



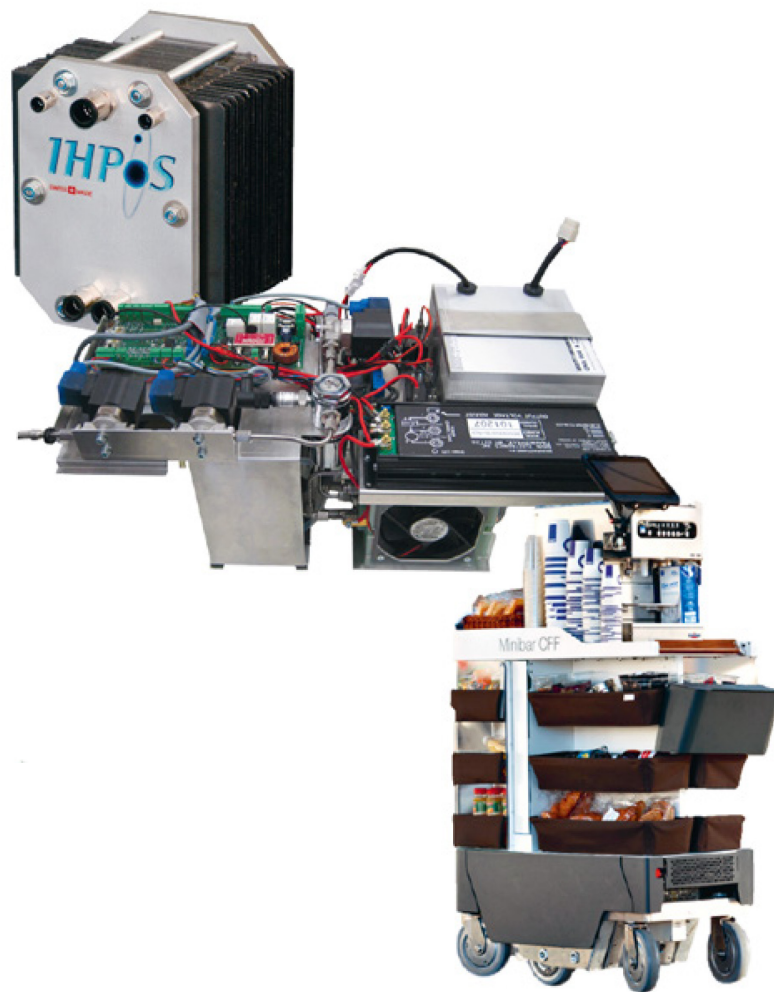
**Schlussbericht** vom 18.04.2016

---

## IHPoS SBB Minibar

### Brennstoffzellensystem zur mobilen Stromversorgung im Praxistest

---





Berner Fachhochschule  
Haute école spécialisée bernoise  
Bern University of Applied Sciences



Ein Unternehmen der SBB AG.

**Datum:** 24.03.2016

**Ort:** Wattwil

**Auftraggeberin:**

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

**Auftragnehmer/in:**

CEKAtec AG  
Industriestrasse 2  
CH-9630/Wattwil  
[www.ceka.ch](http://www.ceka.ch)

BFH-TI, Institut für Energietechnik  
Quellgasse 21  
CH-2501/Biel  
[www.bfh.ch](http://www.bfh.ch)

elvetino AG  
Limmatstrasse 23  
CH-8005/Zürich  
[www.elvetino.ch](http://www.elvetino.ch)

**Autor:**

Marco Santis, CEKAtec AG, [marco.santis@ceka.ch](mailto:marco.santis@ceka.ch)

**BFE-Bereichsleitung:** Josef Känzig, [josef.kaenzig@bfe.admin.ch](mailto:josef.kaenzig@bfe.admin.ch)  
**BFE-Programmleitung:** Stefan Oberholzer, [stefan.oberholzer@bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/501012-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor 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](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

Die CEKAtec hat in enger Zusammenarbeit mit der BFH-TI Biel ein Brennstoffzellensystem entwickelt, welches mit einer Betriebsspannung von 230VAC eine elektrische Leistung von 1.5 kW bereitstellen kann. Der Wasserstoff wird in Metallhydridspeicher mitgeführt. Das Energiesystem wurde in Kooperation mit der Firma Elvetino in SBB Minibars integriert und über eine Dauer von 20 Monate auf den SBB Zügen eingesetzt. Die für den Betrieb notwendige Wasserstoffinfrastruktur und Logistik wurde realisiert. Eine halbautomatische Füllanlage für Metallhydridspeicher wurde für diesen Zweck aufgebaut und verwendet. Durch die gewonnenen Erkenntnisse konnten Verbesserungen und Systemmodifikationen gezielt umgesetzt werden und somit die Ausreifung der Technologie für den täglichen Einsatz erreicht werden. Die Sicherheit der Wasserstofftechnologie konnte im täglichen Einsatz im öffentlichen Raum unter sehr anspruchsvollen Bedingungen nachgewiesen werden.

## Abstract

The CEKAtec has developed in close collaboration with the BFH-TI Biel a fuel cell system capable of providing an electrical output of 1.5 kW with an operating voltage of 230VAC. The hydrogen is stored in canisters as a metal hydride. The energy system has been integrated in cooperation with the Elvetino in SBB minibars and used over a period of 20 months on the SBB trains. The required hydrogen infrastructure and logistic was realized. A semi-automatic refilling station for metal hydride canisters was built and utilized. The insights gained allowed for a specific implementation of improvements and system modifications, resulting in the maturation of the technology for its daily use. The safety of hydrogen technology could be proven in daily use in public places under very demanding conditions.



## Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Zusammenfassung.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Abstract 3</b>  |           |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>1. Ausgangslage .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>2. Ziel der Arbeit .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>3. Grundlagen - Randbedingungen .....</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1. Einsatzbedingungen .....  | 9         |
| 3.2. Bewilligungen .....   | 9         |
| 3.3. Lastprofil.....   | 10        |
| <b>4. Betriebskonzept - Anlagenbeschrieb .....</b>   | <b>11</b> |
| 4.1. Minibar .....   | 12        |
| 4.1.1. Energiesystem – Brennstoffzellensystem .....  | 13        |
| 4.1.2. Energiespeicher – Metallhydridspeicher .....  | 13        |
| 4.2. Parkplatz und Lager Minibar .....   | 13        |
| 4.3. Infrastruktur Wasserstoff .....   | 13        |
| 4.3.1. Füllanlage.....   | 13        |
| 4.3.2. Lager MH-Speicher .....   | 15        |
| 4.3.3. Schlepperfahrzeuge .....  | 15        |
| 4.3.4. Halterung im Zug .....  | 15        |
| 4.4. Logistik Wasserstoff.....   | 16        |
| 4.4.1. Wiederbefüllung der MH-Speicher .....   | 16        |
| 4.4.2. Transport von MH-Speicher auf der Strasse .....   | 16        |
| 4.4.3. Transport von MH-Speicher auf dem SBB-Gelände .....   | 16        |
| 4.4.4. Transport von MH-Speicher im Zug.....   | 16        |
| <b>5. Vorgehen / Methode.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>6. Ergebnisse / Erkenntnisse .....</b>  | <b>17</b> |
| 6.1. Betriebserfahrung mit dem IHPoS Brennstoffzellensystem.....   | 17        |
| 6.2. Ausreifung der Technologie für den täglichen Einsatz .....  | 24        |
| 6.2.1. Ausfallursache Fehlbedienung – Gegenmassnahme User Interphase .....                                     | 24        |
| 6.2.2. Ausfallursache geringe Stackleistung 1 – Gegenmassnahme Anzahl On/Off Zyklen .....                      | 25        |
| 6.2.3. Ausfallursache geringe Stackleistung 2 – Gegenmassnahme Spülstrategie mit sauerstoffverarmter Luft..... | 26        |
| 6.2.4. Ausfallursache geringe Stackleistung 3 – Gegenmassnahme Purgestrategie Luftpumpenstopp .....            | 27        |
| 6.2.5. Einflüsse der Umgebungstemperatur .....   | 27        |
| 6.2.6. Elektronik Optimierungen.....   | 30        |
| 6.2.7. Peripherie Optimierungen .....  | 30        |



|     |  |    |
|-----|--|----|
| 7.  | Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse ..... | 31 |
| 8.  | Schlussfolgerungen .....                                   | 33 |
| 9.  | Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss .....     | 33 |
| 10. | Anhang.....  | 35 |



## Abkürzungsverzeichnis

|       |   |
|-------|---|
| A     | Anforderung                                 |
| ASTRA | Bundesamt für Strassen                      |
| BAV   | Bundesamt für Verkehr                       |
| BE    | Bern  |
| BoP   | Balance of Plant / Systemperipherie         |
| CC    | Constant Current / Konstant-Strom-Modus     |
| CV    | Constant Voltage / Konstant-Spannungs-Modus |
| EB    | Einsatzbedingung                            |
| FC    | Fuel Cell / Brennstoffzelle                 |
| HB    | Hauptbahnhof                                |
| IHPoS | Independent Hydrogen Power System           |
| LU    | Luzern                                      |
| MH    | Metallhydrid                                |
| MMI   | Man Machine Interface / Bedienpanel         |
| RA    | Risikoanalyse                               |
| ZH    | Zürich                                      |



# 1. Ausgangslage

Um das Produktangebot bei den mobilen SBB Minibars erweitern zu können, müssen leistungsfähigere Kaffeemaschinen eingesetzt werden. Die CEKAtec hat in enger Zusammenarbeit mit der BFH-TI Biel ein Brennstoffzellensystem entwickelt, welches mit einer Betriebsspannung von 230VAC eine elektrische Leistung von 1.5 kW bereitstellen kann. Hierfür werden ein Brennstoffzellensystem mit einer maximalen Dauerleistung von 500 W und ein elektrischer Zwischenspeicher verwendet.

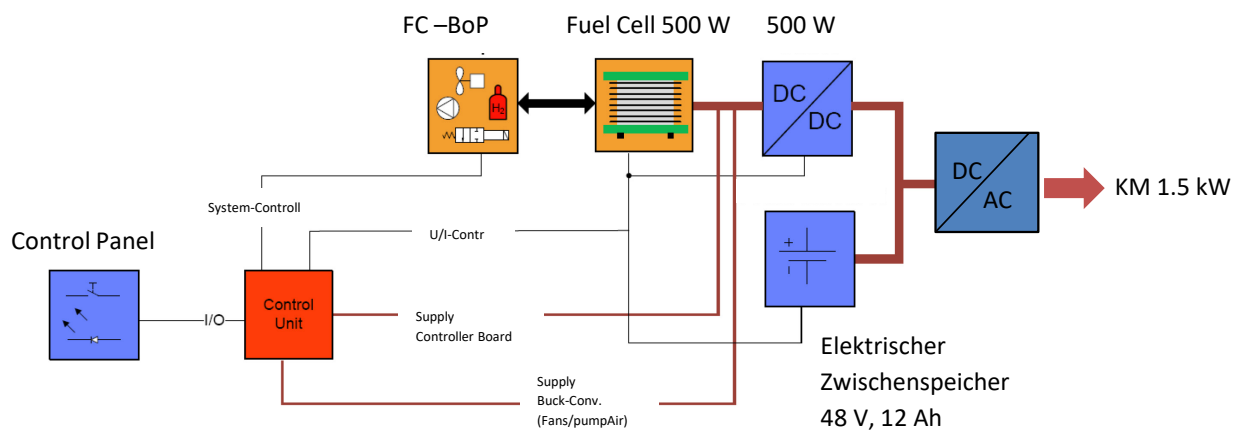


Abbildung 1. Schema des Brennstoffzellensystems für die SBB Minibar

Der Wasserstoff wird in MH-Speichern mitgeführt, welche von der Firma MaHyTec entwickelt worden sind und vom Servicepersonal über eine Schnellkupplung auf dem Zug gewechselt werden könnten. Die Speicher werden in einer stationären Füllanlage, welche von der Firma PanGas entwickelt wurde, wieder befüllt.

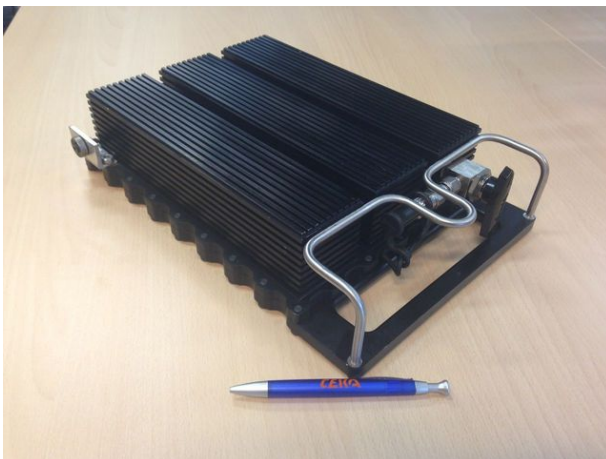


Abbildung 2. Metallhydridspeicher des Brennstoffzellensystems

Das System wurde im Rahmen eines Vorprojekts in 3 Prototypen der SBB Minibars integriert und erfolgreich auf den Zügen getestet. Die Zertifizierung des Systems durch den TÜV-Süd wurde vor Anfang des P&D Projekts abgeschlossen.



Abbildung 3. SBB Minibar mit integriertem MH-Speicher.

Das P&D Projekt sieht in einem breit angelegten Feldtest mit 60 SBB Minibars vor, während 2 Jahre Praxiserfahrungen mit den IHPoS-Systemen zu sammeln.

## 2. Ziel der Arbeit

Im Rahmen des Pilot und Demonstrationsprojekts sollen über eine Dauer von 2 Jahren Daten und Praxiserfahrungen im täglichen Gebrauch des IHPoS Brennstoffzellensystems in Minibars der SBB gesammelt und ausgewertet werden. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollen laufend notwendige Systemmodifikationen und Verbesserungen identifiziert und umgesetzt werden. Das Ziel dabei ist die Produktreife und Praxistauglichkeit des Brennstoffzellensystems im realen Einsatz gemäss den geplanten Einsatzbedingungen zu erreichen.





## 3. Grundlagen - Randbedingungen

### 3.1. Einsatzbedingungen

Die geplanten Einsatzbedingungen (EB) der Systeme bzw. Minibars sind:

Tabelle 1. Liste der geplanten Einsatzbedingungen

| <i>Nr.</i> | <i>Beschreibung</i>   |
|------------|---|
| EB1        | Nutzung ohne Einschränkung auf allen Netzen der Schweiz             |
| EB2        | Nutzung ausschliesslich im Zug                                      |
| EB3        | Gestaffelte Einführung von 30 + 30 Systeme bzw. Minibars            |
| EB4        | Umgebungstemperatur gemäss Standard in Personenzügen: ca. 20°C      |
| EB5        | Luftqualität gemäss Standard in Personenzügen: gefiltert, staubfrei |
| EB6        | Lagerung der Minibars im Zug  |
| EB7        | Verfügbarkeit von Zusatzspeichern und Tausch im Zug                 |
| EB8        | Ausladen der Minibars nur für Wartungs- oder Reparaturzwecken       |

Die typische Einsatzdauer einer Minibar beträgt 12 bis 14 Stunden pro Tag. Für die Speicherung und den Transport der für einen vollen Arbeitstag benötigten Energie werden Metallhydridspeicher verwendet. Um den Energiebedarf einer Minibar über einen ganzen Arbeitstages abzudecken ist es notwendig Zusatzspeicher im Zug zu transportieren. Die Speicher werden in speziell gebauten Halterungen transportiert. Die Befüllung der Metallhydridspeicher wird zentral an einer eigens dafür gebauten Füllstation stattfinden. Diese soll auf dem Gelände der Elvetino in der Stadt Zürich installiert werden.

Der Roll Out (Einführung) und somit Beginn der Erprobungsphase war auf den 1.10.2013 geplant. Insgesamt sollten 60 Minibars mit IHPoS Brennstoffzellensystemen ausgerüstet und eingeführt werden. Die Materialbeschaffung, Vorbereitungen, Produktion und Einführung der Systeme sollte dabei in zwei Stufen zu je 30 Einheiten erfolgen.

### 3.2. Bewilligungen

Die gesetzlichen und sicherheitstechnischen Anforderungen für den Betrieb einer Minibar mit Brennstoffzellen, Wasserstoff und Metallhydridspeicher in Personenzügen wurden im Rahmen von Vorprojekten (KTI Projekt Nr. 9376.2 PFIW-IW ; Industrieprojekt „Railbar IHPoS-E 4123“) mit den zuständigen Behörden (Bundesamt für Verkehr BAV, Amt für Strassen ASTRA, Feuerpolizei und Arbeitsinspektorat der Stadt Zürich) und der für den Betrieb der Minibar verantwortlichen Partei, der SBB, evaluiert und definiert. Definiert wurden die Anforderungen A gemäss Tabelle 2, dass:



Tabelle 2. Liste der definierten Anforderungen

| Nr. | Beschreibung  | Quelle |
|-----|---|--------|
| A1  | Die Brennstoffzellen-Minibar ist gemäss der heutigen Gesetzeslage als nicht Teil vom Rollmaterial zu bewerten und ist entsprechend keinen Bahnnormen unterstellt. | SBB    |
| A2  | Das Brennstoffzellensystem ist gemäss der Norm EN 62282-5-1 „Portable Brennstoffzellen-Energiesysteme – Sicherheit“ zu zertifizieren.                             | SBB    |
| A3  | Die Metallhydridspeicher sind gemäss der ISO 16111 „Ortsbewegliche Gasspeichereinrichtungen - in umkehrbaren Metallhydriden gespeicherter Wasserstoff“ zu prüfen  | Gesetz |
| A4  | Der Transport von Metallhydridspeicher auf der Strasse ist vom ASTRA zu bewilligen.   | Gesetz |
| A5  | Der Transport von Metallhydridspeicher in Personenzügen ist vom BAV zu bewilligen   | Gesetz |
| A6  | Die Installation und Inbetriebnahme der Wasserstoff-Füllstation sind durch die Feuerpolizei und das Arbeitsinspektorat der Stadt Zürich zu bewilligen.            | Gesetz |

### 3.3. Lastprofil

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurde definiert, dass das Brennstoffzellensystem eine maximale Leistung von 1'000 Watt für eine Dauer von min. 1h gewährleisten muss. Diese Leistung soll jeweils am Morgen, Mittag und am Abend gewährleistet sein. Siehe hierfür Abbildung 4. Für die Zeit dazwischen ist man von einer mittleren bis kleineren Auslastung ausgegangen.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderung wie auch aus Platz- und Kostengründen hat man entschieden ein Hybridsystem zu entwickeln welches über einen Zwischenspeicher (Akku) zum Auffangen von Spitzenleistungen und eine Brennstoffzelle welche den Zwischenspeicher kontinuierlich nachlädt verfügt. Zusammenfassend wurde ein Zwischenspeicher mit einer Kapazität von 600 Wh und die Brennstoffzelle mit einer kontinuierlichen Leistung von 500 Watt ausgewählt: während der ersten Stunde liefern somit der Akku 600 W und die Brennstoffzelle 500 Watt = 1'100 Watt für eine Stunde.

Nach der ersten Betriebsstunde unter Volllast muss man also davon ausgehen, dass das Energiesystem keine Leistung über 500 Watt länger abdecken kann und dass der der Zwischenspeicher zu einem gewissen Grad aufgeladen werden muss.

Der Energiespeicher für die Brennstoffzelle, ein Metallhydridspeicher, wurde mit einer Kapazität von 75-80 g Wasserstoff bzw. einer elektrischen Energie von 1'300 – 1'400 Wh<sub>el</sub> dimensioniert. Je nach Lastprofil kann ein solcher MH-Speicher die Brennstoffzelle für mindestens 2h mit Wasserstoff versorgen. Um eine lückenlose Versorgung mit Energie bzw. Wasserstoff zu garantieren muss dafür gesorgt werden, dass ein Wechsel des MH-Speichers mindestens alle 2h erfolgen kann. Dafür müssen Ersatz-MH-Speicher im Zug mitgeführt werden.

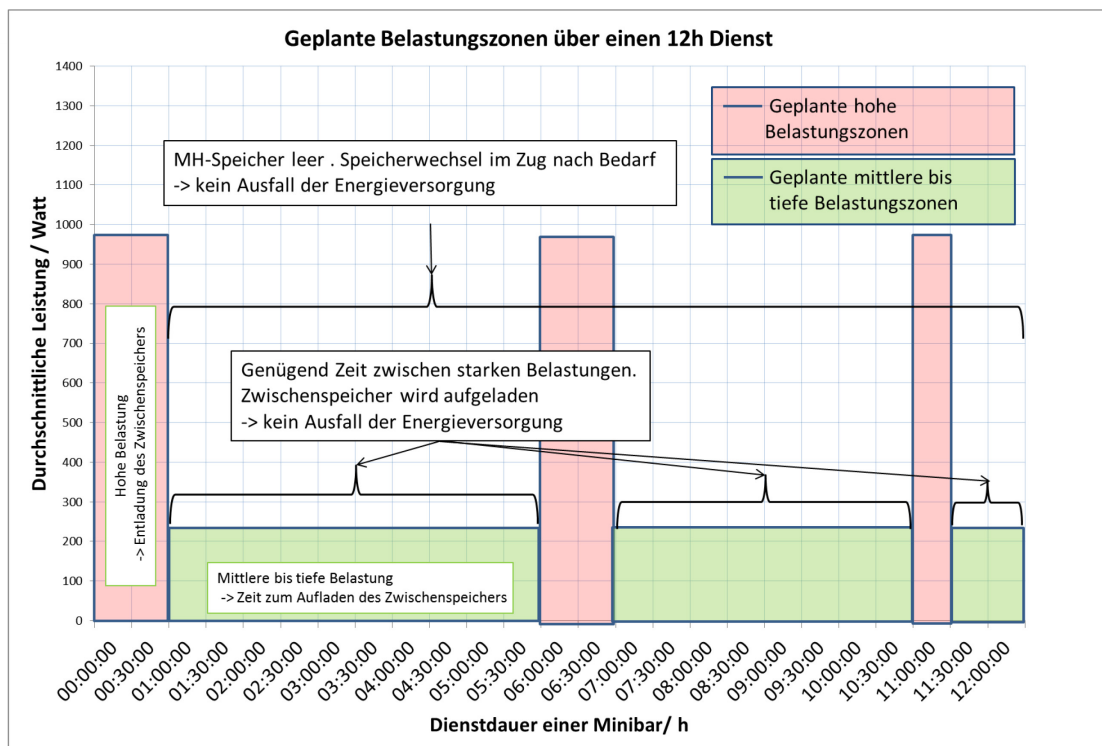


Abbildung 4. Angenommenes durchschnittliches Belastungsprofil für eine Minibar über einen 12h Dienst.

Voraussetzung für den Erfolg dieser Strategie ist ebenfalls, dass der Zwischenspeicher am Anfang des Arbeitstages die volle Kapazität besitzt. D.h., dass am Vortag die Brennstoffzelle vor dem Abstellen genügend Zeit hat um den Zwischenspeicher aufzuladen.

## 4. Betriebskonzept - Anlagenbeschreibung

Um den Betrieb der Elvetino / SBB-Minibar auf Basis der Brennstoffzellentechnologie zu realisieren benötigt man verschiedene Komponenten, Anlagen und Mitarbeiter welche gemäss einem gemeinsamen Betriebskonzept zusammenarbeiten. Siehe dazu die nachfolgende schematische Darstellung in Abbildung 5. Die Legenden geben eine Kurzbeschreibung der betroffenen Anlagen, Komponenten oder Mitarbeitenden.

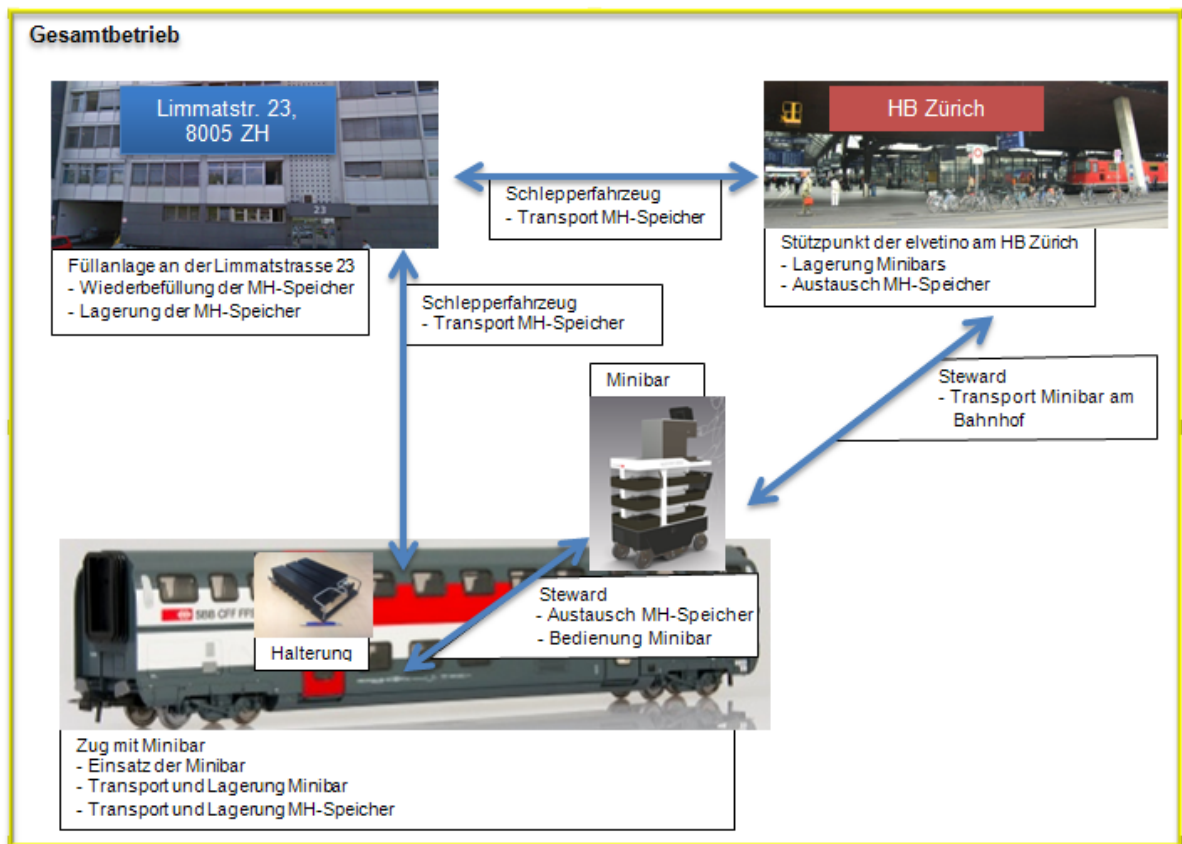


Abbildung 5. Schematische Darstellung der Vorgänge im Betrieb der Elvetino Minibar mit Brennstoffzellen und MH-Speicher.

Nachfolgend wird eine kurze Beschreibung der einzelnen Komponenten, welche für den Betrieb der Minibar notwendig sind, gegeben:

- Minibar
- Parkplatz und Lager Minibar
- Infrastruktur Wasserstoff
- Logistik Wasserstoff

## 4.1. Minibar

Die Minibar ist ein mobiler Handwagen, welcher speziell für den Einsatz in Zügen der SBB entwickelt wurde. Die Minibar besteht aus einer Struktur (Chassis und Fahrwerk), einer Kaffeemaschine, einem Energiesystem und einem Energiespeicher. Gemäss heutiger Normen- und Gesetzeslage untersteht die Minibar keinen spezifischen Anforderungen. Um den sicheren Betrieb der Minibar in Personenzügen der SBB zu gewährleisten, wurden in Abstimmung mit dem BAV technische Anforderungen an die Minibar definiert. Die Erfüllung der Anforderungen und in Folge davon der Einsatz der Minibars wird durch die SBB überprüft bzw. bewilligt.



#### 4.1.1. Energiesystem – Brennstoffzellensystem

Für die Versorgung der Kaffeemaschine mit elektrischem Strom wurde ein Energiesystem auf Basis von Brennstoffzellentechnologie in der Minibar integriert. Das Brennstoffzellensystem ist ein Energiewandler: es wandelt die chemische Energie einer Substanz elektrochemisch direkt in elektrische und thermische Energie um. Nebenprodukt dieser Reaktion ist reines Wasser. Bei der Substanz zur Speicherung und Transport der chemischen Energie in der Minibar handelt es sich um Wasserstoff. Der Wasserstoff wird in einem speziellen Behälter gespeichert und transportiert.

#### 4.1.2. Energiespeicher – Metallhydridspeicher

Beim Energiespeicher der Minibar handelt es sich um einen austauschbaren und wiederbefüllbaren Behälter. Der Behälter ist ein Metallhydridspeicher, kurz MH-Speicher. Der MH-Speicher besteht aus einem Gehäuse (Verpackung), in dessen Innerem eine Metalllegierung enthalten ist. In dieser wird der Wasserstoff als Hydrid chemisch gebunden. Beim Anschliessen des MH-Speichers an das Energiesystem fliesst Wasserstoff aus der Legierung in die Brennstoffzelle, wo in der Folge die elektrochemische Reaktion stattfindet. Hierbei entsteht elektrischer Strom, Wärme und Wasser.

### 4.2. Parkplatz und Lager Minibar

Die Minibar kann über Nacht im oder ausserhalb vom Zug an einem definierten und abschliessbaren Ort parkiert bzw. gelagert werden.

### 4.3. Infrastruktur Wasserstoff

Die Infrastruktur für den Betrieb einer Minibar auf Basis von Brennstoffzellentechnologie beinhaltet folgende Anlagen und Komponenten:

- Füllanlage
- Lager MH-Speicher,
- Schlepperfahrzeuge,
- Halterung im Zug.

#### 4.3.1. Füllanlage

Die Füllanlage dient zur Wiederbefüllung der MH-Speicher. Die Füllanlage befindet sich im Hof der Zentrale der Elvetino in ZH in einem feuerfesten Container. Die Anlage wurde durch die Feuerpolizei und das Arbeitsinspektorat der Stadt Zürich bewilligt.





Abbildung 6. Füllanlage im Hof der Elvetino. Die Füllstationen und Gasflaschenbündel befinden sich im inneren des Containers. Die LED-Anzeige gibt die Informationen zum Füllprozess weiter

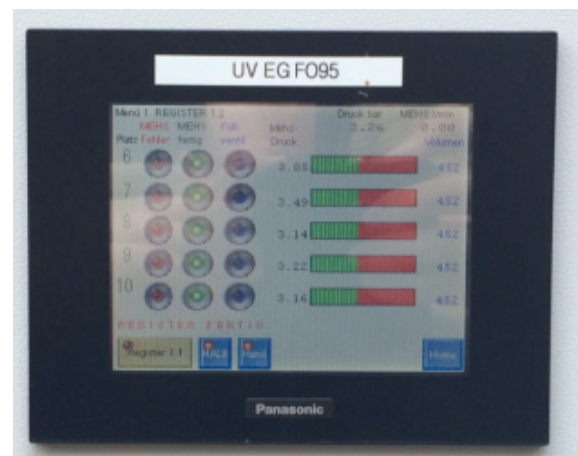


Abbildung 7. Füllstationen mit 2 Register à 10 Positionen. Die LED-Anzeige aussen am Container gibt die Information zum Füllstand bzw. Füllprozess weiter.



Die Befüllung der MH-Speicher erfolgt automatisch. Die Anlage besitzt 2 Register à 10 Positionen, Abbildung 7. Somit können mit der Anlage bis zu 20 MH-Speicher gleichzeitig befüllt werden. Die Füllprozedur dauert ca. 2-3h. Die Anlage überprüft zudem die Dichtheit von jedem Speicher bei jeder Befüllung. Defekte Speicher werden sofort gemeldet und von einem geschulten Mitarbeiter markiert und aus dem Verkehr gezogen. Eine Reparatur wird durch den Hersteller durchgeführt.

Die Anlage wird ebenfalls Fernüberwacht in Bezug auf Störungen, Wasserstoffinhalt, Füllprozess wie auch sicherheitsrelevante Meldungen.

#### 4.3.2. Lager MH-Speicher

Die Lagerung der MH-Speicher befindet sich im Keller vom HB-Zürich statt. Die MH-Speicher werden in einem feuerfesten Schrank gelagert. Die Lagerung wurde von der SBB-Immobilien genehmigt.

#### 4.3.3. Schlepperfahrzeuge

Der Transport von MH-Speicher zwischen der Füllanlage und dem Hauptbahnhof ZH findet mit Hilfe von Schlepperfahrzeugen statt. Die Fahrzeuge verfügen hierfür über eine eigens dafür speziell gebaute Halterung. Siehe Abbildung 8. Die Schlepperfahrzeuge müssen die Gefahrgutvorschriften für den Transport von MH-Speicher auf der Strasse erfüllen.



Abbildung 8. Schlepperfahrzeug mit spezieller Halterung.

#### 4.3.4. Halterung im Zug

Mit einem vollen MH-Speicher kann die Minibar bei einer starken Auslastung der Kaffeemaschine für ca. 2 bis 3 Stunden mit Strom versorgt werden. Um eine ununterbrochene Versorgung der Minibar mit elektrischer Energie über einen ganzen Arbeitstag zu gewährleisten, müssen extra MH-Speicher im Zug mitgeführt werden. Diese werden in speziell für diesen Zweck gebauten Halterungen transportiert. Die Halterung bietet Platz für 2 Zusatzspeicher. Siehe Abbildung 9.

Die Halterungen dürfen nur an einem abschliessbaren Ort (Parkplatz der Minibar) im Zug eingebaut werden. Wagen, in denen eine solche Halterung eingebaut wurde, müssen eine neue Typenzulassung durch das BAV erhalten.

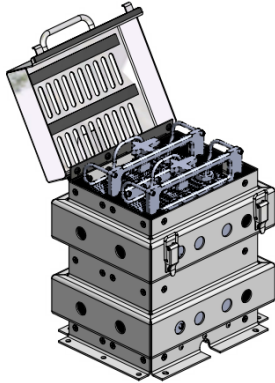


Abbildung 9. Zeichnung der Halterung für 2xMH-Speicher für den Einbau in den Zügen.

## 4.4. Logistik Wasserstoff

Die Logistik des Wasserstoffs beinhaltet folgende Vorgänge:

- Wiederbefüllung der MH-Speicher,
- Transport von MH-Speicher auf der Strasse,
- Transport von extra MH-Speicher im Zug (ausserhalb der Minibar).

### 4.4.1. Wiederbefüllung der MH-Speicher

Die Wiederbefüllung der MH-Speicher findet an der Elvetino Zentrale in Zürich statt. Für diesen Zweck wurde eine Füllanlage entwickelt und installiert.

### 4.4.2. Transport von MH-Speicher auf der Strasse

MH-Speicher werden zwischen der Füllanlage und dem HB Zürich auf der Strasse transportiert. Dabei müssen die Gefahrgutvorschriften eingehalten werden. Für den Transport auf der Strasse werden Schlepperfahrzeuge mit einer speziellen Halterung eingesetzt. Die Bewilligung hierfür wird durch das ASTRA erteilt.

### 4.4.3. Transport von MH-Speicher auf dem SBB-Gelände

Die Schlepperfahrzeuge verkehren auf dem SBB-Gelände (Bahnhof Areal). Die Bewilligung für den Transport von MH-Speichern auf diesem Gelände wird durch die SBB-Immobilien erteilt.

### 4.4.4. Transport von MH-Speicher im Zug

Der Transport von extra MH-Speicher (nicht in der Minibar eingebaut) in Personenzügen der SBB muss durch das BAV zugelassen werden. Für den Transport der extra MH-Speicher werden spezielle Halterungen verwendet, siehe oben. Diese müssen bestimmte Bahn-Normen erfüllen.





Nach der Zulassung für den Transport von Extra MH-Speicher durch das BAV gelten die Extra-MH-Speicher, welche im Speisewagen mitgeführt werden, als integrale Bauteile des Wagens und sind deshalb von den Gefahrgutvorschriften freigestellt.

## 5. Vorgehen / Methode

Das wesentliche Ziel des Projektes ist die Sicherstellung eines 2-jährigen Testbetriebs der IHPoS-SBB Minibars. Hierfür werden die Betriebsdaten der Brennstoffzellensysteme periodisch ausgelesen, statistisch ausgewertet und Massnahmen zur Systemoptimierung daraus abgeleitet. Die Verbesserungsmassnahmen wurden direkt in den laufenden Pilotsystemen umgesetzt. Alle Messdaten wurden zentral auf einem Server gespeichert.

## 6. Ergebnisse / Erkenntnisse

### 6.1. Betriebserfahrung mit dem IHPoS Brennstoffzellensystem

Voraussetzung für die Aufnahme des Betriebs war die Erfüllung der definierten Anforderungen wie im Kapitel 3.2 angegeben. Die Tabelle 3 gibt den Status vor Aufnahme des Betriebs dar.

Tabelle 3. Liste der definierten Anforderungen mit Erfüllungsstatus vor Aufnahme des Betriebs.

| Nr. | Beschreibung  | Erfüllt Ja/Nein.<br>Begründung |
|-----|---|--------------------------------|
| A1  | Die Brennstoffzellen-Minibar ist gemäss der heutigen Gesetzeslage als nicht Teil vom Rollmaterial zu bewerten und ist entsprechend keinen Bahnnormen unterstellt. | NEIN. Siehe Text unten         |
| A2  | Das Brennstoffzellensystem ist gemäss der Norm EN 62282-5-1 „Portable Brennstoffzellen-Energiesysteme – Sicherheit“ zu zertifizieren.                             | JA                             |
| A3  | Die Metallhydridspeicher sind gemäss der ISO 16111 „Ortsbewegliche Gasspeichereinrichtungen - in umkehrbaren Metallhydriden gespeicherter Wasserstoff“ zu prüfen. | JA                             |
| A4  | Der Transport von Metallhydridspeicher auf der Strasse ist vom ASTRA zu bewilligen.   | JA                             |
| A5  | Der Transport von Metallhydridspeicher in Personenzügen ist vom BAV zu bewilligen   | NEIN. Hängt von A1 ab.         |
| A6  | Die Installation und Inbetriebnahme der Wasserstoff-Füllstation sind durch die Feuerpolizei und das Arbeitsinspektorat der Stadt Zürich zu bewilligen.            | JA                             |

Zu A1) 2 Monate vor dem geplanten Roll Out wurde die Anforderung A1) von der SBB neu bewertet. Der Grund für die neue Bewertung der Minibar war, dass die Zuständigkeit über die Minibar von Elvetino zur SBB wechselte. Neu wurde entschieden, dass die Minibar als Teil des Rollmaterials zu bewer-



ten ist, und somit die Konformität mit spezifischen, von der SBB\* definierten Bahnnormen zu prüfen ist. In Absprache mit dem BAV wurden neue Anforderungen gemäss Tabelle 4 definiert.

*\* Dadurch, dass die Minibar keine gesetzlichen Normen oder Anforderungen unterstellt ist, liegt die Pflicht für den Beweis eines sicheren Betriebs beim Betreiber. Entsprechend fällt unter seiner Verantwortung die Anforderungen nach bestem Ermessen zu definieren.*

Das interne SBB Bewilligungsverfahren hat sich als extrem langwierig herausgestellt, wodurch der ursprünglich geplante Roll Out Termin vom 01.10.2013 nicht mehr eingehalten werden konnte.

Tabelle 4. Geänderte und neue Anforderungen für die Aufnahme des Betriebs

| Nr.         | Beschreibung  |
|-------------|---|
| A1 GEÄNDERT | Die Minibar ist als Teil des Rollmaterials gemäss folgender Normen zu bewerten: <ul style="list-style-type: none"><li>- Brandschutznorm DIN 5510 bzw. EN 45545</li><li>- Norm für Umweltbedingungen für Betriebsmittel EN 50125-1</li><li>- UIC 566 Beanspruchung von Reisezugwagen und deren Anbauteilen</li></ul> |
| A7 NEU      | Bei Abweichung von den oberen Normen ist die Unbedenklichkeit dieser Abweichung nachzuweisen, z.G. in Form einer Risikoanalyse  |
| A8 NEU      | Vor der Einführung der Minibar ist ein SBB internes Risikobeurteilungsprozess (K250.1) durchzuführen  |
| A9 NEU      | Erstellung von Risikoanalysen für <ul style="list-style-type: none"><li>- Gesamtbetrieb (Betankung, Handhabung, Transport von Minibars und Metallhydridspeicher ausserhalb vom Zug)</li><li>- Betrieb der Minibar im Zug</li><li>- Transport und Wechsel von Metallhydridspeicher im Zug</li></ul>                  |

Die Abbildung 10 zeigt den Umfang und Abgrenzung der geforderten Risikoanalysen.

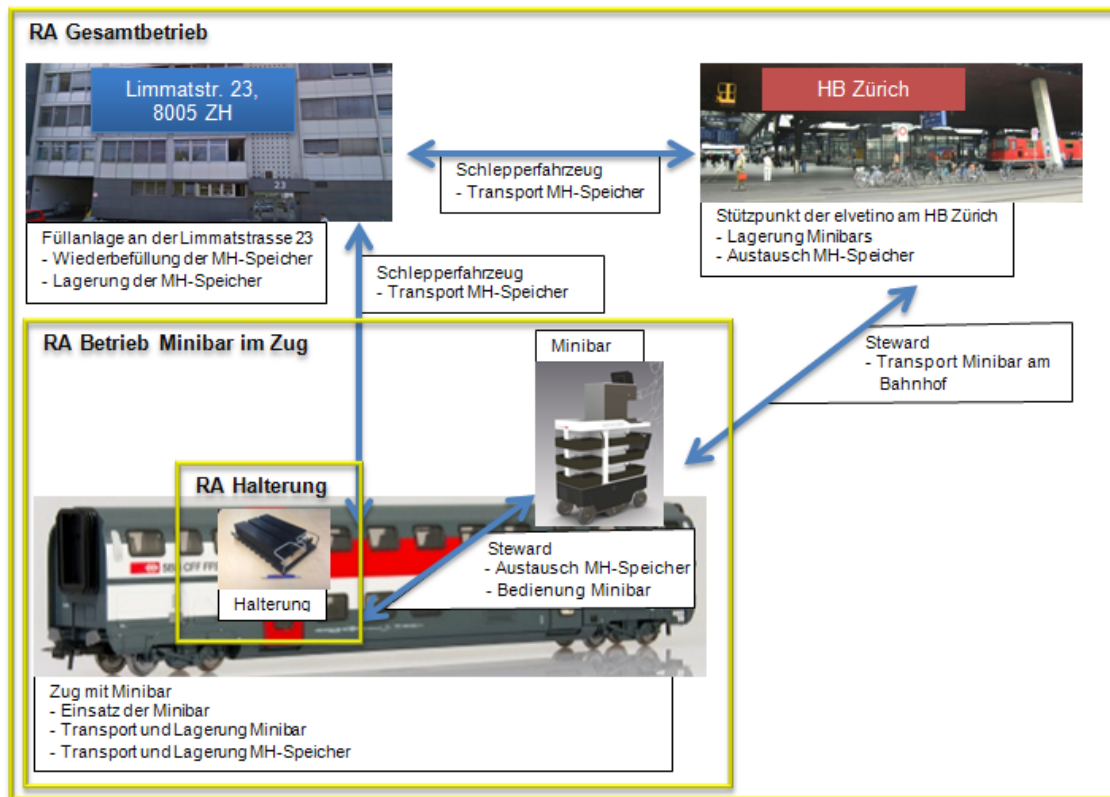


Abbildung 10. Schematische Darstellung der Vorgänge im Betrieb und Abgrenzung der Risikoanalysen RA.

Um eine Einführung der Minibars möglichst zeitnah zu ermöglichen haben die Projektpartner bei der SBB eine Sonderbewilligung beantragt. Diese sah den Einsatz einer limitierten Anzahl an Minibars auf bestimmte Strecke vor. Die Sonderbewilligung wurde auf den 01.04.2014 ohne Frist erteilt. Die Einführung fand nun mit 7 Minibars am 07.4.2014 statt. Der Einsatz von 4 weiteren Minibars erfolgte 2 Monate später. Als Reserve wurden 2 Minibars gebaut. Insgesamt wurden somit 13 Minibars an Elvetino ausgeliefert.

Die von der SBB kurz vor dem Roll Out geänderten Anforderungen führten ebenfalls zu einer Reduktion von Minibars beim Roll Out: von 30 auf 13 Stück.

Die 13 Minibars wurden auf der Strecke mit Sonderbewilligung Zürich-Bern eingesetzt. Vereinfacht dargestellt kann man die Strecke folgendermassen darstellen.

- Aufladen der Minibar am HB Zürich
- Einsatz der Minibar im Zug zwischen Zürich-Bern, Dauer ca. 1h
- Ausladen der Minibar am HB Bern
- Zwischenlagerung der Minibar im Freien auf dem Peron (Achtung, Wintertemperaturen)
- Zwischenpause, Dauer 30 min -> KEIN Speicherwechsel
- Aufladen der Minibar am HB Bern



- 
- Einsatz der Minibar im Zug zwischen Bern-Bern, Dauer ca. 1h
- Ausladen der Minibar am HB Zürich
- Zwischenlagerung der Minibar am Stützpunkt der Elvetino (Keller im HB Zürich)
- Zwischenpause, Dauer 30 min. -> Speicherwechsel

Diese Strecke wurde aus folgenden Gründen ausgewählt, vor und Nachteile werden angegeben, .

Tabelle 5. Vor und Nachteile der Strecke Zürich-Bern mit Sonderbewilligung.

| <b>Vorteil</b>  | <b>Nachteil</b>  |
|---|--|
| „Renner Strecke“ für den Verkauf von Kaffee   | Das Belastungsprofil auf dieser Strecke ist dementsprechend stark, insbesondere am Vormittag. Mehrere starke Belastungszonen kurz hintereinander.  |
|   | Zwischenaufenthalte der Minibar im Freien am HB Bern auf dem Peron. Das Energiesystem wird dabei vermehrt Temperaturen ausserhalb der Toleranzen ausgesetzt -> Unterkühlung des MH-Speichers |
| Der Tausch der Wasserstoffspeicher kann am HB Zürich am Stützpunkt der Elvetino im Keller durchgeführt werden. Kadenz ca. 2.5 h | Dadurch, dass der Transport von MH-Speichern im Zug an die Erfüllung aller neue gestellten Anforderungen gebunden war, konnten in diesen Zügen keine Zusatzspeicher mitgeführt werden        |

Bereits während den ersten Betriebswochen hat sich die Kombination des starken Leistungsprofils mit der fehlenden Möglichkeit einen MH-Speicherwechsel im Zug durchzuführen als sehr problematisch erwiesen. Die Abbildung 11 und Abbildung 12 sollen helfen die Problematik zu illustrieren.

Abbildung 11 zeigt das geplante Belastungsprofil mit der Möglichkeit zum Wechseln eines leeren MH-Speichers im Zug. Unter diesen Bedingungen ist eine lückenlose Energieversorgung reibungslos möglich.

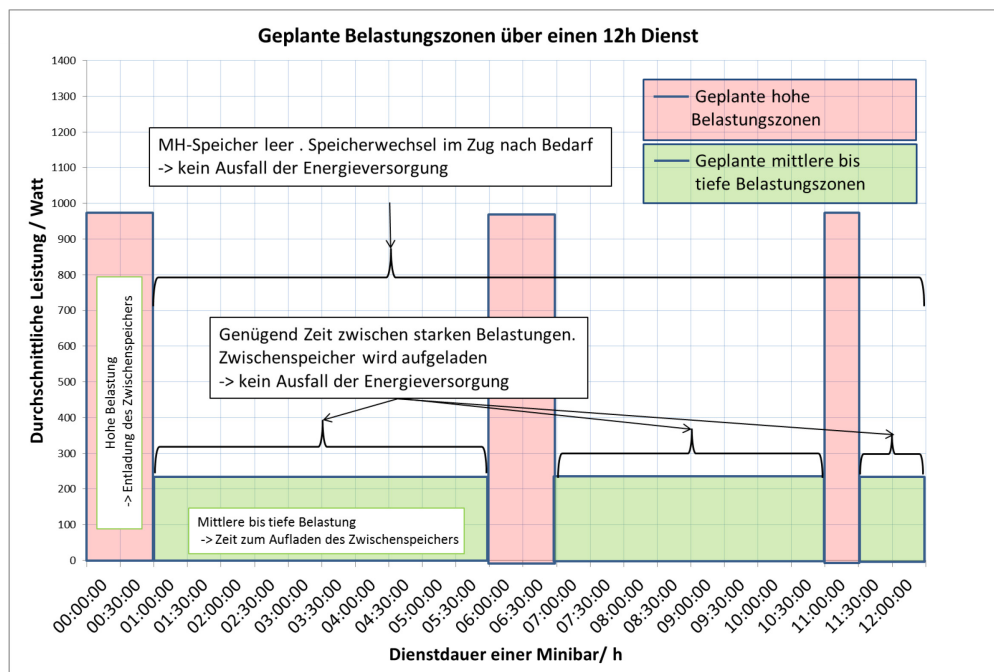


Abbildung 11. Geplante Belastungszonen über einen 12 Stunden Minibardienst mit der Möglichkeit einen Speicherwechsel nach Bedarf im Zug durchzuführen.

Bedingt durch die Einsatzstrecke Zürich-Bern-Zürich ergaben sich jedoch zusätzliche starke Belastungszonen mit nur kurzen Intervallen mittlerer Belastung (Zwischenpausen während Zugwechsel am HB Bern bzw. HB Zürich), siehe hierfür Abbildung 12.

Ein weiterer Faktor welcher nicht eingeplant war, war der Aufenthalt der Minibar während den Zwischenpausen ausserhalb vom Zug am HB Bern auf dem Peron. Bei Umgebungstemperaturen unterhalb 10°C kam es vermehrt zur Ausfälle auf Grund von unterkühlten MH-Speichern.

Die Kombination aus starke Belastungszonen mit nur kurzen Intervallen mittlerer Belastung (Aufladend des Zwischenspeichers), Aufenthalt im Freien und fehlender Möglichkeit im Zug einen MH-Speicherwechsel durchzuführen resultierten wiederholt in einem Ausfall des Minibarservices (Kaffee) während den 2. und 3. starken Belastungszonen.

Ebenfalls ungeplant war die starke Belastungszone am Ende des Minibardienstes. Diese ergab sich auf Grund des Reinigungsprogramms der Kaffeemaschine welches sehr Energieintensiv ist. Die Reinigung wurde jeweils am Ende eines Dienstes durchgeführt, wo dann abschliessend die Minibar mit ausgeschaltetem Energiesystem am Depot abgestellt wurde. Dadurch konnte am darauffolgenden Tag ein voller Zwischenspeicher nicht immer gewährleistet werden. Dies führte dazu, dass auch während der ersten Belastungszone sporadische Energieausfälle stattgefunden haben.

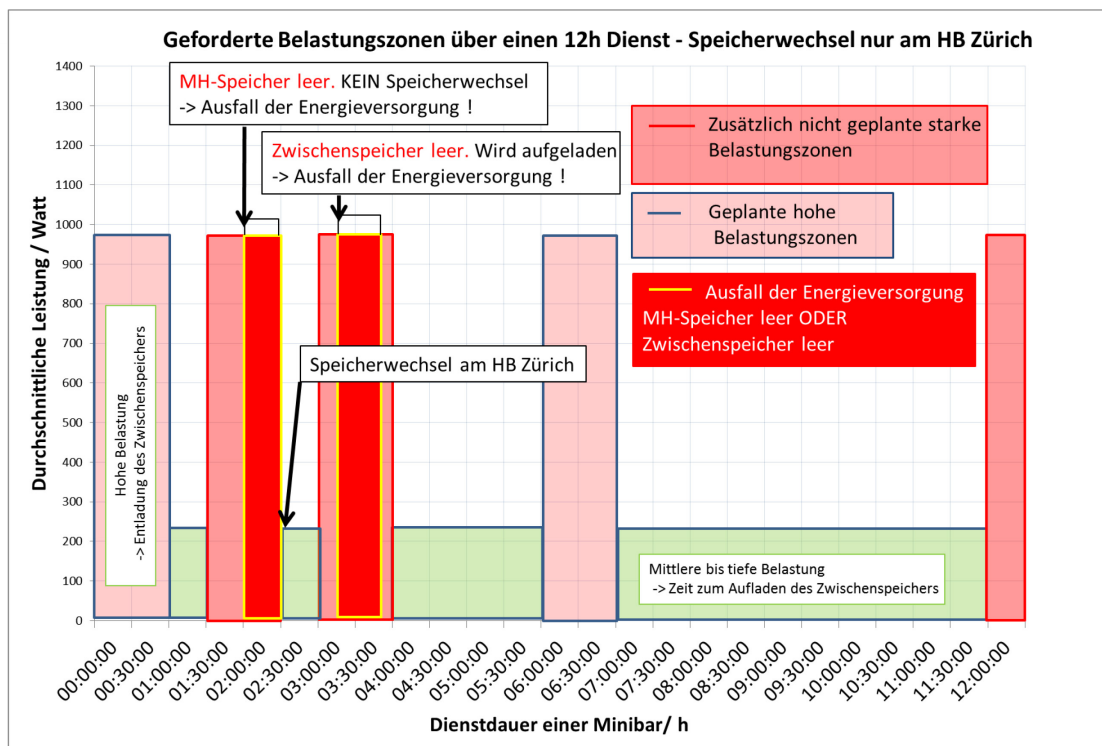


Abbildung 12. Geforderte Belastungszonen auf der Einsatzstrecke Zürich-Bern. Ein Speicherwechsel ist nur am HB Zürich möglich.

Die oben beschriebene Problematik hat hohe technische und logistische Auswirkungen gehabt, siehe hierfür die Tabelle 6.

Nach Umsetzung von technischen Systemverbesserungen und zusätzliche Logistische Arbeiten konnte der Betrieb auf der Strecke Zürich-Bern verbessert werden. Die oben beschriebenen Energieausfälle konnten zwar reduziert werden, jedoch nicht komplett eliminiert werden. Aus dem Grund wurde nach 10 Monate entschieden, die Minibars auf einer Ersatzstrecke mit einer kleineren Belastung einzusetzen. Die Minibars wurden neu auf der Strecke Zürich-Luzern 10 weitere Monate eingesetzt. Die wesentlichen Unterschiede zur Strecke Zürich-Bern sind:

- das Belastungsprofil dieser Strecke entspricht Abbildung 11.
- die Minibar wird am Wendepunkt nicht aus dem Zug genommen (in Luzern findet kein Zugwechsel statt, der Zug wendet).

Bewertung: nach dem Streckenwechsel und Umsetzung der Systemupdates konnte der Betrieb regelmässig und praktisch ohne Ausfälle durchgeführt werden. Die logistischen und technischen Massnahmen haben sich bewährt. Die Massnahmen kann als Erfolgreich bewertet werden.

Von den geplanten 24 Monaten Betriebserfahrung mit insgesamt 60 Minibars (1. Tranche á 30 Stück und 2. Tranche á 30 Stück im 2. Projektjahr) konnten 20 Monate mit 13 Minibars umgesetzt werden. Der Hauptgrund hierfür liegt an dem Entscheid von der SBB den Einsatz von Minibars generell einzustellen – siehe Medienmitteilung von Januar 2016.



Auf Grund des oberen Entscheids (Einstellung von Minibars) wurden keine weiteren Minibars produziert und die Arbeiten zur Erfüllung aller Anforderungen (Tabelle 3 und Tabelle 4) wurden eingestellt.

Tabelle 6. Auswirkungen der geänderten Einsatzbedingungen

| Geplante Einsatzbedingung EB |   | Änderung  | Auswirkung   |
|------------------------------|---|---|--|
| EB1                          | Keine eingeschränkte Streckennutzung                          | Ausschliesslich Zürich-Bern bzw. Zürich-Luzern  | Siehe Auswirkungen auf EB2 bis EB8   |
| EB2                          | Nutzung ausschliesslich im Zug                                | Bei Ankunft in Bern oder Zürich werden die Minibars jeweils ausgeladen (in Luzern bleibt die Minibar im Zug). | Wartezeiten ausserhalb vom Zug. Die Minibars verbringen jeweils bis zu 4h täglich im Freien auf den Perrons. Hohe Totzeiten ohne Möglichkeit zum Wechseln von Speichern.<br><b>Ungeplante Systemupdates und Produktmodifikationen.</b>   |
| EB3                          | Gestaffelte Einführung von 30 + 30 Systeme                    | Bau von nur. 15 Minibars.   | <b>Hohe Lagermenge ohne Bewegung.</b>  |
| EB4                          | Umgebungstemperatur Personenzug ca. 20°C                      | Umgebungstemperaturen im Freien.  | Die Systeme sind grosse Temperaturschwankungen (ca -5°C bis +35°C) ausgesetzt. Dies führt zu einem erhöhten Energieverbrauch. Winter= Wärmeverluste. Sommer= Wärmeregulierung. Speicher werden schneller leer.<br>Wiederholter Start des Energiesystems mit leerem Speicher = Fehlbedienung. <b>Erhöhter Reparaturbedarf.</b><br><b>Ungeplante Systemupdates und Produktmodifikationen.</b>  |
| EB5                          | Luftqualität Personenzug, gefiltert, staubfrei                | Luftqualität im Freien. Gleisumgebung.  | Staub, auch Metallstaub (Zugbremsen) wird angesaugt durch Kühllüfter bzw. Luftpumpe.<br><b>Erhöhte Wartungsarbeiten und hoher Reinigungsbedarf.</b>  |
| EB6                          | Lagerung der Minibars im Zug                                  | Lagerung am Stützpunkt Elvetino – HB Zürich. Bauarbeiten in der Nähe.   | Staub, quasi Industrieumgebung. Schlechte Luftqualität.<br><b>Erhöhte Wartungsarbeiten und hoher Reinigungsbedarf.</b>   |
| EB7                          | Verfügbarkeit von Zusatzspeichern und Tausch im Zug.          | Im Zug dürfen keine Zusatzspeicher transportiert werden.  | Keine lückenlose Energieverfügbarkeit garantiert.<br>Ungeplante Systemupdate und Produktmodifikationen.<br>Wiederholter Start des Energiesystems mit leerem Speicher = <b>Fehlbedienung.</b><br>Verkürzung der Lebensdauer der Brennstoffzelle.<br>Sperrung des Energiesystems zum Selbstschutz.<br>Ausfall von Minibars.<br><b>Erhöhte Wartungsarbeiten und hoher Reparaturbedarf.</b><br><b>Ungeplante Systemupdates und Produktmodifikationen.</b><br>Die Speicher dürfen ausschliesslich am Stützpunkt der Elvetino im HB Zürich ausgetauscht werden.<br>Erhöhung der Füllkapazität der Speicher und Toleranzen des Energiesystems.<br><b>Modifikationen an der Füllstation.</b><br><b>Ungeplante Systemupdates und Produktmodifikationen.</b> |
| EB8                          | Ausladen der Minibars nur für Wartungs- oder Reparaturzwecken | Die Minibars werden täglich je bis zu 16 Mal aus dem Zug aus- bzw. eingeladen.                                | Mechanische Beschädigungen, Flüssigkeit-Schäden.<br><b>Erhöhte Wartungsarbeiten, hoher Reparatur- und Reinigungsbedarf.</b>  |



## 6.2. Ausreifung der Technologie für den täglichen Einsatz

Zur Ermittlung der Betriebsstabilität und Zuverlässigkeit des Energiesystems wurde deren Feldeinsatz mittels Loggers überwacht und regelmässig ausgewertet. Verbesserungen der Hardware, Software und Betriebsstrategien wurden entsprechend definiert und umgesetzt. Zur Validierung der getroffenen Massnahmen wurden Daten weiterhin aufgenommen und ausgewertet. Siehe dazu Abbildung 13

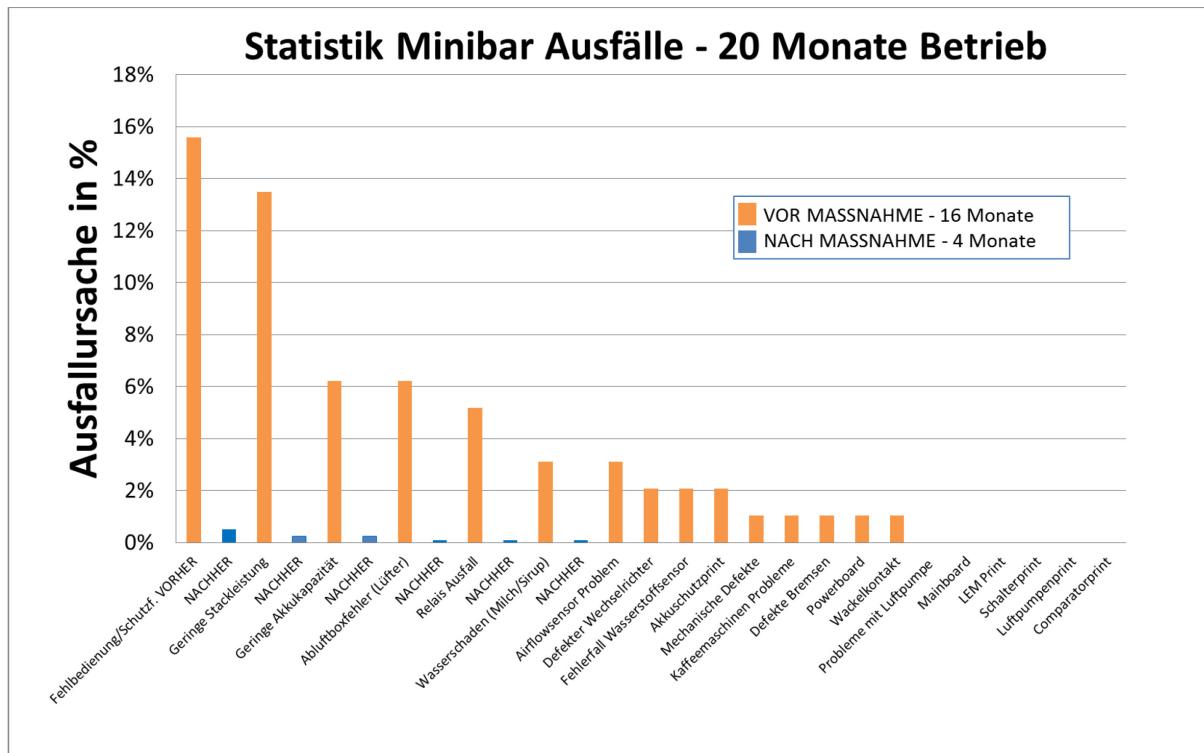


Abbildung 13. Statistik der häufigsten Ausfallursachen. Vor (16 Monate) und nach Umsetzung (4 Monate) **aller** Verbesserungsmassnahmen.

Die umgesetzten Massnahmen und die erzielte Ergebnisse nach deren vollständigen Umsetzung werden unten näher erläutert.

### 6.2.1. Ausfallursache Fehlbedienung – Gegenmassnahme User Interphase

Als Gegenmassnahme um vermehrte Fehlbedienungsfehler zu vermeiden wurde ein überarbeitetes Display bzw. Bedienpanel entwickelt und integriert – Details zur Umsetzung findet man im Anhang „PVB\_UI\_Systemupdates\_4650\_02“.

Mit dem neuen Bedienpanel ist es möglich dem Anwender klare Informationen und Instruktionen zu geben, wodurch Fehlbedienungen vermieden werden können:

- der Wasserstoff ist aufgebraucht, d.h. der MH-Speicher muss gewechselt werden -> die Information „Refuel“ wird dem Anwender gegeben.
- der elektrische Zwischenspeicher ist leer. Der Anwender muss das System eingeschaltet lassen und warten -> die Information „Recharging Wait“ wird dem Anwender gegeben.





- bei sporadischen Fehlern welche zu einer Abschaltung führen wird der Anwender mit dem Signal „Restart“ das System erneut zu starten instruiert.
- im Fall von einem Fehler welcher eine Reparatur bedingt leuchtet das Signal „Service“. In diesem Fall weiss der Anwender, dass er das System abstellen und nicht weiter verwenden darf.

In der Vergangenheit konnte der Anwender den Grund für eine Abschaltung oder fehlendem Strom bei der Kaffeemaschine nicht erkennen, wodurch er meistens versucht hat das System mehrmals erneut zu starten, oft mit einem leeren Speicher. Dies führte in den ersten Betriebsmonaten zu häufigen Ausfällen auf Grund von Beschädigung der Brennstoffzelle, oder einer automatischen Sperrung des Systems zum Selbstschutz. Abbildung 14 zeigt das ursprüngliche sowie das überarbeitete Bedienpanel.

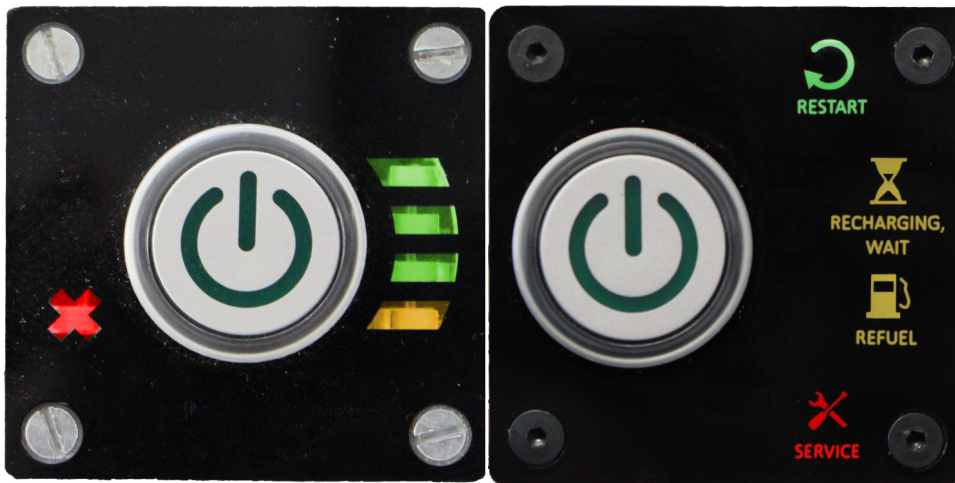


Abbildung 14. Links: ursprüngliches Bedienpanel. Rechts: überarbeitetes Bedienpanel

**Bewertung:** die Auswertung der Daten hat gezeigt, dass Ausfälle auf Grund von einer Fehlbedienung praktisch eliminiert werden konnten. Die Massnahme kann als Erfolgreich bewertet werden.

#### 6.2.2. Ausfallursache geringe Stackleistung 1 – Gegenmassnahme Anzahl On/Off Zyklen

Die Auswertung der Daten hat gezeigt, dass die geringe Stackleistung auf Grund von beschleunigten Alterungsphänomenen stattfindet. Hierfür gibt es hauptsächlich folgende Ursachen:

- Hohe Anzahl bzw. Kadenz an On/Off Zyklen der Brennstoffzelle
- Korrosionsphänomene beim Abschalten und Spülen der Anode mit Umgebungsluft

Um die Anzahl an On/Off Zyklen zu minimieren wurde eine Optimierung der Arbeitspunkte durchgeführt. Die Auswertung zeigt nun, dass die Massnahmen eine Reduktion der Anzahl On/Off Zyklen ermöglicht haben, siehe Tabelle 7.

Tabelle 7. Durchschnittliche Anzahl an On/Off Zyklen pro h. Vor und nach Umsetzung aller Verbesserungsmaßnahmen.

|                 | Vor Massnahmen – 16 Monate Betrieb | Nach Massnahmen – 4 Monate Betrieb |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|
| On/Off Zyklen/h | 3.0/h                              | 1.8/h                              |



**Bewertung:** die Anzahl On/Off Zyklen konnte um 40% reduziert werden. Die Auswirkung der Massnahme kann erst in Kombination mit der unter Punkt 6.2.3 beschrieben bewertet werden.

### 6.2.3. Ausfallursache geringe Stackleistung 2 – Gegenmassnahme Spülstrategie mit sauerstoffverarmter Luft

Korrosion beim Abschalten findet auf Grund des gleichzeitigen Vorhandenseins von Sauerstoff und Wasserstoff auf der Anodenseite während dessen Spülen mit Umgebungsluft. Hierfür wurde neu „Sauerstoffverarmte-Luft“ anstatt von Umgebungsluft genutzt. Details zur Umsetzung dieser Massnahmen findet man im Anhang „PVB\_UI\_Systemupdates\_4650\_02“.

Die Laborergebnisse zeigen positive Ergebnisse im Sinne von einer Verringerung der Degradationsgeschwindigkeit. Siehe dazu Abbildung 15. Diese Laborergebnisse wurden im Frühling 2015 generiert.

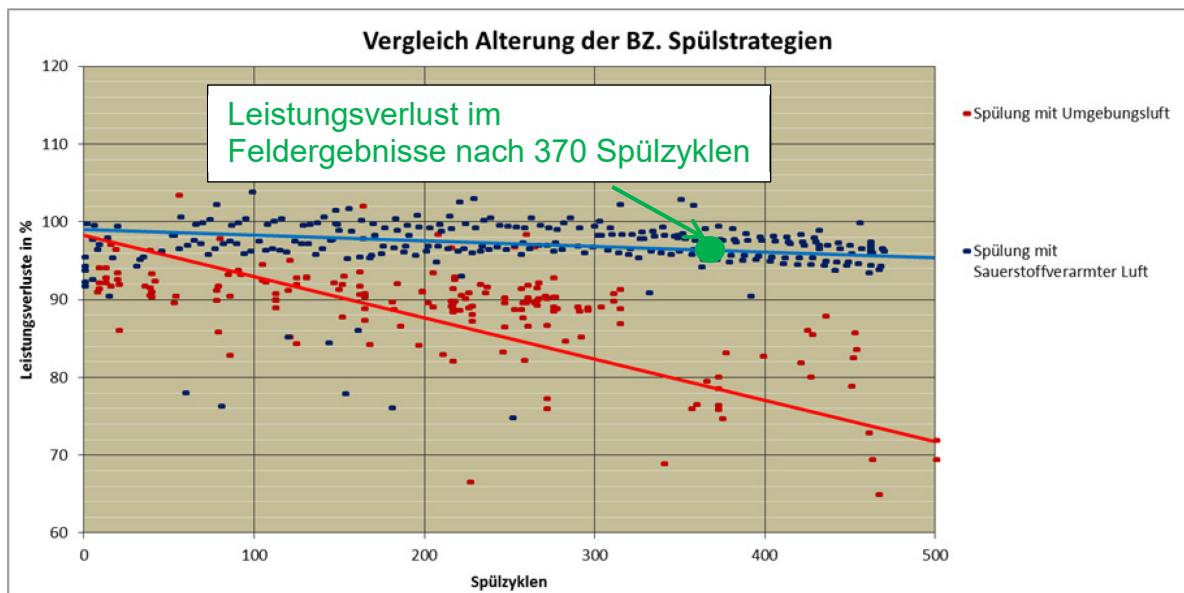


Abbildung 15. Vergleich der Alterung zwischen ursprünglicher und überarbeiteter On/Off Strategie. Rot: Feldegebnisse Frühling 2014-Herbst 2014. Blau: Laborergebnisse Frühling 2015. Grün: Feldegebnisse Herbst 2015.

Abbildung 15 zeigt, dass bei Umsetzung der Spülung der Anodenseite mit Sauerstoffverarmter Luft die Degradation der Brennstoffzelle ca. 1% pro 100 Zyklen beträgt. Im Vergleich dazu führt die Abschaltungsstrategie mittels Spülung mit Umgebungsluft zu einer Degradation von mehr als 5% bei 100 Zyklen.

Im Feld wurden bei 370 Abschaltungen mit der beschriebenen Spülstrategie aufgenommen; Datenaufnahme im Herbst 2015. Die Auswertung der Daten bestätigt die Reduktion der Degradation der Brennstoffzelle auf ca. 1% pro 100 Zyklen.

Die Ergebnisse aus den Labormessungen im Frühling 2015 (Blau in Abbildung 15) konnten in einem parallelen Versuch im Herbst 2015 im Labor jedoch noch nicht reproduziert werden. Eine mögliche Ursache ist der Einfluss der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen im Labor im Frühling und Herbst. Details dazu findet man im Anhang „20150324\_Zwischenstand Arbeiten der BFH am IHPoS P&D\_V4“



**Bewertung:** dadurch, dass eine höhere Anzahl an Zyklen im Feld sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse im Labor für eine definitive Aussage nötig sind, kann die Massnahmen mit Vorbehalt als Erfolgreich bewertet werden.

#### 6.2.4. Ausfallursache geringe Stackleistung 3 – Gegenmassnahme Purgestrategie Luftpumpenstopp

Die bisherige Strategie um Wasser aus den einzelnen Zellen im Stack zu transportieren bzw. zu erzwingen (Purge) bestand ursprünglich daran periodisch einen Überdruck an der Kathodenseite zu generieren. Hierfür wird ein Ventil am Kathodenausgang periodisch für ca. 0.5 Sekunden geschlossen. Eine alternative Methode um das Wasser aus den Zellen zu transportieren besteht darin den Luftfluss zu unterbrechen indem die Luftpumpe kurzzeitig abgestellt wird. Untersuchungen im Labor haben gezeigt, dass eine periodische Verarmung von Sauerstoff auf der Kathodenseite (Stopp der Luftzufuhr für ca. 1 Sekunde) zu einer mittleren höheren Leistung der Brennstoffzelle von ca. 10-15% führt. Die genauen Gründe für diese Leistungserhöhung sind noch unbekannt; man vermutet jedoch, dass durch den Sauerstoffverbrauch in der Brennstoffzelle während der Abstellung der Pumpe, zu einem beim Nachschub von Luft verbesserten Massentransport durch freies Volumen in der Gasdiffusionsschicht führen könnte.

Die Validierung der Purgestrategie im Feld hat ergeben, dass diese bei insgesamt über 400 Betriebsstunden keine negativen Einflüsse auf die Lebensdauer der Brennstoffzelle hat.

**Bewertung:** mit Vorbehalt erfolgreich. Der Zeitraum von 400 Betriebsstunden ist noch nicht aussagekräftig da die gezielte Lebensdauer der Brennstoffzelle bei 5'000 Betriebsstunden liegt.

#### 6.2.5. Einflüsse der Umgebungstemperatur

Neben den oberen Ausfallursachen muss man noch den Einfluss der Änderung der geplanten Einsatzbedingungen der Energiesysteme v.a. in Bezug auf Schwankungen der Umgebungstemperatur bzw. Abweichungen der bei Projektanfang definierten Nutzungsbedingungen berücksichtigen.

Während dem Einsatz der Energiesysteme wurde festgestellt, dass die minimale Starttemperatur der Metallhydridspeicher nicht unter 18°C liegen darf. Liegt die Temperatur darunter fällt der Druck im Speicher zu schnell ab und das Energiesystem schaltet automatisch ab. Diese Problematik hat sich während der Wintermonate bemerkbar gemacht – siehe Abbildung 16.

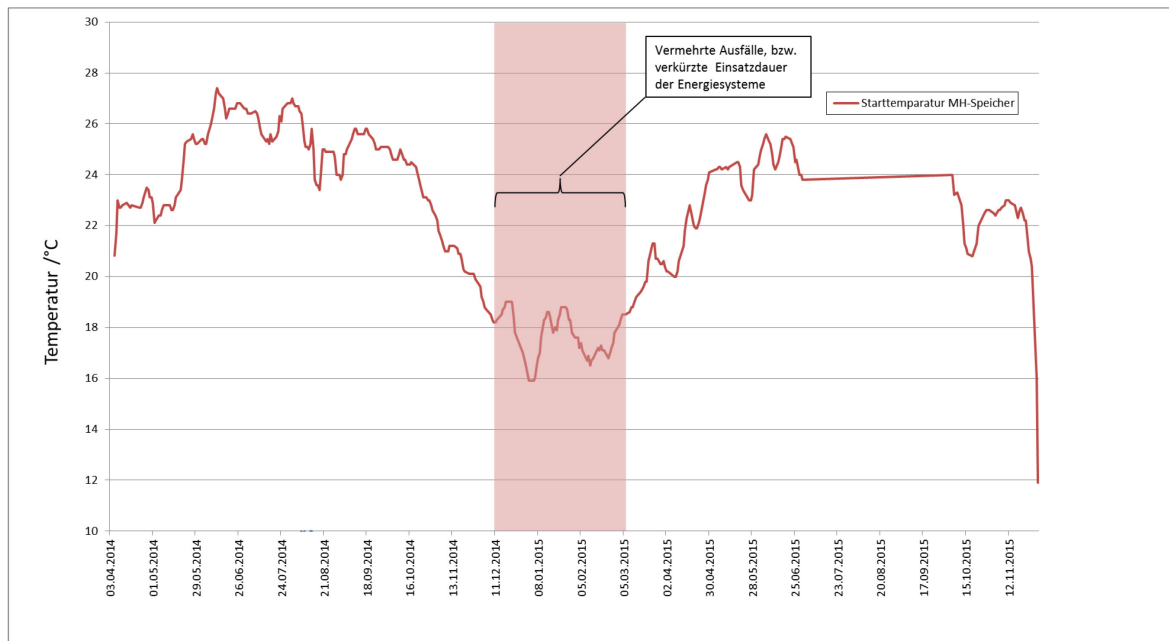


Abbildung 16. Temperatur der Metallhydridspeicher beim Start (Einlegen ins Energiesystem) von April 2014 (Betriebsstart der Minibars bzw. Energiesysteme) bis November 2015.

Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Temperatur (gemessen auf der Oberfläche) zweier MH-Speicher mit unterschiedlichen Starttemperaturen, 17-18 °C bzw. ca. 20°C. Wenn die Temperatur des MH-Speichers unter 18°C beim Start des Energiesystems liegt kommt es zu einer zu schnellen Abkühlung der Legierung. Als Folge davon fällt der Druck im MH-Speicher zusammen. Das Energiesystem registriert diesen Druckabfall und schaltet automatisch in den nächst tieferen Arbeitspunkt um der Abkühlung entgegenzuwirken in dem weniger Wasserstoff verbraucht wird. In einigen Fällen steigt die Temperatur des MH-Speichers wieder hoch genug so dass eine kontinuierliche höhere Wasserstoffabgabe möglich ist. Entscheidend für einen Ausfall des Energiesystems ist einerseits die thermische Bilanz zwischen BZ-Energiesystem (Quelle) und MH-Speicher (Senke); andererseits die elektrische Energiebilanz zwischen BZ-System + Pufferbatterie (Quellen) und Verbraucher (Senke) (Kaffeemaschine).

Ist die mittlere Bilanz zwischen Energieproduktion durch das BZ-Energiesystem und Energieverbrauch der Kaffeemaschine negativ so ist die Pufferbatterie innert kurzer Zeit (je nach Ladezustand kann ein Ausfall bereits nach 10 Minuten stattfinden) leer und muss wieder aufgeladen werden. Während der Aufladung wird die Kaffeemaschine nicht mit Strom versorgt und der Anwender geht von einem Defekt aus -> Dienstunterbruch bzw. Ausfall.

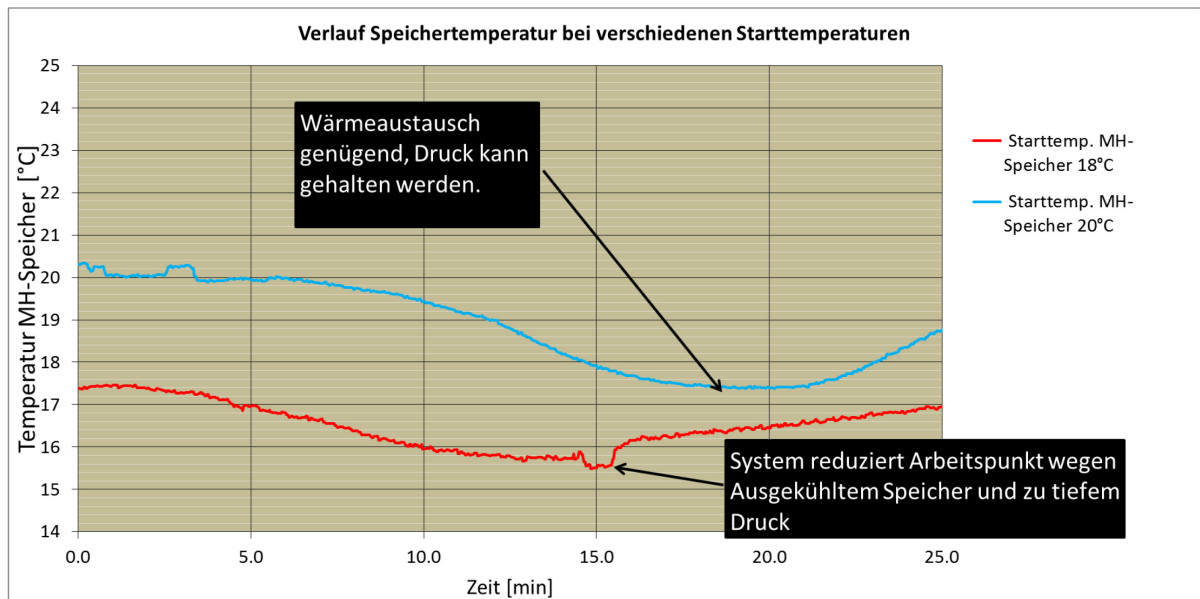


Abbildung 17. Verlauf der Temperatur (gemessen auf der Oberfläche) von MH-Speicher beim Einsatz im Energiesystem. Rote Kurve: MH-Speicher mit einer Starttemperatur ca. 17.5 -18°C; blaue Kurve: >20°C.

Als Gegenmassnahme wurde in erster Linie ein Wärmestau generiert indem die Abfuhr von Wärme aus dem Energiesystem blockiert wurde, siehe dazu Abbildung 18. Wärmestau im Energiesystem mittels Abdeckung.

Durch diese Massnahme konnte das Problem entschärft jedoch nicht vollständig eliminiert werden.

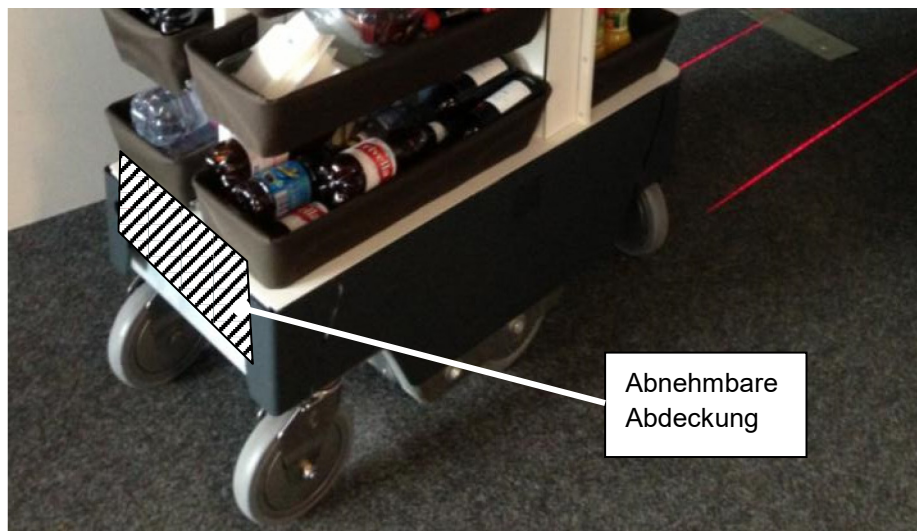


Abbildung 18. Wärmestau im Energiesystem mittels Abdeckung.

Im Labor wurden andere Startstrategien untersucht. Diese sehen einen beschleunigten Start des Brennstoffzellensystems im CV Modus vor. Definitive Ergebnisse konnten noch nicht generiert werden – siehe dazu Anhang 20150311\_Optimierte Startprozedur\_V1.0.



**Bewertung:** dadurch, dass der Einsatz der Minibars längerfristig innerhalb vom Zug stattfinden sollte, wurden keine Massnahmen umgesetzt.

#### 6.2.6. Elektronik Optimierungen

Im Bereich der Elektronik wurden verschiedene Optimierungen durchgeführt:

- Anpassung der elektronischen Filter zur Erweiterung der Toleranzgrenzen und Reduzierung von automatischen Abschaltungen
- Überarbeiteter Akkuschutzprint zur Reduktion von Störungen aus Peripheriegeräten (z.B. Wechselrichter)

**Bewertung:** durch die Erweiterung der Toleranzgrenzen und Verringerung von elektronischen Störungen konnte die Anzahl Ausfälle reduziert werden. Die Massnahme wird als Erfolgreich bewertet.

#### 6.2.7. Peripherie Optimierungen

Das Toleranzfenster für den Druck der MH-Speicher lag bei Projektanfang zwischen 0.5 und 2.0 bar. Es hat sich gezeigt, dass dieses Fenster zu eng für einen realen Einsatz gewählt wurde:

- Die Füllanlage der MH-Speicher befindet sich im Freien, siehe Kapitel 4.3.1.
- Die Lagerung der befüllten MH-Speicher findet im Keller des HB Zürichs statt.
- Bei einer Befüllung im Freien im Winter (bis  $-10^{\circ}\text{C}$ ; ) und Lagerung im Inneren ( $20^{\circ}\text{C}$ ) ergaben sich Temperaturunterschiede von bis zu  $30^{\circ}\text{C}$ .
- Temperaturunterschiede von bereits  $5^{\circ}\text{C}$  können, in Abhängigkeit des Füllstands des MH-Speichers, Druckunterschiede von mehreren bar verursachen.
- Drücke höher als 2.0 bar haben zu Startproblemen und Dienstaussfällen geführt. Das Energiesystem hat zum Selbstschutz eine Systemsperre aktiviert bzw. der Anwender ist von einer defekten Minibar ausgegangen, anstatt einen MH-Speicher innerhalb der Toleranzen zu nehmen.
- Dem Anwender kann nicht zugemutet werden den Druck in jedem eingesetzten Speicher immer zu kontrollieren bzw. einzustellen.

Die Peripherie wurde entsprechend optimiert um den Druckbereich der MH-Speicher zu erhöhen. Hierfür wurde ein weiterer Druckminderer im System eingebaut.

**Bewertung:** durch den zusätzlichen Druckminderer können nun MH-Speicher in einem Toleranzfenster zwischen 0.5 bis 10 bar eingesetzt werden. Keine Ausfälle auf Grund vom Überdruck im MH-Speicher sind mehr aufgetreten. Die Massnahme kann als Erfolgreich bewertet werden.





## 7. Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

Besonders erfreulich war die Tatsache, dass die Handhabung und das tägliche Arbeiten mit allen Anlagen (Energiesysteme, Füllanlage, MH-Speicher, usw.) in Zusammenhang mit Wasserstoff ohne einen einzigen Zwischenfall über eine Dauer von über 3 Jahre (inklusive Vorprojekte) erfolgte! Das Bedienpersonal wurde dabei speziell geschult, musste jedoch über keine besonderen Kenntnissen oder Ausbildungen verfügen.

Trotz der geänderten Betriebsbedingungen und daraus resultierenden technischen und logistischen Herausforderungen konnten wertvolle Erfahrungen und Daten unter realen Betriebsbedingungen gesammelt werden.

Sehr wertvoll war die Erkenntnis, dass obwohl das Brennstoffzellensystem nur über einen einzigen Knopf (ON/OFF) verfügte es vermehrt zu Fehlbedienungen gekommen ist. Bei einem Ausfall der elektrischen Energie konnte der Anwender den Grund hierfür nicht erkennen und entsprechend reagieren:

- a) Ausfall auf Grund von fehlendem Wasserstoff oder
- b) Ausfall auf Grund von einem leeren Zwischenspeicher oder
- c) Ausfall auf Grund von einem technischen Defekt im System

Als Folge davon hat es vermehrt Fehlbedienungen und schlussendlich Ausfälle gegeben. Die Fehlbedienung bestand beispielsweise darin das Energiesystem immer wieder mit einem leeren Speicher zu starten, wodurch eine automatische Sperre des Systems oder im schlimmsten Fall eine Beschädigung des Brennstoffzellenstacks verursacht wurden

Dies hat den Bedarf an einer Überarbeitung des Bedienkonzepts bzw. Bedienpanels deutlich gemacht.

Durch die ständige Auswertung von Daten und Rückmeldungen aus dem Feld konnten weitere technische Arbeiten priorisiert und gezielt durchgeführt werden:

- Ausfällen auf Grund von Fehlbedienungen konnten praktisch ausgeschlossen werden.
- die Degradation der Brennstoffzelle konnte um Faktor 5 von >5% auf <1%% pro 100 On/Off Zyklen verringert werden.
- die Betriebsstabilität wurde verbessert (Weniger Ausfälle, besseres User Interface, verbesserte Peripherie); Während den letzten 6 Monaten gab es nur wenig negative Rückmeldungen bezüglich Ausfälle, im Gegensatz zu mehreren pro Tag während den ersten Betriebswochen.
- Leistungs- und Effizienzsteigerung von bis zu 15% der Brennstoffzelle konnten durch neue Strategien umgesetzt werden

Die grösste Einschränkung in Bezug auf die Umgebungsbedingungen war durch die Verwendung von einem Metallhydrid als Speichermedium gegeben. Bedingt durch die endotherme Desorption des Wasserstoffs resultierte eine Einschränkung für den Einsatz der Minibars ausserhalb vom Zug.

Diese Einschränkung führte dazu, dass die Strecke Zürich – Bern, mit Zwischenpausen am HB Bern auf dem Peron im Freien von ca. 30 Minuten gegen die Strecke Zürich – Luzern getauscht wurde.



- nach der Umsetzung von Systemupdates und dem Einsatz auf der Ersatzstrecke konnte der Betrieb während den letzten 6 Monaten ohne nennenswerte Störungen durchgeführt werden.

Die fehlende Infrastruktur für den Transport von Zusatzspeichern im Zug hat einen reibungslosen Betrieb der Minibars auf einer Strecke mit starken Belastungszonen schlussendlich unmöglich gemacht (Zürich-Bern). Die folgende Abbildung 19 zeigt wie der Betrieb hätte ablaufen können, wenn Zusatzspeicher im Zug gewechselt werden können. Im Kontrast dazu siehe die Abbildung 12.

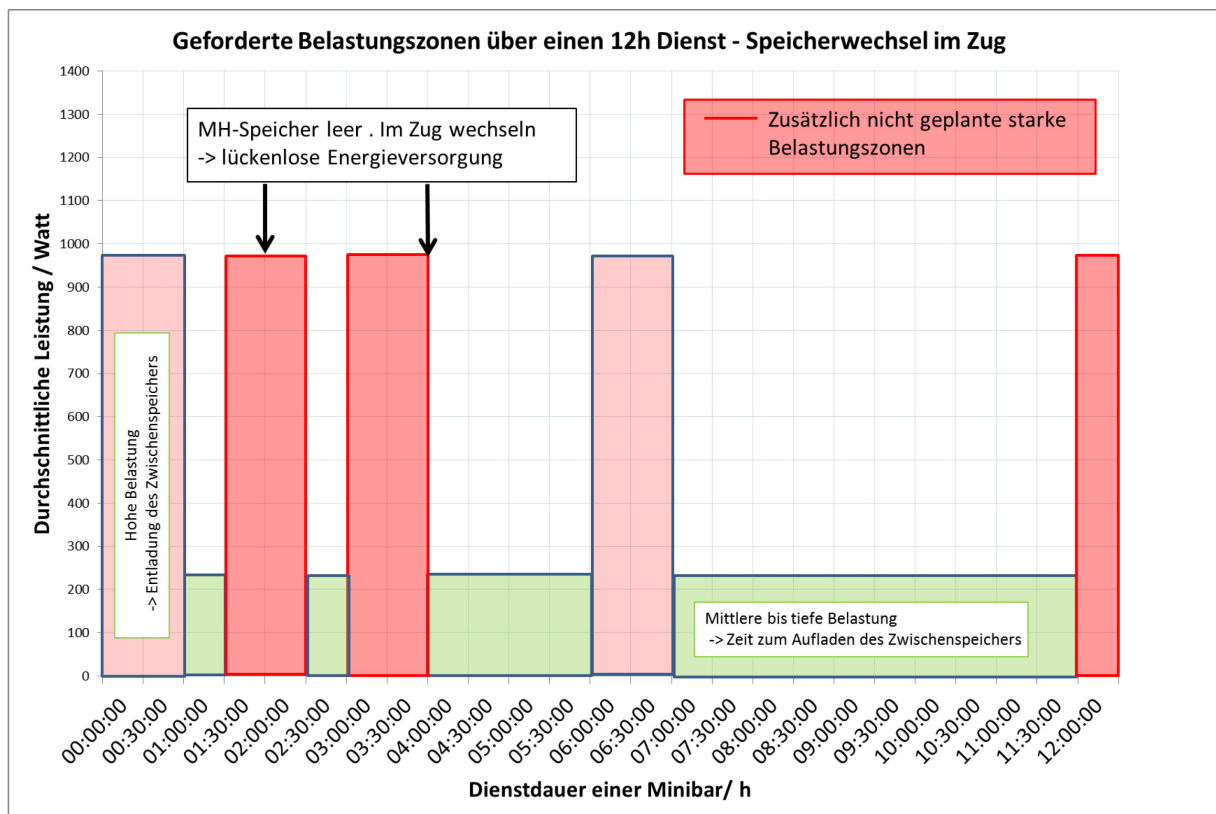


Abbildung 19. Geforderte Belastungszonen auf der Einsatzstrecke Zürich-Bern. Ein Speicherwechsel ist im Zug möglich.





## 8. Schlussfolgerungen

Während der ersten Monate gab es unerwartet grosse technische und logistische Herausforderungen welche nur mit einem grossen Einsatz aller Parteien gelöst werden konnten. Die erreichten Ergebnisse unter den geänderten Einsatzbedingungen haben die Bahntauglichkeit der Systeme bereits während der ersten Projektmonate in Frage gestellt.

Mit der Umsetzung der diversen Verbesserungen und deren Validierung im Feld konnte jedoch das System auf einen Serienstand gebracht werden welcher Bahntauglich ist -> die Systeme konnten über 400 h ohne nennenswerte Probleme eingesetzt werden!

Trotzdem zeigt das heutige System seine Schwächen klar auf, da:

- bedingt durch die fehlende Infrastruktur für den Transport von MH-Speichern im Zug können die Systeme nur auf bestimmte Strecken mit tiefen bis mittelgrossen Belastungszonen eingesetzt werden
- bedingt durch die Temperaturempfindlichkeit der Metallhydridspeicher können die Systeme nur im inneren bzw. bei Umgebungstemperaturen höher als 15°C problemlos verwendet werden
- für Anwendungen im Freien bzw. bei Temperaturen unter 15°C sind die eingesetzten MH-Speicher nicht geeignet. Für solche Umgebungsbedingungen muss eine alternative Speichertechnologie gewählt werden wie a) gasförmige Speicherung oder b) andere Metallhydridlegierungen
- für den Einsatz der Systeme in Anwendungen mit intensiven Belastungsprofilen ist es notwendig die Hybridisierung neu zu dimensionieren; d.h. die Abstimmung der Brennstoffzelle und des elektrischen Zwischenspeichers.

Die Sicherheit der Wasserstofftechnologie konnte im täglichen Einsatz im öffentlichen Raum unter sehr anspruchsvollen mechanischen Belastungen (Vibrationen im Zug, tägliches mehrmaliges Ein- und Ausladen in/aus dem Zug) nachgewiesen werden.

## 9. Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

### ***Vermarktung der Technologie:***

Im Focus für den Einsatz bzw. Vermarktung der Energiesysteme liegen Innenanwendungen. Hierfür hat die Firma CEKAtec ein Brennstoffzellensystem für Marketingzwecke aufgebaut (siehe Abbildung 20). Es handelt sich um das identische Energiesystem, welches in den Minibars verbaut ist, jedoch in einer anderen Bauweise. Das System kann sowohl mit einem Metallhydridspeicher, als auch von einer gewöhnlichen externen Gasflasche versorgt werden.

In einem ersten Schritt werden Hochschulen angegangen, welche das Thema Brennstoffzellen unterrichten und das CEKAtec System im Unterricht einsetzen könnten. Da der Preis des Systems relativ hoch ist, sehen wir den Einsatz eher in industriellen als in privaten Anwendungen. Interessant in die-



sem Gebiet sind Anwendungen, welche heute mit Akkusystemen betrieben werden. Hierzu zählen USV-Anlagen, Lichtsignale auf Baustellen, Armee-Anwendungen, diverse Maschinen, wie z.B. Gabelstapler etc. Das detaillierte Konzept für die Bewerbung und Vermarktung des Systems ist derzeit am Entstehen und hat zum Ziel die geeigneten Märkte bzw. Anwendungen zu identifizieren und Strategien festzulegen um in diese Märkte einzutreten und das Produkt erfolgreich zu platzieren.



Abbildung 20. Marketingkoffer der Firma CEKAtec. Oben links: vordere Seite offen zur Veranschaulichung der Komponenten.



### **SBB Minibars**

Durch den Entscheid der SBB der Einsatz von Minibars generell per 2017 einzustellen werden keine weiteren Minibars mit Brennstoffzellen gebaut.

### **Weiterentwicklung der Technologie:**

Die Reproduzierbarkeit der Laborergebnisse soll erreicht werden. Aus akademischer Sicht ist die Erarbeitung von Strategien für einen Kaltstart mit einem MH-Speicher als Speichermedium interessant.

## **10. Anhang**

- PVB\_UI\_Systemupdates\_4650\_02
- 20150324\_Zwischenstand Arbeiten der BFH am IHPoS P&D\_V4
- 20150311\_Optimierte Startprozedur\_V1.0