



Schlussbericht

Langzeittest USV mit Brennstoffzellen

Unterbrechungsfreie Notstromversorgung mit PEM-Brennstoffzellen im Feld





Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE LUZERN

Technik & Architektur
FH Zentralschweiz

Datum: 30. Juni 2019

Ort: Bern

Auftraggeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Brennstoffzellen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

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

Betriebskommission POLYCOM Nidwalden (BKPNW)
Acherweg 22, CH-6370 Stans

Autor/in:

Ulrike Trachte, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, ulrike.trachte@hslu.ch
Peter Sollberger, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, peter.sollberger@hslu.ch
Thomas Gisler, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, thomas.gisler@hslu.ch

BFE-Bereichsleitung: Dr. Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Dr. Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/501314-01

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



Zusammenfassung

Im Projekt wurde das Langzeitverhalten im Feld von fünf Systemen zur unterbrechungsfreien Notstromversorgung mit PEM Brennstoffzellen für das nationale Sicherheitsfunknetz POLYCOM und die Mobilfunkkommunikation untersucht. Die abzusichernde Leistung beträgt zwischen vier und sechs Kilowatt. Der Betrieb wurde unter verschiedenen Umgebungsbedingungen im landwirtschaftlichen Umfeld, am Tunneleingang einer Autobahn sowie in den Bergen auf über 2'400 Höhenmetern mit Indoor- und Outdoor-Systemen getestet. Je nach Anwenderbedürfnis und vorhandener Infrastruktur wurden die Systeme entweder als integriertes System in die bestehende Anlage eingebunden oder als alleinstehendes System installiert. An einem POLYCOM Standort erfolgte im Rahmen des Projekts ein Umbau von einem integrierten System mit batteriebetriebener Standard-USV in ein alleinstehendes System mit einer eigenen entwickelten Startup-Einheit mit Superkondensatoren.

Unter Berücksichtigung von Messungen und guten Resultaten aus Vorgängerprojekten mit ferngesteuerten Stresstests weisen die Systeme nach insgesamt sieben Betriebsjahren eine sehr gute Zuverlässigkeit und eine stabile Betriebsweise auf. Potential zur Verbesserung besteht noch im Ausbau der Serviceverfügbarkeit für Brennstoffzellenprodukte in der Schweiz und im Handling des Wasserstoffs insbesondere bei der Zylinderzulieferung und beim Zylinderwechsel.

Résumé

Le projet a étudié le comportement à long terme de cinq systèmes d'alimentation électrique de secours ininterrompue avec piles à combustible PEM pour le réseau radio de sécurité nationale POLYCOM et les communications radio mobiles. La puissance à protéger se situe entre quatre et six kilowatts. Le fonctionnement a été testé avec des systèmes intérieurs et extérieurs dans diverses conditions environnementales. Sur un site POLYCOM, le projet a consisté à passer d'un système intégré avec onduleur standard alimenté par batterie à un système autonome avec sa propre unité de démarrage développée avec des supercondensateurs.

En tenant compte des mesures et des bons résultats des projets précédents avec des tests d'effort télécommandés, les systèmes ont une très bonne fiabilité et un fonctionnement stable après un total de sept ans d'exploitation. Il existe encore un potentiel d'amélioration en ce qui concerne l'extension de la disponibilité du service pour les produits de piles à combustible en Suisse et le traitement de l'hydrogène, en particulier dans l'approvisionnement en bouteilles et le remplacement des bouteilles.

Summary

The project investigated the long-term behaviour in the field of five systems for uninterruptible emergency power supply with PEM fuel cells for the national security radio network POLYCOM and mobile radio communication. The power to be protected is between four and six kilowatts. The operation was tested with indoor and outdoor systems under various environmental conditions in the agricultural environment, at the tunnel entrance of a motorway and in the mountains at over 2000 metres altitude. Depending on user requirements and existing infrastructure, the systems were either integrated into the existing system as an integrated system or installed as a stand-alone system. At a POLYCOM site, the project involved a conversion from an integrated system with battery-operated standard UPS to a stand-alone system with its own developed startup unit with supercapacitors.

Taking into account measurements and good results from previous projects with remote-controlled stress tests, the systems have very good reliability and stable operation after a total of seven years of operation. There is still potential for improvement in the expansion of service availability for fuel cell products in Switzerland and in the handling of hydrogen, particularly in cylinder supply and cylinder replacement.





Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
2 Ausgangslage	10
2.1 Hintergrund / Stand der Technik	10
2.2 Projektumfeld	12
2.3 Motivation des Projekts	12
2.4 Ziele der Arbeit	12
3 Vorgehen und Methode	14
3.1 Vorgehen und Arbeitsorganisation	14
3.2 Standorte	14
3.3 Brennstoffzellen	18
3.4 Installationskonzepte und Systemarchitektur	20
3.5 Umbau in stand-alone System mit Superkondensatoren	22
3.6 Betriebskonzepte	24
3.7 Wasserstoffversorgung	25
3.8 Messkonzept	26
3.8.1 Messequipment	26
3.8.2 Messdatenerfassung und Analysesoftware	27
3.8.3 Testdurchführung und Testprogramm	28
4 Resultate	29
4.1 Anlagenstatus	29
4.2 Teststatus und reale Stromausfälle	30
4.3 Standort-Historie und Betriebsverhalten	31
4.3.1 Standort 1, Luzern Telekom, Indoorsystem im Stadtgebiet	32
4.3.2 Standort 2, Graubünden Telekom, Indoorsystem auf 2'400 m Höhe	35
4.3.3 Standort 3, Nidwalden 1 POLYCOM, Indoorsystem mit Anwender-USV	36
4.3.4 Standort 4, Nidwalden 2 POLYCOM, Outdoorsystem mit Superkondensatoren	39
4.3.5 Standort 5, Bern POLYCOM, Indoorsystem	41
4.4 Zuverlässigkeit und Startup-Zeiten	45
4.4.1 Zuverlässigkeit	45
4.4.2 Startup Zeiten	45
4.5 Wasserstoff Bereitstellung	46
4.5.1 Lieferservice der Gaszylinder	46
4.5.2 Zylinderaustausch	46
4.5.3 Ereignisse – Leckagen, Bauteilaustausch	46
4.6 Wartung und Service	47



4.7	Kosten.....	48
4.7.1	Investitionskosten	48
4.7.2	Unterhalts- und Verbrauchskosten.....	49
4.8	Messequipment und Auswertesoftware	49
5	Diskussion der Ergebnisse	50
5.1	Zuverlässigkeit - Messbare Ziele.....	50
5.2	Unterhalt und Service	51
5.3	Entwicklung eines stand-alone Systems mit Superkapazitäten	51
5.4	Betriebskonzept.....	52
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	52
6.1	Nächste Schritte nach Projektschluss	53
7	Publikationen	55
8	Referenzen	56
9	Anhänge	57
9.1	Anhang 1: Tabelle mit aufgezeichneten Messdaten pro Standort	57
9.2	Anhang 2: Auslegung Speicherplatz für Messdaten	58
9.3	Anhang 3: Entwicklung der Stromversorgungssicherheit.....	59



Abkürzungsverzeichnis

BABS	Bundesamt für Bevölkerungsschutz
BFE	Bundesamt für Energie
BKPNW	Betriebskommission POLYCOM Nidwalden
BORS	Behörden und Organisationen für Rettung und Sicherheit
BZ	Brennstoffzelle
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
GB	Gigabyte
H ₂	Wasserstoff
KI	Kritische Infrastrukturen
Max.	maximal
MB	Megabyte
Min	Minute
P	Leistung
P _{Bz}	Leistung der Brennstoffzelle
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
POLYCOM	Eigename
PSI	Paul-Scherrer-Institut
SCap	Superkondensatoren
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung





1 Einleitung

In der Schweiz werden Telekommunikationsdienste über Mobilfunkanbieter angeboten. Die Telekommunikation von Kritischen Infrastrukturen (KI), zu denen die Behörden und Organisationen für Rettung und Sicherheit (BORS) gehören, wird ergänzend über das Schweizer Sicherheitsfunknetz POLYCOM¹ sichergestellt. Die Gewährleistung einer zuverlässigen Kommunikation hat im Alltag und für die Ausübung von Sicherheitsleistungen eine sehr hohe Bedeutung. Die meisten der in diesem Bereich eingesetzten Telekommunikationssysteme werden deshalb mit Hilfe von Notstromanlagen gegen unerwartete Stromausfälle abgesichert.

Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Kommunikation in Krisenfällen zu. Bei einem Ausfall können gravierende Konsequenzen für die Sicherheit der Bevölkerung entstehen, weshalb bei Stromausfällen die Aufrechterhaltung des Sicherheitsfunknetzes eine Grundbedingung ist. Um allfällige Mängel dieser wichtigen Funktion aufzudecken, hat der Bund 2014 eine flächendeckende Sicherheitsverbundübung durchführen lassen. Erkenntnisse aus diesen Übungen wurden 2017 im 'Bericht zur Zukunft der Alarmierungs- und Telekommunikationssysteme für den Bevölkerungsschutz' formuliert, gemäss diesem 'die Sicherheit und Verfügbarkeit der Telekommunikationssysteme zu verbessern ist, damit diese insbesondere gegenüber ... Stromausfällen ausfallsicherer als bisher sind². Ein langanhaltender Stromausfall mit einem Ausfall der Kommunikation hat gemäss dem Technischen Risikobericht von 2015 schwere Auswirkungen, da die Abhängigkeit von Dienstleistungen, die diese Kritischen Infrastrukturen erbringen, zukünftig ansteigen wird³. Die Kantone sind deshalb aufgefordert ein operatives Konzept auszuarbeiten, welches bei einem Stromausfall den Betrieb des POLYCOM Funknetzes für bis zu 72 Stunden respektive drei Tage gewährleistet.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen können Brennstoffzellensysteme einen wichtigen Beitrag leisten. Brennstoffzellen sind effiziente Energiewandler, die unter Zufuhr von Wasserstoff Gleichstrom erzeugen. Als herkömmliche Technologie werden Bleibatterien zur Überbrückung kurzer Ausfallzeiten eingesetzt, für länger anhaltende Stromausfälle Diesel- oder Benzingeneratoren. In Ergänzung oder als Ersatz dieser bekannten Technologien versprechen Brennstoffzellen technische und ökologische Vorteile. Sie arbeiten im Gegensatz zu Diesel- oder Benzingeneratoren leise, mit einem hohen elektrischen Wirkungsgrad und ohne lokale Emissionen. Als Ersatz für fossile Energieträger kann Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen dabei helfen, den allgemeinen CO₂-Ausstoss zu verringern und damit zur Umsetzung der Energiestrategie 2050⁴ beitragen.

In Deutschland wird der Einsatz von Brennstoffzellensystemen für Kritische Infrastrukturen über das Regierungsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie gefördert. Mit diesem Programm sollen Investitionen in längerfristig wenig zukunftsfähige Infrastrukturen vermieden werden⁵.

¹ Polycom ist das flächendeckende Sicherheitsfunknetz der Behörden und Organisationen für Rettung und Sicherheit (BORS). Es ermöglicht den Funkkontakt der Organisationen Grenzwacht, Polizei, Feuerwehr, sanitätsdienstliches Rettungswesen, Zivilschutz und unterstützende Verbände der Armee. Polycom hat heute insgesamt rund 55'000 Nutzer und wird von diesen täglich eingesetzt. (Quellen: <https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/kommsysteme.html>)

² Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS): Bericht zur Zukunft der Alarmierungs- und Telekommunikationssysteme für den Bevölkerungsschutz; S. 30, 29.09.2017.

³ Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS): Katastrophen und Notlagen Schweiz, Technischer Risikobericht, S. 39, 30.06.2015.

⁴ Die 'Energiestrategie 2050' wurde im Jahr 2017 vom Schweizer Stimmvolk gutgeheissen. Neben dem Verzicht auf den Bau neuer Kernkraftwerke sieht die Energiestrategie vor, bis zum Jahr 2050 vor, den CO₂-Ausstoss um das Fünffache zu reduzieren. Die Ziele sollen erreicht werden durch eine Senkung des Energieverbrauchs, der Erhöhung der Energieeffizienz und durch die Förderung erneuerbarer Energien. (Quelle: <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/energie/energiestrategie-2050.html>)

⁵ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 – 2026: S. 13, 30.09.2016.



2 Ausgangslage

2.1 Hintergrund / Stand der Technik

Zur Bereitstellung einer vom Netz unabhängigen lokalen Stromversorgung wird zwischen Stromerzeugern, Notstromanlagen und Unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlagen (USV) unterschieden. Die Aggregate unterscheiden sich durch die Art und den Zweck der Installation. Während Stromerzeuger mobil und übergangsweise für z.B. Grossanlässe wie Konzerte oder Sportveranstaltungen eingesetzt werden, sind Notstromanlagen fix installiert und müssen regelmässig gewartet werden. Die höchsten Anforderungen muss eine USV erfüllen. Es darf kein Versorgungsunterbruch entstehen und Spannungsverzerrungen müssen vermieden werden. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen herkömmlichen Anwendungen und Notstromlösungen im Überblick.

Verwendung/Zweck	Herkömmliche Stromerzeuger	Installation	Einsatz/Anforderung
Stromerzeuger	Diesel- oder Benzingenerator	Mobil	Einfache, mobile und flexible Aufstellung; werden oft für Anlässe eingesetzt
Notstromversorgung	Batteriespeicher in Kombination mit Diesel- oder Benzingenerator	Fix installiert: Batterien Mobil: Diesel- oder Benzingenerator	Generatoren für länger anhaltende Notstromversorgung; kurzer Versorgungsunterbruch wird toleriert
Unterbrechungsfreie Notstromversorgung USV	Batteriespeicher in Kombination mit Diesel- oder Benzingenerator	Fix installiert: Batterien Mobil: Diesel- oder Benzingenerator	Kein Versorgungsunterbruch Keine Spannungsverzerrungen

Tabelle 1: Überblick über verschiedene Anwendungen lokaler Stromerzeuger.

Für alle drei Einsatzbereiche sind Brennstoffzellen in Kombination mit einem Brennstoff eine Alternative. Brennstoffzellen können mit Wasserstoff, mit Methanol oder mit Erd- oder Biogas betrieben werden, wobei für die beiden letztgenannten zusätzlich ein Reformier vor Ort eingesetzt werden muss. Bei den bereits kommerziell erhältlichen Produkten hat sich vor allem der Brennstoffzellentyp PEM⁶ in Kombination mit gasförmigem Wasserstoff durchgesetzt.

International gibt es verschiedene Hersteller, die wasserstoffbetriebene PEM-Brennstoffzellen-Backup-Lösungen auf dem Markt anbieten. Die kanadischen Hersteller Ballard Power Systems und Hydrogenics sind führende Anbieter in diesem Sektor und haben weltweit in verschiedenen Ländern Niederlassungen. Ballard hat mit der FCgen H2PM eine Backup-Lösung im Leistungsbereich bis 5 kW⁷ im Portfolio. Hydrogenics bietet mit der HyPM-Serie⁸ Brennstoffzellenmodule für einen

⁶ PEM Polymer-Elektrolyt-Membran

⁷ <http://www.brennstoffzelle-energie.de/index.php/fcgen-h2pm/> (Abfrage März 2019)

⁸ <https://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/stationary-stand-by-power/telecom-data-centre-backup-power/> (Abfrage März 2019)



kundenseitigen Rackeinbau an. Die Firma PlugPower, ein amerikanischer Brennstoffzellenspezialist, hat im Jahr 2014 die Technologie der PEM Notstromlösung des Herstellers ReliOn aufgekauft⁹, die nun unter dem Namen GenSure¹⁰ auf dem Markt erhältlich ist. Ein System von ReliOn wird an einem Projektstandort eingesetzt.

Als europäische Anbieter wasserstoffbetriebener Brennstoffzellen für den Notstrombereich sind im deutschsprachigen Raum FutureE GmbH und Proton Motor Fuel Cell GmbH zu nennen. FutureE ist in diesem Projekt mit dem System Jupiter an vier Standorten vertreten und hat in Deutschland bereits zahlreiche Systeme in den Bundesländern Baden-Württemberg und Brandenburg für den Behördenfunk installiert. In Brandenburg werden 115 Brennstoffzellennotstromsysteme¹¹ eingesetzt. Auch die Firma Proton Motor kann Referenzanlagen für den Behördenfunk vorweisen und bietet Notstromlösungen für Kritische Infrastrukturen im Outdoor- und Indoor-Bereich zwischen ein und acht Kilowatt an¹². Des Weiteren sind in Europa die italienische Firma Electro Power Systems und der schwedische Hersteller Power Cell am Markt vertreten. Letzterer wird sich nach aktuellen Meldungen neu auf den Mobilitätsmarkt ausrichten¹³. In der Schweiz werden Brennstoffzellensysteme des Schweizer Brennstoffzellenhersteller Swiss Hydrogen für die Notstromlösung auf der ESI-Plattform¹⁴ am Paul-Scherrer Institut (PSI) eingesetzt. In einem 2018 abgeschlossenen Projekt mit der Firma ABB und der Hochschule Luzern – Technik & Architektur¹⁵ wurde ein System für eine 15 Kilowatt Notstromlösung getestet. Nach der Übernahme Ende 2017 durch den französischen Automobilzulieferer Plastic Omnium konzentriert sich Swiss Hydrogen vor allem auf mobile Anwendungen. Alle europäischen Hersteller sind auf dem Weg zur Marktetablierung. Die Verkaufszahlen sind jedoch noch unterschiedlich und fluktuierend, so dass es aufgrund der oft angespannten finanziellen Situation viel Bewegung durch Firmen- oder Technologieaufkäufe gibt.

Hohe Investitionskosten waren und sind Hemmnisse für einen sicheren Markteintritt und viele Systemhersteller sind noch auf Projektförderungen und Investoren angewiesen. Zudem fehlen Langzeiterfahrungen mit der neuen Technologie, so dass potentielle Anwender im sensiblen Notstromumfeld prinzipiell zurückhaltend sind.

Es ist aber zu erwarten, dass der Bedarf an nachhaltigen Notstromlösungen steigt. Auf die Wichtigkeit von zuverlässigen Lösungen wurde schon in der Einleitung hingewiesen; zusätzlich tendiert der Markt zu höheren Leistungen und längeren Backup-Zeiten. Gemäss einer Studie des hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung von 2016 liegt das geschätzte weltweite Potential für Brennstoffzellen allein in der Telekommunikationstechnik bei über 4.5 Millionen Basisstationen¹⁶. Ein Wachstum in diesem Bereich wird mit über 10 Prozent pro Jahr geschätzt.

⁹ <https://www.iwr.de/news.php?id=25995>

¹⁰ <https://www.plugpower.com/industries/stationary/telecom/>

¹¹ <http://www.cleanpowernet.de/anwendung/bos-115-brennstoffzellensysteme-in-brandenburg/>

¹² <https://www.proton-motor.de/zero-emission-loesungen/> Landesentwicklung [brennstoffzelle/pm-module-s5-s8/](https://www.proton-motor.de/zero-emission-loesungen/pm-module-s5-s8/)

¹³ <https://www.powercell.se/en/newsroom/press-releases/detail/?releaseId=9D09953552F747C5>

¹⁴ <https://www.psi.ch/de/media/esi-plattform>

¹⁵ U. Trachte, P. Sollberger: Bundesamt für Energie BFE – 15 kW USV mit CH Brennstoffzelle, Januar 2019

¹⁶ Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und: Stationäre Brennstoffzellen-Anwendungen, Wiesbaden 2016, S. 13



2.2 Projektumfeld

In der Schweiz wurden zum Thema Notstromversorgung mit Brennstoffzellen bereits mehrere vom BFE¹⁷ ¹⁸ und eines von der EU geförderten Projekte durchgeführt¹⁹. Die fünf im aktuellen Projekt getesteten Systeme waren bereits im Rahmen von Vorgängerprojekten installiert. Dabei wurden die Brennstoffzellensysteme von den schon im vorherigen Kapitel erwähnten Firmen FutureE, Electro Power Systems und ReliOn eingesetzt. Je nach Anwenderbedürfnis und vorhandener Infrastruktur wurden die Systeme entweder als integriertes System in die bestehende Notstromanlage eingebunden oder als alleinstehendes System installiert.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung waren neun dieser Notstromsysteme in der Schweiz im Telekommunikationsbereich installiert. Für dieses nationale Folgeprojekt wurden fünf Systeme übernommen, die den Anforderungen der Betreiber entsprachen hatten. Die Leistung dieser Systeme beträgt zwischen zwei und sechs Kilowatt.

2.3 Motivation des Projekts

Nach guten Resultaten in den Vorgängerprojekten ²⁰, ²¹ sollten die Systeme ihre Praxistauglichkeit über einen weiteren Zeitraum von drei Jahren im Feld nachweisen. Zur Motivation trugen folgende Aspekte bei:

- Bisher gab es keine zuverlässigen Langzeitstudien im deutschsprachigen Raum für den Einsatz im Notstrombereich.
- Erfahrungen mit der Serviceverfügbarkeit für Brennstoffzellensysteme fehlen in der Schweiz, ebenso wie Erfahrungen mit der Wasserstoffinfrastruktur durch Zulieferpartner und Betreiberpersonal.
- Obwohl der Einsatz von Brennstoffzellen seit mehreren Jahren Vorteile im Bereich der Notstromversorgung verspricht, ist der Marktdurchbruch noch nicht geschafft. Viele Anwender beobachten zuerst die Entwicklung der Technologie und die Resultate von Demonstrationsprojekten.
- In Bezug auf die Politik des Bundes kann die Brennstoffzellentechnologie einen Beitrag zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen leisten; vor allem im Hinblick auf die geforderte Drei-Tage-Autonomie der POLYCOM-Installationen. Des Weiteren könnte im Zusammenhang mit den Vorgaben an verdichtetes Bauen der Bedarf an geräuscharmen Notstromlösungen in Wohnquartieren und Industriearealen zukünftig steigen.

2.4 Ziele der Arbeit

Im Projekt sollten Erfahrungen im Langzeitbetrieb gewonnen und bewertet werden unter Einbezug von Unterhalts- und Wartungsaufwand. Während einem Zeitraum von über drei Jahren sollten Betriebsverhalten, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzellensysteme aufgezeigt werden. Die

¹⁷ U. Trachte, P. Sollberger: Bundesamt für Energie BFE - USV mit PEFC, Dezember 2015

¹⁸ U. Trachte, P. Sollberger: Bundesamt für Energie BFE – 15 kW USV mit CH Brennstoffzelle, Januar 2019

¹⁹ M. F. Serincan, U. Trachte, A. Graizzaro, A. Pilenga: FITUP project - Public report on test results, EU FP7/2007-2013, June 2014.

²⁰ FITUP - European Commission under Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU) / Demonstration project: „FITUP“: Fuel Cell Field Test Demonstration of Economic and Environmental Viability for Portable Generators, Backup and UPS Power System Applications

²¹ Bundesamt für Energie (BFE) / Forschungsprojekt „POLY-PuD – Demonstration mit hoher Visibilität im Bereich Unterbrechungsfreie Notstromanlagen mit PEM Brennstoffzellen“



unterschiedlichen Standorte und Umgebungsbedingungen der Systeme sollten berücksichtigt werden, um allenfalls Auswirkungen auf die Wartung festzustellen.

Ein Ziel war dabei die Erneuerung der Messeinrichtung zur Überwachung und Datenerfassung der Anlagen und die Ausrichtung der Datenverarbeitung für kontinuierliche Messungen (24 Stunden, sieben Tage). So können auch kurzfristige Stromausfälle erfasst werden. Zusätzlich sollte das kostenfreie Betriebssystem LINUX zum ersten Mal eingesetzt und in Bezug auf Stabilität bewertet werden.

Ein weiteres Ziel war darüber hinaus die Entwicklung eines neuen, alleinstehenden Notstromsystems mit Superkondensatoren als Startup Einheit, welches ohne die batteriegestützte Standard-USV an einem POLYCOM-Standort betrieben werden kann. Superkondensatoren sind im Vergleich zu Batterien unempfindlicher gegenüber Temperaturschwankungen und haben lange Lebenszeiten auch bei hohen Ladezyklen. Die Lade- und Entladezeiten erfolgen sehr schnell. Zusätzlich verspricht ein sogenanntes stand-alone System einen höheren Wirkungsgrad des Gesamtsystems.

Zusätzlich sollten Erfahrungen mit der Serviceverfügbarkeit in der Schweiz und dem Umgang mit der Wasserstoffinfrastruktur durch Zulieferpartner und Betreiberpersonal gewonnen werden. Potentielle Schwachstellen im Service und fehlendes Knowhow sollten aufgezeigt werden.

Die konkreten messbaren Ziele sind wie folgt:

- Die Zuverlässigkeit des Systems ist grösser als 99 %.
- Die Reaktionszeit²² ist kleiner 5 ms.
- Bei Testende ist keine beträchtliche Beschädigung der Brennstoffzellensysteme feststellbar. Das heisst, die Brennstoffzellensysteme sind noch funktionsfähig.

²² Die Reaktionszeit ist die Zeitspanne, bis das Notstromsystem die Last übernimmt.



3 Vorgehen und Methode

3.1 Vorgehen und Arbeitsorganisation

Die Aufteilung der Arbeitspakete zwischen den Projektpartnern zeigt eine Übersicht in Tabelle 2. Die einzelnen Aufgaben werden in den nachfolgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

Nr.	Arbeitspaket / Workpackage	Verantwortlich	Bemerkung
1	Projektleitung	HSLU T&A	Organisation, Projektcontrolling, Berichterstellung, Dissemination
2	Erneuerung und Erweiterung Messequipment	HSLU T&A	Erweiterung auf 24 Std / 7 Tage Messung; Implementierung des Betriebssystems LINUX
3	Umbau stand-alone System am Standort Nidwalden	HSLU T&A BKPNW	Mithilfe eines Elektrikers vor Ort
4	Testdurchführung der ferngesteuerten Stromausfallsimulationen	HSLU T&A Swisscom	HSLU T&A informiert vor Durchführung der Simulationen die jeweils verantwortlichen Kontrollzentren. Swisscom wählt aus operativen Gründen den Zeitpunkt der Testdurchführung selbst
5	Messdatenerfassung, Auswertung und Analyse	HSLU T&A alle	Basierend auf der Software DIADEM, Erstellung eigener Skripts für Auswertung grosser Datenmengen

Tabelle 2: Aufteilung der Arbeitspakete.

3.2 Standorte

Die Brennstoffzellensysteme wurden an unterschiedlichen Standorten aufgestellt unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Ein System befindet sich auf dem Dach eines grossen Verwaltungsgebäudes im Stadtgebiet, das zweite auf einer Bergstation in einer Höhe von über 2400 Meter über Meer. Ein weiteres System ist im Aussenbereich direkt neben dem Tunneleingang einer Autobahn installiert und zwei Brennstoffzellen werden in einem Serviceraum auf dem offenen Feld betrieben. Die Luftqualität für den Betrieb der Anlagen ist ganz unterschiedlich.

Die Servicerräume sind klimatisiert, da in ihnen auch die Batterien untergebracht sind, die je nach Betriebskonzept entweder für den Startprozess oder zur Abdeckung einer ersten Notstromphase eingesetzt werden.

Alle Systeme werden mit Wasserstoff aus Druckgaszylindern betrieben, die in einem Gasschrank gelagert sind. In der Regel ist der Schrank im Aussenbereich platziert; hervorzuheben ist Standort 5, an welchem sowohl das Brennstoffzellensystem als auch die Wasserstoffversorgung im Innenraum installiert sind.



In Tabelle 3 sind die Standortspezifikationen und die Leistungsdaten der Brennstoffzellensysteme zusammengefasst dargestellt.

Nr	Standort	Anwender	Anwendung	Installation		P _{BZ} max	Installations- umgebung
				BZ	H ₂		
1	Luzern	Swisscom AG	Telecom	Indoor	Outdoor	6 kW	Gebäudedach in Stadtgebiet
2	Graubünden	Swisscom AG	Telecom	Indoor	Outdoor	6 kW	Bergstation 2400 m ü. M.
3	Nidwalden 1	BKPNW	POLYCOM	Indoor	Outdoor	4 kW	Feld, Wiese
4	Nidwalden 2	BKPNW	POLYCOM	Outdoor	Outdoor	4 kW	Neben Autobahn- tunneleinfahrt
5	Bern	Kantons- polizei	POLYCOM	Indoor	Indoor	2 kW	Feld, Wiese

Tabelle 3: Standortspezifikationen der Systeme für die Feldtests.

Durch die unterschiedlichen Standortspezifikationen sind auch die Rahmenbedingungen für den Transport der Wasserstoffzylinder verschieden. Für drei Stationen können die Gaszylinder über asphaltierte Strassen oder Feldwege geliefert werden. Hingegen müssen die Gaszylinder für das System auf dem Dach über Lift und Treppenhaus transportiert werden. Für das System auf der Bergstation werden die Zylinder über eine Standseilbahn angeliefert.

Die folgenden Abbildungen zeigen die verschiedenen Standorte der Basisstationen sowie die Aufstellung der Wasserstoffspeicher.



An Standort 1 wird die Brennstoffzelle für die Notstromversorgung einer Telecom-Basisstation eingesetzt. Basisstation und Brennstoffzelle sind in einem Serviceraum im obersten Stockwerk eines Verwaltungsgebäudes im Stadtgebiet installiert, die Wasserstoffversorgung ist im Freien platziert. Der Zylindertransport erfolgt über Aufzug und Treppenhaus, wobei die letzte Etage nur mit einem Flaschenzug zu bewältigen ist.



Abbildung 1: Standort 1, Telecom, Gebäude im Stadtgebiet; Aufstellung der Wasserstoffzylinder und Transport mit Flaschenzug

An Standort 2 ist die Brennstoffzelle auf einer Höhe von 2400 Meter über Meer in einem Serviceraum installiert. Der Wasserstoffschränk für sechs Gaszylinder ist im Aussenbereich in einer Nische platziert. Der Zylindertransport erfolgt über eine Standseilbahn.



Abbildung 2: Standort 2, Telecom, Bergstation mit Antenne; Aufstellung der Wasserstoffzylinder und Transport



An Standort 3 ist die Brennstoffzelle für das POLYCOM Netz auf einem offenen Feld in einem Serviceraum installiert. Der Wasserstoffschränk für vier Gaszylinder ist im Freien platziert auf einem dafür gegossenen Betonsockel. Der Zylindertransport erfolgt mit einem Lieferwagen über eine gut ausgebaute Bergstrasse. Die letzten zwanzig Meter müssen die Zylinder einzeln auf einem schmalen Feldweg mit einem Transportwagen zum Schrank gebracht werden.



Abbildung 3: Standort 3, POLYCOM Nidwalden 1, Station im Feld, Aufstellung der Wasserstoffzylinder und Transport

An Standort 4, dem zweiten Standort für das POLYCOM Netz Nidwalden, sind sowohl das Brennstoffzellensystem als auch die Wasserstoffversorgung im Aussenbereich platziert; direkt neben einem Autobahntunneleingang. Der Wasserstoffschränk fasst vier Gaszylinder, der Zylindertransport erfolgt über eine gut ausgebaute Strasse mit einem Lieferwagen.



Abbildung 4: Standort 4, POLYCOM Nidwalden 2, Station am Tunneleingang, Aufstellung von BZ und Wasserstoffzylinder im Freien



Der Standort 5 ist auch eine POLYCOM Station auf dem offenen Feld. An diesem Standort sind sowohl das Brennstoffzellensystem als auch der Wasserstoffschränk im Innenraum installiert. Der Gasschränk ist für drei Zylinder dimensioniert und der Zylindertransport erfolgt mit einem Lieferwagen über eine Feldstrasse, die im Winter oder bei starkem Regen schwierig zu befahren ist.



Abbildung 5: Standort 5, POLYCOM Bern, Station auf dem Feld mit Serviceraum, Aufstellung der BZ und Wasserstoffzylinder indoor

3.3 Brennstoffzellen

Die insgesamt fünf Brennstoffzellensysteme sind von zwei verschiedenen Herstellern aus dem EU respektive US-Raum. Der Brennstoffzellentyp basiert auf der Polymerelektrolytmembran (PEM)-Technologie. Alle Systeme sind luftgekühlt und können remote angesteuert werden.

Für die Telecom Anwendungen werden Brennstoffzellensysteme mit einer Leistung von sechs Kilowatt eingesetzt, für die POLYCOM Systeme Nidwalden mit vier Kilowatt und für das System am Standort Bern mit zwei Kilowatt. Die Brennstoffzellenstapel sind modular aufgebaut und parallelgeschaltet und können remote überwacht werden.

Bei den vier erstgenannten Systemen liefern die Modulen eine maximale elektrische Leistung von je zwei Kilowatt, beim letztgenannten System wird die Gesamtleistung mit zehn 200 Watt Modulen erreicht. Der Grundgedanke hinter dieser kleinmodularen Aufteilung ist die Gewährleistung einer weiterhin hohen Gesamtleistung, falls einmal ein Modul ausfällt.

Bei allen Systemen wird Wasserstoff aus Druckgasflaschen als Brennstoff verwendet, sowie Sauerstoff aus der Umgebungsluft. Die technischen Spezifikationen zusammengefasst wie folgt:

Leistung max.	2 – 6 kW
Spannung	± 54 VDC
Wasserstoff	Qualität 4.5
Sauerstoff	aus Umgebungsluft
Kühlung	luftgekühlt
Monitoring	remote



Folgende Abbildungen zeigen die Brennstoffzellenracks an verschiedenen Standorten mit den eingebauten Systemen.



Abbildung 5: Brennstoffzelle 6 kW, Innenaufstellung, Standort 1 -2.



Abbildung 6: Brennstoffzelle 4 kW, Aussenaufstellung, Standort 4.



Abbildung 7: Brennstoffzelle 2 kW, Innenaufstellung, Standort 5 (Foto: Benning Schweiz).

Der Hersteller des Brennstoffzellensystems aus Abbildung 7 kommt aus dem US-Raum. Der USV-Lieferant hat das System in seine Standard-USV integriert. Dazu wurden die Spannungsschnittstellen definiert und die Steuerung der jeweiligen Spannungsübernahme sowie die Alarmeinbindung erfolgte über die Steuerungseinheit der USV. Die Brennstoffversorgung wurde über einen dritten Schrank bereitgestellt, der direkt neben den beiden anderen Schränken platziert ist. Dadurch sind kurze Wege für die Gasverteilung gewährleistet. Nachfolgende Abbildung zeigt die Aufstellung der drei Schrank-einheiten.



Abbildung 8: Innenraum-Installation mit Standard-USV, Brennstoffzelle und Gasversorgung (Foto Benning Schweiz).



Die Idee hinter diesem Konzept ist ein für den Anwender vereinfachter einheitlicher Aufbau, sowie die Absicht, dass Komponenten und Service aus einer Hand angeboten werden können.

3.4 Installationskonzepte und Systemarchitektur

Für die fünf Anlagen wurde je nach Standortvoraussetzungen und Anwenderbedürfnissen eine unterschiedliche Systemarchitektur gewählt. Es gibt zwei verschiedene Konzeptvarianten, die im Folgenden näher beschrieben werden:

Konzept 1 – Last ist direkt am Netz angeschlossen:

Bei diesem Konzept wird die Last direkt über die Netzspannung versorgt, die Brennstoffzellen-USV ist im Standby. Erst bei einem Netzunterbruch schaltet sich die USV automatisch zu. Die Startup-Batterien werden über die Brennstoffzelle wieder geladen. Die Notstromversorgung wird hier als allein-stehendes (stand-alone) System eingesetzt, ohne Spannungsübernahme durch eine Standard-USV. Dieses Konzept wird an den beiden Standorten der Telekom-Mobilfunkantennen angewendet.

Konzept 2 – Last ist über eine USV angeschlossen

Bei diesem Konzept ist die USV ans Netz angeschlossen und die Last wird über die USV-Ausgangsspannung versorgt. Netzspannungs- und Netzfrequenzschwankungen werden bei dieser Variante von der Last entkoppelt. Die POLYCOM Installationen der Standorte 3 und 5 sind gemäss diesem Konzept angeschlossen.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen jeweils eine beispielhafte Systemarchitektur der beiden Installationskonzepte.

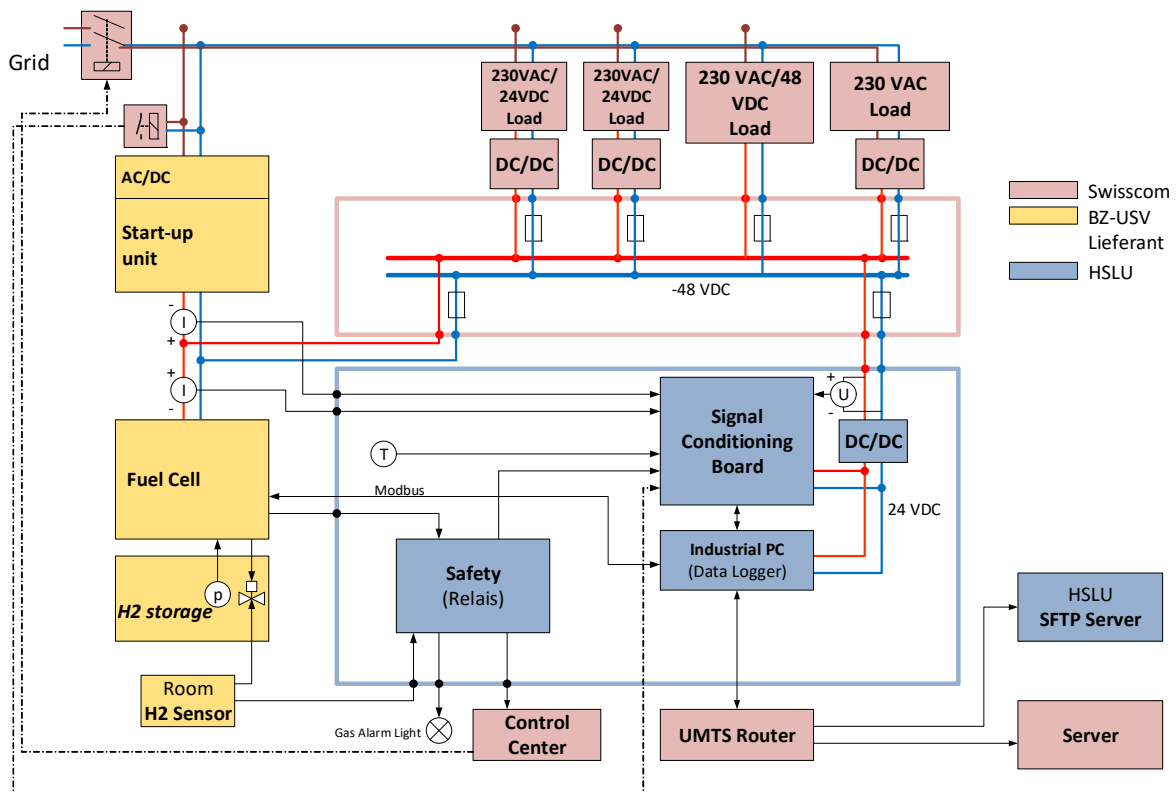


Abbildung 9: Konzept 1: Layout der Standorte 1 und 2 mit Anschluss der Lasten ans Netz; BZ-USV ist im Standby.

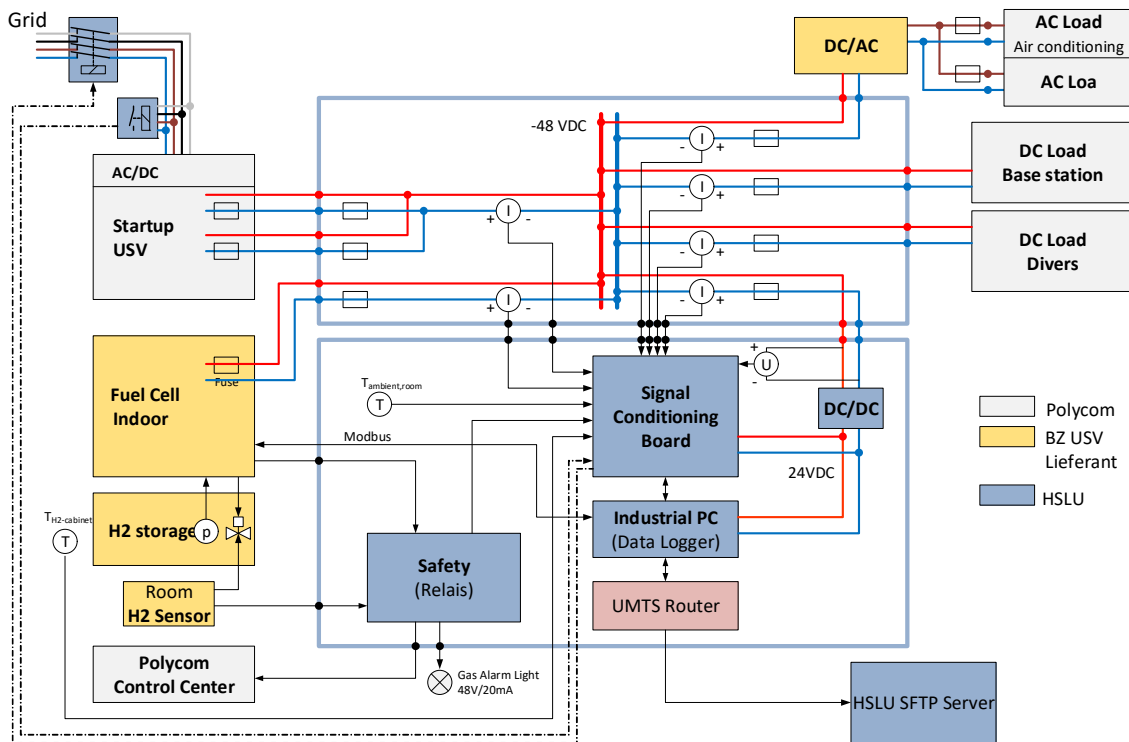


Abbildung 10: Konzept 2 Layout Standort 3; Anschluss der Last an die BZ-USV.

Hervorzuheben ist noch eine Variante von Konzept 2, die im folgenden Schaubild gezeigt wird und an Standort 4 realisiert wurde, für welchen ein alleinstehendes System ohne Standard-USV entwickelt wurde.

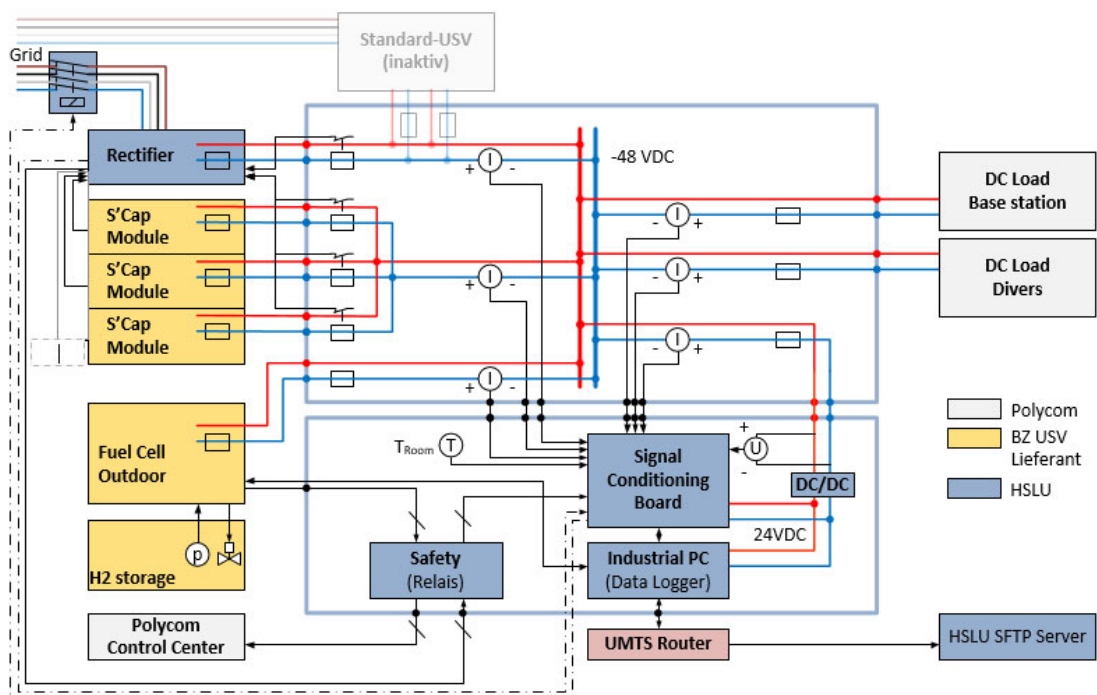


Abbildung 11: Variante von Konzept 2: Layout Standort 4 mit Anschluss der Last ans Netz und BZ-USV im Standby, Startup-Einheit mit Superkondensatoren.



Als Projektziel wurde an diesem Standort ein Umbau von einem integrierten System mit einer Standard-USV in ein alleinstehendes System geplant. Das System wurde im Projekt realisiert in Betrieb gesetzt und wird im folgenden Unterkapitel näher beschrieben.

Allen Installationskonzepten ist gemeinsam, dass das Ein- und Ausschalten der Brennstoffzellen über die voreingestellten Spannungsschwellen des DC Stromkreises definiert ist. Über diese Spannungsschwellen lässt sich die Zeitspanne vom Netzausfall bis zum Start der Brennstoffzelle steuern²³. Die Schwellwerte können variiert und den jeweiligen Bedürfnissen angepasst werden. Dadurch ergeben sich auch unterschiedliche Betriebskonzepte, wie in Kapitel 3.6 noch erläutert wird.

3.5 Umbau in stand-alone System mit Superkondensatoren

Bisher war an beiden POLYCOM-Standorten Nidwalden zusätzlich zum Brennstoffzellensystem die standardmässig installierte USV mit Bleibatterien im Einsatz. Die Brennstoffzelle war in Ergänzung zur Standard-USV installiert. Aufgrund der guten Testergebnisse aus dem Vorgängerprojekt und der nachgewiesenen hohen Zuverlässigkeit des Brennstoffzellensystems wurde an Standort 4 die Standard-USV vom System entfernt und durch eine auf Superkondensatoren basierende Startup-Einheit ersetzt.

Für den Umbau musste eine komplett neue Systemarchitektur entwickelt werden (wie in Abbildung 11 gezeigt), da ohne die bestehende USV auch verschiedene notwendige Funktionen verloren gehen. Dazu gehören zum Beispiel die Versorgung der Last im Normalbetrieb, das Laden des Startup-Speichers und die Ladungserhaltung sowie die Überwachung aller Systemkomponenten und die Alarmierung im Fehlerfall. Ein neuer Gleichrichter wurde evaluiert, der spezifisch für die speziellen Anforderungen des Brennstoffzellen-Superkondensatoren-Systems konfiguriert und ins System integriert werden musste.

Die Superkondensatoren überbrücken den Startvorgang der Brennstoffzelle in den ersten zwei Minuten. Vorteile der Superkondensatoren sind ihre hohe Leistungsdichte, die schnellen Lade- und Entladezeiten und die lange Lebensdauer im Vergleich zu Bleibatterien. Nach dem Start der Brennstoffzelle lädt diese die Superkondensatoren in rund einer Minute wieder auf.

Des Weiteren musste für den Umbau die Software für die Integration von Gleichrichter und Superkondensatoren in das Brennstoffzellensystem neu programmiert und getestet werden. Nachfolgende Abbildungen zeigen die im Messschrank eingebauten Einschübe mit Superkondensatoren und den Gleichrichter.



Abbildung 12: Rackeinschübe

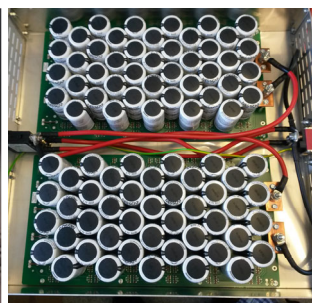


Abbildung 13: Eingebaute Superkondensatoren



Abbildung 14: Wechselrichter

²³ Die Zeitspanne bis zum Start der Brennstoffzelle wird über die Spannungsschwelle als Richtwert geregelt. Die genaue Zeit hängt u.a. vom Ladezustand des Batteriepacks ab, welche in der Regel nicht überwacht wird.



Mit diesem Umbau konnte das neue System unabhängig von der bestehenden Standard-USV betrieben werden. Auch das Spannungskonzept mit den unterschiedlichen Spannungsbereichen von Brennstoffzelle, Superkapazitäten und Verbrauchern²⁴ musste dafür komplett neu überarbeitet werden.

Eine Herausforderung war dabei die Vereinbarung der unterschiedlichen Spannungskurven von Superkondensatoren und Brennstoffzelle. Die elektrische Nennlast der Verbraucher an diesem Standort liegt mit 500 Watt relativ niedrig im Vergleich zur geforderten Maximallast von zwei Kilowatt. Da ein Betrieb der Brennstoffzelle unter verhältnismässig kleinen Lasten für die Lebensdauer des Stacks ungünstig ist, musste ein geeigneter Betriebspunkt überprüft und definiert werden.

Ein Schaubild der neu installierten Komponenten in das Notstromsystem mit Last, Brennstoffzelle und Gasversorgung ist in nachfolgender Abbildung zu sehen.

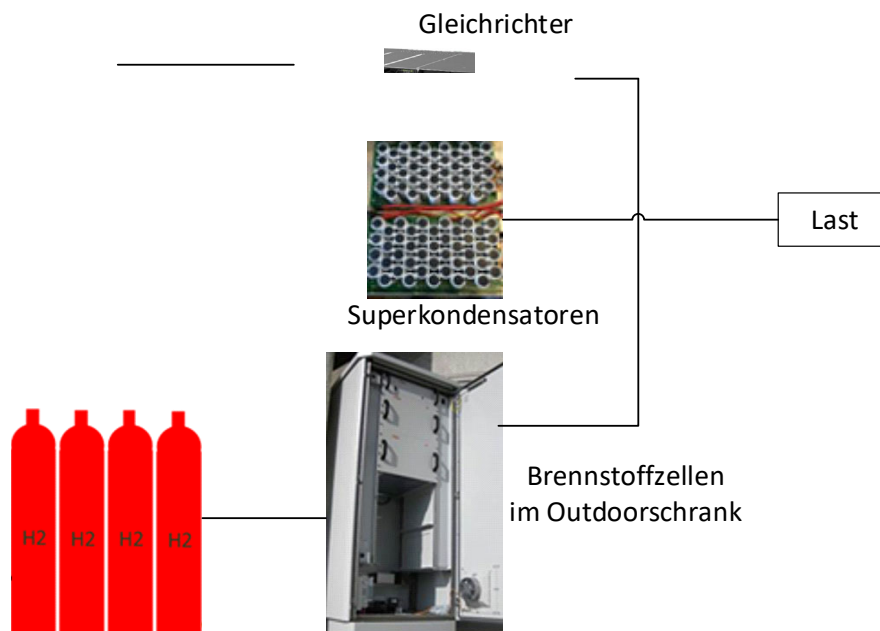


Abbildung 15: Stand-alone System mit Gleichrichter (AC/DC Wandler), Superkapazitäten als Startup-Einheit, Brennstoffzelle und Wasserstoffversorgung an Standort 4.

Bei der Inbetriebsetzung waren alle involvierten Partner beteiligt: die Betreiber, der für den Unterhalt der konventionellen Notstromanlage zuständige Servicepartner, der beauftragte Elektriker und die Projektpartner der Hochschule Luzern – Technik & Architektur. Dank der guten Planung konnte das System ohne weitere Anpassungen erfolgreich in Betrieb gesetzt werden.

²⁴ Das Equipment muss uneingeschränkt in einem Spannungsbereich von 40.5 bis 57 VDC arbeiten.



3.6 Betriebskonzepte

Die Betriebskonzepte wurden durch den jeweiligen Anwender festgelegt und sind im Folgenden kurz beschrieben:

Standorte 1 und 2, Telekommunikation:

- Startup Einheit mit Standardbatteriepacks (Bleibatterien) des Anwenders, integriert in das Brennstoffzellensystem, wobei das Batteriemanagement durch das Brennstoffzellensystem übernommen wird. Die Batterien sind so ausgelegt, dass sie die Leistung auch für die Anlaufströme bereitstellen.
- Die Brennstoffzelle übernimmt die Last direkt nach Stromausfall, es ist keine zusätzliche USV installiert.

Standort 3, POLYCOM Nidwalden 1:

- Startup Einheit mit Batteriepacks (Bleibatterien) des Standard-USV Herstellers²⁵, die in das Rack der USV integriert sind.
- Die Brennstoffzelle übernimmt die Last wenige Minuten nach Stromausfall²⁶, abhängig von den voreingestellten Spannungsschwellen. Je nach Batteriekapazität könnte die Batterie auch bei Entleerung des Gasspeichers noch Strom bereitstellen.

Standort 4, POLYCOM Nidwalden 2:

- Die Startup Einheit wurde neu entwickelt mit Gleichrichter und Superkondensatoren. Die Superkondensatoren sind ausgelegt für die Anlaufströme und für die Zeit bis zum Start des Brennstoffzellensystems.
- Die Brennstoffzelle übernimmt die Last direkt nach einem Stromausfall.
- Wasserstoff wird für eine Autonomiezeit von zirka 72 Stunden gemäss den Anforderungen des Bundes bereitgestellt.

Standort 5, POLYCOM Bern:

- Als Startup Einheit wurden die (Blei-) Batteriepacks des Standard-USV Herstellers mit hoher Kapazität gewählt, damit die Batterien Netzausfälle von acht bis zehn Stunden übernehmen.
- Die Brennstoffzelle übernimmt die Last bei Stromausfall erst nach dieser Zeit, wenn die Batterie eine sehr tiefe Spannung erreicht hat. Die Spannungsschwellen wurden für diese Betriebsweise sehr tief voreingestellt.

Dieses Betriebskonzept wurde gewählt, da die statistisch häufigen Stromausfälle nur wenige Minuten dauern und die Batterien diese Zeit problemlos überbrücken können. Wasserstoff soll nur für länger anhaltende Stromausfälle eingesetzt werden. Dadurch wird Brennstoff gespart und der Aufwand für die Nachlieferung von Gaszylindern reduziert.

²⁵ Fa. Benning AG

²⁶ Diese Einstellung wurde gewählt, damit die Brennstoffzelle für die Tests innerhalb nützlicher Zeit startet.



3.7 Wasserstoffversorgung

An allen Standorten wird Wasserstoff verwendet, der in Druckgaszylindern gelagert wird. Die Zylinder sind in Gasschränken untergebracht, an vier Standorten im Freien, wie in Kapitel 3.2 schon erwähnt.

Die technischen Spezifikationen der Druckgaszylinder sind folgende:

Volumen: 50 Liter, 8.9 m³

Druck: 200 bar

Qualität: 4.5

Die Anzahl der Zylinder beträgt je nach Standortanforderung zwischen drei und sechs Zylinder. Die Autonomiezeiten variieren je nach Anzahl Zylinder, Batteriekapazität und Nennlast. Zur Entnahme des Wasserstoffs wurden unterschiedliche Konzepte gewählt:

Die Anschlussstränge der Zylinder sind eingeteilt in Hauptentnahme und Reservefunktion. Ein Zylinderwechsel sollte mit möglichst wenig Aufwand durchgeführt werden können. Der Zylinder, der für die standardmässigen Starts der Brennstoffzelle²⁷ verwendet wird sowie bei kurzen Stromausfällen, ist der Hauptzylinder. Die Reservezylinder kommen bei längeren Laufzeiten mit Notstrom zum Einsatz.

In folgender Tabelle sind die Spezifikationen der Wasserstoffversorgung an den einzelnen Standorten zusammengefasst.

Nr	Standort	Nennlast	Autonomiezeit bei Nennlast	Installation Gasschrank	Anzahl Zyl. (Haupt / Reserve)	Zugang für Anlieferung der Zylinder
1	Luzern	4.5 kW	18 h	Outdoor	6 (2/4)	Lift und Flaschenzug
2	Graubünden	3 kW	24 h	Outdoor	6 (2/4)	Bergbahn
3	Nidwalden 1	2.5 kW	19 h + 8 h Batterien	Outdoor	4 (1/3)	Bergstrasse, Feldweg
4	Nidwalden 2	0.6 kW	70 h	Outdoor	4 (1/3)	Autostrasse
5	Bern	0.7 kW	8 h Batterien + 50 h	Indoor	3 (1/2)	Feldweg

Tabelle 4: Spezifikationen der Wasserstoffversorgung der einzelnen Standorte

Ein weiterer Aspekt für das gewählte Entnahmekonzept und die Verschaltung der Ventile war die Gewährleistung einer unterbrechungsfreien Strom- und Gasversorgung im Notfall. Das heisst, ein allfälliger Zylinderwechsel sollte bei laufendem Brennstoffzellensystem möglich sein.

²⁷ Das sind die regelmässigen Tests, die je nach Hersteller alle 6 bis 8 Wochen zum Funktionserhalt des Stapels erforderlich sind.



3.8 Messkonzept

Das Messkonzept sieht vor, dass fernüberwachte Stromausfallsimulationen durchgeführt werden können. Dabei wurden die Testtypen im Wesentlichen aus den Vorgängerprojekten übernommen, aber die Testhäufigkeit wurde reduziert, da im Projekt das Betriebsverhalten und die Zuverlässigkeit im Standardeinsatz demonstriert werden sollte.

Die Messdaten wurden deshalb neu kontinuierlich aufgezeichnet, um eine gute Datengrundlage zur Bewertung des Betriebsverhaltens zu erhalten. Es wurden die Busspannung gemessen und die Spannungen und Stromstärken von Brennstoffzelle, Startup-Einheit, Umrichter und der verschiedenen Lasten. Des Weiteren wurden der Druck in den Gaszylindern erfasst sowie die Umgebungstemperaturen. Eine Tabelle mit allen aufgezeichneten Messparametern pro Standort befindet sich im Anhang.

Die Datenübertragung der Messwerte erfolgte automatisch auf einen Projektserver. Ein Messtupel wurde jede Sekunde über 24 Stunden täglich erfasst und abgespeichert. Da wie aufgezeigt zusätzlich zu den Brennstoffzellen-Kenngrößen auch anlagenspezifische Betriebsdaten erfasst wurden, ergab diese Art der Messung neue Erkenntnisse für den Betreiber betreffend Betrieb, Betriebskosten²⁸ und Betriebssicherheit des Standorts²⁹.

3.8.1 Messequipment

Ein Teil des Messequipments wurde aus den Vorgängerprojekten übernommen, es waren jedoch Erneuerungen notwendig. An allen fünf Standorten wurde das Messequipment auf den neuesten Stand gebracht und erweitert. Aufgrund von auslaufendem Support musste das auf den Mess-PCs laufende Betriebssystem Windows XP ausgetauscht werden. Ein Update auf eine neue Windows Version war mit den in die Jahre gekommenen PCs nicht mehr möglich. Zudem hatte sich die Verwendung von Windows im Dauereinsatz aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit nicht bewährt. Die Mess-PCs wurden deshalb auf ein Linux basiertes Betriebssystem umgerüstet. Hardwaremässig wurden die PCs mit einer Festplatte ausgerüstet, da sich die vorher verwendeten USB Sticks im Dauereinsatz auch als unzuverlässig erwiesen haben.

Die LabView Messsoftware wurde, basierend auf der Software aus einem anderen Projekt, neu implementiert. Die Weiterverwendung oder Anpassung der bestehenden Software kam aufgrund von fehlender Zuverlässigkeit und Konfigurierbarkeit nicht in Frage. Zudem wurden grundsätzlich andere Anforderungen an die neue Software gestellt. Eine wichtige neue Anforderung war die kontinuierliche Aufzeichnung der Messdaten, mit der es möglich wurde Langzeitauswertungen der Systeme zu erstellen und spontan auftretende Probleme (Komponentenausfälle, Gas-Leckagen) anhand der aufgezeichneten Messdaten nachzuvollziehen.

Es wurden zusätzliche Stromsensoren installiert, welche eine kontinuierliche Verbrauchsmessung an allen Standorten erlauben. Mit diesen neuen Daten kann der Betreiber eine individuelle und dem Standort entsprechende Dimensionierung der Notstromversorgung gewährleisten und eine allfällige Überdimensionierung identifizieren.

Die Messdatenübertragung auf einen zentralen Server wurde komplett automatisiert.

Der Umbau wurde mit den Betreibern und Nutzern der Anlagen koordiniert, um ein Minimum an Downtime für den Betrieb der bestehenden Anlage gewährleisten zu können.

²⁸ Z.B. Energieverbrauch für Heizung/Kühlung des Raums/Outdoor-Racks

²⁹ Vermutlich wird der Betrieb dieser Anlagen schweizweit zum ersten Mal auf diese Art erfasst (nach Meinung der Autoren).



3.8.2 Messdatenerfassung und Analysesoftware

Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Messdaten wurden grosse Datenmengen generiert. Abhängig von der Anzahl Messgrössen wurden pro Standort pro Tag etwa 12 Megabyte an Daten generiert. Insgesamt wurden im Verlauf des Projekts ohne Vorprojekte knapp 55 Gigabyte an Messdaten aufgezeichnet.

Kernfunktionen der Messdatenerfassung³⁰:

- Kontinuierliche Speicherung der Messdaten (ein Wert pro Sekunde, gemittelt) lokal und auf einem gesicherten Server
- Messdaten können in Echtzeit über einen gesicherten Fernzugriff visualisiert und überwacht werden.
- Auslösung von automatisierten Testsequenzen über einen gesicherten Fernzugriff
- Messgrössen/-kanäle sind per Konfigurationsdatei konfigurier- und erweiterbar (eine Beschränkung ergibt sich nur durch die Messhardware und den Speicherplatz³¹).

Nachfolgende Tabelle zeigt die erfasste Datenmenge pro Tag pro Standort.

Standort	Anzahl der Messkanäle	Daten pro Tag	Daten Total
Luzern	15 analog + 7 digital	8.7 MB/Tag	9.6 GB
Graubünden	18 analog + 7 digital	10.6 MB/Tag	12.6 GB
Nidwalden 1	15 analog + 7 digital	8.7 MB/Tag	10.5 GB
Nidwalden 2	19 analog + 7 digital	12.1 MB/Tag	12.3 GB
Bern	8 analog + 11 digital	7.7 MB/Tag	7.4 GB

Tabelle 5: Generierte Datenmengen pro Tag pro Standort

Für die Auswertung wurde DIAdem³² von National Instruments verwendet. DIAdem erlaubt nicht nur die einfache Visualisierung von Daten sondern auch eine automatisierte, scriptbasierte Datenanalyse, ohne die eine Auswertung solcher Datenmengen nicht möglich wäre. Es wurden zum Beispiel Scripts erstellt welche es erlauben, aus der Gesamtmenge von Messdaten einzelne Tests zu identifizieren und zu visualisieren, eine Systemübersicht der Brennstoffzellenkenndaten über die Zeit zu extrahieren oder die Messdaten innerhalb eines gewissen Datumsbereichs direkt zu visualisieren.

Kernfunktionen der Datenauswertung mit DIAdem:

- Suchen, Indizieren, Darstellen und Auswerten von Tests/Netzausfallsimulationen in der Gesamtmenge aller Daten innerhalb Sekunden
- Darstellen und Auswerten von Messdatenbereichen bis zu etwa 6 Monaten (begrenzt durch Arbeitsspeicher des Computers)
- Extraktion einer Langzeit-Übersicht und Langzeitkennwerten pro Standort aus der Gesamtmenge von Messdaten

³⁰ Eine Bedienungsanleitung kann auf Anfrage ausgehändigt werden.

³¹ Im Anhang werden die getroffenen Annahmen zur Speicherplatzauslegung aufgezeigt.

³² Eigenname der Software



3.8.3 Testdurchführung und Testprogramm

Über eine Fernsteuerung wurden alle zwei bis drei Monate Stromausfälle simuliert. Ausführliche monatliche Stresstests hatten die Systeme bereits in den Vorgängerprojekten problemlos bestanden. Die im Projekt durchgeführten Tests dienten der Funktionskontrolle oder wurden gemäss Herstellerangaben regelmässig in Betrieb gesetzt, damit der Wasserhaushalt in den einzelnen Zellen³³ in Ordnung und die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Stapels erhalten bleibt. Eine Ausnahme bildete das System an Standort 5, welches aus diesem Grund einen nach Herstellerempfehlungen frei programmierbaren Startautomatismus hat.

Die Testautomatik war so programmiert, dass die im Testtyp genannte Zeit immer der Laufzeit des Brennstoffzellensystems entspricht. Das heisst bei einem 30 Minuten Test ist die Brennstoffzelle 30 Minuten in Betrieb respektive bei einem Vier-Stunden-Test läuft das System vier Stunden. Dadurch kann die Stromausfallzeit – ausser bei den Stresstestzyklen- deutlich länger sein, abhängig von der Kapazität der gewählten Startup-Einheit und vom Betriebskonzept des Anwenders. Der Zeitpunkt der Testdurchführung erfolgte in Absprach mit den Anwendern.

Folgende Testtypen wurden durchgeführt:

- Funktionstest 30 Minuten
- Referenztest 1 Stunden
- Langanhaltender Stromausfall 4 Stunden
- Stresstest 1 Kurze Stromausfälle von 2 Minuten nacheinander
- Stresstest 2 Kurze Stromausfälle von 5 Minuten nacheinander

Die Stresstests wurden unregelmässig zur Funktionskontrolle durchgeführt. Die Zyklen mit kurz nacheinander folgenden Stromausfällen entsprechen den Erfahrungen der Anwender. In folgenden Abbildungen werden die beiden Stresstestzyklen graphisch dargestellt.

Stresstest 1:

Zwei Zyklen nacheinander mit 2 Min off, 2 Minuten on, 30 Min off, 1 Stunde off zwischen den Zyklen.

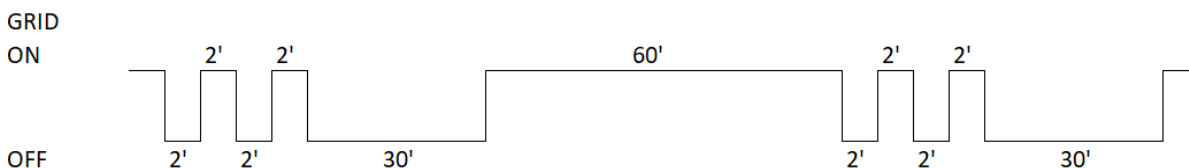


Abbildung 16: Zyklus Stresstest 1

Stresstest 2:

Drei Zyklen nacheinander mit 5 Min off, 5 Minuten on, 1 Stunde off zwischen den Zyklen.

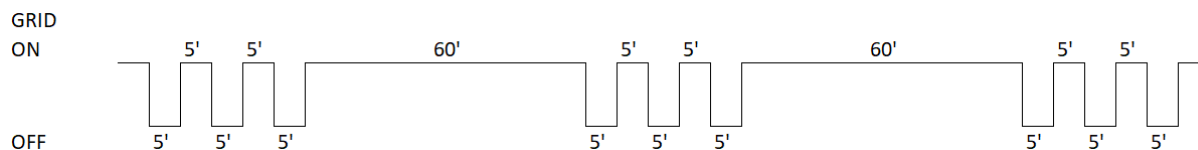


Abbildung 17: Zyklus Stresstest 2

³³ Der Elektrolyt ist bei den eingesetzten BZ-Typ eine Polymermembran, die zum Erhalt der Funktionsfähigkeit nicht austrocknen darf.



4 Resultate

Nach einer Einsatzzeit der Brennstoffzellensysteme von über sieben Jahren im Feld waren an allen Standorten die Systeme noch voll funktionsfähig.

Für alle Notstrom-Installationen können folgende Kernaussagen getroffen werden:

- Die Brennstoffzellensysteme sind sehr robust und funktionieren zuverlässig.
- Die elektrische Nennleistung konnte durch den Brennstoffzellenstapel auch nach einer Standby Zeit bis zu fünf Monaten immer noch erbracht werden.
- Die Brennstoffzellenstapel weisen eine gute Regenerierfähigkeit auf.
- Die realen Stromausfälle bestätigen, dass das gewählte Test-Setup gut der Realität entspricht. Diese Erkenntnisse konnten aus den 24-Stunden / 7 Tage Messung gewonnen werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden der Anlagenstatus und der Teststatus von allen Systemen beschrieben. Im Unterkapitel 4.3 werden pro Standort aus Platz- und Darstellungsgründen nur jeweils zwei bis drei beispielhafte Diagramme zum Betriebsverhalten aufgezeigt und spezifische Erkenntnisse hervorgehoben.

4.1 Anlagenstatus

Am Projektende sind vier von fünf Systemen noch im Feld in Betrieb. Das System an Standort 3 wurde aufgrund von Platzbedarf für einen Standortumbau seitens Anlagenbetreiber abgebaut.

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den Installationsstatus zum Projektende.

Nr.	Standort	Erst-Inbetriebsetzung	In Betrieb seit	Status	Bemerkung
1	Luzern	Dez 2011	7.5 Jahre	Voll funktionsfähig	
2	Graubünden	Nov 2011	7.5 Jahre	Voll funktionsfähig	
3	Nidwalden 1	Nov 2011	7.5 Jahre	Voll funktionsfähig	Abbau im Dez 2018 wegen Platzbedarf für Standortumbau
4	Nidwalden 2	Nov 2011	7.5 Jahre	Voll funktionsfähig	
5	Bern	Juni 2012	7 Jahre	Voll funktionsfähig	

Tabelle 6: Anlagenstatus am Projektende

An allen Standorten sind noch die originalen Brennstoffzellenstapel in Betrieb. Hingegen mussten im Verlauf der Betriebsphase sowohl Batterien, Teile des Messequipments und der Wasserstoffinfrastruktur ausgetauscht werden.



4.2 Teststatus und reale Stromausfälle

In diesem Kapitel werden die jeweiligen Standort-Historien und der Teststatus näher beschrieben. Nachfolgende Tabelle zeigt die Anzahl Startups der Brennstoffzellen, die durch die Stapel produzierte elektrische Energie und die Stromausfallzeiten. Pro Standort werden die absoluten Zahlen seit der Inbetriebsetzung vor über 7 Jahren genannt.

Nr.	Standort	Max. P _{BZ}	Nennlast	Anzahl Startups	Grid off Zeit	Laufzeit BZ	Prod. elektr. Energie BZ
1	Luzern	6 kW	4.5 kW	559	144 h	151 h	478 kWh
2	Graubünden	6 kW	3 kW	580	156 h	161 h	212 kWh
3	Nidwalden 1	4 kW	2.5 kW	518	186 h	166 h	220 kWh
4	Nidwalden 2	4 kW	0.6 kW	530	197 h	176 h	105 kWh
5	Bern	2 kW	0.7 kW	413 ³⁴	217 h	163 h	136 kWh

Tabelle 7: Teststatus und Betriebsdaten aller Standorte seit Inbetriebsetzung.

Seit Beginn der Inbetriebsetzung sind vier Brennstoffzellensysteme über 500 Mal erfolgreich gestartet, ein System über 400 Mal³⁵. Die Laufzeit der Brennstoffzellen betrug an allen Standorten zwischen 150 und 180 Stunden. An den Standorten 1 und 2 ist die Laufzeit der Brennstoffzellen höher als die Stromausfallzeit (Grid off Zeit). Dies liegt daran, dass die Brennstoffzellensysteme noch zirka fünf Minuten nachlaufen, wenn das Stromnetz wieder da ist. Diese Einstellung wurde gewählt, damit bei einem erneuten Stromausfall, die Brennstoffzelle sofort wieder startbereit ist.

An den Standorten 3 und 4 ist die Stromausfallzeit etwas höher als die Brennstoffzellen-Laufzeit, da die Startup-Zeit und die erste kurze Stromausfallzeit über die Batterien überbrückt wird. An Standort 5 ist die Stromausfallzeit deutlich höher als die Brennstoffzellen-Laufzeit. Dies liegt am Konzept des Betreibers, welches vorsieht, dass in den ersten acht Stunden die Batterie den Notstrom übernimmt und die Brennstoffzelle erst danach startet.

Die Tabelle unten zeigt ergänzend die Anzahl Startups und Grid-off Zeiten des aktuellen Projekts unter Standard-Betriebsbedingungen.

Nr.	Standort	Anzahl Startups bei Start Projekt	Anzahl Start-ups während Projekt	Grid off Zeit bei Start Projekt	Grid off Zeit während Projekt
1	Luzern	513	46	115	29
2	Graubünden	541	39	120	36
3	Nidwalden 1	481	37	129	57
4	Nidwalden 2	478	52	169	28
5	Bern	406	7 ³⁶	185	32

Tabelle 8: Anzahl Startups und Grid-off-Zeiten während des Projekts.

³⁴ Die zweimonatlichen automatischen Startups für die Funktionskontrollen sind nicht enthalten, da diese über die Auswerteroutine nicht automatisch erfasst werden.

³⁵ An diesem Standort weniger Startups aufgrund eines weichenden Testprotokolls entsprechend Anwenderbedürfnissen.

³⁶ Vgl. Fussnote 30



Zusätzlich zur Anzahl der Startups durch die simulierten Stromausfälle konnte während des aktuellen Projekts dank der neu implementierten 24 Stunden Messung auch die Anzahl der realen Stromausfälle erfasst werden.

Nr.	Standort	Anzahl der realen Stromausfälle
1	Luzern	5
2	Graubünden	3
3	Nidwalden 1	1
4	Nidwalden 2	8
5	Bern	6

Tabelle 9: Anzahl der gemessenen Stromausfälle an den einzelnen Standorten.

Die Stromausfälle sind je nach Standort unterschiedlich. An Standort 2 in Nidwalden wurden im Rahmen der Datenerfassung an fünf Tagen insgesamt acht Stromausfälle gemessen. An diesem Standort sind die meisten Stromausfälle zu verzeichnen, gefolgt von Standort 5 in Bern mit sechs Stromausfällen an insgesamt drei Tagen und Standort 1 in Luzern mit fünf Stromausfällen an vier Tagen.

Bei zwei Ausfällen gab es im Sommer 2016 mehrere kurze Stromausfälle für ein bis drei Minuten. Anschliessend ist das Netz für 30 bis 45 Minuten ausgefallen. Diese realen Stromausfälle bestätigen die im Projekt definierten Stresstesttypen. Darüber hinaus bestätigen die Stromausfallsituationen die Statistik der Swissgrid, die einen Anstieg der Häufigkeit der Redispatch-Massnahmen aufzeigt. In Anhang 3 wird dieser Begriff näher erläutert.

4.3 Standort-Historie und Betriebsverhalten

In diesem Kapitel werden die Betriebsdiagramme über die gesamte Installationszeit der einzelnen Standorte gezeigt.

In den jeweiligen Vorgängerprojekten wurden die Systeme stark belastet und zahlreichen Stresstests unterzogen. Das zeigen die jeweils steil ansteigenden Kurven der Start-Stopp-Zyklen sowie der erzeugten Energie. Im aktuellen Projekt wurden wie schon in vorangegangenen Kapiteln beschrieben, weniger Tests durchgeführt, um die Funktionsweise der Systeme im Standardbetrieb aufzuzeigen.

Weiter werden in diesem Kapitel beispielhaft pro Standort die Leistungsdiagramme einzelner Tests aus dem aktuellen Projekt hervorgehoben, um das Betriebsverhalten der Systeme aufzuzeigen. Die Leistungsdiagramme sind in drei Teile aufgegliedert, um die einzelnen Parameter übersichtlicher darstellen zu können.

Im oberen Diagramm sind jeweils die Spannung am Bus sowie die Stromstärke der Brennstoffzelle über der Zeit dargestellt. Im mittleren Diagramm zeigen die Graphen in violett jeweils die Stromstärke über der Zeit respektive die gelieferte Leistung der Brennstoffzelle. Der blaue Graph zeigt den Leistungsverlauf der Startup-Einheit und der grüne Graph den Verlauf der Last. Die Brennstoffzellenwerte im negativen Bereich zeigen an, wenn die Brennstoffzelle Strom liefert.

Aus dem unteren Diagramm ist ersichtlich, zu welchem Zeitpunkt der Netzstrom ausfällt respektive wieder zur Verfügung steht. Die Signalstärke Eins heisst immer ON. Null bedeutet, dass kein Netz vorhanden ist beziehungsweise in Bezug auf die Brennstoffzelle, dass diese im Standby-Betrieb ist.



4.3.1 Standort 1, Luzern Telekom, Indoorsystem im Stadtgebiet

An diesem Standort ist die Brennstoffzelle als stand-alone System mit den Standardbatterien des Betreibers installiert, wobei das Batteriemangement durch das Brennstoffzellensystem übernommen wird. Bei Netzbetrieb wird die Last direkt mit Netzstrom (220 V AC) gespeist, das Brennstoffzellensystem verbleibt im Standby-Betrieb. Bei Netzausfall bezieht die Last die Energie über den 48 V DC Notstromanschluss, welche dann durch die Batterie resp. den Brennstoffzellenstapel zur Verfügung gestellt wird.

Regelmässig, alle zwei bis drei Monate, wurden Funktionstests für mindestens 30 Minuten durchgeführt sowie langanhaltende Tests einmal jährlich für drei oder vier Stunden.

Das nachfolgende Diagramm zeigt das Betriebsdiagramm mit allen Tests und Netzausfällen seit der Installation des Systems.

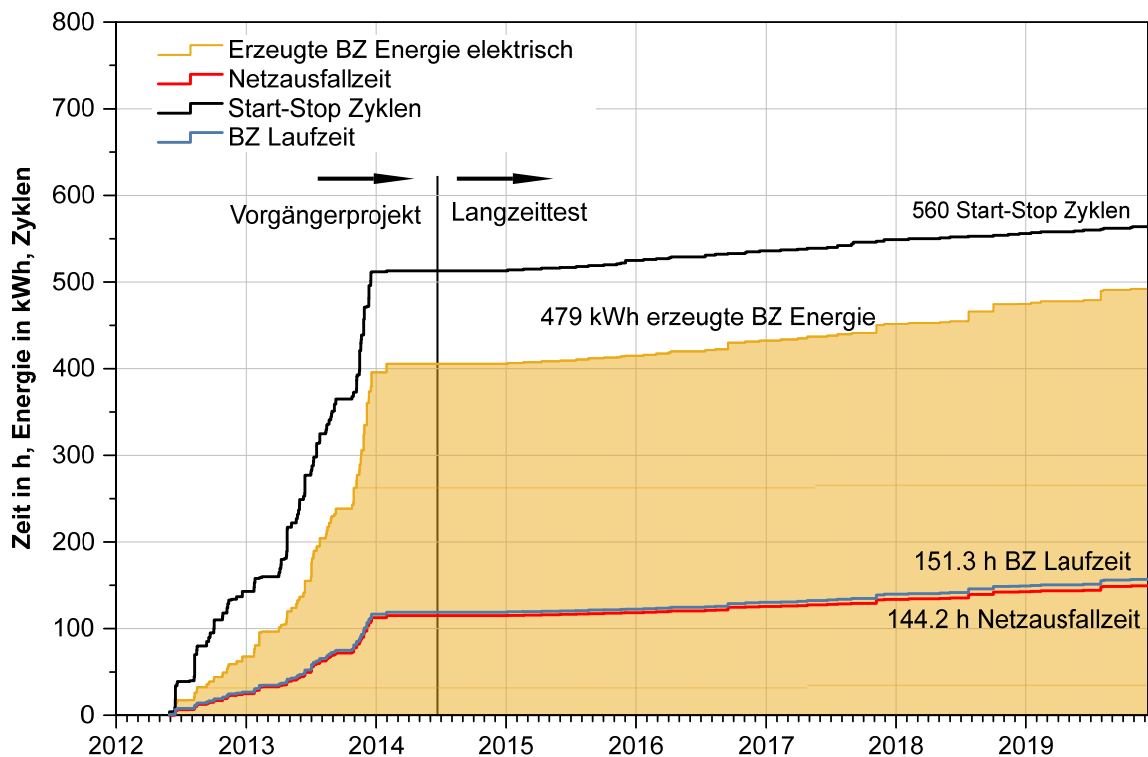


Abbildung 18: Betriebsdiagramm Standort 1, Luzern Telekom, seit Installation des Brennstoffzellensystems

In den folgenden Abbildungen wird eine reale Stromausfallsituation mit zwei kurz aufeinander folgenden Netzunterbrüchen gezeigt. Die Startup-Batterien haben unterbrechungsfrei den erforderlichen Strom geliefert, die Brennstoffzelle ist nach vier bis fünf Sekunden gestartet.

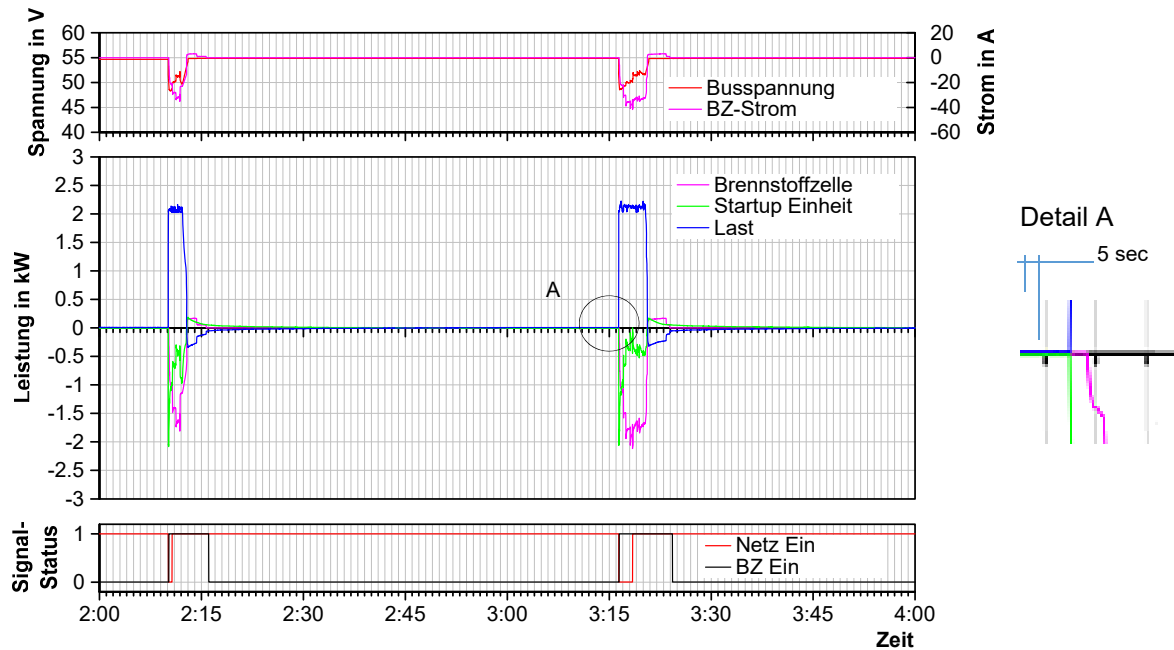


Abbildung 19: Realer Stromausfall, nachts, zwei Mal in Folge am Standort 1 in Luzern am 03.09.2017

Die beiden Stromausfälle ereigneten sich nachts für je etwa eine Minute im Abstand von etwas mehr als einer Stunde. Detail A zeigt den Start der Brennstoffzellen innerhalb von fünf Sekunden nach Stromausfall. Die Last von zwei Kilowatt wurde für die kurze Stromausfallzeit gemeinsam von Brennstoffzelle und Batterien geliefert. Die Brennstoffzelle läuft noch fünf Minuten nach, um für einen erneuten Stromausfall zur Verfügung zu stehen, wie in der Einleitung von Kapitel 4.2 bereits beschrieben.

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Ergebnisse eines Vier-Stunden-Tests.

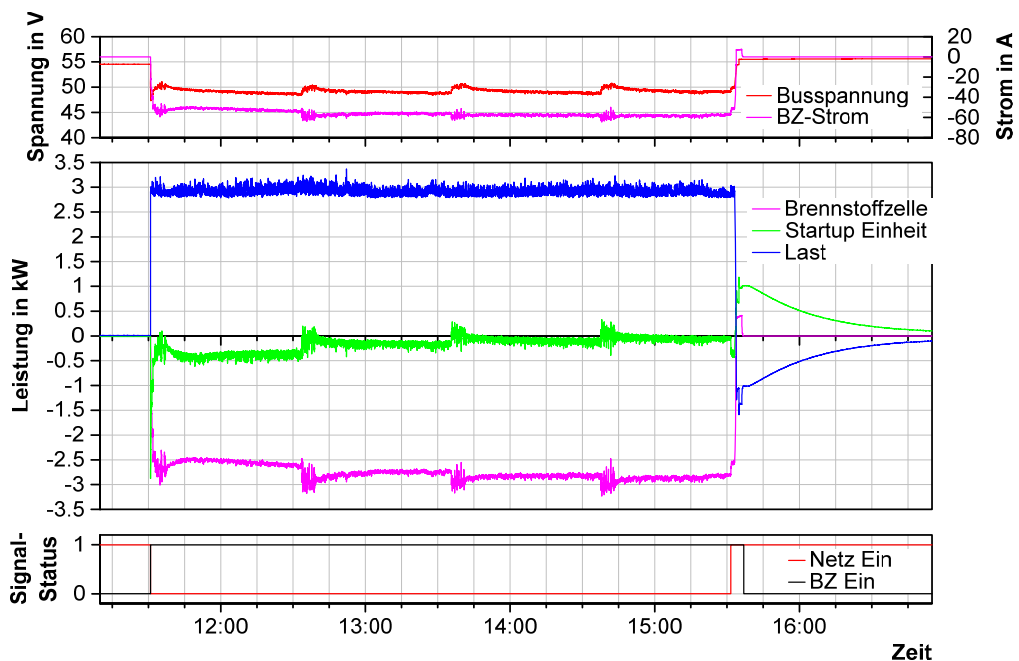


Abbildung 20: Simulation Langzeit-Stromausfall über vier Stunden am Standort 1 in Luzern am 23.07.2018



Die Simulation erfolgte im Sommer über die Mittagszeit mit einer Lufteintrittstemperatur zwischen 22°C und 24°C. Die Last von drei Kilowatt wurde hauptsächlich von den Brennstoffzellen geliefert, innerhalb der ersten Stunde noch mit weniger als 500 Watt zusätzlich von den Batterien³⁷.

Zum Projektende im Februar 2019 waren die Batterien nach nur etwa drei Einsatzjahren defekt. Die Lebensdauer der Batterien sollte mindestens sechs bis acht Jahre betragen. Das Gehäuse blähte sich auf und die Batterien lieferten eine zu geringe Spannung für die benötigten Anlaufströme³⁸. Nachfolgende Abbildung zeigt die defekten Batteriepacks.



Abbildung 21: Defekte Batteriepacks am Standort 1 in Luzern (Foto: Swisscom AG)

Nach einem Austausch der Batterien war das System wieder voll funktionsfähig. Die Batterien wurden durch den Betreiber ersetzt; das Batteriemanagement erfolgt wie schon beschrieben durch das Brennstoffzellensystem. Die Brennstoffzelle selbst wies während der Testperiode eine sehr gute Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit auf.

³⁷ Wie lange die Batterien zusätzlich Strom liefern hängt vom Ladezustand ab.

³⁸ Die Geräte sind abgestürzt.



4.3.2 Standort 2, Graubünden Telekom, Indoorsystem auf 2'400 Meter Höhe

An diesem zweiten Telekom Standort ist die Brennstoffzelle mit der gleichen Systemarchitektur wie an Standort 1 installiert. Alle zwei Monate wurden regelmässig Funktionstests für mindestens 30 Minuten durchgeführt sowie langanhaltende Tests zwei Mal jährlich für vier Stunden.

Das nachfolgende Diagramm zeigt das Betriebsdiagramm mit allen Tests und Netzausfällen seit der Installation des Systems.

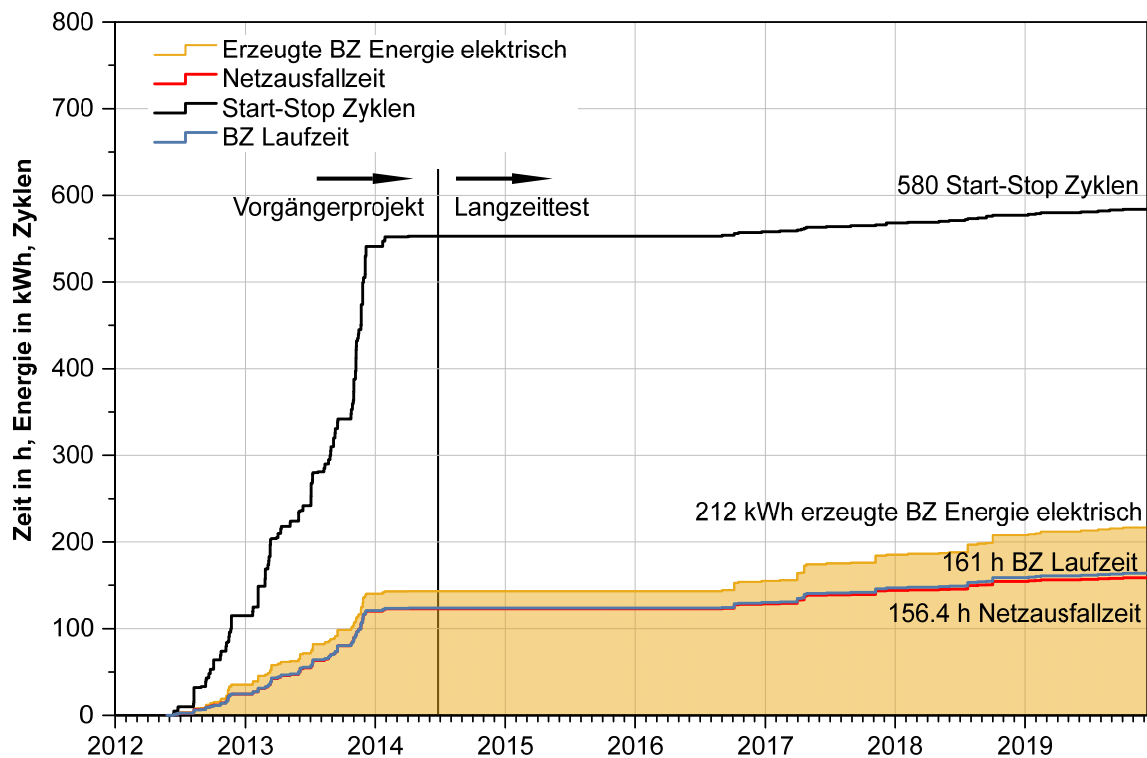


Abbildung 22: Betriebsdiagramm Standort 2, Graubünden Telekom, seit Installation des Brennstoffzellensystems

Im Mai 2016 wurde im Rahmen eines Service festgestellt, dass die Batterien defekt sind, mit ähnlich aufgeblähten Gehäusen wie an Standort 1. Zu diesem Zeitpunkt wurde dies von Betreiberseite als Zellenkurzschluss interpretiert. Da sich der Defekt an Standort 1 mit der gleichen Systemarchitektur wiederholte, soll im Rahmen eines Folgeprojekts ein Zusammenhang mit der Systemarchitektur weiter im Detail abgeklärt werden.

Im Verlauf des oben genannten Service wurde darüber hinaus ein Spannungsabfall an allen drei Brennstoffzellen-Stacks festgestellt, so dass die Stacks nicht mehr voll funktionsfähig waren. An diesem Standort war von Betreiberseite der Remote Zugang für rund sechs Monate³⁹ unterbrochen, so dass die Funktionstests nicht durchgeführt werden konnten.⁴⁰ Ob die Brennstoffzellen aufgrund der trockeneren Luft auf einer Höhe von 2'400 Metern ausgetrocknet waren, lässt sich nicht direkt nachvollziehen.

³⁹ Aus anwenderspezifischen Gründen war der Remote Zugang zum System von November 2015 bis Mitte Mai 2016 unterbrochen.

⁴⁰ Der Standort ist für den Betreiber nur mit hohem Zeitaufwand zu erreichen, deshalb wurden die Funktionstests ausgesetzt. Ein automatischer Startmechanismus ist in diesem System nicht implementiert.



Der Hersteller konnte die Stapel im Werk vollständig regenerieren und die Brennstoffzellen wurden wieder erfolgreich am Standort installiert. Bei der Inbetriebsetzung starteten die Module nach zwei Sekunden und übernahmen nach einer Minute die volle Last von rund zwei Kilowatt.

Nachfolgende Abbildung zeigt den Funktionstest mit den regenerierten Stapeln.

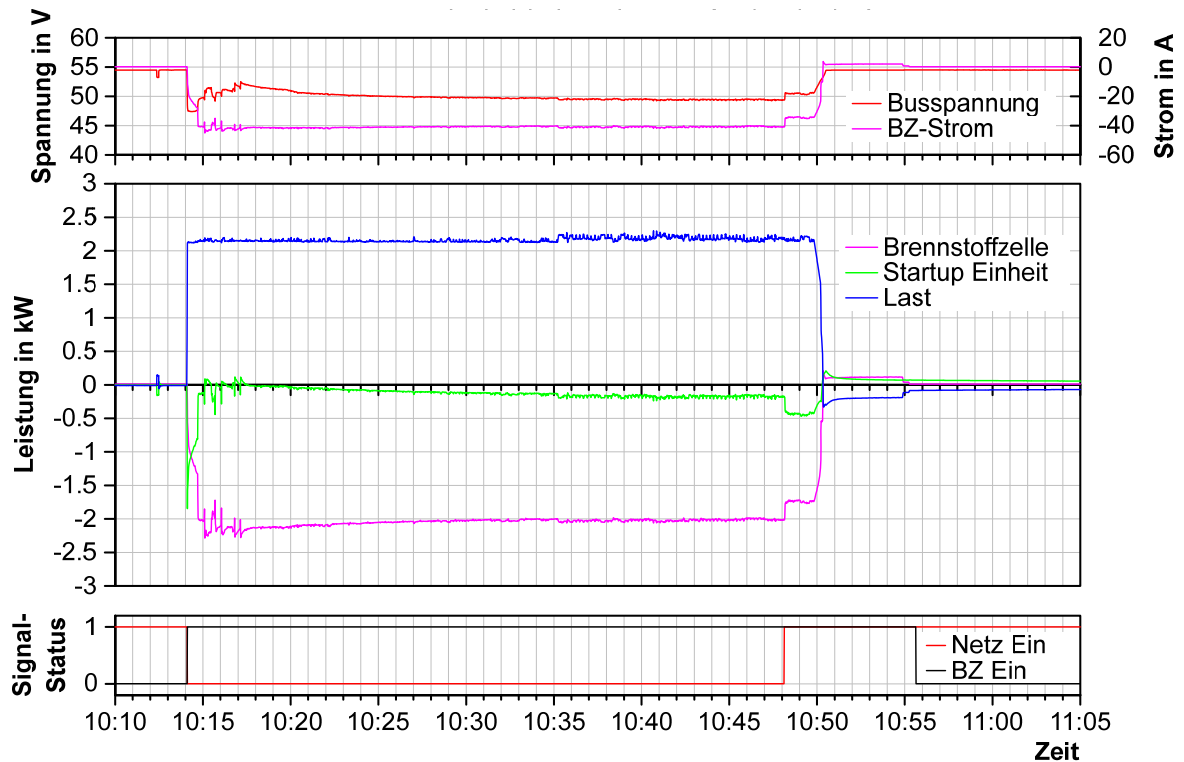


Abbildung 23: Funktionstest mit im Werk regenerierten Stapeln an Standort 2 in Graubünden

Im Anschluss hat das System während den verschiedenen Funktions- und Langzeittests wieder unterbrechungsfrei und zuverlässig den erforderlichen Notstrom geliefert. Im Sommer 2018 gab es drei reale Stromausfälle zwischen einer und 16 Minuten, die das System auch problemlos bewältigte. Die Leistungsdiagramme sind vergleichbar mit den Diagrammen der Abbildungen 22 und 23 an Standort 1 und werden deshalb an dieser Stelle nicht mehr gezeigt.

Positiv bleibt an diesem Standort festzustellen, dass die Brennstoffzellenstapel eine sehr gute Regenerationsfähigkeit aufweisen.

4.3.3 Standort 3, Nidwalden 1 POLYCOM, Indoorsystem mit Standard-USV

An diesem Standort für das Sicherheitsfunknetz POLYCOM wird sowohl die Funktion der Basisstation als auch die einer Klimaanlage über Notstrom abgesichert. Durch das Ein- und Ausschalten der Klimaanlage⁴¹ führt dies zu einer dynamischen Last. Die Brennstoffzelle ist an den Batteriebus der bestehenden Standard-USV des Standortbetreibers angeschlossen. Die Batterien haben eine hohe Kapazität und werden durch den USV-Lieferant evaluiert und bereitgestellt. Über die Einstellung der

⁴¹ Im Winter Heizung



Spannungsschwelle startet die Brennstoffzelle nach einer für die Testdurchführung nützlichen Frist. Die Batterien tragen aufgrund ihrer hohen Kapazität jedoch die meiste Zeit zur Notstromlieferung bei. Das nachfolgende Diagramm zeigt das Betriebsdiagramm mit allen Tests und Netzausfällen seit der Installation des Systems.

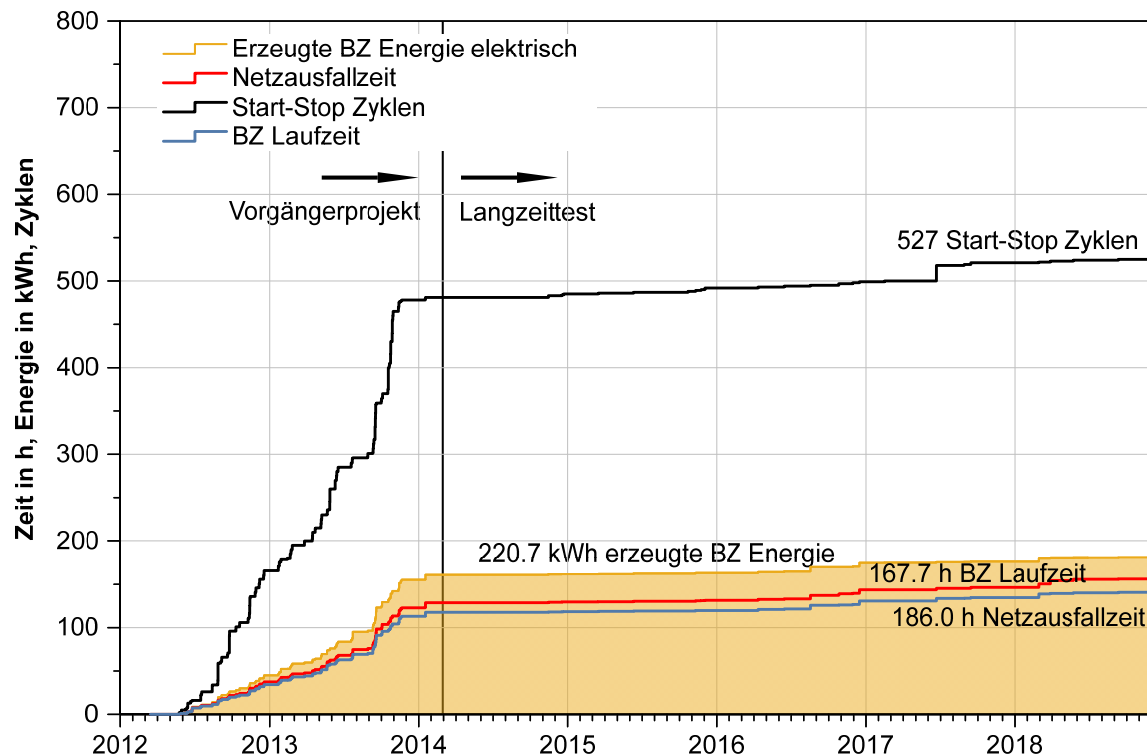


Abbildung 24: Betriebsdiagramm Standort 3, Nidwalden 1 POLYCOM, seit Installation des Brennstoffzellensystems

Alle zwei bis drei Monate wurden Funktionstests für mindestens 30 Minuten durchgeführt. Einmal jährlich wurden die Stresstestzyklen 1 und 2 sowie ein langanhaltender Test von vier Stunden simuliert. Auch bei einer Aussentemperatur von 5°Celsius lieferte das System zuverlässig über vier Stunden den erforderlichen Strom.

Während der Projektlaufzeit gab es zwei Standby Zeiten von fünf bis sechs Monaten⁴², während der kein Start durchgeführt wurde⁴³. Das System ist nach dieser Zeit problemlos wieder gestartet.⁴⁴ Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Vier-Stunden-Test direkt nach der Standby-Zeit von fünf Monaten.

⁴² Von Januar bis Juni 2017 und von Oktober bis Februar 2018

⁴³ Ein automatischer Startmechanismus wäre in diesem Fall sehr hilfreich gewesen. Dieser ist im System nicht implementiert.

⁴⁴ Die Stapel an Standort 2 haben nach sechs Monaten Standby die erforderliche Spannung nicht mehr geliefert. Ob dies an der trockeneren Luft auf 2400 m Höhe liegt oder einer höheren Beanspruchung liess sich nicht nachvollziehen.

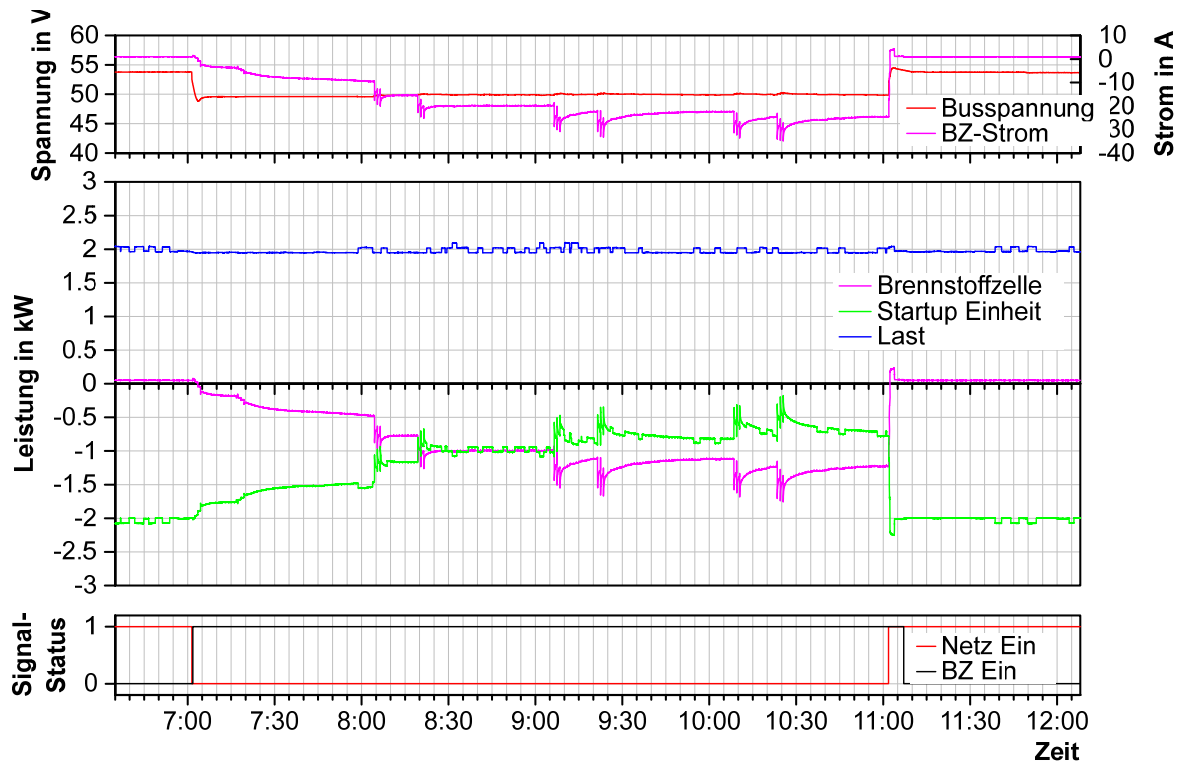


Abbildung 25: Vier-Stunden Test an Standort 3 nach einer Standby-Zeit von fünf Monaten

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Brennstoffzelle an diesem Standort ihre Funktionsfähigkeit sehr erfolgreich unter Beweis gestellt hat, unter anderem auch bei Aussentemperaturen knapp über dem Nullpunkt, mit einer Luftqualität aus einem landwirtschaftlichem Umfeld (Pollenbelastung-) und nach fast halbjährlichen Standby Zeiten. Nach einer Betriebszeit von insgesamt mehr als 7 Jahren, über 500 Startup-Vorgängen und dynamischen Stresstestsituationen gab es keine Ereignisse mit der Brennstoffzelle und ihre Funktionsfähigkeit war zu jedem Zeitpunkt gewährleistet.

Das Brennstoffzellensystem wurde zum Jahresende 2018 abgebaut, da der Anlagenbetreiber den Platz für eine Erweiterung der Funkinfrastruktur benötigte. Vor dem Abbau wurde der Wasserstoff in einem letzten Test aufgebraucht, bei dem die Brennstoffzelle über 26 Stunden lang in Betrieb und noch voll funktionsfähig war.

Bei einer Weiterführung der Brennstoffzelleninstallation wäre es in einem nächsten Schritt sinnvoll gewesen eine neue System- oder Betriebsvariante zu wählen. Das hätte bedeutet, die Batteriekapazität zu reduzieren oder die Schwellspannung für den Brennstoffzellenstart herabzusetzen. Mit letztgenannter Variante wäre dann der Notstrom in den ersten Stromausfallstunden über die Batterien bereitgestellt worden und Brennstoffzelle und Wasserstoff wären für die lang anhaltenden Blackout Szenarien vorgesehen (entsprechend dem Betriebskonzept von Standort 5).



4.3.4 Standort 4, Nidwalden 2 POLYCOM, Outdoorsystem mit Superkondensatoren

Dieser Standort wurde im Rahmen des Projekts als eigenständiges USV-System mit Superkondensatoren umgebaut, wie in Kapitel 3.5 beschrieben. Das Brennstoffzellensystem aus dem Vorgängerprojekt wurde übernommen.

Vor dem Einbau der Kondensatoren wurden diese im Labor auf ihre Funktionsfähigkeit mit einer externen, elektronischen DC-Last getestet. Zuerst mit einem 1.5 Kilowatt Kaltstart und in anschließenden Testzyklen mit einer Last von 1 Kilowatt und 500 Watt. Alle drei Tests waren erfolgreich und das System wurde im Januar 2017 in Betrieb gesetzt.

Das nachfolgende Diagramm zeigt das Betriebsdiagramm mit allen Tests und Netzausfällen seit der Installation des Systems.

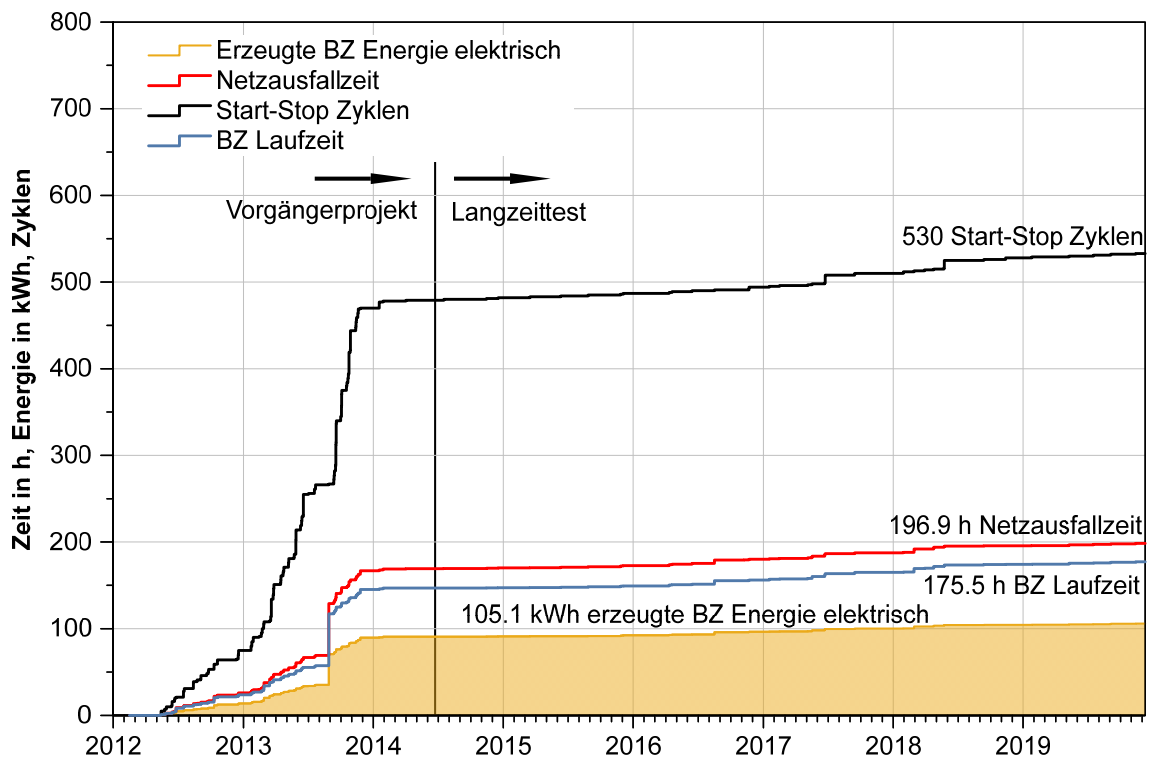


Abbildung 26: Betriebsdiagramm Standort 4, Nidwalden 2 POLYCOM, seit Installation des Brennstoffzellensystems

Alle zwei bis drei Monate wurden Funktionstests für mindestens 30 Minuten durchgeführt. Einmal zwei Mal jährlich der Stresstestzyklus 2. Im Jahr 2018 gab es sechs reale Stromausfälle zwischen 6 und 12 Minuten. Das umgebaute System lieferte bei allen Tests und Netzausfällen zuverlässig den erforderlichen Notstrom. jährlich wurden ein langanhaltender Test von vier Stunden sowie der Stresstestzyklus 1 durchgeführt,

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Leistungsdiagramm eines Vier-Stunden-Tests.

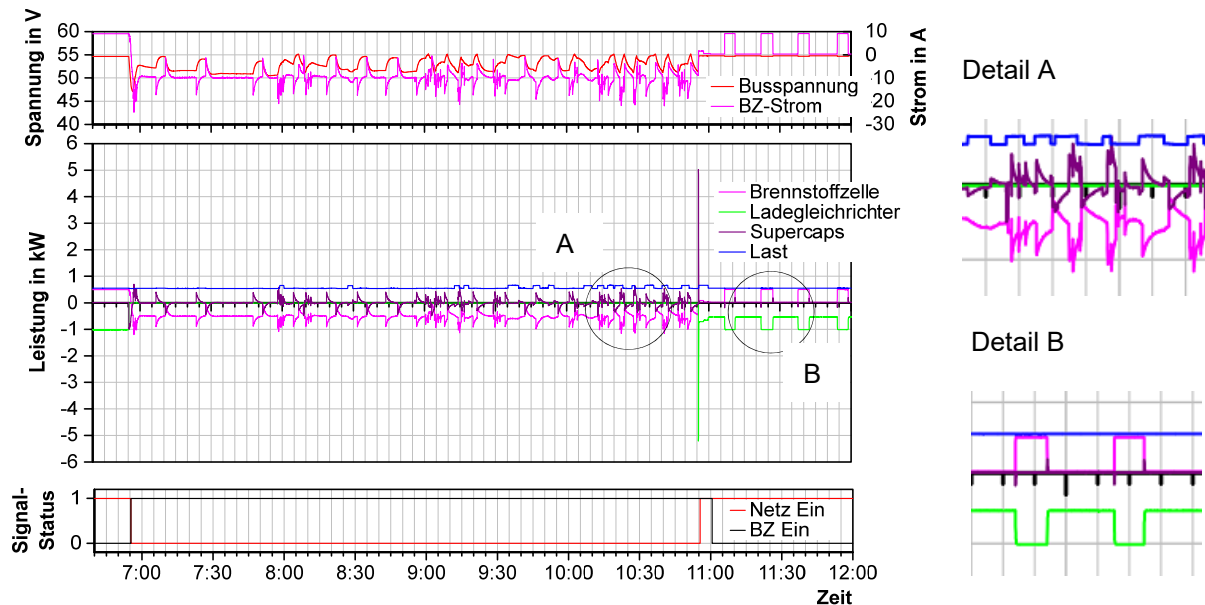


Abbildung 27: Vier-Stunden Test an Standort 4 mit Superkondensatoren am 28.02.2018

In der Abbildung ist die Betreiberlast in blauer Farbe dargestellt. Sie beträgt an diesem Standort fast konstant 500 Watt. Detail A zeigt aufeinanderfolgende Leistungsspitzen der Brennstoffzelle während der Stromausfallsimulation. Diese sind darauf zurückzuführen, dass die Brennstoffzellen nach der Lastübernahme die Superkondensatoren wieder aufladen, wodurch die Spannung am Bus steigt. Die geladenen Superkondensatoren liefern dann ihrerseits wieder Notstrom bis sie entladen sind respektive die untere Spannungsschwelle am Bus erreicht ist. Dann übernimmt wieder die Brennstoffzelle die volle Last und lädt die Kondensatoren. Dieser Zyklus wiederholt sich über die gesamte Laufzeit. Der Test wurde im Winter mit tiefen Aussentemperaturen um die 5°Celsius durchgeführt. Die Brennstoffzelle ist an diesem Standort in einem Outdoorschrank untergebracht.

Aus Detail B ist das zyklische Ein- und Ausschalten der Heizung ersichtlich. Die Outdoor Heizung hat an diesem Standort zu einem zusätzlichen Verbrauch geführt.

Weiterhin zeigt das Diagramm den Leistungsverlauf des Ladegleichrichters in grüner Farbe⁴⁵. Nach der Netzzuschaltung gibt es eine hohe Leistungsspitze des Ladegleichrichters. Dies liegt daran, dass der Gleichrichter -sobald er Netzstrom hat- die Superkondensatoren mit voller Leistung auflädt.

Im nächsten Diagramm wird noch ein realer Stromausfall gezeigt mit drei Stromausfällen an einem Tag zwischen vier und sieben Minuten. Die ersten beiden Stromausfälle ereigneten sich morgens direkt nacheinander, der dritte Stromausfall von knapp fünf Minuten um die Mittagszeit. Auch in dieser realen Stromausfallsituation hat das System den Notstrom zuverlässig bereitgestellt.

⁴⁵ Bei dieser Architektur haben Superkondensatoren und Gleichrichter jeweils eine eigene Verbindung zum DC-Bus und werden deshalb im Diagramm separat dargestellt. Bei den anderen Systemen werden Gleichrichter und Batterien zusammen als (Startup)-Einheit betrachtet. Deshalb wird bei diesen der Leistungsverlauf der Startup-Einheit dargestellt.

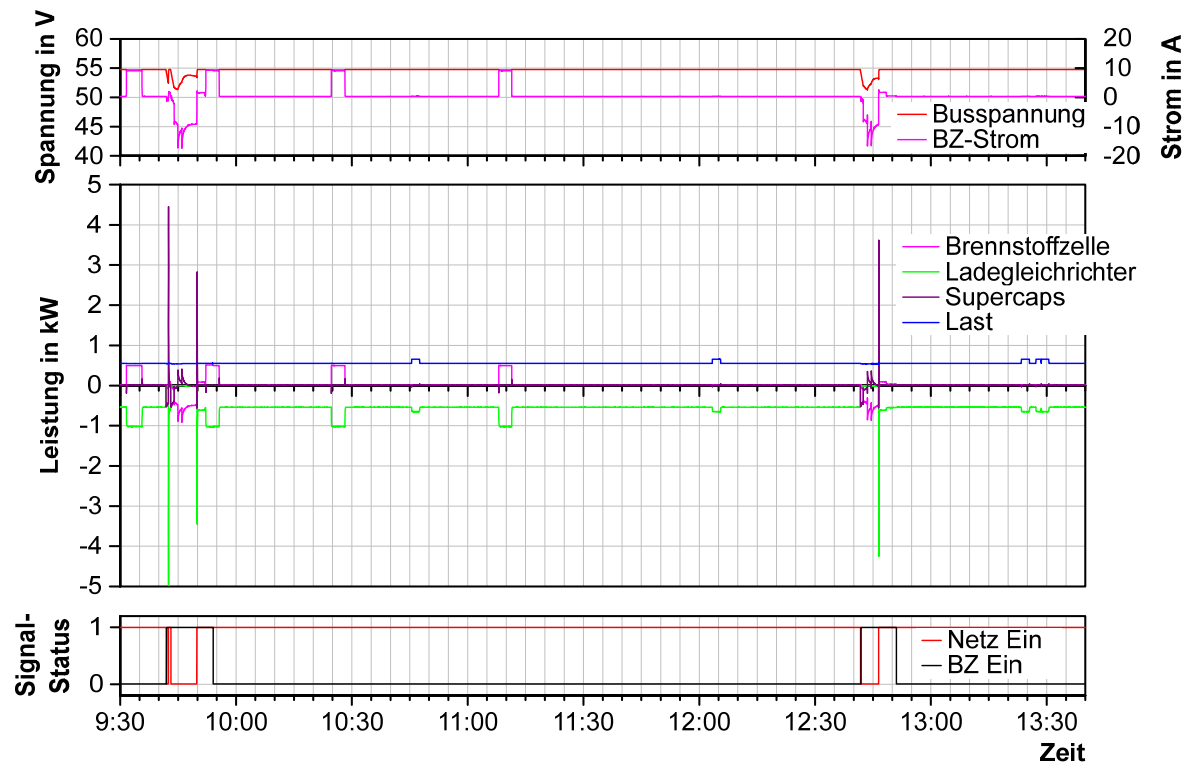


Abbildung 28: Drei Stromausfälle an Standort 4 mit Superkondensatoren am 29.01.2018

Die zum stand-alone System umgebaute Anlage hat sowohl bei Stresstests als auch bei langanhaltenden Tests und realen Stromausfällen erfolgreich funktioniert. Nach einer Betriebszeit von insgesamt über sieben Jahren, über 500 Startup-Vorgängen und dynamischen Testsituationen gab es keine Ereignisse mit dem Brennstoffzellensystem. Ein Einfluss der Luftqualität direkt vor dem Eingang eines Autobahntunnels konnte nicht festgestellt werden und die Funktionsfähigkeit des Systems ist weiterhin voll gewährleistet.

Bei einer Verlängerung des Betriebs an diesem Standort sollte die Einstellung des Betriebspunkts weiter optimiert werden, um die Zeitspanne der Lade und Entlade-Zyklen der Superkondensatoren zu verlängern und dadurch einen stabileren Betriebspunkt der Brennstoffzellen zu erreichen.

Ausserdem hat die Heizung des Outdoorschranks während der kalten Jahreszeit zu einem zusätzlichen Verbrauch geführt. Für kleine Lasten ist deshalb zu prüfen, ob eine Indoor-Installation realisiert werden kann oder ob ein alternatives Brennstoffzellensystem eingesetzt wird, welches auf einer Technologie basiert, die bei tiefen Temperaturen ohne Heizung funktionsfähig ist.

4.3.5 Standort 5, Bern POLYCOM, Brennstoffzelle und Wasserstoff indoor

An diesem Standort ist ein Brennstoffzellensystem eines zweiten Herstellers installiert während an den Standorten 1 bis 4 der gleiche Stapeltyp eingesetzt ist. Im Gegensatz zu den anderen Installationen sind hier sowohl die Brennstoffzelle als auch der Wasserstoffspeicher in einem Raum installiert. Die Brennstoffzelle wird an diesem Standort als Ergänzung zur Standard-USV mit hoher Batteriekapazität eingesetzt, als Notstromlieferant für aussergewöhnliche Notfall-Situationen.



Bei diesem Standort wurde die Spannungsschwelle, bei der die Brennstoffzellen starten soll, tiefer gesetzt. Wie in Kapitel 3.6 beschreiben sieht das Betriebskonzept vor, dass für die ersten Netzausfallstunden die Batterien den Notstrom bereitstellen.

Wie bei den anderen Standorten wurde auch dieses System im Rahmen eines ersten Projekts mit der Durchführung zahlreicher Stresstests auf seine Funktionsfähigkeit hin geprüft. Im aktuellen Projekt wurde im Wesentlichen das Betriebsverhalten in Standardsituationen aufgezeigt.

Das nachfolgende Diagramm zeigt das Betriebsdiagramm mit allen Tests und Netzausfällen seit der Installation des Systems.

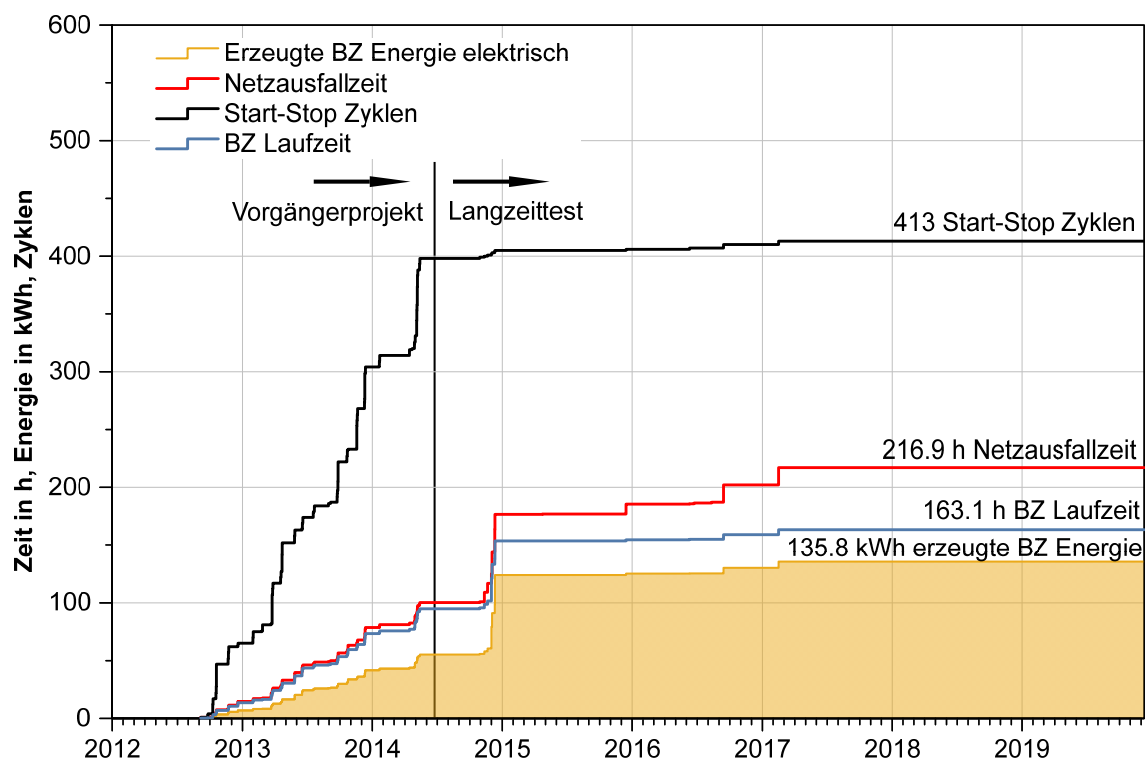


Abbildung 29: Betriebsdiagramm Standort 5, Bern POLYCOM, seit Installation des Brennstoffzellensystems

Die aktiven Stromausfallsimulationen wurden an diesem Standort auf zwei Vier-Stunden-Tests beschränkt⁴⁶. Die Vier Stunden beziehen sich auf die Brennstoffzellenlaufzeit. Gemäss Konzept stellen in den ersten acht bis zehn Stunden die Batterien den Notstrom bereit. Die Brennstoffzelle startet erst nach dieser Zeit, wodurch lange Stromausfallzeiten von bis zu 15 Stunden simuliert wurden. Die Simulation endet erst dann, wenn die Brennstoffzelle vier Stunden in Betrieb war. Die folgende Abbildung zeigt den Leistungsverlauf eines Vier-Stunden Tests.

⁴⁶ Die Stresstests wurden bereits im Vorgängerprojekt ausreichend und erfolgreich durchgeführt.

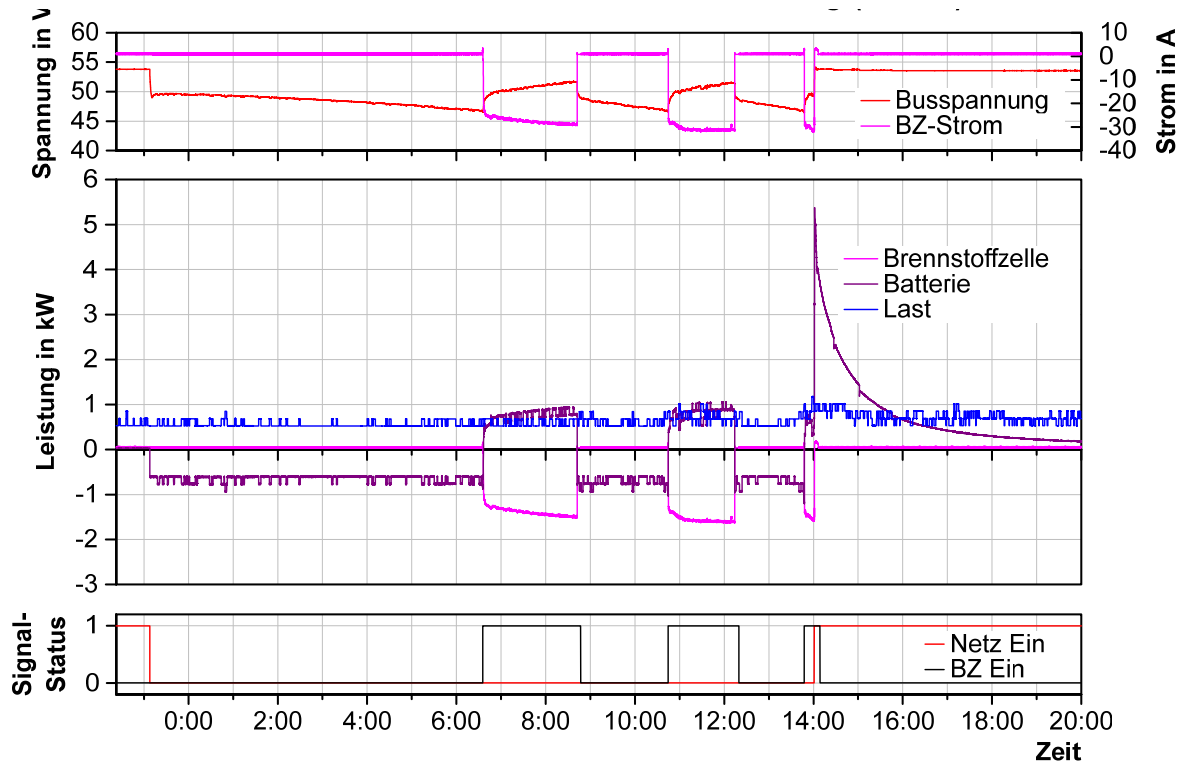


Abbildung 30: Vier-Stunden Test an Standort 5 am 14.02.2017, Startup-einheit mit hoher Batteriekapazität

Die Simulation wurde gegen 23 Uhr gestartet. Bis gegen halb sieben Uhr morgens war die Busspannung auf den voreingestellten Schwellwert abgesunken und die Brennstoffzelle startete problemlos innerhalb von 50 Sekunden und hatte nach 35 Sekunden die volle Last übernommen. Sofort wurden die Batterien durch die Brennstoffzelle geladen bis diese nach zirka zwei Stunden den oberen Spannungsschwellwert erreichten und ihrerseits wieder die Last übernahmen bis zum Erreichen des unteren Spannungsschwellwertes. Dieser Zyklus wiederholte sich durch die spannungsgeführte Regelung des Systems drei Mal. Bei Testende schaltete der Netzstrom wieder zu und der Ladegleichrichter lädt die Batterien mit voller Leistung auf. Dadurch ergibt sich die hohe Leistungsspitze der Batterien im mittleren Diagramm.



Bei diesem System wurden durch den Brennstoffzellen-Hersteller automatische Funktionstests in die Steuerung implementiert. Diese können frei konfiguriert werden und wurden an diesem Standort so gewählt, dass die Brennstoffzelle alle zwei Monate für 30 Minuten in Betrieb ist. Bei diesem Test gib es keinen Netzausfall, die Brennstoffzelle wird mit einer internen Last von rund 500 Watt betrieben. Die Tests funktioniert seit über zwei Jahren problemlos und gewährleisten die Funktionsfähigkeit des Brennstoffzellensystems.

Nebenstehende Abbildung zeigt beispielhaft einen automatischen Funktionstest.

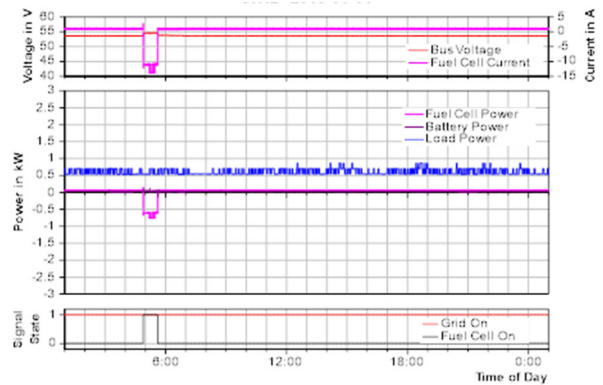


Abbildung 31: Automatischer Funktionstest alle 6 Wochen an Standort 5, Test am 01.01.2019

Im Jahr 2016 gab es fünf und im Jahr 2018 einen realen Stromausfall zwischen einer und 45 Minuten. Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft zwei kurze und einen direkt darauffolgenden Netzausfall von 35 Minuten. Die Spannung am Batteriebus ist dabei nicht auf die eingestellte tiefe Spannungsschwelle von 46 V DC abgesunken, so dass jeweils die Batterien den Strom geliefert haben.

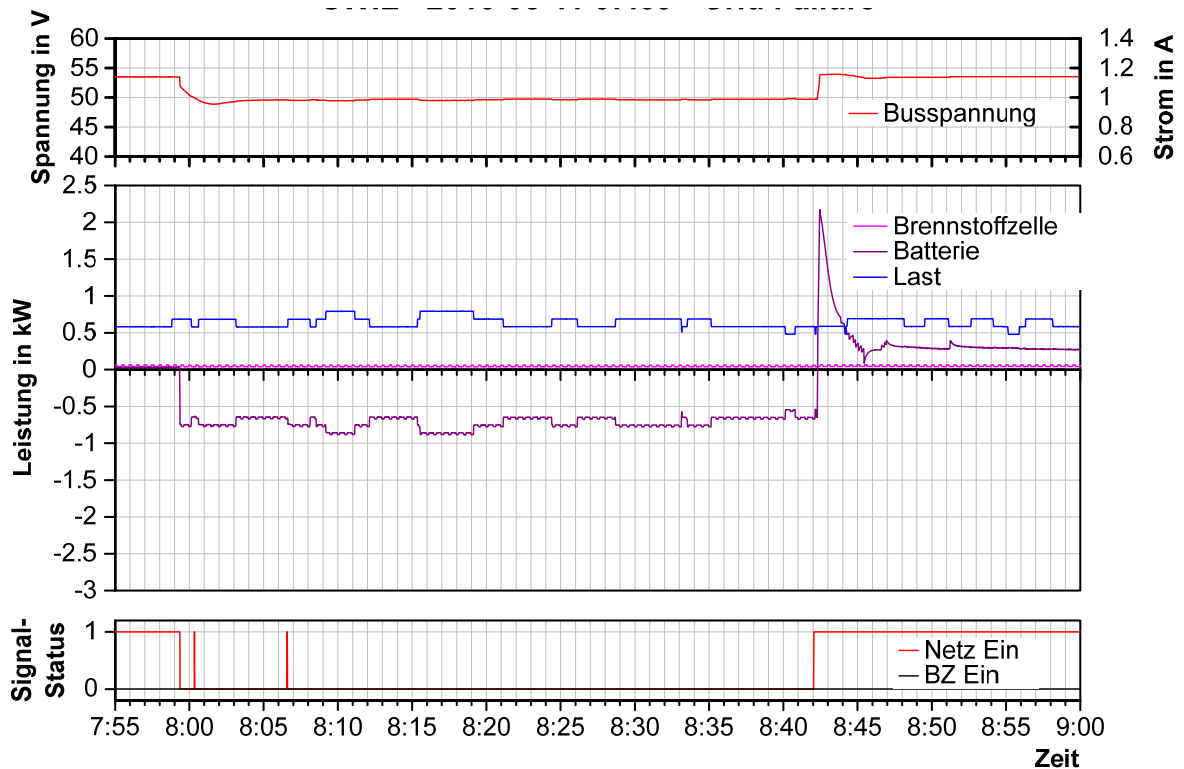


Abbildung 32: Drei Stromausfälle an Standort 5 am 11.08.2016



Auch an diesem Standort hat das Brennstoffzellensystem sehr erfolgreich den erforderlichen Notstrom bereitgestellt. Es gab keine Ereignisse mit dem Brennstoffzellensystem.

Die Bedingungen und das Betriebskonzept sind an diesem Standort gut aufeinander abgestimmt. Bei einer Verlängerung der Installation an diesem Standort sind keine Anpassungen notwendig.

4.4 Zuverlässigkeit und Startup-Zeiten

4.4.1 Zuverlässigkeit

Der Begriff der Zuverlässigkeit wie er in diesem Bericht verwendet wird, ist definiert durch das erfolgreiche Starten des Brennstoffzellensystems bei einem Netzunterbruch. Zum Brennstoffzellensystem gehört bei dieser Betrachtung auch die jeweils integrierte Startup-Einheit. In der folgenden Tabelle wird die Zuverlässigkeit pro Standort in Prozent angegeben, wobei das System sowohl als Gesamtes betrachtet wird als auch die Zuverlässigkeit von Brennstoffzelle und Startup-Einheit getrennt. Für die Prozentangabe werden die Fehlstarts ins Verhältnis zur Gesamtanzahl der Start-Stopp-Zyklen gesetzt.

Nr.	Standort	Max. P _{BZ}	Nennlast	Anzahl der Start Zyklen	BZ System kein Start	BZ	Startup Einheit	Zuverlässigkeit
1	Luzern	6 kW	4.5 kW	560	1	0	2	99.6 %
2	Graubünden	6 kW	3 kW	580	1	1	2	99.6 %
3	Nidwalden 1	4 kW	2.5 kW	527	0	0	0	100 %
4	Nidwalden 2	4 kW	0.6 kW	530	0	0	0	100 %
5	Bern	2 kW	0.7 kW	413 ⁴⁷	0	0	0	100 %

Tabelle 10: Zuverlässigkeit der Brennstoffzellensysteme an den einzelnen Standorten seit Inbetriebsetzung im Feld

Alle Brennstoffzellensysteme weisen eine sehr hohe Zuverlässigkeit auf, die den Anforderungen der Betreiber entspricht und das Projektziel von 99% Zuverlässigkeit erfüllt. Die Fehlstarts an Standort 1 und 2 sind auf die Startup-Einheiten zurückzuführen. An beiden Standorten ereignete sich ein Fehlstart bereits im Vorgängerprojekt, bedingt durch eine Fehldimensionierung der Startup-Einheit nach einer Anlagenerweiterung. Der Fehlstart im aktuellen Projekt ereignete sich aufgrund defekter Batterien wie im vorhergegangenen Kapitel beschrieben. Der Spannungsabfall der Brennstoffzelle an Standort 2 ist auf einen Handling-Fehler zurückzuführen und die Stapel konnten wie schon beschrieben vollständig regeneriert werden

4.4.2 Startup Zeiten

Die Zeit, bis die Brennstoffzelle nach Erhalt des Startsignals Energie bereitstellen kann, wird als Startup Zeit bezeichnet. Das Startsignal wird ausgelöst, sobald die Spannung am Bus unter den eingestellten Spannungsschwellwert sinkt.

Das Brennstoffzellensystem an den Standorten 1 bis 4 startet zwischen zwei und fünf Sekunden. Nach dieser Zeit liefert sie Strom. Nach welcher Zeit sie die volle Last übernimmt hängt von verschiedenen Faktoren ab: von der Systemarchitektur, von der Kapazität und dem Ladezustand der

⁴⁷ Die Anzahl Starts durch die automatischen Funktionstests sind bei dieser Gesamtzahl nicht inbegriffen.



Batterien respektive Superkondensatoren sowie der Einstellung der Regelung des Brennstoffzellenherstellers⁴⁸.

An Standort 5 startet die Brennstoffzelle innerhalb von zirka 50 Sekunden und übernimmt innerhalb von einer Minute die volle Last.

4.5 Wasserstoff Bereitstellung

4.5.1 Lieferservice der Gaszylinder

Die Gaszylinder wurden in der Regel mit einem Lieferwagen des Gashändlers angeliefert. Deshalb sind gut erreichbare Standorte mit ausgebauten Verkehrswegen von Vorteil, aber nicht immer gegeben. Die fünf Standorte hatten ganz unterschiedliche Voraussetzungen. Bei schlechtem Wetter mit Regen oder Schneefall waren die Standorte Nidwalden 1 und Bern aufgrund von nicht asphaltierten Feldwegen zum Standort schlecht bis gar nicht zu erreichen.

Des Weiteren ist es vorgekommen, dass ein Standort nur über die Angabe von GPS-Koordinaten aufzufinden ist. Diese waren bei den Lieferanten teilweise nicht ausreichend dokumentiert, so dass neue Chauffeure sich immer wieder verfahren hatten, was zu einem erheblichen zeitlichen Mehraufwand auf Betreiberseite geführt hatte.

Auch in Bezug auf die Lieferzeit passten die Bedürfnisse des Anwenders und das Konzept der Gaslieferanten nicht zusammen. Der Lieferant legt kurzfristig⁴⁹ ein Zeitfenster für die Anlieferung der Zylinder fest, die genaue Uhrzeit ist abhängig vom Verlauf des Tagesbetriebs. Da die Systeme aber oft an entlegenen oder nicht ganz einfach zugänglichen Standorten installiert sind, muss der Betreiber zu einer vereinbarten Zeit einen Mitarbeiter zum Standort schicken können.

4.5.2 Zylinderaustausch

Nach Anlieferung der Zylinder wurde der Zylinderaustausch an allen Standorten durch den Betreiber ausgeführt. Das Personal hat sich entsprechend eingearbeitet und auch den anschliessenden Drucktest durchgeführt. Ein Zylinderaustauschservice wurde für diese Standorte durch den Lieferanten nicht angeboten.

Für die Standorte 1 bis 4 war zudem ein durch den Installateur des Gasspeicher- und Verteilsystems ein aufwändiges Spülkonzept vorgegeben mit mehrfachem Spülen der Leitungen bei Zylinderwechsel. Die Zylinderdichtungen werden bei jedem Austausch gewechselt.

4.5.3 Ereignisse – Leckagen, Bauteilaustausch

Das Gasleitungssystem wird in der Regel einmal jährlich einem Drucktest unterzogen und auf Leckagen hin überprüft. Kleine Leckagen werden oft schnell gefunden und können teilweise durch ein festeres Anziehen der Verschraubungen behoben werden. Leckagen durch defekte Ventile oder Dichtungen haben im Projekt mehr Aufwand erfordert. Diese können die Verfügbarkeit der Notstromversorgung über eine gewisse Zeit einschränken bis ein Ersatzteil beschafft und montiert wurde.

Über die installierte Fernüberwachung des Zylinderdrucks können Leckagen durch eine Absenkung des Drucks zeitnah ermittelt werden. Im aktuellen Projekt gab es an Standort 4 ein Leck, welches dank der Remote Überwachung festgestellt wurde. An diesem Standort musste ein Spülventil ersetzt werden. Zum Projektende muss auch ein Spülventil an Standort 1 ersetzt werden. Damit musste an zwei Standorten die gleiche Komponente ausgetauscht werden. Die Spülventile wurden im Projekt

⁴⁸ Alle im Projekt installierten Brennstoffzellensysteme bestehen aus mindestens zwei Stapeln, die gemäss einer herstellerinternen Regelung abwechselnd oder gemeinsam den Strom liefern.

⁴⁹ Meist am Abend vorher



oftmals auf und zu gedreht, was mit dem im obigen Abschnitt beschriebenen aufwändigen Spülkonzept bei Zylinderaustausch zusammenhängt.

An zwei Standorten wurde während der Servicearbeiten je ein kleines Leck behoben. Keines der Ereignisse hat die Funktionsfähigkeit der Brennstoffzelle beeinträchtigt. Die Ereignisse werden in folgender Tabelle pro Standort dargestellt:

An Standort 5 wurden drei 50-Liter Druckgaszylinder indoor in einem belüfteten Gasschrank installiert. An diesem Standort gab es im Verlauf der letzten dreieinhalb Projektjahre keine Leckagen und keine Ereignisse.


Nr	Standort	Austausch Bauteil	Leckage	Bemerkung
1	Luzern	1x	1x	Leckage bei Wartung behoben Spülventil in Rohrleitung aussen muss ausgetauscht werden (schleichendes Leck) ⁵⁰
2	Graubünden			Keine Ereignisse betreffend Wasserstoffversorgung
3	Nidwalden 1		1x	Leckage in Leitung bei Wartung behoben
4	Nidwalden 2	1x	1x	Austausch Spülventil wegen Leckage; Ein Leitungsstrang wurde für 6 Wochen geschlossen bis Ersatzteil beschafft und montiert wurde. Die Brennstoffzellensystem war weiterhin funktionsfähig. 
5	Bern			Keine Ereignisse

Tabelle 11: Ereignisse in Zusammenhang mit der Wasserstoffversorgung.

4.6 Wartung und Service

Das Brennstoffzellensystem an den Standorten 1 bis 4 wurden zu Beginn der Projektlaufzeit einem Service unterzogen. Nach einem Zyklus von rund drei Jahren wurde an den Standorten 1 und 2 ein weiterer Service durchgeführt. Das System an Standort 5 arbeitet seit sieben Jahren wartungsfrei⁵¹.

Zur Wartung gehörten die folgenden Aufgaben:

- Optische Kontrolle, allenfalls Reinigen und Entstauben
- Austausch der Luftfilter
- Kontrolle der Luftkanäle

⁵⁰ Die Funktion der Brennstoffzelle ist nicht beeinträchtigt. Das Leck ist im Freien und führt zu keinem nennenswerten Gasverlust, da es eine kurze geschlossene Leitung betrifft.

⁵¹ Der Hersteller dieses Systems hat von Beginn an keine Wartung angeboten. Zum einen, weil das System als wartungsfrei betrachtet wurde und Wartungsarbeiten nur nach Funktionsstörungen und individueller Absprache vorgesehen waren. Zu anderen, weil ein Service in Europa noch nicht etabliert war. Durch einen Firmenaufkauf während des weiteren Projektverlaufs, war später kein europäischer Ansprechpartner mehr verfügbar. Die Möglichkeiten einer Wartung durch einen Serviceanbieter im Brennstoffzellenumfeld werden aktuell neu evaluiert.



- Überprüfung des Softwarestands und allenfalls Update durchführen
- Funktionskontrolle der Heizung bei Outdoor-Installationen
- Testlauf der Brennstoffzelle mit internen Lasten oder Kundenlast
- Kontrolle der Energiespeicher, Kontakte und Ladespannung überprüfen
- Funktionskontrolle des Ladegleichrichters

Zusätzlich zur Wartung der Brennstoffzelle war im Servicepaket auch ein Wartungsservice für die Gasleitungen integriert mit folgendem Aufgabenpaket:

- Sichtkontrolle der Leitungen und Ventile
- Funktionstest von Magnet- und Sicherheitsventilen
- Funktionstest von Gaswarneinheit und Rauchmelder
- Druck- und Dichtigkeitstest
- Erstellen eines Druckprüfprotokolls

Die Dichtigkeit der Gasleitungen und die Überprüfung der Ventile erfolgt in der Regel jährlich. Der Betreiber hat in der Zeit zwischen den Wartungszyklen der Brennstoffzelle Sichtkontrolle und Dichtigkeitstests selbst durchgeführt oder diese bei einem lokalen Gaslieferanten in Auftrag gegeben.

Der Wartungszyklus des Brennstoffzellensystems von drei Jahren kann für die Projektstandorte als ausreichend bewertet werden⁵². Die Sichtkontrolle an den Standorten wurde jährlich durch den Betreiber selbst durchgeführt.

Einen Einfluss der Luftqualität auf die Funktion der Brennstoffzelle aufgrund der unterschiedlichen Standortumgebungen durch Pollenbelastung oder Staub aus dem landwirtschaftlichen Umfeld oder durch höhere Emissionswerte am Autobahntunneleingang konnte im Rahmen der Wartungsarbeiten nicht festgestellt werden. Das für das System an Standort 5 kein Serviceangebot zur Verfügung steht, ist aktuell nicht zufriedenstellen.

4.7 Kosten

Die Kosten für den Betrieb eines Brennstoffzellensystems setzen sich zusammen aus Investitionskosten⁵³ und Unterhaltskosten. Die Kosten für ein Brennstoffzellensystem variieren je nach Hersteller. Im Bericht wird an dieser Stelle ein Preis aus aktuellen Angeboten als Richtangabe genannt.

4.7.1 Investitionskosten

Als Richtpreis kostet ein Brennstoffzellensystem zirka Euro 3'500.- pro Kilowatt Systemkosten. Zusätzlich kommen Kosten für einen Gasschrank und die-Gasverteilung, sowie Sicherheitssensoren. Ein Gasschrank mit sechs 50-Liter Druckgasflaschen inklusive Verteilstation kostet als Richtpreis Euro 10'000.-.

⁵² Ein zweijähriger Zyklus war geplant. Zwischenzeitlich konnte jedoch die Serviceleistung aufgrund von Firmenkonsolidierungen nicht angeboten werden.

⁵³ Für die Installation müssen je nach Standort noch Kosten für die baulichen Massnahmen und Gebühren für das Einholen von Genehmigungen und Bewilligungen berücksichtigt werden. Letztere variieren je nach Kanton.



4.7.2 Unterhalts- und Verbrauchskosten

Zu den Unterhaltskosten zählen vor allem die Wartungskosten. Für eine Wartung mit den im vorangegangenen Kapitel genannten Leistungen kann mit einem Richtpreis von zirka Euro 1'000.- pro Standort gerechnet werden.

Ersatzteile, die die Gasversorgung betreffen, sind je nach Standort individuell. An zwei Projektstandorten wurde beziehungsweise noch ein Ventil ausgetauscht. Hierbei entstanden Kosten für Serviceleistungen von etwa CHF 500.-. An drei Standorten mussten bisher keine Teile ausgetauscht werden.

Die Verbrauchskosten für Wasserstoff sind im Projekt vor allem durch die Betriebssimulationen entstanden. Im realen Betrieb mit vergleichsweise kurzen Stromausfällen und den periodischen Funktionstests müssen einzelne Gaszylinder nur alle zwei bis drei Jahre ausgetauscht werden.

Für die Wasserstoffpreise gilt der freie Marktpreis und die Preise pro Kilogramm Gas können stark variieren. Für den Betreiber ist es empfehlenswert, verschiedene Anbieter zu überprüfen. Zusätzlich zu den Gaskosten kommt die Zylindermiete mit einem Richtpreis von etwa CHF 80.- pro Jahr pro 50 - Liter Zylinder.

4.8 Messequipment und Auswertesoftware

Die Umstellung auf eine kontinuierliche Messdatenerfassung (24 Stunden, sieben Tage) und die Entscheidung für ein Linux basiertes Betriebssystem hat sich bewährt. Kurzfristige Stromausfälle und die kurzen Störfälle, die durch vermehrte Frequenz- und Spannungsabweichungen des öffentlichen Stromnetzes⁵⁴ entstehen, konnten erfasst werden. Durch die Anpassungen des Messequipments und der Messsoftware sowie der Umstellung auf das Linux basierte Betriebssystem wurde eine sehr stabile Aufzeichnung des Anlagenzustands und -betriebs möglich.

Hardwaremässig wurden die Mess-PCs mit einer Festplatte statt USB-Sticks umgerüstet, was auch zu einer stabilen Datenerfassung beigetragen hat. Als Folge der Installation dieser erneuerten Hard- und Software haben sich gelegentlich der UMTS-Router und vereinzelt die Messhardware aufgehängt. Mittels zusätzlicher Softwareüberwachungsroutinen und eines täglichen Auto-Restart des Routers wurden diese Probleme behoben.

Der erhöhte Initialaufwand für die Installation wurde durch die deutlich bessere Stabilität aufgewogen. Das Messequipment sowie Datenerfassung, Datenspeicherung und Datenübertragungen funktionieren zum Zeitpunkt der Berichterstellung immer noch zuverlässig.

Generell ist die Auswahl von Hard- und Software für derartige Langzeitmessungen schwierig, da Support, Leistungsfähigkeit und insbesondere auch Sicherheit über eine verhältnismässig lange Zeit garantiert werden müssen⁵⁵. Für das ursprüngliche Betriebssystem der Mess-PCs wurden Support und Sicherheitsupdates vor fünf Jahren, im April 2014 eingestellt. Ersatzkomponenten für Mess-PC und Messhardware wären bei einem Ausfall nicht mehr erhältlich.

⁵⁴ Ein Indikator für die Stromversorgungssicherheit ist die Entwicklung der Frequenz- und Spannungsabweichungen. Diese Daten werden von der Eidgenössischen Elektrizitätskommission ELCom jährlich erfasst und veröffentlicht. Gemäss dem Bericht 2018 steigt seit 2014 die Gesamtanzahl der Frequenzabweichungen an. Eidgenössische Elektrizitätskommission ELCom, Fachsekretariat: Versorgungssicherheit der Schweiz 2018, S. 14. Bern, Mai 2018

⁵⁵ Für das Betriebssystem Windows XP aus dem Vorgängerprojekt wurden Support und Sicherheitsupdates bereits vor fünf Jahren, im April 2014 eingestellt. Ersatzkomponenten für Mess-PC und Messhardware wären bei einem Ausfall nicht mehr erhältlich gewesen.



5 Diskussion der Ergebnisse

Nach sieben Jahren Einsatz im Feld zeigen alle Brennstoffzellensysteme sehr gute Ergebnisse. Sie weisen eine hohe Zuverlässigkeit im realen Betrieb über alle Standortvarianten und auch bei tiefen Aussentemperaturen auf. Die Erkenntnisse werden in diesem Kapitel diskutiert.

5.1 Zuverlässigkeit - Messbare Ziele

Die messbaren Ziele aus Kapitel 2.4 werden in diesem Abschnitt bewertet:

- Die Zuverlässigkeit des Systems ist grösser als 99 %.
- Die Reaktionszeit⁵⁶ ist kleiner 5 ms.
- Bei Testende ist keine beträchtliche Beschädigung der Brennstoffzellensysteme feststellbar. Das heisst, die Brennstoffzellensysteme sind noch funktionsfähig.

Mit einer Zuverlässigkeit von 99.6% bis 100% haben die Systeme das Projektziel vollumfänglich erfüllt. Eine Reaktionszeit kleiner 5 Millisekunden ist durch die Batterien beziehungsweise Kondensatoren der Startup-Einheit gewährleistet, die die Spannung am Batteriebus halten. Bei Testende gab es keine beträchtlichen Beschädigungen und es können keine Alterungserscheinungen beobachtet werden. Alle Systeme sind noch voll funktionsfähig. Alle Anwender beurteilen die Zuverlässigkeit und das Betriebsverhalten der Brennstoffzellen als zufriedenstellend.

Neben der Zuverlässigkeit sind auch die Verfügbarkeit des Systems und die zuverlässige Bereitstellung des Brennstoffs ein wichtiges Kriterium für den Betrieb von Notstromanlagen. Durch Leckagen im Leitungssystem oder längere Liefer- oder Servicezeiten für einzelne Komponenten wie z.B. Ventile, kann die Verfügbarkeit einer Anlage eingeschränkt beziehungsweise die Autonomiezeit reduziert sein. Für den Anwender ist es empfehlenswert im Vorfeld die Verfügbarkeit kritischer Bauteile⁵⁷ abzuklären oder Ersatzteile selbst am Lager zu halten.

Die Anzahl verschiedener Ereignisse und die Zuverlässigkeit während der Projektlaufzeit⁵⁸ werden in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Nr.	Standort	Anzahl realer Stromausfälle	Anzahl Fehler Startup Einheit	Anzahl Fehler BZ	Anzahl Ereignisse H2 Infrastruktur, Leckage	Zuverlässigkeit
1	Luzern	5	1	0	1	99.6%
2	Graubünden	3	1	1		99.6%
3	Nidwalden 1	1	0	0	1	100%
4	Nidwalden 2	8	0	0	1	100%
5	Bern	6	0	0	0	100%

Tabelle 12: Zusammenfassung aller Ereignisse an den einzelnen Standorten

⁵⁶ Die Reaktionszeit ist die Zeitspanne, bis das Notstromsystem die Last übernimmt.

⁵⁷ Z.B. Ventile für Gasleitung

⁵⁸ von 2016 bis zum 1. Quartal 2019



In Zusammenhang mit der Startup-Einheit gab es zwei Vorfälle. Der letzte Vorfall war erst kurz vor Projektende. Die Systemintegration muss noch weiter analysiert und die Spannungsschnittstellen überprüft werden.

Mit der Brennstoffzelle gab es nur einen Vorfall an Standort 2; ein Spannungsabfall, der auf einen Handhabungsfehler zurückzuführen ist. Das System hatte keinen automatischen Startmechanismus integriert, mit welchem es vermutlich nicht zu diesem Spannungsabfall aufgrund einer halbjährlichen Standby-Zeit gekommen wäre. Bei den neuen Brennstoffzellenprodukten ist ein automatischer Startmechanismus in der Regel integriert. Die Stapel wurden vollständig regeneriert und nach den aktuellen Testergebnissen ist ein End of Life der Brennstoffzelle noch nicht ersichtlich

5.2 Unterhalt und Service

In diesem Zusammenhang ist auch das Ziel zu sehen, Erfahrungen mit der Serviceverfügbarkeit in der Schweiz und dem Umgang mit der Wasserstoffinfrastruktur durch Zulieferpartner und Betreiberpersonal zu gewinnen. Verbesserungspotential gibt es im Hinblick auf die Versorgungslogistik und die Serviceverfügbarkeit für Zylinderanlieferungen und Zylinderanschlusservice. Das Anlieferungskonzept der Gaslieferanten mit kurzfristigen und flexiblen Angaben für die Lieferzeit passt mit dem Anwenderbedürfnis nach konkreten Terminen für die Anlieferung im Feld nicht zusammen.

Auch besteht ein Bedarf der Betreiber nach einem Zylinderanschlusservice für die Installationen im Feld, der bisher nicht angeboten wird⁵⁹. In diesem Bereich ist das Geschäftsmodell sowohl für Anwender als auch für Lieferanten noch unbefriedigend. Dabei spielt die Serviceverfügbarkeit eine wichtige Rolle für die Betreiber. Vor allem kantonale Organisationen können oft kein eigenes Personal ausbilden und sind auf den Einkauf von Serviceleistungen angewiesen.

Des Weiteren hat sich das Vorgehen beim Zylinderwechsel mit einem aufwändigen Spülkonzept als umständlich erwiesen. Dieses Konzept wurde durch den Anlagenlieferanten vorgegeben. Im Projekt hat sich dies in der Anwendung als zu umständlich erwiesen und einfachere Gasverteilkonzepte sind anzustreben.

Hingegen hat sich das Konzept der Wartung 'aus einer Hand', das heisst Wartung von Brennstoffzelle, Wasserstoffinfrastruktur und Sicherheitsvorkehrungen bewährt und ist für zukünftige Installationen ein gutes Konzept. Nach den Projekterfahrungen haben neben der Funktionsfähigkeit der Anlagen ein gutes Serviceangebot für Brennstoffzellensysteme und Gasversorgung einen hohen Stellenwert für die Betreiber. Die Serviceverfügbarkeit ist ein wichtiges Auswahlkriterium für die Betreiber in der Schweiz⁶⁰.

5.3 Entwicklung eines stand-alone Systems mit Superkapazitäten

Das stand-alone Systems mit Superkondensatoren statt Batterien und ohne die Standard-USV wurde erfolgreich entwickelt⁶¹ und in Betrieb gesetzt. Der Betrieb als stand-alone System hat zuverlässig

⁵⁹ Ein Anschlusservice für Laborinstallationen gibt es und wird von ausgebildetem Fachpersonal durchgeführt. Im Feld gibt es nur einen Lieferservice. Die Zylinder werden von Chauffeuren angeliefert.

⁶⁰ Aufgrund der noch relativ jungen Brennstoffzellen-Technologie war dies im Rahmen des Projekts nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet.

⁶¹ Der Aufwand für die Entwicklung hat mehr Zeit und Eigenaufwand erfordert als geplant, da der Brennstoffhersteller aufgrund einer Insolvenz kurzfristig seinen Support einstellen musste.



funktioniert und die erforderliche Leistung wurde jederzeit zur Verfügung gestellt. Trotz dieser guten Ergebnisse ist die spannungsgeführte Regelung des Systems noch einmal zu überdenken, um einen stabileren Betrieb der Brennstoffzelle zu erreichen.

Aus wirtschaftlicher Sicht lohnt sich der Einsatz von Superkondensatoren (noch) nicht, da sie im Vergleich zu Batterien teuer sind. Zusätzlich kommt der Aspekt, dass die einzelnen Kondensatoren für kleine Spannungen ausgelegt sind, so dass es eine hohe Anzahl von Kondensatoren braucht, um die erforderliche Spannung für das Equipment zu erreichen.

5.4 Betriebskonzept

Das Betriebskonzept der POLYCOM Station an Standort 5 wird von den Autoren als überzeugend bewertet. Durch die Lastübernahme der Batterien in den ersten Notstromstunden steht der Wasserstoff für die lang anhaltenden Ausfälle zur Verfügung. Dadurch wird Wasserstoff nur für die Systemtests verbraucht und ein Zylinderwechsel erfolgt erst nach langen Zyklen von bis zu drei Jahren. Während dieser Zeit kann die volle Autonomiezeit aufrechterhalten werden ohne weiteren Aufwand.

Die Systemintegration an Standort 5 wurde unter dem Gesichtspunkt geplant die Komponenten USV, Brennstoffzelle und Wasserstoffversorgung aus einer Hand anzubieten und die gesamte Systemsteuerung in die Mikrocontroller Unit (MCU) der USV einzubinden. Dies hatte im Vorgängerprojekt einen hohen Integrationsaufwand erfordert, doch die Anlage funktioniert überzeugend. Das Konzept ist anwenderfreundlich und entspricht prinzipiell dem Bedürfnis des Betreibers, einen unkomplizierten Service für alle Komponenten aus einer Hand einzukaufen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Folgende Erkenntnisse ergeben sich aus dem Projekt:

- Die Brennstoffzellensysteme sind sehr robust und funktionieren zuverlässig. Die Stapel haben eine gute Regenerationsfähigkeit.
- Eine Funktionsüberwachung der Startup Einheit ist sinnvoll⁶².
- Das gewählte Test-Setup entspricht gut den realen Stromausfallsituationen und wäre als Standard-Testset für Feldmessungen mit Brennstoffzellen im Notstrombereich geeignet.
- Bei der Wasserstoff Versorgung gibt es Verbesserungspotential im Hinblick auf
 - die Serviceverfügbarkeit
 - das Konzept für Gasverteilstationen und
 - das Konzept für die Zylinderwechsel.
- Forschungsbedarf gibt es bei der Regelung der Brennstoffzelle. Die spannungsgeführte Regelung der Systeme ist für einen stabilen Betrieb der Brennstoffzelle nicht ideal.
- Forschungsbedarf gibt es bei der Systemintegration.

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind für einen Einsatz im Notstrombereich gut geeignet und arbeiten zuverlässig. Mit diesen Systemen sind flexible, auf den Anwender angepasste Betriebskonzepte zur Erhöhung der

⁶² Dies ist durch die Kombination mit einer Standard USV in der Regel gewährleistet.



Autonomiezeit möglich. Die Investitionskosten sind im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen (noch) hoch, doch die Kosten sind nicht das alleinige Kriterium für eine Notstromlösung⁶³. Mit der Option auf eine lange Autonomiezeit ohne Personal vor Ort können gerade für die POLYCOM Anwendungen mit einer geforderten 72 Stunden-Autonomie die Vorteile einer Brennstoffzelle heute schon überwiegen. Die Alterung der Brennstoffzelle hat nach sieben Jahren noch keine Auswirkungen auf den Betrieb in der entsprechenden Anlage.

Systemintegration

In Bezug auf die Systemintegration konnten im Projekt wertvolle Erfahrungen gewonnen werden. Trotz der demonstrierten Praxistauglichkeit im Feld gibt es weiteren Entwicklungs- und Demonstrationsbedarf: Die Autoren sehen vor allem ein Forschungspotential im Hinblick auf die Untersuchung verschiedener Systemintegrationsmöglichkeiten. Die Spannungsschnittstellen zwischen Brennstoffzelle, Regelung der Brennstoffzelle, Startup Einheit und Ladegleichrichter sollten weiter im Detail untersucht werden, um die Abhängigkeiten besser zu verstehen und zu optimieren.

Wasserstoff

Die Wasserstoffversorgungslogistik ist (noch) nicht ausreichend anwenderfreundlich. Es gibt Verbesserungspotential in den Bereichen Transport, Zylinderwechsel, Verteilung und Speicherung. Beim Transport passt die Organisation der Anlieferung von Lieferant zu Anwender nicht gut zusammen. Ein Zylinderwechselservice wird bei den Anlagen im Feld nicht angeboten; dadurch muss der Anwender eigenes Personal ausbilden. Die Konzepte für einen Zylinderwechsel sollten möglichst einfach gehalten und bei der Verteilstation so wenig Ventile und Verschraubungen wie möglich eingesetzt werden.

Für grössere Gasmengen wären neue Konzepte zu Speicherung und Nachfüllung notwendig, zum Beispiel mit einer Gasspeicherung im Tank statt in Zylindern oder einem Nachfüllen des Gases vor Ort. Dadurch würde der Zylinderaustausch entfallen.

Darüber hinaus kann für einzelne Standorte geprüft werden, statt wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen ein System mit Methanol zu wählen. Methanol Zellen versprechen weniger Aufwand bei der Brennstoffbeschaffung, Verteilung und Speicherung. Zudem gibt es in der Öffentlichkeit weniger Sicherheitsbedenken, da Methanol nicht explosiv ist.

6.1 Nächste Schritte nach Projektschluss

Die Projektpartner sind sich einig, dass eine Fortsetzung der wissenschaftlichen Standortbegleitung mit Testinstallation und Messungen im gleichen Rahmen sinnvoll ist. Für Swisscom ist vor allem die Lebensdauer des Systems von Interesse. Noch sind die Systeme verhältnismässig teuer, aber sollte ein Betrieb mit Brennstoffzellen von 12 bis 15 Jahren möglich sein, würde dies die Kosten im Verhältnis zu den Kosten mit einem rein batteriegestützten System relativieren.

Für die POLYCOM Installationen könnte sich die Bedeutung der Brennstoffzellen-Technologie in nächster Zeit stark erhöhen. Der Bundesrat hat eine nationale Strategie 2018 – 2022⁶⁴ verabschiedet, mit der unter anderem gravierende Stromausfälle kritischer Infrastrukturen (KI) verhindert werden sollen. Zu den kritischen Infrastrukturen zählen die Telekommunikation und die Blaulichtorganisationen. Die Bedeutung des POLYCOM Netzes wird hervorgehoben und eine der Schutzmassnahmen ist die Beschaffung von Notstromanlagen.

⁶³ Die Brennstoffkosten selbst spielen keine so grosse Rolle, da die Betriebsdauer der Notstromlösungen in der Regel kurz ist.

⁶⁴ Schweizerischer Bundesrat: Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen 2018–2022; S. 511, S. 514; Bern, Dezember 2017



Die Hochschule Luzern – Technik & Architektur ist für Messungen im Feld unter anderem dank der Erfahrungen in diesem Projekt gut vorbereitet und konnte wertvolle Erfahrungen erwerben in Bezug auf Messausrüstung und Analyse. In einem Folgeprojekt können noch vertiefte Auswertungen in Bezug auf Gesamt-Wirkungsgrad und Lastprofile durchgeführt werden, die den Umfang dieses Projektes übersteigen. Forschungspotential gibt es im Hinblick auf die Systemintegration. Ein Folgeprojekt zum Betrieb der im Bericht beschriebenen Standorte für weitere fünf Jahre, allenfalls bis zum End-of-Life der Systeme, soll deshalb beantragt werden.



7 Publikationen

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



8 Referenzen

Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS): Bericht zur Zukunft der Alarmierungs- und Telekommunikationssysteme für den Bevölkerungsschutz; S. 30, 29.09.2017.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS): Katastrophen und Notlagen Schweiz, Technischer Risikobericht, S. 39, 30.06.2015.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Regierungsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 – 2026: S. 13, 30.09.2016.

Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, Fachsekretariat: Versorgungssicherheit der Schweiz 2018, S. 14. Bern, Mai 2018

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung: Stationäre Brennstoffzellen-Anwendungen, Wiesbaden 2016, S. 13

M. F. Serincan, U. Trachte, A. Graizzaro, A. Pilenga: FITUP project - Public report on test results, EU FP7/2007-2013, June 2014.

Schweizerischer Bundesrat: Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen 2018–2022; S. 511, S. 514; Bern, Dezember 2017 - *Schlussfolgerungen*

Schweizerischer Bundesrat: Risikoanalyse des Bundes

U. Trachte, P. Sollberger: Bundesamt für Energie BFEE - USV mit PEM BZ, Dezember 2015

U. Trachte, P. Sollberger: Bundesamt für Energie BFEE – 15 kW USV mit CH BZ, Januar 2019



9 Anhänge

9.1 Anhang 1: Tabelle mit aufgezeichneten Messdaten pro Standort

Standort	Luzern	Graubünden	Nidwalden 1	Nidwalden 2	Bern
	1	2	3	4	5
Bus Voltage	x	x	x	x	x
Startup Unit Current	x	x	x		
Rectifier Current	x	x		x	
SCap Current				x	
Battery Current					x
Fuel Cell Current			x	x	x
Load Current					x
Base Station Current			x	x	
Divers Current			x	x	
DAQ Unit Current			x	x	
Air Cond Current			x		
Room Temperature	x	x	x	x	x
Outdoor Temperature			x		
Main H2 Pressure	x	x	x	x	x
Reserve H2 Pressure	x	x	x	x	x
FC Data Voltage	x	x	x	x	
FC Data Current	x	x	x	x	
FC Data Power	x	x	x	x	
FC Data Inlet Temp	x	x	x	x	
FC Data Inlet Pressure	x	x	x	x	
FC Data Cell Pressure	x	x	x	x	
FC Data Cell 1 Power	x	x	x	x	
FC Data Cell 2 Power	x	x	x	x	
FC Data Cell 3 Power	x	x			
H2 Flow					x
Grid On	x	x	x	x	x
Fuel Cell On	x	x	x	x	x
Fuel Cell Warning	x	x	x	x	x
Fuel Cell Alarm	x	x	x	x	x



Fuel Cell Low Fuel	x	x	x	x	x
Valve 1 On					x
Valve 2 On					x
H2 Warning	x	x			x
H2 Alarm	x	x	x		x
H2 Sensor Fault			x		x
H2 Alarm HC200					x
Rectifier Warning				x	
Rectifier Alarm				x	

Tabelle 13: Tabelle mit aufgezeichneten Messdaten pro Standort

9.2 Anhang 2: Auslegung Speicherplatz für Messdaten

Grösse eines Tuples:

- 18 x 4 Bytes in Binärformat
- 18 x 12 Bytes in Textformat

Anzahl Messwerte pro Tag:

- 24 Stunden \wedge = 86'400 Tupel

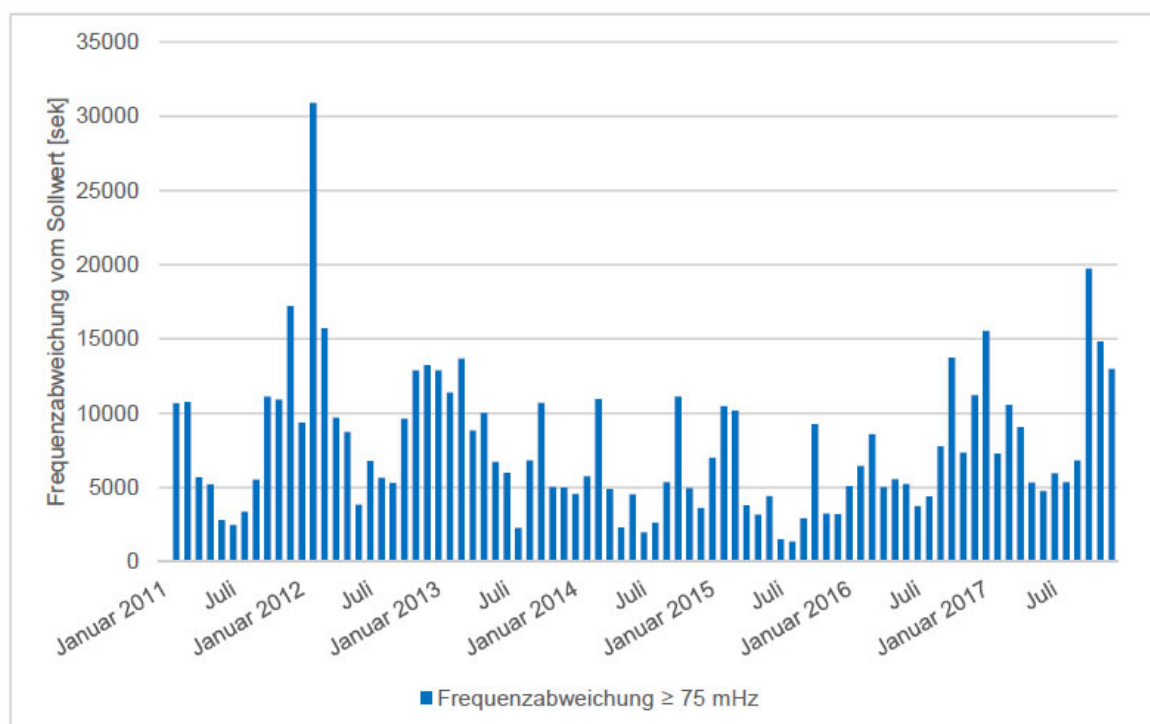
Speicherbedarf:

- Binär pro Tag 6'220'800 Bytes (5.9 MB)
- Binär pro Jahr 126'144'000 Bytes (2.1 GB)
- Text pro Tag 18'662'400 Bytes (17.8 MB)
- Text pro Jahr 126'144'000 Bytes (6.4 GB)



9.3 Anhang 3: Entwicklung der Stromversorgungssicherheit

Zu den Faktoren, die ein Indikator der Entwicklung der Stromversorgungssicherheit darstellen gehört die Entwicklung der Frequenz- und der Spannungsabweichung. Diese Daten werden von der Eidgenössischen Elektrizitätskommission ELCom jährlich erfasst und veröffentlicht. Gemäss dem Bericht 2018 steigt seit 2014 die Gesamtanzahl der Frequenzabweichungen an. Im folgenden Schaubild ist diese Entwicklung ersichtlich.





Das folgende Schaubild aus dem Elcon Bericht zur Stromversorgungssicherheit 2017⁶⁸ zeigt den Anstieg der Redispatchenergiemengen von 2012 bis 2017. Es zeigt, dass der Netzbetrieb in den Sommermonaten anspruchsvoller geworden ist.

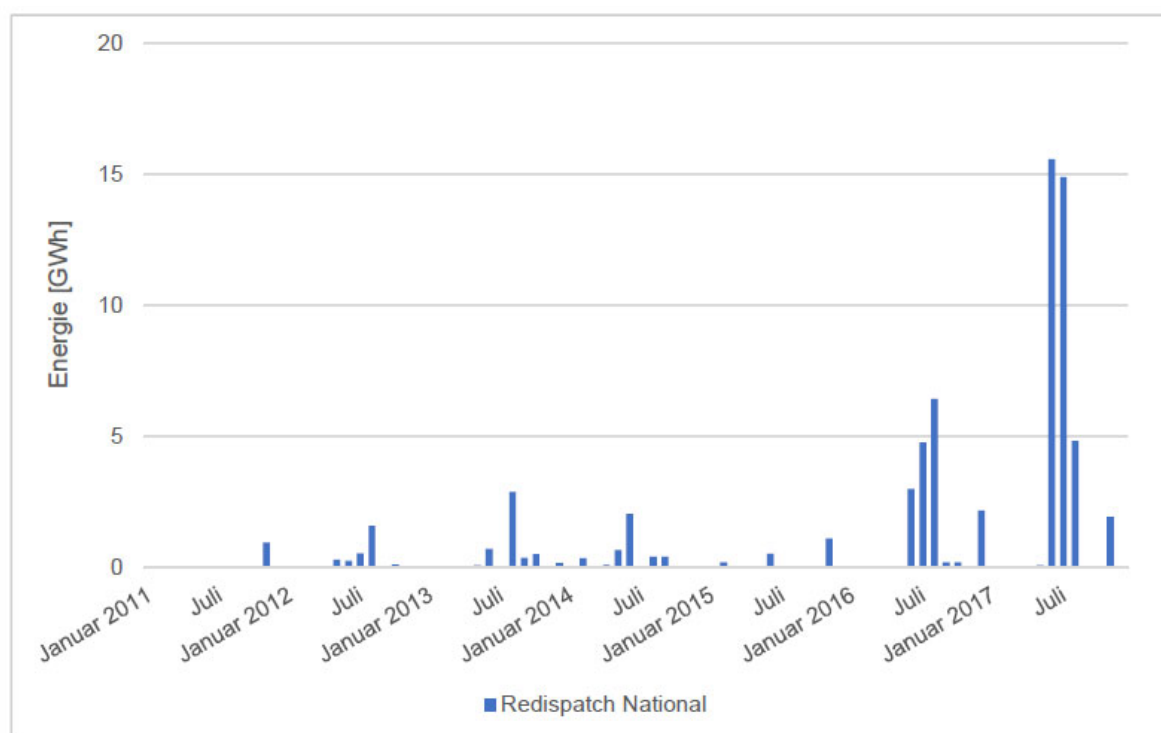


Abbildung 34: Eingesetzte Energiemenge für nationale Redispatchmassnahmen (Quelle: Swissgrid).

⁶⁸ Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, Fachsekretariat: Versorgungssicherheit der Schweiz 2017, S. 15. Bern, 2017