

Abschlussbericht März 2007

# Projekt USV für GSM-Basisstationen mit BZ (PEM Fuel Cell Back-Up System)

Autor und Koautoren	Ulrike Trachte
beauftragte Institution	Hochschule für Technik+Architektur HTA Luzern
Adresse	Technikumstrasse 21, 6048 Horw
Telefon, E-mail, Internetadresse	041 3493 249, <a href="mailto:utrachte@hta.fhz.ch">utrachte@hta.fhz.ch</a> , <a href="http://www.hta.fhz.ch">www.hta.fhz.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100957
Dauer des Projekts (von – bis)	01.08.2004 bis 31.12.2006

## ZUSAMMENFASSUNG

An der HTA Luzern wird ein Prototyp einer Anlage zur Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit Brennstoffzellen (BZ) statt mit Bleibatterien konzipiert und in Betrieb gesetzt. Das verzögerte Anfahrverhalten der Brennstoffzelle wird durch Superkapazitäten überbrückt.

Inhalt einer ersten Projektphase waren Planung, Systemzusammenbau und Labortest. In einer zweiten Projektphase wurde das BZ-System an eine reale Telekommunikations-Basisstation (Antenne) angeschlossen und im Feldtest für den Zeitraum eines Jahres erprobt. Der Feldtest umfasste monatliche Stromausfall-Simulationen bei einer realen Antennenlast von ca. 2.4 kW sowie Tests mit externer Last bis 8.5 kW zur Aufnahme der Kennlinie. Wasserstoff wird über zwei 50l-Druckgasflaschen zur Verfügung gestellt. Unter Verbraucherlast ist ein autonomer Betrieb der Anlage bis zu 6 h gewährleistet.

Die Ergebnisse der rund 100 Stromausfall-Simulationen mit einer Gesamtlaufzeit der Brennstoffzelle von 39 h sind sehr zufrieden stellend verlaufen. Auch bei einem unwetterbedingten, realen Stromausfall hat die Anlage für eine knappe Stunden den Strom problemlos überbrückt. Eine Degradation der Brennstoffzelle ist bis jetzt noch nicht feststellbar.

Das Projekt findet in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern APC Industrial Systems, als Hersteller und Marktleader im Bereich von USV-Anlagen und Swisscom Mobile AG, als Anwender von USV-Anlagen im Telekommunikationsbereich statt.

Aufgrund der guten Ergebnisse und um Erfahrungen im Langzeitverhalten der Brennstoffzelle zu sammeln wird der Feldtest für zwei weitere Jahre fortgesetzt.



## **ABSTRACT:**

The University of applied sciences HTA Lucerne designed a prototype of an uninterruptible power supply (UPS) with Fuel Cell technology instead of lead-acid batteries and put it into operation.

The delayed start-up of the Fuel Cell was bridged with ultracapacitor technology.

In a first project stage the system was designed, assembled and tested in laboratory. In a second stage the installation was connected to a real base station of a telecommunication antenna and proved within field tests during one year.

The field test included monthly simulations of power failure with antenna load of about 2.4 kW as well as tests with external load up to 8.5 kW to establish the characteristic diagram.

Hydrogen was provided by two 50l pressure tanks. The full quantity of Hydrogen assured a stand-alone operation of the Fuel Cell system for about 6 hours under antenna load.

The results of the totally 101 simulations of grid-failure demonstrate a very reliable start-up behaviour of the Fuel Cell System. Also during a real power failure due to a thunderstorm the installation provided the demanded power without any problems.

The total currency of the Fuel Cell is up to 39 hours. Any degradation is not yet assessed.

The project takes place in collaboration with the industrial partners APC Industrial Systems, as a producer and market leader of UPS-Systems und Swisscom Mobile AG, as a user of UPS-systems in telecommunications.

Due to the good results and in order to get more experiences in long-term application of the Fuel Cell system the tests should be continued for two more years.

## Inhaltsverzeichnis

- 1. Einleitung**
  - Ausgangslage
  - Projektziele
- 2. Durchgeführte Arbeiten**
  - 2.1 Anlagekonzept**
  - 2.2 Systemkomponenten**
    - USV
    - Brennstoffzelle
    - Superkapazitäten (Konzept, Auslegeordnung)
    - SPS
    - Wasserstoffversorgung
  - 2.3 Sicherheitskonzept**
  - 2.4 Anlagenlayout und Aufstellung**
- 3. Feldtest und erreichte Ergebnisse**
  - 3.1 Feldtest**
    - Testprogramm
    - Testaufbau und Testbedingungen
  - 3.2 Messergebnisse**
    - Antennenlast - Lastkurve und Startverhalten
      - 2 x 20 min.-Test
      - 5 x 5 min.-Test
      - 4 h-Test
      - Realer Stromausfall
    - Externe Last - Lastkurve
      - Vollast
      - Kennlinie
    - Wirkungsgrad
  - 3.3 Betriebserfahrungen**
    - Zuverlässigkeit/Störungen
    - Unterhalts- und Betriebskosten
- 4. Nationale und internationale Zusammenarbeit**
- 5. Bewertung und Ausblick**
- 6. Referenzen/Literaturverzeichnis**

# 1. Einleitung

## Ausgangslage

Ein Erfolg versprechender Einsatz der Brennstoffzelle liegt im Bereich des Batterieersatzes und es ist zu erwarten, dass der Marktdurchbruch der Brennstoffzellen in diesem Bereich gelingen wird. (siehe [1] K. Ledjeff: Brennstoffzellen, 2. Auflage, C.F. Müller Verlag, S.34). Die meisten Anwendungen befinden sich jedoch noch im Prototyp-Stadium. Für ein marktreifes Produkt sind Erfahrungen im Betrieb und im Langzeitverhalten notwendig.

Die Integration einer Brennstoffzelle in eine Anlage zur Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) ist eine umweltfreundliche und zukunftsorientierte Alternative zu herkömmlichen Bleibatterien und vor allem auch zum Einsatz von Dieselgeneratoren.

Die besonderen Vorteile der Brennstoffzelle sind:

- Brennstoffzellen arbeiten leise. Es findet eine geräuschlose elektrochemische Energieumwandlung statt.
- Brennstoffzellen arbeiten sauber. Es entstehen keine schädlichen Abgase, sondern als Reaktionsprodukt fallen nur Wasser und Wärme an.
- Eine individuelle Anpassung der erforderlichen Autonomiezeit der Anlage ist über die Menge der Wasserstoffbereitstellung möglich.
- Die verbleibende Autonomiezeit ist jederzeit kontrollierbar über die Wasserstoffdruckanzeige.
- Modularer Aufbau der Zellen für verschiedene Leistungsklassen.
- Ein geringer Service- und Wartungsaufwand ist durch eine lange Betriebsbereitschaft zu erwarten.

Die noch relativ geringe Lebensdauer der Brennstoffzellen bezogen auf ihre Betriebsstunden ist beim Einsatz in USV-Anlagen nicht nachteilig, da die effektive Laufzeit sich nur auf die Notstromzeit beschränkt.

## Projektziele

Im Projekt wird die Anwendung einer PEM-Brennstoffzelle als Batterieersatz für eine USV-Anlage untersucht. Das verzögerte Anfahrverhalten der Brennstoffzelle, d.h. die Zeit, bis die Brennstoffzelle startet und die volle Leistung zur Verfügung steht, muss mit einem Energiespeicher überbrückt werden. Dafür stehen Batterien oder Superkapazitäten zur Verfügung.

Leitgedanke des Projekts ist die Idee, die Batterien in einer USV-Anlage komplett durch andere umweltfreundliche Energielieferanten zu ersetzen. In diesem Fall werden deshalb Superkapazitäten zur Überbrückung der Anfahrzeit gewählt. Superkapazitäten sind an der HTA Luzern am Kompetenzzentrum (CC) 'Integrale, intelligente und effiziente Energiesysteme' (IIEE) ein Forschungsschwerpunkt (siehe [2], [3], [4])

Im Rahmen eines Vorprojekts hat die HTA Luzern erste Erfahrungen mit der Kombination von Brennstoffzellen (im folgenden Text auch BZ genannt) und Superkapazitäten (im folgenden Text auch Scaps genannt) gesammelt. In diesem Vorprojekt wurde ein Funktionsmuster mit einer Brennstoffzellen Leistung von 1 kW konzipiert, aufgebaut und ausgetestet. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Basis für eine Übertragung des Konzepts auf grössere Leistungen an einer realen Anlage.

Folgende Ziele werden verfolgt:

1. Entwicklung eines Prototypen USV mit BZ-System und Superkapazitäten
2. Austesten des Prototypen und Installation an einer realen Anlage
3. Durchführung von Feldtests (monatliche Stromausfallsimulationen)
4. Nachweis der Funktionalität in der Anwendung

In Zusammenarbeit mit Hersteller und Anwender wird der Prototyp dieser Anlage an einem realen Antennenstandort aufgebaut und in einem Feldversuch direkt an den Verbraucher (GSM-Basisstation für Mobilfunkantennen) angeschlossen. Die Stromausfall-Simulationen können so unter realen Lastverhältnissen durchgeführt werden.

## 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Das Projekt wird in zwei Phasen durchgeführt:

1. Projektphase: Systemzusammenbau und Inbetriebsetzung im Labor
2. Projektphase: Inbetriebsetzung am Antennenstandort und Durchführung des Feldtests

Die erste Projektphase umfasst:

- Konzepterstellung und Komponentenauswahl
  - Auswahl Brennstoffzelle
  - Auslegung und Integration von Superkapazitäten
  - Konzept für System Control
- Sicherheitskonzept
- Anlagenlayout und Design
- Systemzusammenbau, Systemintegration
- Inbetriebsetzung der Anlage im Labor

Die zweite Projektphase umfasst:

- Inbetriebsetzung der Anlage am Antennenstandort  
Standort: Swisscom Mobile-Standort HOTE an der HTA Luzern in Horw
- Durchführung des Feldtests
  - Simulation von Stromausfällen gemäss Test-Spezifikation und
  - Dauerbetrieb der Anlage unter realen Bedingungen.

### 2.1 Anlagekonzept

Als Brennstoffzelle wird eine kommerziell erhältliche PEM-Brennstoffzelle mit einer Leistung von 10 kW gewählt. Das BZ-System wird an den Batterie-Eingang der USV-Anlage angeschlossen. Die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle muss über einen DC/DC-Wandler an die Spezifikation der USV-Anlage angepasst werden.

Um Typ und Anzahl der zu verwendenden Superkapazitäten bestimmen zu können, mussten zuerst die Position des Moduls im System und die Anforderungen an das Modul spezifiziert werden. Diese Anforderungen wurden in Zusammenarbeit mit APC erarbeitet.

Überwachung und Steuerung von BZ und DC/DC-Wandler erfolgt über das Power Module Control Interface. Übergeordnet übernimmt eine SPS die Überwachung der Gesamtanlage mit folgenden Funktionen:

- Schnittstelle zum Anwender
- Schnittstelle zur Messdatenerfassung (BZ und Gesamtsystem)
- Überwachung der Superkapazitäten und Regelung des Lademoduls

Die Anlagedaten können kontinuierlich aus dem Power Modul ausgelesen und über ein Terminal gespeichert werden. Die SPS zeichnet die Mess- und Anlagedaten automatisch während dem Betrieb der BZ auf und erfasst ständig Änderungen des Systemzustandes.

Beide Kontrollsysteme werden installiert, um eine saubere Schnittstelle zwischen den Komponenten von APC und der HTA Luzern zu gewährleisten. Die Elemente BZ, DC/DC-Wandler und das Power Modul Control Interface werden von APC zur Verfügung gestellt. Die HTA Luzern übernimmt die Auslegung und den Zusammenbau der Superkapazitäten mit Lademodul, der SPS, den Messeinrichtungen und der Gesamtinstallation am Antennenstandort mit externem Kühlkreislauf der BZ und der Wasserstoffversorgung.

Fig. 1 zeigt das Schema des Gesamtsystems.

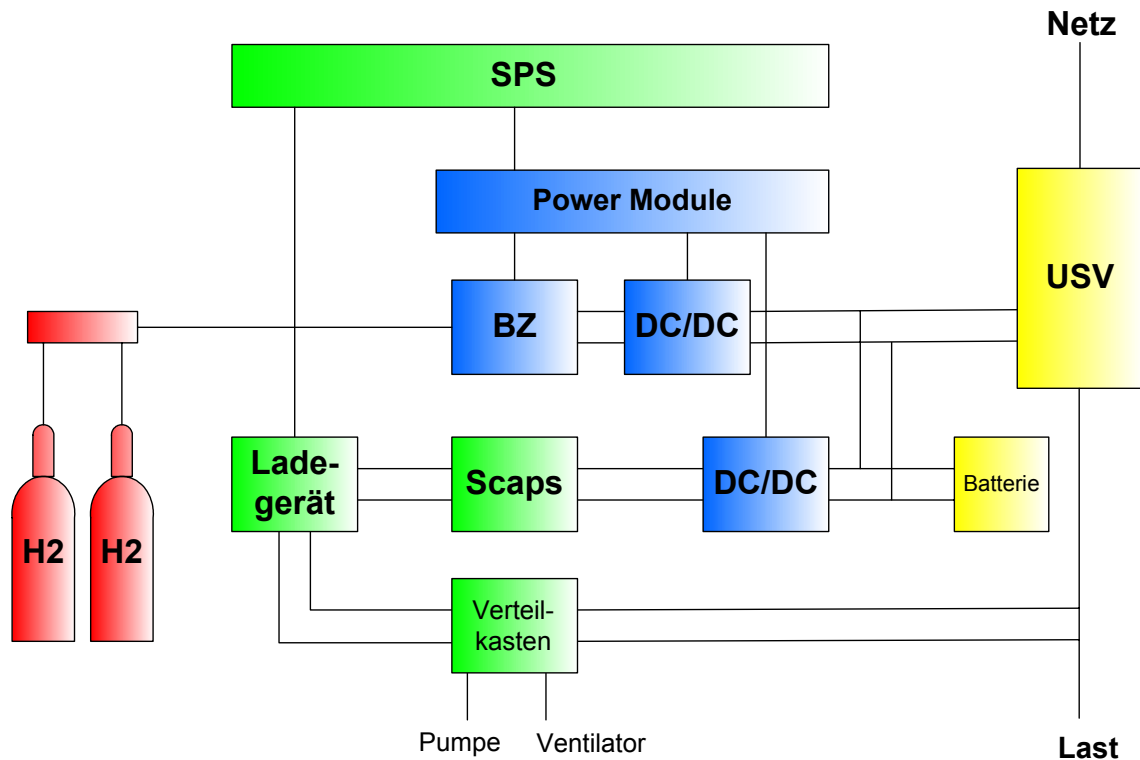


Fig. 1: Schema des Gesamtsystems

Nach folgenden Spezifikationen wurde das Gesamtsystem ausgelegt:

Verbraucherlast am USV-Ausgang:	max. 5.6 kW
Überbrückungszeit Scaps:	30sec. @ $P_{\max} = 6 \text{ kW}$
Autonomiezeit:	2 h bei 10 kW 6 h unter Antennenlast

Im Falle einer ausreichenden Stromversorgung über das Netz, verbleibt die Brennstoffzelle im Stand-by-Modus. Sie schaltet sich erst ein, wenn die USV einen Netzausfall signalisiert.

#### Fall-Back Szenario

Für die ersten Tests mit Antennenlast bleiben die Batterien an die USV angeschlossen. Die Anlage wird aber nur dann im Batteriemodus arbeiten, wenn die Superkapazitäten ausfallen oder die Brennstoffzelle nicht startet. Bei gutem zuverlässigem Startverhalten von Superkapazitäten und Brennstoffzelle werden die Batterien nach den ersten Tests abgehängt.

## 2.2 Systemkomponenten

### USV

Die USV ist mit Batterien am Antennenstandort installiert. Die Batterien werden direkt durch das BZ-System ersetzt.

- USV-Typ: APC-DP310E Deltawandler
- Leistung: 10 kW
- Spannung: 3 x 400 VAC am Ausgang der USV
- $\pm 435$  VDC am Batterie-Eingang

### Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist für eine elektrische Leistung von 10 kW ausgelegt. Sie wird mit Wasserstoff aus Druckgasflaschen und Sauerstoff aus der Luft betrieben. Das im Betrieb entstehende Wasser wird in einem Kanister gesammelt.

Technische Daten:

- PEM- BZ-System, Fa. Hydrogenics
- 10 kW el. Leistung netto
- 37 – 57 VDC Spannungsbereich
- Wasserstoff, Luft
- 65°C Betriebstemperatur
- 3.1 – 7.1 bar Eingangsdruck
- $\leq 150$  L<sub>n</sub>/min. H<sub>2</sub>-Verbrauch bei Volllast (Herstellerangabe)

### Kühlsystem

Die Kühlung des Systems erfolgt über einen internen Wasserkreislauf und einen externen Kühlkreislauf mittels Pumpe und Rückkühler aufstellungsseitig. Der Kühler ist von der Fa. Güntner und hat eine Leistung von 6.8 kW. Er arbeitet im Winter in Sternschaltung, im Sommer in Dreieckschaltung zur Leistungserhöhung.

### Superkapazitäten

#### *Auswahl und Auslegung*

Nach der Entscheidung, den Scap-Speicher parallel zur BZ mit eigenem DC/DC-Wandler zu positionieren und die Überbrückungszeit auf 30 Sekunden bei einer Last von 6 kW zu definieren (Antennenlast nach UMTS-Ausbau max. 5.6 kW), wurde die erforderliche Anzahl Superkapazitäten berechnet und dimensioniert.

Die Superkapazitäten werden von der Fa. Maxwell bezogen. Gemäss den Anforderungen kamen zwei Typen in die engere Auswahl: der BCAP0008 und der BCAP0010.

Der erste Typ wurde an der HTA Luzern bereits im Projekt ‚Kleinbus TOHYCO-Rider‘ [4] eingesetzt. Die erreichbare Leistung wäre auch für diese Anwendung ausreichend und Dokumente und Layout-Zeichnungen hätten übernommen werden können. Die Auswahl fiel dennoch auf den Typ BCAP0010 mit grösserer Kapazität, da die Produktion für diesen Typ von der Fa. Maxwell über das Jahr 2006 hinaus garantiert wurde. Der BCAP0010 ist in Figur 2 abgebildet.

Für den Spannungsbereich von 37 – 58 V, der durch den DC/DC-Wandler vorgegeben ist, reichen 24 Scaps (24 x 2,5 V = 60 V) aus. Ein Teilmodul wird dennoch auf 65 V (26 x 2.5 V) ausgelegt. Diese kleine Reserve gewährleistet, dass ein einzelner Scap im Normalfall nicht über 2.2 V geladen wird, was sich wiederum positiv auf die Lebensdauer und die Performance der Scaps auswirkt.



Zum Erreichen der erforderlichen Leistung von 6 kW für die Zeitdauer von 30 Sekunden müssen 2 Teilmodule zu je 26 Scaps parallel geschlossen werden. Da bei dieser Konstellation hohe Ströme fließen, muss dieser Strom von den Teilmodulen zu gleichen Teilen geliefert werden. Wir entscheiden uns für den Einbau von 3 Modulen, damit der Strom pro Teilmodul kleiner als 100 A gehalten wird. Dies bedeutet weniger Verluste und ermöglicht kleinere Kabelquerschnitte.

Zwei weitere Punkte wurden bei der Auslegung des Moduls noch berücksichtigt:  
*die Ausgleichsschaltung und die Überwachung.*

Hier ergab sich eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit dem Team des Kompetenzzentrums (CC) 'Integrale, intelligente und effiziente Energiesysteme' (IIEE), das bereits patentierte Lösungen dafür entwickelt hatte.

Kapazität, Innen- und Parallelwiderstand sind wichtige Eigenschaften eines Scap, wenn es um die Serienschaltung geht. Da kein Scap exakt gleich ist wie ein zweites, müssen bei der Verbindung mehrerer Elemente zu einem Modul die Scaps ausbalanciert und überwacht werden.

Bei den Ausgleichsschaltungen wird zwischen aktiven- und passiven Schaltungen unterschieden. Bei schnell wechselnden, dynamischen Vorgängen, wie sie in einem Fahrzeug auftreten, werden aktive Schaltungen eingesetzt. In unserem Fall ist für die stationäre Anwendung die einfachere, passive Variante ideal und konnte als Baugruppe 'Integration Kit' direkt vom Scap-Hersteller bezogen werden.

Zur Überwachung der Scap werden Spannung und Temperatur für jedes Scap-Paket kontinuierlich gemessen. Am CC IIEE sind bereits einige Schaltungen und Konzepte für die Realisierung einer solchen Hardware vorhanden.

Die Anbindung an das übergeordnete Leitsystem wurde mit einem CAN-Bus realisiert. Mittels einer integrierten Schaltung (IC) können die Werte von bis zu 4 Analog- und 8 Digitaleingängen auf den CAN-Bus übermittelt werden.

#### *Technische Daten:*

Kenndaten des BCAP0010:

Kapazität: 2600 F  
Spannung: 2.5V  
Gewicht: 525 g  
Abmessung: 60 x 172 mm



Fig. 2: Superkondensator Typ BCAP0010

Überbrückungszeit:	30sec. @ $P_{\max} = 6 \text{ kW}$
Spannung nominal:	65 V
Anzahl gesamt:	78
Anzahl Teilmodule:	3 Teilmodule zu je 26 Stück parallel
Gewicht Teilmodul:	ca. 20 kg
Kapazität gesamt:	300 F
Energieinhalt (60 - 37 V):	93 Wh

### *Zusammenbau*

Die Scaps werden über Leiterplatten miteinander verbunden. Auf der Leiterplatte werden sowohl der Leistungspfad wie auch die Steuer- und Überwachungsfunktionen integriert. Diese Technik hat sich auch im Projekt ‚Kleinbus TOHYCO-Rider‘ [4] bewährt und sich als zuverlässig und handlich erwiesen. Die Hardware für die Leiterplatte wurde am CC IIEE entwickelt.

Das komplette Scap-Modul soll abschliessend in einem 19“-Rack zusammen mit der Brennstoffzelle und den DC-DC-Wandlern montiert werden. Hierfür musste eine optimale Anordnung erarbeitet werden.

Um die Handlichkeit zu erleichtern und die Herstellungskosten der Leiterplatten klein zu halten wurde ein Teilmodul mit 26 Scaps wiederum in zwei 13er-Pakete unterteilt. Ein solches 13er-Paket wiegt ca. 10 kg und wird mit zwei Anschlusspunkten zu einem 26er-Teilmodul zusammengeführt, siehe Abbildung in Figur 3.



Fig. 3: Einbau der Supercapazitäten

### *Laden der Supercapazitäten*

Die Scaps werden über eine Ladeschaltung geladen. Das Ladegerät ist am USV-Ausgang angeschlossen. Damit die BZ auch bei kurz hintereinander folgenden Stromausfällen betriebsbereit bleibt, werden die Supercapazitäten sofort nach dem Aufstarten der BZ neu geladen. Das Aufladen erfolgt drei-stufig über eine geregelte Ladeschaltung. Diese Ladeschaltung begrenzt den Maximalstrom und optimiert die Ladezeit und den Spannungsausgleich zwischen den Scaps. Die Regelung ist so eingestellt, dass die Spannung bis auf 58 V geladen wird.

Unter der Last bei angeschlossener Antenne von ca. 3.3 kW sinkt die Scap-Spannung beim Anfahrvorgang bis auf ca. 52 V ab und steigt innerhalb von ca. 100 Sekunden wieder auf 58 V an.

Zum Laden wird ein Ladegerät der Fa. Schaefer [5] mit einer Leistung von maximal 2 kW eingesetzt.

### Baukasten-Auslegung für Leistungen von 2 – 20 kW

Im Hinblick auf eine Übertragung des Konzepts BZ - Supertapazitäten auf verschiedene Leistungen wurde eine Baukasten-Auslegung für Leistungen von 2 – 20 kW erarbeitet, siehe Tabelle 1.

Die Auslegung basiert auf folgenden Voraussetzungen:

- Position Scaps parallel zur BZ mit eigenem DC/DC-Wandler
- Spannungsbereich DC/DC-Wandler 37 – 58 V
- Zu überbrückende Anfahrzeit 30 Sekunden
- Gleicher Scap-Typ BCAP0010 für alle Leistungsklassen
- Modularer Aufbau aus bestehenden Baugruppen für 19“-Rack

Leistung	Anzahl Scap gesamt	Anzahl Teilmodule parallel	Erreichte Start-Up Zeit	Gewicht	Volumen
kW			sec	kg	L
2	26	1	50	21.5	23.4
4	52	2	50	43	46.8
6	78	3	50	64.5	70.2
8	78	3	37	64.5	70.2
10	78	3	30	64.5	70.2
12	104	4	33	86	93.6
14	104	4	29	86	93.6
16	130	5	31	107.5	117
18	156	6	33	129	140.4
20	156	6	30	129	140.4

Tab. 1: Baukasten-Auslegung Supertapazitäten für verschiedene Leistungen

Die Spannung am Eingang des DC/DC-Wandlers ist entscheidend für die Anzahl Scaps pro Modul, die Höhe der maximalen Leistung pro Zeiteinheit bestimmt die Anzahl der parallel geschalteten Module.

Diese Auslegeordnung ist nur für die oben genannten Voraussetzungen gültig und gibt nur einen Überblick über die Grössenverhältnisse. Wenn der DC/DC-Wandler eine andere Eingangsspannung hat oder die Spannung am Batteriebus der USV so tief ist, dass auf einen DC/DC-Wandler verzichtet werden kann, so müssen die Scaps neu ausgelegt werden.

Berücksichtigt werden müssen auch die Produkt-Anpassungen des Herstellers der Supertapazitäten. So ist die Fa. Maxwell bestrebt, ihre Produktpalette ständig zu verbessern. Für den im Projekt eingesetzten Typ BCAP0010 gibt es bereits ein Nachfolgemodell mit einer Kapazität von 3000 F statt 2600 F.

Supertapazitäten sind erst seit dem Jahr 2000 auf dem Markt und es ist mit weiteren Änderungen zu rechnen.

## SPS

Das gesamte System wird übergeordnet durch eine SPS der Fa. Selectron gesteuert und in Betrieb gesetzt. 4. Es arbeitet autonom, d.h. es wird ohne PC gestartet.

Die Steuerung erfüllt folgende Aufgaben:

- Messdatenerfassung

Die SPS liest folgende Messdaten jeweils über eine CAN-Bus-Verbindung ein:

- BZ-Messdaten (Strom, Spannung) aus dem Power Module von APC
- Betriebszustand der USV
- Scap-Überwachungsdaten (Temperatur, Spannung)

An der Gesamtanlage sind mehrere Temperatur- und Druck-Messstellen zur Überwachung installiert, die über die SPS gespeichert werden.

Während des Betriebs der BZ werden alle Daten automatisch aufgezeichnet. Das Auslesen der Daten über den PC erfolgt via Ethernet-Anschluss.

- Steuerung des Ladevorgangs der Scaps

- Steuerung des externen Kühlkreislaufs

Der Betrieb von Rückkühler und Pumpe werden über die SPS angesteuert. Um Stand Schäden zu vermeiden wird der Rückkühler monatlich für zwei Stunden in Betrieb gesetzt.

- Schnittstelle zum Swisscom Mobile Kontrollcenter

Ein Alarmierungskonzept gehört zu den Sicherheitsmassnahmen, die mit Swisscom Mobile vereinbart wurden. Über potentialfreie Kontakte werden Störungen der Anlage im Swisscom Mobile Kontrollcenter signalisiert.

- Kommunikation und Schnittstelle zum Anwender

Ein HMI (Human Machine Interface) Display und Bedienerfeld erlauben das Bedienen der Anlage und das Beobachten und Abrufen der Anlagezustände, siehe Fig. 4.



Fig. 4: Human Machine Interface – Bedienung des Gesamtsystems

- Visualisierung

Der Anlagezustand wird schematisch auf der Bildschirmoberfläche dargestellt. Leistung der Brennstoffzelle und Ladezustand der Superkapazitäten sind auf den Mess-Skalen in Fig.5 ersichtlich.

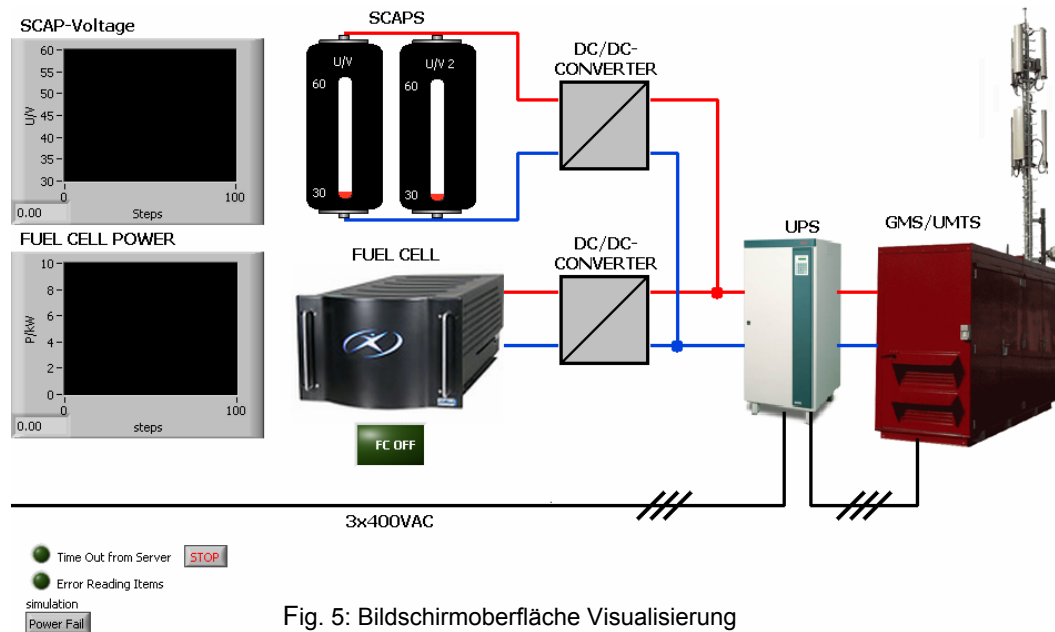


Fig. 5: Bildschirmoberfläche Visualisierung

### Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffversorgung und die Verlegung der Zuführleitung wurden von einem erfahrenen Fachmann installiert. Ein Drucktest bestätigte die Dichtheit der Anlage.

Der Wasserstoffspeicher ist so ausgelegt, dass die Anlage bei einer Last von 10 kW eine Autonomiezeit von 2 Betriebsstunden gewährleistet und bei Antennenlast ca. 6 Betriebsstunden. Dazu werden zwei 50l-Druckgasflaschen ausserhalb des Gebäudes auf dem Dach der HTA Luzern in einem Gasflaschenschrank aufgestellt. Mittels einer Umschaltstation ist gewährleistet, dass nach Leerung der ersten Flasche automatisch auf die zweite umgestellt wird, siehe Fig. 6.

Eine Druckanzeige überwacht bei jeder Flasche den Flascheninhalt. Sobald eine Flasche leer ist wird im Kontrollcenter von Swisscom Mobile eine Alarmmeldung ausgelöst, damit die Flasche gewechselt werden kann.

Die Reinheit des verwendeten Wasserstoffs beträgt  $\geq 99.995$ , was der Qualität 4.5 entspricht.



Fig. 6: Wasserstoff-Umschaltstation

## 2.3 Sicherheitskonzept

Wasserstoff ist in einer Konzentration von 4 – 75.6 Volumen % in Luft leicht entflammbar. Die untere Explosionsgrenze von 4 % wird als UEG bezeichnet. Der Grenzwert für einen tolerierbaren Wasserstoffgehalt in Luft wird meist als Bruchteil des UEG angegeben.

Das Projekt soll auch zur Entmystifizierung des Umgangs mit Wasserstoff beitragen und einen sicheren Umgang mit Wasserstoff aufzeigen. Verschiedene Massnahmen wurden umgesetzt, um die Sicherheit zu gewährleisten:

- **Aufstellung der Druckflaschen ausserhalb des Gebäudes**  
Die zwei 50l-Druckgasflaschen sind in einem wetterfesten Flaschenschrank im Freien aufgestellt. Dies hat zwei Vorteile:
  - Erstens entweicht der Wasserstoff bei einem Leck in den Leitungen sofort und
  - zweitens gewährleistet die Aufstellung einen einfachen Zugang beim Flaschenwechsel.
- **Belüftung des Aufstellungsraumes**  
Im Aufstellungsraum der BZ-Anlage befinden sich direkt unterhalb der Decke Lüftungsöffnungen, so dass der nach oben steigende Wasserstoff im Falle einer undichten Stelle entweichen kann. Durch diese Lüftungsöffnungen und einem grösseren Spalt in der Eingangstür ist eine natürliche Durchlüftung des Raumes gewährleistet.
- **Belüftung der Anlage**  
Zusätzlich zur Belüftung des Raumes wird das Rack belüftet, in dem die BZ montiert ist. Die Belüftung erfolgt über einen Ventilator, der auch im Stand-by-Betrieb der BZ-Anlage kontinuierlich in Betrieb ist. Über ein Abluftrohr wird austretender Wasserstoff direkt ins Freie geführt, um so eine mögliche Wasserstoffkonzentration im Raum zu verhindern.
- **Wasserstoffsensor**  
Sowohl in der Abluftleitung als auch im Aufstellungsraum der BZ-Anlage ist ein Wasserstoffsensor installiert. Die Sensoren sind so eingestellt, dass schon bei geringem, unkritischem Wasserstoffgehalt in der Luft eine Alarmmeldung ausgelöst wird. Oberhalb eines definierten Grenzwertes stoppt ein Magnetventil am Wasserstoffspeicher die Zufuhr.
- **Alarmierungskonzept mit Swisscom Mobile**  
In Zusammenarbeit mit Swisscom Mobile wurde ein Alarmierungskonzept erarbeitet. Das Swisscom Mobile Kontrollcenter in Olten kann den Zustand der Anlage jederzeit abrufen und Alarmmeldungen werden automatisch angezeigt.  
Eine Alarmmeldung wird bei folgenden Vorfällen ausgelöst:
  - Wasserstoffkonzentration in der Luft über dem eingestellten Grenzwert
  - allgemeine Anlagestörung
  - Störung der BZ
  - Wasserstoffflasche leer
  - Information, wenn BZ läuft
 Das Kontrollcenter informiert bei Störungsmeldungen sofort die verantwortlichen Personen an der HTA Luzern.
- **Suva**  
Ein Suva-Vertreter war direkt vor Ort und hat die Sicherheitsmassnahmen und die Installation der gesamten Anlage begutachtet und akzeptiert.



## 2.4 Anlagenlayout und Aufstellung

Die Systemkomponenten BZ, DC/DC-Wandler, Superkapazitäten und Steuerung sind so dimensioniert, dass sie in ein 19" - Standard-Rack eingebaut werden können. BZ und Superkapazitäten sind modular aufgebaut, so dass die Anlage auch für grössere Leistungen ausgelegt werden kann. Nach erfolgreichem Aufbau und Austesten im Labor erfolgte die Montage der Anlage am eigentlichen Antennenstandort.

Die Brennstoffzelle erfordert idealerweise eine Umgebungstemperatur von 15 – 30 °C. Das Rack wird auf dem Dach der HTA Luzern in einem unbeheizten, frostfreien Service-Raum installiert, siehe Figur 7, welcher aufgrund guter Isolierung die Umgebungsbedingungen für die BZ erfüllt.

Die Abluftrohre (Kathodenabluft der BZ und Belüftung) und die Wasserstoffleitungen werden auf kürzestem Weg nach aussen geführt.

Die eigentliche USV sowie die GSM/UMTS-Basisstation von Swisscom Mobile sind in einem separaten klimatisierten Container untergebracht, vergleiche Figur 8.

Die elektrische Anbindung des Rack an die USV erfolgte durch einen APC-Techniker, die Verkabelung mit der Basisstation durch einen Elektriker von Swisscom Mobile.

Der Rückkühler für den sekundären Kühlkreislauf der BZ und der Gasflaschenschrank stehen auf dem Dach, was auf dem Foto in Figur 9 zu erkennen ist.



Fig. 7: Aufstellung Rack



Fig. 8: USV-Anlage und Basisstation im Container



Fig. 9: Wasserstoffspeicher und Rückkühler

Die Gesamtinstallation zeigt das Schema in Figur 10.

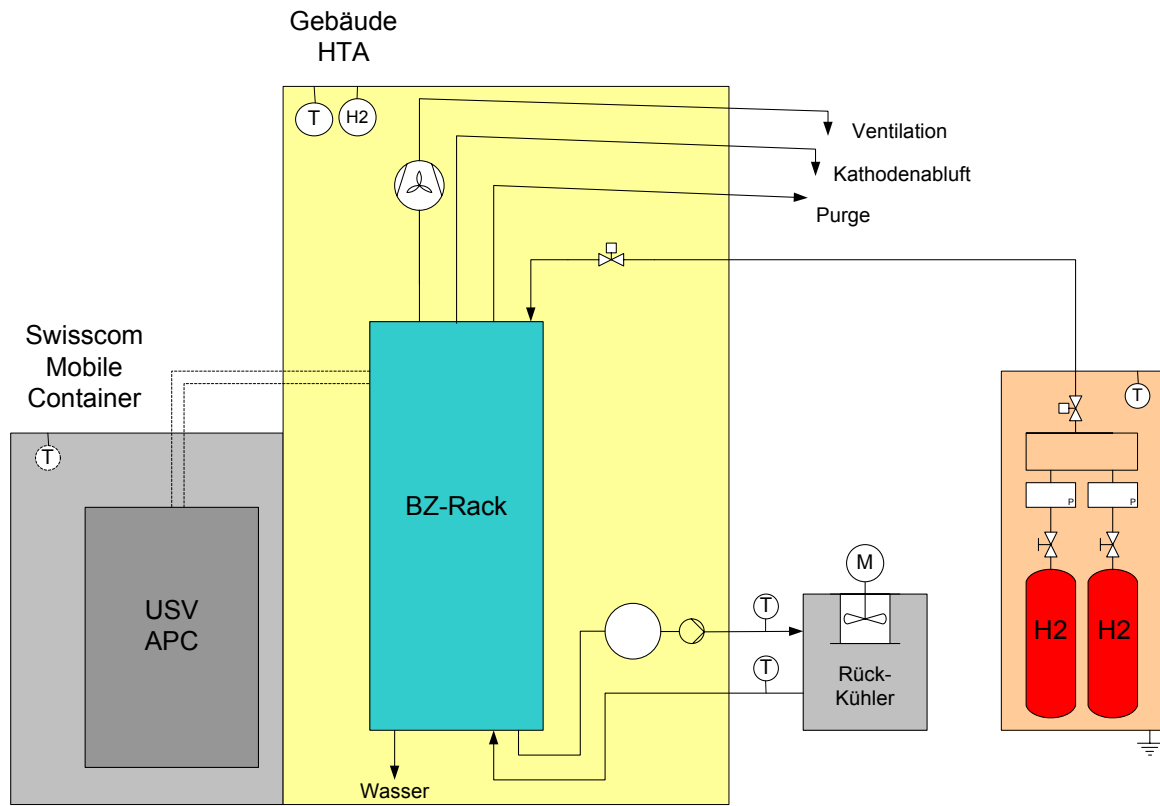


Fig. 10: Schematischer Aufbau des Gesamtsystems



### 3. Feldtest und erreichte Ergebnisse

#### 3.1 Feldtest

##### Testprogramm

Zum Austesten der Anlage werden sowohl Tests mit Verbraucherlast (Antennenlast) als auch Tests mit externer Last (Widerstände) durchgeführt.

Anzahl und Ablauf der Stromausfall-Simulationen an der realen Anlage unter Verbraucherlast wurde in Zusammenarbeit mit Swisscom Mobile erarbeitet. Sie stellen mögliche realistische Stromausfall-Szenarien dar.

Im Zeitabstand von ca. 6 Monaten werden Tests mit externer Last durchgeführt, um Aussagen zur Degradation der BZ treffen zu können. Dazu wird die BZ mit Volllast sowie mit abfallender Last zur Aufnahme der Kennlinie belastet.

Unter Antennenlast liefert die BZ eine Leistung von ca. 3.3 kW, bei Volllast eine Leistung von ca. 8.5 kW. Diese Last ist durch eine Lastbegrenzung des DC/DC-Wandlers vorgegeben. Die eigentliche BZ ist gemäss Herstellerangabe bis über 10 kW belastbar.

Tabelle 2 zeigt das Testprogramm mit Antennenlast und externer Last.

	Test	Last	Dauer	Durchführung	Ziel
1	Simulation normaler Stromausfälle mit Wiederholung	Antenne	2 x 20 min. innerhalb 1 h	Monatlich ab April	Zuverlässigkeit
2	Simulation kurz aufeinander folgender Stromausfälle	Antenne	5 x 5 min. innerhalb 30 min.	Monatlich ab April	Zuverlässigkeit
3	Simulation lang anhaltender Stromausfälle	Antenne	4 h	Zwei Mal jährlich	Zuverlässigkeit
4	Belastung bei Volllast	Externe Last	30 min.	Drei Mal jährlich	Degradation
5	Belastung mit abfallender Last	Externe Last	30 min.	Drei Mal jährlich	Degradation Kennlinie

Tab. 2: Testprogramm

##### Testbedingungen

Die Aufstellung des BZ-Systems in einem gut isolierten Service-Raum bot im Sommer wie im Winter stabile Umgebungsbedingungen.

*Umgebungsbedingungen:*

Raumtemperatur: 15 - 30°C  
relative Luftfeuchtigkeit: 40 ± 10 %

*Messdaten:*

Die Messdaten werden über die SPS erfasst und aufgezeichnet. Die Leistung der BZ  $P_{BZ}$  wird über Strom- und Spannungsmessung direkt am Ausgang der BZ ermittelt und in einer Lastkurve dargestellt. Das Anfahrverhalten zeigt sich anhand der Leistung  $P_{BZ}$  über der Zeit  $t$ .

Der Wirkungsgrad der BZ  $\eta_{BZ}$  wird über den Wasserstoffverbrauch während der Betriebszeit ermittelt.

Um auch eine Aussage über den Wirkungsgrad des Gesamtsystems mit USV-Anlage  $\eta_{\text{ges}}$  treffen zu können, wurde in einer einmaligen Messreihe die Leistung am Ausgang der USV über einen angeschlossenen Power Analyzer abgelesen.

Tabelle 3 benennt die gemessenen Größen und das Ziel der Auswertung. Das Schema in Figur 11 zeigt, an welcher Stelle im System gemessen wurde.

	Gemessene Grösse	Auswertung
Brennstoffzelle	Stromstärke $I_{\text{BZ}}$	Lastkurve mit/ohne Batterie
	Spannung $U_{\text{BZ}}$	
	Temperatur $T_{\text{BZ}}$	Temperaturverlauf
Superkapazitäten	Entladezeit $t_{\text{Entl}}$	Anfahrverhalten
	Aufladezeit $t_{\text{Aufl}}$	
Wasserstoff	Druck $p_{\text{vor/nach}}$	Wirkungsgrad Brennstoffzelle $\eta_{\text{BZ}}$
	Temperatur $T_{\text{Umgebung}}$	
USV	Leistung $P_{\text{USV}}$	Wirkungsgrad gesamt $\eta_{\text{ges}}$

Tab. 3: Messgrößen

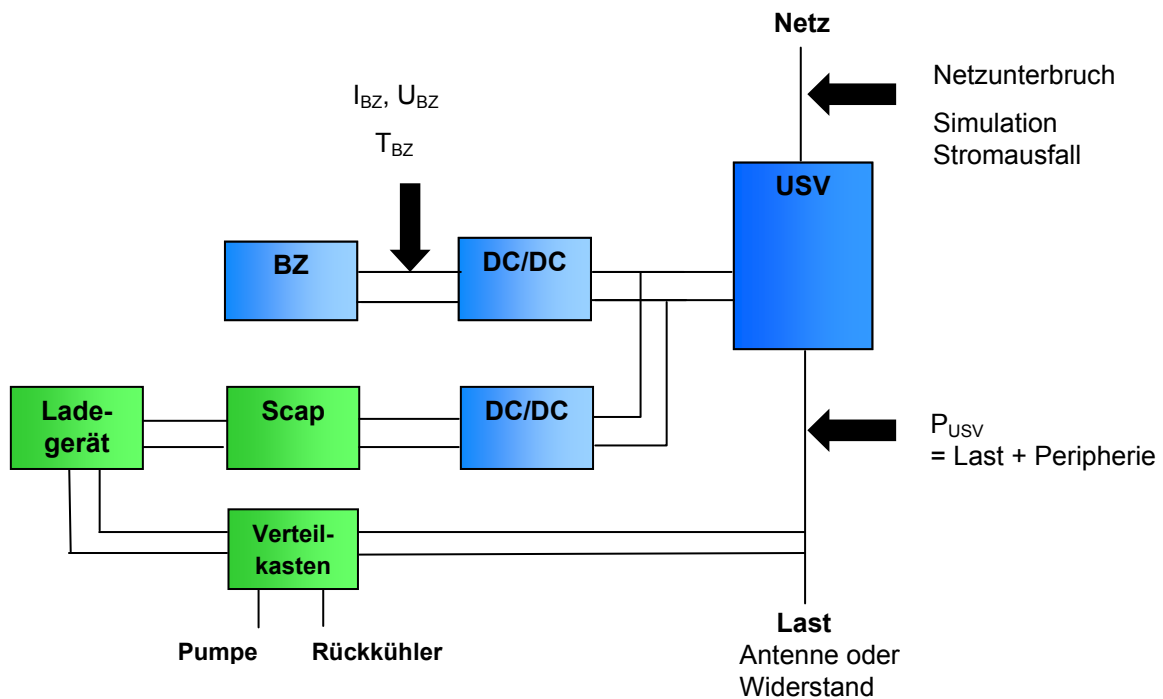


Fig. 11: Position der Messstellen im System

## Testaufbau

### Mit Antennenlast

Figur 12 zeigt die Installation der GSM/UMTS-Basisstation. Diese ist im Normalfall an den Ausgang der USV angeschlossen, die Stromversorgung ist über das Netz gewährleistet, was im Verlauf der grünen Linie dargestellt ist.

Bei einem Netzausfall sorgen die Batterien in der USV-Anlage für einen unterbrechungsfreien Betrieb respektive bei unserer Testanlage das BZ-System, siehe rote, strich-punktierte Linie.

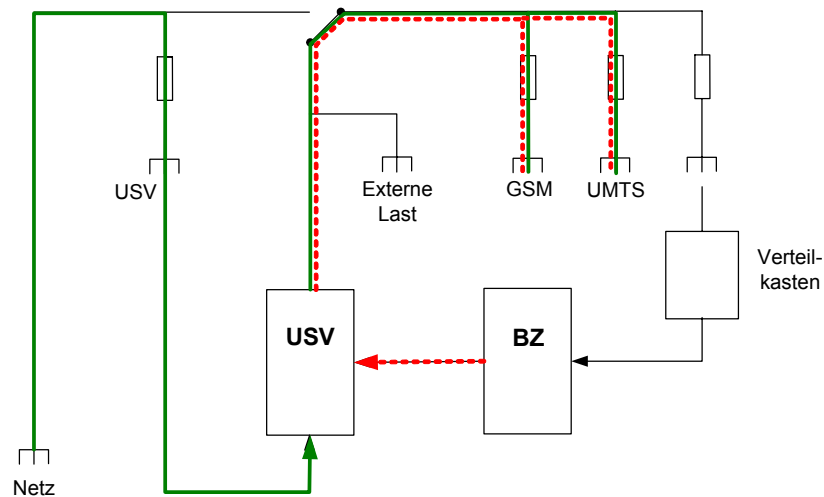


Fig. 12: Versuchsanordnung mit Antennenlast

### Mit externer Last

Als Lastgeber für die externe Last dienen Widerstände, die in definierten Lastschritten eingestellt werden können. Das Schema dieser Versuchsanordnung ist aus Figur 13 ersichtlich. Die Widerstände sind an den Ausgang der USV angeschlossen und werden vor der Simulation direkt vom Netz gespeist. Dies zeigt der Verlauf der grünen Linie. Nach Simulation des Netzausfalls schaltet sich das BZ-System zu. Die rote, strich-punktierte Linie stellt diesen Stromverlauf dar.

Die GSM/UMTS-Basisstation wird während dieser Tests mit externer Last über einen äusseren Stromkreis direkt vom Netz gespeist und ist in dieser Zeit nicht an die USV angeschlossen. Die Funktionsfähigkeit der Antenne ist auf diese Weise zu jedem Zeitpunkt gewährleistet.

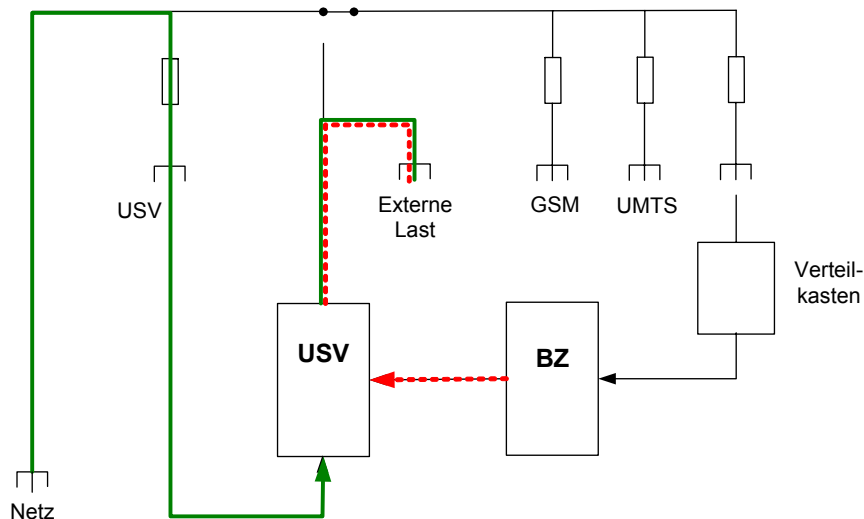


Fig. 13: Versuchsanordnung mit externer Last

### 3.2 Messergebnisse

Die von der SPS aufgezeichneten Betriebsdaten der BZ sehen am Ende der einjährigen Testzeit zusammengefasst folgendermassen aus:

Laufzeit gesamt:	34.3 h	Betriebsstunden der BZ an HTA Luzern (über SPS aufgezeichnet)
	39.0 h	inkl. Betriebsstunden der BZ durch Hersteller (Daten aus BZ Controller des Herstellers ausgelesen)
Anzahl Start/Stops:	138	ausgeführt an HTA Luzern
Anzahl Wattstunden:	130.2 kWh	geliefert von BZ (Daten aus BZ Controller des Herstellers ausgelesen)

#### Antennenlast – Lastkurve und Startverhalten

Von Januar bis Dezember 2006 wurden die monatlichen Tests mit Antennenlast durchgeführt. Die Gesamtanzahl der Simulationen mit angeschlossener Basisstation betrug 88 und war damit mehr als doppelt so hoch wie die ursprünglich geplanten 40 Simulationen.

Die Leistungsaufnahme der BZ lag unter Antennenlast durchschnittlich bei 3.2 bis 3.3 kW konstanter Last.

Von Januar bis April war neben der BZ und den Superkapazitäten auch die Batterie als Back-up an die USV angeschlossen. Die Position der Batterie ist im vorhergehenden Kapitel Anlagekonzept im Schema in Figur 1 zu sehen.

Im Folgenden zeigt Figur 14 die Lastkurve der Simulation eines normalen Stromausfalls von 20 Minuten mit angeschlossener Batterie. Die Leistung der BZ steigt langsam bis auf knapp 3 kW an, bei einer Spannung von knapp 50 V. Das Spannungsniveau der Superkapazitäten bleibt konstant auf dem Ausgangsniveau von 59 V. Dies liegt darin begründet, dass keine eindeutige Lastübernahme durch die Scaps erfolgen kann, da die Batterie den Startvorgang und die Last puffert.

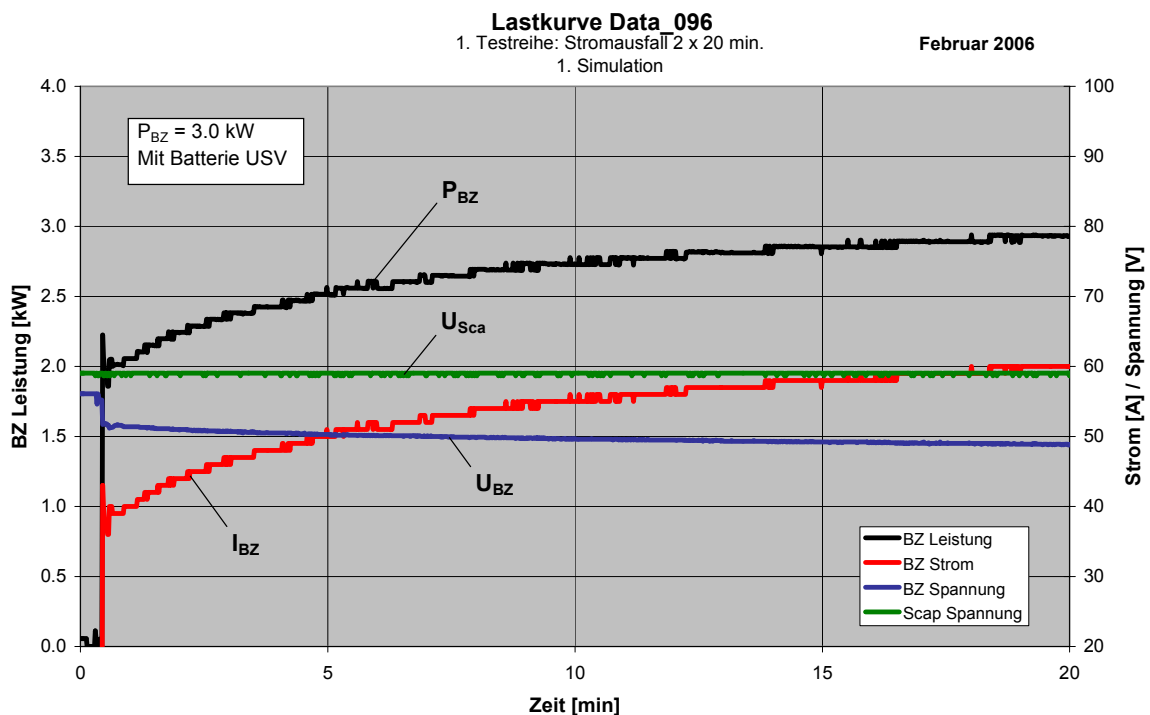


Fig. 14: Lastkurve der BZ im 20 min.-Test mit Batterie Back-up in USV

Verschieden dazu sieht die Lastkurve ohne Batterie in Figur 15 aus. Hier erreicht die BZ eine Leistungsaufnahme von ca. 3.3 kW bei einer Spannung von 47 V.

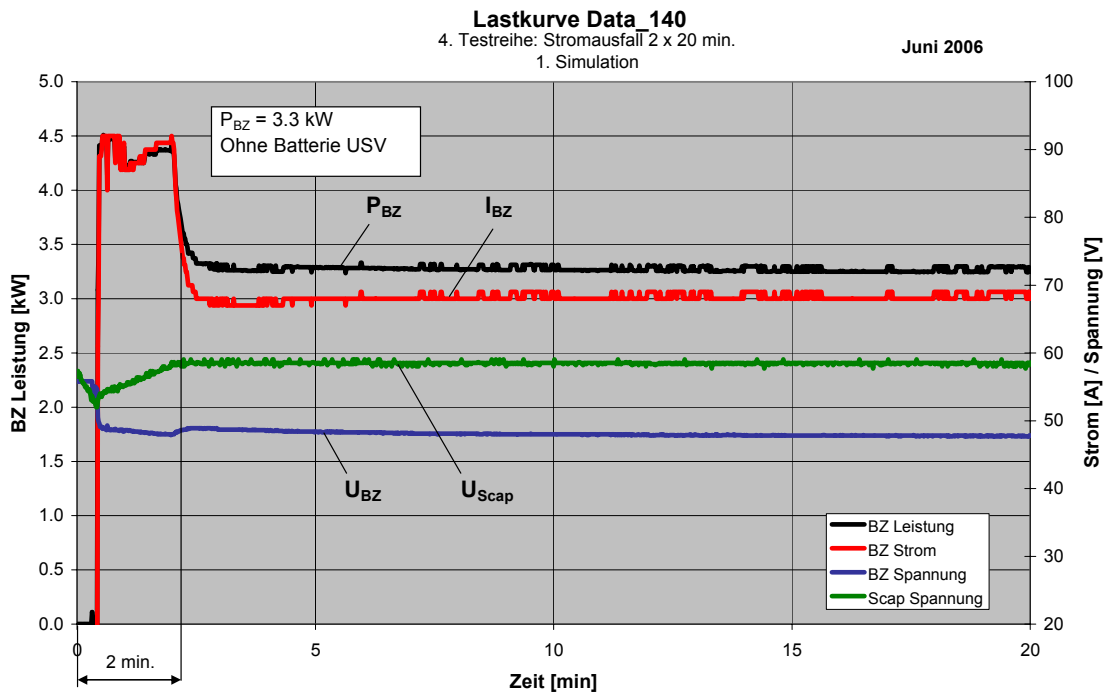


Fig. 15: Lastkurve der BZ im 20 min.-Test ohne Batterie Back-Up in USV

Während des Startvorgangs sinkt die Scap-Spannung von 59 V auf 52 V innerhalb von 24 Sekunden ab. Nach dieser Zeit ist die BZ startbereit und die Supercapazitäten werden unmittelbar über das BZ-System wieder geladen. Das System liefert während dieser Ladephase eine Leistung von 4.5 kW. Nach ca. 2 Minuten ist die Spannung der Supercapazitäten wieder auf ihrem Ausgangsniveau und das System stabilisiert sich unter Antennenlast bei 3.3 kW.

In Figur 16 sind die drei Phasen des Startverhaltens nochmals deutlicher dargestellt.

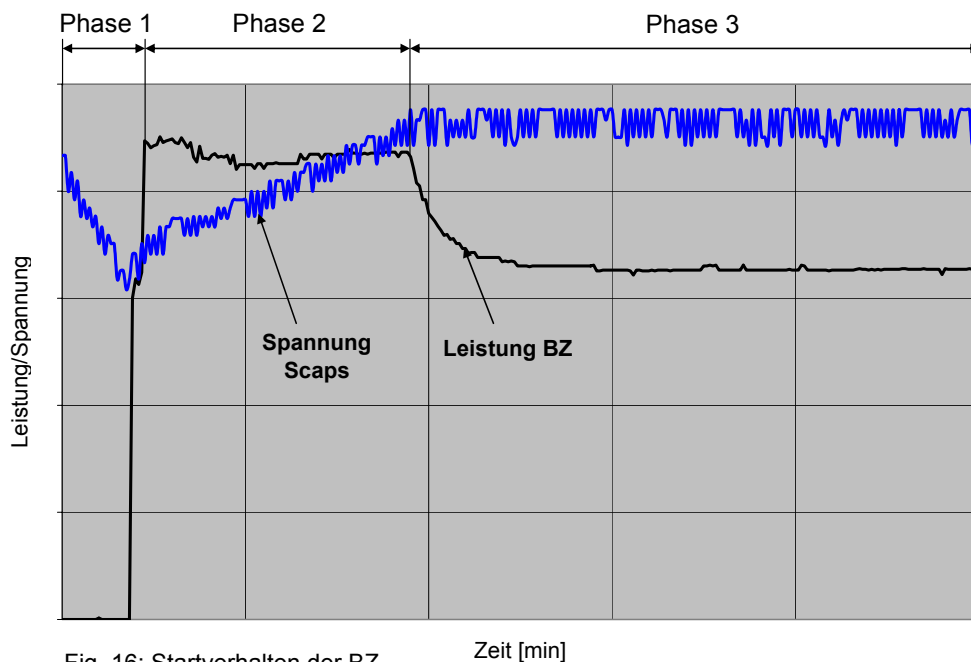


Fig. 16: Startverhalten der BZ

In Phase 1 fährt die Brennstoffzelle an. Die Superkapazitäten liefern in dieser ersten Phase die Spannung, um die unterbrechungsfreie Stromversorgung zu gewährleisten. Fig. 16 zeigt den Abfall der Spannungskurve während der Startphase. Nach 20 – 30 Sekunden ist die Brennstoffzelle betriebsbereit. Sie übernimmt die Stromversorgung für die Mobilfunk-Basisstation und lädt gleichzeitig die Superkapazitäten wieder auf. Die erhöhte Leistungskurve in Phase 2 verdeutlicht diesen Prozess. Nach kurzer Zeit sind die Superkapazitäten geladen. In Phase 3 liefert die Brennstoffzelle solange den Strom bis das Netz wieder zur Verfügung steht.

Bei allen Versuchen sowohl mit Antennenlast als auch mit externer Last war die BZ nach spätestens 30 Sekunden startbereit.

#### • 2 x 20 min. - Test

Die Lastkurve des 2 x 20 min.-Tests ist in Figur 17 mit folgendem Testablauf dargestellt:

Simulation von 20 Minuten Stromausfall - 20 Minuten Netz vorhanden - 20 Minuten Stromausfall.

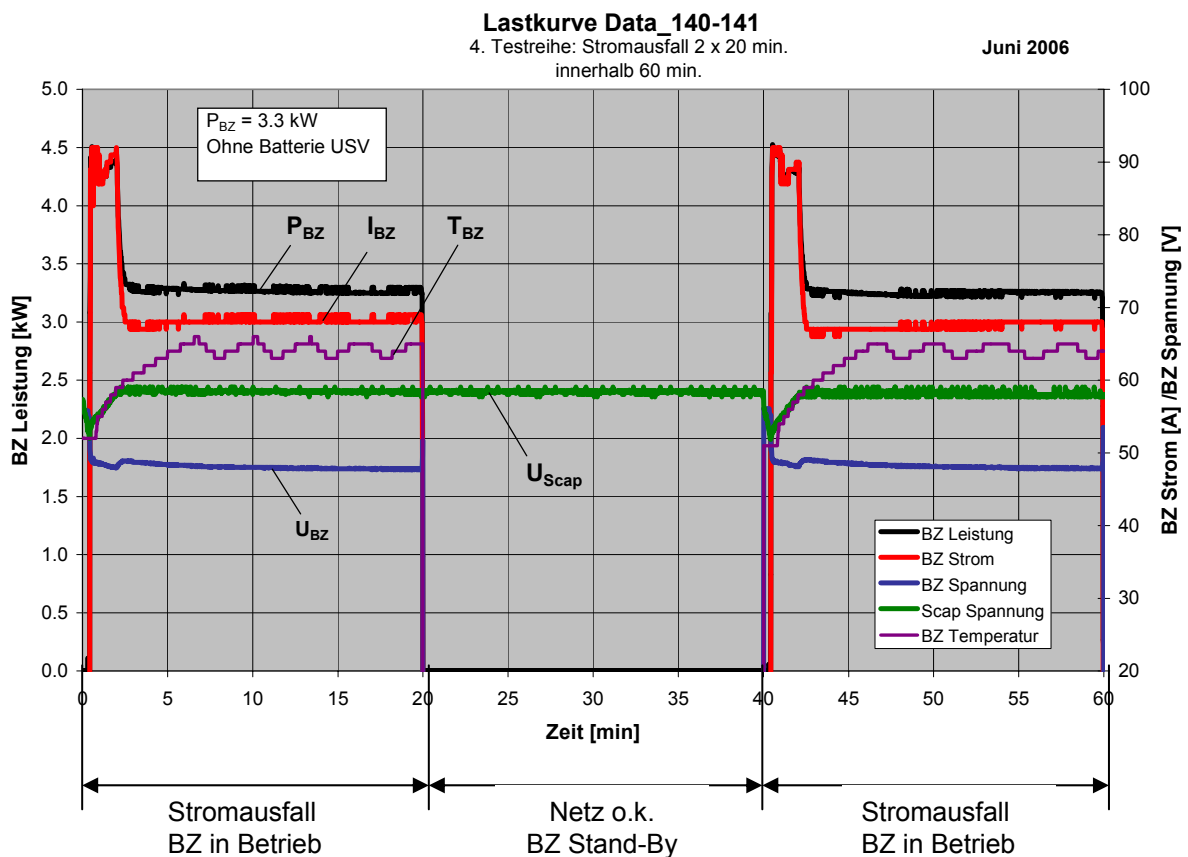


Fig. Lastkurve der BZ im 2 x 20 min. Test

Dieser Test ohne USV-Batterie wurde ab April 2006 monatlich durchgeführt. Die Antennenlast ist jeweils konstant, so dass nach dem Startvorgang der BZ und dem Wiederaufladen der Scaps ein gleichbleibender Leistungsverlauf zu beobachten ist.

Die Stack-Temperatur steigt im Betrieb auf die geregelte Betriebstemperatur von 63 – 65°C an.

Im Stand-By-Modus des BZ-Systems wird die Temperatur nicht aufgezeichnet, so dass dieser Verlauf im Diagramm nicht dargestellt ist. Die Scap-Spannung bleibt auf dem Niveau von 58 V, um für den nächsten Stromausfall einsatzbereit zu sein.

### • 5 x 5 min. – Test

Dieser Test wurde ab April 2006 monatlich durchgeführt. Zwischen den simulierten Stromausfällen von je 5 Minuten wurde der Strom jeweils eine Minute lang wieder vom Netz geliefert, siehe Lastkurve aus Figur 18.

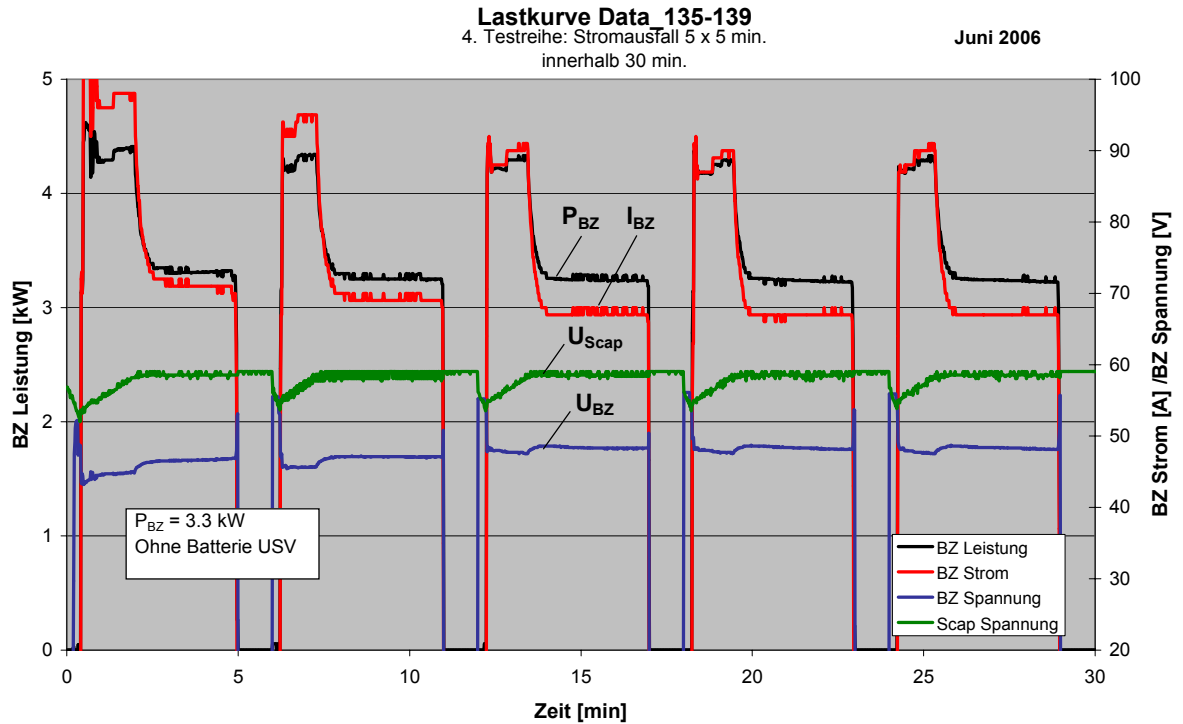


Fig. 18: Lastkurve der BZ im 5 x 5 min. Test

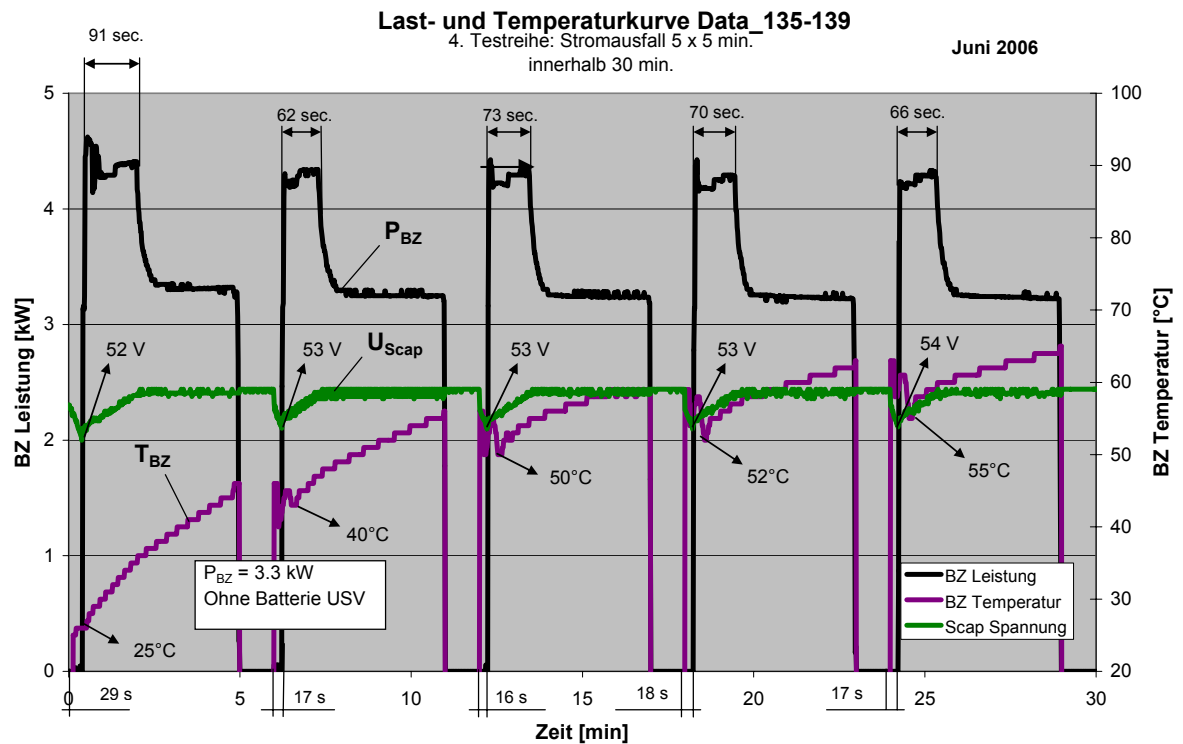


Fig. 19: Starttemperatur und Anfahrzeit der BZ im 5x5 min.-Test

Das Anfahrverhalten ist aus Fig. 19 erkennbar. Die Startzeit der BZ liegt zwischen 16 und 30 Sekunden und steht in Zusammenhang mit der BZ-Temperatur beim Starten. Liegt die Starttemperatur bei Raumtemperatur braucht die BZ länger zum Starten als wenn ihre Temperatur durch vorhergehenden Betrieb schon erhöht war.

Diese Startzeit steht auch in direktem Zusammenhang mit der Entladung der Scaps. Bei längerer Startzeit werden sie auf ein tieferes Niveau entladen und es benötigt dementsprechend mehr Zeit, sie wieder aufzuladen. Beim dargestellten Test beträgt die Ladezeit 91 Sekunden für eine Anfahrzeit von 29 Sekunden, respektive 62 – 73 Sekunden bei einer Startzeit von ca. 17 Sekunden.

#### • 4h – Test

Im 4h – Test wurde das Verhalten des BZ-Systems bei lang anhaltendem Stromausfall von 4 Stunden untersucht. Dieser Test wurde im Testjahr zwei Mal erfolgreich durchgeführt.

Die Antennenlast blieb über die ganze Zeit konstant und auch das BZ-System zeigte über den gesamten Zeitraum ein sehr stabiles Betriebsverhalten.

Figur 20 zeigt den Leistungsverlauf während des Tests.

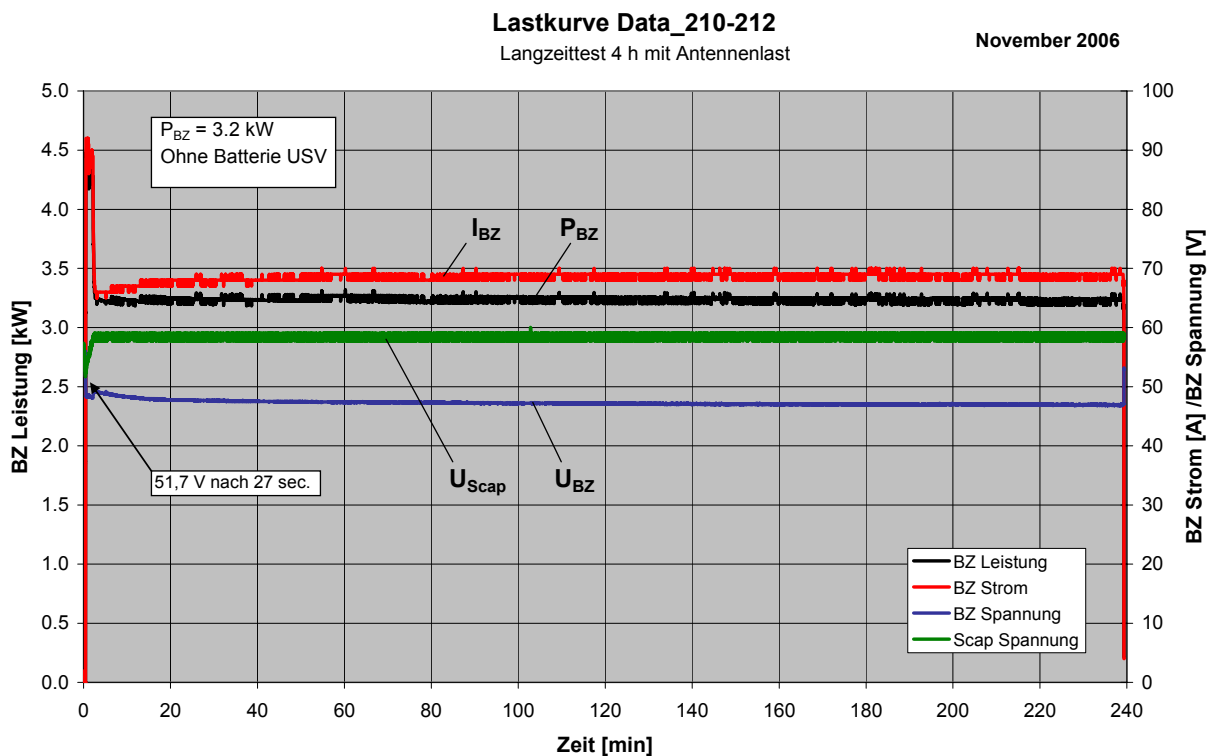


Fig. 20: Lastkurve der BZ im 4h - Test



### • Realer Stromausfall

Im Juli 2006 ereignete sich ein realer Stromausfall für die Zeitdauer von fast 1 Stunde aufgrund von Unwetterschäden.

Auch in diesem Fall ist das BZ-System problemlos gestartet. Die Startzeit betrug 24 Sekunden und bewegte sich damit im erwarteten Rahmen. Die Kühlung der BZ regelte die Stacktemperatur auf Werte zwischen 63 und 65°C.

Das Betriebsverhalten der BZ war auch in diesem Fall sehr stabil, siehe Lastkurve in Figur 21.

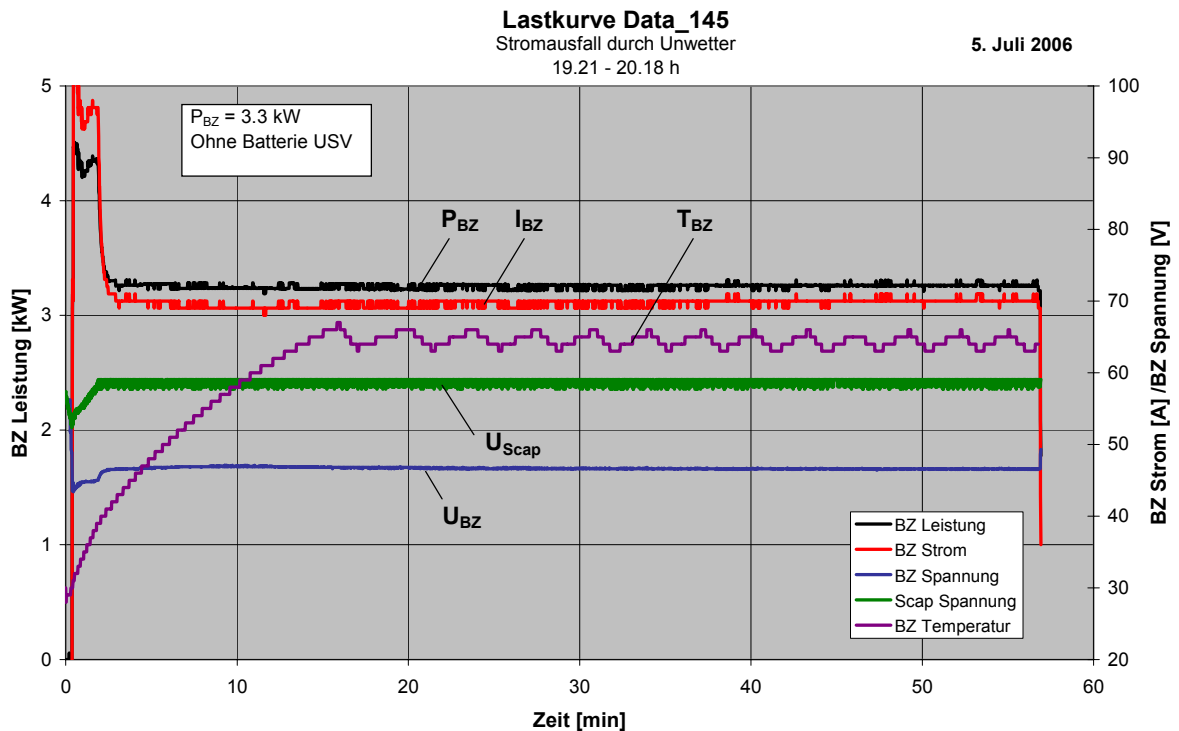


Fig. 21: Lastkurve, Temp.- und Scap-Spannungsverlauf des BZ-Systems bei realer Stromausfall

### Zusammenfassung der Ergebnisse bei Antennenlast

- Leistung BZ:  $P_{BZ} = 3.3 \text{ kW}$
- Anfahrzeit BZ:  $t_{BZ} = 25 - 30 \text{ sec.}$
- abh. von der Starttemperatur der BZ
- Ladezeit Scap:  $t \cong 2 \text{ min. von } U_{\min.} \cong 52 \text{ V} - 58 \text{ V}$
- Betriebstemperatur:  $65 - 68^\circ\text{C}$
- Betriebsverhalten: Sehr stabil
- Startverhalten
- Zuverlässigkeit: 100% gemäss Tests  
88 Starts von 88 Tests erfolgreich

## Externe Last

Mit externer Last wurden insgesamt drei Mal

- Tests mit Volllast und
- Tests mit absteigender Last zur Aufnahme der Kennlinie

durchgeführt. Die BZ liefert gemäss Herstellerangaben eine Last von über 10 kW. In unserem Aufbau ist jedoch der DC/DC-Wandler das leistungsbegrenzende Bauteil. Die Maximalleistung des DC/DC-Wandlers liegt bei 8 kW, wodurch die BZ bis ca. 8.5 kW belastet werden kann.

### • Volllast

Fig. 22 zeigt die Lastkurve während des Tests unter Volllast. Die Last wird in drei Stufen innerhalb von knapp vier Minuten hochgefahren und bleibt dann für 30 Minuten konstant. Die Stromstärke der BZ steigt auf 200 A an. Sie ist in Fig. 22 zugunsten einer übersichtlichen Darstellung nicht eingetragen.

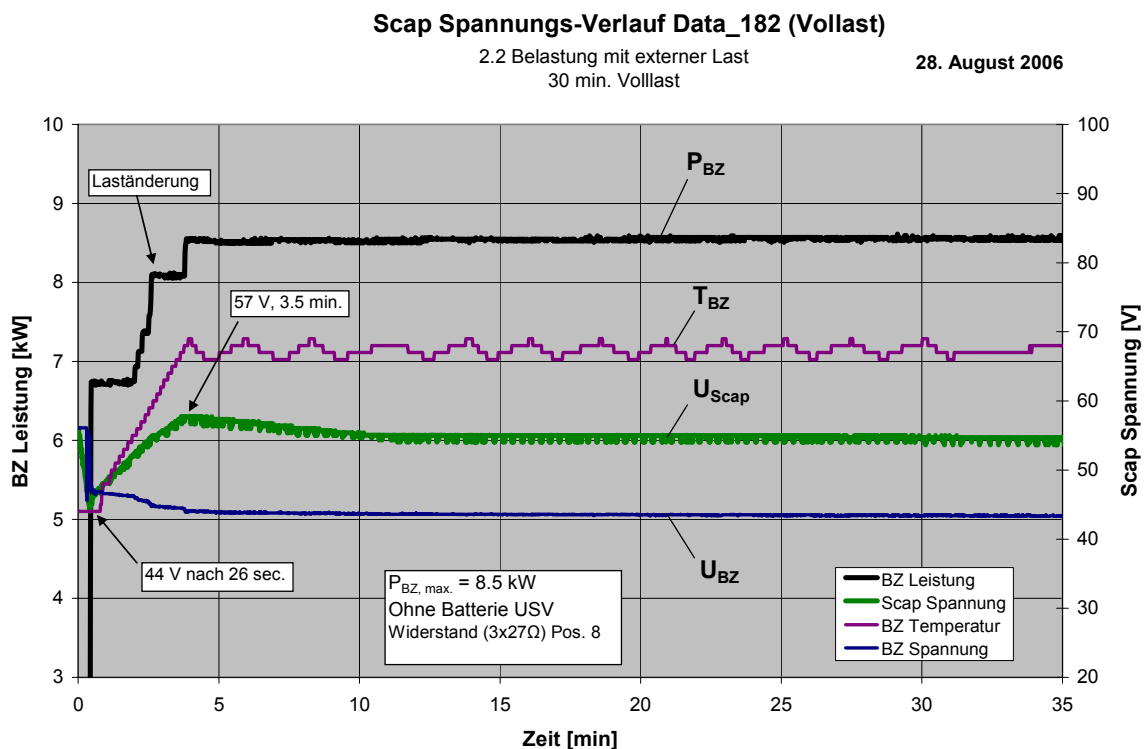


Fig. 22: Lastkurve, BZ-Temp.-verlauf und Scap-Spannungsverlauf bei Volllast im August 2006

Die Spannung der Supercapazitäten sinkt beim Anfahren innerhalb von 26 Sekunden auf 44 V ab. Sie steigt langsam wieder an, bleibt dann jedoch nicht auf ihrem höchsten Wert von 58 V, sondern verharrt auf einem Niveau von 55 V. Dies ist dadurch zu erklären, dass der DC/DC-Wandler der BZ an seiner Leistungsgrenze belastet wird und nicht auf seinem höchsten Spannungsniveau arbeitet. In Folge wird der DC/DC-Wandler der Supercapazitäten aktiviert und die Scaps geben kontinuierlich Spannung an die USV ab. Über das Netz werden die Scaps wieder nachgeladen.

Der gleiche Effekt ist auch bei den November Tests mit Volllast zu beobachten, siehe Fig. 23. Hier wird die Last in zwei Stufen innerhalb von einer Minute hochgefahren und für 30 Minuten konstant gehalten. Die Spannung der Supercapazitäten sinkt beim Anfahren innerhalb von 20 Sekunden auf 46 V ab. Sie steigt langsam wieder an, verharrt dann auf einem Niveau von ca. 48 V.

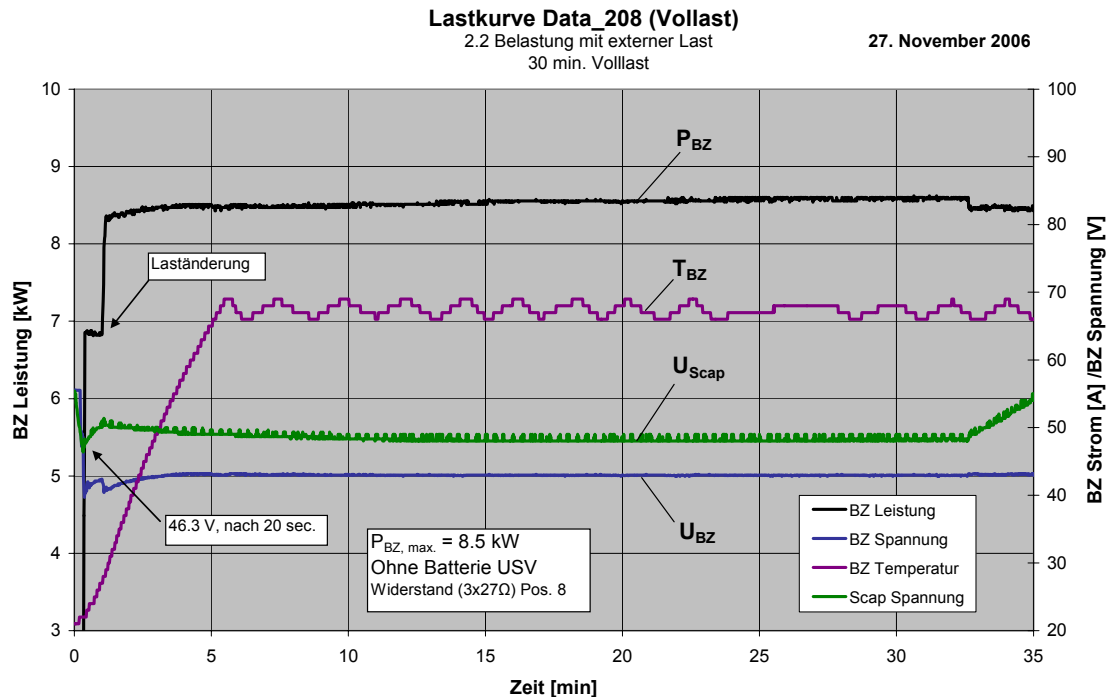


Fig. 23: Lastkurve, BZ-Temp.-verlauf und Scap-Spannungsverlauf unter Vollast im November 2006

Die Temperaturkurve des Stack verläuft zwischen 66 – 68°C und ist somit 3°C höher als unter Antennenlast. Die Regelung der Temperatur weist im Verlauf kleine Unregelmässigkeiten auf. Ansonsten zeigt das gesamte BZ-System aber auch unter der hohen Last ein stabiles Betriebsverhalten.

#### • Kennlinie

Im Anschluss an die 30 Minuten Vollast wurde die Last von 8.5 kW kontinuierlich nach unten gefahren. Die Laststufen wurden jeweils für 1 Minute gehalten. Bei knapp 7 kW musste der Versuch kurz unterbrochen werden, um den Widerstand zu wechseln. Dadurch erklärt sich der kleine Sprung in der Kennlinie in Fig. 24.

Die Tests zur Aufnahme der Kennlinie wurden insgesamt drei Mal durchgeführt. In Fig. 24 sind alle drei Kennlinien dargestellt. Sie sind alle drei fast identisch. Aufgrund dieser Messungen ist bisher keine Degradation der BZ feststellbar.

Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da die BZ noch keine sehr hohe Lebensdauer aufweist und die tatsächliche Betriebsdauer mit einer Laufzeit von 34 Stunden kurz ist. Gemäss Herstellerangabe zeigt sich eine leichte Degradation erst ab 300 Betriebsstunden.

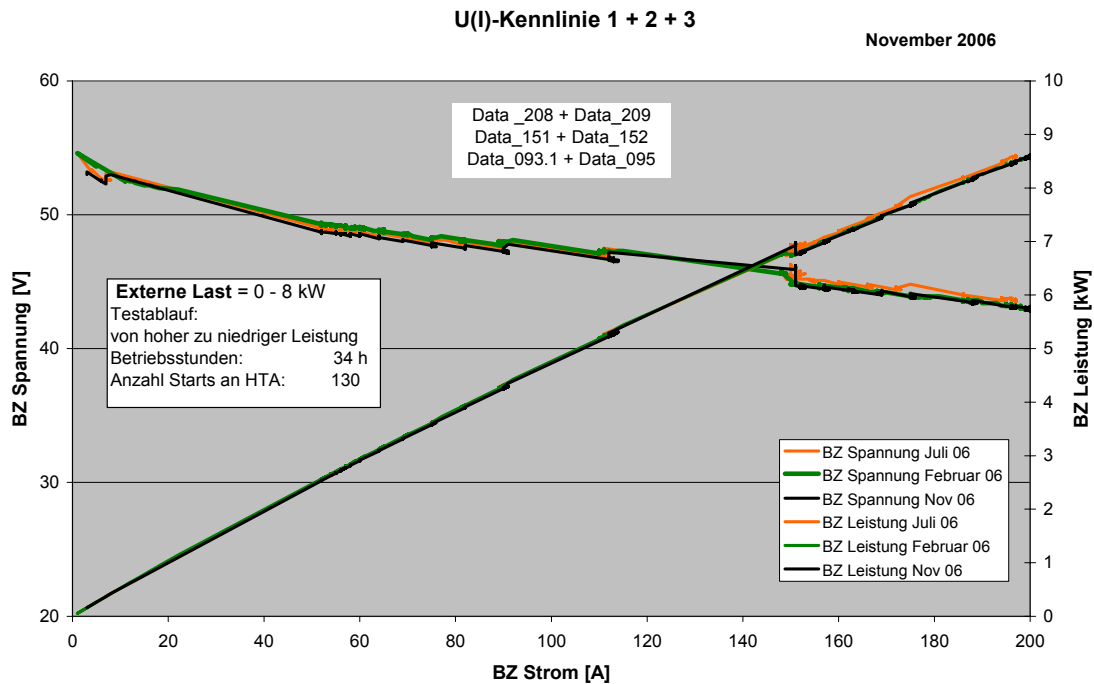


Fig. 24: Kennlinie der BZ aus Messungen im Februar, Juli und November 2006

### Zusammenfassung der Ergebnisse bei Volllast

- Leistung BZ:  $P_{BZ} = 8.5 \text{ kW}$  (begrenzt durch Leistung DC/DC-Wandler)
  - Anfahrzeit BZ:  $t_{BZ} = 25 - 30 \text{ sec.}$  (abh.  $P_{BZ}$ ,  $T_{BZ}$ )
  - Ladezeit Scap:  $t \cong 3.5 \text{ min.}$  von  $U_{\min.} \cong 44 \text{ V} - 58 \text{ V}$
  - Betriebstemperatur:  $65 - 68^\circ\text{C}$
  - Betriebsverhalten: Stabil
  - Degradation: bisher noch keine zuverlässige Aussage möglich, da zu kurze Betriebs- und Standzeit
- Lebensdauer: 11 Monate  
 Laufzeit: 34 h  
 Start: 130 x

### Wirkungsgrad

Folgende Wirkungsgrade wurden anhand der Messergebnisse ermittelt:

- der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems  $\eta_{BZ\text{-System}} = \dot{Q}_{zu} / P_{\text{Stack}}$  und
- der Wirkungsgrad des Gesamtsystems mit USV  $\eta_{\text{gesamt}} = \dot{Q}_{zu} / P_{\text{USV}}$ .

Der Wasserstoffverbrauch während des BZ-Betriebs bestimmt die zugeführte Energie  $\dot{Q}_{zu}$ . Diese wird über den Massestrom und den Heizwert des Wasserstoffs ermittelt.

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_{zu} \times H_{H_2}$$

Unter der Annahme, dass Wasserstoff sich wie ein ideales Gas verhält, wird der Massestrom  $\dot{m}_{zu}$  über den Wasserstoffdruck vor und nach dem Test mit Hilfe der Zustandsgleichung für ideale Gase errechnet.

$$P \times V = m \times R \times T \text{ mit } R \text{ als spezieller Gaskonstante}$$

Der auf den Wasserstoff bezogene Heizwert beträgt (aus Dubbel D44 Anhang D8, Tab. 1):

$$H_{H_2} = 119'972 \text{ kJ/kg (1 bar, } 25^\circ\text{C)}$$

Die Leistung der Brennstoffzelle  $P_{\text{Stack}}$  wurde über Strom- und Spannungsmessung direkt am BZ-Ausgang ermittelt. Die Leistung der USV  $P_{\text{USV}}$  wurde in einer einmaligen Testserie in Zusammenarbeit mit APC am Ausgang der USV mit Hilfe eines Power Analyser gemessen und dokumentiert. Diese Leistungsdaten konnten nicht kontinuierlich aufgezeichnet werden, sondern wurden am Display abgelesen. Zur Position der Messstellen siehe auch Seite 14 Figur 11.

Auf der Lastkurve in Fig. 25 sind der Leistungsverlauf der Brennstoffzelle und der USV beim 2 x 20 min.-Test dargestellt. Unter Antennenlast wird in der Startphase der BZ und der Ladephase der Scaps eine Leistung von 3.6 kW am Ausgang der USV gemessen. Die Scaps werden mit einer Leistung von maximal 1 kW geladen. Nach der Aufladung sinkt die Leistung auf 2.6 kW ab und ist während dem Betrieb der BZ konstant.

Nach Ausschaltung der BZ bleibt diese Leistung von 2.6 kW noch für ca. 1 - 3 Minuten erhalten, um dann auf die eigentliche Antennenlast von 2.4 kW zu sinken. Dies ist durch den Nachlauf von Rückkühler und Pumpe zu erklären.

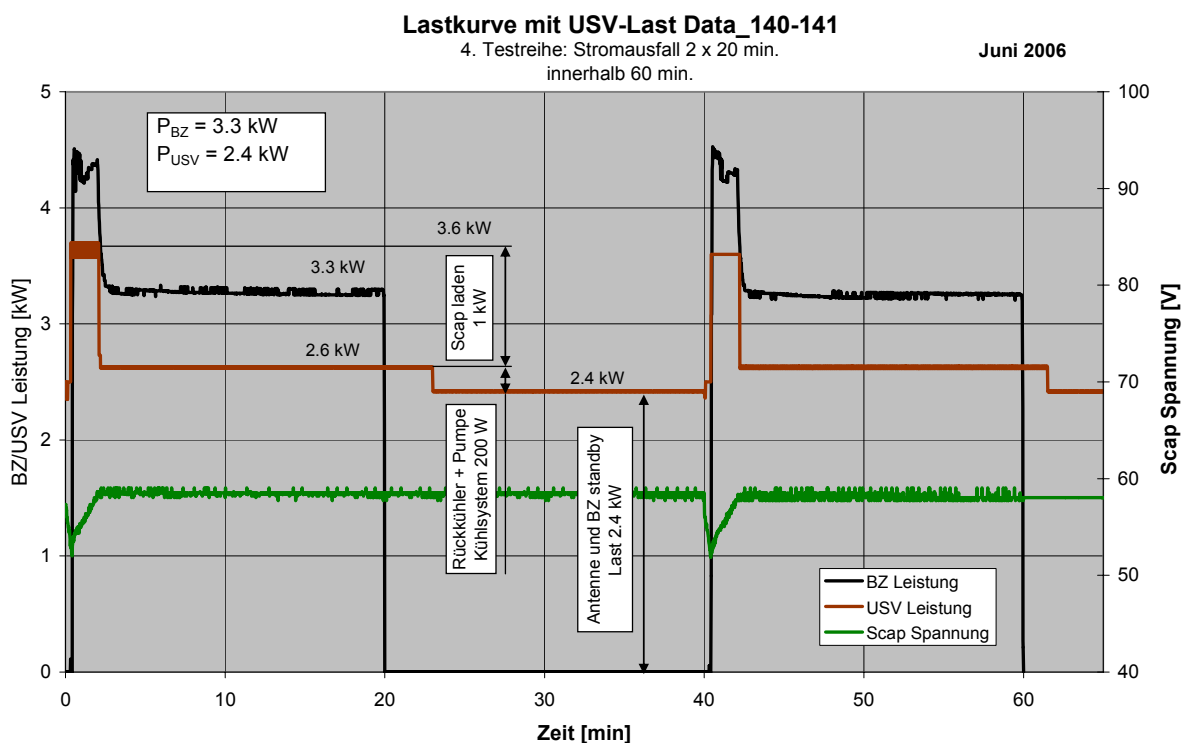


Fig. 25: Lastkurve mit Leistungsverlauf am Ausgang der USV

In der ‚Brutto‘-Leistung der BZ von 3.3 kW sind enthalten:

- Antennenlast 2.4 kW
- Interne Verbraucher BZ-System
- Verluste durch Wirkungsgrad von DC/DC-Wandler und USV

Auf der Basis dieser Messungen errechnen sich folgende Wirkungsgrade:

- Wirkungsgrad des BZ-Systems inklusive interner Verbrauch  
 $\eta_{\text{Stack}} = 48 \% \pm 4 \%$  (basierend auf 15 Messungen)
- Wirkungsgrad des Gesamtsystems  
 $\eta_{\text{gesamt}} = 37 \% \pm 0.2 \%$  (basierend auf 2 Messungen)

Messunsicherheiten ergeben sich durch mögliche Messfehler bei der Druckmessung aufgrund von EMV-Störungen. Bei der Fortsetzung der Feldversuche soll diese Messanordnung noch optimiert werden.

### 3.3 Betriebserfahrungen

#### Betriebsstörungen

Um die Zuverlässigkeit der Anlage beurteilen zu können, muss das Gesamtsystem betrachtet werden. Fehler und Störungen können sowohl im BZ-System selbst auftreten, aber auch bei den Peripheriekomponenten Kühlung, DC/DC-Wandler, Steuerung, Kommunikation, Mess- und Sicherheitseinrichtungen oder bei der Wasserstoff-Installation.

##### *BZ-Störungen:*

Während der Startphase der Test-Periode gab es noch einige kleinere Störungen im BZ-System, die jedoch relativ schnell korrigiert werden konnten. Folgende Fehler sind aufgetreten und konnten unmittelbar behoben werden:

1. Sicherheitsschalter für Kontrolle Wasserhaushalt defekt (Januar 2006)
2. Signalstörung durch Wackelkontakt an Kühlleitung (Januar 2006)
3. Signalstörung an Wasserstoff-Rezirkulations-Pumpe (März 2006)

Störung Nr. 4 ist nur einmal unter Volllast von 8.6 kW aufgetreten:

4. Luftbefeuchter ‚klemmt‘ (Juli 2006)

Nach einem E-Stop ist die BZ anschliessend wieder problemlos gestartet. Dieser Punkt ist dem Hersteller bekannt. Tritt er erneut auf, muss das Bauteil ersetzt werden.

##### *Peripherie Wasserstoff:*

Zwei Reparaturen wurden an der aussenseitigen Wasserstoff-Umschaltstation durchgeführt:

1. Austausch Ventilkegel (Nov. 2005)  
Dies war eine Garantie-Leistung des Herstellers.
2. Undichtigkeit an Umschaltstation (April 2006)  
Eine undichte Stelle wurde durch Druckverlust in der Wasserstoffflasche bemerkt und konnte an der Verschraubung der Drucktransmitter lokalisiert werden. Die Transmitter mussten ausgebaut und im Werk überarbeitet werden.  
Es ist zu vermuten, dass die undichte Stelle durch wetterbedingte Temperaturdifferenzen (Winter – Sommer) aufgetreten ist.

#### Zuverlässigkeit

In der Feldtestperiode sind folgende Anzahl Tests durchgeführt worden:

- 101 BZ-Starts → 101 Mal erfolgreiche Lastübernahme, davon
- 88 Tests mit Antennenlast
- 13 Tests mit externer Last.

Zwei Mal ereigneten sich Stromausfälle, die nicht im Rahmen des Feldversuchs geplant waren und bei denen die Last auch problemlos von der BZ übernommen wurde:

1. Stromausfall wegen EDV-Umstellung am 11.3.2006 für 1 h 40.
2. Stromausfall wegen Unwetter am 5.7.2006 für 1 h.

Insgesamt zeigte die Brennstoffzelle selbst eine 100%-ige Start-Zuverlässigkeit.

#### Unterhalts- und Betriebskosten

Unter den aktuellen Voraussetzungen bewegen sich die Investitions- und Unterhaltskosten einer USV mit BZ noch deutlich über dem Niveau von denen einer USV mit Batterie.

Ziel der Forschenden, sowie Wunsch und Notwendigkeit der Industrie ist eine Annäherung der Kosten der beiden Systeme.

#### 4. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Um das Projekt zu starten und die Forschungsziele erreichen zu können, war ein gutes Zusammenspiel zwischen Hersteller, Forschung und Anwender unerlässlich. Mit den Firmen Swisscom Mobile AG als Anwender und APC Industrial Systems als Hersteller und Marktleader im Bereich von USV-Anlagen hatte die HTA Luzern starke Partner gefunden.

Beteiligung der einzelnen Partner:

*APC Industrial Systems:*

- Bereitstellung von BZ, DC/DC-Wandler und USV-Anlage für den Labortest
- Zusammenarbeit mit der Entwicklungsabteilung in Kolding, Dänemark und dem Vertrieb in Wettingen, Schweiz

*HTA Luzern:*

- Engineering, Auslegung Superkapazitäten, Zusammenbau und Durchführung Feldtest
- Interne Zusammenarbeit des Instituts IPE – Institut für Produktentwicklung - und dem Kompetenzzentrum CC IIEE – Integrale, intelligente und effiziente Energiesysteme

*Swisscom Mobile AG:*

- Unterstützung bei der Festlegung von Spezifikationen und Testanforderungen
- Bereitstellung des Standorts HOTE an der HTA Luzern für den Feldtest
- Kontrollcenter Olten: wurde bei allen Tests durch HTA Luzern informiert

*Bundesamt für Energie BFE:*

- Unterstützt einen Teil des Projekts
- Pflege eines regelmässigen Informationsaustauschs über BFE-Begleitgruppe

Das Schaubild in Fig. 26 zeigt die Struktur der Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Partnern.

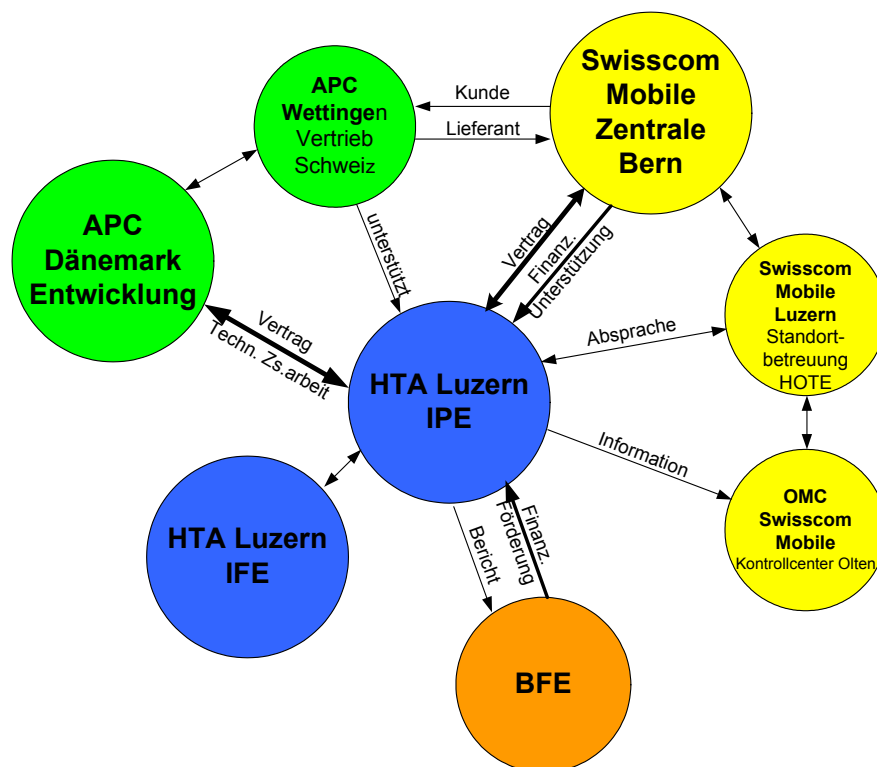


Fig. 26: Zusammenarbeit der beteiligten Partner

#### 4. Bewertung und Ausblick

Die Projektziele Entwicklung eines Prototypen USV mit BZ-System sowie Installation und Inbetriebsetzung an einem realen Antennenstandort wurden erreicht. Mit der erfolgreichen Durchführung eines Feldtests mit monatlichen Stromausfallsimulationen konnten die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Anlage eindeutig nachgewiesen werden.

Durch das hohe Spannungsniveau am Batterieausgang der USV war eine relativ komplizierte Systemarchitektur erforderlich, jedoch ist das Konzept prinzipiell geeignet für eine marktreife Anwendung.

Es bleibt die Frage, wie eine USV-Anlage mit BZ-System zu wettbewerbsfähigen Preisen auf dem Markt etabliert werden kann. Doch steigende Energieanforderungen im Telekommunikationsbereich durch neue Techniken, die zunehmende Wichtigkeit der Datensicherung und das vermehrte Auftreten unwetterbedingter Netzstörungen begünstigen die Chancen eines Markteinstiegs für USV-Anlagen mit Brennstoffzellen. Zumal die BZ auch als Alternative zu Dieselgeneratoren eingesetzt werden können und damit deutlich zu einer Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen.

Diese politisch günstige Position für BZ gilt es zu nutzen. Es fehlen jedoch immer noch Langzeiterfahrungen zum Betrieb von BZ, sowie die Beeinflussung der Lebensdauer durch Standzeiten und Anzahl der Startvorgänge.

In einem Folgeprojekt soll nun der Feldversuch für zwei weitere Jahre fortgesetzt werden, um Erkenntnisse zum Langzeitverhalten zu gewinnen.

#### 5. Referenzen/Literaturquellen

- [1] K. Ledjeff: Brennstoffzellen, 2. Auflage, C.F. Müller Verlag, S.34
- [2] V. Härri, S. Egger, P. Erni, P. Schweizer: „Anwendungspotential von Superkapazitätspeichern SAM“, Schlussbericht PSEL-154 (PSEL: Projekt und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft), Juli 2000
- [3] V. Härri, S. Egger, S. Eigen: „Industrietauglicher Superkapazitätspeicher SAM“, Schlussbericht Dezember 2002, KTI Projekt 4504.1 FHS, Januar 2003
- [4] V. Härri, D. Carriero, P. Collins: „Kleinbus TOHYCO-Rider mit SAM Superkapazitätspeicher“, Forschungsbericht über TR-Bus für den Energiefonds der Stadt Luzern, Mai 2006, HTA Luzern
- [5] Fa. Schaefer: Datenblatt C4786V-120, März 2005