



Laborübung Photovoltaik

Manuskript

Fachhochschule Vorarlberg
Studiengang
Elektrotechnik DUAL im Zuge der LVA **Elektrotechnik Einführungslabor**
Energietechnik und Energiewirtschaft im Zuge der LVA **Erneuerbare Energien**

Version 1.0
© PV-FHV

Dornbirn, 20.01.2020

Zusammenfassung

Diese Laborübung ist für Technikstudenten und interessierte mit dem Hintergrund Energie bestimmt. Dabei lehrt diese Laborübung zuerst die Grundlagen der Photovoltaik welche das Verständnis für diese Technologie verdeutlichen sollen. Danach beantwortet sie interessante Fragen welche ausführliche Antworten enthalten und bietet Beispiele mit detaillierten Lösungen. Diese Beispiele gelten als ein guter Ansatz für eigenen Photovoltaiküberlegungen zuhause. Das Manuskript führt zuerst zielgerecht in die Laborübung ein und diese anschließend strukturiert durch. Im Rahmen dieser Laborübung wird überprüft, welchen Einfluss Ausrichtung, Neigungswinkel und Verschmutzung auf die Stromproduktion eines Photovoltaikmoduls haben. Die Ergebnisse können dann durch Studenten analysiert und mit unterschiedlichen Diagrammen auf der PV-FHV Homepage verglichen und evaluiert werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen, Begriffe und Nützliches	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Lernziele	1
1.2 Theoretische Grundlagen und verfügbare Technik	1
1.2.1 Geschichte	1
1.2.2 Verfügbare Technik	1
1.2.3 Grundlagen	2
2 Laborvorbereitung	5
2.1 Fragen und Antworten	5
2.2 Übungsaufgaben	6
3 Versuchsdurchführung	7
3.1 Aufbau und Vorbereitung	7
3.2 Durchführung	8
3.3 Reflektion der Lernergebnisse	8
4 Lösungen zu den Übungsaufgaben	9
4.1 Lösung zu Beispiel 1	9
4.2 Lösung zu Beispiel 2	10
Literaturverzeichnis	11

Abkürzungen, Begriffe und Nützliches

PV

Photovoltaik

WEEE

“Waste electrical and electronic Equipment” bzw. Richtlinie 2002/96/EGu

Degradation

Degradation bezeichnet die Leistungsminderung von Photovoltaik Modulen im Laufe der Zeit.

Bifaciale Module

Vertikale, Ost-West ausgerichtete Module die von beiden Seiten genutzt werden können. In der Praxis kein großer Nachteil gegenüber südausgerichteten Modulen. Vorteil: Grünflächen können wieder besser ausgenutzt werden.

Unterschied Energieautonom und Energieautark

Im Unterschied zur Energieautonom ist ein 100 % Energieautarkes Haus komplett eigenständig, versorgt sich zu jeder Zeit selbst und benötigt von außen keine zusätzliche Energie. Bei der Autonomie wird über das Jahr gerechnet alle Ein- und Ausspeisungen bilanziert und in % angegeben. Der Autarkiegrad kann auch in 0-100 % angegeben werden.

Energieeinheiten

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg (m/s)}^2$$

$$1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ Ws}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$$

Energieäquivalente

$$1 \text{ m}^3 \text{ Erdgas} = 1 \text{ l Öl} = 1 \text{ l Benzin} = 1 \text{ kg Kohle} = 2 \text{ kg Holz} = 10 \text{ kWh elektrische Energie}$$

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkungsgrade unterschiedlicher Photovoltaikanlagen (Quaschning, 2018) .	2
Abbildung 2: Messreihe über das Jahr 2019, jeweils am 1sten des Monats; Quelle: eigene Ausarbeitung mit angenommenen Werten.....	3
Abbildung 3: Einspeisung PV; Quelle: eigene Ausarbeitung.....	3
Abbildung 4: Beispiel 1; Quelle: eigene Ausarbeitung	6
Abbildung 5: Beispiel 2; Quelle: eigene Ausarbeitung	6
Abbildung 6: Wagen mit eingefahrenen PV-Modulen; Quelle: eigene Ausarbeitung	7
Abbildung 7: Lösung zu Beispiel 1; Quelle: eigene Ausarbeitung	9
Abbildung 8: Lösung zu Beispiel 1; Quelle: eigene Ausarbeitung	10

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: PV-Tabelle; Quelle: eigene Ausarbeitung 8

1 Einleitung

1.1 Lernziele

- Sensibilisierung der Studenten in Bezug auf erneuerbare Energieformen, um die Wichtigkeit und die Vorteile deren kennenzulernen und einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.
- Problemstellungen anhand handlungsorientierteren Aufgaben zielgerecht lösen und analysieren
- Förderung der Problemlösekompetenz bzw. berufliche Handlungskompetenz durch die Methodik des problembasierten Lernens.

1.2 Theoretische Grundlagen und verfügbare Technik

Unter PV versteht man die direkte Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Der Begriff leitet sich aus dem griechischen Wort „Licht“ (φωτός = photos) und der Einheit für die elektrische Spannung, dem Volt ab. 500 GW an elektrischer PV-Leistung waren bis Ende 2018 weltweit installiert. Das Wachstum betrug zwischen 1998 und 2015 im Mittel 38 %. Bis 2030 wird eine installierte Leistung von 10.000 GW und bis 2050 30.000 - 70.000 GW erwartet. Durch die laufend sinkenden Kosten gilt die Aussage das PV die teuerste Form von erneuerbarer ist als überholt. (Nancy & al, 2019, S. 836-838)

1.2.1 Geschichte

Der Photoeffekt wurde bereits 1839 von Alexander Becquerel entdeckt, wobei er zwei Metallplatten in eine verdünnte Säure eintauchte und bei Sonneneinstrahlung Energieerzeugung beobachtete. Die physikalischen Hintergründe zum Photoeffekt konnte erst 1905 von Albert Einstein erklärt werden, für welchen er 1922 den Nobelpreis erhielt. 1950 wurde die erste Siliziumzelle gebaut und um die 1990'iger Jahre erfolgte die Einführung der Technologie in die Gesellschaft. Im Jahre 2012 war Photovoltaik bereits ein ernsthafter Teilnehmer der Gesamtstromproduktion. 2016 ist der Batteriespeicher mit Photovoltaik bereits gelebte Realität. (Markstaller, 2018)

1.2.2 Verfügbare Technik

Grundsätzlich wird zwischen drei Begriffen unterschieden:

- Solarzelle oder Photovoltaikzelle (einzelne Zelle)
- Solarmodul oder Photovoltaikmodul (Verschaltung mehrerer Zellen zu einer Einheit)
- Solarkollektor oder Solarthermiekollektor (Sonnenenergie für Produktion von Wärme)

1.2.3 Grundlagen

Nennleistung

Sie ist unabhängig von der Strahlung immer gleich und ist definiert durch die Nennleistung der Photovoltaikmodule nicht etwa den Wechselrichtern.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Photovoltaikzelle oder eines Photovoltaikmoduls errechnet sich aus der Eingangsleistung P_{in} (=Strahlungsleistung) und der Ausgangsleistung P_{out} (= abgegebenen elektrische Leistung). Die Strahlungsleistung wiederum berechnet sich aus der Strahlung H mal der Modulfläche A . Der optimale Wirkungsgrad wird anhand STC (Standard Test Conditions) errechnet, welche eine Strahlungsintensität von $H = 1000 \text{ W/m}^2$, eine Modultemperatur von $T_{Modul} = 25 \text{ °C}$ und das Spektrum AM1.5 voraussetzen. (Markstaller, 2018)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\text{abgegebene elektrische Leistung}}{\text{Strahlungsleistung}} = \frac{P}{H_{STC} * A} \quad (1)$$

Grundsätzlich besagt ein hoher Wirkungsgrad das weniger Fläche für eine Photovoltaikanlage benötigt wird. Bei der Konzentratorfläche, siehe Abbildung 1, ist nur die photovoltaisch aktive Fläche gemeint. In nachfolgender Abbildung wird ersichtlich das Amorphes = nicht kristallines Silizium den schlechtesten Wirkungsgrad hat.

Zellmaterial	Maximaler Zellwirkungsgrad im Labor	Maximaler Wirkungsgrad (Serienproduktion)	Typischer Modulwirkungsgrad	Flächenbedarf pro kWp
Monokristallines Silizium	25,8 %	24 %	19 %	5,3 m ²
polykristallines Silizium	22,3 %	20 %	17 %	5,9 m ²
Amorphes Silizium	14,0 %	8 %	6 %	16,7 m ²
CIS/CIGS	22,6 %	16 %	15 %	6,7 m ²
CdTe	22,1 %	17 %	16 %	6,3 m ²
Konzentratorzelle ^{A1}	46,0 %	40 %	30 %	3,3 m ²

Abbildung 1: Wirkungsgrade unterschiedlicher Photovoltaikanlagen (Quaschnig, 2018)

Energie

Bei der Stromproduktion wählt man die elektrische Energie W mit der Einheit [Wh]. Diese berechnet sich aus dem Produkt von Leistung mal Zeit. Für die allgemeine Form gilt:

$$W = \int P * dt \quad (2)$$

Der Endverbrauch über ein Jahr wird in der Praxis als Messreihe dargestellt, siehe Abbildung 2. Mit dieser Messreihe kann durch aufsummieren die Jahresenergie W berechnet werden.

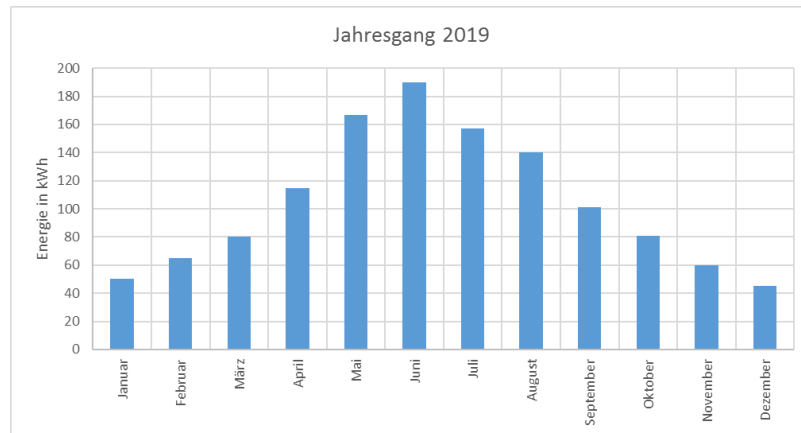


Abbildung 2: Messreihe über das Jahr 2019, jeweils am 1sten des Monats; Quelle: eigene Ausarbeitung mit angenommenen Werten

Aufstellung der Photovoltaikmodule

Bei der Aufstellung ist auf gegenseitige bzw. anderweitige Abschattung zu achten, in der Praxis bezieht man sich oft auf den 21.12 (Sonnentiefstand). Die Module können auf einem Flachdach aufgeständert, auf einem Schrägdach angebracht, auf einer Freifläche aufgestellt (evtl. auch bifacial) oder als Indach-Lösung ausgeführt werden. Dabei liegt der ideale Neigungswinkel zwischen 30 und 45°. (Markstaller, 2018)

Einspeisung

Grundsätzlich muss bei der Einspeisung einer PV-Anlage ins Netz, hier 250 V, siehe Abbildung 3, zwecks Spannungsfall, die Spannung tendenziell höher sein als die des nächsten Transformators, hier 240 V. Wiederum auch muss der Transformator, hier 240 V liefern, um im Haus, hier 230 V, sicherzustellen.

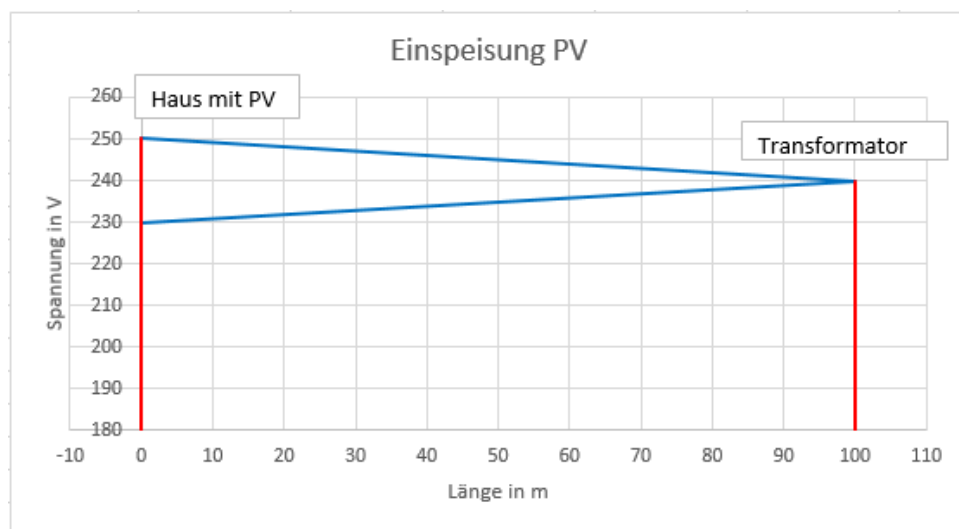


Abbildung 3: Einspeisung PV; Quelle: eigene Ausarbeitung

Spezifischer Ertrag

Der spezifische Ertrag Y (englisch Yield) errechnet sich aus der Jahresenergie W durch die Nennleistung P .

$$Y = \frac{W}{P} = \frac{\text{Jahresenergie}}{\text{Nennleistung}} = \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kW}} \right] \quad (4)$$

In unseren österreichischen Breitengraden beträgt Y etwa 1.000 kWh/kW.

Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten C_{Str} sind die kWh-Kosten für welche man bei der Herstellung benötigt. Dabei errechnet sich diese aus den Anfangsinvestitionskosten C_0 durch die Gesamtstromproduktion W_E Mal der Amortisationsdauer n .

$$C_{Str} = \frac{C_0}{W_E * n} = \frac{\text{Anfangsinvestition}}{\text{Jahresenergie} * \text{Anzahl Jahre}} = \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \quad (5)$$

Allerdings ist diese Betrachtung nicht ganz richtig, weil die Stromgestehungskosten zu einem anderen Zeitpunkt entstehen wie die Investition und Geldbeträge haben im Laufe der Zeit andere Werte. So haben 100 € heute einen anderen Wert wie in 10 Jahren. Um dies vergleichen zu können benötigt man den Kapitalzins, jedoch wird dies hier nicht mehr behandelt.

2 Laborvorbereitung

Um bestens auf die kommende Laborübung vorbereitet zu sein, ist zu empfehlen nachfolgende Fragen und Antworten durchzulesen und die Übungsaufgaben mithilfe der Einleitung zu lösen.

2.1 Fragen und Antworten

Was für eine Lebensdauer hat Photovoltaik?

Bei Photovoltaik spricht man nicht von Lebensdauer, sondern von Alterung. Der Grund dafür ist der, dass Photovoltaik keine beweglichen Teile oder Komponenten besitzt, welche nach einer gewissen Zeit ihre Funktion verlieren. Die Zellen verschmutzen und Degradieren, deshalb garantieren aktuell Hersteller noch 80 % Leistung nach 25 Jahren.

Wie hoch ist die Recyclingquote bei Photovoltaik?

Eine verbindliche Vorschrift des Europäischen Parlaments zu WEEE besagt, dass 85 % gesammelt und 80 % recycelt werden muss. Derzeit liegt die Recyclingquote über 95 %. Um wertvolle Rohstoffe bzw. seltene Erden nicht aufwändig und damit teuer abbauen zu müssen, ist Recycling die ideale Alternative günstig an diese Stoffe zu kommen.

Wie groß muss eine Anlage sein damit sie sich rentiert?

In unseren österreichischen Breitengraden produziert eine 1 kW Anlage etwa 1.000 kWh elektrische Energie. Dabei benötigt diese etwa 6,5 m² Dachfläche. Die meisten PV-Hausanlagen haben 3-5 kW Leistung jedoch lässt sich pauschal keine konkrete Antwort auf diese Frage geben. (E-Werk Gröbming, 2020)

Ist der Wartungsaufwand hoch?

PV-Anlagen haben nahezu keine Wartungs- Betriebs- und Servicekosten. Auch Staub, Schnee und Schmutz wird meist selbst vom Wetter bereinigt. (E-Werk Gröbming, 2020)

Garantiert mir jemand den jährlichen Ertrag meiner PV-Anlage?

Dadurch dass PV sehr ausgereift ist und die Anzahl der Sonnenstunden im Jahr relativ konstant sind, kann der jährliche Ertrag ziemlich genau berechnet werden. (E-Werk Gröbming, 2020)

2.2 Übungsaufgaben

Beispiel 1

Der Besitzer eines Einfamilienhauses möchte eine eigene PV-Anlage auf seinem Dach, siehe Abbildung 4. Wieviel Leistung kann er bei einer Dachneigung von $\alpha = 30^\circ$, einer Sonneneinstrahlung von $H_{STC} = 1.000 \text{ W/m}^2$ und einem Modulwirkungsgrad von 18 % maximal installieren?

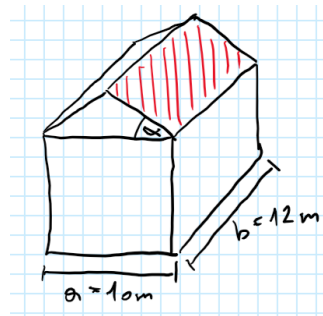


Abbildung 4: Beispiel 1; Quelle: eigene Ausarbeitung

Beispiel 2

Der Besitzer eines Einfamilienhauses am Comosee hat eine 35 m^2 große Anlage auf dem Dach installiert. Die Neigung der PV-Module haben 30° und sind Richtung Osten ausgerichtet. Der Modulwirkungsgrad beträgt 18 %, die Sonneneinstrahlung $H_{STC} = 1.000 \text{ W/m}^2$ und der spezifische Ertrag $Y = 1.200 \text{ kWh/kW}$.

- Wie groß ist der Jahresertrag?
- Der Stromverbrauch beträgt 6.000 kWh bei $0,22 \text{ €/kWh}$ pro Jahr, wie hoch ist seine Stromrechnung?
- Wie hoch sind die Stromgestehungskosten für PV bei 1600 €/kWp bei 0 % Kapitalzins und 25 Jahren.

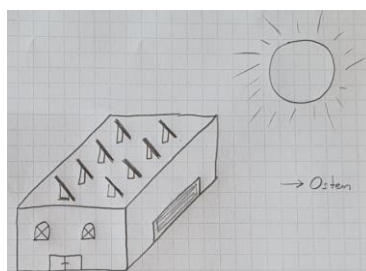


Abbildung 5: Beispiel 2; Quelle: eigene Ausarbeitung

3 Versuchsdurchführung

In dieser Laborübung sollen im Praxisteil die zwei Photovoltaikmodule (Photovoltaikwagen) ausgemessen und dokumentiert werden. Anschließend werden im Labor die ausgemessenen Werte mit denen der PV-FHV installierten Dachanlage verglichen -> Homepage. Es soll im Theorieteil dann verglichen werden wie groß die Unterschiede sind. Zum Schluss sollen die Werte noch mit den vorgegebenen Daten händisch gerechnet werden.

Notwendige Daten für diese Laborübung:

- Homepage PV-FHV: <https://pv.labs.fhv.at/>
- Technische Dokumentation PV-FHV

3.1 Aufbau und Vorbereitung

Der Photovoltaikwagen, siehe Abbildung 6, soll aus dem Laborraum nach Außen transportiert werden. Da sich der Laborraum im Untergeschoss befindet, muss der Wagen mit dem Aufzug in das erste Geschoss gebracht werden. Hierbei ist wichtig, dass sich der Wagen im eingefahrenen Zustand befindet, damit dieser in den Aufzug reinpasst. Draußen angekommen, müssen die Module zuerst ausgefahren und anschließend um den in der Übung vorgegebenen Winkel geneigt werden. Hierbei wird einem bei der nachfolgenden Messung sofort klar, dass die Flächen der PV-Module zur Sonne hinzeigen müssen, um das Potential der PV-Module maximal auszunutzen.

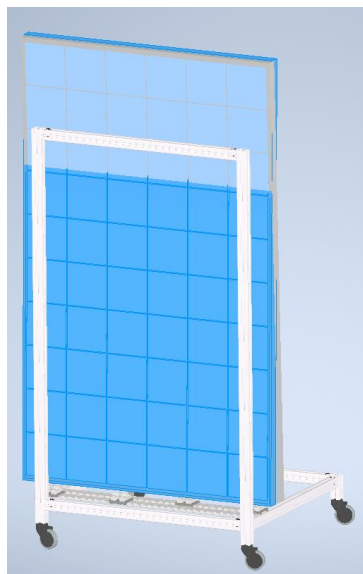


Abbildung 6: Wagen mit eingefahrenen PV-Modulen; Quelle: eigene Ausarbeitung
Es sollte ein Messgerät das Strom und Spannung messen kann mitgenommen werden.

3.2 Durchführung

Die Paneele sollen in verschiedenen Himmelsrichtungen und Winkeln ausgerichtet und beobachtet werden was mit den Strömen und Spannungen passiert. In Tabelle 1 sollen die gemessenen Kurzschlussströme in Ampere und die Leerlaufspannungen in Volt eingetragen werden. Der optimale Winkel soll in jeder der vier Himmelsrichtungen eruiert und dokumentiert werden.

		Tag:				Uhrzeit:			
Ausrichtung		S		SW		SO		N	
Winkel		30°	W_o	30°	W_o	30°	W_o	30°	W_o
Strom I_k									
Spannung U_o									

Tabelle 1: PV-Tabelle; Quelle: eigene Ausarbeitung

S=Süden; SW=Südwesten; SO=Südosten; N=Norden; W_o =Winkel Optimal

Anschließend sollen die Werte mit den PV-FHV Werten am selben Tag und mit derselben Uhrzeit verglichen werden. Was für Unterschiede ergeben sich? Kann mit einem optimaleren Winkel ein höherer Jahresertrag erzielt werden bzw. würde es sich lohnen die PV-Module der Sonne nachzuführen? - Wenn Ja, warum? Was passiert, wenn die PV-Module verschmutzt werden?

- 1.) Berechnen sie den Jahresertrag der beiden Paneele anhand der Technischen Dokumentation PV-FHV.
- 2.) Der elektrische Energieverbrauch der FH-Vorarlberg beträgt jährlich etwa 3.000 MWh. Bei einem Energiepreis von 0,15 €/kWh und einem Einspeisepreis von 0,06 €/kWh, wieviel kann durch die bereits aufgebauten Paneele von PV-FHV plus Photovoltaikwagen jährlich eingespart werden?
- 3.) Wie hoch sind die Stromgestehungskosten bei PV-FHV und 20 Jahren Laufzeit mit 0 % Kapitalzins?
- 4.) Würde es sich rentieren die FHV komplett energieautonom mit PV zu betreiben?

3.3 Reflektion der Lernergebnisse

- Was wurde heute gelernt?
- Würden Sie selbst eine PV-Anlage zuhause installieren?
- Ist es sinnvoll überall auf der Erde eine PV-Anlage aufzubauen?
- Aus welchen Komponenten besteht eine PV-Anlage?
- Wie hoch sind die laufenden Kosten?

4 Lösungen zu den Übungsaufgaben

4.1 Lösung zu Beispiel 1

geg.: Einfamilienhaus

$$\alpha = 30^\circ$$

$$H_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$$

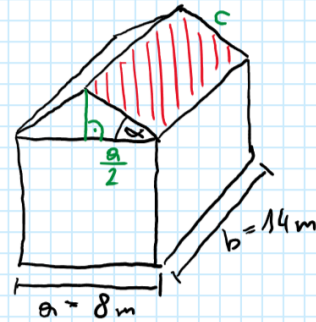
$$\eta = 18\%$$

ges.: $P = ?$

$$\cos(\alpha) = \frac{AK}{H} = \frac{a}{2 \cdot c} \Rightarrow$$

$$c = \frac{a}{\cos(\alpha) \cdot 2} = \frac{8 \text{ m}}{\cos(30^\circ) \cdot 2}$$

$$= \underline{4,62 \text{ m}}$$



$$A = b \cdot c = 14 \text{ m} \cdot 4,62 \text{ m} = 64,66 \text{ m}^2$$

$$P = \eta \cdot A \cdot H_{STC} = 0,18 \cdot 64,66 \text{ m}^2 \cdot 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 11638,8 \text{ W}$$

$$= \underline{11,64 \text{ kW}}$$

Abbildung 7: Lösung zu Beispiel 1; Quelle: eigene Ausarbeitung

4.2 Lösung zu Beispiel 2

geg.: $\alpha = 30^\circ$
 $\eta = 18\%$
 $A = 35 \text{ m}^2$
 $H_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$
 $\gamma = 1000 \text{ kWh/kW}$

ges.: $W = ?$
 $P = ?$
 $C_{\text{Stn}} = ?$

a.) $P = \eta \cdot A \cdot H_{\text{STC}} = 0,18 \cdot 35 \text{ m}^2 \cdot 1000 \text{ W/m}^2 = 6300 \text{ W}$
 $\gamma = \frac{W}{P} \Rightarrow W = \gamma \cdot P = 1000 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}} \cdot 6,3 \text{ kW} = \underline{6,3 \text{ kWh}}$

b.) $P_{\text{el}} = W_G \cdot E = 6000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,22 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = \underline{1320 \text{ €/a}}$

c.) $C_{\text{Stn}} = \frac{C_0}{W_E \cdot \eta} = \frac{1600 \frac{\text{€}}{\text{kW}}}{1000 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}} \cdot 0,25} = \underline{0,64 \text{ €/kWh}}$

Abbildung 8: Lösung zu Beispiel 1; Quelle: eigene Ausarbeitung

Literaturverzeichnis

E-Werk Gröbming. (7. Januar 2020). *Häufig gestellte Fragen*. Von <https://www.das-ewerk.at/de/sonnenkraft/fragen-antworten.php> abgerufen

Markstaller, M. (2018). *Photovoltaik für Ingenieure*. Schweiz: BoD - Books on Demand, Norderstedt.

Nancy, H., & al, e. (2. Januar 2019). Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. 364(Nr. 6443).

Quaschnig, V. (2018). Erneuerbare Energien und Klimaschutz. 4. Auflage.