

# „Untersuchung des Betriebsverhaltens von ausgewählten DC versorgten Komponenten eines Umspannwerkes bei Tiefentladung,,

**Hans-Jürgen Wernegger**

KNG-Kärnten Netz GmbH, Abteilung Diagnose und Instandhaltung HS, Kirchengasse 104, A-9020 Klagenfurt am Wörthersee, +43 (0)50525 1245., hans-juergen.wernegger@kaerntennetz.at, <http://www.kaerntennetz.at/>

**Kurzfassung:** Im Falle eines Blackouts sind Umspannwerke neben den Leitungsanlagen und Kraftwerken für einen Netzwiederaufbau von zentraler Bedeutung. Die Zeit, in der ein Umspannwerk dabei ohne „externe“ Netzspannung weiterhin ferngesteuert und bedient werden kann, wird Autonomiezeit genannt und bestimmt sich dabei grob durch die Kapazität der gesicherten Stromversorgungsanlage (GSV-Anlage) und die Last der durch Gleichstrom (DC) versorgten Komponenten.

Kann, aus welchen Gründen auch immer, ein Netzwiederaufbau nicht vor Ablauf der Autonomiezeit von Umspannwerken erfolgen, dann kommen die Batterien in den Zustand der Tiefentladung. Wie lange die DC – versorgten Komponenten in so einem Fall noch funktionieren, ob und wann es zu Pendel- od. Pumpvorgängen zwischen Batterie und DC-Verbrauchern kommt, ob die DC-Verbraucher im Falle einer wiederkehrenden Spannung wieder (ordnungsgemäß d.h. auch ohne Verlust der Parameter) funktionieren und ob die tiefentladenen Batterien wieder problemlos aufgeladen werden können waren zentrale Ziele dieser Untersuchung. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die untersuchten Komponenten teilweise noch bis weit unter den in den Handbüchern angegebenen Spannungsgrenzen funktionierten. Die im Anschluss des Versuches durchgeführten Überprüfungen zeigten, dass alle Parameter in den Geräten erhalten geblieben sind. Aufgrund der geringen Schalthysterese des DC/DC-Wandlers traten ab einer bestimmten Spannung funktionstechnisch gefährliche Pendel- bzw. Pumpvorgänge von DC/DC-Wandler und Batterie auf. Der Batterieladevorgang des 110-V-Versuches musste wegen kritischer Erwärmung einer defekten Zelle abgebrochen werden.

**Keywords:** Blackout, Umspannwerke, Autonomiezeit, GSV Anlage, Tiefentladung

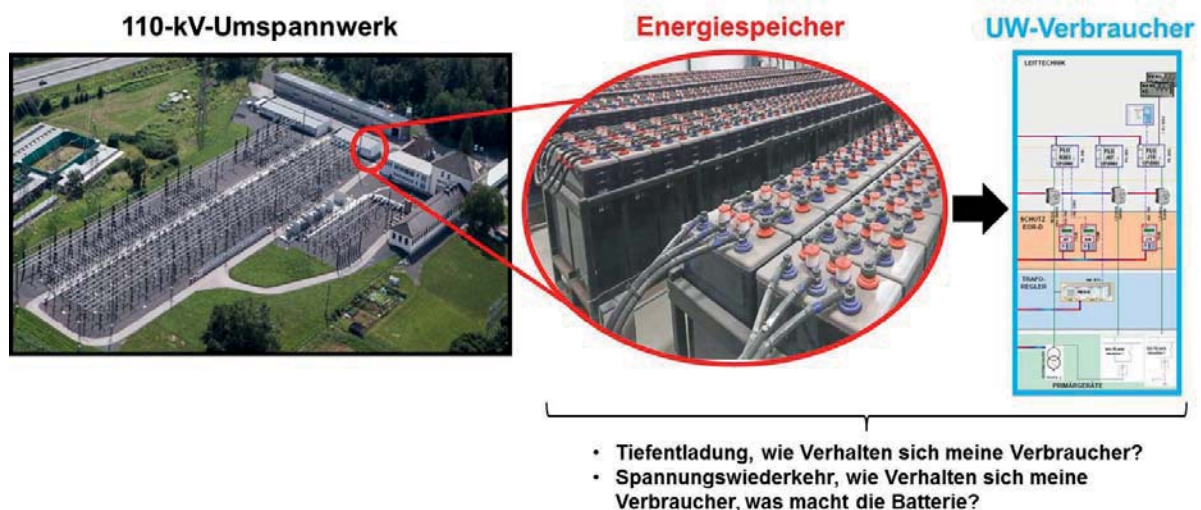
## 1 Einleitung

Unter dem Begriff Blackout versteht man im allgemeinen Sprachgebrauch einen überregionalen und unter Umständen mehrere Staaten betreffenden Stromausfall. Wann so ein überregionaler Stromausfall eintritt, wie lange er dauert, wie schnell und wie weit er sich ausdehnt ist dabei aber nicht vorhersehbar.

Um die elektrische Energieversorgung nach einem überregionalen Stromausfall möglichst rasch wiederherstellen zu können, müssen nach [1] folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Verfügbarkeit der Netze
- Verfügbarkeit von Erzeugungsanlagen für Schwarzstart und Inselbetrieb
- USV Versorgung zentraler Netzkomponenten
- Trainierte Netzwiederaufbaukonzepte

Wer, wie und wann bei einem Netzwiederaufbau auf Kraftwerksanlagen und Umspannwerke in Kärnten zugreift, wird im „Vertrag über die koordinierte Vorgangsweise bei Großstörungen in Kärnten“ (Netzwiederaufbaukonzept) zwischen der KNG (KNG-Kärnten Netz GmbH) und der APG (Austrian Power Grid AG) festgelegt. Faktum ist, dass die Umspannwerke neben den Leitungsanlagen und den Kraftwerken für einen schnellen Netzwiederaufbau von zentraler Bedeutung sind. Die Zeit, in der ein Umspannwerk ohne „externe“ Netzspannung ferngesteuert und bedient werden kann wird Autonomiezeit genannt und bestimmt sich grob durch die Kapazität der GSV – Anlage (Zellenanzahl, Zustand, Alter) und die Last der DC-versorgten Komponenten.



**Abbildung 1) Ausgewählte UW-verbraucher, welche im Falle eines Blackouts von einem Energiespeicher (Batterie) aus (weiter) versorgt werden können**

Kann, aus welchen Gründen auch immer, ein Netzwiederaufbau nicht vor Ablauf der Autonomiezeit von Umspannwerken erfolgen, dann kommen die Batterien in den Zustand der Tiefentladung. Wie lange die DC – versorgten Komponenten in so einem Fall noch funktionieren, ob und wann es zu Pendel- od. Pumpvorgängen zwischen Batterie und DC-Verbrauchern kommt, ob die DC-Verbraucher im Falle einer wiederkehrenden Spannung wieder (ordnungsgemäß d.h. auch ohne Verlust der Parameter) funktionieren und ob die tiefentladenen Batterien wieder problemlos aufgeladen werden können waren zentrale Ziele dieser Untersuchung.

## 2 Methodik

Um den Versuchsaufwand auf ein verträgliches Maß (technisch/wirtschaftlich) zu beschränken ist mit allen Geräteverantwortlichen (Schutz, Leittechnik, Kommunikation, Primärgeräte, Batterie und Gleichrichter) ein abgestimmtes Verbraucher-Gerätekonzept festgelegt sowie die Spannungsebenen der Batterien auf 24 V und 110 V eingeschränkt worden.

Die eingesetzten / getesteten Komponenten spiegeln dabei den „Status Quo“ in den meisten Umspannwerken der KNG wider. Die durchgeführten Versuche gliedern sich dabei grob in gerätespezifische Grunduntersuchungen, in zwei 24-V-Batterie-Vorversuchen und einem 110-V-Hauptversuch. Um einerseits möglichst viel Informationen aus den Versuchen ableiten zu können und andererseits die Versuchsdurchführungen so real wie möglich zu gestalten, sind weiters folgende Festlegungen getroffen worden:

- Einsatz von bereits in einem Umspannwerk im Betrieb befindlichen Geräten in Kombination mit „neuen“, aus der Störungsreserve entnommenen Geräten
- Leittechnische Einbindung aller beim Versuch beteiligten Geräte und Integration der kompletten Leit- und Übertragungstechnik in das KNG – Netzleitsystem „UW 99“
- Vorgabe eines fixen Versuchsablaufes je Versuch „Drehbuch“ mit zyklisch durchzuführenden Schalthandlungen (in der Tiefentladungsphase mit dementsprechend erhöhter Schalthäufigkeit)
- Ferngesteuerte Durchführung aller Schalthandlungen<sup>1</sup> durch die Hauptschaltleitung der KNG von Klagenfurt aus
- Ausschließliche Verwendung des Betriebsfunks und des Betriebstelephons für die Kommunikation mit der Hauptschaltleitung
- Ladung einer vollständig entladenen Batterie mit wiederkehrender Netzspannung



Abbildung 2) UW Versuchsaufbau in der Kranhalle des UW Landskron (links), beim Versuch verwendete Primär- und Sekundärtechnik des bestehenden UW Landskron (mitte und rechts)

<sup>1</sup> Gilt nicht für die durchgeführten Schalthandlungen nach Ausfall der Leittechnik

Versuchsablauf: Zum Zeitpunkt  $t=0$  erfolgt die Trennung der externen Netzspannung. Ab diesem Zeitpunkt werden die Funktionsweisen aller beim Versuch beteiligten DC-Verbraucher bei sukzessiver Entladung der Batterie durch den Geräteeigenverbrauch, einen elektronisch geregelten Lastwiderstand (TORKELE), einen Schiebewiderstand und durchgeführte, belastungstechnisch - relevante Schalt- und Regelhandlungen von Primärgeräten visuell beobachtet, messtechnisch aufgezeichnet und anschließend anhand der Geräteprotokolle einer umfangreichen Überprüfung und Analyse unterzogen. Nach vollständiger Entladung sollen die Batterien mit wiederkehrender Netzspannung geladen werden.

### 3 110-V-Hauptversuch

#### 3.1 Allgemeines

Der 110-V-Hauptversuch wird zwar nicht an einem kompletten Umspannwerk durchgeführt, die Versuchsanordnung beinhaltet jedoch alle funktions- und kommunikationstechnisch relevanten DC – Verbraucher, welche im Falle eines Blackouts durch die Batterieanlage versorgt werden. Es kommen hierbei sowohl Geräte des bestehenden UW Landskron (Primärgeräte, Sekundärgeräte), als auch neue (aus der Störungsreserve entnommene) Geräte zum Einsatz (UW-Versuchsaufbau). Im Zuge des Versuches wird seitens der GSV-Abteilung getestet, ob eine komplett entladene Batterieanlage nach Wiederkehr der Netzspannung mit dem dazugehörigen Gleichrichter vollständig geladen werden kann.

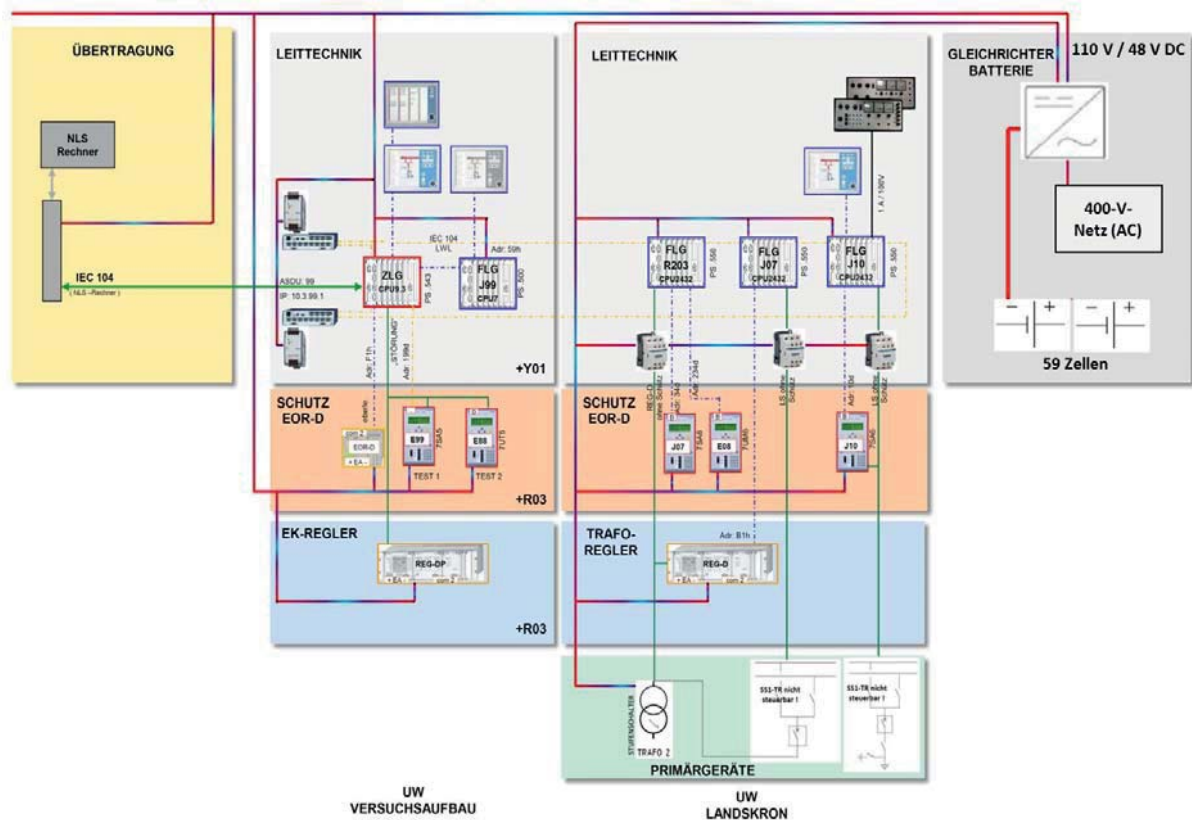


Abbildung 3) Übersicht Leittechnikkonzept 110-V-Hauptversuch

Untersuchte Komponenten beim 110-V-Hauptversuch im Überblick:

- 110-V-Energiespeicher (59 Zellen 18 GroE 450)
- 110-V-Gleichrichter in Zusatzzellentechnologie
- Zentralleitgerät
- Feldleitgeräte
- Spannungs- und E-Kompensationsregler
- Schutzgeräte versch. Generationen
- Primärgeräte (Leistungsschalter, Trenner, Stufensteller)
- Geräte der Übertragungstechnik

Übersicht Versuchsablauf 110V Hauptversuch				
Beginn der Abschaltung:	23.04.2017	14.01 Uhr		
Belastungsstrom:	4,5A	Konstantverbrauch		
	5,6A	Torkel (direkt auf Batterie geschaltet, ohne Shunt)		
	10,0A	Gesamtstrom (Torkel und Grundverbrauch)		
Belastungsstrom ab 25.4.:	4,5A	Konstantverbrauch		
	20-35A	Torkel		
	9,5A	Schiebewiderstand		
Schaltschema:	23.04.2017	13.58 Uhr	1.Schaltung	(Vor Netzausfall)
	23.04.2017	14.16 Uhr	2. Schaltung	(Kurz nach Netzausf.)
	24.04.2017	08.24 Uhr	3. Schaltung	(Nach 180Ah Entn.)
	24.04.2017	16.19 Uhr	4. Schaltung	(Nach 260Ah Entn.)
	25.04.2017	07.56 Uhr	5. Schaltung	(Nach 420Ah Entn.)
	25.04.2017	10.12 Uhr	6. Schaltung	(Gesamtsp. 110V)
	25.04.2017	11.21 Uhr	7. Schaltung	(Gesamtsp. 100V)
	25.04.2017	12.07 Uhr	LT-AUSFALL!!!	
25.04.2017	12.23 Uhr	8. Schaltung	(Händisch, ohne LT)	
Hochfahrprogramm:	26.04.2017 ca.	08.28 Uhr	Netzspannung Ok	Gleichrichter liefert sofort 99V (Strom langsam steigend ca. 20A)

Tabelle 1) Übersicht 110-V-Versuchsablauf

## 3.2 Ergebnisse

### 3.2.1 Batterieentladekurve, Ausfallszeitpunkte der Verbraucher

Die rechnerische Autonomiezeit ergab vor dem Versuch 40 h. Beim Versuch wurde die Nennkapazität von 450 Ah nach 42 h 45 min (113 V Gesamtspannung) und die minimale Tiefentladespannung nach 48 h 36 min (21,6 V Gesamtspannung) erreicht.

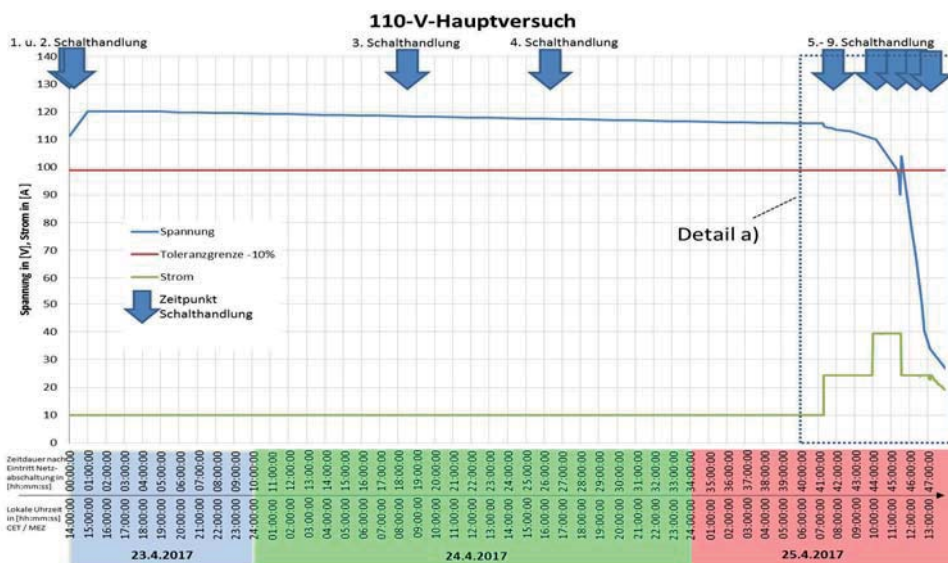


Abbildung 4) Spannungsverlauf Batterie, Schalthandlungen und Belastungsstrom

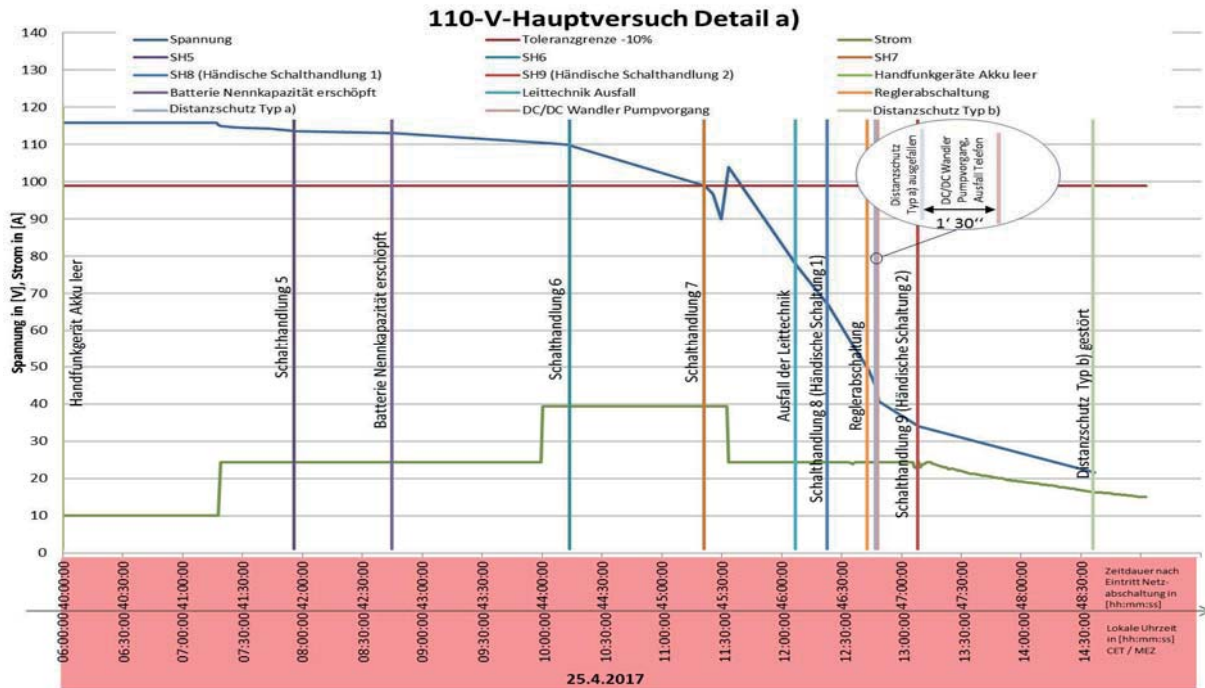


Abbildung 5) Detail a) Spannungsverlauf Batterie, Schalthandlungen, Belastungsstrom, Ausfallszeitpunkte der Verbraucher in der Tiefentladungsphase

### 3.2.2 Batterie und Gleichrichter

Durch die beim Versuch bewusst durchgeführte Tiefenladung des Energiespeichers ist bei einer Zelle des Energiespeichers ein irreversibler Schaden aufgetreten, welcher in weiterer Folge beim Ladevorgang zu einer kritischen Erwärmung und zum Abbruch des Versuches führte. Die Funktion des Gleichrichters und der integrierten Komponenten war während des gesamten Versuches aufrecht, es kam zu keinen unerwarteten Problemen / Störungen am Gleichrichter selbst.

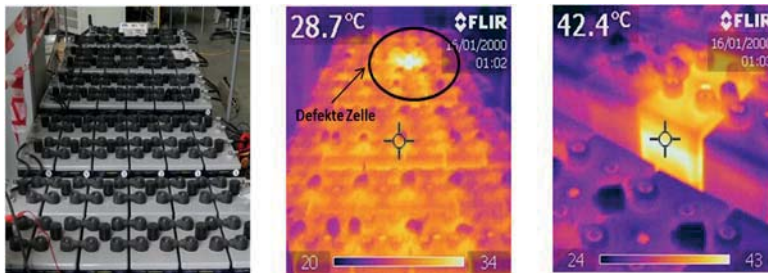


Abbildung 6) Links 110-V-Zellenverbund, Mitte thermographisches Bild 110-V-Zellenverbund bei Ladung, Rechts thermographisches Bild der defekten Zelle bei Ladung

### 3.2.3 Leittechnik

Bei den untersuchten Leittechnikgeräten ist die Stromversorgungsbaugruppe mit einer speziellen Einrichtung zur Überwachung der Versorgungsspannung ausgestattet. Diese Einheit überwacht permanent die Versorgungsspannung im Hinblick auf die erlaubten Betriebsparameter Überspannung und Unterspannung. Nur wenn die Versorgungsspannung innerhalb der zulässigen Betriebsparameter liegt, wird die Versorgungsspannung an die internen Schaltkreise aufgeschaltet. Getestet wurden alle drei Varianten der bei KNG eingesetzten Leittechniknetzteile in verschiedenen typischen Konfigurationen, sowie die

Netzteile der Netzwerkschicht für den Prozessbus. Die tatsächlich gemessenen Ausschaltspannungen der unterschiedlichen Geräte sind in der Tabelle 2 angeführt. Nach Wiederinbetriebnahme des Gleichrichters booteten die Geräte normal. Die Prozessverbindungen untereinander, zu Schutzgeräten, Reglern und zur Hauptschaltleitung wurden ordnungsgemäß aufgebaut. Bei nachfolgender Überprüfung der Geräte bzw. Baugruppen konnten keine Fehler/Beschädigungen festgestellt werden.

Betriebsmittel	Einsatzgrenze lt. Datenblatt	Fehler / Ausfall lt. Messung	Hysterese / Gerät aktiv ab
LT Gerät Typ a)	88 V	77 V	88 V
LT Gerät Typ b)	88 V	77 V	88 V
LT Gerät Typ c)	88 V	71 V	88 V
Netzwerkschicht	85 V	56 V	83 V

Tabelle 2) Ein- Ausschaltspannungen der getesteten LT Komponenten

### 3.2.4 Übertragungstechnik

Der gemeinsame DC/DC Wandler war funktionstechnisch die bestimmende Einrichtung betreffend Betriebsverhalten aller nachrangig versorgten Übertragungseinrichtungen. Ein Abschalten der Einrichtungen bzw. ein Störverhalten trat ca. 30 V unterhalb der vom Hersteller angegebenen unteren Spannungsgrenze auf (Herstellerangabe 70 V DC / laut Versuch 40,8 V DC). Dieser Wert ist jedoch stark leistungsabhängig. Bei Vorversuchen wurde hier bei Volllast des DC/DC Wandlers von 12 A eine Abschaltschwelle von 63 V DC ermittelt (Differenz zur Herstellerangabe 7 V DC). Die Hysterese zwischen dem automatischen Ein/Ausschalten des DC/DC Wandlers von < 3V blieb jedoch über dem gesamten Leistungsbereich nahezu unverändert. Durch diese kleine Hysterese neigt der DC/DC Wandler zu einem massiven Schwingverhalten (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7) Screenshot der DC/DC Wandlerstörungen, mit fortlaufender Zeit kommt es zu einer Häufung von Trigger Ereignissen

Schwingt der DC/DC Wandler, schwingen alle nachrangigen versorgten Übertragungseinrichtungen mit, fällt er aus, fallen auch alle nachrangigen versorgten

Übertragungseinrichtungen aus. Zum Selbstschutz des DC/DC Wandlers und der nachrangig versorgten Übertragungseinrichtungen wurde dieser ca. 11 Minuten nach Eintreten der ersten Wandlerstörung manuell, durch das anwesende Versuchspersonal abgeschaltet.

### 3.2.5 Schutzgeräte

Alle getesteten Schutzgeräte haben bis weit unter den in den Handbüchern angegebenen unteren Spannungsgrenzen funktioniert. Während der Tiefentladungsphase wurde die Schutzfunktion durch mehrere Schutzauslöseüberprüfungen seitens des anwesenden Versuchspersonals überprüft. Die nach dem Versuch durchgeführten Schutzüberprüfungen haben ergeben, dass in den Schutzgeräten keine Parameter verloren gegangen sind und kein Gerät durch den langsamen Spannungsverfall einen Schaden genommen hat.

Betriebsmittel	Zul. Versorgungsbereich bis ...	Auslösefunktion bis...	Gestört ab....
Schutzgerät Typ a)	88 V	50 V	45 V
Schutzgerät Typ b)	48 V	26 V (Leistungsschalter scharf ausgelöst bei 30V)	24 V
Schutzgerät Typ c)	88 V	53 V	52 V

**Tabelle 3) Betriebsverhalten der eingesetzten Schutzgeräte**

### 3.2.6 Regler / Regelantrieb

Während des ges. Versuches wurden im Zuge der Schaltheandlungen auch ständig Regelvorgänge durchgeführt. Beim Erreichen der Ausschaltsschwellen (siehe Tabelle 4) kamen die Regelsysteme in undefinierte Zustände - durch Spannungsschwankungen kam es auch hier zu mehreren Ein- und Ausschaltvorgängen. Dabei wurde mehrmals der Bootprozess der CPU unterbrochen und neu gestartet. Nach Überschreitung dieser Schwelle schalteten die Regler automatisch ab. Die letzte, ordnungsgemäße Funktion des Reglers wurde bei 50,5 V DC festgestellt. Nach Ausfall des Reglers wurden die Befehle für den Reglerantrieb vor Ort abgesetzt. Bei ca. 35 V wurde der letzte Stufenlaufbefehl abgesetzt, wobei die Steuerrelais nicht mehr anzogen.

Betriebsmittel	Einsatzgrenze lt. Datenblatt	Fehler / Ausfall lt. Messung
Spannungsregler	88 – 264 VAC / 88 – 280 VDC	50,5 V
E-Kompensationsregler	88 – 264 VAC / 88 – 280 VDC	49 V

**Tabelle 4) Ausschaltsschwellen Regler**

Eine Überprüfung der Regler nach wiederkehrender Spannung zeigte, dass alle Parameter noch vorhanden waren und die Regelvorgänge, Statusmeldungen und Auslösebefehle nach wie vor richtig funktionieren.



### **3.2.7 Primärgeräte**

#### **3.2.8 20-kV-Leistungsschalter**

Bei einer unteren Spannungsgrenze von ca. 30 V (im Zuge der Schutzprüfung ermittelt) war keine Auslösung mehr möglich. Der Aufzug des Leistungsschalters funktionierte bis ca. 50 V - die Aufzugszeit war jedoch erheblich länger.

#### **3.2.9 20-kV-Trennschalter**

Bei ca. 60 V wurden die letzten Schalthandlungen händisch durchgeführt – eine deutliche längere Laufzeit und eine erhöhte Stromaufnahme ist dabei festgestellt worden.

#### **3.2.10 Regelantrieb**

Wurde im Punkt 3.2.6 im Zuge des Reglers mitbehandelt.

## **4 Zusammenfassung**

Aufgrund der durchgeführten Versuche konnte erstmals das Betriebsverhalten von ausgewählten DC- versorgten Komponenten eines Umspannwerkes im kritischen Bereich der Tiefentladung und in der Ladephase der Batterie untersucht und dokumentiert werden.

Zusammenfassend ist aufgrund der Einzelergebnisse festzuhalten, dass zum Selbstschutz der Anlage ein Betrieb der DC-Komponenten in der Tiefentladungsphase der Batterie mit allen Mitteln zu verhindern ist, eine gezielte manuelle Abschaltung der Batterie vor Ablauf der Autonomiezeit ist anzustreben.

## **5 Danksagung**

An dieser Stelle möchte sich der Autor beim gesamten Projektteam für deren unermüdlichen Einsatz bei der Durchführung des Projektes recht herzlich bedanken. Im Speziellen sind dies: Wolfgang Waldner, Michael Rauter, Günter Dirnbacher, Bernhard Obersteiner, Andreas Reisinger, Karl Decker, Thomas Gratzner, Gernot Kowatsch, Rainer Zederbauer, Roland Haunschmid und Kurt Stranner von der KNG, sowie Daniel Vollert von der Kelag.

## **Literaturverzeichnis**

- [1] Fiedler, Schmaranz, 3. Fachtagung Blackout – Vorbeugung, Bewältigung, Wiederaufbau, Leipzig 21.-22. 4. 2015, Herausforderungen für den Übertragungsnetzbetreiber