



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 28. Januar 2011

Backup Inverter

Praxistest eines Photovoltaik-Backup-Wechselrichters in der Schweiz

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Photovoltaik
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

ewz, CH-8050 Zürich

Auftragnehmer:

Basler & Hofmann AG
Forchstrasse 32
CH-8032 Zürich
www.baslerhofmann.ch

Autoren:

Christof Bucher, Basler & Hofmann AG, christof.bucher@baslerhofmann.ch
Claudio Schönenberger, Basler & Hofmann AG, claudio.schoenenberger@baslerhofmann.ch
Peter Toggweiler, Basler & Hofmann AG, peter.toggweiler@baslerhofmann.ch
Sandra Stettler, Basler & Hofmann AG, sandra.stettler@baslerhofmann.ch

BFE-Bereichsleiter: Herr Stefan Oberholzer

BFE-Programmleiter: Herr Stefan Nowak

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 102421 / 153047

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abstract	5
Deutsch	5
English	5
Einleitung	6
Projekterweiterung	6
Projektziele und Fragestellungen	7
Konkrete Fragestellungen	7
Beschreibung von System und Messgeräte	9
System ISA3000	9
Systembeschreibung	9
Systemfehler	9
System Sunny Backup Set S	11
Sunny Backup 2200 (SBU 2200) und automatische Switchbox (AS-Box)	13
Sunny Boy 2500 (SB 2500)	14
PV-Module	15
Messgeräte	15
Langzeitmessungen	15
Messungen transienter Vorgänge	16
Messkonzept	17
Langzeittest	17
Netzqualität	17
Messungen transienter Vorgänge	17
Praxistest Sunny Backup Set S	18
Langzeittest	18
Funktionstest	18
Wirkungsgrade	19
Messaufbau transiente Vorgänge	20
Netzqualität	21
Netzqualität Normalnetz	21
Netzqualität Notnetz	21
Messungen transienter Vorgänge	22
Umschalten Normalnetz – Notnetz	22
Umschalten Notnetz - Normalnetz	24
Zuschalten von grossen Lasten	24
Messungen an weiteren Systemen	25
Messungen an der SBU 5000	25
Systembeschreibung	25
Netzqualität	25
Messungen transienter Vorgänge	26
Messungen am XPC 2200	28
Systembeschreibung	28
Netzqualität	28
Messungen transienter Vorgänge	30
Fazit	33
Notstrom ja – unterbrechungsfreie Stromversorgung nein	33
Sunny Backup 2200, Backup Set S	33
Sunny Backup 5000, Backup Set L	34
XPC 2200	34
Beantwortung der Fragestellungen zum Sunny Backup 2200	35
Empfehlung für die Weiterentwicklung von Backupwechselrichtern	37
Ausblick	38

Referenzen 39

Abstract

Deutsch

Konventionelle Wechselrichter für Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) müssen bei Stromausfall automatisch vom Netz getrennt werden. Eine PV-Anlage erhöht deshalb die Versorgungssicherheit eines Gebäudes nicht, selbst wenn sie genügend Energie zur Deckung der angeschlossenen Lasten ins Netz einspeisen könnte.

In diesem Projekt wird ein Backup-Wechselrichter getestet. Der Backupwechselrichter soll bei Stromausfall das gebäudeeigene Stromnetz oder Teile davon (im Folgenden Notnetz genannt) vom öffentlichen Netz trennen und autonom weiter betreiben.

Backup-Wechselrichter wurden in der Schweiz bisher kaum eingesetzt. Im Rahmen einer Pilotanlage wird in diesem Projekt deshalb eine PV-Anlage mit Backup-Wechselrichter aufgebaut und getestet. Der erste dabei eingesetzte Backup-Wechselrichter (ISA3000 von Conergy) erweist sich dabei als fehleranfällig. Weil das Gerät nicht länger hergestellt wird und der Support vom Hersteller eingestellt wurde, wird es im Verlauf des Projekts mit dem Sunny Backup Set ersetzt.

Das Sunny Backup Set arbeitet zuverlässig. Die Spannungsqualität des Notnetzes liegt auf einem hohen Niveau. Einzig der hohe Stromverbrauch im Standby-Betrieb fällt negativ auf. Der am Backup Set angeschlossene Wechselrichter (Sunny Boy von SMA) zeigt zudem Schwächen bei der Synchronisation, insbesondere im Zusammenhang mit dem Notnetz.

English

Conventional power inverters for photovoltaic systems need to switch off during heavy grid disturbances or power outages due to safety reasons. Therefore, even if the solar panels can produce enough power to autonomously supply the load, no electricity is available in the building in the case of such events.

In this project, a backup-inverter is being tested. The backup-inverter separates the electrical grid inside a building ("backup grid") from the public electrical grid in case of power outage. The backup grid is designed to operate autonomously.

Backup-inverters have rarely been installed within Switzerland. Such a system is installed within a pilot plant and tested. In the first test, the backup-inverter ISA3000 (Conergy) is used. However due to malfunction and ceased technical support by Conergy, the inverter cannot be used.

In the second step, the "Sunny Backup Set S" (SMA) is tested, and this backup-inverter works properly. The quality of the voltage is high. The negative aspect is the high energy consumption of the device. Also, the PV power inverter tends to have difficulties synchronising with the emergency grid.

Einleitung

Die Idee liegt auf der Hand: Ist ein Gebäude mit einer PV-Anlage ausgerüstet, bestehend aus PV-Modulen und einem Wechselrichter, so soll diese Anlage das Gebäude in sonnigen Zeiten auch bei Stromausfall mit Energie versorgen können. Zusätzlich an einen Batteriespeicher angeschlossen, ist in gewissen Grenzen sogar eine vollständige Autonomie zu erwarten. Der Mehraufwand gegenüber einer herkömmlichen PV-Anlage sollte sich somit in Grenzen halten, wenn man den zusätzlichen Nutzen der Autonomie berücksichtigt.

Conergy lieferte mit dem ISA3000 ein System, welches genau diesen Anforderungen entsprechen soll. Ein einziges Gerät, angeschlossen an die PV-Anlage, das Stromnetz, einen Batteriespeicher und an einen Verbraucher stellt dem PV-Wechselrichter sowie der Notstromversorgung die Funktionalität zur Verfügung. Weil Systeme wie dieses in der Schweiz u. A. wegen der hohen Stromversorgungsqualität sowie der noch geringen Verbreitung von PV-Systemen fast unbekannt sind, soll das Gerät ISA3000 in diesem P+D-Projekt getestet werden.

Während das Solarstrommagazin Photon [Ph10-5] im Mai 2010 bereits eine Liste von 69 PV-Wechselrichterhersteller aufführt (davon 41 europäische), konnten im Projektverlauf nur drei europäische Hersteller von Backupwechselrichtern ausfindig gemacht werden. Ziel des Projekts ist es, das Gerät ISA3000 im Rahmen einer Pilot- und Demonstrationsanlage eingehend zu testen. Folgende Tests sind dabei vorgesehen:

- Langzeittest: Einsatz des Gerätes über eine längere Zeitdauer
- Funktionalität: Überprüfen und diskutieren der Funktionen
- Wirkungsgrad: Messung verschiedener Wirkungsgrade
- Messungen transienter Vorgänge, Netzqualität

Der Backupwechselrichter ISA3000 funktionierte jedoch nicht zuverlässig und der Gerätesupport wurde vom Hersteller eingestellt. Deshalb wird der Backupwechselrichter im Rahmen einer Projekterweiterung mit dem Sunny Backup Set S von SMA ersetzt.

Projekterweiterung

Auf der Basis des Projekterweiterungsgesuchs vom 19. Mai 2009 wird das System ISA3000 von Conergy im Herbst 2009 mit dem Sunny Backup Set S von SMA ersetzt. Die PV-Anlage sowie die Messgeräte werden dem neuen System angepasst. Die Langzeitmessungen werden vom Winter 2009 bis zum Sommer / Herbst 2010 durchgeführt. Die Messungen von transienten Vorgängen sowie die Spannungsqualitätsmessungen werden im Sommer 2010 durchgeführt.

Ausgemessen und getestet werden die folgenden Systeme:

- **Sunny Backup Set S von SMA:** Pilot- und Demonstrationsanlage in Mönchaltorf, Langzeittests, Wirkungsgradmessungen sowie Messungen von transienten Vorgängen.
- **Sunny Backup Set L von SMA:** In Privathaushalt installiertes System zur Notstromversorgung, Messungen von transienten Vorgängen.
- **XPC 2200 von Studer Innotec:** In Privathaushalt installiertes System zur Notstromversorgung, Messungen von transienten Vorgängen.

Projektziele und Fragestellungen

PV-Netzverbundanlagen müssen bei Netzausfall abschalten, um eine gefahrlose Reparatur des Netzes zu ermöglichen. Entsprechend sind Wechselrichter in der Regel so konzipiert, dass sie nur mit vorhandenem Wechselstromnetz arbeiten können. Besitzer von PV-Anlagen möchten aber auch bei Stromausfall die Leistung ihres Solargenerators nutzen können. Einige Wechselrichter bieten deshalb die Möglichkeit an, bei Netzausfall die Notstromversorgung des Haushalts zu übernehmen. Wie bei einer UPS (unterbrechungsfreie Stromversorgung) trennen diese Geräte sich vom öffentlichen Stromnetz ab und speisen Strom in das Notstromnetz des Haushalts ein. Damit auch bei wenig Sonnenschein eine Notstromversorgung gewährleistet ist, benötigt das System zusätzlich eine Batterie.

In der Schweiz gibt es bisher noch keine publizierten Erfahrungen mit solchen Backupwechselrichtern. In diesem Projekt soll deshalb ein Backupwechselrichter installiert und Betriebserfahrungen gesammelt werden. Hauptziel ist es, die Praxistauglichkeit eines solchen Geräts zu untersuchen. Daneben sollen aufgrund der Resultate auch Vorschläge für die zukünftige Entwicklung solcher Geräte erarbeitet werden.

Die Resultate dieses Projekts werden publiziert und in der Schweizer PV-Branche verbreitet. Ziel ist es, dass in Zukunft vermehrt solche Geräte eingesetzt werden. Damit kann dem Wunsch der Endkunden nach einer Notstromversorgung durch die netzgekoppelte PV-Anlage entsprochen werden.

Konkrete Fragestellungen

Folgende Betriebszustände des Wechselrichters werden getestet:

Netzeinspeisung

1. Wird ein ähnlicher Wirkungsgrad erreicht wie mit einem handelsüblichen netzgekoppelten Wechselrichter?

Notstrombetrieb ohne Einstrahlung

1. Ist die Umschaltzeit genügend kurz? Oder kommt es bei einigen angeschlossenen Geräten zu Problemen?
2. Entstehen durch die Umschaltung Probleme im Netz? (Spannungsspitzen?)
3. Welchen Wirkungsgrad hat der WR für die Umwandlung von Batteriestrom zu Wechselstrom? Ist der Wirkungsgrad im Vergleich zu üblichen UPS-Geräten genügend?
4. Was geschieht, wenn die Batterie sich leert? Gibt es eine Vorwarnung, dass bald nicht mehr genügend Batteriestrom zur Verfügung stehen wird und man die Lasten reduzieren soll? Oder stellt der Wechselrichter einfach ab? Wie hoch ist die Tiefentladung der Batterie?
5. Wenn die Batterie leer ist, wie verhält sich der Wechselrichter während dem Abschalten? Gibt es Probleme im Netz? (Spannungsspitzen?)

Notstrombetrieb mit Einstrahlung

1. Wie hoch ist der Wirkungsgrad zum Laden und Entladen der Batterie?
2. Was geschieht, wenn die Solarleistung höher ist als die Leistung der angeschlossenen Notstromgeräte? Wird die nicht benötigte Energie in der Batterie gespeichert? Wie hoch ist der Wirkungsgrad?
3. Was geschieht, wenn die Solarleistung tiefer ist als die Leistung der angeschlossenen Notstromgeräte? Kann das Gerät gleichzeitig Leistung aus der Batterie und aus dem PV-Generator an die Notstromlasten liefern?

Überlastverhalten im Notstrombetrieb

1. Gibt es eine Warnung bei Überlast? Wie kann darauf reagiert werden?
2. Messen der Abschaltzeit und der Netzspannungen während dem Ausschalten des Geräts (aufgrund zu hoher Last).
3. Schaltet das Gerät selbstständig wieder zu, wenn die Last reduziert wird?

Laden der Batterien während Notstrombetrieb

1. Welche maximale Batterieladeleistung ist möglich?
2. Welcher Wirkungsgrad wird erreicht?
3. Was geschieht, wenn die Batterie voll ist und die Last auch nicht durch den Notstromkreis abgenommen wird?

Laden der Batterien nach dem Notstrombetrieb

1. Können die Batterien mit Strom aus dem Netz wieder geladen werden?
2. Welche maximale Batterieladeleistung ist möglich?
3. Welcher Wirkungsgrad wird erreicht?

Weitere Betriebszustände

1. Wie können weitere DC-Quellen (z.B. Dieselgenerator) angeschlossen und steuerungstechnisch eingebunden werden?
2. Kann das Gerät Batteriestrom ins öffentliche Netz einspeisen?
3. Welche weiteren Einstellungen sind möglich?

Beschreibung von System und Messgeräte

In diesem Kapitel werden die an der Lindhofstrasse 52 in Mönchaltorf installierten und getesteten Geräte sowie die dazugehörigen Messgeräte beschrieben. Eine Beschreibung der übrigen getesteten Systeme findet sich im Kapitel „Messungen an weiteren Systemen“.

System ISA3000

Der Backupwechselrichter ISA3000 von Conergy wird im Jahr 2008 an der Lindhofstrasse 52 in Mönchaltorf installiert. Weil er nicht zuverlässig funktioniert, wird er ein Jahr später auf Garantieleistung der Firma Suntechnics mit dem Sunny Backup Set S von SMA ersetzt. In diesem Kapitel wird der ISA3000 kurz beschrieben.

Systembeschreibung

Der ISA3000 vereint alle Funktionen eines PV-Backupwechselrichters in einem Gerät. An der verschliessbaren Frontseite des Gerätes werden Batterie, PV-Anlage, Netz (zu den Bezügersicherungen) und Notnetz (Last) angeschlossen. Abbildung 1 zeigt den installierten Backupwechselrichter mit den Bleiakкумуляtoren. In Abbildung 2 wird das Elektroschema des Backupsystems sowie der installierten Messeinrichtungen für den Langzeittest aufgezeigt.

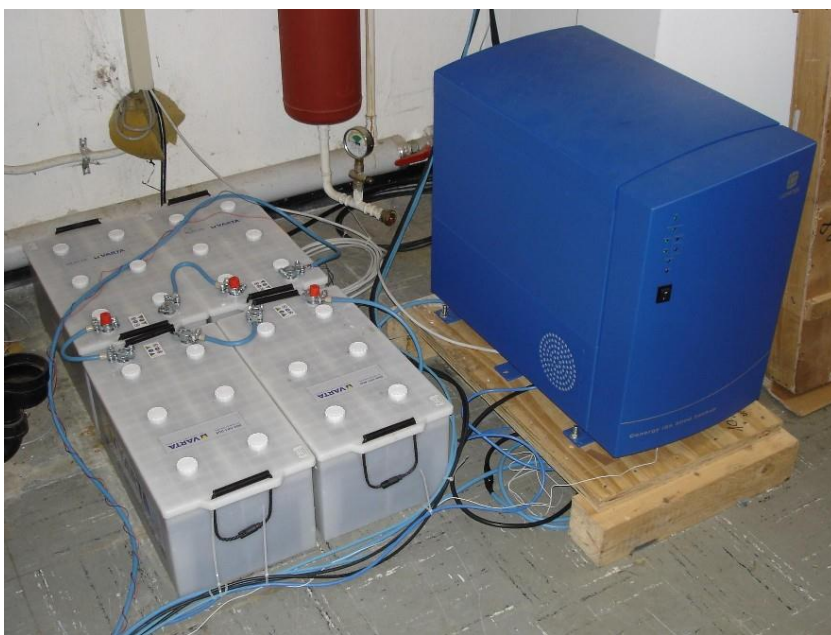


Abbildung 1: Bleiakкумуляtoren und Backupwechselrichter ISA3000.

Systemfehler

Aus nicht näher bekannten Gründen (der Hersteller vermutet ein Fehler auf einer Systemplatine) schaltet sich der Backupwechselrichter ISA3000 nach wenigen Betriebstagen bis maximal ca. zwei Betriebswochen aus und meldet einen nicht möglichen Fehler (Überlast im Leerlauf). Dies hat zur Folge, dass Langzeitmessungen regelmässig unterbrochen wurden und zuverlässige Wirkungsgradmessungen nicht gemacht werden konnten. Conergy gibt zudem bekannt, dass das Gerät nicht länger hergestellt würde und deshalb auch nicht repariert werden könne. Aus diesem Grund werden keine weiteren Tests am ISA3000 durchgeführt.

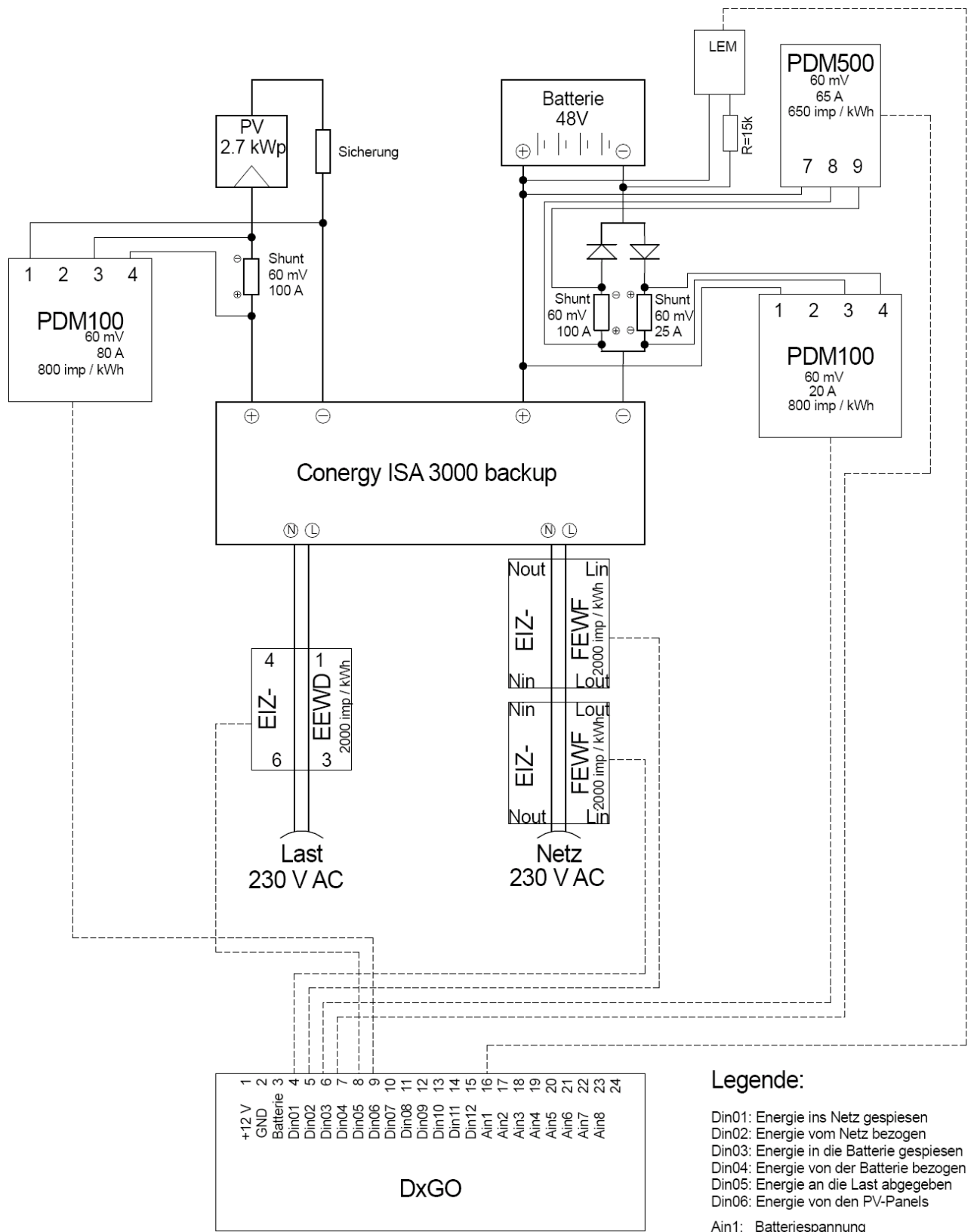


Abbildung 2: Schema der Messinstallation für die Langzeitmessungen zum Praxistest für den Backupwechselrichter.

System Sunny Backup Set S

Im Gegensatz zum ISA3000 von Conergy sind die Sunny Backup Sets modular aufgebaut. PV-Wechselrichter, Backupwechselrichter und Umschaltseinheit sind je einzelne Geräte, siehe Abbildung 3.

Die Philosophie des Backup Sets sieht zwei Betriebsarten vor:

- **Normalbetrieb:** Die PV-Anlage speist über die selbsttätige Schaltstelle für PV-Anlagen und über einen separaten PV-Einspeisezähler Strom ins Netz ein. Die PV-Anlage ist durch den PV-Koppelschütz von den Verbrauchern getrennt. Derweil lädt das Gerät Sunny Backup 2200 (SB 2200) die Batterien und ist im Bereitschaftsmodus (Parallelbetrieb zum Netz), um das Netz zu stützen.
- **Notbetrieb:** Bei Stromausfall wird die Selbsttätige Schaltstelle für PV-Anlage geöffnet und die PV-Anlage damit vom Netz getrennt. Verzögert wird der PV-Koppelschütz geschlossen und die PV-Anlage an das Notnetz angeschlossen. Gleichzeitig stellt der SB2200 vom Lade- auf den Entladebetrieb der Batterien um und versorgt die Verbraucher weiterhin mit elektrischem Strom.

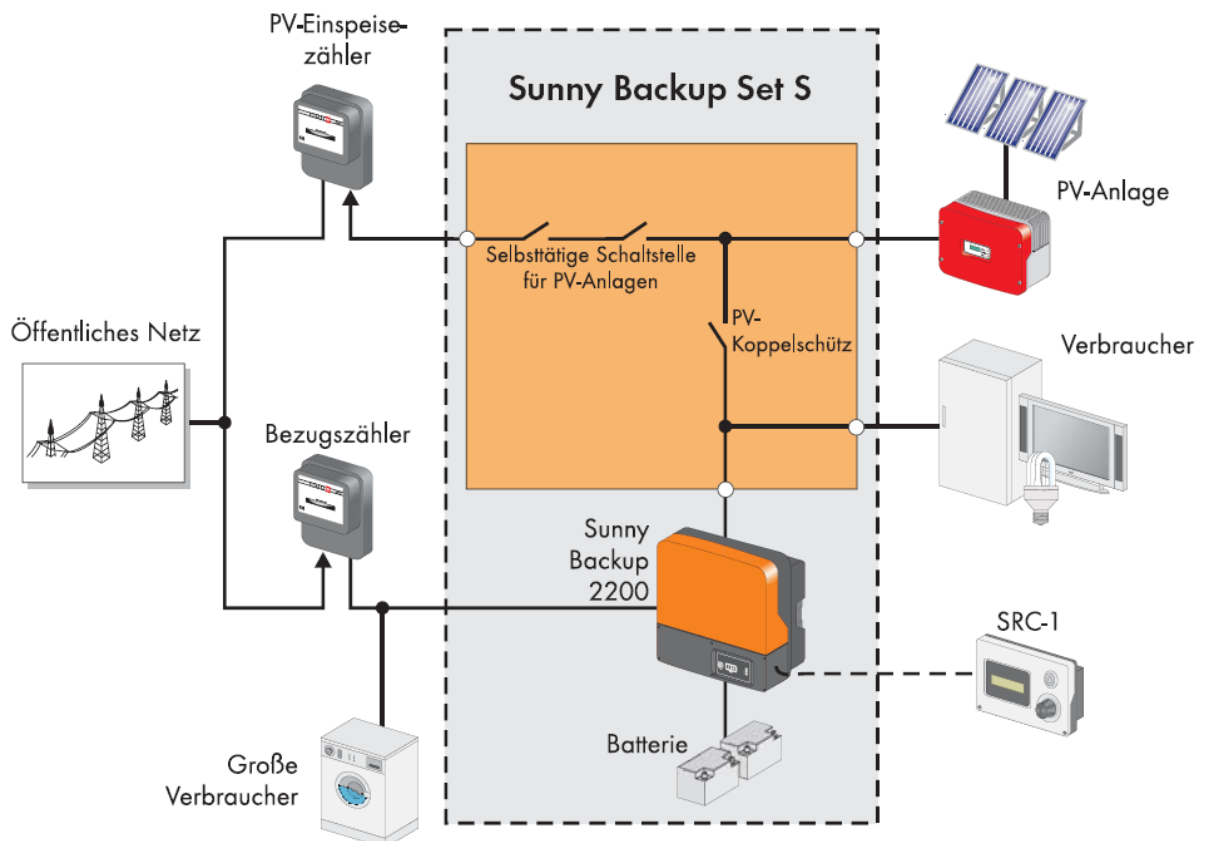


Abbildung 3: Prinzipschema des Sunny Backup Sets S [SMA-SBS].

Das Elektroschema mit den Messeinrichtungen für die Langzeittests ist in Abbildung 4 abgebildet. Die einzelnen Komponenten des Sunny Backup Sets S werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

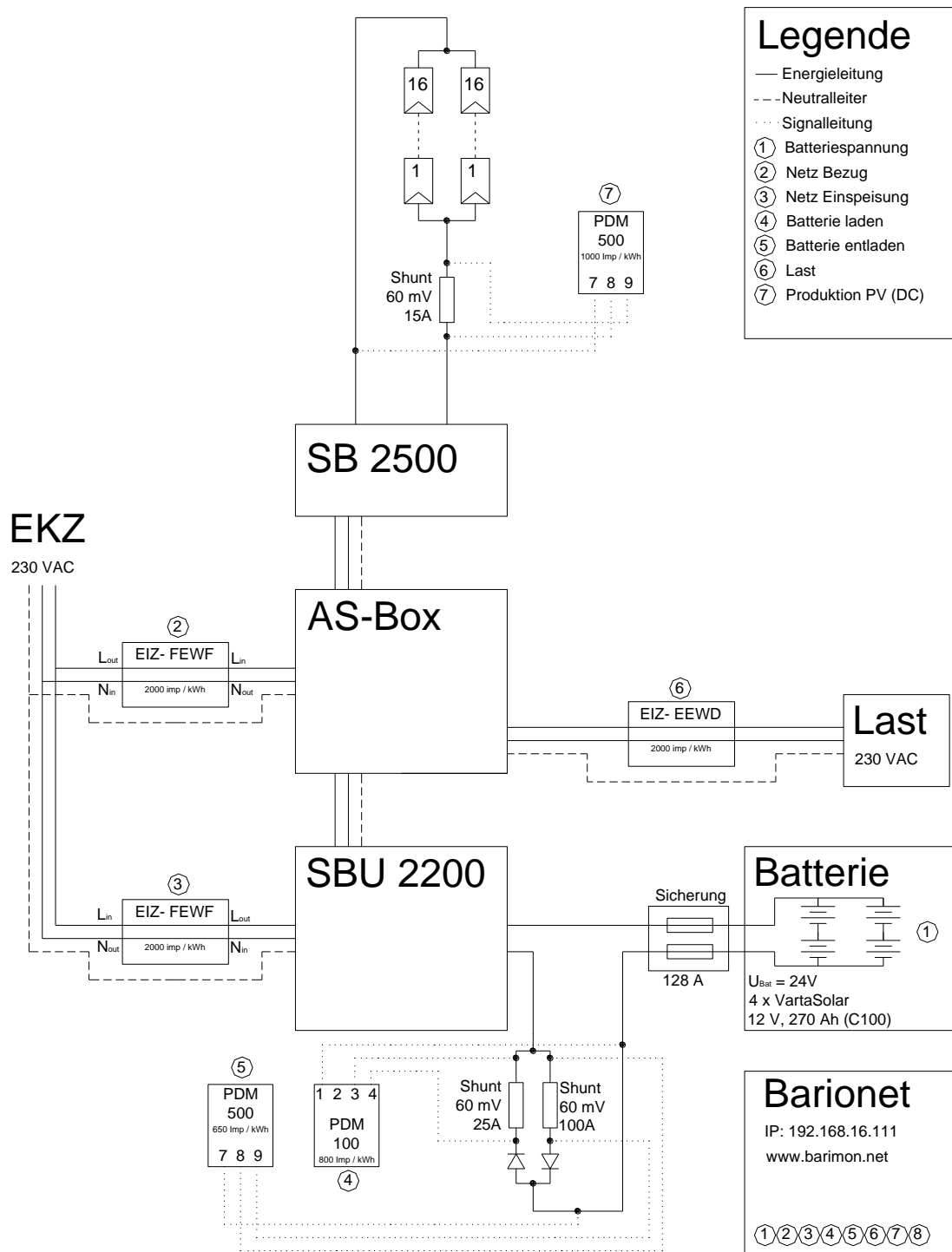


Abbildung 4: Anschlussschema des Sunny Backup Sets S mit den Messeinrichtungen für Langzeit-
test und Wirkungsgradmessungen.

Sunny Backup 2200 (SBU 2200) und automatische Switchbox (AS-Box)

Das Kernstück des Backupsystems bildet die Backup Unit SBU 2200. Sie fungiert sowohl als Batterieladegerät wie auch als Wechselrichter, um das Notnetz mit Strom zu versorgen. Die Umschaltung der beiden Betriebszustände erfolgt durch die automatische Switchbox (AS-Box) und soll typischerweise um die 50 ms dauern. Im Notstrombetrieb schaltet die AS-Box die PV-Anlage automatisch vom Netz frei und verbindet sie mit dem Notnetz.

Sind im Notstrombetrieb die Batterien voll geladen und die PV-Anlage speist mehr Energie ins System ein als die Verbraucher momentan benötigen, so hebt der SBU 2200 die Netzfrequenz um bis zu 2 Hz an, worauf der Wechselrichter entweder seine Einspeiseleistung reduziert (systemkompatible Geräte) oder sich ganz ausschaltet (alle anderen Geräte). Dadurch wird ein Überladen der Batterien verhindert.

Tabelle 1 zeigt einige technische Eckdaten zur Sunny Backup Unit 2200

Ausgang (Verbraucher)	
Nom. Leistung / Strom bei Netzbetrieb	5,7 kW / 25 A
Backupleistung (Dauer / 30 min / 1 min)	2,2 kW/ 2,9 kW / 3,8 kW
Phasenzahl (Netzbetrieb / Backupbetrieb)	1 / 1
Spannung (Bereich)	230 V (172,5 – 264,5 V)
Frequenz (Bereich)	50 Hz (45 bis 65 Hz)
Zulässige Netzform (Netzseite / Verbraucherseite)	TN-C / TN-S
Typ. Unterbrechungszeit bei Netzausfall	50 ms
Eingang PV-Anlage	
Nom. AC-PV-Leistung / Strom	4,6 kW / 20 A
Kompatible PV-Wechselrichter	alle Sunny Boy-Wechselrichter
Eingang Batterie	
Nennspannung	24 V
Wirkungsgrad / Eigenverbrauch	
Max. Wirkungsgrad Backupbetrieb	93,60%
Eigenverbrauch Tag / Nacht (Silent Mode)	40 W / 6 W
Schutzeinrichtungen	
DC-Verpolungsschutz / Tiefentladungsschutz	— / ja
AC-Kurzschluss / AC-Überlast	ja / ja
Netzüberwachung (SMA Grid Guard) / Galvanische Trennung	ja / ja
Allgemeine Daten	
Maße SBU (B / H / T) in mm	470 / 445 / 180
Maße AS-Box (B / H / T) in mm	200 / 300 / 120
Gewicht je (SBU / AS-Box)	19 kg / 4,5 kg
Betriebstemperaturbereich	–25 °C ... +60 °C
Schutzart (SBU / AS-Box)	IP54 / IP65
Ausstattung / Funktion	
Integrierter Bypass für den Fehlerfall / Testbetrieb	ja / ja
Ladezustandsberechnung / Generatoreingang	ja / —

Tabelle 1: Technische Angaben zur SBU. Quelle: www.sma.de

Sunny Boy 2500 (SB 2500)

Der Sunny Boy 2500 von SMA wandelt als konventioneller PV-Wechselrichter den Gleichstrom der PV-Anlage in netzkonformen Wechselstrom um und betreibt die PV-Anlage im optimalen Betriebspunkt (MPP-Tracking¹). Zwischen dem SB 2500 und dem Sunny Backup Set S besteht kein Kommunikationslink. Die einzige Kommunikation geschieht über die Netzfrequenz: Steigt diese an, so regelt der SB 2500 bei entsprechender Konfiguration seine Einspeiseleistung mittels Spannungsanhebung am PV-Generator ab.

Eingang (DC)	
Max. DC-Leistung (@ cos f=1)	2700 W
Max. DC-Spannung	600 V
MPP-Spannungsbereich	224 V – 480 V
DC-Nennspannung	300 V
Min. DC-Spannung / Startspannung	224 V / 300 V
Max. Eingangsstrom / pro String	12 A / 12 A
Anzahl MPP-Tracker / Strings pro MPP-Tracker	1 / 3
Ausgang (AC)	
AC-Nennleistung (@ 230 V, 50 Hz)	2300 W
Max. AC-Scheinleistung	2500 VA
AC-Nennspannung; Bereich	220, 230, 240 V; 180 V – 260 V
AC-Netzfrequenz; Bereich	50, 60 Hz; ± 4,5 Hz
Max. Ausgangsstrom	12,5 A
Leistungsfaktor (cos f)	1
Einspeisephasen / Anschlussphasen	1 / 1
Wirkungsgrad	
Max. Wirkungsgrad / Euro-eta	94,1 % / 93,2 %
Schutzeinrichtungen	
DC-Verpolungsschutz	ja
DC-Lasttrennschalter ESS	ja
AC-Kurzschlussfestigkeit	ja
Erdschlussüberwachung	ja
Netzüberwachung (SMA Grid Guard)	ja
Galvanisch getrennt / Allstromsensitive Fehlerstromüberwachungseinheit	ja / —
Schutzklasse / Überspannungskategorie	I / III
Allgemeine Daten	
Maße (B / H / T) in mm	440 / 339 / 214
Gewicht	28 kg
Betriebstemperaturbereich	–25 °C ... +60 °C
Geräuschemission, typisch	= 33 dB(A)
Eigenverbrauch (Nacht)	< 0,25 W
Topologie	NF-Transformator

Tabelle 2: Technische Angaben zum Sunny Boy 2500. Quelle: www.sma.de

¹ MPP-Tracking: Maximum Power Point Tracking, Betreiben der PV-Anlage im optimalen Betriebspunkt (Betriebspunkt mit maximaler Leistungsabgabe)

PV-Module

32 PV-Module à 85 Wp bilden eine PV-Anlage mit einer DC-Nennleistung von 2.72 Wp. Die Module sind in zwei Strängen verschaltet und am PV-Wechselrichter SB 2500 angeschlossen.

Allgemeines	
Hersteller	BP Solar
Typ	BP585L
Technologie	Monokristallin

Elektrische Grössen	
Leistung	85 Wp
Umpp	18 V
Impp	4.72 A
Isc	5 A
Uoc	22.03 V
Temp. Koeffizient Strom	1.39 mA/K
Temp. Koeff. Spannung	-0.43 %/K
Max. Systemspannung	600 V

Mechanische Grössen	
Abmessungen	1183 mm x 525 mm
Gewicht	5.5 kg

Tabelle 3: Technische Angaben zu den verwendeten Solarmodulen. Quelle: Datenblatt von BP, heute zum Beispiel erhältlich unter www.photovoltaik.co.at

Messgeräte

In diesem Kapitel werden die Messgeräte für die Langzeitmessungen und die Messungen transienter Verläufe aufgeführt und vorgestellt.

Langzeitmessungen

Im Langzeittest wurden während rund neun Monaten verschiedene Grössen gemessen und aufgezeichnet.

Nr.	Gerät	Funktion des Gerätes, Eigenschaften
1	EIZ-FEWF	AC Energiezähler. Misst die ins Netz gespeiste Energie.
2	EIZ-FEWF	AC Energiezähler. Misst die vom Netz bezogene Energie.
3	PDM100	DC Energiezähler. Misst die in die Batterien gespeiste Energie.
4	PDM500	DC Energiezähler. Misst die aus den Batterien bezogene Energie.
5	EIZ-EEWD	AC Energiezähler. Misst die an die Last abgegebene Energie.
6	PDM500	DC Energiezähler. Misst die von den PV Modulen produzierte Energie.
7	Barionet	Datenlogger für alle Langzeitmessgeräte und AD-Wandler für die Messung der Batteriespannung.

Tabelle 4: Liste der für die Langzeitmessungen verwendeten Messgeräte.

Zur Überprüfung von Spannungen und Strömen kamen zusätzlich das Multimeter METRA Hit 16S sowie der Stromwandler Z201A von Grossen Metrawatt zum Einsatz.

Messungen transienter Vorgänge

Spannungs- und Stromtransiente werden mit dem PowerXplorer PX5 von Dranetz [Dra10] aufgezeichnet. Der PX5 zeichnet hochfrequent Spannungen und Ströme auf je vier Kanälen auf, je einer davon mit eigenem Referenzpotenzial.

Für eine Messung kommt der Omni Quant von Haag [Haag10] zum Einsatz.



Abbildung 5: PowerXplorer von Dranetz [Dra10] und Omni Quant von Haag [Haag10].

Messkonzept

Langzeittest

Während mehreren Monaten wird das Backupsystem im Lindhof betrieben und überwacht. Die im Kapitel "Systembeschreibung", Unterkapitel "System Sunny Backup Set S" vorgestellten Messwerte wurden im Minutentakt aufgezeichnet und gespeichert. Weil die Messperiode sowohl Winter- wie auch Sommermonate umfasst, lassen sich aus den Messungen Rückschlüsse auf den Ganzjahresbetrieb ziehen.

Verschiedene Wirkungsgrade und Verbrauchszahlen lassen sich aus den Werten herleiten. Die Schlussfolgerungen aus den Messungen sind im Kapitel "Praxistest Sunny Backup Set S", Abschnitt "Wirkungsgrade" aufgeführt.

Neben den Messungen wird der zuverlässige Systembetrieb überwacht. Zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr und bei verschiedenen Einstrahlungen wird das System auf die Funktionalität überprüft.

Netzqualität

Über mehrere Minuten gemittelt werden zu verschiedenen Zeitpunkten die Oberschwingungen (OS) der Spannungen des Netzes gemessen. Zur Beurteilung der Sensitivität der Ergebnisse werden die Messungen jeweils mit und ohne zugeschaltetem Wechselrichter / Backupwechselrichter vorgenommen.

Mit den Netzqualitätsmessungen sollen drei Ziele verfolgt werden:

1. Die Spannungsqualität des Notnetzes soll bestimmt werden.
2. Rückwirkungen der PV-Backup-Anlage auf das öffentliche Stromnetz sollen ermittelt werden.
3. Es soll sichergestellt werden, dass ein allfälliges Fehlverhalten des Backupsystems (z. B. Einspeisung von OS) nicht auf die Netzqualität des öffentlichen Netzes zurückzuführen ist.

Die Netzqualitätsmessungen im Rahmen dieses Projekts werden nicht normenkonform (d.h. nach EN 50160 über mehrere Tage) durchgeführt und sind deshalb als Momentaufnahme zu verstehen. Sie sind nicht zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten geeignet.

Messungen transienter Vorgänge

Im Fokus dieser Messungen steht das Verhalten der Backup-Anlage zum Zeitpunkt des Netzunterbruchs sowie bei der Netzzrückkehr. Gemessen werden jeweils die Momentwerte von Strom und Spannung am Verbraucher, welcher durch das Backup-System gestützt wird. Die entsprechenden Verbraucher sind nicht normiert, sondern durch die Nutzer der Backup-Anlagen vorgegeben.

Als weiterer Punkt wird das Zu- und Wegschalten von grossen Lasten am Notnetz analysiert. Strom- und Spannungsmessungen sollen zeigen, wie die Backup-Wechselrichter mit den entsprechenden Stresssituationen umgehen können.

Praxistest Sunny Backup Set S

Die Funktionen und Eigenschaften des Backupwechselrichters werden überprüft. Im Fokus stehen dabei:

- Funktionstest
- Messung von Wirkungsgraden
- Messung von transienten Vorgängen

Langzeittest

Über den Zeitraum November 2009 bis Oktober 2010 wurde das Sunny Backup Set S am Standort der Enecolo AG in Mönchaltorf betrieben und getestet. In diesem Kapitel werden die Testergebnisse zusammengefasst.

Funktionstest

Die elementaren Funktionen des Sunny Backup Set S werden in diesem Abschnitt einer Funktionskontrolle unterzogen. Dabei geht es in erster Linie nicht darum, die im Handbuch beschriebenen Funktionen zu bestätigen, sondern deren Praxistauglichkeit zu bewerten. Im Folgenden werden wichtige Funktionen des Wechselrichters diskutiert.

- **Akkumulatoren laden:** Die Akkumulatoren können sowohl vom Netz wie auch von der PV-Anlage geladen werden. Der Ladevorgang startet jeweils automatisch bei Bedarf und verfügbarer Energie (im Inselbetrieb). Im Normalbetrieb wird die Batterie ausschliesslich vom Netz geladen. Dieser Vorgang funktioniert während den Tests einwandfrei.
- **Netzeinspeisung:** Befindet sich das Stromnetz innerhalb der zulässigen Grenzen (Spannung, Frequenz, Netzimpedanz), so wird der PV-Wechselrichter direkt mit dem Netz verbunden. Ebenso wird die gestützte Last mit dem Netz verbunden. Für die Last und den PV-Wechselrichter können dabei zwei separate Stromzähler verwendet werden. Das System kann von der Batterie nicht ins Netz einspeisen – diese Funktionalität wird von der Software unterbunden (das bestehende Gesetz verbietet dies, siehe dazu auch Funktionserweiterung im Kapitel "Empfehlung für die Weiterentwicklung von Backupwechselrichtern").
- **Umschaltung auf Notstrom:** Bei Netzausfall trennt das Backupsystem die PV-Anlage und den Backupwechselrichter vom Netz. Noch vor dem Trennvorgang stellt der Backupwechselrichter von Batterielade- auf Wechselrichterbetrieb um. Ist das Netz genügend hochohmig, so speist er solange unterbrechungsfrei einen 50 Hz-Sinus in Netz UND Notnetz ein, bis er den Backupwechselrichter mittels der automatischen Switchbox vom Netz getrennt hat. Deshalb ist die Unterbrechungszeit des Backupsystems nur mit einer Ober-, nicht aber mit einer Untergrenze definiert. In den Tests dauert die Rückspeisung bis zu 650 ms bei einer Leistung ("reverse power") von ca. 3 kW.
- **Notstrombetrieb:** Im Notstrombetrieb gibt der Backupwechselrichter das Stromnetz vor und macht das Netzmanagement. Der PV-Wechselrichter synchronisiert sich auf das Notnetz auf. Auf intelligente Art und Weise regelt der Backupwechselrichter die Energieflüsse: Grundsätzlich wird die Last mit Energie aus den Batterien versorgt. Die PV-Anlage speist aber direkt auf die AC-Seite (also Lastseite) ein, so dass der Backupwechselrichter entsprechend der Momentanleistung der PV-Anlage weniger Energie aus den Batterien einspeisen muss. Sollte die Leistung der PV-Anlage den Leistungsbedarf der Last überschreiten, so speist der Backupwechselrichter die überschüssige Energie in die Batterien ein. Sind die Batterien bereits geladen, so hebt er die Netzfrequenz an, worauf der PV-Wechselrichter seine Leistung reduziert (falls er die entsprechende Funktion hat) resp. sich ganz ausschaltet.
- **Umschaltung auf Normalbetrieb:** Nach der Netzwiederkehr dauert es rund eine Minute, bis der Backupwechselrichter vom Inselbetrieb zum Normalbetrieb (Netzeinspeisung der PV-Anlage) zurückkehrt. Die Synchronisation mit dem Netz erfolgt zuverlässig.

- **Silent Mode:** Zu Energiesparzwecken kann der Wechselrichter mit dem "Silent Mode" in einen Energiesparmodus versetzt werden. Während sich der Backupwechselrichter im Silent Mode befindet, kann die PV-Anlage jedoch keinen Strom ins Netz einspeisen, da der Backupwechselrichter dieses nicht überwachen kann. Deshalb kann der Silent Mode in der Praxis nur nachts eingeschaltet werden, wenn keine Energieeinspeisung der PV-Anlage möglich ist. Dazu wird ein fixes Stundenfenster konfiguriert, in welchem der Backupwechselrichter in den Silent Mode fallen darf. Während der Zeit im Silent Mode kann die Umschaltung vom Normal- in den Notbetrieb des Backupwechselrichters bis zu sechs Sekunden dauern. Das für den Silent Mode sinnvoll wählbare Zeitfenster in der Schweiz beträgt im Winter rund 16 Stunden, im Sommer rund 8 Stunden. Soll der Backupwechselrichter nicht regelmässig umkonfiguriert werden, sind die 8 Stunden für das ganze Jahr zu wählen. Während des Testbetriebs konnte der Backupwechselrichter nicht in den Silent Mode geschaltet werden.
- **Überlastverhalten:** Schaltet sich der Backupwechselrichter wegen Überlast automatisch aus, so muss er manuell neu gestartet werden. Dies kann z.B. dann kritisch sein, wenn mit dem Backupsystem ein Aufzug (Lift im Treppenhaus, Rollstuhllift o. ä.) betrieben wird, welcher dem Betreiber der Anlage im Extremfall den manuellen Neustart nicht möglich macht. Dem ist allerdings anzufügen, dass der Backupwechselrichter bei einer Dauerleistung von 2.2 kW die Leistung von 3.8 kW während einer Minute und im Test sogar 4 kW während drei Sekunden lieferte – genügend also, um die Startleistung für verschiedene Systeme mit hohen Initialströmen aufzubringen, z.B. Motoren.
- **Verhalten PV-Wechselrichter:** Der SB 2500 wird bei Netzausfall vom Netz getrennt und schaltet sich deshalb automatisch aus. Anschliessend wird er an das Notnetz geschaltet, worauf er sich wieder einschalten und in das Notnetz einspeisen soll. Diese Synchronisation erfolgt bei dem getesteten Gerät nicht zuverlässig. Trotz mehrmaliger Neustartversuche synchronisiert der Wechselrichter an zwei Messtagen erst nach einigen Stunden Wartezeit.
- **Konfiguration PV-Wechselrichter:** Nach VDE0126 müssen Wechselrichter die Netzimpedanz messen, um sich mit dem Stromnetz verbinden zu dürfen (gilt nicht in der Schweiz). Diese Netzimpedanzmessung schlägt im Inselbetrieb fehl und muss deshalb deaktiviert werden. Nur so kann sich der PV-Wechselrichter im Inselbetrieb auf das Inselnetz synchronisieren. Dies hat jedoch zur Folge, dass der Wechselrichter mit der entsprechenden Konfiguration nicht mehr am normalen Stromnetz betrieben werden darf. Die entsprechende Konfiguration kann und darf nur durch einen Fachmann gemacht werden und ist somit mit einem gewissen Aufwand verbunden.

Wirkungsgrade

Ein Ziel des Projekts ist, die Systemwirkungsgrade des Backupsystems zu ermitteln. Dazu werden – wo möglich – nicht Messungen eines kurzen Experiments herangezogen, sondern über einen längeren Zeitraum gemittelte Werte verwendet.

- **Eigenverbrauch Backupwechselrichter:** Der Eigenverbrauch des Backupwechselrichters beträgt gemittelt über die Messperiode (ca. 6 Monate) 35.9 W. Dies entspricht einem Jahresverbrauch von 314.5 kWh resp. dem Energieertrag einer 330 Wp PV-Anlage in der Schweiz. Im Silent Mode reduziert sich der Energieverbrauch des Backupwechselrichters gemäss Datenblatt auf 4 W. Diese Energiewerte schliessen die Ladeerhaltung der Bleiakkumulatoren mit ein.
- **Wirkungsgrad Netzeinspeisung PV-Anlage:** In den ausgewerteten Monaten hat der Wechselrichter SB 2500 860.5 kWh elektrische Energie ins Netz eingespeist, bei einer aus den PV-Modulen bezogenen Energie von 917 kWh. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von

$$\eta_{PV} = \frac{860.5 \text{ kWh}}{917 \text{ kWh}} = 93.8\%$$

- **Systemwirkungsgrad Netzeinspeisung Backupsystem:** Hochgerechnet auf ein ganzes Jahr beträgt die eingespeiste Energie 2065 kWh, die von den PV-Modulen bezogene Energie 2201 kWh. Wird die vom Backupwechselrichter bezogene Bereitschaftsenergie (35.9 W während 8760 Stunden im Jahr) vom Energieertrag abgezogen, so resultiert ein Wirkungsgrad von:

$$\eta_{PV+SBU} = \frac{E_{\text{Netzeinspeisung}} - E_{\text{VerbrauchBackup}}}{E_{PV,DC}} = \frac{2065 \text{ kWh} - 35.9 \text{ W} \cdot 8760 \text{ h}}{2201 \text{ kWh}} = 79.5\%$$

Würde der Backupwechselrichter durchschnittlich zehn Stunden pro Tag im Silent Mode betrieben, so entspräche dies einem Systemwirkungsgrad von

$$\eta_{PV+SBU,SilentMode} = \frac{E_{Netzeinspeisung} - E_{VerbrauchBackup}}{E_{PV,DC}}$$

$$= \frac{2065kWh - 35.9W \cdot 5110h - 4W \cdot 3650h}{2201kWh} = 84.8\%$$

Diese Wirkungsgrade sind stark abhängig von der Grösse der PV-Anlage. Die für dieses Backupsystem maximal zulässige PV-Anlage beträgt ca. 5 kWp (4.6 kW AC). Mit einer solchen Anlage liesse sich der Systemwirkungsgrad Netzeinspeisung Backupsystem nach obigen Annahmen auf maximal 87.7% steigern (89.9% mit Silent Mode). Wird ein Wechselrichter mit höherem Wirkungsgrad verwendet, steigt auch der Systemwirkungsgrad zusätzlich an.

- **Systemwirkungsgrad Backupbetrieb:** Diesem Wirkungsgrad liegt die Frage zugrunde: Wie viel der Energie, welche der Backupwechselrichter zum Laden der Batterien aus dem Netz bezieht, kommt bei Netzausfall bei den Verbrauchern an? Die ermittelten Werte basieren auf mehreren Lade- und Entladezyklen, bei welchen das Backupsystem mit 0.5 bis 1 kW belastet wurde und die Batterien auf max. 50% des Ladestandes entladen wurden. Der durchschnittlich erreichte Wirkungsgrad beträgt dabei 65% - 70%.

Messaufbau transiente Vorgänge

Zur Messung verschiedener transienter Vorgänge werden die Messgeräte Omniquant und Dranetz verwendet. Begleitet von einem Spezialisten für Netzqualitätsmessungen des ewz finden die Messungen vor Ort gemäss nachstehender Beschreibung statt.

Als Last werden drei thermische (ohmsche) Lasten à 1.2 kW, 1.6 kW und 2.0 kW sowie ein Staubsauger à 700 W verwendet.

Die Messungen sowie die Konfiguration der Lasten wurde gemäss dem Messschema in Abbildung 6 durchgeführt. Für die Lasten "Last Netz" und "Last Backup" wurden je nach Messkonfiguration verschiedene der oben beschriebenen Lasten eingesetzt.

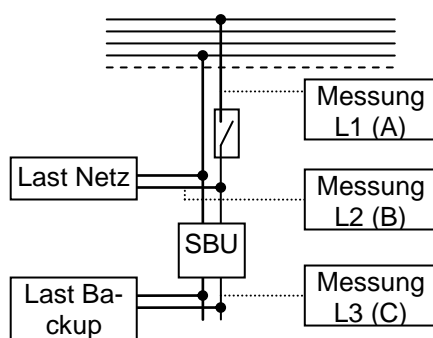


Abbildung 6: Messschema.

Netzqualität

Die Referenzphase für die Messungen ist die zweite Phase. Die Bezeichnungen L1 (A), L2 (B) und L3 (C) beziehen sich gemäss Abbildung 6 auf die Eingangskanäle des Messgeräts.

Netzqualität Normalnetz

Die Netzqualität der Stromversorgung an der Phase L2 ist mit einer THD von knapp 1.4 % sehr gut und liegt deutlich innerhalb der geforderten Toleranzen², siehe Abbildung 7. Zu beobachten sind insbesondere die fünfte und siebte Oberschwingung, welche z.B. durch die Präsenz von vielen Kleingeräten (z.B. Netzgeräte, Stromsparlampen, Computer, Fernseher, ...) verursacht werden können.

Aufgrund der guten Netzqualität wird ein relevanter Einfluss vorhandener Netzverschmutzungen auf die zu testenden Geräte ausgeschlossen resp. vernachlässigt.

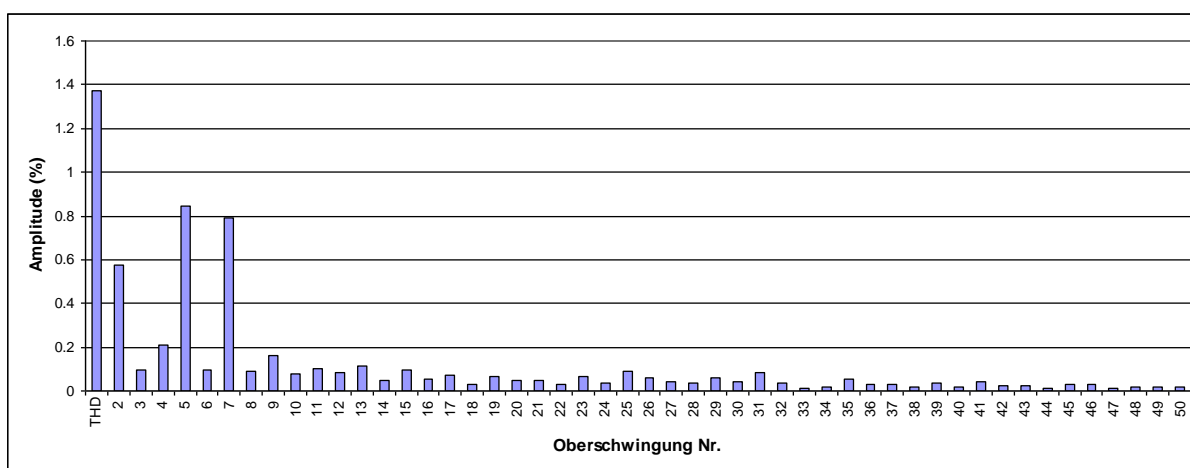


Abbildung 7: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des Normalnetzes.

Netzqualität Notnetz

Abbildung 8 zeigt das Oberschwingungsmuster für die Spannung des Notnetzes. Mit einem THD von über 5 % (Netzspannung) können die Backupwechselrichter die Netzqualität des Normalnetzes nicht aufrecht erhalten, die Oberschwingungen liegen jedoch noch im Toleranzbereich.

² EN 50160 fordert ein THD < 8% für alle OS bis zur Ordnungszahl 40.

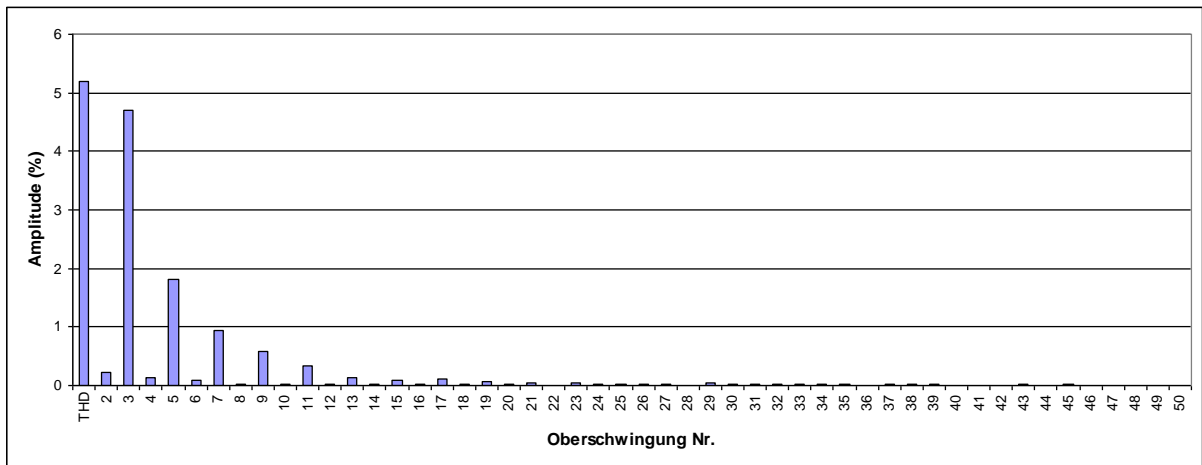


Abbildung 8: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des belasteten Backupnetzes.

Messungen transienter Vorgänge

Umschalten Normalnetz – Notnetz

Bei der Umschaltung vom Normalnetz auf das Notnetz stellt die SBU quasi instantan vom Batterielade- auf den Entladebetrieb um, um die Lasten am Notnetz weiter zu versorgen, siehe Abbildung 9. Dieser Umschaltvorgang geschieht deutlich schneller, als dass die AS-Box das Notnetz vom Normalnetz zu trennen vermag. Deshalb kommt es bei einem Netzausfall zu einer Rückspeisung von den Batterien ins Netz, bis die AS-Box die Anlage freigeschaltet hat. Bei den Testläufen dieses Projekts kann das Netz mit maximal ca. 3 kW Lasten nachgebildet werden. Dabei vermag die SBU die Rückspeisung in den meisten Fällen bis zur Freischaltung aufrecht erhalten. Abbildung 10 zeigt eine solche Rückspeisungsphase von einer Länge von 110 ms.

Der Umschaltzeitpunkt lässt sich dabei unter anderem auch durch das veränderte Muster der Oberschwingungen detektieren. Während das Normalnetz einen THD von 1.4 % bei einer ausgeprägten fünften und siebten Oberwelle aufweist, ist der THD beim Notnetz mit über 5 % gut dreimal grösser (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8).

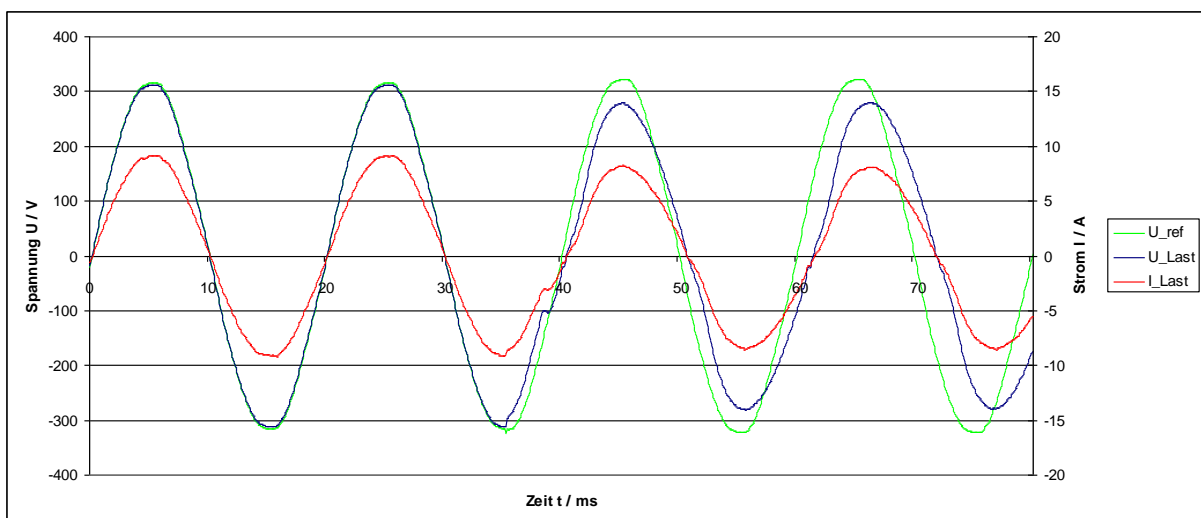


Abbildung 9: Umschaltung vom Normalnetz auf das Notnetz bei ca. $t = 35$ ms, Phase L2. Während das Normalnetz eine Spannung von 220.6 V RMS aufweist, ist die Klemmenspannung des Notnetzes lediglich 198 V RMS.

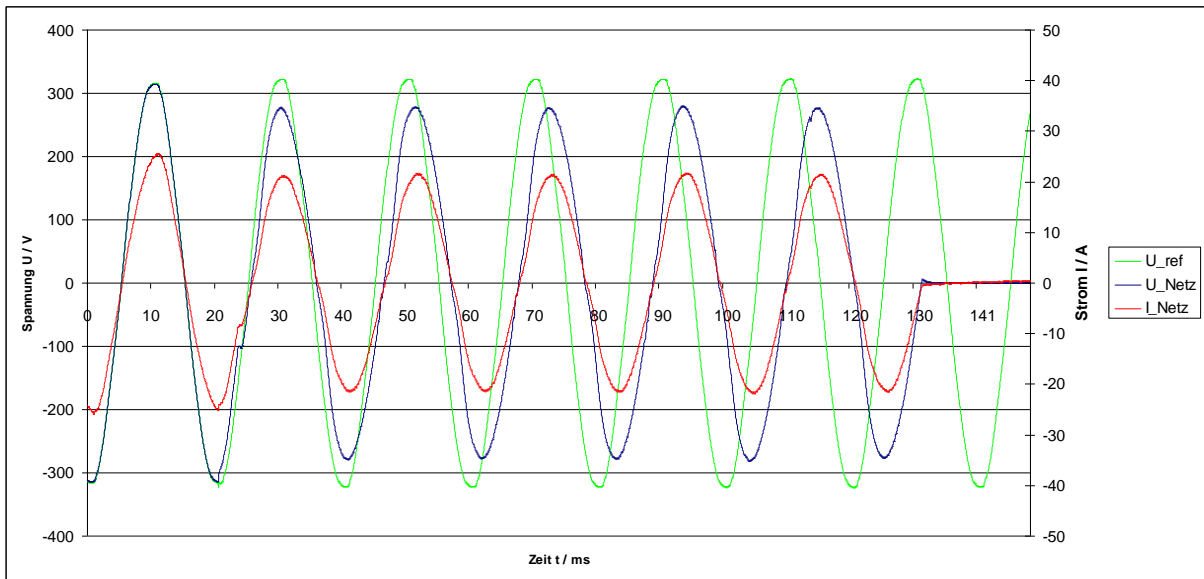


Abbildung 10: Umschaltung vom Normalnetz auf das Notnetz bei ca. $t = 20$ ms, Phase L2. Rückspeisung bis ca. $t = 130$ ms. Referenzphase und Phase des Notnetzes fallen ausser Tritt.

Ist das Netz hingegen sehr niederohmig – wie es bei einem Stromausfall i. d. R. zu erwarten ist, kann die SBU das Netz nicht bis zum Umschaltzeitpunkt der AS-Box stützen. Mit anderen Worten: Die SBU kann nicht ein ganzes Verteilnetz mit Energie versorgen. In diesem Fall kommt es zum Stromunterbruch. Ein solcher Stromunterbruch von fast 80 ms wird in Abbildung 11 gezeigt.

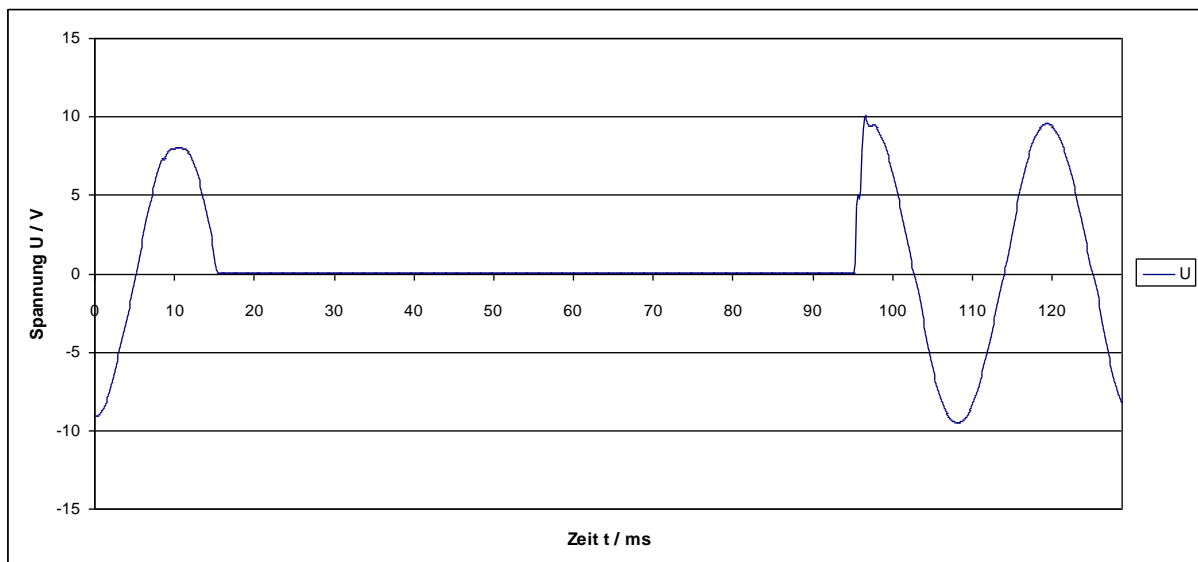


Abbildung 11: Umschaltung vom Normalnetz auf das Notnetz bei ca. $t = 16$ ms, Unterbrechungszeit von ca. 80 ms.

Umschalten Notnetz - Normalnetz

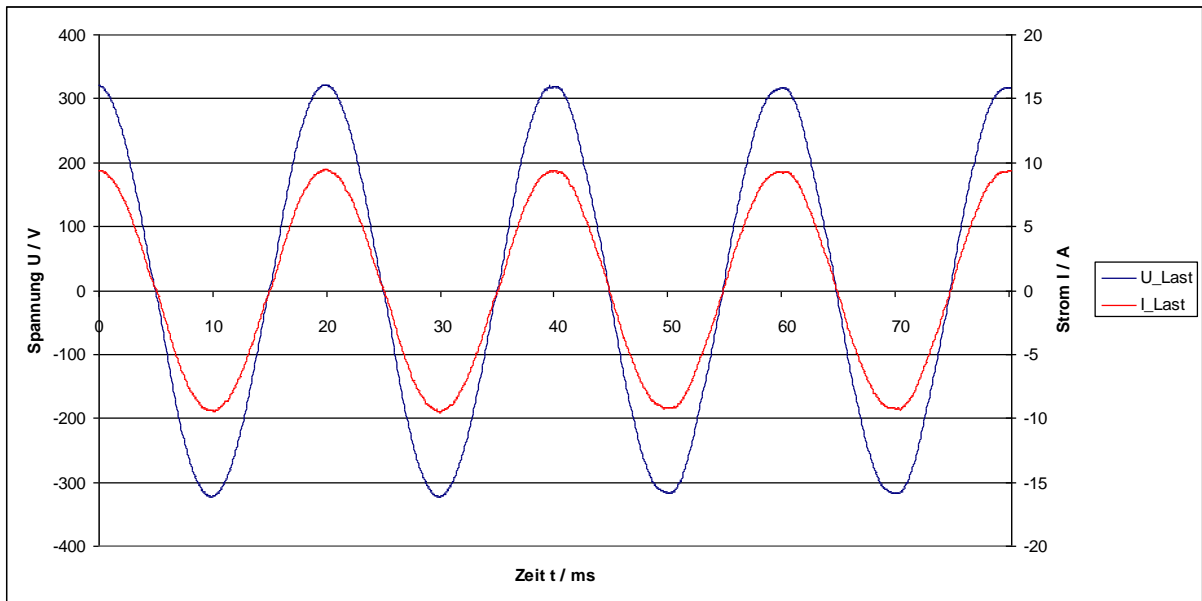


Abbildung 12: Umschaltung vom Notnetz auf das Normalnetz bei ca. $t = 40$ ms, Phase L2.

Die Umschaltung vom Notnetz zum Normalnetz erfolgt wie vom Hersteller versprochen unterbrechungsfrei (vgl. Abbildung 12). Der SBU-2200 synchronisiert zunächst das Notnetz mit dem Normalnetz, um danach die Rückschaltung auszulösen.

Zuschalten von grossen Lasten

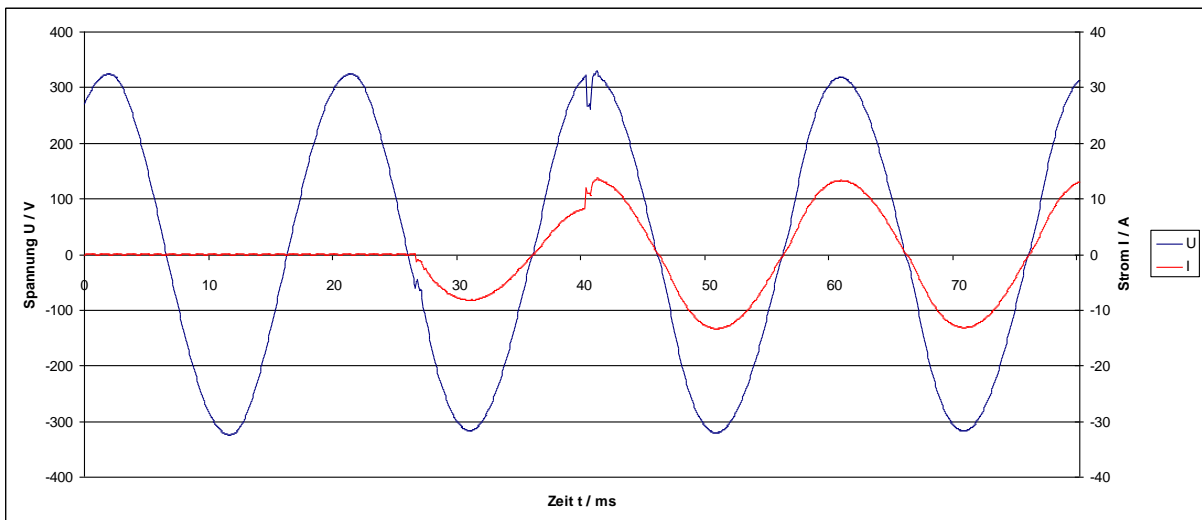


Abbildung 13: Zuschaltung einer grossen Last (2 kW) zum unbelasteten Netz.

Das Verhalten der SBU beim Zuschalten einer grossen Last (ca. 2 kW) wird in Abbildung 13 gezeigt. Zwar bricht die Netzspannung des Notnetzes beim ersten Stromanstieg kurz ein, wird jedoch innert ca. einer Millisekunde wieder auf den Sollwert gebracht.

Die Charakteristik (OS) der Notnetzspannung ist bei kleiner und grosser Netzbelastung vergleichbar. Auch Verbraucher mit hohen Anforderungen an die Netzqualität sollten dementsprechend mit einem SBU versorgt werden können, unabhängig von weiteren Lasten im Notnetz.

Messungen an weiteren Systemen

Um die Messungen nicht auf einem einzigen System resp. Gerät abzustützen, werden sie in verkürzter Form an zwei weiteren Systemen durchgeführt.

Messungen an der SBU 5000

Systembeschreibung

Ausgemessen wurde das System "Sunny Backup Set M" von SMA, bestehend aus drei SBU 5000 (Master / Slave / Slave). An jede SBU ist ein einphasiger PV-Wechselrichter des Typs Solarmax 3000S geschaltet. Während den Messungen schwankt die Leistung pro PV-Wechselrichter zwischen 500 W und 1500 W.

Grundlast während den Messungen sind die nicht näher spezifizierten im Gebäude angeschlossenen Verbraucher, sowie als Spitzenlast ist ein 500l Warmwasserboiler (7 kW).

Netzqualität

Die Referenzphase für die Messungen ist die Phase L2. Zur Validierung der Messungen wurden L1 und L3 ebenfalls untersucht. Weil die Messresultate ähnlich ausfallen, werden sie im Rahmen dieses Berichts nicht publiziert.

Netzqualität Normalnetz

Die Netzqualität der Stromversorgung an der Phase L2 ist mit einer THD von rund 1.5% sehr gut und liegt deutlich innerhalb der geforderten Toleranzen, siehe Abbildung 14. Zu beobachten sind insbesondere die fünfte und siebte Oberschwingung, welche z.B. durch die Präsenz von vielen Kleingeräten (z.B. Netzgeräte, Stromsparlampen, Computer, Fernseher, ...) verursacht werden können.

Aufgrund der guten Netzqualität wird ein relevanter Einfluss vorhandener Netzverschmutzungen auf die zu testenden Geräte ausgeschlossen resp. vernachlässigt.

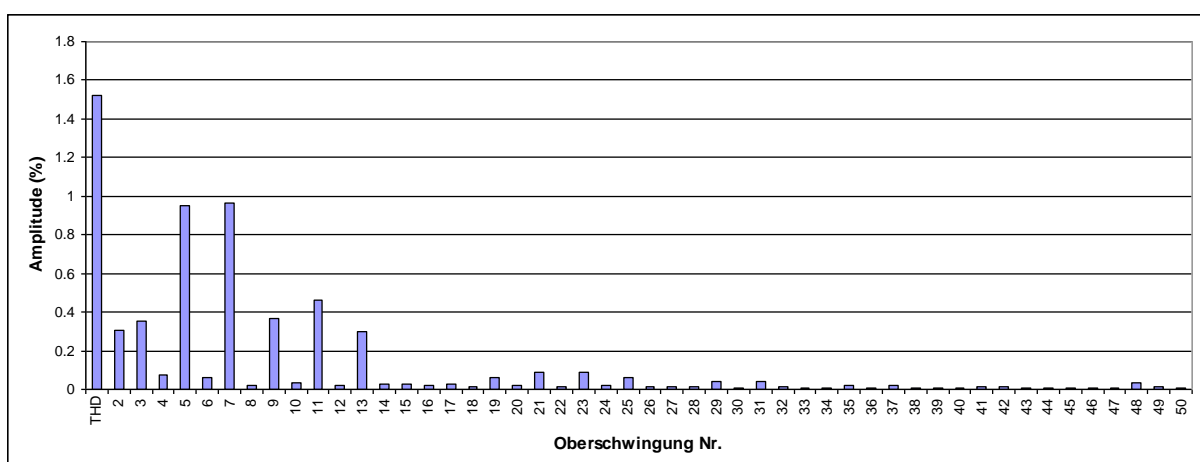


Abbildung 14: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des Normalnetzes.

Netzqualität Notnetz

Mit einem THD von 5 % - 6 % (Netzspannung) können die Backupwechselrichter die Netzqualität des Normalnetzes nicht aufrechterhalten. Wie die Analyse der Zeitverläufe von Strom und Spannung (Abschnitt "Zuschaltung von grossen Lasten") zeigen, sind dafür insbesondere steile Stromflanken der Verbraucher verantwortlich. Der Regler der Netzspannung im Backupwechselrichter kann den von der Last geforderten Strom nicht liefern, ohne die Spannung einbrechen zu lassen.

Auffällig ist dabei, dass die Netzqualität des stark belasteten Notnetzes (grosse ohmsche Last von ca. 10 kW) besser ist, als jene des leicht belasteten Notnetzes mit hohem Oberschwingungsanteil (ca. 2 kW, die Lasten zeigen kein ohmsches Verhalten).

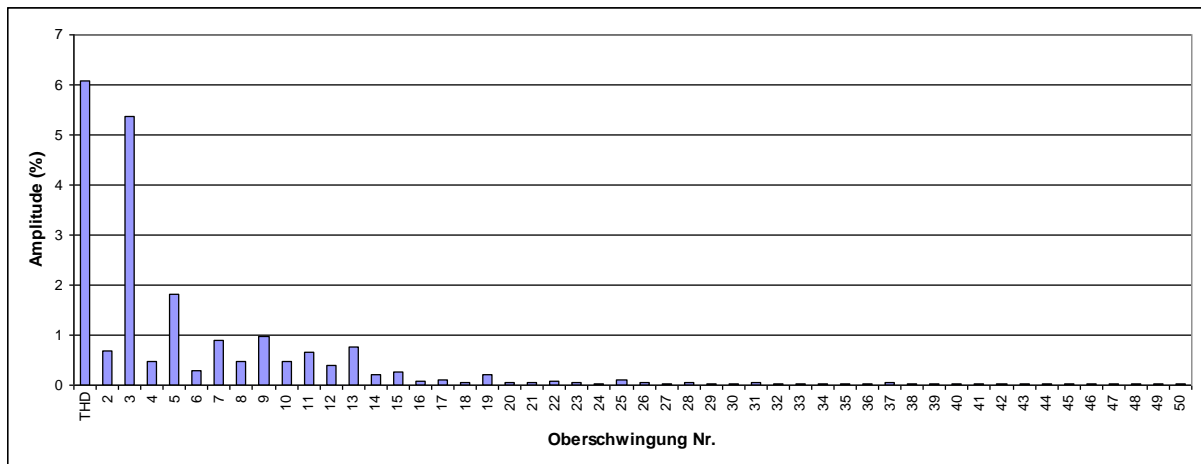


Abbildung 15: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des leicht belasteten (ca. 2 kW) Notnetzes.

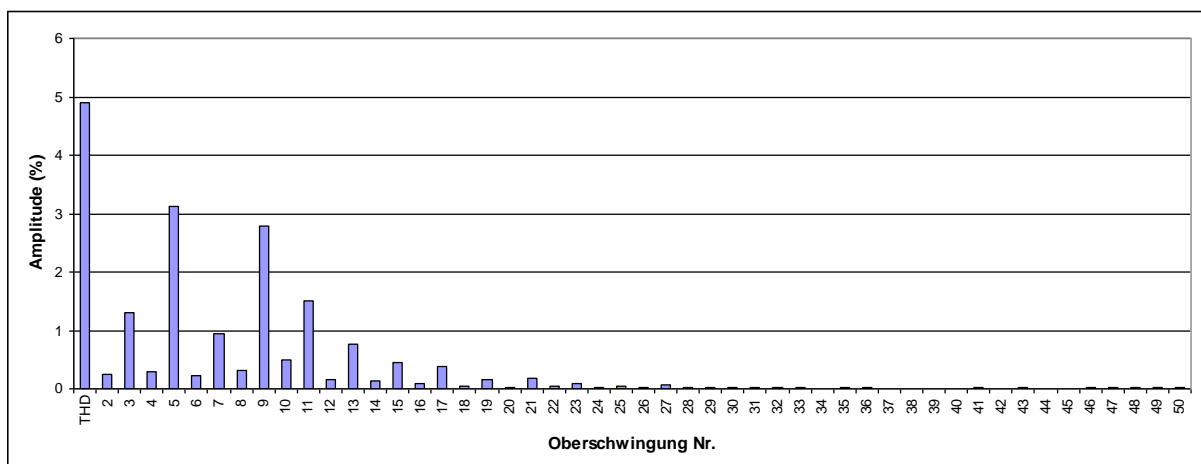


Abbildung 16: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des stark belasteten (ca. 10 kW) Notnetzes.

Messungen transienter Vorgänge

Umschaltung Normalnetz - Notnetz

Gemäss den Herstellerangaben (SMA) schaltet die SBU bei Stromausfall innert 20 Millisekunden vom Normalnetz auf das Notnetz um. Der von der SBU gestützte Verbraucher soll somit nicht länger als 20 Millisekunden ohne Stromversorgung sein.

Bei dem ausgemessenen System kann diese Unterbrechungszeit jedoch nicht festgestellt werden. Die drei SBU schalten die Lasten am Notnetz in fünf manuell ausgelösten Stromausfällen jeweils unterbrechungsfrei vom Normalnetz aufs Notnetz.

Einer der gemessenen Umschaltvorgänge ist in Abbildung 17 dargestellt.

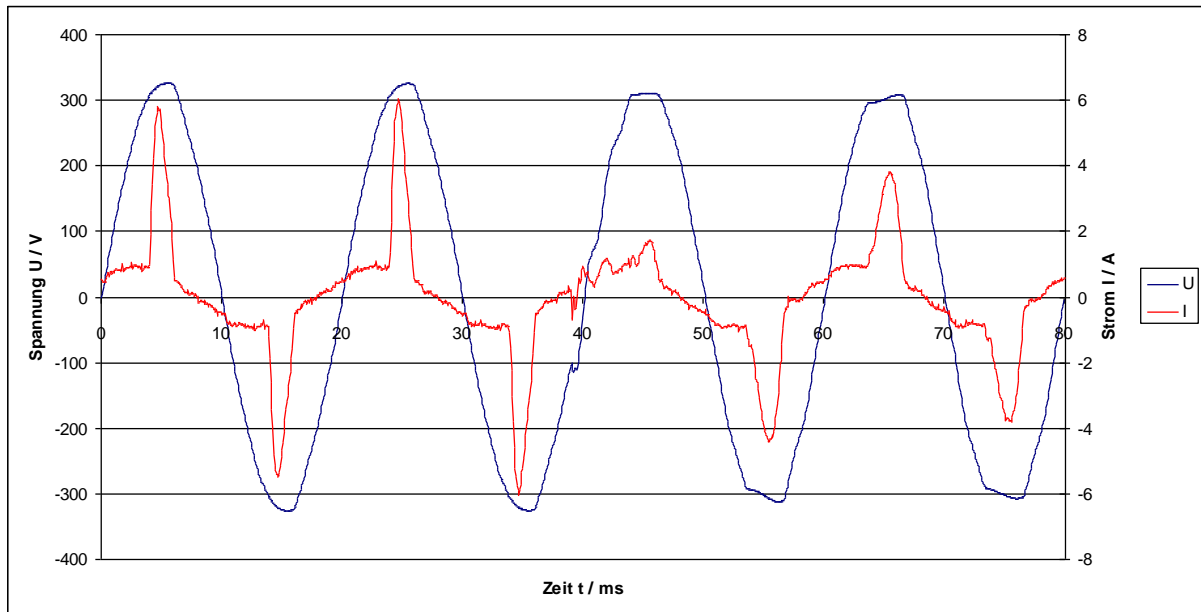


Abbildung 17: Umschaltung vom Normalnetz auf das Notnetz bei ca. $t = 38$ ms, Phase L2.

Der Umschaltzeitpunkt lässt sich dabei unter anderem durch das veränderte Muster der Oberschwingungen detektieren. Während das Normalnetz einen THD von 1.5% bei einer ausgeprägten fünften und siebten Oberwelle aufweist, ist der THD beim Notnetz mit 5 % gut drei Mal grösser (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 15).

Umschaltung Notnetz - Normalnetz

Die Rückschaltung vom Notnetz auf das Normalnetz erfolgt wie erwartet ebenfalls unterbrechungsfrei (Abbildung 18).

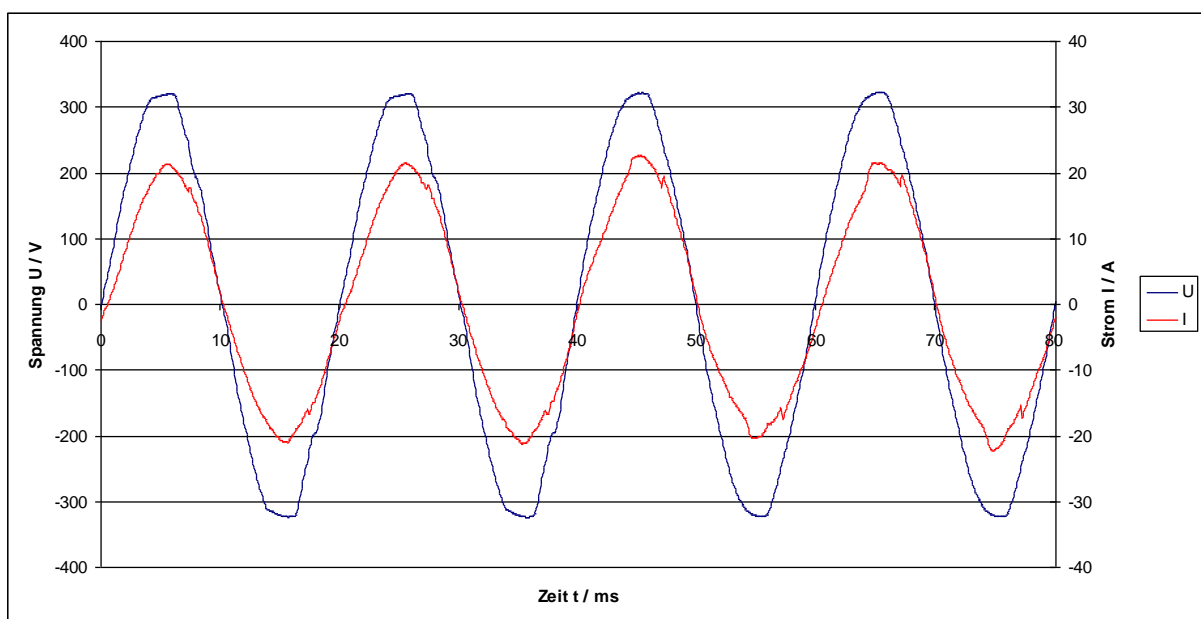


Abbildung 18: Umschaltung vom Notnetz auf das Normalnetz bei ca. $t = 40$ ms, Phase L2.

Zuschalten von grossen Lasten

Das Verhalten der SBU beim Zuschalten einer grossen Last (Warmwasserboiler, ca. 7 kW) wird in Abbildung 6 gezeigt. Zwar bricht die Netzspannung des Notnetzes beim ersten Stromanstieg kurz ein, wird jedoch innert ca. einer Millisekunde wieder auf den Sollwert gebracht. Der Einbruch der Notnetzspannung erfolgt aufgrund der steilen Stromflanke (68 A / ms), verursacht durch das Einschalten des Boilers. Zum Vergleich: Der Strom eines idealen ohmschen Verbrauchers mit der Nennleistung einer SBU (5 kW) steigt rund 6 A / ms an.

Die Charakteristik (OS) der Notnetzspannung ist bei kleiner und grosser Netzbelastung vergleichbar. Auch Verbraucher mit hohen Anforderungen an die Netzqualität sollten dementsprechend mit einem SBU versorgt werden können, unabhängig von weiteren Lasten im Notnetz.

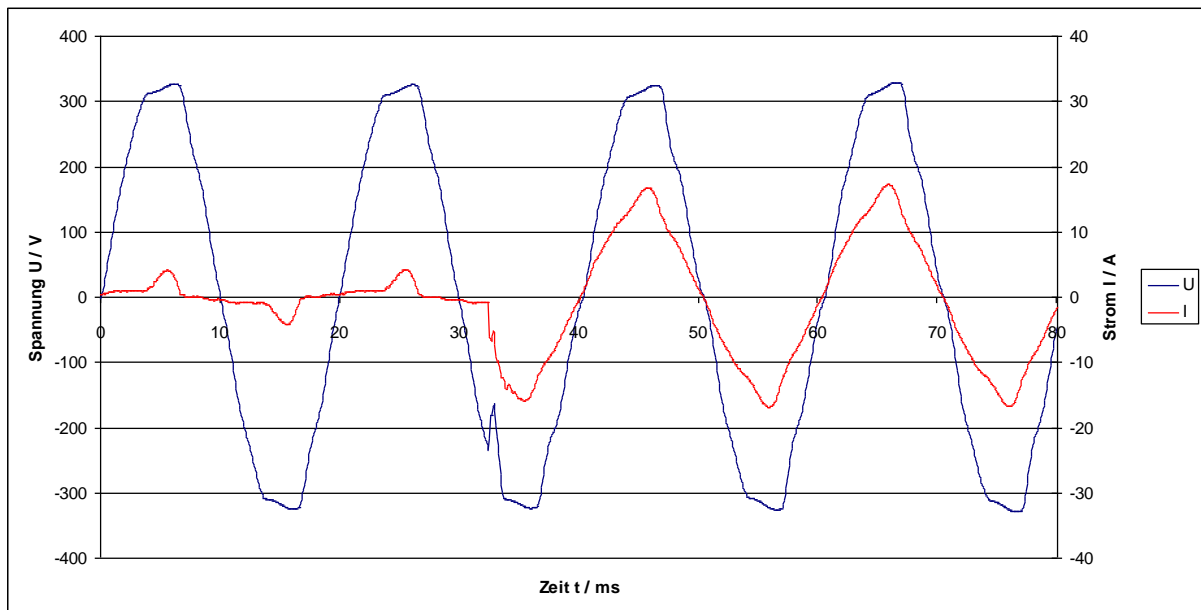


Abbildung 19: Zuschaltung einer grossen Last (Warmwasserboiler) bei ca. $t = 33$ ms, Phase L2.

Messungen am XPC 2200

Systembeschreibung

Ein XPC 2200 von Studer (STUDER INNOTECH SA) dient als Backupsystem für eine Phase des hier getesteten Systems. Über die ARM-01 (zum XPC 2200 gehörende Umschalteneinheit) wird ein Relais angesteuert, welches die gestützten Lasten von Normalnetz aufs Notnetz umschalten.

Ein Sunny Boy 1100 (SB 1100, Photovoltaikwechselrichter) wird bei Stromausfall und genügend tiefem Batterieladestand vom Normalnetz aufs Notnetz umgeschaltet.

Netzqualität

Die Referenzphase für die Messungen ist die Phase L2. Zur Validierung der Messungen wurden L1 und L3 ebenfalls untersucht. Weil die Messresultate ähnlich ausfallen, werden sie im Rahmen dieses Berichts nicht publiziert.

Netzqualität Normalnetz

Die Netzqualität der Stromversorgung ist in allen Phase L1 bis L3 mit einer THD von rund 0.8% - 1.5% sehr gut und liegt deutlich innerhalb der geforderten Toleranzen, siehe Abbildung 20. Zu beobachten ist insbesondere die siebte Oberschwingung, welche z.B. durch die Präsenz von vielen Kleingeräten (z.B. Netzgeräte, Stromsparlampen, Computer, Fernseher, ...) verursacht werden kann.

Aufgrund der guten Netzqualität wird ein relevanter Einfluss vorhandener Netzverschmutzungen auf die zu testenden Geräte ausgeschlossen resp. vernachlässigt.

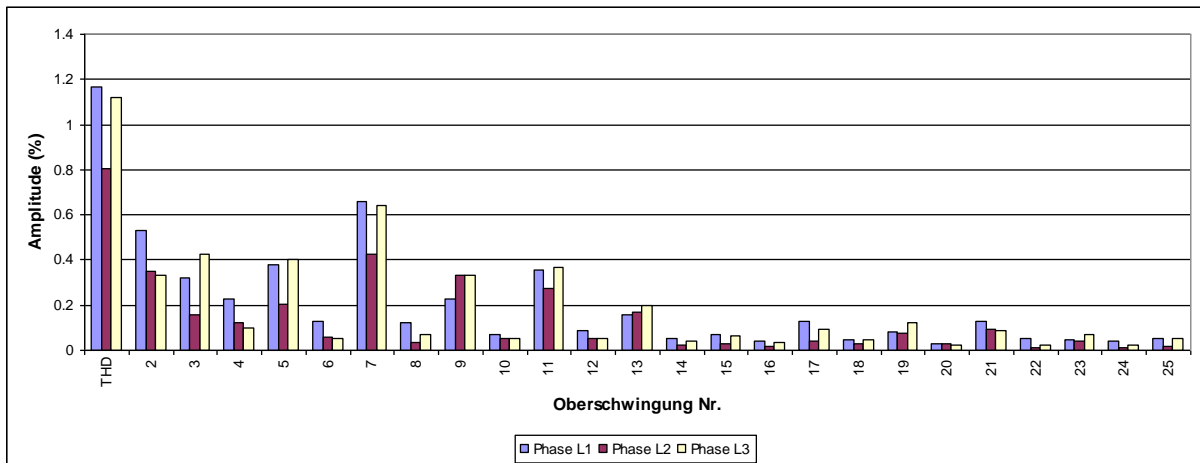


Abbildung 20: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des Normalnetzes.

Netzqualität Notnetz

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen das Oberschwingungsmuster für die Spannung des Notnetzes. Im Gegensatz zu den Messungen an der SBU 5000 nimmt hier die Belastung durch die Oberschwingungen bei dem stärker belasteten Netz zu. Dafür gibt es zwei Gründe: Einerseits weist hier auch die grosse Last (elektronisch angesteuerter Motor, Gesamtlast ca. 3 kW) kein ohmsches Verhalten auf, andererseits arbeitet der XPC 2200 bei angeschlossener grosser Last bereits deutlich über der Nennleistungsgrenze.

Sowohl beim schwach wie auch beim stark belasteten Notnetz liegen die Oberschwingungen jedoch in derselben Grössenordnung wie diejenigen der SBU 5000 und damit im Toleranzbereich.

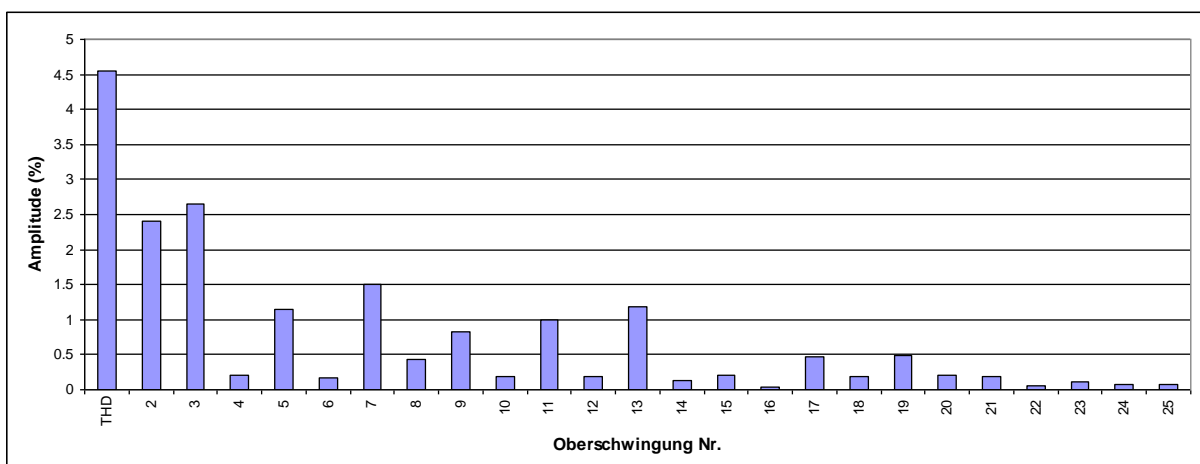


Abbildung 21: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des leicht belasteten Notnetzes.

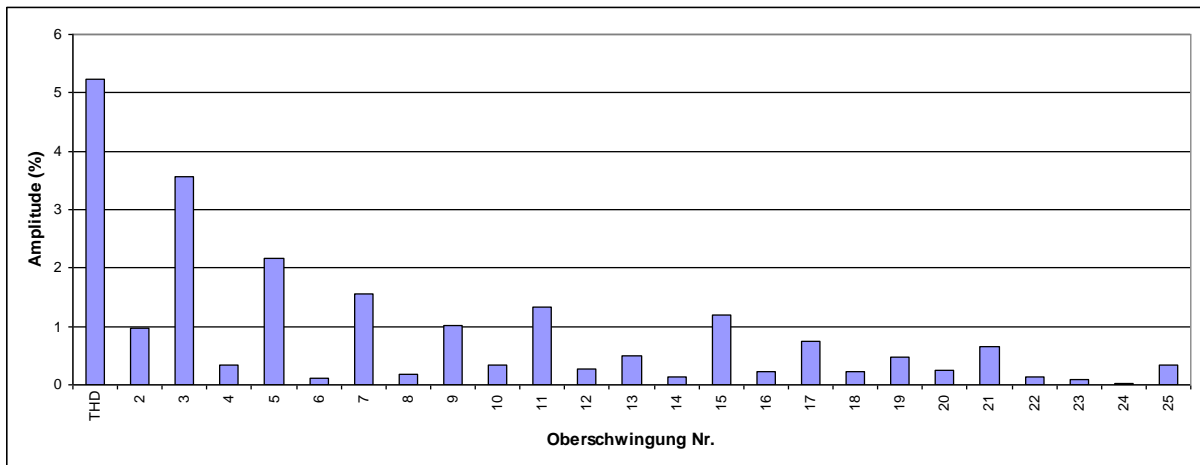


Abbildung 22: Momentaufnahme der Oberschwingungen der Phase L2 des stark belasteten Notnetzes.

Messungen transienter Vorgänge

Umschaltung Normalnetz - Notnetz

In der technischen Dokumentation des XPC-2200 gibt Studer-Innotec die Umschaltzeit mit 40 Millisekunden an. Mit 65 Millisekunden dauerte der Unterbruch jedoch gut eineinhalb Mal so lange wie erwartet (Abbildung 23).

Diese Umschaltzeit setzt sich einerseits aus der Umschaltzeit des XPC-2200 selber sowie der Schaltzeit des externen aber betriebsnotwendigen Relais zusammen. Im Rahmen dieses Projekts (Systembetrachtung) werden die beiden Zeiten nicht unterschieden.

Des Weiteren zeigt Abbildung 23, dass Amplitude und Phase des Notnetzes nicht synchron zum Normalnetz verlaufen. Während das Normalnetz eine Spannung von 231.7 V RMS aufweist, ist die Klemmenspannung des XPC-2200 lediglich 223.4 V RMS. Die in Abbildung 23 beobachtete Phasenverschiebung ist nicht relevant, da sie bei jeder Messung eine andere Grösse aufweist.

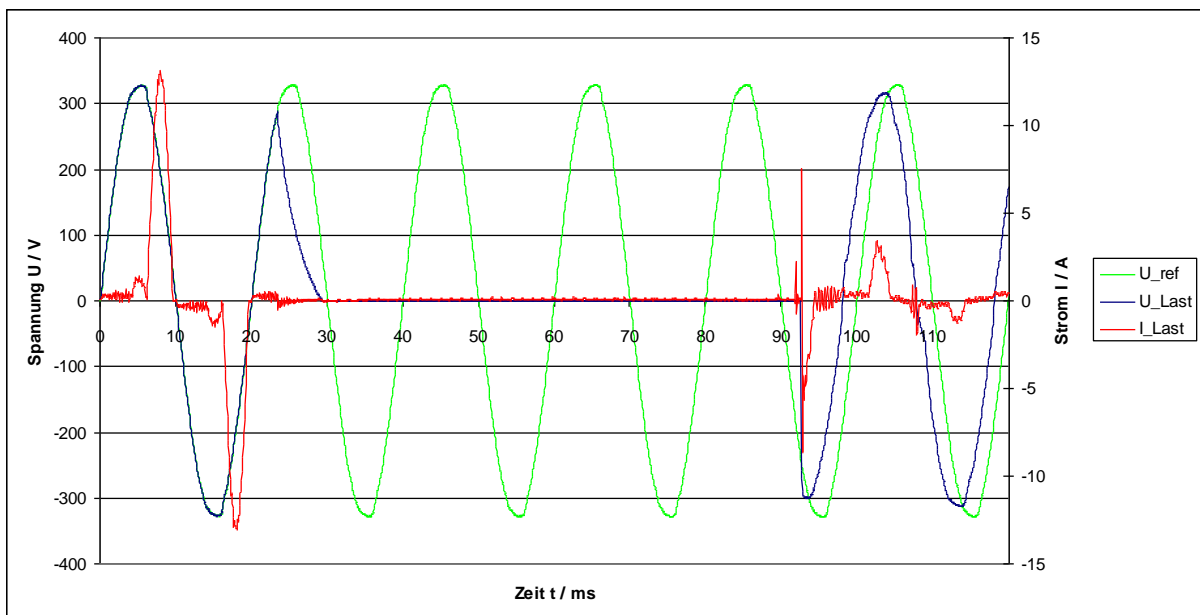


Abbildung 23: Umschaltung vom Normalnetz auf das Notnetz bei ca. $t = 25$ ms. Der XPC-2200 versorgt die Last erst bei $t = 93$ ms wieder mit Strom. Die hellgrüne Kurve (U_{ref}) zeigt die Netzspannung während der Zeit, in der das Notnetz vom Normalnetz getrennt ist.

Umschaltung Notnetz - Normalnetz

Die Umschaltung vom Notnetz zum Normalnetz erfolgt wie vom Hersteller versprochen unterbrechungsfrei. Der XPC-2200 synchronisiert zunächst das Notnetz mit dem Normalnetz, um danach die Rückschaltung auszulösen (Abbildung 24). Wegen dem dabei erfolgten Stromanstieg tritt bei der Last eine Stromtransiente auf (bei $t = 35$ ms in Abbildung 24).

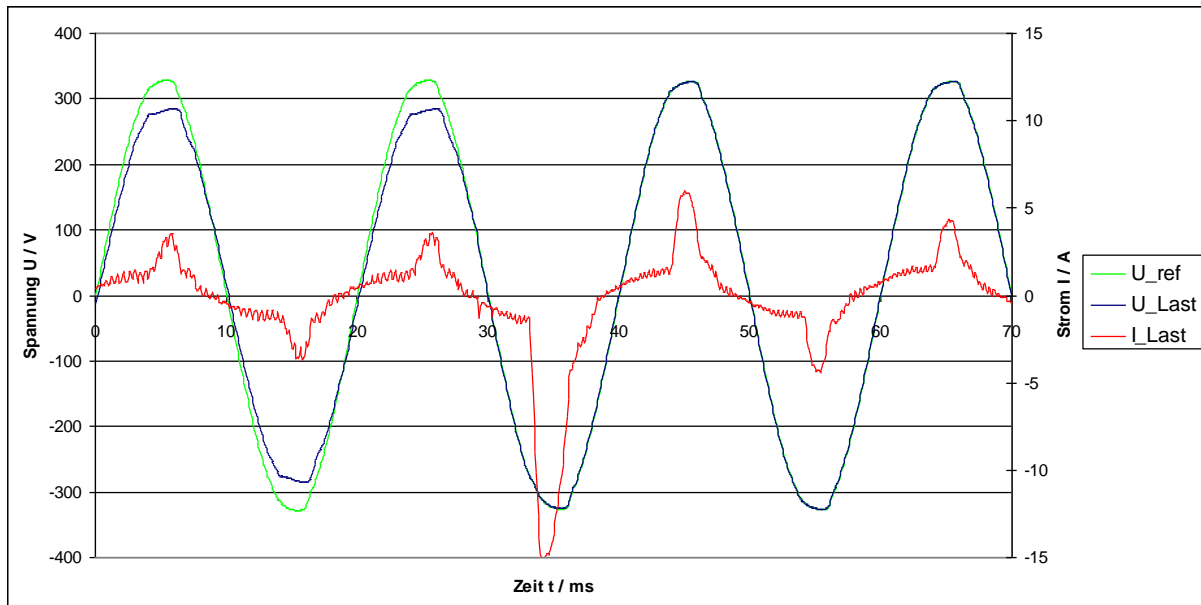


Abbildung 24: Umschaltung vom Notnetz auf das Normalnetz bei ca. $t = 35$ ms.

Zuschalten von grossen Lasten

Als Stresstest wird auch beim XPC-2200 eine Last in der Grössenordnung der Nennleistung des XPC-2200 verwendet. Grundsätzlich kann der Backupwechselrichter dabei die Spannung aufrechterhalten – er erhöht sie sogar leicht – die Spannungsqualität (OS, Abweichung vom idealen Sinus) nimmt jedoch ab. Dies ist im Wesentlichen auf die Last zurückzuführen, welche ihrerseits einen OS-belasteten Strom aus dem Netz zieht.

Das Wegschalten derselben Last (Not-Aus des Motors) hingegen hat keinen messbaren Einfluss auf die Spannung am Notnetz (Abbildung 26).

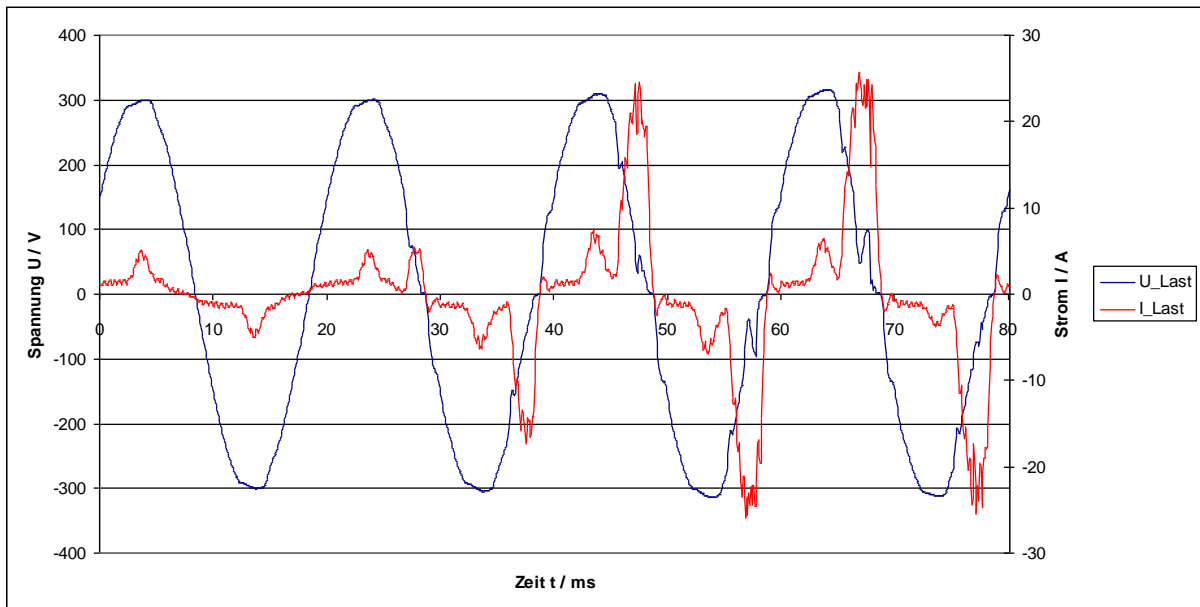


Abbildung 25: Zuschaltung einer grossen Last (Motor mit Soft-Start)

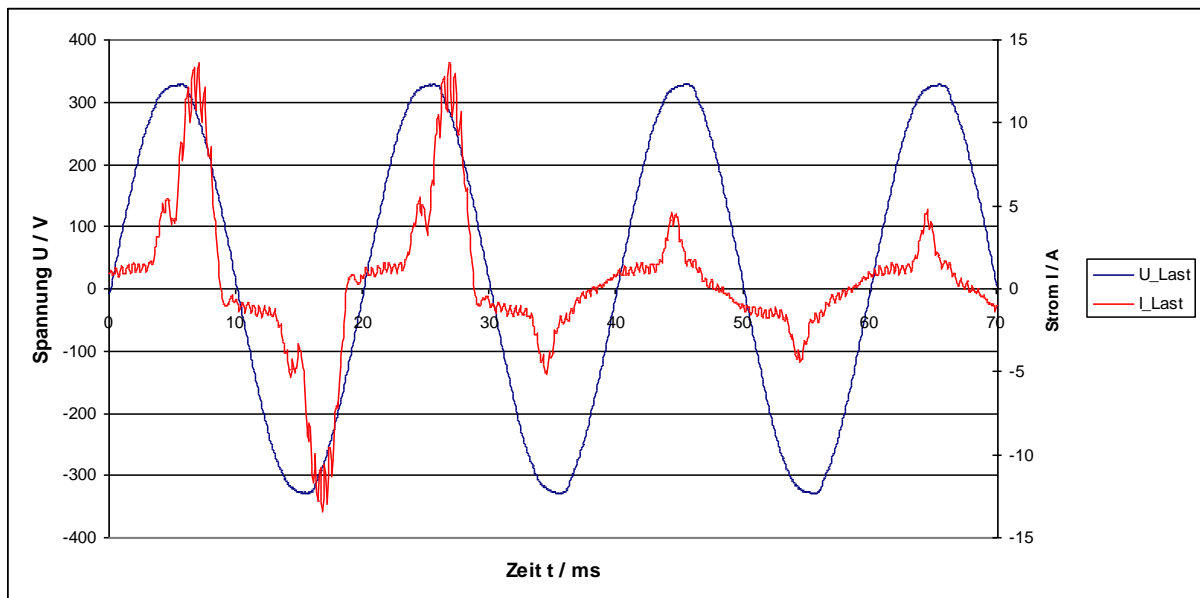


Abbildung 26: Wegschalten einer grossen Last (Not-Aus eines Motors)

Fazit

Notstrom ja – unterbrechungsfreie Stromversorgung nein

Alle untersuchten Systeme (bis auf den ausgewechselten ISA 3000 von Conergy) erfüllen die Erwartungen und Herstellerangaben weitgehend. Sie unterscheiden sich jedoch in einem wesentlichen Punkt von verwandten, nicht PV-assoziierten Systemen: Es sind reine Backup- oder Notstromsysteme, die keine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV oder englisch UPS) garantieren. Wer also Kühlschrank, Fernseher und Staubsauger auch zu Zeiten des Stromausfalls nutzen möchte, ist mit den getesteten Systemen bestens bedient. Wer hingegen seine anspruchsvollen Geräte wie den Computer vor einem Absturz sichern will, dem hilft ein Backupwechselrichter nur begrenzt³.

Sunny Backup 2200, Backup Set S

Der "Sunny Backup 2200" von SMA erweist sich als zuverlässig und für den Alltag geeignet. Einige Punkte stechen dabei besonders positiv heraus:

- Die Umschaltvorgänge sind bei den gemessenen Szenarien sauber. Falls es zu einem Unterbruch kommt, nimmt dieser ein klares Zeitfenster ein. Vor und nach dem Unterbruch liegt eine saubere Netzspannung an.
- Es treten keine nennenswerten Netzverzerrungen auf, die Oberwellenbelastung des Notnetzes ist den Umständen entsprechend gering.
- Es treten zu keinem Zeitpunkt Spannungsüberhöhungen auf, auch nicht beim plötzlichen Lastabwurf.
- Weil der PV-Wechselrichter direkt ins Netz einspeist, ist sein Wirkungsgrad grundsätzlich unverändert.
- Das System ist modular und damit erweiterbar, der PV-Wechselrichter kann unter gewissen Bedingungen⁴ durch ein beliebiges anderes Fabrikat ersetzt werden.
- Das Gerät lässt sich mit dem im Lieferumfang enthaltenen Sunny Remote Control bequem aus der Ferne steuern und überwachen.

Als nachteilig sind hingegen folgende Punkte einzuordnen:

- Der Bereitschaftsverbrauch von 40 W (gemessen: 35.9 W) ist relativ hoch. Im Monat Dezember entspricht dies rund 35% der elektrischen Energie, welche eine 3 kWp PV-Anlage im Mittel erwirtschaftet, übers ganze Jahr gesehen sind es 10%.
- Der Backupwechselrichter ist kein USV-Gerät, er garantiert keine unterbrechungsfreie Stromversorgung. In den Messungen werden die angegebenen 50 ms Umschaltzeit in einem Fall sogar überschritten. Geschieht der Unterbruch jedoch hochohmig (z.B. aufgrund einer ausgelösten Sicherung am Hausanschluss), so wird meist ein echt unterbrechungsfreier Betrieb gemessen. Sensible Geräte wie z.B. Computer können deshalb mit dem Sunny Backup 2200 nicht zuverlässig geschützt werden.
- Die im BFE-Projekt SIMIBU [SI07] in Aussicht gestellten Synergien der Kombination von PV-Wechselrichter und Backupwechselrichter werden aufgrund der Modularität des Systems nicht wahrgenommen. Entsprechend hoch ist der Systempreis.
- Bei Testläufen hat der Wechselrichter SB 2500 vermehrt Schwierigkeiten mit der Netzsynchroisation, insbesondere im Inselbetrieb. Weil der SB 2500 jedoch kein zwingender Bestandteil des Backupsystems ist und auch durch andere Geräte ersetzt werden kann, ist dieser Punkt kein Bewertungskriterium für das Backupsystem.
- Der Bereitschaftsverbrauch lässt sich zwar mit dem Silent Mode reduzieren, doch kann in diesem Fall weder die PV-Anlage Strom produzieren noch ein Netzausfall sofort abgefangen werden.

³ Dies geht auch aus den Herstellerangaben hervor.

⁴ Insbesondere muss sich der Wechselrichter bei einer vorgegebenen Frequenz automatisch ausschalten.

Sunny Backup 5000, Backup Set L

Die leistungsfähigere Backup-Variante von SMA ist in Funktionalität und Eigenschaften dem kleineren System nicht unähnlich.

Vorteile:

- Leistungsfähiges, robustes und zuverlässiges Gerät
- Die mit 20 Millisekunden vom Hersteller angegebene maximale Unterbrechungszeit ist so gering, dass auch Geräte mit höheren Anforderungen an die Spannungsqualität unterbrechungsfrei arbeiten können sollten.

Nachteile:

- Mit 114 Watt (69 Watt im Silent Mode) ein grosser Stromfresser, der pro Jahr den Energieertrag einer 1 kWp PV-Anlage zu Nichte macht.

XPC 2200

Das Backup-System von Studer-Innotec XPC 2200 arbeitet zuverlässig und energiesparend, die Unterbrechungszeit bei Netzausfall ist jedoch nicht zu vernachlässigen. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile des Systems beschrieben.

Vorteile:

- Das Gerät arbeitet zuverlässig, die Spannungsqualität ist einwandfrei.
- Die Gerätegrösse ist mit 124 mm x 215 mm x 410 mm und 12.6 kg Gewicht deutlich geringer als die des vergleichbaren Geräts von SMA.
- Nach Herstellerangaben liegt der Bereitschaftsverbrauch bei nur 7 W und ist damit rund fünf Mal tiefer als der des Backupwechselrichters von SMA.
- Im Gegensatz zum SBU 2200 schaltet sich der XPC 2200 nach einer automatischen Überlastabschaltung selbständig wieder ein.
- Wie die Backupwechselrichterfamilie von SMA hat auch der XPC 2200 eine Fernsteuerung mit integrierter Betriebsanzeige.

Nachteile:

- Wegen dem systembedingt nachgeschalteten Relais ist die Unterbrechungszeit an der Last deutlich grösser als die mit 20 ms veranschlagte Umschaltzeit des Backupwechselrichters. Diese Umschaltzeit ist auch bei einem hochohmigen Netzausfall (z. B. ausgelöste Sicherung) hinzunehmen.

Beantwortung der Fragestellungen zum Sunny Backup 2200

Der Grossteil der eingangs gestellten Fragen konnte im Projektverlauf beantwortet werden.

Netzeinspeisung	Wird ein ähnlicher Wirkungsgrad erreicht wie mit einem handelsüblichen netzgekoppelten Wechselrichter?	Der PV-Wechselrichter speist ohne Wirkungsgradverlust ins Netz ein. Der Backupwechselrichter hat jedoch einen Standby-Verbrauch von 40 W, was einem Wirkungsgradverlust der PV-Anlage von rund 10% entspricht (bei einer 3 kWp PV-Anlage).
Notstrombetrieb ohne Einstrahlung	Ist die Umschaltzeit genügend kurz? Oder kommt es bei einigen angeschlossenen Geräten zu Problemen?	Die Umschaltzeit ist u. A. abhängig von der Netzimpedanz des ausgefallenen Stromnetzes. Weil diese in den Tests nur in gewissen Grenzen gewählt werden konnte, konnte das volle Spektrum der Umschaltzeit nicht ermittelt werden. Mit den ausgewiesenen 50 ms ist die Umschaltung für viele Anwendungen kurz genug, nicht aber für sensible Geräte wie z.B. Computer.
	Entstehen durch die Umschaltung Probleme im Netz? (Spannungsspitzen?)	Nein.
	Welchen Wirkungsgrad hat der WR für die Umwandlung von Batteriestrom zu Wechselstrom? Ist der Wirkungsgrad im Vergleich zu üblichen UPS-Geräten genügend?	Der durchschnittlich erreichte Systemwirkungsgrad beträgt ca. 65% - 70% im Backupbetrieb und rund 80% im Bereitschaftsbetrieb (Wirkungsgrad PV-Wechselrichter mit eingeschlossen). Abzüglich des Wirkungsgrades des PV-Wechselrichters entspricht dieser Wirkungsgrad herkömmlichen UPS-Geräten, welche im "Offline-Modus" (Parallelbetrieb ohne Trennung von Normalnetz und Notnetz, es wird nicht die ganze Energie durch den Wechselrichter umgesetzt). Der Wirkungsgrad ergibt sich dabei jeweils auf dem Bereitschaftsverbrauch des Systems, und nicht aus der Energieumwandlung.
	Was geschieht, wenn die Batterie sich leert? Gibt es eine Vorwarnung, dass bald nicht mehr genügend Batteriestrom zur Verfügung stehen wird und man die Lasten reduzieren soll? Oder stellt der Wechselrichter einfach ab? Wie hoch ist die Tiefentladung der Batterie?	Der Backupwechselrichter schaltet sich automatisch aus und muss manuell wieder gestartet werden. Mit einem dreistufigen Batterieschonbetrieb kann die maximale Entladetiefe manuell eingestellt werden.
	Wenn die Batterie leer ist, wie verhält sich der Wechselrichter während dem Abschalten? Gibt es Probleme im Netz? (Spannungsspitzen?)	Die Ausschaltung erfolgt ohne Netzurückwirkungen.

Notstrombetrieb mit Einstrahlung	Wie hoch ist der Wirkungsgrad zum Laden und Entladen der Batterie?	Die Wirkungsgrade können hier nur als Systemwirkungsgrade zuverlässig gemessen werden, siehe nächste Frage.
	Was geschieht, wenn die Solarleistung höher ist als die Leistung der angeschlossenen Notstromgeräte? Wird die nicht benötigte Energie in der Batterie gespeichert? Wie hoch ist der Wirkungsgrad?	Die Überschussenergie wird in die Batterien gespeichert. Der Systemwirkungsgrad (siehe Kapitel "Praxistest Sunny Backup Set S", Abschnitt "Wirkungsgrade", beträgt 65% - 70%.
	Was geschieht, wenn die Solarleistung tiefer ist als die Leistung der angeschlossenen Notstromgeräte? Kann das Gerät gleichzeitig Leistung aus der Batterie und aus dem PV-Generator an die Notstromlasten liefern?	Ja, dies ist ein normaler Betriebszustand.
Überlastverhalten im Notstrombetrieb	Gibt es eine Warnung bei Überlast? Wie kann darauf reagiert werden?	Nein, eine Warnung gibt es nicht. Der Backupwechselrichter ist jedoch weit über seine Nennleistung hinaus belastbar, siehe Tabelle 1.
	Messen der Abschaltzeit und der Netzspannungen während dem Ausschalten des Geräts (aufgrund zu hoher Last).	Bei der angeschlossenen Testlast von ca. 4 kW schaltet sich der Wechselrichter jeweils innert drei Sekunden aus.
	Schaltet das Gerät selbstständig wieder zu, wenn die Last reduziert wird?	Nein, der Neustart muss manuell ausgelöst werden.
Weitere Betriebszustände	Wie können weitere DC-Quellen (z.B. Dieselgenerator) angeschlossen und steuerungstechnisch eingebunden werden?	Nein, dies ist nur bei der grösseren Backupwechselrichterfamilie von SMA möglich.
	Kann das Gerät Batteriestrom ins öffentliche Netz einspeisen?	Nein, diese Funktion ist grundsätzlich gesperrt. Während des Umschaltvorgangs speist der Backupwechselrichter jedoch für kurze Zeit zurück ins Netz ("reverse power").
	Welche weiteren Einstellungen sind möglich?	<ul style="list-style-type: none"> • Silent-Modus (Energiesparmodus) • Konfigurierbares Relais, z.B. für Lastabwurf bei tiefem Batterieladestand • Diverse gemäss Handbuch

Empfehlung für die Weiterentwicklung von Backupwechselrichtern

Mit den getesteten Geräten erfüllen die Gerätehersteller die meisten Spezifikationen, die im Projekt SIMIBU [SI07] aufgezeigt worden sind. Die Geräte sind technisch auf einem genügend hohen Stand, um bedenkenlos breit eingesetzt werden zu können.

Für die weitere Geräteentwicklung wurden die folgenden Vorschläge erarbeitet:

Verbesserungsvorschläge	Der Energieverbrauch der Systeme im Bereitschaftsbetrieb soll stark gesenkt werden. Das Backup-System darf nicht wie heute ca. 10% des von der Solaranlage erwirtschafteten Ertrags zur Deckung des Eigenbedarfs verwenden.
	Das System soll nach Möglichkeit die Funktionalität eines USV-Systems bieten. Wer heute auf ein USV-System angewiesen ist, müsste dem Backupsystem zusätzlich ein USV-Gerät nachschalten.
	Der automatische Systemstart nach einem Fehler (z. B. Überlastabschaltung) soll ermöglicht werden. Zwar gibt es die Option "AutoStr" (automatischer Start), jedoch muss nach erfolgtem Gerätestart der Wechselrichterbetrieb manuell eingeschaltet werden. Damit soll dem Anlagebesitzer der Gang mit der Taschenlampe in den Keller erspart bleiben, wenn er versehentlich eine Herdplatte zu viel einschaltet.
	Es sollte geprüft werden, ob es für gewisse Anwendungen nicht sinnvoll wäre, alle Systemkomponenten (Backupwechselrichter, Umschalteneinheit, Wechselrichter) in einem einzigen Gerät zusammenzufassen.
Funktionserweiterung	Das Thema "Eigenverbrauch" ist zurzeit insbesondere in Deutschland sehr aktuell: Z. B. mit lokalem Batteriespeicher soll die Mittagsspitze aus der Solarstromproduktion gespeichert und am Abend verbraucht werden. Diese Funktionalität wird dann entscheidend wichtig, wenn die PV-Anlagen ein bestimmtes Verteilnetz stark belasten (Spannungsanhebung). Ein Backupwechselrichter erfüllt die idealen Voraussetzungen, um diese Funktion übernehmen zu können.
	Sowohl für die Elektromobilität wie auch für den Selbstversorger ist die Energiespeicherung ein zentraler, Kosten treibender Faktor. In einem zukünftigen System ist zu prüfen, ob für diese verschiedenen Anforderungen nicht derselbe Speicher verwendet werden kann. Für das Backupsystem würde dies bedeuten, dass es dynamisch mit unterschiedlichen Speichergößen arbeiten können muss.

Ausblick

Seit dem Projektstart im Jahr 2007 hat sich im Bereich Backupwechselrichter einiges getan. Nicht zuletzt wegen den Bemühungen Deutschlands (nach wie vor PV-Markt Nr. 1 weltweit), den Eigenverbrauch der PV-Anlagebesitzer zu fördern, hat die Kombination Photovoltaik und lokaler Speicher (bisher insbesondere Batteriespeicher) starken Aufwind erhalten. So soll z.B. aus einem Forschungsprojekt lanciert von namhaften deutschen und französischen Forschungsinstituten und Firmen [Sol-ion10] im Frühjahr 2011 ein neues Backup-System hervorgehen [Ph10-6].

Weiterhin verfügbar sind die Produktpaletten an Backupwechselrichtern von Studer Innotec und SMA, welche die in SIMIBU gestellten Anforderungen erfüllen.

Nach Angaben von Conergy Schweiz soll auch Conergy wieder einen Wechselrichter mit Backupfunktion ins Auge gefasst haben, ein Produkt wird zurzeit jedoch nicht angeboten.

Die österreichische Firma Fronius bietet zurzeit mit der "Fronius Energiezelle" ein System an, welches in Zukunft Solarstrom in Wasserstoff zwischenspeichern können soll [Fro10].

In diesem Projekt wurde die Praxistauglichkeit eines Backupwechselrichters eingehend geprüft, das Resultat ist positiv. Ein weiteres Folgeprojekt ist deshalb nicht vorgesehen.

Referenzen

- [Ph10-5] Photon, Das Solarstrom-Magazin, Mai 2010, Seite 32ff, Aachen.
www.photon.de
- [Ph10-6] Photon, Das Solarstrom-Magazin, Juni 2010, Seite 98, Aachen.
www.photon.de
- [SMA-SBS] Datenblatt zu Sunny Backup Set S, Stand 2010, www.sma.de
- [SI07] SIMIBU, Solar Inverter mit integriertem Backup, Enecolo AG und Sputnik Engineering AG, mit Unterstützung des BFE, 2007
- [Sol-ion10] Das Sol-ion System – Ein System zur Optimierung des Eigenverbrauchs von PV-Strom, 25. Symposium – Photovoltaische Solarenergie 2010, voltwerk electronics GmbH, Fraunhofer IWES Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen, 2010
- [Fro10] Homepage von Fronius International GmbH, 2010-10-13, www.fronius.com
- [ewz10] Homepage des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich ewz, 2010-10-18,
www.ewz.ch
- [Dra10] PowerXplorer PX5 von Dranetz, Homepage 2010-10-20
www.dranetz-bmi.com
- [Haag10] Omni Quant von Haag, Homepage 2010-10-20, www.haag-messgeraete.de