



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Schlussbericht 30.12.2015**

---

# **USV mit PEFC**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Brennstoffzellen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Hochschule Luzern – Technik & Architektur  
Technikumstrasse 21  
CH-6048 Horw  
[www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

**Autoren:**

Ulrike Trachte, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, [ulrike.trachte@hslu.ch](mailto:ulrike.trachte@hslu.ch)  
Peter Sollberger, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, [peter.sollberger@hslu.ch](mailto:peter.sollberger@hslu.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Stefan Oberholzer  
**BFE-Programmleiter:** Stefan Oberholzer  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/500569-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verant- 2/23  
wortlich.



## Zusammenfassung

Eine kommerziell erhältliche PEM Brennstoffzelle wurde in ein bestehendes System zur Unterbrechungsfreien Notstromversorgung integriert. Wasserstoff wurde über drei 50 Liter Druckgaszylinder bereitgestellt. Das System wurde an einem Antennenstandort für das Sicherheitsfunknetz POLYCOM in einem Raum installiert. Über eine Periode von mehr als zwei Jahren wurden ferngesteuerte Stromausfälle simuliert.

Ziel des Projektes war der Nachweis von Zuverlässigkeit und Effizienz des Brennstoffzellensystems sowie der Erwerb von Erfahrungen im Umgang mit der Wasserstoffinfrastruktur und den erforderlichen Sicherheitsmassnahmen.

In den Jahren 2012 bis 2015 nach einer simulierten Stromausfalldauer von knapp 180 Stunden, über 400 Start-Stopp Zyklen und einer Stromproduktion von mehr als 124 Kilowattstunden wies das System eine Zuverlässigkeit von 100 % auf.

## Abstract

In this project a commercial PEM FC-system was added to an existing UPS system. Hydrogen was supplied by three 50 liter pressure tanks. The system was connected to a real operating base station for the national radio network POLYCOM. Remote-controlled grid failure simulations were carried out over a period of two years.

The objective of this project was to prove the reliability and efficiency of the FC-system and to acquire experiences with the handling of hydrogen infrastructure and with safety aspects.

After simulated grid off time of nearly 180 hours, more than 400 start-stop cycles and an energy production of more than 124 kilowatt hours the system demonstrated a reliability of 100 %.

## Ausgangslage

Wichtige technische Einrichtungen wie zum Beispiel Funknetze werden mit Systemen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung gegen Stromausfälle geschützt. Dieser Notstrom wird meist mit herkömmlichen technischen Lösungen wie Batterien und Dieselgeneratoren bereitgestellt. Doch Bleibatterien sind temperaturempfindlich, schlecht zu überwachen und enthalten schädliche Substanzen. Der Einsatz von Brennstoffzellen zur Notstromversorgung könnte eine Erfolg versprechende Alternative in diesem Early-Market-Bereich [1] sein, da er zahlreiche Vorteile verspricht:

Brennstoffzellen arbeiten bei einem hohen Wirkungsgrad leise und sauber und es entstehen keine lokalen schädlichen Abgase. Die erforderliche Leistung kann durch einen modularen Aufbau der Zellen an die anwenderspezifischen Anforderungen angepasst werden. Die Autonomiezeit wird individuell über die bereitgestellte Menge an Wasserstoff festgelegt. Darüber hinaus kann der Betriebszustand der Anlagen fernüberwacht werden. Ein geringer Wartungsaufwand wird erwartet.

Doch trotz dieser Vorteile ist die Markteinführung im mitteleuropäischen Raum schwierig. Es gibt noch zu wenige Demonstrationsanlagen und Feldtests, die die Zuverlässigkeit der Brennstoffzellensysteme im konkreten Bedarfsfall und ihre Effizienz über einen längeren Zeitraum nachweisen. Zudem sind die Systeme noch teuer und die potentiellen Anlagenbetreiber haben keine Erfahrung im Umgang mit der neuen Technologie. Es besteht auch Unsicherheit im Hinblick auf die Beschaffung von Wasserstoff und die Sicherheit im Umgang damit.

Diese erschwerten Rahmenbedingungen hatte auch die EU erkannt und in ihrem 7. Rahmenprogramm einen Call zur Anwendung der Brennstoffzelle im Notstrombereich ausgeschrieben. Die Hochschule Luzern – Technik und Architektur nahm im Konsortium des EU-Projekts FITUP teil und hat acht Systeme in der Schweiz getestet [2]. Das in diesem Bericht vorgestellte Demonstrationsprojekt wurde zeitlich parallel zu FITUP durchgeführt mit einer Brennstoffzellen Notstromanlage für das Sicherheitsfunknetz POLYCOM. Die Schweizer Partner sind die Firma Benning Power Electronics GmbH, Dietlikon und die Kantonalpolizei Bern.

## Ziel der Arbeit

Mit diesem Projekt sollten die Zuverlässigkeit und Markttauglichkeit einer Notstromanlage mit Brennstoffzellen im Feldtest aufgezeigt werden. Die Testergebnisse mit aktuellen Betriebsspezifikationen gaben dem Anwender die Möglichkeit, Funktionsweise und Betriebsverhalten des Systems kennen zu lernen. Zusätzlich wurden Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff gewonnen.

Die spezifischen Ziele orientierten sich an den Messzielen des europäischen Projekts FITUP wie folgt:

- Zuverlässigkeit grösser 95%
- Reaktionszeit kleiner 5 ms

Am Ende der Testserie wurde die Funktionsfähigkeit und Markttauglichkeit der Anwendung beurteilt und Schwachstellen wurden identifiziert.

## Vorgehen

Ein kommerziell erhältliches PEM Brennstoffzellensystem der Firma ReliOn wurde in eine standardisierte unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage (USV) der Fa. Benning GmbH integriert. Das Betreiberkonzept sah vor, dass die Brennstoffzelle in Ergänzung zur Batterie eingesetzt wurde, um die Autonomiezeit der Notstromanlage zu verlängern. Das System wurde auf Wunsch des Betreibers für eine Indoor-Aufstellung geplant und an einem Antennenstandort für das Sicherheitsfunknetz POLY-COM installiert. Bild 1 zeigt den Standort der Antenne im Feld.

Ein Feldtest über einen Zeitraum von über zwei Jahren wurde durchgeführt mit monatlichen Stromausfallsimulationen. Das Messkonzept war so konzipiert, dass die Tests ferngesteuert nach einem von den Projektpartnern gemeinsam definierten Testprotokoll durchgeführt werden konnten. Am Ende der Testserie wurde ein Test über 72 Stunden ergänzt, um die kantonalen Anforderungen an den Notstrom zu überprüfen.



*Bild 1: Standort der Antenne im Feld, Foto: Kantonalpolizei Bern*

## Beschreibung der Anlage

Das Gesamtsystem besteht aus drei nebeneinander stehenden Schrankeinheiten. Im ersten Schrank ist eine Standard-USV der Fa. Benning untergebracht. Im unteren Teil ist Platz für die Batterien, die zur Standardausstattung der USV gehören. Diese sind im Normalbetrieb an das Stromnetz angeschlossen und sind immer unter Spannung. Bei einem Stromausfall liefern sie unterbrechungsfrei die benötigte Energie. Zur Anlagenerweiterung wurde das Brennstoffzellensystem in einem zweiten Schrank zusammen mit dem Messequipment installiert. Das System wurde parallel an den Batterieausgang angeschlossen. Die Batterien liefern so lange den Strom, bis die Brennstoffzelle startet und die volle Last übernimmt. Im dritten Schrank ist die Gasversorgung untergebracht. Der Schrank bietet Platz für drei 50 Liter Druckgasflaschen und die Gasverteilung.

Der Aufbau der drei Racks mit geschlossenen Türen ist in Bild 2 dargestellt, Bild 3 zeigt das geöffnete Brennstoffzellenrack.



Bild 2: Aufbau des Systems bestehend aus USV-Anlage, BZ-Rack und Wasserstoffschränk; Foto: Benning Schweiz



Bild 3: BZ-Rack mit geöffneter Tür, Foto: Benning Schweiz

Die Brennstoffzelle basiert auf PEM Technologie. Sie ist für eine maximale elektrische Leistung von 2 kW ausgelegt und besteht aus einzelnen steckbaren 200 W Modulen. Das System ist luftgekühlt. Nachfolgend sind die technischen Spezifikationen des Systems zusammengefasst:

BZ Typ	PEM
Hersteller	Fa. ReliOn, T-2000
Leistung BZ maximal:	2 kW elektrisch
Ausgangsspannung:	48 VDC geregelt über DC/DC Converter
Kühlung:	Luftgekühlt
Start-up Einheit:	Batterien
Kommunikation:	TCP-IP
Wasserstoff:	Mindestqualität 4.0 (Reinheit 99.95%)
Autonomiezeit:	ca. 52 h unter Normallast

Mit einer Fernüberwachung konnte der Status der Anlage während der Testperiode fernüberwacht und jederzeit kontrolliert werden. Dazu wurden die Alarmer des Brennstoffzellensystems in das bestehende Alarmsystem des Betreibers integriert. Bei einer Fehlfunktion der Zelle oder wenn die Wasserstoffzylinder fast leer sind, werden im Kontrollcenter des Anwenders eine Warnung oder ein Alarm angezeigt.

Bild 4 zeigt das Schema der Anlage mit den Alarmen von Brennstoffzelle und Wasserstoffsensoren.

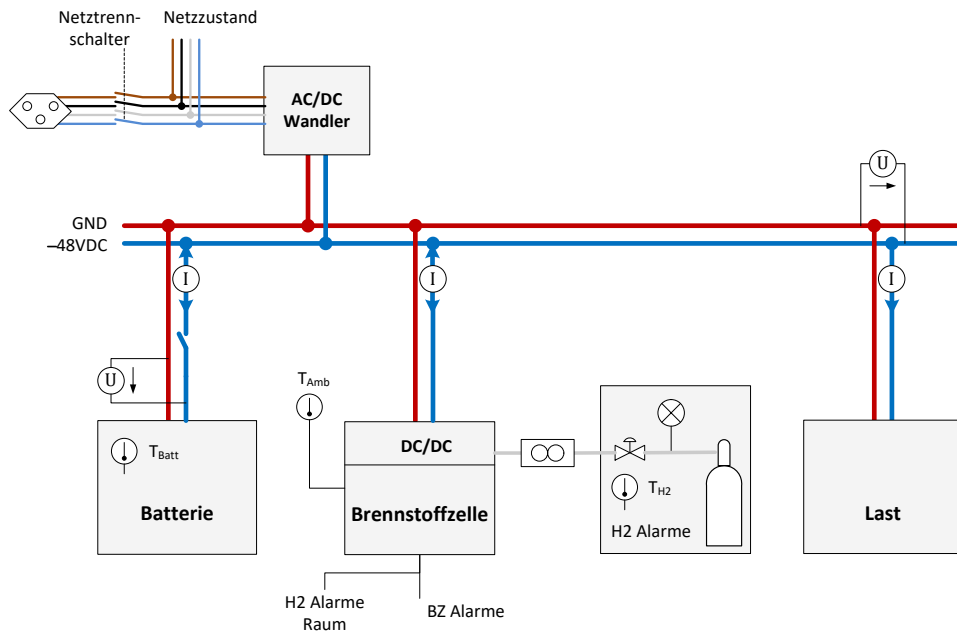


Bild 4: Anlagenschema

## Wasserstoffversorgung

Die Gaszylinder und die Verteilstation wurden auf Wunsch des Betreibers in einem Indoor-Schrank untergebracht unter Berücksichtigung aller Anforderungen an den Explosionsschutz. Im Schrank wurden drei 50 Liter Druckgasflaschen à 200 bar installiert, wovon zwei Zylinder der Hauptversorgung dienen. Im Notfall bieten diese beiden Zylinder eine Autonomiezeit von über 15 Betriebsstunden unter Vollast und bis zu 52 Stunden unter Normallast. Der dritte Zylinder wurde als Reserve- und Serviceflasche eingesetzt. Er liefert den Wasserstoff im Normalbetrieb für die durch die Anlage automatisch durchgeführten Selbsttests sowie bei einem Austausch der beiden Hauptzylinder während des Betriebs der Brennstoffzelle. So kann eine unterbrechungsfreie Stromversorgung auch bei einem Zylinderwechsel gewährleistet werden. Eine Anleitung zum Zylinderwechsel wurde dem Betreiber bereitgestellt.

Als Sicherheitsmassnahme wurde sowohl im Schrank als auch im Raum ein Wasserstoffsensoren installiert und entsprechende Alarmfunktionen wurden in das Alarmkonzept integriert. Auch der Druck in den Zylindern konnte jederzeit remote überprüft werden. Aus Bild 5 ist der Aufbau der Wasserstoffversorgung ersichtlich.

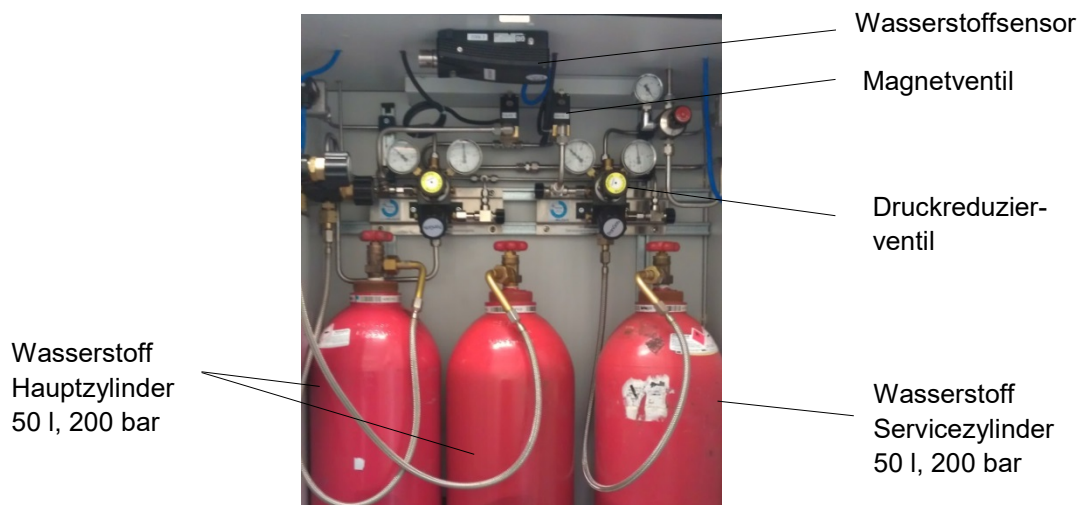


Bild 5: Wasserstoffverteilstation

## Messkonzept

Die Stromausfallsimulationen wurden ferngesteuert ausgelöst. Dazu wurde ein LabVIEW-Programm entwickelt und implementiert. Im Testbetrieb wurde zur Simulation der Stromausfälle der Netzschalter getrennt. Messtechnisch erfasst wurden die Spannung am Bus, die Stromstärken von Batterie, Brennstoffzelle und Last, die Flaschendrucke sowie die Temperatur im Raum. Zur Erfassung des Wasserstoffverbrauchs wurde ein separater Durchflussmesser installiert. Aus dem Anlagenschema in Bild 4 sind die Messkomponenten ersichtlich.

## Kommunikationsschema und Datenübertragung

Zur Speicherung der Messdaten wurde vor Ort ein Mess-PC installiert. Diese Daten wurden mit Hilfe einer LabVIEW Programmierung automatisch auf den Server der Hochschule Luzern übertragen. Über ein Web-Interface konnten die Daten auf einem beliebigen PC abgerufen und ausgewertet werden. Über diesen Remote Zugang wurden auch der Anlagezustand und der Druck in den Wasserstoffzylindern überwacht. Das Schema von Kommunikation und Datenübertragung ist in den Bildern 6 und 7 dargestellt.

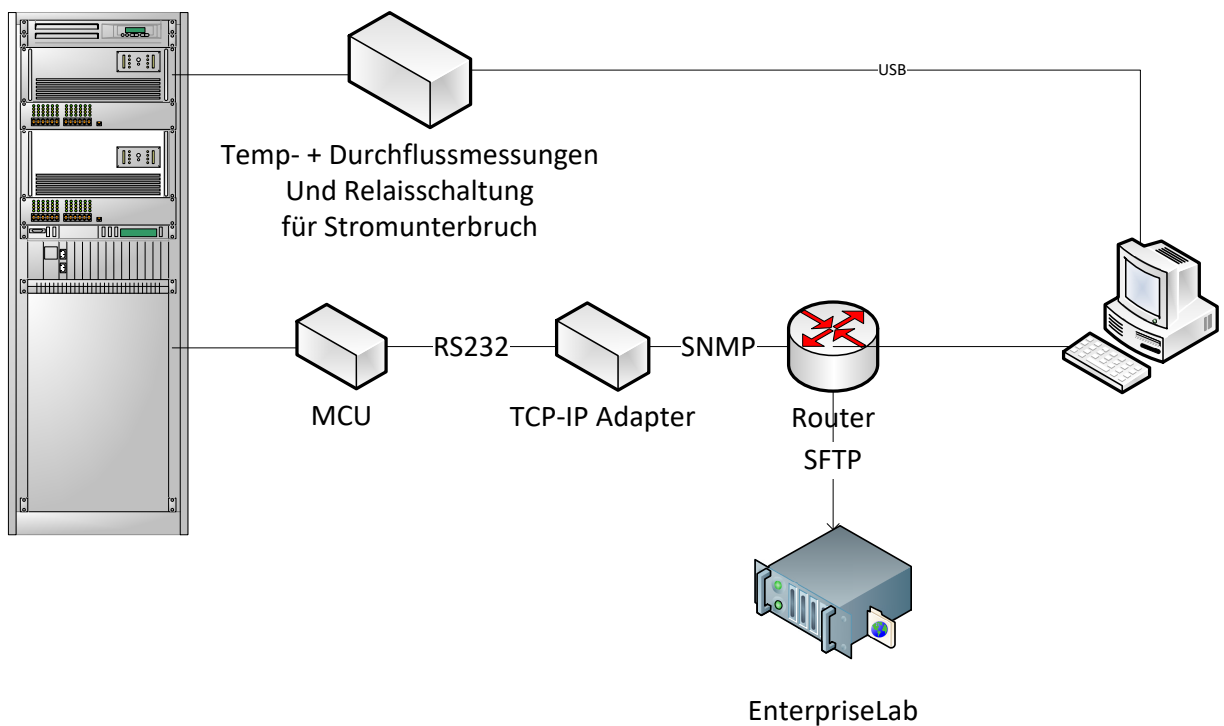


Bild 6: Kommunikationsschema

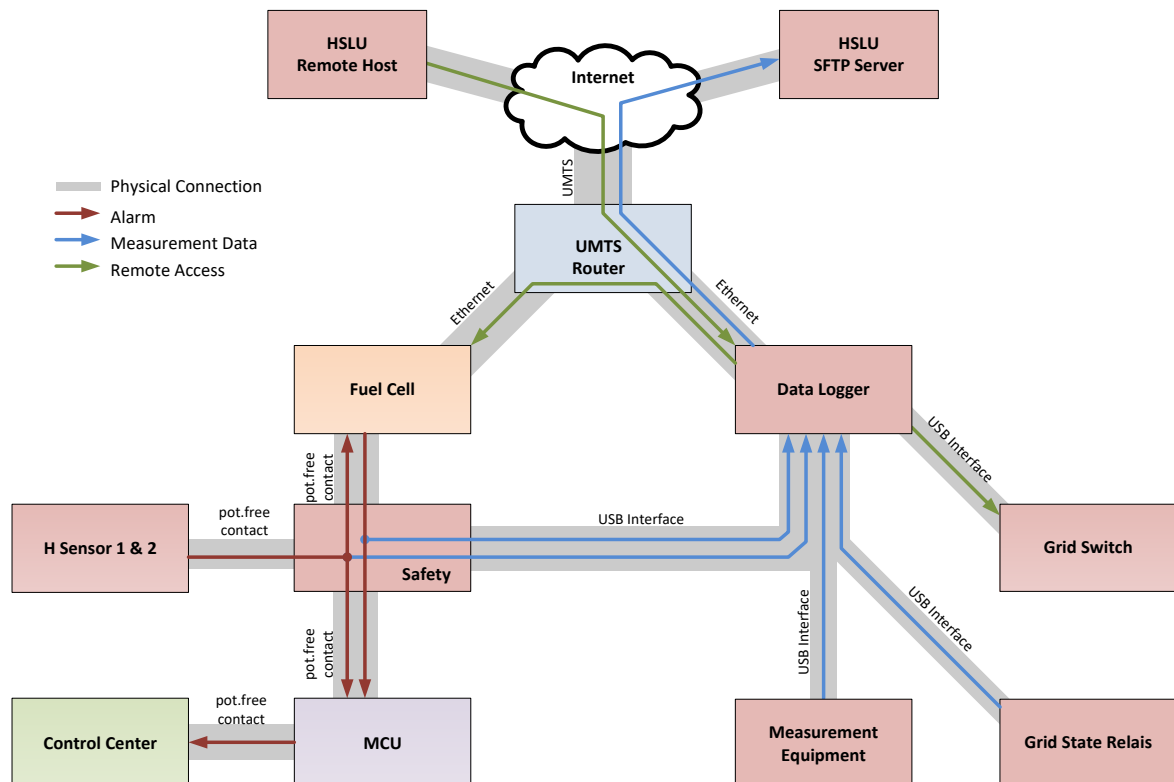


Bild 7: Schema der Datenübertragung

## Testprotokoll

Die Testserien wurden nach dem gleichen Protokoll durchgeführt, welches im europäischen Projekt FITUP [3] entwickelt wurde. Das Testprotokoll orientierte sich an Testserien, die in einem Vorgängerprojekt an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur [4] bereits durchgeführt wurden, an europäischen Stromausfallstatistiken [5] und den Bedürfnissen der Anwender. Darauf basierend wurden folgende Typen von Stromausfällen definiert:

- Kurze Stromausfälle von 5, 10 oder 15 Minuten
- Längere Stromausfälle von 4 Stunden
- Katastrophenvorfall von 72 Stunden (spezifisch für die Anforderungen von POLYCOM)

Darüber hinaus wurden zusätzliche Testserien festgelegt, um mehrere kurz aufeinanderfolgende Stromausfälle zu simulieren. Diese sogenannten Stresstests sind umfangreicher als die Statistik zeigt. Sie sollten das System stressen, um die Funktionsfähigkeit auch unter extremen Bedingungen nachzuweisen. Bei diesen Testserien startete das System bis zu 25 Mal innerhalb von acht Stunden. Es wurde unterschieden zwischen Kalt- und Warmstarts. Unter Kaltstarts werden die Startsituationen verstanden, bei denen die Brennstoffzelle mit Umgebungstemperatur startet. Es wurde mit den Herstellern bestimmt, dass das System vor einem Kaltstart mindestens eine Stunde im Standby-Betrieb sein muss, damit die Brennstoffzelle innerhalb dieser Zeit wieder auf Umgebungstemperatur abkühlen kann. Ein Warmstart ist ein Start, bei dem die Brennstoffzelle bereits mit einer erhöhten Temperatur startet. Die Schemen der verschiedenen Testserien sind in Anhang 1 dargestellt.

Bis zum Ende der Testperiode wurden für die Durchführung der Stromausfallsimulationen folgende Ziele vereinbart:

- 400 Start-Stopp Zyklen
- 100 Stunden Stromausfall bzw. Betriebszeit der Brennstoffzelle

Der 72 Stunden Test wurde zusätzlich zu der vereinbarten Stromausfallzeit in das Testprotokoll mit aufgenommen, da diese Autonomiezeit den realen Anforderungen der POLYCOM Installationen entspricht. Bei diesem Test mussten die Wasserstoffzylinder während des Betriebs der Brennstoffzelle ausgetauscht werden, so dass der Prozess des Zylinderwechsels getestet und überprüft werden konnte.

## Testdurchführung

Die monatlichen Stromausfallsimulationen am Antennenstandort wurden nach Absprache mit dem Kontrollcenter der Kantonspolizei Bern koordiniert. Alle Tests wurden remote durchgeführt. Dazu wurden die jeweiligen Testtypen und Testserien mit der Software LabVIEW vorprogrammiert und automatisch durchlaufen. Die Tests konnten jederzeit remote überwacht werden. Bild 8 zeigt einen Screenshot der LabVIEW-Oberfläche, über welche der entsprechende Testtyp eingegeben wurde. Bild 9 zeigt den Verlauf der Stromstärken während des Starts der Brennstoffzelle.

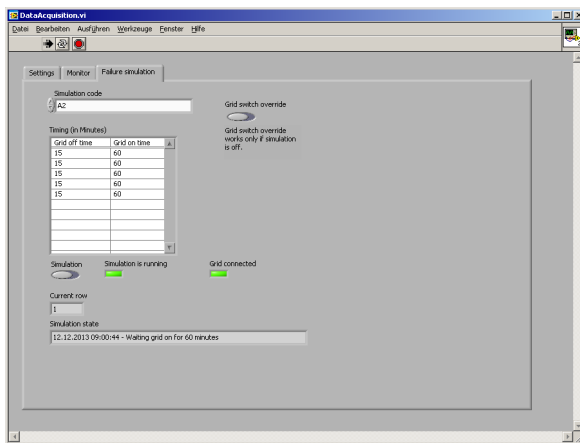


Bild 8: LabVIEW-Oberfläche Testauslösung

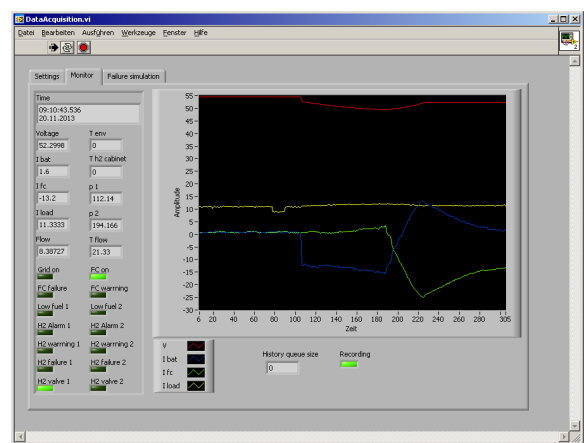


Bild 9: LabVIEW-Oberfläche Start der BZ

## Auswertung der Testdaten

Zur Auswertung der Testdaten wurde ein Matlab-Programm geschrieben, mit dessen Hilfe eine schnelle Analyse von Startverhalten und Betrieb der Brennstoffzelle direkt nach jedem einzelnen Test möglich war. Die Messdaten wurden in drei Diagrammen dargestellt. In einem ersten Diagramm sind die Stromstärken von Brennstoffzelle, Batterie und Last über der Zeit abgebildet, in einem zweiten die Spannungen und der Wasserstoffdurchfluss, sowie in einem dritten Diagramm die Leistungen von Brennstoffzelle und Last. Unregelmässigkeiten im Betrieb konnten durch diese Schnellauswertung sofort nach Testende erkannt werden. In Anhang 2 ist ein Beispiel der Auswertung dargestellt.

Die Daten der Einzelauswertungen wurden zusammengefasst und im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Start-up Verhalten, Stabilität und Wasserstoffverbrauch ausgewertet.

# Ergebnisse

Während der Feldtestperiode wurden die Tests nach dem geplanten Testprotokoll durchgeführt. Das Brennstoffzellensystem startete insgesamt über 400 Mal und überbrückte während mehr als 177<sup>1</sup> Stunden die simulierten Stromausfälle. Während der Laufzeit hat die Brennstoffzelle über 124 Kilowattstunden elektrischen Strom produziert.

In Bild 10 sind die Startzyklen und Stromausfallzeiten über der Zeit grafisch dargestellt.

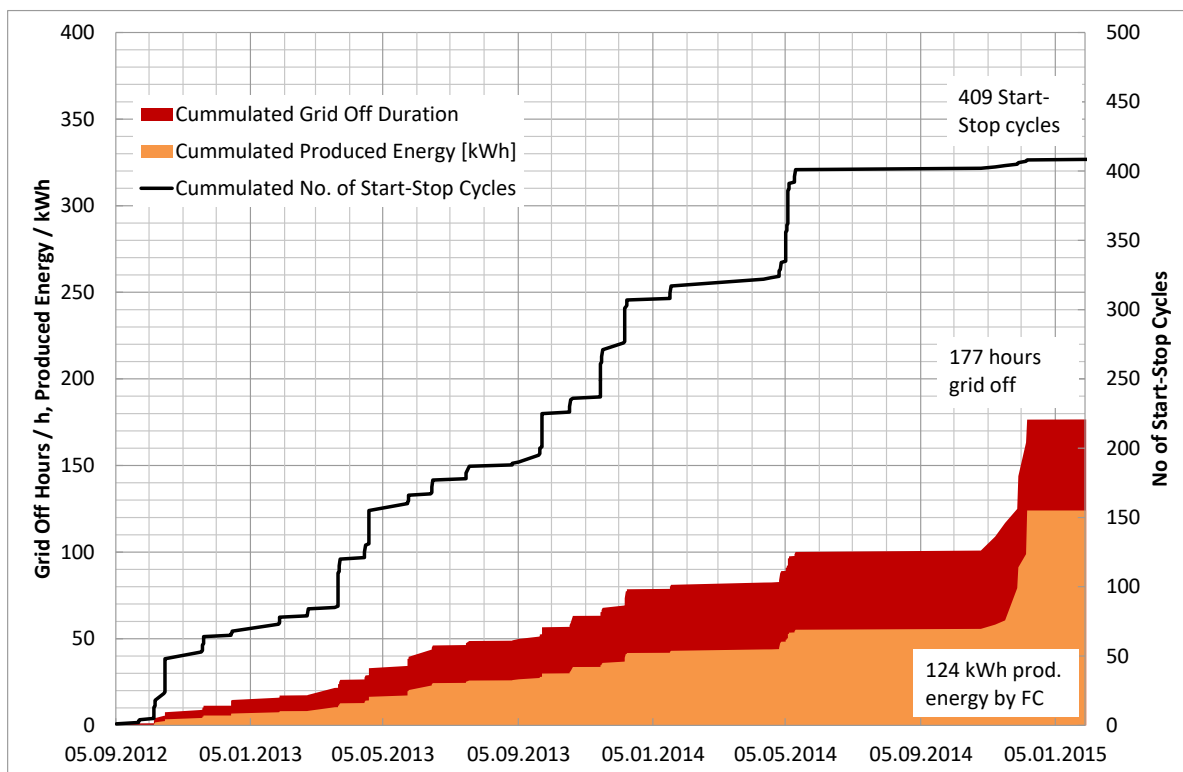


Bild 10: Testdurchführung

Der Status der Testdurchführung am Ende der Testperiode ist in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst. Tabelle 1 zeigt die Gesamtzahl der Start-Stopp-Zyklen, die Stromausfallzeit in Stunden und der Testerfüllungsgrad. In Tabelle 2 ist die Anzahl der durchgeführten Testtypen aufgelistet. Die Messungen wurden gemäss dem Testprotokoll vollumfänglich durchgeführt.

Start-Stopp-Zyklen [Anzahl]		Testerfüllungsgrad	Stromausfall [Stunden]		Testerfüllungsgrad
Soll	Ist	[%]	Soll	Ist	[%]
400	409 <sup>2</sup>	102%	100	177 <sup>3</sup>	177%

Tabelle 1: Status der Testdurchführung nach Testende

<sup>1</sup> Im angegebenen Zeitraum wurden insgesamt 225 Stunden Stromausfall simuliert. Bei den Langzeittests wurden jedoch über das Tagesdatum hinaus nicht alle Daten aufgezeichnet (Daten von 48 Stunden Betriebszeit fehlen).

<sup>2</sup> Inklusive kurzer Funktionstests.

<sup>3</sup> Siehe Fussnote 1.

Testtyp	15 min		4 h		Stresszyklus 10 min		Stresszyklus 5 min		Langzeit über 4 h	
	Start	h	Start	h	Starts	h	Starts	h	Starts	h
Anzahl	184	46	7	28	100	17	97	8	6	78

Tabelle 2: Anzahl durchgeführter Testzyklen bis Testende

Aus verschiedenen Gründen kam es zu Testabbrüchen oder zu Verzögerungen der Testdurchführung. Diese Gründe können mit folgenden Komponenten oder Ereignissen in Zusammenhang stehen:

Brennstoffzelle, Wasserstoffinfrastruktur, Messequipment, Unterhalt oder Arbeiten durch den Betreiber. Während der Testlaufzeit sind zwei Arten von Ereignissen aufgetreten, die zu einem Stopp der Brennstoffzelle führten. Zum einen ist ein Fehler bei der Druckmessung der Wasserstoffzylinder aufgetreten, zum anderen gab es eine Warnmeldung, die auf einen lose platzierten Abluftschlauch zurückzuführen war.

Eine Zusammenfassung der Vorfälle, die sich insgesamt während der Projektlaufzeit ereigneten, ist in Tabelle 3 aufgelistet.

	BZ	H2 Infrastruktur	Unterhalt	Mess- equipment	Betreiber	Ausfall <sup>4</sup>	Start Zyklen	Zuverlässig- keit der BZ
	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	[%]
Bern	0	3	0	1	0	0	409	100%

Tabelle 3: Art der Ereignisse während der Testperiode

## Zuverlässigkeit

Die Angabe der Zuverlässigkeit basiert auf dem Verhältnis von erfolgreichem Systemstart und -betrieb zur Anzahl der Stromausfälle. Um die Zuverlässigkeit der Brennstoffzelle zu bestimmen, wurden nur die Ereignisse gewertet, die in direktem Zusammenhang mit der Brennstoffzelle beziehungsweise dem Stack stehen. Auf Basis dieser Beschreibung erreichte das Brennstoffzellensystem eine Zuverlässigkeit von 100% wie in Tabelle 3 aufgeführt.

## Effizienz und Wasserstoffverbrauch

Die Effizienz des Brennstoffzellensystems ist abhängig vom Wasserstoffverbrauch. Während der Testperiode wurde ein durchschnittlicher Verbrauch von 770 bis 860 Standardliter pro Kilowattstunde bei einer Last zwischen 500 und 800 Watt gemessen. Der Verbrauch ist bei den Kaltstarts Testtyp A2 deutlich höher als bei den Warmstarts Typ A1 oder den Langzeittests Typ B1 und B2. Bild 11 zeigt das Histogramm des Wasserstoffverbrauchs über den verschiedenen Testtypen.

<sup>4</sup> Einbezogen für die Bewertung der Zuverlässigkeit der Brennstoffzelle wurden nur Ereignisse, die die Funktion der Brennstoffzelle betreffen.

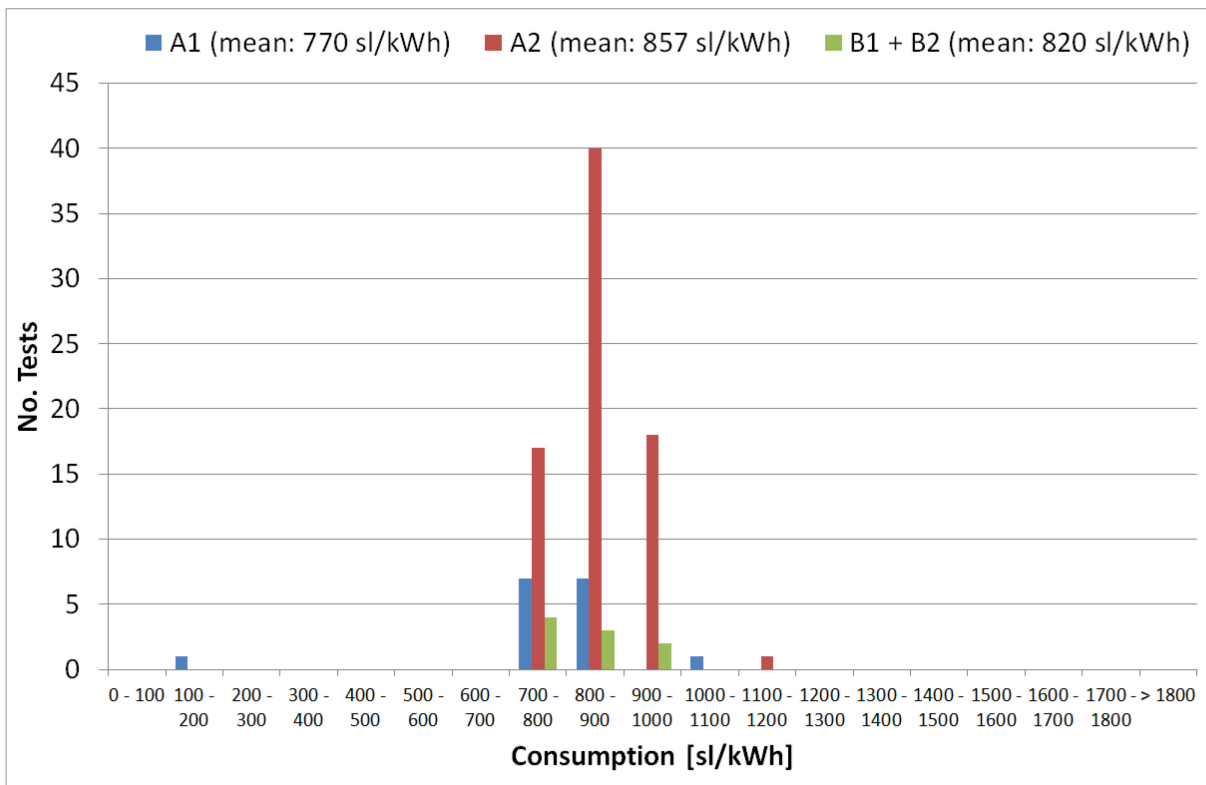


Bild 11: Wasserstoffverbrauch verschiedener Testtypen

## Startverhalten des Gesamtsystems und der Brennstoffzelle

Das Brennstoffzellensystem ist an den Batteriebus der USV angeschlossen und parallel zu den Batterien geschaltet. Das Startverhalten des Systems lässt sich durch die Betrachtung von drei Zeiten beschreiben, die im Folgenden dargestellt werden:

Reaktionszeit:

Zeitspanne, innerhalb der das Notstromsystem bei einem Netzausfall die Last übernimmt.

Startzeit der Brennstoffzelle:

Zeit, bis die Brennstoffzelle nach Stromunterbruch startet.

Startup-Zeit der Brennstoffzelle:

Zeit, bis die Brennstoffzelle die Last übernimmt.

Sobald der Netzstrom ausfällt übernehmen zuerst die Batterien unterbrechungsfrei die Last. Da die Batterien am Netz angeschlossen und in der Regel geladen sind, beträgt die Reaktionszeit bis zur Lastübernahme immer 0 Sekunden. Die Zeit, bis die Brennstoffzelle startet, hängt von der Einstellung der Spannungsschwellwerte am Batteriebus und der internen Regelung der Brennstoffzelle ab. Der untere Spannungsschwellwert bestimmt den Startzeitpunkt der Brennstoffzelle. Wird dieser erreicht, startet die Brennstoffzelle und übernimmt die Last. Als Startup-Zeit wurde für dieses Projekt die Zeit angegeben, die die Brennstoffzelle braucht, bis sie 50% oder 75% der Last übernimmt. Diese Zeit variiert in geringem Umfang abhängig von der Temperatur der Brennstoffzelle beim Start und ihrem internen Wasserhaushalt.

Aus Bild 12 ist das Startverhalten der Brennstoffzelle ersichtlich. Die Spannung am Batteriebus beträgt bei Netzbetrieb 54 Volt. Nachdem das Stromnetz ausfällt, übernimmt unterbrechungsfrei die Batterie den Laststrom, die Spannung am Batteriebus sinkt nach zirka 90 Sekunden auf den eingestellten unteren Spannungsschwellwert von 49.5 V, das Startsignal für die Brennstoffzelle.

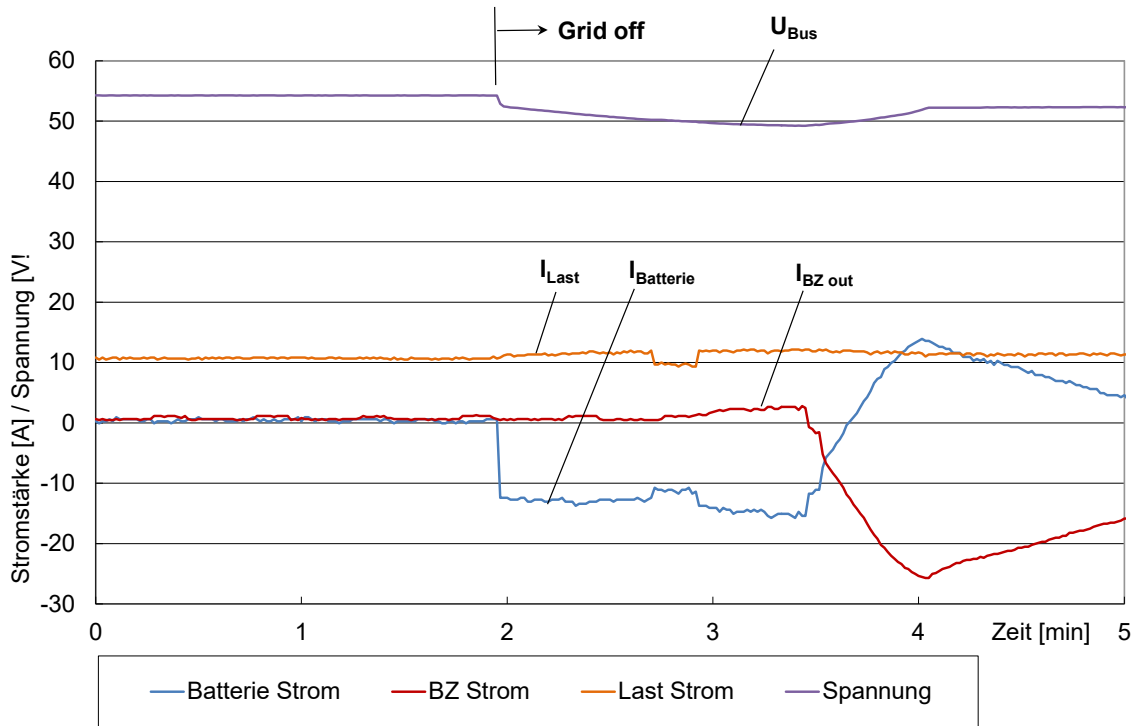


Bild 12: Startverhalten der Brennstoffzelle

Die Startup-Zeit der getesteten Brennstoffzelle bis 75 % der Last erreicht sind beträgt bei fast 70% aller Starts durchschnittlich 15 Sekunden. Bild 13 zeigt das Histogramm der Startup-Zeiten.

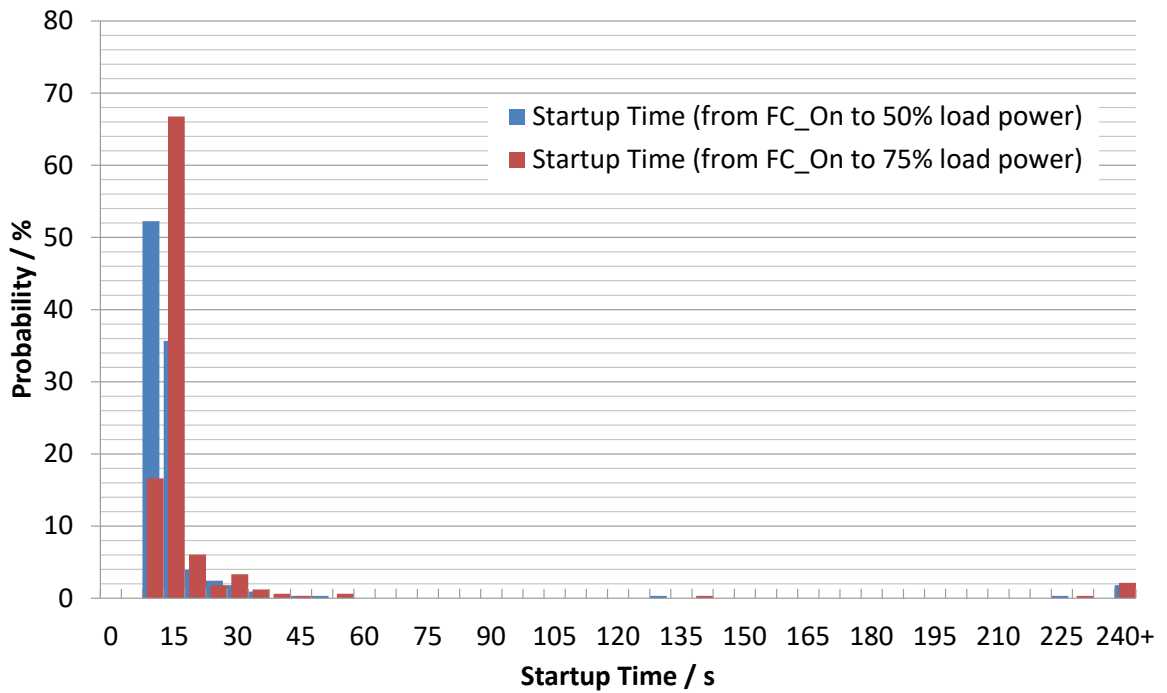


Bild 13: Histogramm der Startup Zeiten

## Betriebsverhalten der Brennstoffzelle

Der Betrieb der Brennstoffzelle war im Langzeittest durch alternierende Start-Stopp-Zyklen gekennzeichnet. Wie im vorherigen Textabschnitt beschrieben, ist die Startzeit der Brennstoffzelle durch die Spannung am Batteriebus bestimmt. Sinkt die Spannung auf den unteren Schwellwert, startet die Brennstoffzelle und übernimmt die Last. Gleichzeitig wird die Batterie geladen. Dadurch steigt die Spannung am Batteriebus wieder an. Nach Erreichen des oberen Schwellwerts übernimmt die Batterie wieder die Last, woraufhin die Spannung wieder sinkt bis der untere Schwellwert erreicht ist. Dadurch entsteht ein alternierender Betrieb der Brennstoffzelle. Die Länge des Zyklus zwischen Start und Stopp ist abhängig von den eingestellten oberen und unteren Spannungsschwellwerten am Batteriebus.

In Bild 14 ist der Betrieb während eines vier Stunden Tests dargestellt. Der Betrieb der Brennstoffzelle während sie Strom lieferte war trotz des alternierenden Zyklus stabil.

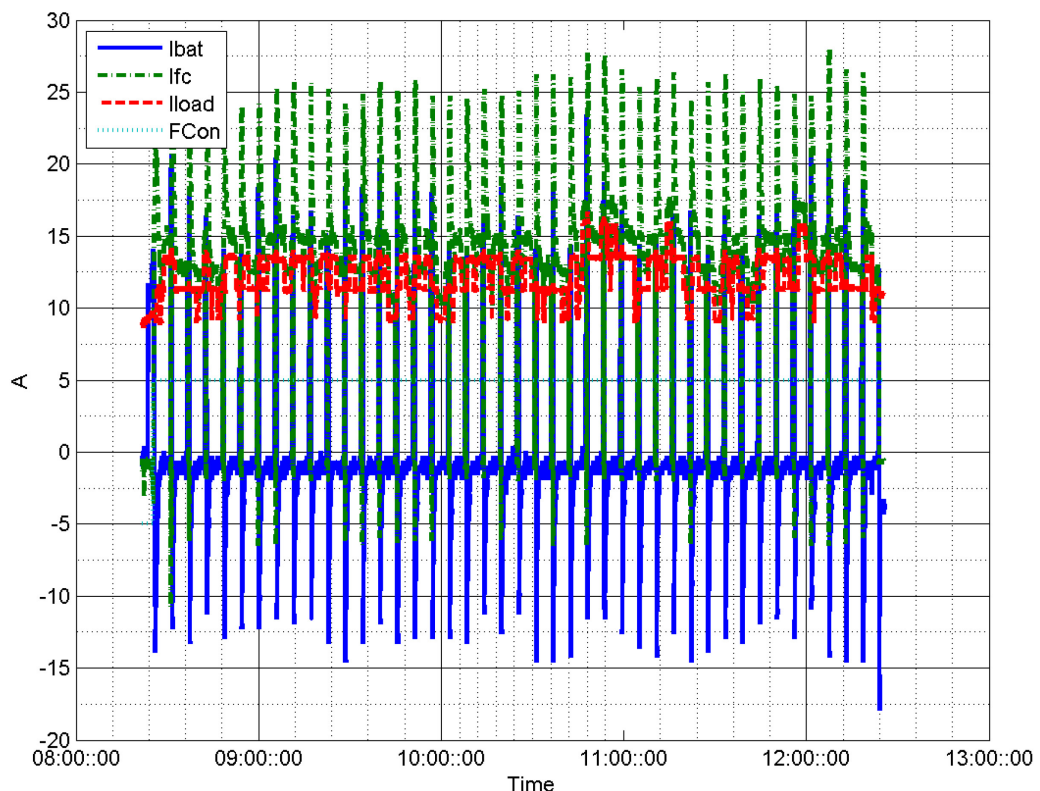


Bild 14: Verhalten der Brennstoffzelle im Betrieb während eines 4 Stunden Tests, Diagramm aus der Matlab-Schnellauswertung

## Betriebsbereitschaft des Systems

Die Betriebsbereitschaft des Systems war über die gesamte Projektlaufzeit gewährleistet. Zwei Einschränkungen, die zu Testunterbrüchen geführt haben, gab es im Rahmen der Fernüberwachung und der Wasserstoffinfrastruktur. Zum einen musste die Software für das Web-Interface angepasst werden. Zum anderen war ein Drucktransmitter in der Wasserstoffversorgungsleitung defekt und musste ausgetauscht werden. Infolge langer Lieferzeiten wurden in der Zeit von Mai bis Oktober 2014 keine Stromausfallsimulationen durchgeführt. Das System war jedoch über die ganze Periode funktionsfähig. Die Testunterbrüche sind im Diagramm in Bild 10 ersichtlich.

## Start nach 5 Monaten Standby

Nach dem Test- und Betriebsunterbruch von etwas mehr als fünf Monaten dauerte es 37 Sekunden bis die Brennstoffzelle 75 Prozent der Last übernahm. Vor dem Unterbruch waren es 20 Sekunden. Auf den Bildern 15 und 16 ist das Startverhalten dargestellt.

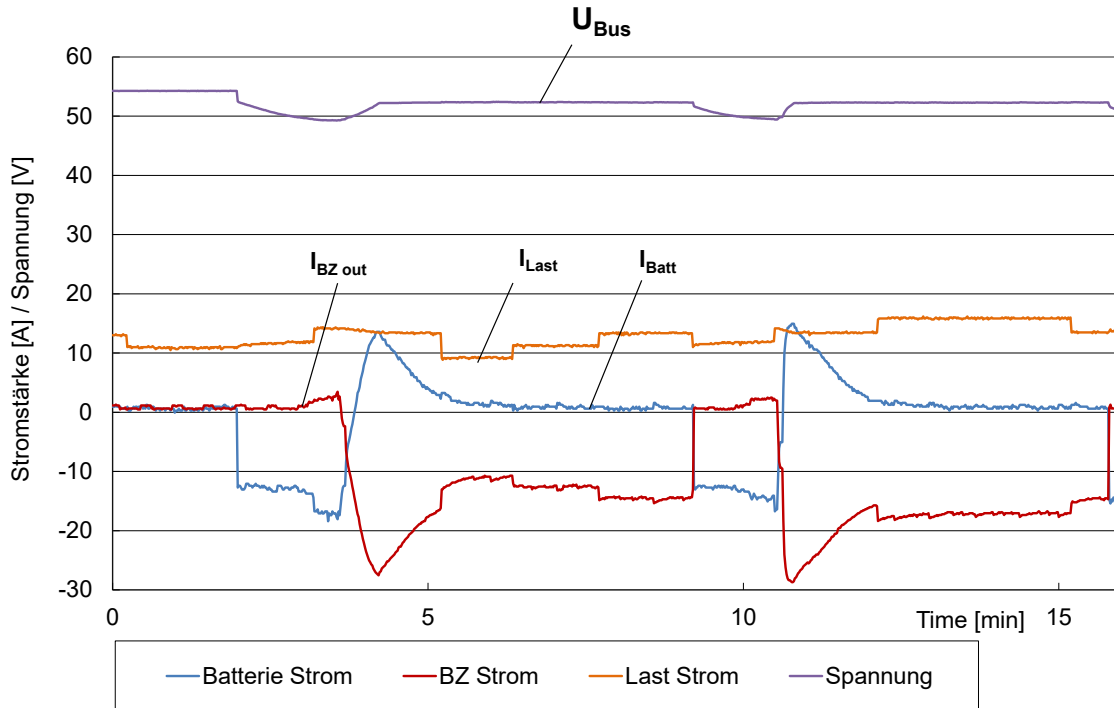


Bild 15: Startverhalten der Brennstoffzelle vor Standby

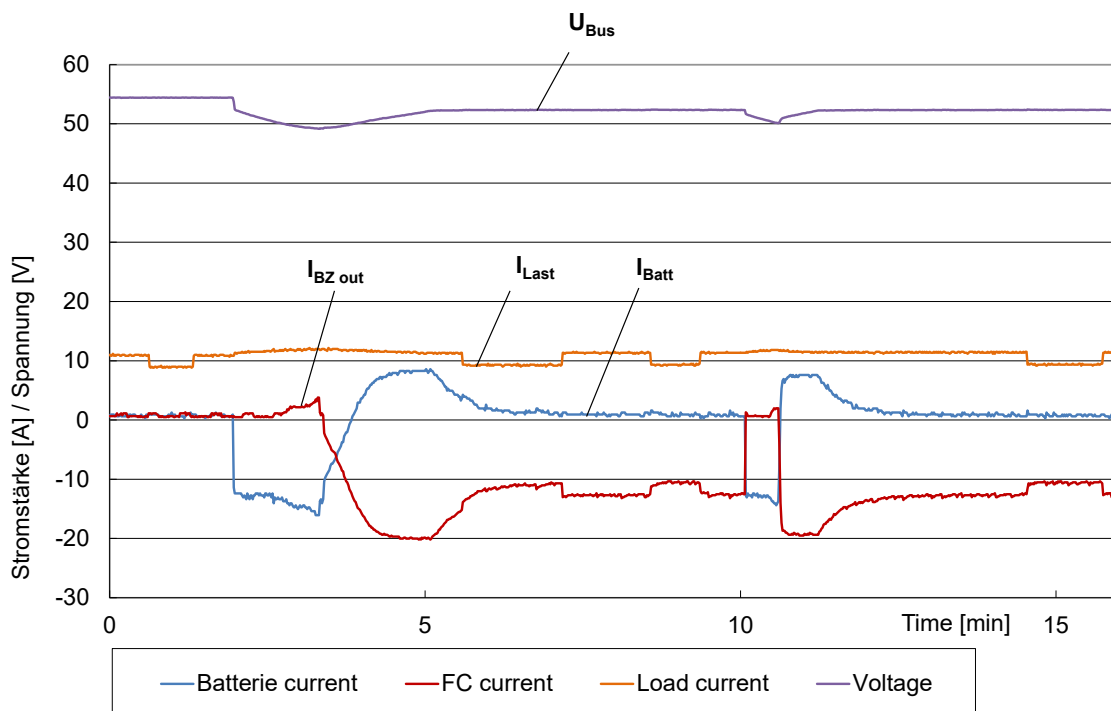


Bild 16: Startverhalten der Brennstoffzelle nach fünf Monaten Standby

## Katastrophentest 72 Stunden

Für diesen Test wurde der untere Spannungsschwellwert für den Start der Brennstoffzelle von 49.5 Volt auf 49.0 Volt gesenkt. Dadurch übernahmen die Batterien zu Beginn des Stromausfalls für eine längere Zeit die Last. Diese Verschiebung erfolgte auf Wunsch des Betreibers, der die Brennstoffzelle als Erweiterung der Batterie und als Ersatz für Diesel-Generatoren einsetzt.

Im Verlauf des Zylinderwechsels während des Betriebs der Brennstoffzelle wurde im Raum ein Wasserstoffalarm ausgelöst, der zu einem Stopp der Brennstoffzelle führte. Der Test wurde abgebrochen und an einem anderen Tag fortgesetzt, wobei die Spannungsschwelle auf 47.0 Volt weiter herabgesetzt wurde. Durch diese weitere Absenkung der unteren Spannungsschwelle startete die Brennstoffzelle erst nach zirka acht Stunden. Bild 17 zeigt den Start und Betrieb des Systems über eine Periode von mehr als 18 Stunden.

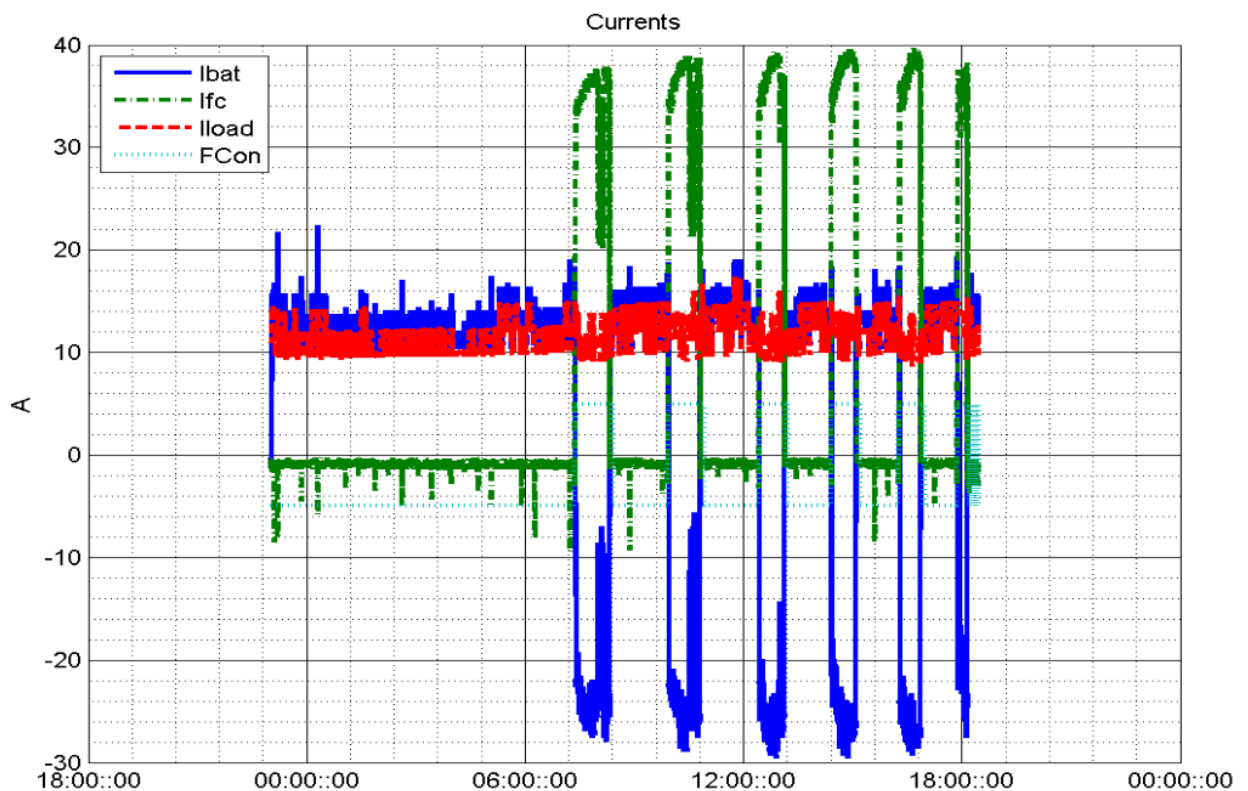


Bild 17: Betrieb der Brennstoffzelle mit herabgesetztem Spannungsschwellwert, Diagramm aus Matlab-Schnellauswertung

## Diskussion

Mit einer Zuverlässigkeit von 100% hat sich das Brennstoffzellensystem im Praxistest bewährt und das Projektziel deutlich übertroffen. Die hohe Zuverlässigkeit entspricht den Anforderungen der Anwender, vor allem da es sich bei POLYCOM um ein sicherheitsrelevantes Funknetz handelt. Auch die Reaktionszeit des Gesamtsystems von 0 Millisekunden entspricht den Erwartungen an eine Notstromversorgung. Das gute Startverhalten nach einer über fünf-monatigen Standby-Phase unterstützt diese Einschätzung zusätzlich. Am Ende der Testperiode war das System weiterhin voll funktionsfähig. Das Projekt bestätigt die Markttauglichkeit des Brennstoffzellensystems und die Erfüllung der Anforderungen der Anwender.

Durch das Herabsetzen der Spannungsschwelle wurde die Zeit bis zur Lastübernahme durch die Brennstoffzelle deutlich verlängert. Dies entspricht dem Betriebskonzept des Betreibers, der die Brennstoffzelle in Ergänzung zur Batterie und als Ersatz für Diesel-Generatoren einsetzt. Durch das Herabsetzen dieser Schwelle konnten die Laufzyklen der Brennstoffzelle deutlich verlängert werden, was für die Lebensdauer des Systems von Vorteil ist.

Zusätzlich zu den Messergebnissen wurden wichtige Kenntnisse zum Installationsprozedere, zum Unterhalt, zur Anlagenüberwachung und zum Umgang mit Wasserstoff erworben. Einzelne Mitarbeiter bei der Kantonalpolizei wurden geschult beziehungsweise haben sich das notwendige Wissen zum Zylinderwechsel und zum Umgang mit Gasen erarbeitet. Die Gasverteilstation ist jedoch (zu) komplex und eine Vereinfachung sollte für eine neue Installation angestrebt werden. Die Lieferzeit für eine kurzfristig ausgefallene Komponente der Gasversorgung war zu lang. In diesem Bereich sind Service und Zusammenarbeit mit den Zulieferern und Gaslieferanten noch ausbaufähig. Auch das Konzept des Zylinderwechsels während des Betriebs der Brennstoffzelle muss für den weiteren Betrieb der Anlage überarbeitet werden. Insgesamt hat sich die Indoor-Lösung jedoch an diesem Standort für den Endanwender gut bewährt.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Das getestete PEM Brennstoffzellensystem ist im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Handhabung markttauglich und hat in dieser Hinsicht den Erwartungen des Anwenders voll entsprochen. Das System bleibt auch nach Projektende am POLYCOM Standort in Betrieb und wird im Langzeittest für weitere drei Jahre überwacht. Für neue Anwendungen ist zu prüfen, ob die Kontrolle des Brennstoffzellensystems und der Wasserstoffversorgung in das Kontrollsystem der USV integriert werden können.

Im Bereich der Wasserstoffinfrastruktur wird für einen verbreiteten Einsatz von Brennstoffzellen ein zusätzlicher Aufbau von Serviceleistungen erforderlich sein. Vor allem im Hinblick auf Gaslieferungen und Anschlussservice wäre ein verbesserter Service wünschenswert. Die Gaslieferungen erfolgen meist mit grossen Lieferwagen. Da die Anlagen teilweise nur über kleine Feld- oder Bergstrassen erreichbar sind, ist eine genaue Abklärung notwendig. Für die Industriekunden, zu denen die Betreiber der Funkanlagen zählen, ist in der Regel kein Anschlussservice vorgesehen. Das heisst, der Fahrer liefert die Zylinder aus, der Anlagenbetreiber muss den Zylinderanschluss selbst durchführen und die Anwesenheit zur Übergabe der Zylinder vor Ort genau planen. Hier sind Engpässe festzustellen und ein Anschlussservice seitens der Gaslieferanten könnte eine zusätzliche Anforderung der Betreiber sein. Auch eine engere Zusammenarbeit mit den Zulieferern von Gaskomponenten ist anzustreben, um lange Lieferzeiten für Ersatzteile zu vermeiden. Der Einsatz von Elektrolyseuren für die Wasserstoffproduktion vor Ort könnte für entlegene Standorte eine gute Alternative sein.

Durch den Aufbau des Funknetzes POLYCOM bietet die Schweiz einen potentiell grossen Markt für die Anwendung von Brennstoffzellen. Der für das Katastrophenszenario ‚Schweiz dunkel‘ geforderte Notstrombetrieb von 72 Stunden erfordert neue technische Lösungen. Durch die Bereitstellung von Notstrom über einen langen Zeitraum ohne Personal vor Ort könnte die Brennstoffzellentechnologie hier einen wesentlichen Beitrag leisten. Auch bei ähnlichen Anwendungen wie zum Beispiel Notstrom für die Tunnelinfrastruktur ist ein Marktpotential vorhanden. Die Anlagen sind jedoch noch teuer und eine Marktdurchdringung erfolgt nur langsam. Eine weitere Förderung durch die öffentliche Hand wird notwendig sein, um die Verbreitung der Brennstoffzellen voranzubringen. Ein Nachfolgeprojekt mit Elektrolyseur würde die gewonnenen Erkenntnisse ideal ergänzen und vertiefen.

## Referenzen

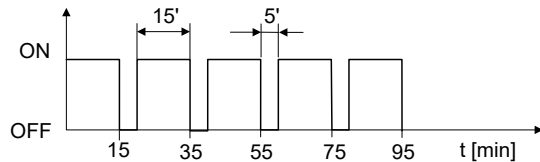
- [1] E-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellen-technologie: Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende – Entwicklungsstand und Perspektiven, June 2014, page 7, 52.
- [2] M. F. Serincan, U. Trachte, A. Graizzaro, A. Pilenga: FITUP project - Public report on test results, EU FP7/2007-2013, June 2014.
- [3] A. Coralli, A. Graizzaro: Project FITUP - D 4.1 Development of test protocol, 2011.
- [4] U. Trachte et al: Swiss Federal Office of Energy SFOE - Folgeprojekt USV für GSM/UMTS Basisstationen mit Brennstoffzellen, 2010.
- [5] R. C. Marti, S.e Ricard: Analysis of major failures in Europe's power grid, 2010.
- [6] U. Trachte: Erste kommerzielle Brennstoffzellen im Notstrombereich, BULLETIN SEV/VSE, October 2008, issue 19, page 17 – 21.

# ANHANG

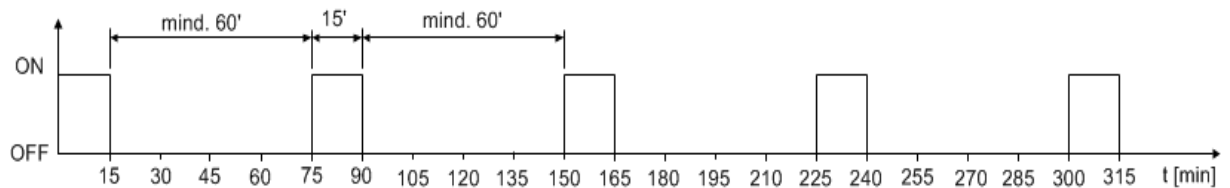
## Anhang1 - Testzyklen

### Monatliche Durchführung

#### A1-Test

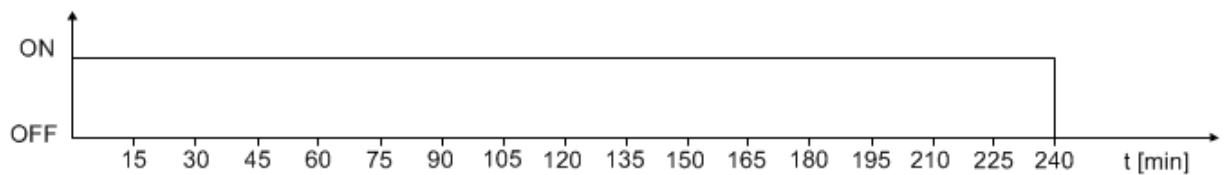


#### A2-Test



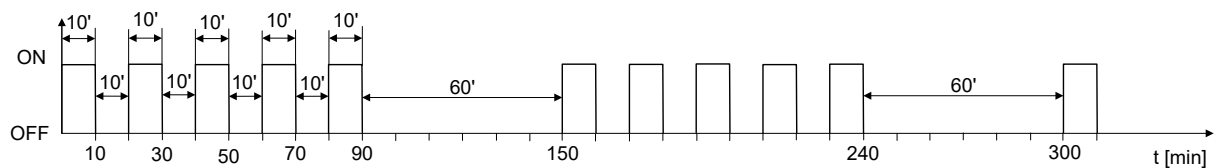
### Durchführung 2x im Jahr

#### Vier-Stunden-Test

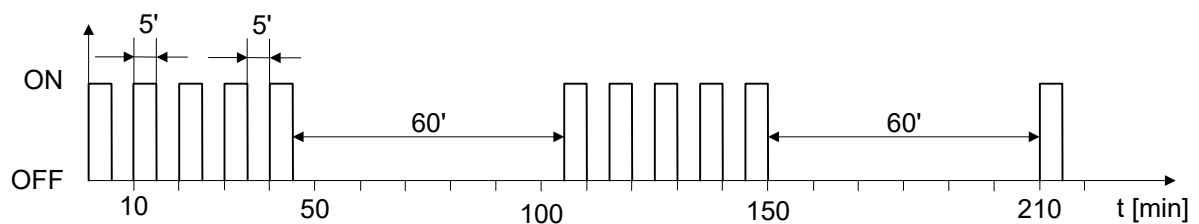


#### Stresstest

Fünf Zyklen nacheinander mit 10 Minuten ON 10 Minuten OFF, 1 Stunde OFF zwischen den Zyklen.



Fünf Zyklen nacheinander mit 5 Minuten ON 5 Minuten OFF, 1 Stunde OFF zwischen den Zyklen.



## Anhang 2 - Schnellauswertung Matlab

### Beispiel

# Quick Analysis of Seewil\_2014-10-29\_10\_52\_08\_G

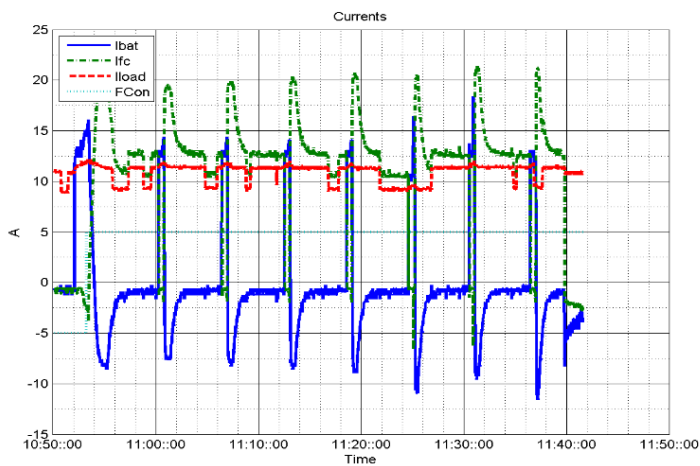
Report generated by Hochschule Luzern - Technik & Architektur.  
**Confidential!**

Date of record: 29-Oct-2014

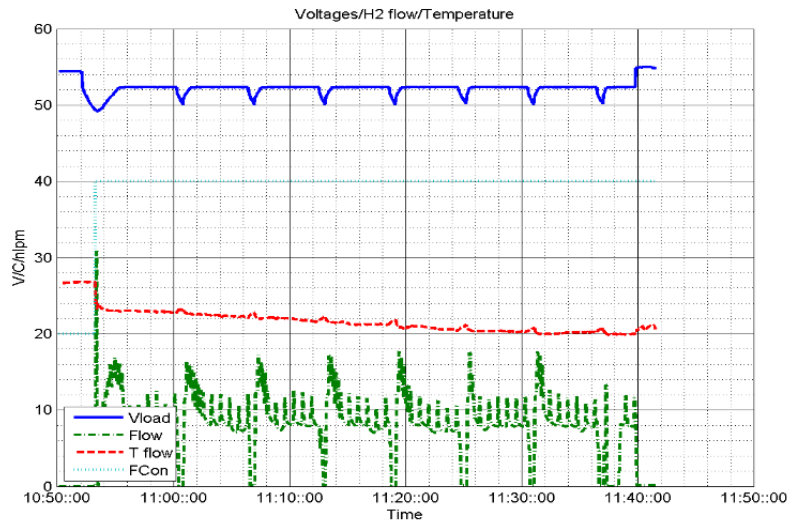
### Key Figures

Start of recording:	10:50:08	Time
Duration of recording:	00:51:21	HHMMSS
Grid <sub>off</sub> time:	10:52:07	Time
Grid <sub>on</sub> time:	11:39:28	Time
Time between grid <sub>off</sub> and FC <sub>on</sub> :	68	seconds
Time between FC <sub>on</sub> and $I_{fc} > 50\% I_{load}$ :	30	seconds
Time between FC <sub>on</sub> and $I_{fc} > 75\% I_{load}$ :	37	seconds
Runtime of fuel cell:	0.80	hours
Produced energy:	490.29	Wh
Consumed energy (by load) during FC on:	453.79	Wh
Energy drawn from startup unit during recording:	1.18	Ah
Energy fed to startup unit during recording:	1.68	Ah
H <sub>2</sub> consumption (from p, approx.):	376.25	sl
H <sub>2</sub> consumption (from flow):	384.34	sl
Consumption per kWh (from p, approx.):	767.41	sl
Consumption per kWh (from flow):	783.90	sl
Pressure H <sub>2</sub> tank 1 at record start:	64.9	bar
Pressure H <sub>2</sub> tank 1 at record end:	59.9	bar
Pressure H <sub>2</sub> tank 2 at record start:	150.8	bar
Pressure H <sub>2</sub> tank 2 at record end:	149.9	bar

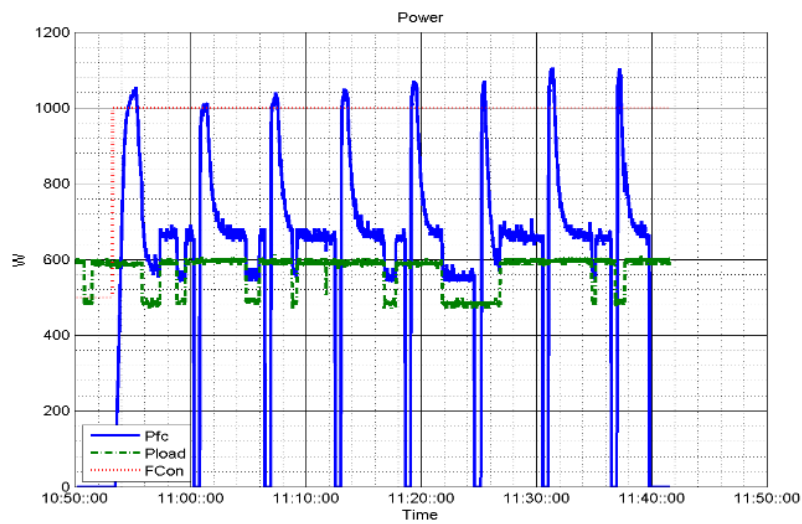
### Currents over time



## Voltages over time



## Power over time



## Alarms and events

Time	Event
10:52:07	Grid off
10:53:15	Fuel cell on
10:53:15	Valve 1 on
11:37:04	Low fuel 1 on
11:37:04	Valve 1 off
11:37:11	Low fuel 1 off
11:37:11	Valve 1 on
11:37:17	Low fuel 1 on
11:37:17	Valve 1 off
11:38:24	Low fuel 1 off
11:38:24	Valve 1 on
11:39:29	Grid on