



Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

PowerBlox - Betrieb



Hochschule München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Christina Lesti, Daniel Goldmann, Prof. Dr.-Ing. Simon Schramm

23.10.2018

I Kurzfassung

Die Energieversorgung von Entwicklungsländern ist ein wichtiger Beitrag zur Entwicklungshilfe dieser Menschen vor Ort. Die hier getestete PowerBlox kann hierzu einen wertvollen Beitrag leisten.

Angefangen beim sog. „Unboxing“ über eine kritische Bewertung der im Datenblatt aufgelisteten Eigenschaften bis hin zur Messung des dynamischen Verhaltens der PowerBlox werden in diesem Dokument exemplarische Ergebnisse vorgestellt, die das Leistungsvermögen der PowerBlox im aktuellen Serienstand bewerten. Ein Erfahrungsbericht während eines zweiwöchigen Camping-Aufenthalts bewertet die reale Nutzung zweier Boxen im Inselsystem.

Zusammenfassend sind einige Vorschläge gelistet, welche aus Sicht der Autoren die PowerBlox zu einem wirklich guten Produkt werden lassen.

Ergänzt wird das Dokument um einen Bauvorschlag für eine einachsige Nachführung als weiteres, ergänzendes Produkt für die Nutzung der PowerBlox in einem PV-gespeisten Inselsystem.

II Inhaltsverzeichnis

I	Kurzfassung	2
II	Inhaltsverzeichnis.....	3
1	Einleitung	5
1.1	Systemübersicht	5
1.2	GUI/Nutzerinterface	8
1.3	Anschlussvarianten / Lieferumfang / Unboxing	9
1.4	Kommunikation:	10
2	Spezifikation.....	11
2.1	PV-Anschluss.....	11
2.2	Batterieanschluss.....	13
2.2.1	Li-Ion- Batterie.....	13
2.2.2	Blei- Batterie.....	13
2.3	Netzanschluss:	15
2.3.1	Schuko-Steckdosen	15
2.3.2	Netzkopplung/Generatorbetrieb	15
2.3.3	PowerBlox – Kopplung	15
2.3.4	Blindleistungsstellbereich	16
3	PowerBlox – Funktionsweise	17
3.1	MPP-Laderegler	17
3.2	Hochsetzsteller mit galvanischer Trennung	18
3.3	Netzwechselrichter.....	19
4	PowerBlox - Betrieb	20
4.1	Regulärer Betrieb.....	22
4.2	Überlastbetrieb.....	24
4.3	Gekoppelter Betrieb zweier PowerBlox	25
5	Nutzung zweier PowerBlox im Inselbetrieb – Erfahrungsbericht.....	32
6	PV-Generator – Nachführung	34
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	39
8	Literaturverweis	40

1 Einleitung

Etwa 620 Millionen Menschen in der Subsahara-Region auf dem afrikanischen Kontinent, dies entspricht etwa 68 % der dortigen Bevölkerung, leben heute noch ohne Strom und somit auch ohne der Möglichkeit an der „modernen Welt“ teilzunehmen. Der Energiebedarf Afrikas ist enorm und die Bereitstellung würde die benötigte Lebensperspektive für die Menschen, besonders in den ländlichen Regionen, schaffen. Zwischen 2000 und 2012 wuchs der gesamte Primärenergiebedarf in Afrika um 50 %, ist aber immer noch auf niedrigem Niveau. Die Energieversorgung von Entwicklungsländern ist ein wichtiger Beitrag zur Entwicklungshilfe der Menschen vor Ort. Die PowerBlox kann hierzu einen wichtigen Beitrag leisten [IASS].

Kenias Regierung strebt für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes bis 2020 an, das ganze Land mit Strom zu versorgen, da alleine dort bisher mehr als 46 Millionen Menschen ohne einen Anschluss an das öffentliche Stromnetz leben. Besonders in den entlegenen Gebieten existieren nur wenige, von klimaschädlichen Dieselgeneratoren betriebene, Inselnetze. Die wirtschaftlich sinnvollste Lösung zur Verringerung der Energiearmut ist ein dezentrales Off-Grid-System zur Energieversorgung, eine sogenannte Dorfstromanlage. Eine solche könnte durch ein elektrisches Inselsystem, bestehend aus einer einachsigen Photovoltaik-Nachführung und den PowerBlox, zur Versorgung einzelner Familien oder Kleingruppen, realisiert werden [BMZ].

Im Rahmen des Dokuments wird untersucht, ob die innovative Hardware (PowerBlox [Pow18]) hierzu einen Beitrag liefern kann, ob diese einen Mehrwert für die Bevölkerung vor Ort dazustellen, und an welchen Stellen für die nächste Entwicklungsstufe der Hardware Modifikationen sinnvoll sein können.

1.1 Systemübersicht

Zunächst wird das Gesamtsystem anhand des aktuellen Produktflyers [Pow18] dargestellt und die technischen Komponenten und der Aufbau des Systems entsprechend den Informationen aus dem Datenblatt und den Broschüren beschrieben:

Die PowerBlox 200 Serie der Schweizer Firma PowerBlox AG besteht aus autonomen, intelligenten Energiewürfeln mit integrierter Batterie. Diese fungiert als Energie-Schnittstelle, da sie mit jeder externen Energiequelle, wie z.B. Solar, Wind, Biomasse oder einem Dieselgenerator, oder jeglichem anderen Speichersystem kombiniert werden kann. Eine einzelne PowerBlox, welche in Abbildung 1-1 abgebildet ist, und ein Kantenmaß von etwa 40 cm besitzt kann genug Energie speichern, um einen kleinen Kühschrank, einige LEDs und das Ladegerät für ein Mobiltelefon zu versorgen. Die PowerBlox wurden speziell für eine Versorgung der Bevölkerung abseits des Stromnetzes, besonders auf dem afrikanischen Kontinent, entwickelt und kann auch als Backup zur Überbrückung von Stromausfällen bei

unzuverlässigen Netzen verwendet werden, da sie selbstständig schwarzstartfähig ein privates 230 V Wechselstromnetz, ein sogenanntes Mini-Grid, bilden kann.



Abbildung 1-1: Abbildung der PowerBlox von außen, mit Ladezustandsanzeige, Tragegriffen und integrierte Schuko-Steckdosen.

Wenn ein Minimum von zwei PowerBlox durch das integrierte Kabel verbunden werden, können proprietäre Algorithmen das System dank sogenannter Schwarmintelligenz anpassen und ein Schwarmnetz (engl. Swarm-Grid) schaffen, welches nachhaltigen und regulierten Strom für Schulen, Krankenhäuser, Katastrophenhilfe bis hin zu ganzen Dörfern liefern kann [REM]. Abbildung 2 zeigt, dass die Skalierbarkeit der PowerBlox im Schwarmnetz aufgrund der Architektur des Systems in Form von Schneeflocken nahezu unbegrenzt, wobei nur 10 Einheiten pro Zweig installiert werden können. Dadurch wird die Stromerzeugung, -speicherung und -verteilung mit einer vollständig dezentralisierten Architektur möglich, um sowohl fluktuierende Lasten als auch die Erzeugung zu regeln. Beim Ausfall einer beliebigen Komponente im Swarm-Grid funktioniert das verbleibende System ohne Probleme weiter. Darüber hinaus benötigen die Würfel keine komplexe Installation, spezielle Konfiguration oder besonderes Fachwissen, sind wartungsfrei und aufgrund des wenig Gewichts und der eingebauten Tragegriffe leicht und einfach zu transportieren. Diese Aspekte sind besonders in Hinsicht auf den Standort, für den sie konzipiert wurden, Tansania in Zentralafrika, von besonders hoher Relevanz.

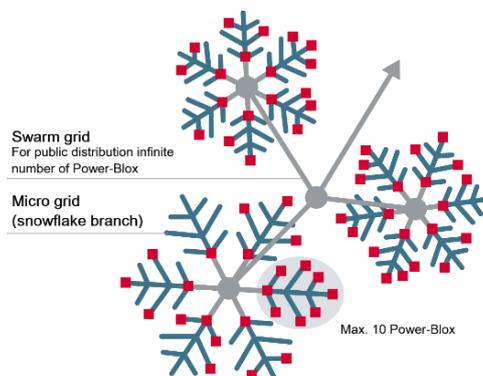


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung des Schwarmnetzes als Schneeflocken-Topologie.

Einleitung

Die PowerBlox ist, wie in der Abbildung 1-3 aufgezeigt, in der aktuellen 200 Serie in zwei Batterievarianten, Lithium (PBX-200 Li) und Blei (PBX-200 Pb), erhältlich. Im Folgenden wird hierbei lediglich auf die Blei-Version speziell näher eingegangen, da hiervon zwei Exemplare zur Untersuchung vorlagen.

Jede PowerBlox besteht aus diesen funktionalen Komponenten:

- Energiespeicher,
- Wechselrichter
- MPP-Laderegler

inklusive der entsprechenden Steuerung, Regelung und Kommunikationseinheiten. Diese sind auf der Platine, welche sich im oberen Teil der Box befindet und in Abbildung 1-3 dargestellt sind, verbaut und werden im Folgenden beschrieben.

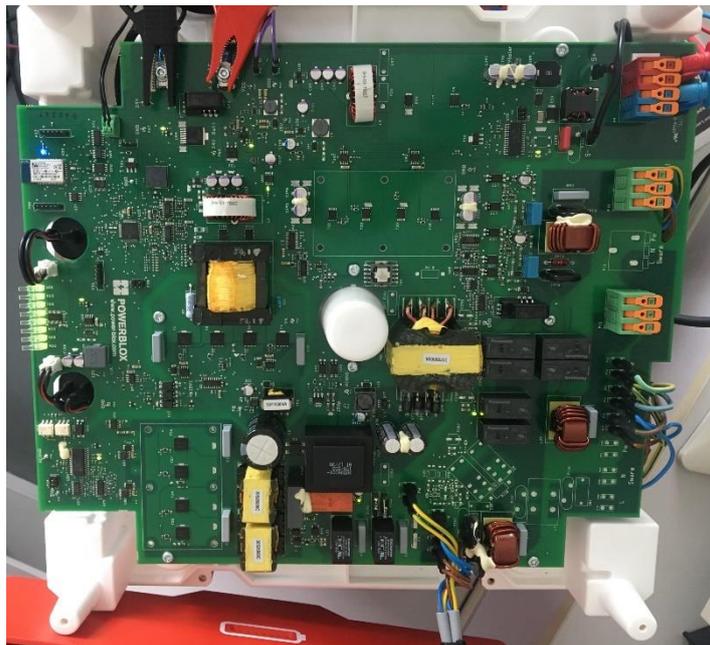


Abbildung 1-3: Platine PowerBlox.

PV-Anschluss: das anzuschließende PV-Modul soll eine Maximalleistung von 250W und einen DC-Eingangsspannungsbereich von 30-45V aufweisen, empfohlen ist eine Modulleistung von 200W. Der integrierte Verpolungsschutz sorgt für einen sicheren Umgang mit der Blox, falls am PV-Eingang versehentlich oder aus Unwissenheit + und - vertauscht werden (getestet :-)).

MPP-Laderegler: Laut Datenblatt (vgl. Abbildung 2-1) besitzt jede Blox einen MPP-Laderegler, welcher dem Schutz der Batterie dient und eine optimale Ladestrategie erlaubt. Der MPP-Laderegler ermöglicht den Betrieb des angeschlossenen PV-Panels im optimalen Betriebspunkt - (MPP-Maximum Power Point), somit steht zum Laden die maximal verfügbare Leistung aus dem PV-Generator zur Verfügung.

Energiespeicher: beim chemischen Energiespeicher der vorliegenden PBX-200 Pb handelt es sich um einen sogenannten verschlossenen Bleiakkumulator, bei welchem der Elektrolyt in einem Glasfaservlies (AGM) aufgesogen ist. Hierbei ist bei einem einwandfreien Zustand der Batterie keine Gasungsreaktion nach außen zu erwarten, da die Rekombination des Sauerstoffs und Wasserstoffs zu Wasser durch Diffusionspfade im Elektrolyten ermöglicht

wird und nicht nach außen dringt. Dadurch ist, auch bei erhöhten Umgebungsbedingungen, wie es z.B. in Tansania der Fall sein kann, kein händisches auffüllen von Wasser in den Elektrolyten nötig. Im Allgemeinen sollte die Umgebungsbedingung dennoch in einem Bereich von -10° bis 45° C liegen. Im Gerät ist keine aktive Kühlung vorgesehen, deshalb ist speziell auf die obere Grenze zu achten. Bei der Ladung des Akkus ist eine sogenannte IUoU-Charakteristisch vorteilhaft. Bei diesem Laderegime werden zunächst die Phasen des konstanten Stroms und anschließend einer konstanten Spannung durchlaufen, um durch umschalten abschließend eine Erhaltungsladung durchzuführen. Der Ladevorgang wird ebenfalls stets über den eingebauten Temperatursensor überwacht und dadurch bei einer Überhitzung des Systems unterbrochen. Dem Datenblatt zufolge besteht eine Zyklusfestigkeit bis 2500 Zyklen und einer somit erwarteten Lebenszeit des Akkus von etwa 3 - 5 Jahren.

Der integrierte Wechselrichter ermöglicht, laut Datenblattangaben, eine angeschlossene Dauerleistung (bei 25° C) des Verbrauchers von 200W, incl. Überlastfähigkeit für kürzere Zeitabschnitte, beispielsweise 230W für 5 Sekunden, 370W für 3 Sekunden.

1.2 GUI/Nutzerinterface

Das System ist nach dem Prinzip Plug & Power konzipiert und bedarf deshalb keine Konfiguration, spezielles Knowhow oder Wartung. Abbildung 1-4.1 die Ladezustandsanzeige der Blox. Diese funktioniert über acht LED, welche gut sichtbar auf der Blox positioniert sind und dadurch auch mit geringen technischen Nutzerverständnis einen guten Aufschluss über den Ladezustand ermöglichen. Es kann durch erlöschen und Farbveränderung (von grün zu orange und rot) der einzelnen LEDs nicht nur eine Verringerung der gespeicherten Energie dargestellt werden, sondern auch eine aktuell durchgeführte Synchronisation mit dem Nachbargerät (orangenes Lauflicht) oder Fehler (schnelles, rotes blinken) im Betrieb (vgl. Abbildung 1-4.2).



Abbildung 1-4.1: Ladezustandsanzeige der PowerBlox (hier 100% vollgeladener Zustand).

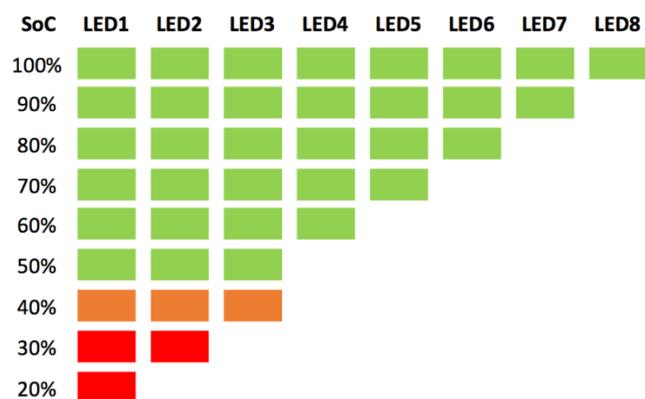


Abbildung 1-4.2: Schema der Anzeige des Ladezustands durch die farbigen LEDs.

Konnektivität: Jeder Würfel bietet folgende, integrierte Schnittstellen zum Anschluss beliebiger Verbraucher für den Anwender (vgl. Abbildung 1-5):

- zwei DC USB Buchsen (5V, 2A)
- eine Zigarettenanzünder-Buchse (12V DC, 3A)
- zwei 230 V AC Schuko-Steckdosen

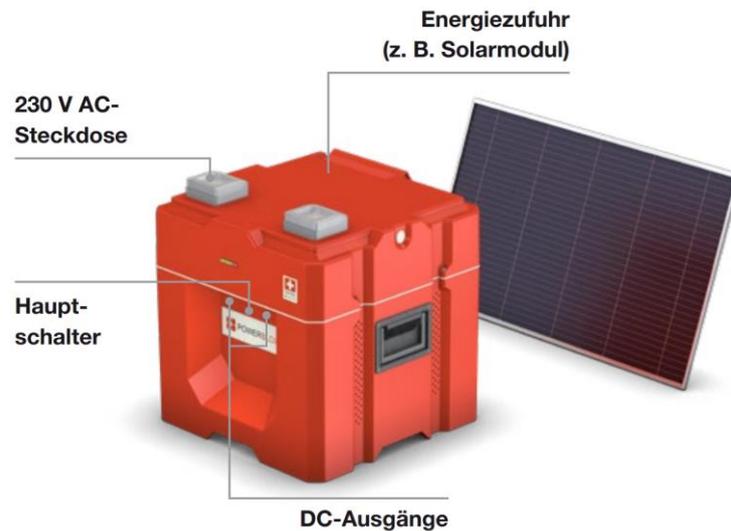


Abbildung 1-5: Position der integrierten Schnittstellen und Schalter.

1.3 Anschlussvarianten / Lieferumfang / Unboxing

Der Lieferumfang beinhaltet eine Erzeugungseinheit mit einem Kabel zur Verbindung der Blox mit dem öffentlichen Netz über eine Kaltgeräte-Buchse mit dem Ziel der Ladung des Akkus aus dem Netz. An jeder PowerBlox ist ein Kabel samt blauem Stecker zur Kopplung mit einer weiteren Blox integriert. Ebenso wird eine einseitige Kurzanleitung für die Inbetriebnahme der Blox mitgeliefert (vgl. Abbildung 1-6 und Abbildung 1-7).



Abbildung 1-6: Lieferumfang der PowerBlox (Ansicht von oben im Karton).



Abbildung 1-7: Links: Kurzanleitung zur Erstinbetriebnahme der Blox und Kabel zur Verbindung mit dem öffentlichen Stromnetz, Rechts: integriertes, blaues Schwarmkabel und beschriftete Anschlussbuchsen an der Blox.

1.4 Kommunikation:

Auf der PowerBlox befindet sich eine Kommunikationsantenne (NFC – Near Field Communication), z.B. für Abrechnungszwecke, diese wurde im Rahmen dieses Dokuments nicht weiter untersucht.

2 Spezifikation

Nachdem im Kapitel 1 eine erste Übersicht über die PowerBlox und deren Komponenten gegeben wurde, wird nun anhand der gegebenen Spezifikationen der Einsatzbereich der PowerBlox im Detail untersucht.

In Abbildung 2-1 sind die wesentlichen Datenblattangaben zu zwei PowerBlox Typen gelistet:

Inverter	PBX-200 Pb	PBX-200 Li
Rated grid voltage	230 V	
Rated frequency	50 Hz	
Phases	1 Phase	
Harmonic distortion	<4%	
Continuous power at 25°	200 W	
Power for 5 sec. at 25°	230 W	
Power for 3 sec. at 25°	370 W	
Maximum load	Up to short-circuit	
Cos φ	0.1 bis 1	
Grid / generator input		
Input voltage	230 V ±15%	
Frequency range	47 - 64 Hz	
Grid charger current	5 A	
Charging characteristics	IUoU ¹	Li BMS ¹
Resettable fuse	10 A	
Transfer connectors		
Transfer voltage	230 V ±15%	
Frequency range	47 - 64 Hz	
Resettable fuse	10 A	
Solar input		
Solar charger type	MPP ²	
Input voltage range	30 - 45 V	
PV current	8 A	
Maximum PV power	250 W	
Recommended PV power	200 W	

Abbildung 2-1: Datenblatt-Auszug – PowerBlox

Das Gesamtgewicht der PowerBlox ohne Energiespeicher liegt bei etwa 10 kg, die Kantenlänge der PowerBlox beträgt etwa 40 cm.

Das Gerät wurde vom Hersteller mit Schutzklasse IP 20 eingestuft, Berührungsschutz für Objekte mit Durchmesser >12.5mm, kein Schutz gegen Wasser, der Anwendungsbereich ist damit stark eingeschränkt, die Schutzart passt nicht zu Anwendungen, die auf der Webseite dargestellt sind.

2.1 PV-Anschluss

Der PV-Eingangsspannungsbereich der PowerBlox ist laut Abbildung 2-1 auf eine maximale DC-Spannung von 45V begrenzt, der MPP-Spannungsbereich ist zwischen 30V und 45V angegeben. Der maximale Eingangsstrom ist 8A.

Aus diesen Datenblattangaben werden nun für die PowerBlox geeignete PV-Module abgeleitet. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der PV-Zellen werden in Tabelle 1 die Leerlauf- und MPP-Spannungen bei STC-Einstrahlung, aber unterschiedlichen Temperaturen

(T_Cell) für reale/typische PV-Module mit 36 – 72 Zellen gelistet. 2*36 Zellen werden für mobile Anwendungen vorgeschlagen, die beiden Module über einen Klappmechanismus verbunden.

Tabelle 1: Typische Leerlauf U_{oc} und MPP-Spannung aktueller PV-Module unterschiedlicher Zellen

T_cell [°C]	U_{oc} [V]					U_{MPP} [V]				
	-20	-10	0	10	20	50	60	70	80	90
36 Zellen	26.4	25.6	24.9	24.1	23.4	17.2	16.6	16.0	15.4	14.8
2*36Zellen	51.1	49.7	48.4	47.0	45.7	34.2	33.1	32.0	30.9	29.8
54 Zellen	39.4	38.4	37.3	36.2	35.2	26.0	25.1	24.3	23.4	22.5
60 Zellen	43.9	42.7	41.5	40.4	39.2	28.9	28.0	27.0	26.0	25.1
72 Zellen	52.4	50.9	49.5	48.0	46.5	34.4	33.2	32.0	30.8	29.6

Die farbliche Kennzeichen in Tabelle 1 bewertet die zu erwartenden Spannungen für die in der Spezifikation vorgegebenen Spannungsbereich: schwarz: im Spannungs-Betriebsbereich, gelb: unterhalb des Betriebsbereichs (kein optimales Tracking möglich, kein Laden der Batterie möglich). rot: oberhalb des Eingangsspannungsbereichs – Gefahr für Tiefsetzsteller

Aus Tabelle 1, bzw. der Bewertung ist ersichtlich, dass der aktuelle Eingangsspannungsbereich der PowerBlox für **keine** Zellengröße passend ist! Am besten passen noch 60 Zellen-Module, dort ist ein Leistungsverlust aufgrund von eingeschränktem MPP-Bereich zu erwarten. Sowohl 3x36 Zellen, welche z.B. für eine Ost-West-Aufständigung, sowie für mobile Anwendungen interessant sind, wie auch 72 Zellen Module sind nicht nutzbar.

Zusammen mit dem maximalen Eingangsstrom von 8A sind aktuell nur 60 Zellen-Module mit einer MPP-Leistung von max. $P_{MPP} = 31.5V \cdot 8A \sim 250W$ möglich, welche 09/2018 nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen, aktuelle Module besitzen einen $P_{MPP} \sim 275W$, sodass die passenden Module nicht längerfristig auf dem Markt verfügbar sein werden. Auch ist das Risiko der Zerstörung für diesen, sehr eingeschränkten DC-Eingangsbereich eine große Gefahr für den nachhaltigen Betrieb der PowerBlox, hier sollte sowohl der Eingangsspannungsbereich wie auch der Eingangsstrombereich signifikant angehoben werden, beispielsweise bis 60V, um auch 72 Zellen Module zu nutzen. Alternativ ist eine aktive Begrenzung der Eingangsspannung auf 45V.

Die minimale Eingangsspannung des MPP-Trackers ist aufgrund der Beschränkung auf einen Tiefsetzsteller durch die Batteriesystemspannung limitiert, abhängig vom Ladezustand und Batterietyp. Ein Hoch-Tiefsetzsteller könnte bei leicht erhöhter Komplexität der Schaltung den Eingangsspannungsbereich auch für Module mit geringerer Zellenanzahl anpassen.

2.2 Batterieanschluss

Es können unterschiedliche Batteriesysteme bestellt werden: Drei Konfigurationen werden angeboten:

- PBX-200 Pb, PowerBlox mit 2x58Ah / 12V Bleibatterien
- PBX-200 Li, PowerBlox mit 2x50Ah / 12V LiFePo4 Batterien
- PBX-200 Demo, PowerBlox mit 2x15Ah / 12V Bleibatterien (=DUT)

2.2.1 Li-Ion- Batterie

Die Li-Ion-Version wird mit 2x50Ah Li-Ion-Systemen ausgeliefert. Zum Einsatz kommt ein LiFePo4 Speicher. Es ergibt sich eine maximal nutzbarer Kapazität der $E_{N,LiIon}$ von

$$E_{N,LiIon} = 24V \cdot 50Ah \sim 1200 Wh$$

Bei einer angenommenen Entladetiefe von 90% ergibt sich hieraus eine nutzbare Kapazität von etwa 1000 Wh.

Die möglichen Ladezyklen sind mit 5000 Zyklen angegeben, was einen Energieumsatz von 5000 kWh entspricht, etwa der dreifachen Energiemenge des Bleisystems (Absatz 2.2.2).

Für das Laden kommen die Ladeverfahren CC/CV in Frage, diese entsprechen dem Ladeverfahren der Bleibatterie (zunächst konstant Strom (CC), dann konstante Spannung (CV)). Die Grenzwerte variieren zu denen der Blei-Batterie, weshalb von einem einfachen Tausch der Batterietechnologie abgeraten werden muss, solange keine genaueren Details zur Konfiguration bzw. Pairing der PowerBlox mit dem Batteriesystem bekannt sind. Die Serienschaltung von Li-Ion-12V Batteriesystemen ist nicht von allen Herstellern empfohlen, besser ist eine Serienschaltung individueller Zellen, mit entsprechend konfigurierten BMS (Batteriemanagementsystem) auf Zellenebene.

Das Gewicht eines vergleichbaren Speichers liegt bei ca. 5kg, somit ergeben sich für das reine Batteriesystem ein Gesamtgewicht von etwa 10 kg, nur 25% des Gewichts des Blei-Batteriesystems.

2.2.2 Blei- Batterie

Im Datenblatt ist bei der Blei-Batterie-Version der Typ Hoppecke –V sun power VR M 12V 58 mit zwei Batterien in Serie verschalten. Das Batteriedatenblatt gibt für diesen Batterietyp abhängig vom Lade/Entladestrom eine Nennkapazität 56 Ah an.

Die maximal verfügbare Kapazität des Batteriesystems $E_{N,Blei}$ beträgt somit

$$E_{N,Blei} = 24V \cdot 56Ah \sim 1344 Wh$$

Abhängig von der Entladetiefe ergeben sich typische Nennzyklenzahlen:

2500 Zyklen bei 50% Entladetiefe und 20°C

1200 Zyklen bei 80% Entladetiefe und 20°C.

Die kalendarische Lebensdauer ist mit 15 Jahren angegeben, bei 20°C. Die Temperatur hat großen Einfluss auf die Lebensdauer des Batteriesystems, die Korrosion hängt stark von den Betriebsbedingungen ab. Eine Erhöhung um 10K halbiert die Lebensdauer der Batterie [Hop18]. Auch die maximale Zyklenzahl ist abhängig von der Temperatur, 10K höhere

Temperatur reduziert die Nennzyklenzahl um etwa 25%. Die PowerBlox sollte deshalb nicht der direkten Sonnen ausgesetzt werden, um eine möglichst hohe Lebensdauer zu erreichen. Eine gute Systemauslegung führt zu einer gleichmäßigen kalendarischen und zyklischen Alterung, somit ergeben sich bei 50% Zyklen (~650 Wh, ~3h Nennleistung/a) ~166 Nutztage im Jahr (2500 Zyklen, 15 Jahre). Der Energieumsatz des Batteriesystems für diese Annahme ergibt während der Lebensdauer 1680 kWh.

Eine größere Zyklisierung von 75% Zyklen (~1000 Wh, ~5h Nennleistung/a) resultiert in max. ~80 Nutztagen im Jahr (1200 Zyklen, 15 Jahre). Der Energieumsatz des Batteriesystems für diese Annahme ergibt während der Lebensdauer 1290 kWh.

Im Datenblatt sind eine erwartete Lebensdauer von 3-5 Jahren angegeben, bei einer Zyklenzahl von 2500 Zyklen ergibt dies 500 – 800 Zyklen im Jahr. Vermutlich wird mit einer wesentlich höheren Betriebstemperatur gerechnet, ein verbessertes Kühlkonzept (Konvektion) würde zu einer erhöhten Lebensdauer des Gesamtsystems beitragen.

Geeignete Ladeverfahren wenden ein IU-Verfahren an, zunächst Laden mit konstantem Strom bis zur Erreichung der Ladeschlussspannung, dann Laden mit konstanter Spannung, z.B. mit 2.35V-2.4V je Zelle, was einer Ladeschlussspannung von 28.8V (bei 2x6 Zellen in Serie) entspricht.

Das verbesserte Ladeverfahren IU1a lädt die Zellen bis zu einer maximalen Spannung von 2.65V, was zu einer Systemspannung von 31.8V führt. Je nach verwendetem Zellentyp und Zellentemperatur des PV-Moduls ergibt sich eine nicht optimale Nutzung des Generators bei hohem Ladezustand (vgl. Tabelle 1).

Das Gewicht einer Einzelbatterie beträgt jeweils 19 kg, somit ergibt sich ein Gesamtgewicht des reinen Batteriesystems von 38 kg, im Vergleich zu 10 kg für das Li-Ionen-System.

Das getestete (Demo) System ist mit 2x 15Ah / 12V Bleibatterien ausgestattet, mit einer Nennkapazität von 180 Wh (bei 50% nutzbarer Kapazität). Das Gewicht der Einzelbatterie liegt bei ~4kg, somit wiegt das Batteriesystem etwa 8kg (Gesamtgewicht).

Das Li-Ion-System lässt einen dreifachen Energieumsatz während der Lebensdauer erwarten, bei 25% des Gewichts für das Batteriesystem.

Vorteil des Blei-Batteriesystems sind die Beschaffung und Recycling der Batteriesysteme. Aufgrund der schnell fortschreitenden Entwicklung im Bereich der Li-Ion-Batterien werden die Performance-Vorteile dominanter, der Anteil der Blei-Batterielösungen auch für diese Anwendung wird vermutlich stark schwinden.

2.3 Netzanschluss:

Die PowerBlox besitzt mehrere Möglichkeiten der AC-Kopplung, diese werden hier kurz aufgeführt, und Anforderungen daraus überprüft.

2.3.1 Schuko-Steckdosen

Für den Anschluss von steckbaren Verbrauchern sind die beiden Schutzkontakt-Steckdosen für Stecker des Typs CEE 7/4 vorgesehen. Die Abdeckungen lassen eine Schutzklasse ähnlich Feuchtraum-Steckdosen erwarten, z.B. IP 54. Eine Absicherung der Steckdosen gegen Überlast ist nicht vorhanden, diese scheint aufgrund der Steuerungsmöglichkeiten des vorgelagerten Wechselrichters, im Speziellen die Leistungsbegrenzung nicht notwendig.

2.3.2 Netzkopplung/Generatorbetrieb

Die PowerBlox wird mit der Möglichkeit der Kopplung mit dem Verbundnetz, sowie Generatorbetrieb beworben. Diese Funktionalität wurde zum aktuellen Stand nicht getestet. Die Begrenzung der Anzahl parallele verbundener PowerBlox (en) obliegt dem Nutzer, dies wird abhängig vom Nutzerkreis als schwierig angesehen, da im Gesamtsystem keine Absicherung gegen Überlast vorgesehen ist (thermische Überlastung von Kabel usw.)

2.3.3 PowerBlox – Kopplung

Die Funktionalität Schwarmnetz ist auf der Platine (Abbildung 1-3) noch nicht bestückt. Diese Schnittstelle ist vermutlich für einen gesteuerten Leistungsbeitrag jeder PowerBlox zum übergeordneten Inselnetz vorgesehen.

Somit bleibt für die Kopplung mehrere Boxen eine reine Parallelschaltung auf der AC-Seite zur Erhöhung der Systemkapazität und Systemleistung. Auch kann, wie in Kapitel 4 aufgezeigt die Batterie einer PowerBlox durch ein zweites System geladen werden.

2.3.4 Blindleistungsstellbereich

Aufgrund der Anforderung des Inselbetriebs muss die PowerBlox auch in der Lage sein, Blindleistungsbedarf der angeschlossenen Verbraucher zu decken.

Die PowerBlox kann laut Datenblatt (Abbildung 2-1) eine Dauerleistung von 200W zur Verfügung stellen. Hieraus ergibt sich ein Dauer-Nennstrom der PowerBlox von

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = 0.87A$$

Dieser Strom kann dauerhaft dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden, sowohl als Wirk- als auch als Blindstrom, es gilt:

$$I_N = |I_w + jI_{bl}|$$

Aus diesem Zusammenhang lässt sich der Wirk- und Blindleistungsstellbereich der PowerBlox darstellen (Abbildung 2-2), mit der Einschränkung, dass der Leistungsfaktorbereich $0.1 \leq \cos\varphi_{cap/ind} \leq 1$ zulässig ist.

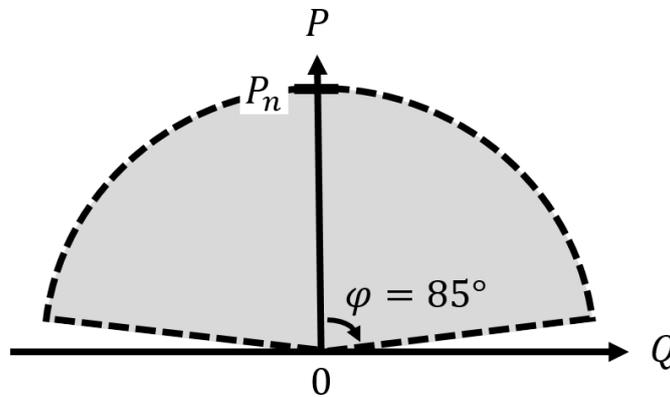


Abbildung 2-2: Wirk- und Blindleistungsstellbereich der PowerBlox

Dieser Stellbereich scheint für die Anwendung im Inselssystem gut geeignet, soweit keine reine Blindleistungs-Verbraucher (z.B. Trafo im Leerlauf) angeschlossen werden. Für diese Fälle müsste der Blindleistungsstellbereich auf $\cos\varphi_{cap/ind} \leq 0$ erweitert werden, um erhöhte Ausgangsspannungen wie in Kapitel 7 erwähnt zu vermeiden.

3 PowerBlox – Funktionsweise

Bei der PowerBlox handelt es sich um ein System mit mind. 3 Umwandlungsstufen:

- 1.) PV-Generator zu Batterie – Tiefsetzsteller mit MPP-Tracker-Funktionalität - Kapitel 3.1
- 2.) Hochsetzsteller Batterie – HV-DC-Link (400V) – Kapitel 3.2
- 3.) Netzwechselrichter mit Filter usw. – Kapitel 3.3

Zusätzlich gibt es einen Ladeanschluss, sowie einen PowerBlox-Kopplungsanschluss. Auf diese Verbindungen wird in diesem Dokument nicht eingegangen.

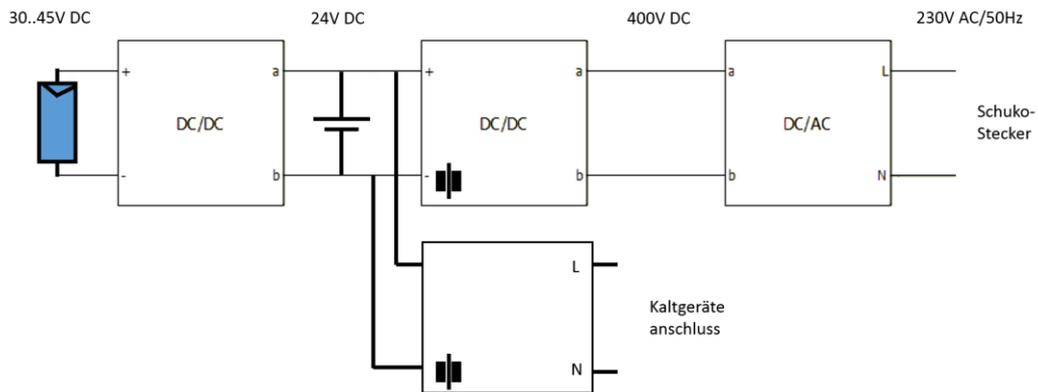


Abbildung 3-1: Schaltungsübersicht PowerBlox

3.1 MPP-Laderegler

In der PowerBlox ist ein MPP-Laderegler auf Basis eines Tiefsetzstellers verbaut. Der Eingangsspannungsbereich muss immer größer der Batteriespannung sein, was bei typischen max. Batteriespannung zwischen 2.4V-2.5V und 12 Zellen für ein Batteriesystem eine minimale Eingangsspannung von $U_{in,min} \sim 28.8V \dots 30.0V$ bei maximalem Batterieladestand bedeutet. In diesem Fall (SoC-max erreicht) ist kein optimaler Betrieb des PV-Generators mehr möglich, eine Erweiterung des MPP-Spannungsbereichs auf einen Bereich von 20V..45V scheint sinnvoll.

Die maximal zulässige DC-Eingangsspannung hängt ab vom Blockiervermögen des aktiven Schalters, sowie transienten Überspannungen durch parasitäre Induktivitäten in der Schaltung.

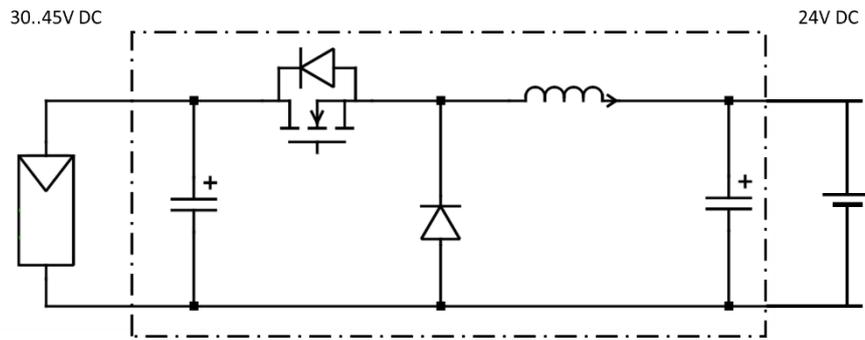


Abbildung 3-2: Tiefsetzsteller zwischen PV-Modul und 24V Batterie

Ein Wechsel in die nächst höhere Schalter-Klasse (z.B. Spannungsklasse 55V auf 80V) würde die Flexibilität der PowerBlox hinsichtlich Modulauswahl signifikant verbessern, vermutlich auf Kosten der MPP-Laderegler-Effizienz (siehe auch Kapitel 2.1).

3.2 Hochsetzsteller mit galvanischer Trennung

Für das Hochsetzen der Spannung des Energiespeichers (Nennspannung 24V) auf die notwendige DC-Spannung des netzseitigen Wechselrichters bietet sich ein sog. HF-Transformator an, die Hochfrequenz wird mittels einer Vollbrücke auf der Niederspannungsseite erzeugt, mittels kompakten Trafo galvanisch getrennt auf ein höheres Spannungsniveau übersetzt, und mittels Gleichrichterstufe gleichgerichtet (mögliche Umsetzung siehe Abbildung 3-3).

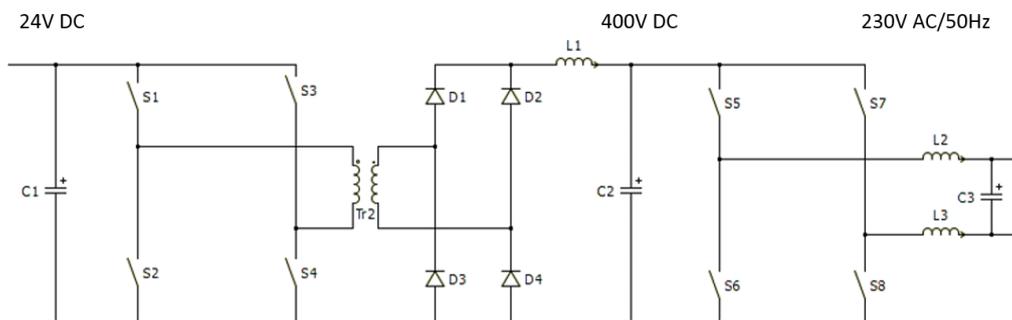


Abbildung 3-3: Single-Active-Bridge als Hochsetzsteller mit galvanischer Trennung.

Eine weitere Aufgabe des Hochsetzstellers ist die Begrenzung der Wirkleistungsübertragung von der 24V in die 400V Ebene, welches für die meisten Anwendungs-, bzw. (Über)Lastfälle ein Schutz für den Wechselrichter auf der Netzseite darstellt. Die Leistung und somit der Strom, der von der Netzseite an den Verbraucher geliefert wird, ist durch den Hochsetzsteller limitiert. Eine Überlastung auf der Netzseite führt zu einem Einbruch der DC-Spannung auf der 400V Ebene, siehe z.B. Abbildung 4-6. Eine bidirektionale Version (aktive Halbleiter auf der

400V Seite) würde die Funktionalität sinnvoll ergänzen, und die Ladung der Batterie über die AC-Seite signifikant erleichtern.

3.3 Netzwechselrichter

Beim Netzwechselrichter handelt es sich wie bereits in Abbildung 3-3 angedeutet um einen 2-stufigen Vollbrücken-Wechselrichter. Bei diesem kommen 4 CoolMOS Power Transistoren mit einer Blockierspannung von 650V, und einem Nenndauerstrom von 5.7A bei 100°C Junction-Temperatur zum Einsatz. Diese werden durch die in der Schaltung fehlenden Kühlkörper und Luftströme bei signifikant geringerem Nennstrom von (wie in Kapitel 2.3.4 berechnet) 0.87A betrieben, kurzfristig sind bis zu 1.6A zulässig.

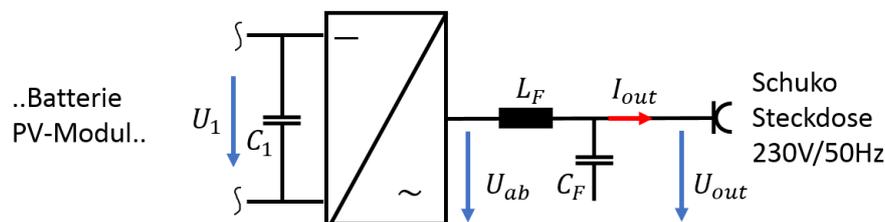


Abbildung 3-4: Schaltungsillustration – Netzwechselrichter

Die Ausgangsspannung U_{ab} ist in Abbildung 3-5 aufgezeigt. Es wird eine Unipolarmodulation verwendet,

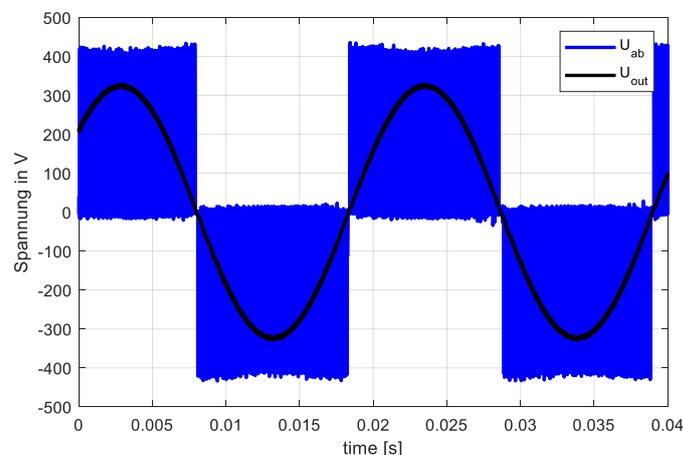


Abbildung 3-5: 3-stufige Ausgangsspannung des Vollbrücken-Wechselrichters

Die Schaltfrequenz beträgt etwa $F_s = 27.5 \text{ kHz}$, aufgrund der Schaltmuster bedeutet dies für jeden der vier Schalter eine effektive Schaltfrequenz von $F_{s,s} = 13.75 \text{ kHz}$.

Im Nennbetrieb wird ein Modulationsgrad von etwa 0.8 angewandt, somit sind noch 20% Stellmöglichkeit der Ausgangsspannung für transiente Anforderungen möglich, ohne den linearen Bereich zu verlassen.

4 PowerBlox - Betrieb

Um eine vergleichbare, einheitliche und bewertbare Messung der PowerBlox zu erhalten, wurde im Folgenden der im März 2017 erschienene Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme für eine Bewertung der Effizienz der PowerBlox angewandt. Dieser ist ein Prüfleitfaden zur Charakterisierung der Wirkungsgrade, des Standby-Verbrauchs und der Regelungseffizienz von stationären Batteriespeichersystemen. Der Leitfaden betrachtet dabei drei Systeme der gängigsten Topologien und Batteriezellchemie.

In dieser Arbeit soll, aufgrund der vorliegenden Systemstruktur, lediglich das DC-gekoppelte System betrachtet werden. Abbildung 4-1 zeigt die Energiewandlungspfade in der genannten DC-gekoppelten Systemtopologie, wobei diese durch die entsprechenden Leistungsflüsse zwischen den jeweiligen Quellen (PV-Generator, Batterie oder Netz) und der zugehörigen Senke (Batterie, Last oder Netz) definiert sind. Folgende Auflistung zeigt alle sich somit ergebenden Wandlungspfade in der DC-gekoppelten Systemtopologie [BVES].

PV2AC	PV-Netzeinspeisung oder Direktnutzung
AC2BAT oder PV2BAT	AC-PV-Batterieladung
BAT	Batteriespeicherung
BAT2AC	AC-Batterieentladung

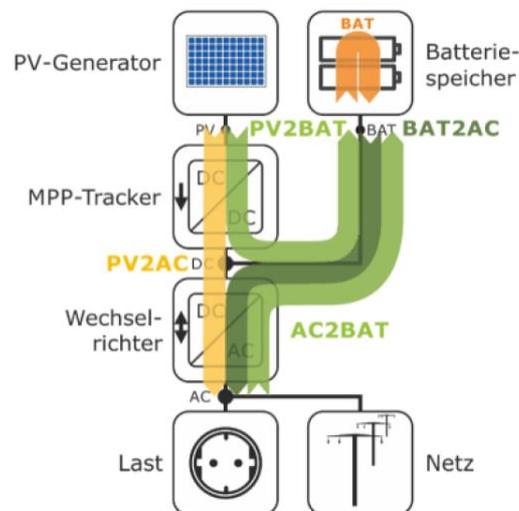


Abbildung 4-1: Energiewandlungspfade von DC-gekoppelten Systemtopologie in PV-Speichersystemen, gemäß BVES.

Die Systemkomponenten und entsprechenden Messpunkte eines DC-gekoppelten Systems sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Hierbei ist das Batteriespeichersystem an den DC-Zwischenkreis des Wechselrichters angebunden und das Leistungsumwandlungssystem besteht aus einer Einheit. Entsprechend den Wandlungspfaden aus Abbildung 4-1, welche gemäß entsprechend der Abbildung aus dem Effizienzleitfaden angepasst wurden, wird die erzeugte PV-Energie in die Batterie (bzw. Akku) geladen (PV2BAT) oder zur Lastabdeckung bzw. Netzeinspeisung verwendet (PV2AC). Über den Pfad BAT2AC wird die Batterie zur Lastdeckung über den Wechselrichter entladen. Obwohl der Wechselrichter unidirektional

ausgeführt ist, ist durch einen Bypass auch der Pfad AC2BAT möglich. In der folgenden Tabelle sind alle erforderlichen Messpunkte mit den entsprechenden Messgrößen aufgelistet.

MESSPUNKTE	MESSGRÖSSEN	MESSBEREICH
PVS	PV-Simulator	I_{DC} 0 – 10 A DC
		U_{DC} 0 – 50 V DC
LAST	Emulierte Haushaltslast	P_{AC} 0 – 230 W
BAT	Anschlussklemmen Akku	I_{BAT} 0 – 20 A DC
		U_{BAT} 0 – 30 V DC
AC	Ausgangsleistung < 1kHz	I_{AC} 0 – 10 A RMS
		U_{AC} 0 – 250 V RMS

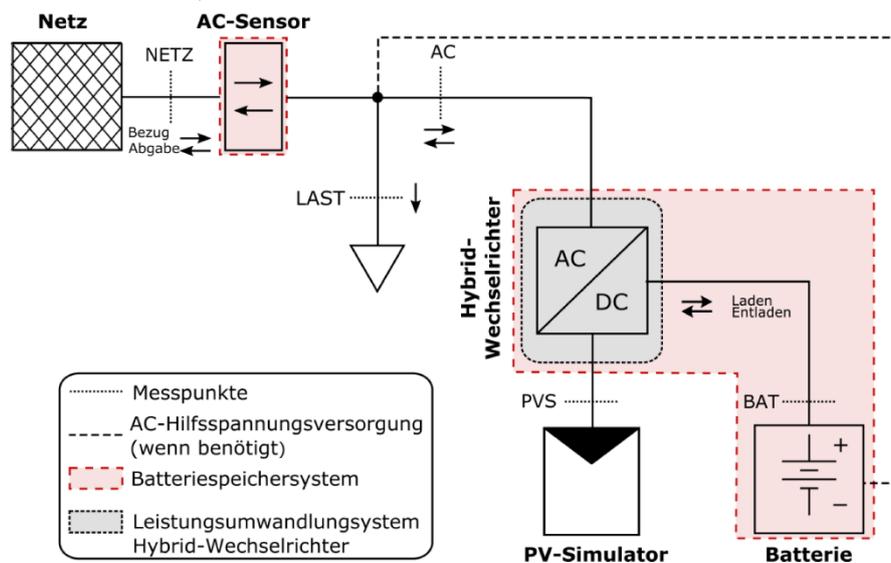


Abbildung 4-2: Darstellung der Systemkomponenten und der Messpunkte bei DC-gekoppelten Systemen.

Die Überprüfung der Leistungsvorgaben einzelner Betriebspunkte erfolgt lediglich durch Vorgabe der Leistung am PV-Generator (PV-Simulator) und an der elektrischen Last. Die Batterie wird zur Deckung der Last entladen und durch überschüssige PV-Energie geladen. Das Energiemanagementsystem des Speichersystems regelt auf Basis der gemessenen Netzaustauschleistung die Batterieleistung. Bei der Messung des Wirkungsgrades können unerwünschte Leistungsflüsse auftreten, welche speziell bei DC-gekoppelten Systemen wegen fehlenden Messpunkten im DC-Zwischenkreis nicht einem Pfad eindeutig zugeordnet werden können. Dies kann zum einen bei der Vermessung der Batterieladung- bzw. Batterieentladung (PV2AC) und zum anderen bei der Vermessung der AC-Einspeisung bzw. des AC-Bezugs (PV2BAT) auftreten.

Im Folgenden werden die einzelnen Teilprüfungen des Gesamtsystems zur Bestimmung des Wirkungsgrads bzw. der auftretenden Verluste des Leistungsumwandlungssystems (Batterie-Wechselrichter) detailliert beschrieben. Bei dem hier betrachteten vollintegrierten System sind hierbei, aufgrund der definierten Messpunkte, der Energieverbrauch des Energiemanagementsystems, der Kommunikationsschnittstellen sowie gegebenenfalls des verwendeten AC-Stromsensors in den Verlusten des Leistungsumwandlungssystems enthalten. Bei Verwendung einer Last P_{LAST} ist hierfür ein sogenannter Schiebewiderstand zur

stufenweisen Einstellung des vorzugebenden Wertes eingesetzt. (reine Wirkleistungsmessung)

Alle im Folgenden verwendeten Messgeräte sind anschließend aufgelistet. Der Aufbau ist analog zu Abbildung 4-2 und je nach Messpunkt entsprechend zu realisieren.

- ScopeRecorder: Yokogawa DL750 ScopeCoder
- 2x Schiebewiderstände als ohmsche Last mit einem Stellbereich von etwa 5 k Ω bis 200 Ω und 200 Ω bis 10 Ω (Sicherung: F200L250V, Nennstrom: 0.2 A) ->10W-265W und 265W – 5300W (bei U=Unenn)
- 2x aktive Differential-Tastköpfe (AC-Spannung): Pico Ta041, Testec TT-SI9001
- 2x Stromzangen für DC-Strom: Gossen Metrawatt CP30
- 3x digitale Multimeter: Gossen Metrawatt Metrahit Energy, Metrahit 26S, Metrahit Outdoor
- PV-Simulator PVS: Spitzenberger Spies
- diverse Kabel und entsprechende Stecker

Da eine statische Aufzeichnung (fast) aller Arbeitspunkte bei einem möglichst eingeschwungenen Zustand durchgeführt wurde, ist ein gewisser zeitlicher Versatz beim Ablesen der Messwerte und eine sich daraus ergebende Ungenauigkeit bei der Bewertung der folgenden Messwerte zu berücksichtigen.

4.1 Regulärer Betrieb

Der Leistungsfluss **PV2AC** tritt bei Direktnutzung oder Netzeinspeisung der PV-Erzeugung auf. Durch das Tracking des MPP sollte das System möglichst die maximal vom PV-Generator bereitgestellte Leistung beziehen. Dabei können sowohl MPP-Anpassungs- als auch Umwandlungsverluste auftreten.

Die Prüfung erfolgt durch Vorgabe der entsprechenden PV-Erzeugungsleistung und der Spannung am PV-Generator (Simulator) bei einem mittleren Ladezustand SOC_{avg} Batterie, an welcher idealerweise während der Prüfung keine Batterieladung bzw. -entladung auftritt. Die Kennlinie wird hierzu auf die maximale Leistung und nicht auf die Einstrahlung normiert, sodass die Eingangsspannungen jeweils möglichst konstant sind. Hierfür wurden im Messaufbau mittels PV-Simulator verschiedene Modultypen in ähnlichen Leistungsklassen, ausgewählt und vermessen. Jedes Modul wurde separat über den PV-Generator angeschlossen und die entsprechende Last durch einen ohmschen Widerstand simuliert, um den Wirkungsgrad der gesamten Umwandlungsstufen von der PV-Eingangleistung zur daraus resultierenden Ausgangsleistung zu bestimmen. Umwandlungswirkungsgrade > 92% konnten hierbei für eine Belastung zwischen 160W und 200W ermittelt werden, sinkende Effizienz bei steigender Belastung.

Der Wirkungsgrad des Systems bei der Entladung ist sowohl von der Entladeleistung der Batterie P_{BAT} sowie von der Batteriespannung U_{BAT} abhängig, welche wiederum, vom Ladezustand SOC, dem Batteriestrom I_{BAT} und der Batteriekonfiguration beeinflusst ist.

Hierbei wird keine PV-Erzeugung $P_{PVS, MPP}$ angeschlossen. Es werden zwei identische Messungen mit verschiedenen Ladezuständen (SOC_{max} und SOC_{avg}) der Batterie durchgeführt.

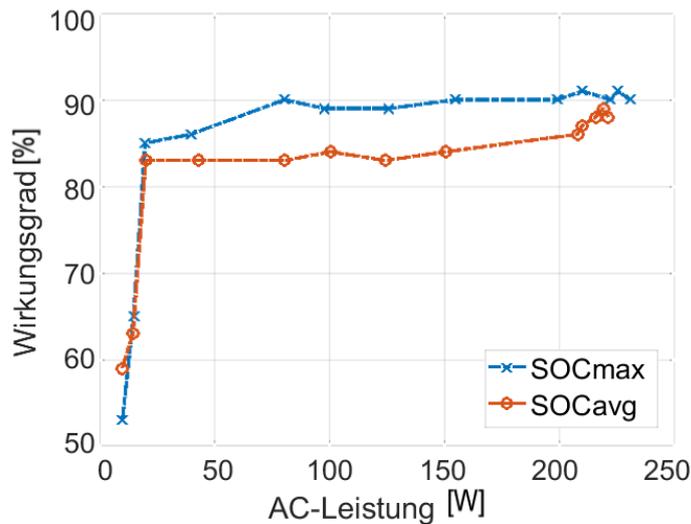


Abbildung 4-3: Wirkungsgrad der Batterieentladung bei vollem (SOC_{max}) und mittlerem (SOC_{avg}) Ladezustand der PowerBlox.

Abbildung 4-3 zeigt die beiden Wirkungsgradkennlinien der Batterieentladung. Hierbei ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad der vollen Batterie (blau) besonders im mittleren Leistungsbereich höhere Werte annimmt. Somit ist eine bessere Umwandlung in diesem Pfad mit einer vollen Batterie zu erreichen, da bei gleicher Leistung aufgrund des Batteriezustandes eine geringere Spannung vorliegt, wird ein höherer Strom benötigt, welcher quadratisch höhere Verluste verursacht und somit den Wirkungsgrad reduziert. Auffällig ist, dass bei höherer Belastung der PowerBlox, entsprechend der Abbildung 4-4 die Ausgangsspannung mit steigender Verbraucher-Leistung linear abnimmt.

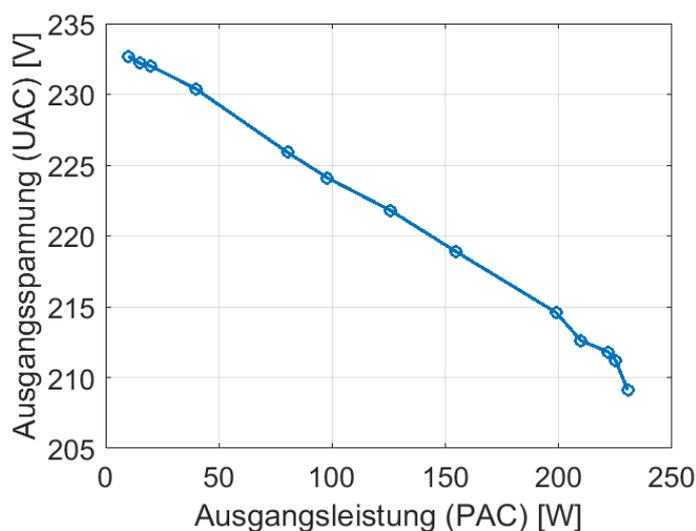


Abbildung 4-4: Ausgangsspannung bei der Batterieentladung mit steigender Verbraucher-Leistung.

4.2 Überlastbetrieb

In der regulären Anwendung kann eine Überlastung des Ausgangs der PowerBlox nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Im Datenblatt ist hierzu auch eine Aussage „Up to Short-Circuit“ vermerkt. Hierzu werden ein paar exemplarische Ergebnisse aufgeführt.

In Abbildung 4-5 ist hierzu eine Messung aufgeführt, in welcher ein Lastwiderstand von etwa 70 Ohm an der PowerBlox angeschlossen wurde. Diese Belastung führt bei Nennspannung zu einer Leistung von $P_{70,N} = \frac{U_N^2}{R_{70}} = 756 \text{ W}$, was etwa der dreifachen Maximalbelastung entspräche.

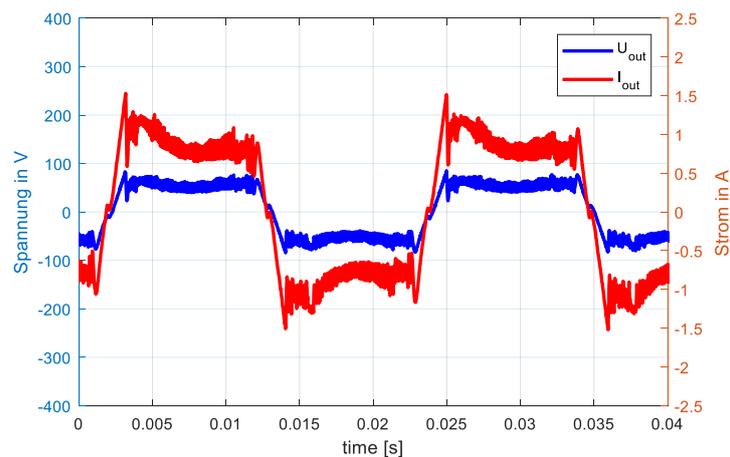


Abbildung 4-5: Ausgangsspannung und Strom im Überlastbetrieb

Aus Abbildung 4-5 kann die prinzipielle Funktionsweise der PowerBlox auf der Netzseite entnommen werden. Der galvanisch getrennte Hochsetzsteller begrenzt passiv (physikalisch begrenzt) den Wirkleistungsfluss in den Hochvolt-Spannungszwischenkreis (bei Gleichspannung gibt es nur Wirkleistung), sodass dieser bei Überlast „zusammenbricht“, und die DC-Spannung signifikant herabsetzt (für den in Abbildung 4-5 gezeigten Betriebspunkt auf etwa 70V). Durch die begrenzte Leistungsübertragung kann auch die Last einen maximalen Strom von etwa 1 A ziehen, was die PowerBlox laut Datenblatt mind. 5 Sekunden bereitstellen kann.

Ein kritischer Zustand könnte sich bei einer stark induktiven Last einstellen, in welcher der Wirkleistungsanteil am Gesamtstrom klein ist, und vom Hochsetzsteller übertragen werden kann. Hier kann sich eine Überlastung des Netzwechselrichters einstellen. Eine mögliche Last wäre eine elektrische Maschine, die z.B. während des Startens mechanisch hängt, und somit einen vergleichsweise großen Blindstrom aufnimmt. Dieser Fall wurde aktuell nicht getestet.

4.3 Gekoppelter Betrieb zweier PowerBlox

Für den Test mit gekoppelter PowerBlox werden unterschiedliche Widerstandslasten zu- und abgeschaltet. Es wurde jeweils die Ausgangsspannung an der Last, sowie der Ausgangs- und der Kopplungsstrom (=Beitrag der zweiten PowerBlox) erfasst.

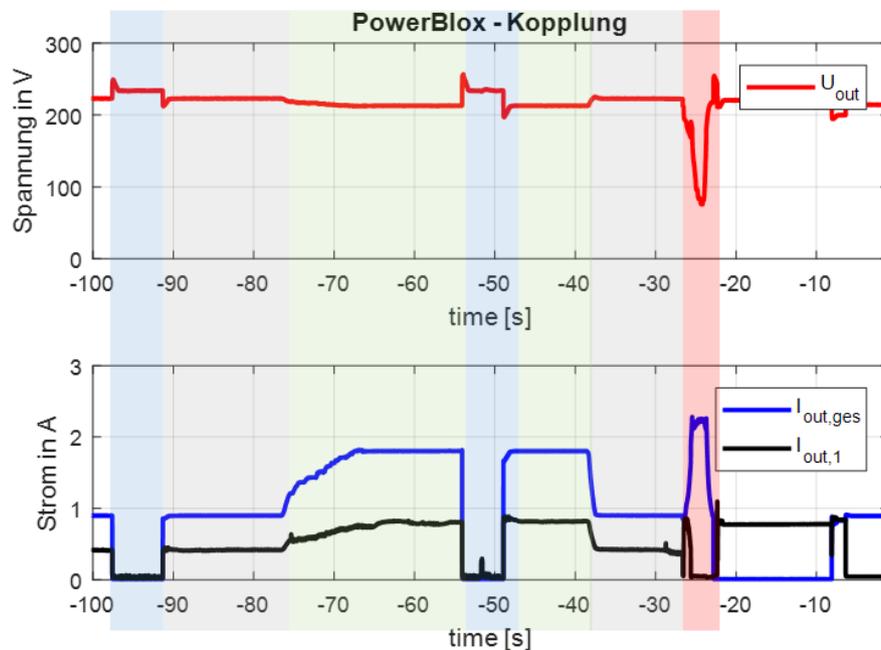


Abbildung 4-6: Testreihe gekoppelter Betrieb – 028.WVF

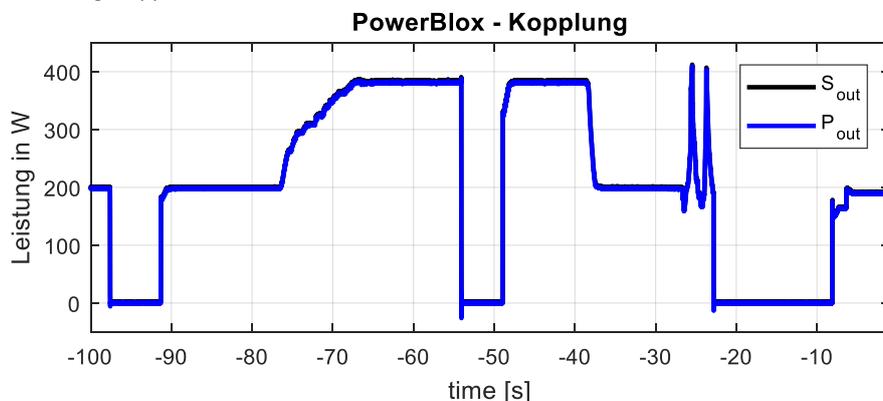


Abbildung 4-7: Testreihe gekoppelter Betrieb – Wirkleistungsbezug der Last

Vier unterschiedliche Belastungsfälle wurden für die statische und dynamische Bewertung des Netzverhaltens verwendet.

1.) Leerlauf-Betrieb (blaue Markierung)

Im Leerlauf stellen die gekoppelten PowerBlox(en) eine Ausgangsspannung von etwa 233 V zur Verfügung. Die Frequenz der Ausgangsspannung beträgt im Leerlauf etwa 48.8 Hz, siehe Abbildung 4-8.

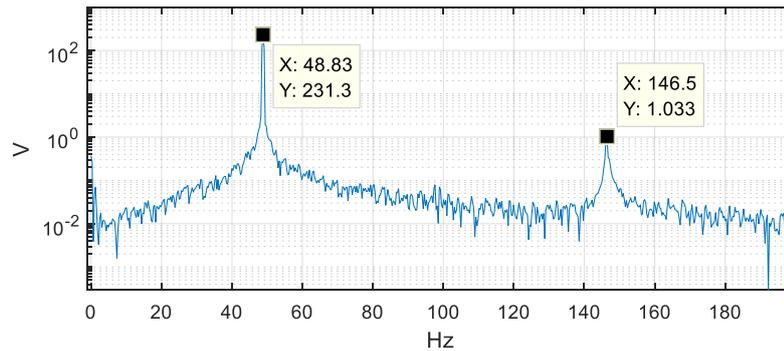


Abbildung 4-8: Frequenzspektrum der Ausgangsspannung im gekoppelten Betrieb - Leerlauf

2.) Belastung mit $P \sim 200W$ (graue Markierung)

Im statischen Betrieb wird die Frequenz auf die Betriebsfrequenz 48.8Hz gehalten, die Spannung bricht trotz vergleichsweise geringer Belastung von $\sim 100W$ je PowerBlox bereits um 5% ein.

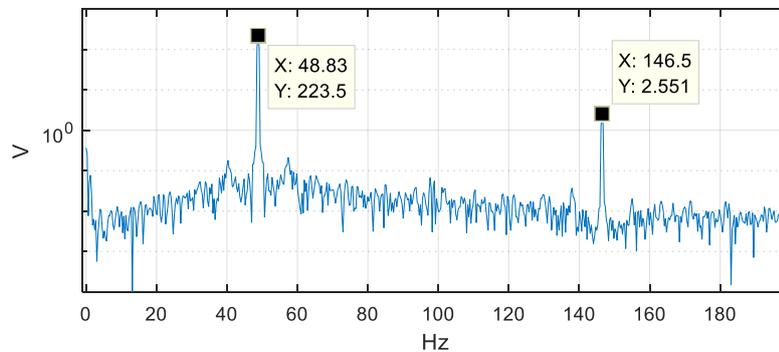


Abbildung 4-9: Frequenzspektrum der Ausgangsspannung im gekoppelten Betrieb – 100W Belastung

3.) Belastungserhöhung auf $P \sim 375W$ (grüne Markierung) und stationärer Betrieb:

Während der Belastungsänderung stellt sich eine Frequenzänderung an der Last ein, in Abbildung 4-10 dargestellt für den Zeitpunkt $t \sim 72s$ von etwa 48.5 Hz, im stationären Betrieb stellt sich wieder die Betriebsfrequenz von 48.8Hz ein. Die Frequenz wird zur Leistungsaufteilung der beiden PowerBlox verwendet, eine Leistungsanforderung/Leistungserhöhung wird durch eine Frequenzreduktion erreicht.

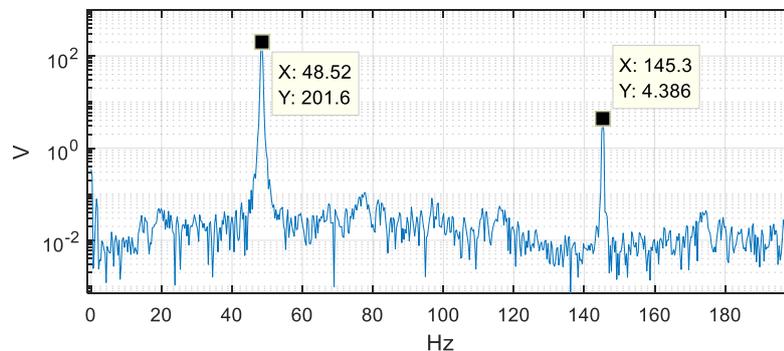


Abbildung 4-10: Frequenz während der Belastungsänderung ($t \sim 70s$)

Für diesen Test wurde der Widerstandswert langsam auf $R \sim 118\Omega$ reduziert, was einer Nennbelastung von $P_N \sim 450W$ für die gekoppelten Boxen, somit etwa 225W bei gleichmäßiger Aufteilung entspricht (bei Nennspannung). Die Ausgangsspannung der PowerBlox sinkt stationär um 10%, auf etwas 210V, was aufgrund des ohmschen

Lastverhaltens einer Leistungsreduktion von etwa 20% entspricht. Bei $t=-54.08\text{s}$ erfolgt eine Lastabschaltung in den Leerlaufbetrieb, bei $t=-48.94\text{s}$ wird die Last wieder zugeschalten (Abbildung 4-11 – Leerlauf ->ohmsche Belastung „450W“).

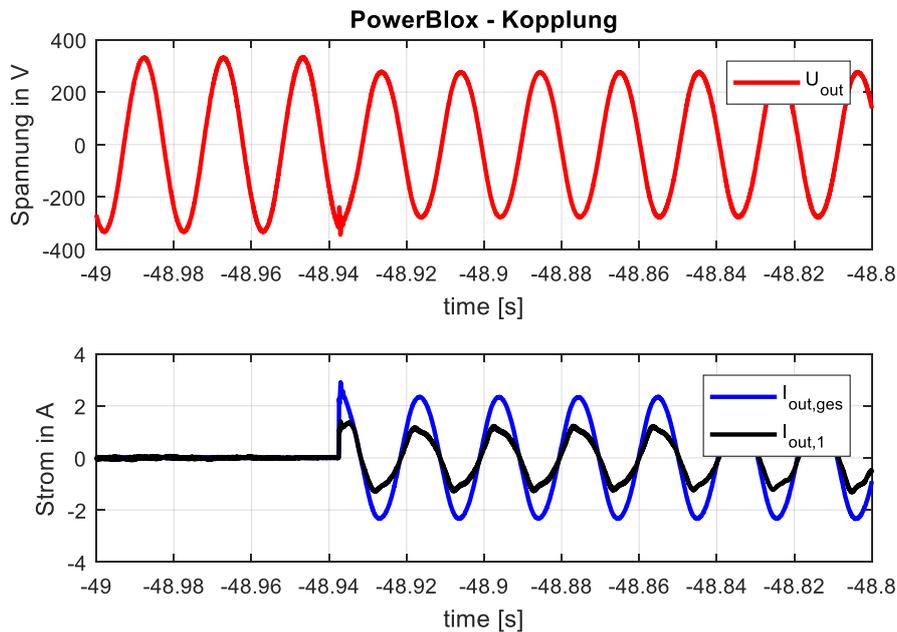


Abbildung 4-11: Stromverlauf während Lastzuschaltung bei $t \sim -48.94\text{s}$

Dynamische Ausgangsspannungsregelung: Während der Last-Abschaltung erhöht sich die Ausgangsspannung auf 110% der Nennspannung, und wird mit einer Zeitkonstante von etwa 800ms auf den Nennwert von 233V geregelt.

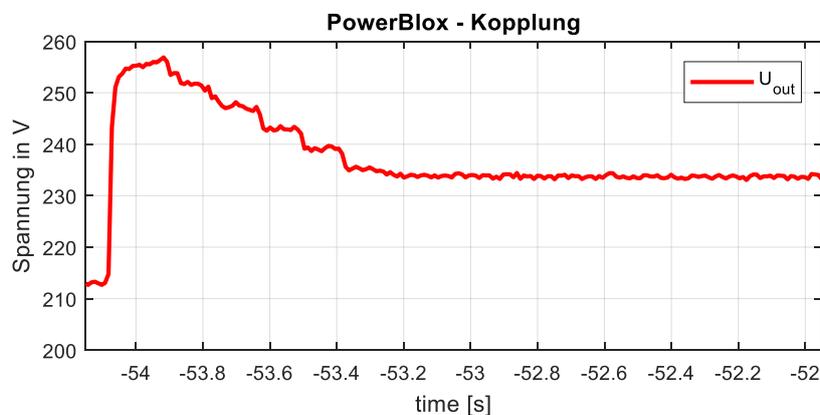


Abbildung 4-12: Spannungsverlauf während Lastabschaltung

Der gleiche Effekt kann auch für die Lastzuschaltung erkannt werden, die Ausgangsspannung bricht auf 85% der Nennspannung ein, und wird mit einer Zeitkonstante von etwa 800ms auf den stationären Endwert von etwa 212V eingestellt.

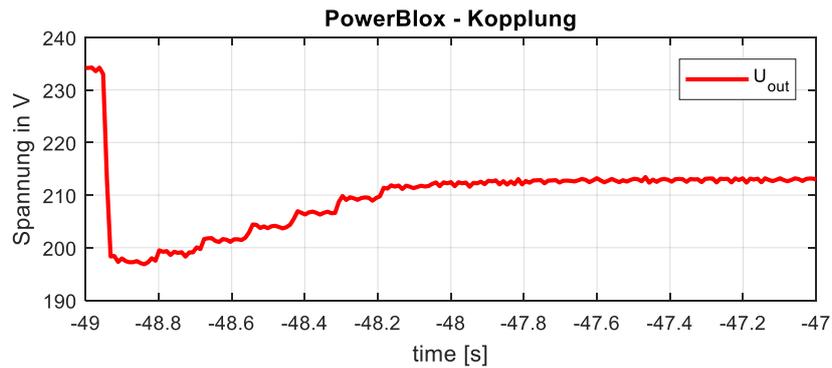


Abbildung 4-13: Spannungsverlauf während Lastzuschaltung

Das in Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 gezeigte dynamische Regelverhalten der Ausgangsspannung ist für die Anwendung ausreichend, die statische Abweichung bei Nennbelastung ist suboptimal.

Am Ende des Belastungsfalls schaltet PowerBlox1 ab (Abbildung 4-14, -26.6s), verursacht möglicherweise durch vollständige Entladung des Akkus. Die Leistungsflussrichtung kehrt sich um (Phasenlage $I_{out,1}$ (schwarz) in Abbildung 4-14 bei $t = -26.5s$), PowerBlox1 lädt sich über PowerBlox2. Die Spannung an der Last sinkt auf 84% der Nennspannung, da die Versorgung nun rein aus der PowerBlox 2 erfolgt.

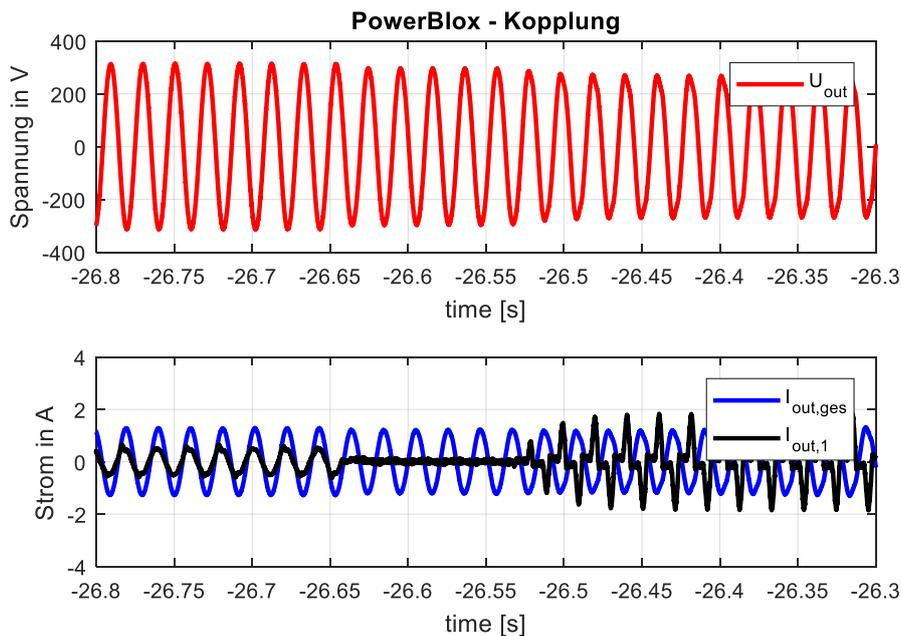


Abbildung 4-14: Ausfall von PowerBlox1 am Ende des Belastungsfalls.

4.) Überlast

Der Überlastfall der gekoppelten PowerBlox wird zu einer Überlastung einer einzelnen PowerBlox. Die Versorgung (Laden) der zweiten PowerBlox stoppt durch Einbruch der AC-Spannung der PowerBlox2.

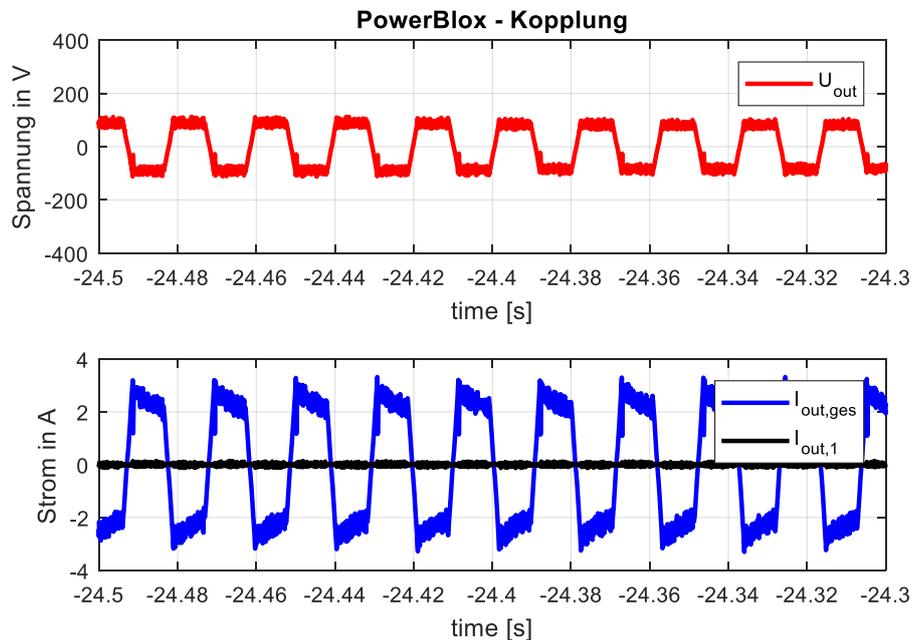


Abbildung 4-15: Überlastfall –

Die Spannungsamplitude der Ausgangsspannung sinkt auf etwa 100V (=DC-Spannung des Spannungszwischenkreises HV), die Ausgangsspannung wird stark trapezförmig. Der Strom wird indirekt auf etwa 2A begrenzt.

5.) Leerlauf + Laden

Nach Abschalten des Verbrauchers fließt ein Strom im Kopplungspfad der beiden Boxen, PowerBlox2 lädt PowerBlox1 (Abbildung 4-7 - $-20s < t < -10s$).

Nach erneutem Zuschalten einer Last mit etwa 240W bei $t \sim -8.1 s$ wird zunächst die Last und PowerBlox1 aus PowerBlox2 versorgt, aufgrund des daraus resultierenden

Spannungseinbruchs der Ausgangsspannung auf 200V wird das Laden der PowerBlox1 aus PowerBlox2 nach ca. 1.8s unterbrochen, die PowerBlox2 versorgt nun alleinig die Last.

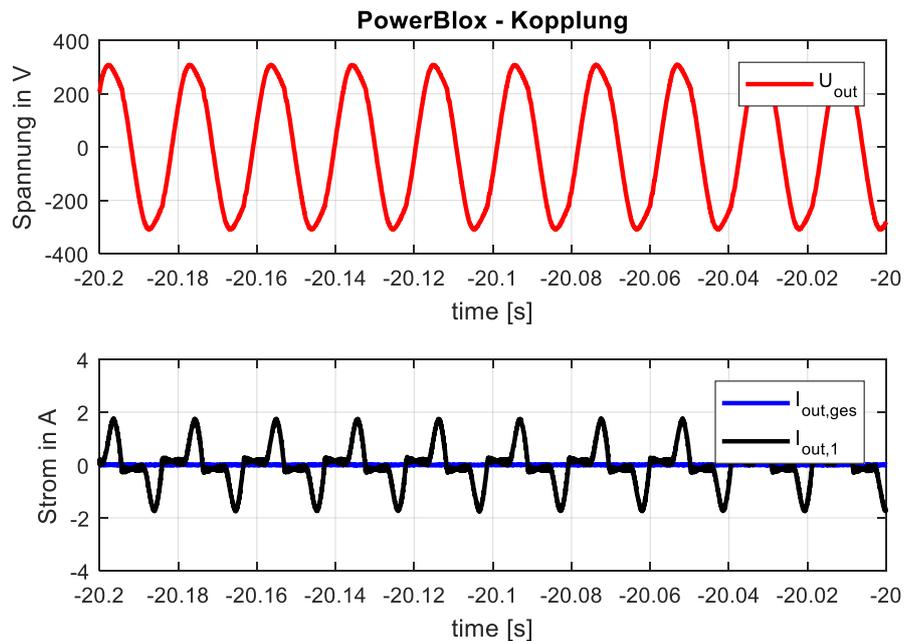


Abbildung 4-16: Leerlauf (AC-Last), Ladung der PowerBlox1 durch PowerBlox2

Das Verhalten der PowerBlox scheint entweder sehr gut durchdacht, oder zufällig zu sein. Die Stromform im Ladebetrieb entspricht dem eines ungesteuerten Gleichrichters, was zu der Annahme führt, dass es für die Ladefunktion der PowerBlox einen zweiten Strompfad zwischen AC-Anschluss und Batterie geben muss, siehe auch Abbildung 3-1.

Der Kopplungsstrom zwischen den beiden PowerBlox weist neben der Grundschwingungskomponente f_0 des Stroms (siehe auch Abbildung 4-11, schwarz) weitere Harmonische (vielfache der Grundschwingungen auf). In Abbildung 4-17 ist hierzu das Frequenzspektrum in einem Arbeitspunkt aufgezeigt. Hierbei fallen zum einen die Frequenzanteile unter 1000Hz auf - Abbildung 4-18, konkret $3 \cdot f_0$, $5 \cdot f_0$ und $7 \cdot f_0$, sowie hohe Frequenzanteile im Bereich um 8kHz. Speziell die großen Stromamplituden in diesem Frequenzbereich können zu erheblichen EMV-Auskopplungen führen, werden diese Ströme doch in der Kopplungsleitung außerhalb des Gerätes geführt.

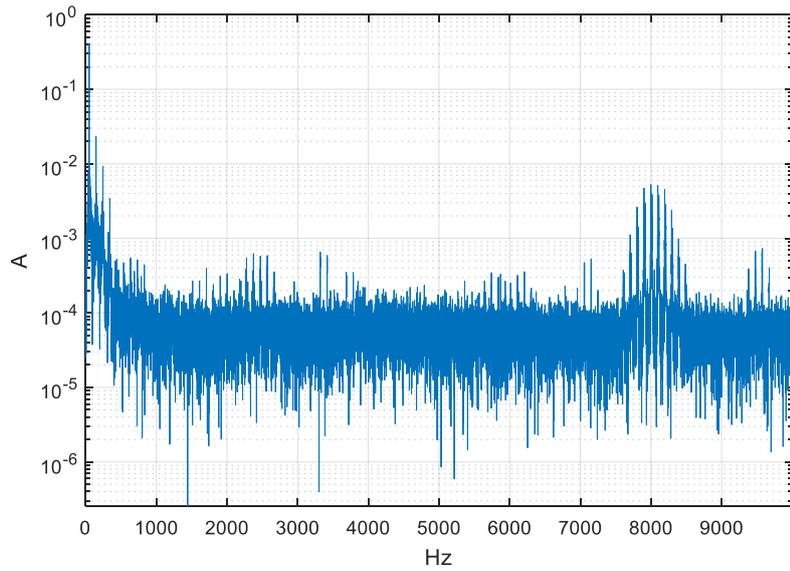


Abbildung 4-17: FFT-Darstellung des Kopplungsstroms (Gesamtlast etwa 200W)

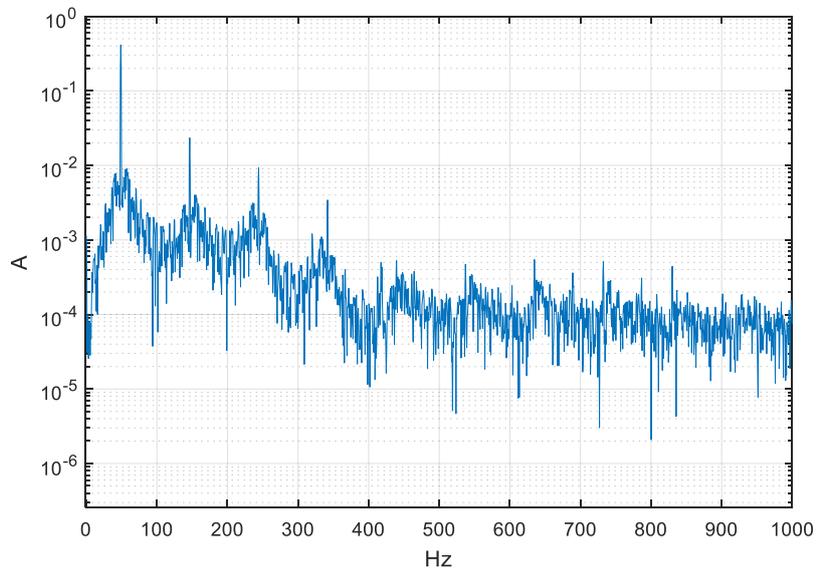


Abbildung 4-18: FFT-Darstellung des Kopplungsstroms (Gesamtlast etwa 200W) – ZOOM 0-1000Hz

5 Nutzung zweier PowerBlox im Inselbetrieb – Erfahrungsbericht

Für die Evaluation der PowerBlox (ins besondere der Synchronisation zwischen mehreren Speichern) wurden zwei miteinander gekoppelte Systeme in zwei unterschiedlichen Konfigurationen getestet. Beim Erfahrungsbericht ging es eher um das „gefühlte Verhalten“ eines typischen Nutzers ohne weitere Messtechnik.

In der **ersten** Variante wurde ein erster Energiewürfel durch einen zweiten, als reine Speichererweiterung (Leistungs- und Energieplus) betriebenen, erweitert. Die Kopplung der beiden PowerBloxen erfolgte über das dafür vorgesehene Kopplungskabel

Für die **zweite** Variante wurde die zweite Box mit einem eigenen Solarmodul unterstützt.

Eine 250W Last mit PFC und eine 50W Last ohne PFC wurden als beispielhafte Belastung gewählt.



Abbildung 5-1: PowerBlox Konfiguration im Inselbetrieb

Die Leistungsaufteilung zwischen beiden Speichersystemen bei Belastung funktioniert wie erwartet. Für Systeme mit annähernd gleicher Batteriekapazität und Ladezustand wird die Last zu gleichen Teilen übernommen. Die ungleichmäßige Belastung durch die Last ohne PFC hatte keine merkbaren Einflüsse auf die Spannungsqualität am Ausgang.

Auch bei unterschiedlichen Ladezuständen zu Beginn der Messung erfolgt die Aufteilung gleichmäßig, was bei entsprechender Energieentnahme aus dem Inselsystem zu einem verfrühten Abschalten des Speichersystems mit geringerer Anfangskapazität führt. Im Test übersteigen die in Summe 300W an Verbrauchern die Nennleistung einer PowerBlox (200W), was nach kurzer Zeit zu einer Gesamtsystemabschaltung führt, die verfügbare Gesamtkapazität des Speichersystems konnte nicht genutzt werden

Der Batteriezustand, bzw. die Restkapazität wird offensichtlich bei der Leistungsaufteilung mehrerer Systeme nicht berücksichtigt.

In der ersten Variante wird während des Ladens die PowerBlox mit angeschlossenem Solarmodul (Abbildung 5-1) schneller geladen als die rein über das Kopplungskabel verbundene (Speichererweiterung). Diese Effekt verstärkt sich bei häufigen Lade- und Entladevorgängen, z.B. aufgrund von variabler Einstrahlungsleistung an einem bewölkten Tag und gleichbleibender Last oder ähnlich. In der zweiten Variante war dieser Effekt nicht feststellbar. Eine gleichmäßige Verteilung der Ladeleistung auf die beiden PowerBlox ist

deshalb besonders empfehlenswert in Anwendungen in denen keine häufige vollständige Ladung zu erwarten ist.

Die Ladezustandserkennung ist besonders im unteren Bereich zuverlässig und die Abnahme bei konstanter Last gleichmäßig. Das ermöglicht eine realistische Einschätzung der verbleibenden Energiemenge während des Betriebs. Nach dem Abschalten erholt sich die Bleibatterie im inneren der PowerBlox nach einigen Minuten. Die daraufhin gestiegene Spannung führt zu einem wieder einschalten. Unter Last bricht die Batteriespannung aber schnell wieder ein und das System wird erneut abgeschaltet. Diese Zustände wechseln in kurzen Abständen (ca. 3 Minuten) und erzwingen ein manuelles Abschalten der Last oder PowerBlox.

Die PowerBlox kann gekoppelt betrieben werden. Für einen sinnvollen Parallelbetrieb sollte aber an jeder PowerBlox auch ein PV-Generator mit ähnlicher Leistung und Ausrichtung angeschlossen werden, um eine ungleichmäßige Ladung/Entladung des zweiten Energiespeichers zu vermeiden. Der Betrieb bei niedrigem Ladezustand ist bei unbeobachtetem Betrieb zu vermeiden, um empfindliche Verbraucher vor deren Zerstörung durch ständiges zu- und abschalten zu bewahren. Hier scheint es Verbesserungspotential in der Ladesteuerung/Batteriemanagementsystem zu geben.

6 PV-Generator – Nachführung

Ergänzend zur Untersuchung der PowerBlox wird eine (externe) Erweiterung dieser vorgeschlagen, Anschluss eines nachgeführten PV-Generators.

Mit einer jährlichen Energiemenge von $3.9 \cdot 10^{24}$ J, also circa 10^{18} kWh, stellt die Sonne die größte erneuerbare Energiequelle dar und übertrifft damit knapp zehntausendfach den Weltprimärenergiebedarf. PV-Module wandeln ebendiese Sonnenenergie in elektrische Energie um. Hierbei ist der Einfallwinkel des Lichts von signifikanter Relevanz. Nur im optimalen Winkel kann die höchste Ausbeute an elektrischer Energie erreicht werden. Eine Vielzahl der Solaranlagen ist jedoch starr montiert und können dadurch nicht flexibel nach dem aktuellen Sonnenstand ausgerichtet werden. Dieser Zusammenhang ist speziell morgens und abends von hoher Relevanz, und kann die zeitliche Nutzung des Energiesystems mit PowerBlox signifikant vergrößern: Abhilfe schaffen hier Nachführungssysteme, welche die Ausrichtung der Module über ein oder mehrere Achsen beeinflussen können. Im Folgenden soll die Entwicklung und Umsetzung einer einachsigen Photovoltaik-Nachführung für die Anwendung in einem elektrischen Inselsystem beschrieben werden.

Die Unterkonstruktion

Folgende Anforderungen wurden zu Beginn an die zu erstellende Unterkonstruktion gestellt:

- Die Konstruktion sollte einfach nach Süden positionierbar sein und einen möglichst großen Stellbereich des Azimutwinkels ermöglichen
- Die Maße des zu montierenden Solarmoduls sollten frei wählbar sein und der Austausch einfach erfolgen können
- Ein großes Maß an mechanischer Stabilität und Witterungsschutz
- Positionsermittlung erfolgt durch Photoresistoren mit einer möglichst genauen Annäherung an die Zielposition.

Für den zu wählenden Aufständigungswinkel eines Solarmoduls, wurde bei der beschriebenen Konstruktion ein Winkel von $23,5^\circ$ angesetzt, da das System vorzugsweise ganzjährig betrieben wird, aber besonders in den Sommermonaten, eine möglichst optimale Ausrichtung erreichen soll. Dabei entspricht das höhere Ende, in Voraussetzung des Systembetriebes auf der Nordhalbkugel, der Nordseite, da die Modulfläche stets möglichst exakt nach Süden ausgerichtet positioniert werden sollte, um eine entsprechend optimale Nachführung von Ost nach West zu erzielen.

Die CAD Konstruktionszeichnung der vollständigen Unterkonstruktion mit entsprechender Bemaßung des beschriebenen Systems ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Hierbei erkennt man die beiden Nord- und Süd-Stirnelemente, welche identisch aufgebaut sind und durch ihre entsprechenden Maße die Neigung des Moduls bestimmen und je nach Standort variiert werden können. Die Verbindungsstrebe ist analog dazu, der Bemaßung des Moduls, bzw. der Module, anzupassen. Weiterhin können weitere Querstreben und Verstärkungen additiv zu den bereits angebrachten ergänzt werden, falls am Aufstellungsort mit einer besonders hohen Windlast zu rechnen ist. Falls mit erhöhten Windgeschwindigkeiten am Standort zu rechnen

bei voller Auslenkung reduziert. Das U-förmige Gehäuse ist nicht auf Pressung anzufertigen, da es dem Motor einen gewissen Spielraum zur nötigen Anpassung an die Neigung der Schubstange ermöglichen soll. Da sich die Stange bei der Bewegung in sich dreht, ist es nötig, zur Befestigung der Schubstange mit dem Modul am Punkt *c*, eine variable Lösung zu finden. Dies kann sowohl über ein bewegliches Lager als auch über einen Kabelbinder realisiert werden.

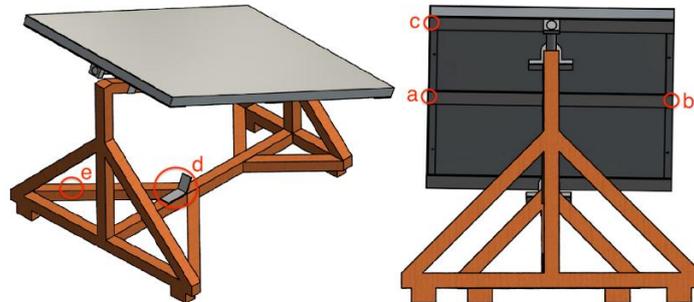


Abbildung 6-2: CAD Konstruktionszeichnung des Solarfolgers mit markierten Punkten.

Die Nachlaufsteuerung

Die Steuerung besteht aus zwei LDR, welche jeweils mit einem 2 k Ω Widerstand auf einer Lochrasterplatine seriell verschaltet wurden. Abbildung 6-3 zeigt den Widerstand der LDR als Funktion der Beleuchtungsstärke. Hierbei ist zu erkennen, dass der Widerstand entsprechend mit größerer Beleuchtungsstärke abnimmt, weshalb sich durch den Widerstand auf die Einstrahlung schließen lässt. Zur Reduktion der Intensität der Einstrahlung kann zusätzlich getöntes Plexiglas vor den Sensoren angebracht werden. Dies ermöglicht hohe Einstrahlungswerte besser zu differenzieren und ein breiteres Spektrum verarbeiten zu können.



Abbildung 6-3: Photoresistoren mit einer schwarzen Abschirmung aus Holz zwischen und getöntem Plexiglas vor den Sensoren, in einem Gehäuse an der Stirnseite des Solarmoduls zur Erfassung der Einstrahlungswerte.

Zwischen dem Widerstand und der Diode befindet sich der Messpunkt für die analogen Werte, welche anschließend von einem uController, z.B. Arduino weiterverarbeitet werden. Die beiden LDR, welche wie in Abbildung 32 abgebildet, für den Witterungsschutz in einer Abzweigdose untergebracht sind, an der Stirnseite des Moduls befestigt, wobei sich zwischen bei beiden eine Abschirmung, z.B. aus Holz oder Plastik befindet. Die Abschirmung führt zu

einer Verschattung der LDR falls nicht optimal ausgerichtet, als Eingangsinformation für den Steuerungsalgorithmus.

Der Schaltplan

Die zur Nachlaufsteuerung nötigen Komponenten, sowie deren Verschaltung sind in Abbildung 6-4 dargestellt.

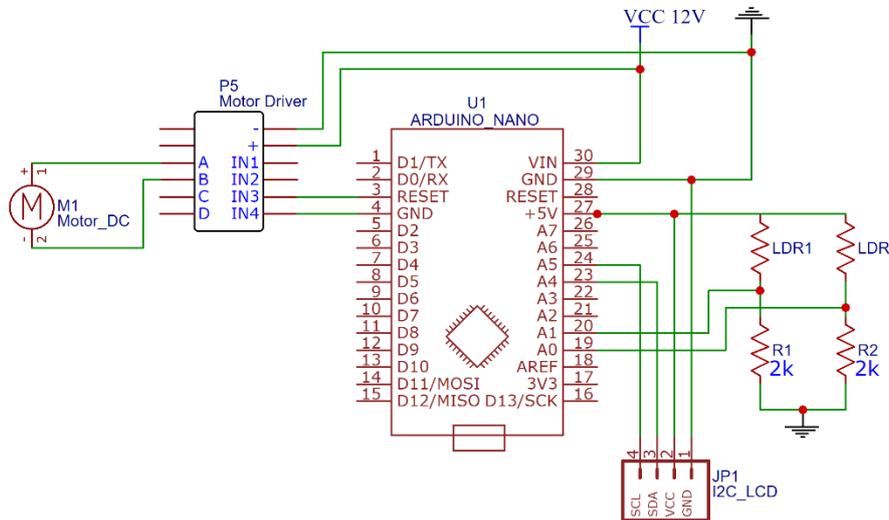


Abbildung 6-4:Schaltplan der Steuerung des Solarfolgers.

Das Kernelement bildet der uController Arduino nano, welcher sowohl über die Schrittmotorplatine den Linearmotor ansteuert, als auch über den analogen Eingang die Werte der LDR verarbeitet. Entsprechend dem Schaltplan lässt sich erkennen, dass der Arduino ein Verhältnis zweier Widerstände benötigt, um einen analogen Wert zu erfassen. Die auf dem Photowiderstand basierende Schaltung verwendet einen Widerstandsteiler, um es dem Analogeingang mit hoher Impedanz zu ermöglichen, die Spannung zu messen, da diese Eingänge fast keinen Strom ziehen. Der Messpunkt befindet sich in der Mitte des variablen und des festen Widerstandes. Die Größe dieses Widerstands richtet sich nach dem verwendeten Sensor und dem Umfeld, in dem er betrieben wird. Für diese Auslegung wurden verschiedene Widerstände ausgetestet, um ein möglichst gleichmäßiges Spektrum von 0 bis 1023, über verschiedene Stärken der Einstrahlung zu erhalten. Weiterhin ist ein Referenzwiderstand nötig um bei niedriger Einstrahlung einen Kurzschluss zu verhindern.

Die Software

Die Anforderung an das Programm ist es, die beiden, im Abschnitt Steuerung beschriebene analoge Eingangswerte so zu verarbeiten, dass durch die Ansteuerung des Motors eine sonnenrichtige Mitführung des Moduls erfolgt. Nachfolgend wird der prinzipielle Ablauf des Programmcodes beschrieben.

Die analogen Eingänge des Arduinos, welche ein Spannungssignal zwischen 0 und 5V erhalten, wandeln dieses durch einen 10 Bit A/D Wandler beim Aufruf der *analogRead* Funktion in einen entsprechenden lesbaren Wert um. Der maximale Wert, welcher auch der höchsten

Einstrahlung entspricht, liegt hierbei bei 1023, der minimale Wert ist 0 und entspricht in etwa völliger Dunkelheit.

Als Kernelement der Steuerung zeigt Abbildung 6-5 den schematischen Programmablauf zur Ermittlung der zu drehenden Richtung des Moduls.

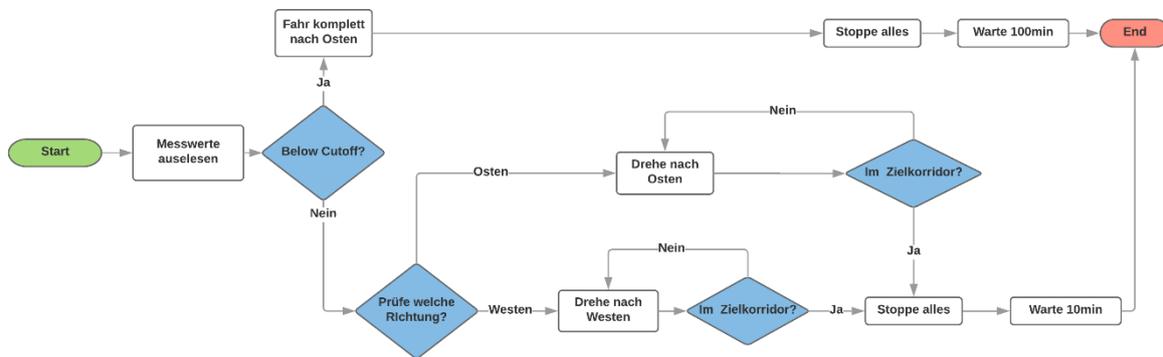


Abbildung 6-5: Schematischer Programmablauf der Nachlaufsteuerung.

Hierbei werden zunächst für jeden Schleifendurchlauf die Messwerte eingelesen. Daraufhin wird bestimmt, ob sich diese unterhalb des zu Beginn bestimmten Schwellwerts, dem sogenannten *Cutoff*, befindet. Dies führt nach einer vollständigen ostwärts Drehung zum Stoppen aller Vorgänge und einem Abwarten von 100 Minuten bis zum erneuten Start der Schleife. Die *Cutoff* Variable wurde durch Messung der Einstrahlungsstärke bei nahezu vollständigem Sonnenuntergang bestimmt, aktuell auf den Wert 30 (von 1023) gesetzt. Die vollständige ostwärts Drehung soll ermöglichen, dass sich das Modul zum Sonnenaufgang am folgenden Tag bereits in einer passenden Ausgangsrichtung befindet.

Befindet sich der Wert nicht unterhalb des *Cutoff* Wertes, muss geprüft werden, in welche Richtung sich das Modul drehen muss, um möglichst perfekt zur Sonne ausgerichtet zu sein. Hierbei werden die beiden Werte subtrahiert und anschließend das Modul unter weiterer Erfassung der sich verändernden Eingangswerte in die Richtung des größeren Wertes und somit höheren Einstrahlungsstärke gedreht. Dies geschieht so lange bis die Differenz der beiden Werte einen zuvor eingestellten Zielkorridor (Hysterese) erreicht. Dieser dient der Vermeidung eines unendlichen Annäherns an den genauen Zielwert, welcher durch die stark fluktuierenden Eingangswerte auf einen genauen Wert nicht festzulegen ist. Weiterführend stellt sich eine Genauigkeit der Positionierung des Moduls in einem Wertekorridor von +/- 2 als ausreichend dar. Nach Erreichen des Zielkorridors werden alle Vorgänge gestoppt und es startet eine Wartephase von empirisch ermittelten 10 Minuten. Das Warten soll besonders an sehr wolkigen Tagen ein dauerhaftes hin und her fahren aufgrund von Löchern in der Wolkendecke verhindern und somit auch stromsparend sein, da sich innerhalb von 10 Minuten der Sonnenstand, auch zu Zeiten in denen die Sonne im Zenit steht, nur um etwa 5° Grad zur Ausrichtung des Moduls verändert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hardware der getesteten PowerBlox hat sich als sehr robustes und qualitativ hochwertiges Gerät herausgestellt. Sowohl in der Auslegung als auch in der Steuerung der PowerBlox sehen die Autoren Verbesserungspotential:

Folgende Punkte sind während der Tests aufgefallen:

Eingangsspannungsbereich PV-Generator: der im Datenblatt spezifizierte Spannungs- und Strombereich ist zu klein spezifiziert. Genaugenommen passt kein am Markt verfügbares Modul unter realen (Betriebs-)Bedingungen. Der Eingangsspannungsbereich sollte deshalb signifikant erhöht werden, auch der Eingangsbereich passt nicht mehr zu aktuellen 6“ Wafern mit Nennströmen von bis zu 10A.

Energiespeicher: aus dem Datenblatt ist nicht ersichtlich, ob der Nutzer von einem Blei auf ein Li-Ionen-System (oder umgekehrt) wechseln kann oder darf. Da die Ladestrategie und Grenzwerte für die beiden Technologien unterschiedlich ist, sollte hierzu eine vom Nutzer parametrisierbare Konfiguration (z.B. Klemmenbrücke) diese Wahlmöglichkeit erlauben.

Ausgangsspannung des Netzwechselrichters: die AC-Ausgangsspannung der PowerBlox variiert sehr stark mit der Belastung. Bei Nennbelastung mit ohmscher Last sinkt die Spannung auf 90% der Nennspannung ein, bei Lasten mit induktiven Verhalten wurden bereits bei geringer Wirkbelastung Spannungen bis zu 110% der Nennspannung gemessen. Diese starken Spannungsvariationen können unmittelbare oder auf Dauer signifikante Auswirkung auf die Lebensdauer der angeschlossenen Geräte führen.

Im Überlastfall ist die Spannung auf unter 30% der Nennspannung gefallen. Die Spannungsreduktion führt zu einer Begrenzung des Laststroms, zumindest bei „constant Impedance“ Verbrauchern. Verbraucher mit anderer Lastcharakteristik können zu einer Schädigung der PowerBlox führen (Überlast der Halbleiter). Auch dieses Feature kann zu Fehlfunktionen der angeschlossenen Verbraucher führen, das Abschalten des AC-Ausgangs innerhalb weniger Perioden könnte eine sinnvolle Abhilfe sein.

Bei dynamischer Belastung schwankt die Ausgangsspannung stark, die Ausgangsspannungsregelung reagiert mit einer Zeitkonstante von etwa 800 ms. Inwiefern eine gepulste Last, z.B. eine Heizlast (z.B. Kaffeemaschine) im getakteten Betrieb mit ähnlichen Pulslängen die Spannungsregelung stört, ist Gegenstand weiterer Tests.

PowerBlox-Verbindung: Auf der PowerBlox Verbindungsleitung wurden signifikante Frequenzanteile um die 8 kHz gemessen, diese können aufgrund der fehlenden Schirmung der Kopplungsleitung zu ungewünschten EMV-Störungen in der Nähe befindlicher Geräte führen.

Betrieb bei niedrigem Ladezustand: Die Batterie wird von der integrierten Ladesteuerung gegen Tiefentladung geschützt, die Last wird getrennt. Die eingestellte Hysterese der Ladezustandserkennung führt zum Pulsieren, bzw. Pumpen des AC-Ausgangs, was im schlimmsten Fall die am Ausgang angeschlossene Last zerstören kann.

8 Literaturverweis

- [Hop18] Fa. Hoppecke: „*Montage-, Inbetriebsetzungs- und Gebrauchsanleitung für verschlossene ortsfeste Blei-Säure-Batterien*“, 7140203151 V1.4, 03/2018
- [Pow18] „*Power Where You Are*“, Werbeflyer Fa. PowerBlox
- [IASS] Rainer Quitzow u. a. *Die Zukunft der Energieversorgung in Afrika. Potenzialabschätzung und Entwicklungsmöglichkeiten der erneuerbaren Energien.* Techn. Ber. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), März 2016
- [BMZ] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). *Förderung von Solar-Hybrid Dorfstromanlagen (ProSolar).* 2018.
url:https://www.bmz.de/de/ministerium/ziele/2030_agenda/deutscher_beitrag/fallstudien/fallstudie_kenia_energie/index.html (besucht am 13. 04. 2018)
- [BVES] *Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme.* Techn. Ber. Bundesverband Energiespeicher (BVES) BSW Solar, März 2017.
- [REM] Renewable Energy Magazine, *Power-Blox uses swarm power to create intelligent autonomous energy grids*, 16.Mai 2017, url:
https://www.renewableenergymagazine.com/energy_saving/powerblox-uses-swarm-power-to-create-intelligent-20170516