



Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin

Fachbereich 1

Ingenieurwissenschaften - Energie und Information

Regenerative Energien (B)

**Photovoltaik-Inselbetrieb vom 28.04.2023**

*Betreuerin: M.Sc. Sabine Kupzok*

*Gruppe: 5*

Name	Matrikelnummer
Johannes Tadeus Ranisch	578182
Markus Jablonka	580234
Niels Feuerherdt	577669
Katharina Jacob	578522
Lukas Aust	574051

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Versuchsziele</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Vorbereitungsfragen</b>	<b>4</b>
3.1	Photovoltaik-Insulanlage . . . . .	4
3.2	Laderregler . . . . .	5
3.3	Batteriesysteme . . . . .	7
3.4	Wechselrichter in PV-Insulanlagen . . . . .	9
3.5	Einstrahlung und Umgebungsbedingungen . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>14</b>
5.1	PV-Generatorwirkungsgrad . . . . .	14
5.2	Wechselrichter . . . . .	15
5.3	Leistungsbilanz . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Quellen</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>22</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Nachgeführter PV-Generator . . . . .	2
2	Stationärer PV-Generator . . . . .	2
3	Photovoltaik-Batteriesystem mit einem Serienladeregler . . . . .	5
4	Photovoltaik-Batteriesystem mit einem Shuntladeregler . . . . .	6
5	Kennlinie des PV-Generators in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke . . . .	12
6	Wirkungsgradkennlinie des Wechselrichters in Abhängigkeit der Auslastung . . .	17
7	Oszilloskopbilder bei verschiedenen Belastungen . . . . .	18
8	Leistungsbilanz der Anlage . . . . .	19

## Tabellenverzeichnis

1	Messdaten von Strom und Spannung in Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke . .	14
2	Messdaten der Ströme, Spannungen und Leistungen . . . . .	16
3	Wirkungsgrad und Leistungsbeiwert . . . . .	16
4	Leistungsbilanz . . . . .	18

## Abkürzungsverzeichnis

PV	Photovoltaik
WR	Wechselrichter
LR	Laderegler
MPP	Maximum Power Point

## 1 Versuchsziele

Der Versuch 'Photovoltaik-Inselbetrieb' beleuchtet zum tieferen Verständnis das Anlagenkonzept eines Photovoltaik-Inselsystems. Das System wird sowohl als System für DC-Verbraucher als auch für AC-Verbraucher betrachtet. Das Verstehen und Aufstellen von Energiebilanzen wird geschult. Die Relevanz von Photovoltaik-Inselanlagen ist die vollständige Unabhängigkeit der Systeme. Die damit verbundenen Möglichkeiten reichen von der Versorgung kleinerer elektrischer Geräte wie Taschenrechner, Uhren oder GPS-Tracker bis hin zu der Möglichkeit eine Stromversorgung mit eigenem Netz für größere Geräte herzustellen. Mögliche Anwendungsbereiche sind hier die Versorgung von Geräten an Standorten an denen ein Netzanschluss nicht möglich ist, z.B. auf einer Bohr- oder Forschungsinsel oder dort wo noch kein Netz existiert und eine Inselanlage den ersten sicheren Stromversorger darstellt, wie es in einigen Entwicklungsländern bereits der Fall ist.

## 2 Versuchsbeschreibung

Der Versuchsaufbau für diese Messungen besteht aus zwei eigenständigen Systemen. Jedes der Systeme wird über eine eigene PV-Anlage versorgt, hierbei ist Anlage 1 nachgeführt und Anlage 2 stationär. Beide PV-Anlagen sind auf der Dachterasse des G-Gebäudes der HTW Berlin am Campus Wilhelminenhof aufgeständert. In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind die zwei unterschiedlichen PV-Generatoren zu sehen. Die weiteren Komponenten sind innerhalb des Gebäudes angebracht.



Abbildung 1: Nachgeführter PV-Generator



Abbildung 2: Stationärer PV-Generator

Hinsichtlich der Bauteile unterscheiden sich die Anlagen ebenfalls, für Aufbau 1 wurden die folgenden Komponenten genutzt:

- 8x Solarmodule SunWare SW-8046
- 1x Wechselrichter SMA SUNNY ISLAND 2012/2224
- 1x Laderegler SMA SUNNY ISLAND CHARGER 50
- 1x Batteriesystem aus Blei-Gel-Batterien BAE 6V4PVV280
- 1x Ohmsche-induktive Last (hier:stufenweise regelbarer Staubsauger)
- 1x Ohmsche Last (hier: S-Bahn Heizung)

Für Aufbau 2 wurden folgende Komponenten genutzt:

- 8x Solarmodule SunWare SW-8046
- 1x verstellbarer Widerstand

### 3 Vorbereitungsfragen

#### 3.1 Photovoltaik-Inselanlage

##### 3.1.1 Anlagenkonzepte von PV-Insulanlagen

«««< HEAD Anlagenkonzepte unterscheiden sich durch die verwendeten Komponenten, die Verschaltung und die angeschlossenen Verbraucher.

Das einfachste Konzept ist das direkte Verschalten der PV-Anlage mit  
 ===== Die Konzepte unterscheiden sich durch die verwendeten Komponenten, die Verschaltung und die angeschlossenen Verbraucher.

Das Einfachste der vier Konzepte ist das direkte Verschalten der PV-Anlage mit »»»> 54e1827e4e21b7f7edc93a2134db3186f16d27ea DC-Verbrauchern, hierbei kann es sich z.B. um ein Heizungssystem für ein Schwimmbecken handeln.

Das zweite System wird durch eine Batterie ergänzt welche zwischen die PV-Anlage und die Verbraucher geschaltet ist. Mögliche Anwendungen sind einfache DC-Systeme, welche allerdings auch außerhalb der Sonnenstunden funktionieren müssen und dementsprechend einen Puffer benötigen. Ein Beispiel wäre hier ein solarversorgter Snackautomat.

Das komplexeste System, welches weiterhin für DC-Verbraucher gedacht ist, wird neben den Komponenten des zweiten Systems um einen Laderegler ergänzt welcher vor die Batterie geschaltet wird. Solche Systeme werden häufig in Wohnmobilen oder Wohnwägen verwendet, welche mit DC-Verbrauchern ausgestattet sind.

Um AC-Verbraucher nutzen zu können muss System 3 um einen Umrichter erweitert werden, welcher vor die Verbraucher geschaltet wird. Diese Systeme können dann Einfamilienhäuser, Forschungsstationen oder abgelegene Dörfer versorgen und ein Netz etablieren.

«««< HEAD

##### 3.1.2 Prüfung der Funktionsfähigkeit von Anlagenkomponenten

Gemessen werden an allen Ein- und Ausgängen der Geräte sowohl der Strom als auch die Spannung. =====



### 3.1.3 Die Anlagenkomponenten sollen im Inselsystem auf ihre Funktionsfähigkeit hin geprüft werden. Was messen sie in welcher Reihenfolge?

Gemessen wird an allen Ein- und Ausgängen der Geräte sowohl der Strom als auch die Spannung. »»»» > 54e1827e4e21b7f7edc93a2134db3186f16d27ea  
 Beginnend mit dem Ausgang der PV-Anlage, wird dann entlang der Erzeugungslinie geprüft. So folgt die Prüfung des Ladereglers. Anschließend wird das Batteriesystem geprüft und abschließend der Umrichter.

## 3.2 Laderregler

### 3.2.1 Voraussetzungen für Anlagen mit Akku ohne Laderegler

Inselnetzanlagen müssen in der Lage sein, die Ladung des Akkus und die Stromversorgung des angeschlossenen Verbrauchers zu gewährleisten. Dementsprechend müssen die einzelnen Bauteile aufeinander ausgelegt werden, um eine Beschädigung der Komponenten zu vermeiden. Ein Laderegler wird benötigt, sobald die Leerlaufspannung der Module die maximale Ladespannung der Batterie überschreitet, eine spannungsunabhängige Schaltung umgesetzt werden soll (bei größeren Anlagen) oder keine konstanten Wetterbedingungen garantiert werden können. Ein Laderegler sorgt dafür die Batterie vor Tiefenentladung und/oder Überladung zu schützen. In Kombination mit einem MPP-Tracker kann ein Laderegler auch den Energieertrag erhöhen.

### 3.2.2 Verfahren zur Laderegelung

Es wird in drei unterschiedliche Arten von Ladereglern (LR) unterschieden:

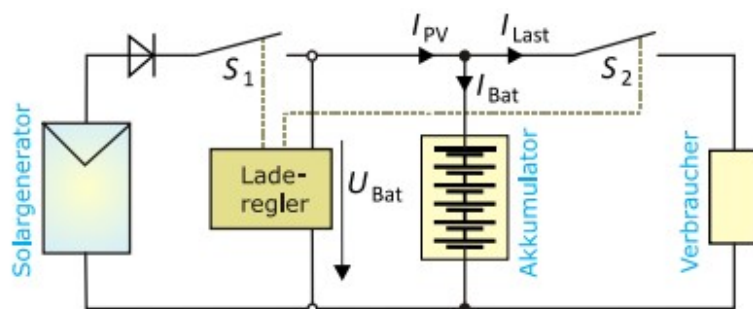


Abbildung 3: Photovoltaik-Batteriesystem mit einem Serienladeregler



- In Serienladeregler (auch Längsregler) (Abbildung 3) werden Leistungshalbleiter als Schalter verwendet um den Stromfluss zu unterbrechen. Das hat zur Folge, dass beim Laden des Akkus immer Durchlassverluste entstehen. Serienladeregler sind die preiswertesten LR und können auch für nicht kurzschlussfeste Verbraucher genutzt werden.

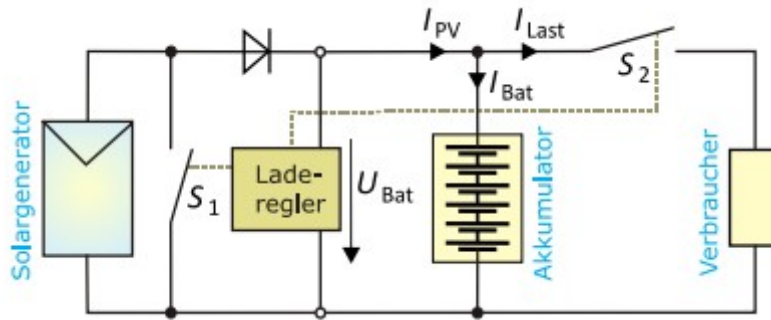


Abbildung 4: Photovoltaik-Batteriesystem mit einem Shuntladeregler

- Shuntregler (auch Parallelregler) (Abbildung 4) sind am weitesten verbreitet. Diese schalten bei vollgeladenem Akku den Solargenerator kurz. Dieser Kurzschluss stellt im regulären Betrieb kein Problem dar, kann aber bei Abschattungen zu extremen Belastungen einzelner Zellen führen.
- MPP-Laderegler können auch bei wechselnden Wetterbedingungen beste Ladeleistungen erreichen. Nachteilig sind allerdings die hohen Anschaffungskosten.

### 3.2.3 Austausch defekter Batterien

Das Wechseln der Batterie erfolgt in sieben einzelnen Schritten. Als erstes sollte die Betriebsanleitung gelesen und danach die Last abgeschaltet und vom System getrennt werden. Daraufgehend muss sowohl der PV-Generator als auch die Batterie vom Laderegler getrennt werden. Nun kann die neue Batterie und dann der PV-Generator an den Laderegler angeschlossen werden. Als letztes wird die Last wieder angeschaltet.

### 3.3 Batteriesysteme

#### 3.3.1 Vor- und Nachteile von 2 Batterietypen

Die beiden am häufigsten verwendeten Akkumulatoren sind Blei- und Lithium-Ionen-Akkus. Blei Akkus haben zum Vorteil, dass sie schon sehr lange, beispielsweise für Kraftfahrzeuge, in der Benutzung sind und so sehr weit optimiert werden konnten. Außerdem sind die Speicher preiswert und leicht zu erwerben. Nachteilig sind sowohl die geringe Energiedichte (im Vergleich mit Lithium Akkus) als auch die Selbstentladung von ca. 10% pro Monat (bei 25°C). Um eine Tiefenentladung zu vermeiden, müssen Bleiakkumulatoren deshalb regelmäßig nachgeladen werden. Dazukommend darf der Akku nicht mit zu hoher Spannung geladen werden um Gasungen und Wasserverluste zu vermeiden. Deshalb muss bei der Wahl eines Batterieraums auf eine gute Durchlüftung geachtet werden.

Lithium-Ionen-Akkus zeichnen sich durch ihre hohe Energiedichte und geringe Selbstentladerate aus. Beachtet werden muss allerdings der höhere Preis und die zeitweilig geringe Verfügbarkeit auf Grund der hohen Nachfrage. Ein weiterer Nachteil ist die Empfindlichkeit der Batteriezellen, weshalb diese mit einem elektronischem Batteriemanagementsystem überwacht und geschützt werden müssen.

Bei der Laderegung von Batteriesystemen ist es besonders wichtig auf die Ladeströme und Spannungen, die Batterieräume als auch auf die Empfindlichkeit der Batteriezellen zu achten, um Beschädigungen des Systems zu vermeiden.

#### 3.3.2 Anforderungen an Batterieräume

Ein Batterieraum sollte trocken, gut belüftet, mit einem Rauchmelder ausgestattet und gleichmäßig im zulässigen Temperaturbereich temperiert sein.

### 3.3.3 Häufig eingesetzten Systemspannungen

Häufige eingesetzte Systemspannungen sind 12 V, 24V, 48V, und 72V. Bei DC-Verbrauchern kann es zu hohen Strömen kommen, weshalb große Kabelquerschnitte vorteilhafter sind.

### 3.4 Wechselrichter in PV-Insulanlagen

#### 3.4.1 Auswahlkriterien eines Insel-Wechselrichters

- Die Leistung des Umrichters muss an die Leistungsanforderungen des Insel-Netzes angepasst werden.
- Die Signalqualität der Spannung muss auch unter Last in den erfordernten Grenzen der Verbraucher bleiben.
- Der Wirkungsgradbereich muss nach dem Lastverhalten des Inselnetzes ausgelegt werden.
- Der Umrichter muss die gleiche Phasen-Anzahl besitzen wie das System benötigt.

#### 3.4.2 Insel-Wechselrichter-Typen

Mögliche Umrichter Typen:

- mit oder ohne inneren Trafo
- 3 Level oder Multi Level
- ein oder drei Phasig
- Single- oder Multistring

#### 3.4.3 Schlechte Wechselrichter

- Die Qualität der Spannung ist durch Oberschwingungen und Verzerrungen unzureichend.
- Der Umrichter produziert zu große Mengen an Wärme im Nennlast betrieb.
- Der Momentan-Wirkungsgrad des Wechselrichters kann mit Hilfe von Gleichung 1 bestimmt werden.
- Wenn der Wirkungsgrad bei Nennleistung deutlich unter einem wert von 90% liegt, kann der Umrichter als 'schlecht' bezeichnet werden.

$$\eta_{WR} = \frac{P_{WR,Ein}}{P_{WR,Aus}} \quad (1)$$

#### 3.4.4 Anforderungen an den Einbauort eines Wechselrichters

- Der Einbauort muss vor Witterung schützen.
- Der Umrichter muss gut belüftet sein.
- Die Umgebungstemperatur des Umrichters, darf zu keiner Zeit außerhalb seines angegebenen Temperaturbereichs liegen.
- Die Umrichter sollten für Wartungszwecke leicht zugänglich sein.
- Ein Brand sollte möglichst schnell erkannt werden, durch z.B. Brandmelder und sollte keine anderen Komponenten beeinflussen (durch genügend Abstand oder Abschirmung).

#### 3.4.5 Sofortige Lastabschaltung des Wechselrichters

Bei jedweder Gefahr für die Verbraucher:

- Überspannungen durch z.B. Blitzeinschlag
- Kurzschlüsse durch z.B. Hochwasser
- Feuer am Umrichter.

#### 3.4.6 Auswirkungen der benötigten Blindleistung auf Dimensionierung des Wechselrichters

Durch zusätzlich benötigte Blindleistung muss der Umrichter nicht auf die Leistung des PV-Generators ausgelegt werden, sondern auf die Scheinleistung, welche er ins Netz geben muss. Diese wird also zusätzlich innerhalb des Umrichters generiert, führt aber zu größeren Leistungsflüssen.[1]

#### 3.4.7 Ein PC (einschließlich Peripherie) benötigt 120 W. Der Inselwechselrichter der unter 3. beschriebenen Anlage schaltet wegen Batterieerschöpfung nach 2 Tagen Betriebsdauer ab. Welche Möglichkeit des Dauerbetriebs der Anlage schlagen Sie vor. Begründen Sie die Realisierbarkeit.

Es wird ein sowohl Spannung als auch Strom regelnder Umrichter benötigt, um zwischen Insel- und Netzbetrieb wechseln zu können.

### **3.5 Einstrahlung und Umgebungsbedingungen**

#### **3.5.1 Messverfahren zur Erfassung der Globalstrahlung**

Es gibt 2 Physikalische Effekte, welche konventionell zur Messung der Globalstrahlung verwendet werden. Der Photo-Effekt, welcher in Pyranometern mit Halbleitersensoren verwendet wird. Dieser Basiert auf dem selben Prinzip wie eine Photovoltaikzelle und setzt die Einstrahlung in Proportion mit dem Strom. Der Seebeck-Effekt wird genutzt, welcher in thermischen Pyranometern zur Anwendung kommt. Es wird eine von zwei miteinander verbundenen Metallplatten durch die Bestrahlung aufgeheizt. Der Seebeck-Effekt besagt, dass durch eine Temperaturdifferenz zwischen 2 Leitermaterialien eine elektrische Spannung entsteht.[2] Dies hat den Vorteil, dass ein viel größerer Teil des Spektrums gemessen wird.

#### **3.5.2 Einfluss diffuser und direkter Sonnenstrahlung auf die Leistung des PV-Generators**

Der PV-Generator kann problemlos sowohl bei direkter als auch diffuser Bestrahlung Leistung entnehmen. Jedoch hat die diffuse Einstrahlung eine geringere spezifische Leistung, da sie mehr Weg durch die Atmosphäre zurückgelegt hat und somit einige Wellenlängen durch Absorptionsbänder herausgefiltert wurden.

#### **3.5.3 Modultemperatur**

Die Modultemperatur wird durch mehrere Faktoren beeinflusst: die Umgebungstemperatur, die Bestrahlungsstärke und die Einbauart, wie zum Beispiel hinterlüftet, aktive Kühlung etc.

Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle Wellenlängen des Sonnenlichts in einem Modul in Wärme umgewandelt werden, nur welche mehr Energie als die Bandlücke besitzen. Diese erzeugen zwar auch ein Elektron-Loch-Paar, generieren aber durch die Übererregung Wärme innerhalb des Halbleiters. Die Modul Temperatur hat direkten Einfluss auf die Leistung des PV-Moduls. Bei steigender Temperatur sinkt die Modulspannung deutlich und der Modulstrom steigt minimal.

## 4 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde entsprechend der Anweisungen aus der Laboranleitung [3] durchgeführt. Zu Beginn wird unter Anleitung und Erklärung der Laborleitung Fr. Kupzok die Funktionalität der Anlage geprüft und sichergestellt, so dass die Anlage und Komponenten korrekt angeschlossen sind.

Die erste Messung hat das Ziel den Generatorwirkungsgrad beider PV-Generatoren im Aufbau 2 (DC-Betrieb) zu bestimmen. Zusätzlich wird jeweils eine PV-Kennlinie aufzuzeichnen. Hierfür wird die benötigte Mess-technik angeschlossen und ein verstellbarer Widerstand verschaltet. Während der Versuche wird die Bestrahlungsstärke mit einem Pyranometer gemessen.

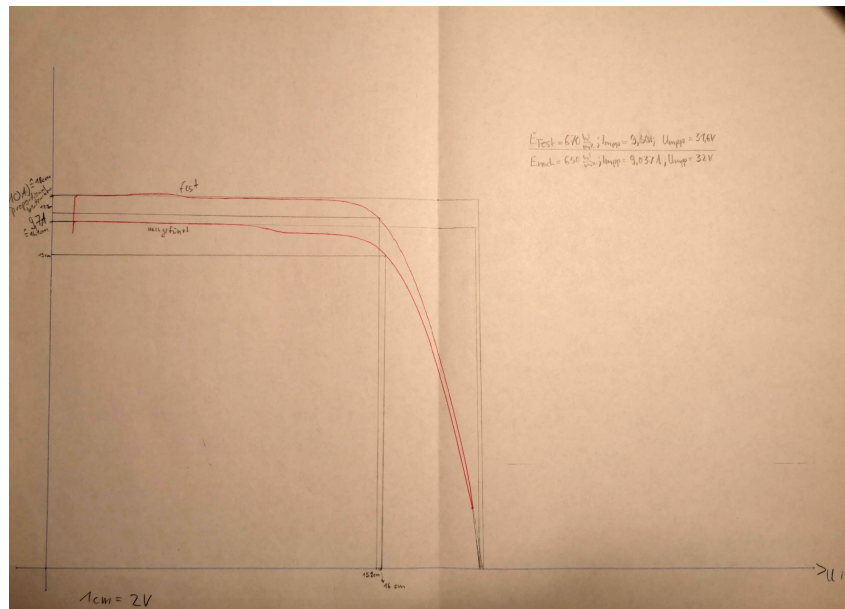


Abbildung 5: Kennlinie des PV-Generators in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

Mittels des verstellbaren Widerstandes wird das System in den Leerlauf geführt und dann die Leerlaufspannung bestimmt. Durch das Überbrücken des Widerstandes wird der Kurzschlussfall herbeigeführt und der Kurzschlussstrom gemessen.

Im zweiten Teil des Versuches wird Aufbau 1 verwendet, welcher den AC-Betrieb ermöglicht. Ziel des zweiten Teils ist die Ermittlung der in der Anleitung [3, S.8] aufgeführten Kennwerte.

Hierzu gehören die Umgebungstemperatur, Bestrahlungsstärke, sowie Span-



nungen und Ströme an den relevanten Komponenten. Zusätzlich wird auch der zeitliche Spannungsverlauf des Wechselrichters auf der AC-Seite mit einem Oszillogramm aufgenommen. Diese Kennwerte werden für die folgenden Belastungsfälle bestimmt:

- Ohne Last, nur der Wechselrichter ist in Betrieb
- geringe Ohmsche-induktive Last, Staubsauger Stufe 1
- mittlere Ohmsche-induktive Last, Staubsauger Stufe 2
- hohe Ohmsche-induktive Last, Staubsauger Stufe 3
- rein Ohmsche Last, S-Bahn-Heizung

## 5 Auswertung

### 5.1 PV-Generatorwirkungsgrad

Die Messungen erfolgen bei 26°C um 12:37Uhr Ortszeit. Nach Aufnahme der grafischen Kennlinie aus Abbildung 5 wird eine Auswertung vorgenommen und die Werte in Tabelle 1 eingetragen. Der MPP wird mithilfe der Tangentensteigung abgeschätzt.

Tabelle 1: Messdaten von Strom und Spannung in Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke

	$U_{Leer}$ in V	$I_K$ in A	$U_{MPP}$ in V	$I_{MPP}$ in A	E in $\frac{W}{m^2}$	FF in %	A in $m^2$
feststehende Anlage	41,7	10	31,6	9,5	670,10	0,72	0,36
nachgeführte Anlage	41,6	9,7	32	9,37	650,00	0,74	0,36

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{Gen}}{P_{Sonne}} = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A_{Module}} \quad (2)$$

#### 5.1.1 Feststehende Anlage

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad (3)$$

Um den Wirkungsgrad des PV-Generators zu bestimmen muss zunächst die Leistung im MPP über Formel Gleichung 3 bestimmt werden:

$$P_{MPP} = 31,6V \cdot 9,50A = 300,2W$$

Die Leistung eingesetzt in Formel Gleichung 2:

$$\eta_{Gen, fest} = \frac{300,2W}{670 \frac{W}{m^2} \cdot 8 \cdot 0,36m^2} = 0,15557 \approx 15,56\%$$

Der Wirkungsgrad der feststehenden Anlage beträgt 15,56%.

#### 5.1.2 Nachgeführte Anlage

Um den Wirkungsgrad des PV-Generators zu bestimmen muss zunächst die Leistung im MPP über Formel Gleichung 3 bestimmt werden:

$$P_{MPP} = 32V \cdot 9,037A = 289,18W$$

Die Leistung eingesetzt in Formel Gleichung 2:

$$\eta_{Gen,nach} = \frac{289,18W}{650 \frac{W}{m^2} \cdot 8 \cdot 0,36m^2} = 0,1544 \approx 15,44\%$$

Der Wirkungsgrad der nachgeführten Anlage beträgt 15,44%.

### 5.1.3 Bewertung der Ergebnisse

Laut Datenblatt des SW-8046 beträgt der  $P_{MPP}$  des Moduls bei  $1000 \frac{W}{m^2}$  bis zu  $60Wp$ . Die Leistung eingesetzt in Formel Gleichung 2:

$$\eta_{Modul} = \frac{60W}{1000 \frac{W}{m^2} \cdot 0,36m^2} = 0,16 \approx 16\%$$

Für monokristalline PV-Module aus dem Jahr 2008 ist ein Modul Wirkungsgrad von 14-18% plausibel. Eine Wirkungsgradminderung von 3,75-7,5% sind für einen Zeitraum von 15 Jahren wahrscheinlich. Im Bezug auf die Wirkungsgrade sind die Module gut erhalten. Weitere Verlustquellen können die langen Kabel und geringfügige Beschädigungen der Solarzellen darstellen. Auffällig ist, dass der Wirkungsgrad der nachgeführten Anlage etwas geringer im Vergleich zur feststehenden Anlage ausfällt, obwohl der Ausrichtungswinkel günstiger ist. Diese Beobachtung ist auf die instabilen Wetterverhältnisse während den zwei Messungen zurückzuführen und die hieraus unterschiedliche Bestrahlungsstärke. Die Wirkungsgrade für beide PV-Generatoren sind demnach naheliegend.

## 5.2 Wechselrichter

### 5.2.1 Wirkungsgrad Kennlinie

Laut Datenblatt hat der Wechselrichter Sunny Island 2224 im Betrieb und ohne Last, einen Eigenverbrauch von 21W. In unserem Fall lag der Ei-

genverbrauch ohne Last bei 29,7 W. Der Eigenverbrauch wird dabei nach Formel Gleichung 4 aus der Leistung am LR im Leerlauf bestimmt. Der Eigenverbrauch des Wechselrichters hat seine Ursachen dabei größtenteils aus den Schaltvorgängen, der in ihm verbauten Halbleiter, und den Ohmschen Widerständen.

$$P_{\text{Eigenverbrauch}} = U_{LR} \cdot I_{LR} \quad (4)$$

Tabelle 2: Messdaten der Ströme, Spannungen und Leistungen

Aufgabe	$P_{\text{Sonne}}$	$U_{\text{Gen}}$	$I_{\text{Gen}}$	$U_{LR}$	$I_{LR}$	$I_{\text{Batt}}$	$I_{WR}$	$P_{AC}$	$U_{AC}$	$I_{AC}$	f
$WR_{\text{allein}}$	$690 \frac{W}{m^2}$	39,3 V	0,84 A	25,4 V	1,17 A	0,15 A	0,97 A	12 W	229,83 V	0 A	50Hz
$Staub_1$	$550 \frac{W}{m^2}$	33,6 V	7,84 A	24,5 V	8,9 A	-10,5 A	21,9 A	510 W	228,5 V	3,04 A	55Hz
$Staub_2$	$460 \frac{W}{m^2}$	32,2V	12,49 A	23,3 V	15,6 A	-27,2 A	43,4 A	942 W	227,47 V	4,33 A	50Hz
$Staub_3$	$471 \frac{W}{m^2}$	36,8 V	7,66 A	23,2 V	10,94 A	-46,2 A	57,3 A	1208 W	226,98 V	5,05 A	50Hz
$Heizung$	$601 \frac{W}{m^2}$	34,8 V	16,15 A	23,2 V	20,51 A	-33,7 A	55,7 A	1186 W	227,4 V	5 A	50Hz

Der Wirkungsgrad des Wechselrichters berechnet sich nach folgender Formel:

$$\eta_{WR} = \frac{P_{AC}}{P_{WR, \text{Ein}}} \quad (5)$$

Dabei ist in Abbildung 6 zu erkennen, dass der Wirkungsgrad des Wechselrichters sich nicht linear verhält. Zunächst ist sehr niedrig und nähert sich dann einem Maximum an. Anschließend fällt der Wirkungsgrad wieder leicht ab, was an den steigenden Ohmschenverlusten liegt, die bei immer höher werdenden Strömen immer größer werden. Der maximale Wirkungs-

Tabelle 3: Wirkungsgrad und Leistungsbeiwert

Aufgabe	$WR_{\text{allein}}$	$Staubsauger_1$	$Staubsauger_2$	$Staubsauger_3$	S-Bahn Heizung
Wirkungsgrad_WR	49%	95%	93%	91%	92%
cos(phi)	0,00	0,73	0,96	1,05	1,04

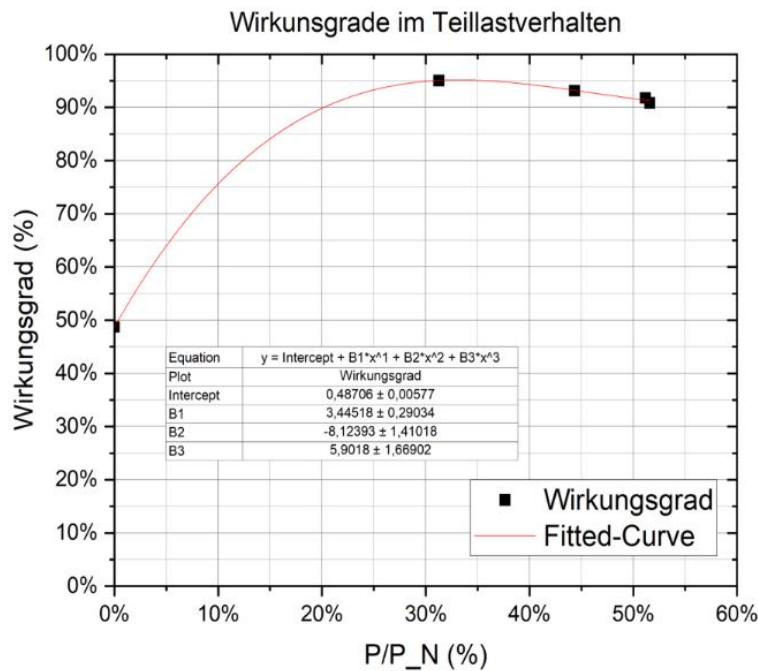


Abbildung 6: Wirkungsgradkennlinie des Wechselrichters in Abhängigkeit der Auslastung

grad liegt bei uns sogar bei 95 Prozent (Abbildung 6). Dies ist sogar 2 Prozent über dem Wirkungsgrad den der Hersteller angibt. Die ermittelte Kurve für den Wirkungsgrad ist dabei gut mit der Theorie zu vereinbaren. Des Weiteren ist zu erkennen, dass dieser Wechselrichter bereits ab 30 % der Nennleistung sehr hohe Wirkungsgrade beseitzt, was ihn besonders gut macht für Standorte, die häufig Teilleistung liefern.

### 5.2.2 Frequenz- und Spannungsstabilität

Wie in unseren Messwerten zu sehen liegt die Spannung zwischen 226V und 230V. Die Spannung nimmt dabei mit steigender Leistung ab. Diese Werte passen auch sehr gut mit den Datenblattwert von 230 Volt zusammen. Die Frequenz bleibt dabei konstant bei 50 Hertz, wie man auf den Oszilloskopbildern erkennen kann. Jedoch ist auch zu erkennen, dass der Sinus nur im Leerlauf und beim Anschließen der Straßenbahnheizung ohne Oberschwingungen daherkommt. Dies liegt daran, dass hier ausschließlich Wirkleistung benötigt wird. Beim Anschließen des Staubsaugers erkennt man in Abbildung 7 die Oberschwingungen die entstehen. Dies liegt daran, dass der Staubsauger auch Blindleistung benötigt.

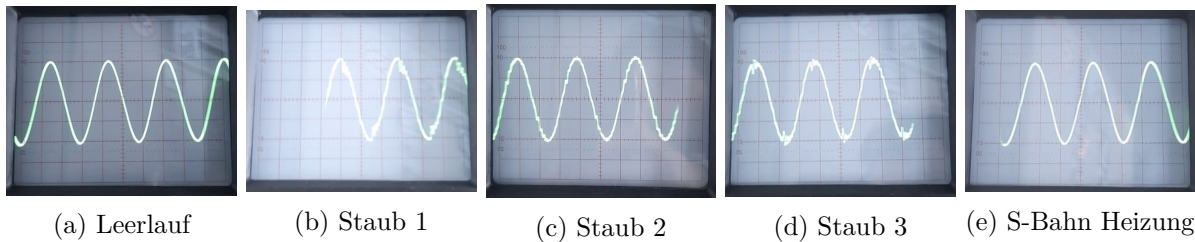


Abbildung 7: Oszilloskopbilder bei verschiedenen Belastungen

### 5.2.3 Leistungsbeiwert

Der Leistungsbeiwert  $\cos(\phi)$  berechnet sich nach Gleichung 6:

$$\cos(\phi) = \frac{P_{AC,Wirk}}{I_{AC} \cdot U_{AC}} \quad (6)$$

Dabei ist in der Tabelle zu sehen, dass bei immer größerer Leistung beim Staubsauger der Leistungsbeiwert sich immer näher an 1 annähert (??), was bedeutet, dass fast nur Wirkleistung benötigt wird. Leider ist es nicht möglich den Leistungsbeiwert anhand unserer Oszilogramme zu bestimmen. Dies liegt daran, dass es nicht möglich war ein stehendes Bild zu erzeugen, anhand dessen es möglich wäre eine Aussage über den Phasenversatz zu machen. In der Theorie sollte mit steigendem Blindleistungsbedarf ein immer größer Phasenversatz zu sehen sein.

## 5.3 Leistungsbilanz

### 5.3.1 Leistungsbilanz

Tabelle 4: Leistungsbilanz

Verbraucher	$P_{Sonne}$	$P_{Gen_{DC}}$	$P_{LR}$	$P_{Bat}$	$P_{WRE}$	$P_{AC}$	$P_{Verluste}$	Verluste
$WR_{allein}$	$690 \frac{W}{m^2}$	33,01W	29,72W	-3,81W	24,64W	12W	17,20W	59%
$Staub_1$	$550 \frac{W}{m^2}$	263,42W	218,05W	257,25W	536,55W	510W	10,67W	2,05%
$Staub_2$	$460 \frac{W}{m^2}$	402,18W	363,48W	633,76W	1011,22W	942W	93,94W	9,07%
$Staub_3$	$471 \frac{W}{m^2}$	281,89W	253,81W	1071,84W	1329,36W	1208W	145,73W	10,8%
$Heizung$	$601 \frac{W}{m^2}$	562,02W	475,83W	781,84W	1292,24W	1186W	157,86W	11,75%

Tabelle 4 stellt die gemessene Leistung im Bezug auf die einzelnen Anlagenkomponenten dar. Im Belastungsfall ohne Verbraucher nimmt die Batterie 3,81W Leistung auf. In allen anderen Fällen reicht die vom PV-Generator

bereitgestellte Energie nicht aus um die Verbraucher direkt zu betreiben, weshalb die Batterie Energie abgibt. Die größten Verluste treten im Betrieb ohne zusätzliche Last auf. Bei geringer Last sind die Verluste mit 2,05% am geringsten. Beim Erhöhen der Last steigen die Verluste prozentual ebenfalls. Die instabilen Wetterverhältnisse beeinflussen die Messdaten zu erkennen in der schwankenden Bestrahlungsstärke.

### 5.3.2 Verlustquellen

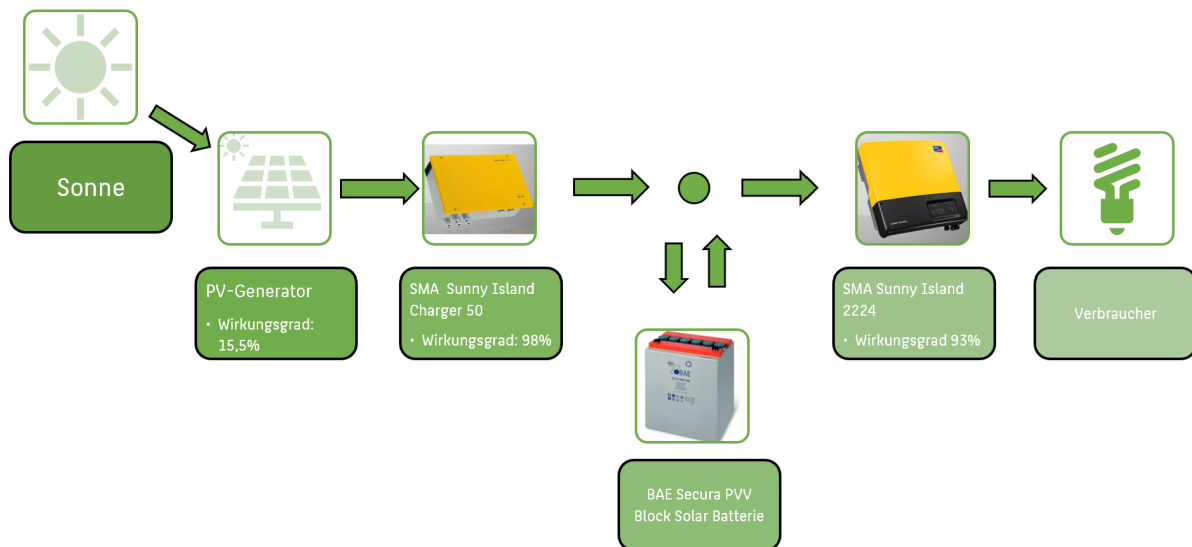


Abbildung 8: Leistungsbilanz der Anlage

Abbildung 8 stellt schematisch den Anlagenaufbau und Leistungsfluss dar. Hierbei ist der erste Verlustfaktor der Anlagenwirkungsgrad da nicht 100% der Sonnenenergie in Leistung umgewandelt werden kann. Der Wirkungsgrad des verwendeten Ladereglers liegt bei 98%, womit es zu geringfügigen Verlusten kommt. Je nachdem ob es einen Leistungsüberschuss oder ein Leistungsdefizit gibt, stellt die Batterie Strom zur Verfügung. Die Selbstentladung von 2% pro Monat der Batterie kann in diesem Fall vernachlässigt werden, da im betrachteten Fall die Messdauer sehr kurz ist. Der Wechselrichter besitzt einen Wirkungsgrad von 93%. Im Wechselrichter kommt es zu den höchsten Umwandlungsverlusten bei der Umwandlung von DC in AC Spannung. Über die Leistungsbilanz ohne Verbraucher können der Eigenverbrauch des Ladereglers und des Wechselrichters als weitere



Verlustquelle bestimmt werden. Für den Laderegler ergibt das:

$$P_{LR_{Eigen}} = P_{Gen} - P_{LR} = 33,01W - 29,72W = 3,29W$$

Im Datenblatt des SUNNY ISLAND Charger 50 wird ein Eigenverbrauch von unter 5W im Tagesbetrieb angegeben. Für den Wechselrichter:

$$P_{WR_{Eigen}} = P_{WRE} - P_{AC} = 24,64W - 12W = 12,64W$$

Im Datenblatt des SUNNY ISLAND wird ein Eigenverbrauch von 21W angegeben. Die Länge der Kabel stellen eine weitere Verlustquellen dar.

### 5.3.3 Vor-und Nachteile Direktbetrieb einer PV-Anlage

Vorteilhaft am Direktbetrieb einer PV-Anlage sind die günstigen Kosten durch das Wegfallen von Batterie, Laderegler und Wechselrichter. Der Aufbau von Anlagen ohne die aufgeführten Komponenten ist unkomplizierter. Einerseits gibt keine Bauteile bedingten Leistungsverluste im Betrieb, andererseits arbeitet die Anlage nicht dauerhaft im MPP wodurch im mittel geringere Leistungsausbeuten auftreten können. Durch die fehlende Batterie ist es nicht möglich Energie speichern, wodurch Insel-Systeme keine Tage mit geringer Bestrahlungsstärke überbrücken können.

## 6 Quellen

### Literatur

- [1] Blindleistung. <https://www.sma.de/partner/expertenwissen/sma-verschiebt-die-phase>. Accesed 02.05.2023-11:29.
- [2] Thermoelektrizität. <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelektrizit%C3%A4t#Seebeck-Effekt>. Accesed 30.04.2023-14:01.
- [3] Labor regenerative energien - zusammenwirken und energiebilanzen in dezentralen speichergestützten photovoltaik-anlagen. [https://moodle.htw-berlin.de/pluginfile.php/1749734/mod\\_resource/content/3/Anleitung%20PV-Insel%2020230427.pdf](https://moodle.htw-berlin.de/pluginfile.php/1749734/mod_resource/content/3/Anleitung%20PV-Insel%2020230427.pdf). Accesed 06.05.2023-21:09.

## **7 Anhang**

Die Messwerte sind in der Datei 'PV-Inselversuch-GR5.xls' zu finden.