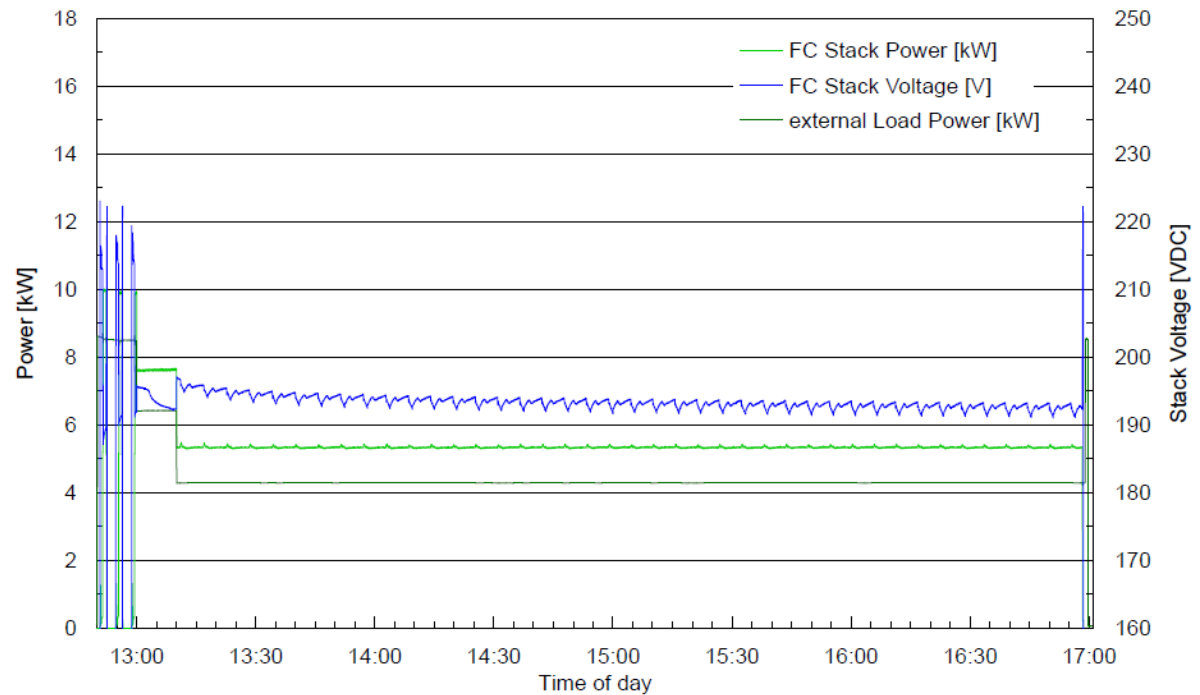


A1 fix Test (22.09.2017) mit DC-DC Wandler





A1 Test ohne DC-DC-Wandler	A1 Test mit DC-DC-Wandler
FC stack produced energy: 8.89 kWh External load consumed energy: 7.37 kWh FC stack efficiency: 53.4% FC-UPC system efficiency: 44.3% Electrical FC-UPC system efficiency: 82.9% FC runtime: 1.22 h FC starts [number]: 5	FC stack produced energy: 10.20 kWh External load consumed energy: 7.60 kWh FC stack efficiency: 49.7% FC-UPC system efficiency: 37% Electrical FC-UPC system efficiency: 74.5% FC runtime: 1.20 h FC starts [number]: 5

C1 Test, 4 Stunden-Test (11.11.2016) ohne DC-DC-Wandler**System Performance - C1 Test (11.11.2016)**

FC stack produced energy: 21.99 kWh
External load consumed energy: 17.73 kWh
FC stack efficiency: 54.8%
FC-UPC system efficiency: 44.2%
Electrical FC-UPC system efficiency: 80.6%
FC runtime: 4.05 h
FC starts [number]: 3