

# Photovoltaische Zellen

Geschichte, Funktion und Stand der Technik  
photovoltaischer Zellen

**Erik Bünnig**

27.3.2021

Projektarbeit zur alternativen Prüfungsleistung im  
Kurs Elektrotechnik



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
2.1	Begrifflichkeiten . . . . .	2
2.1.1	Photoelektrischer Effekt . . . . .	2
2.1.2	Photovoltaischer Effekt . . . . .	2
2.1.3	Photovoltaische Zelle . . . . .	2
2.2	Historie der Photovoltaik . . . . .	3
2.2.1	Entdeckung . . . . .	3
2.2.2	Nennenswerte Ereignisse . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Grundlegender Aufbau und Funktionsweise</b>	<b>4</b>
3.1	Aufbau . . . . .	4
3.2	Funktionsweise . . . . .	4
3.3	Vorteile . . . . .	5
3.4	Nachteile . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Anwendungsgebiete</b>	<b>7</b>
4.1	Niedrigverbrauchapplikationen . . . . .	7
4.2	Raumfahrt . . . . .	7
4.3	Alternative zu fossilen Brennstoffen . . . . .	7
4.3.1	Kalifornien, USA . . . . .	7
4.3.2	Deutschland . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	<b>9</b>
5.1	Problemstellung . . . . .	9
5.2	Theorie . . . . .	9
5.3	Praxis . . . . .	10
5.4	Konklusion . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Schlusswort</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Quellen</b>	<b>13</b>

# 1 Vorwort

Diese Facharbeit dient als alternative Prüfungsleistung für den Kurs Elektrotechnik (Angewandte Informatik, B.Sc.) an der Fachhochschule Erfurt und behandelt photovoltaische Zellen, deren Anwendungsgebiete und Funktionsweise sowie einen Teil der Historie der Photovoltaik.

Für lesen der digitalen Kopie dieser Facharbeit: alle Quellenangaben sind mit *hyperlinks* verlinkt, Referenzen führen direkt per *hyperref* zu der dazugehörigen Quelle. Alle Sektionen können vom Inhaltsverzeichnis per klick erreicht werden.

Diese Arbeit wurde mit L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X erstellt, Source Code ist verfügbar unter:

Github: [projektarbeit-elektrotechnik](#)

## **2 Einleitung**

### **2.1 Begrifflichkeiten**

#### **2.1.1 Photoelektrischer Effekt**

Wechselwirkung zwischen Photonen und baryonischer Materie, wird in den inneren und äußeren photovoelektrischen Effekt und die Photoionisation unterteilt. Beschreibt die Freisetzung von Elektronen durch Bestrahlung eines Materials mit elektromagnetischer Strahlung [1].

#### **2.1.2 Photovoltaischer Effekt**

Teil des inneren photoelektrischen Effekts, beschreibt Bildung eines Photostroms entgegen der Durchlassrichtung des p-n-Übergangs als Folge von elektromagnetischer Bestrahlung. Dabei werden Ladungsträgerpaare in den dotierten Schichten der des Materials getrennt, daworaufhin sich Elektronen in den n-dotierten Schichten und die Löcher in den p-dotierten Schichten ablagern in so fern sie auf dem weg dahin nicht mit entgegen gesetzten Ladungsträgern zusammenstoßen. Der photovolatische Effekt baut auf der Photoleitung auf, einem weiterm inneren Teil des photoelektrischen Effekts. Der photovoltaische Effekt dient als Grundlage für die Funktionsweise von photovoltaischen Zellen [1].

#### **2.1.3 Photovoltaische Zelle**

Elektrisches Bauelement das auf Grundlage des photovoltaischen Effekts, Strom erzeugt und vorwiegend aus Silizium oder anderen Halbleitermaterialien besteht. Umgangssprachlich werden photovoltaische Zellen oft Solarzellen genannt, dabei wird der Begriff auch als Synonym für Solarpanäle benutzt obwohl diese eine Ansammlung von photolotaischen Zellen, Leiterelementen und strukturellen Bauelementen beschreiben.

## **2.2 Historie der Photovoltaik**

### **2.2.1 Entdeckung**

Die Effekte der Photovoltaik wurden erstmals in 1839 von Andre Edmond Becquerel entdeckt, aber erst weit später praktisch angewendet. Bei der Entdeckung handelte es sich um einen geringen Strom zwischen einer Platin-Anode und -Kathode welcher sich unter Licht verstärkte. [2]

### **2.2.2 Nennenswerte Ereignisse**

- 1876 - Beweis der direkten Konversion von elektromagnetischer Strahlung in elektrische Energie durch William Grylls Adams und Richard Evans Day [2]
- 1907 - Theoretische Erklärung des photoelektrischen Effekts auf Basis der Lichtquantenhypothese (1905) durch Albert Einstein [2]
- 1912 - 1916 - Experimentelle Bestätigung von Einsteins Erklärung durch Robert Andrews Millikan [2]
- 1958 - Erste Verwendung von Solarzellen zur Versorgung eines Satelliten der NASA (Vanguard I) [3]
- 1961 - Entdeckung der Shockley-Queisser-Grenze durch William B. Shockley und Hans-Joachim Queisser, einer theoretischen Höchstgrenze des Wirkungsgrades photovoltaischer Zellen [4]

## 3 Grundlegender Aufbau und Funktionsweise

### 3.1 Aufbau

Die meisten photovoltaischen Zellen haben den gleichen Grundaufbau und nur geringe Unterschiede wie das Muster der vorderen Kontakte oder die chemische Komposition der Anti-Reflexionsschicht [5].

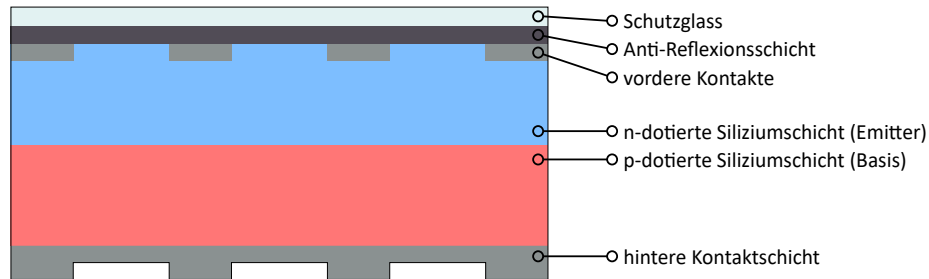


Abbildung 1: Grunlegender Aufbau einer Silizium-basierten Solarzelle

Die Dotierung der Schichten beschreibt einen Prozess bei dem ein Siliziumkristall mit Unreinheiten besetzt wird um dessen elektrische Leitfähigkeit zu beeinflussen. Silizium hat 4 Valenzelektronen und bildet somit Kristallstrukturen durch Kovalente Bindungen. Durch das dotieren mit Atomen mit mehr als 4 Valenzelektronen entsteht eine n-dotierte Schicht, bei dotieren mit Atomen mit weniger als 4 Valenzelektronen eine p-dotierte Schicht.

### 3.2 Funktionsweise

Wenn eine Solarzelle von Licht mit einer Wellenlängen von maximal 1110nm getroffen wird welche nicht reflektiert werden, können diese bei Interaktion mit Atomen in den p- und n-dotierten Schichten Elektronen-Loch-Paare erzeugen.

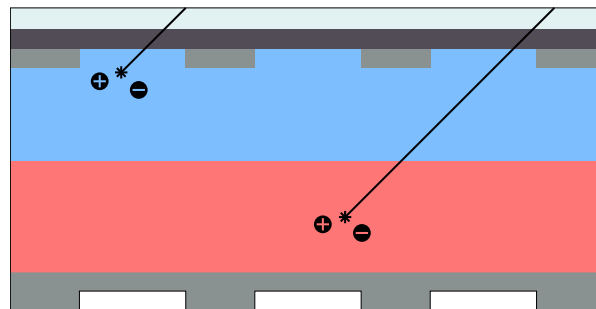


Abbildung 2: Bildung von Elektronen-Loch-Paaren

Durch den photovoltaischen Effekt bewegen sich die befreiten Elektronen in Richtung der n-dotierten Schicht (blau) und Löcher in Richtung der p-dotierten Schicht (rot).

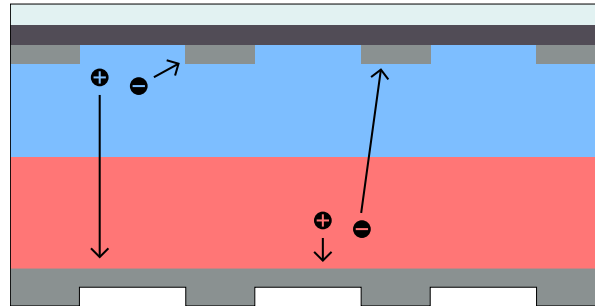


Abbildung 3: Bildung des Photostroms

Der dabei entstehende Strom nennt sich Photostrom und die dabei Entstehende Potentialdifferenz erzeugt eine Spannung welche bei Anlegen eines externen Verbrauchers an die oberen und unteren Kontakte einen Messbaren Strom erzeugt.

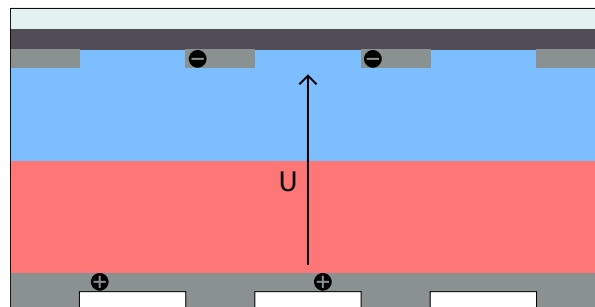


Abbildung 4: Entstehen einer messbaren Spannung

Erst wenn ein externer Verbraucher angeschlossen ist, bewegen sich Elektronen und Löcher zu den nahe gelegenen Kontakten und dann über den Verbraucher zurück in die jeweiligen Schichten.

### 3.3 Vorteile

Nach der Installation von Solarzellen wird kein Rohmaterial oder Energiezufluss benötigt um Energie zu sammeln. Dadurch dass Solarzellen keine beweglichen oder kontaktintensiven Teile besitzen brauchen sie beinahe keine Wartung und sind unanfällig gegenüber feuchten Witterungsverhältnissen [6]. Auch wenn Solarzellen wegen ihrer Umweltunfreundlichen Herstellung oft kri-

tisiert werden, ist der Erntefaktor <sup>1</sup> von Solarzellen etwa 26:1 (4% Energieoffset) im Vergleich zu den durchschnittlich 9:1 (11% Energieoffset) von Kohle- und Ölkraftwerken [7].

### 3.4 Nachteile

Solarzellen sind anfällig für Temperaturschwankungen, bei höheren Temperaturen sinkt die Effizienz von Solarzellen. Die durchschnittliche Energieeffizienz von Solarzellen liegt bei etwa 15% bis 20% (unter Laborkonditionen) [8], das heißt das rund 85% bis 80% der aufgefangenen Sonnenenergie entweder reflektiert oder in Wärme umgewandelt wird, welche wiederum die Effizienz verringert (die überflüssige thermische Energie kann allerdings zur Effizienzsteigerung beitragen, indem sie zur Versorgung von Kühlungsanlagen verwendet wird. [9, 10]. Solarzellen können nur am Tag Energie produzieren und ihre Effizienz sinkt in den Herbst- und Wintermonaten. Photovoltaische Zellen bieten nur dann eine ernstzunehmende Alternative für Nuklear-, Wind-, Hydro- oder sogar fossile Energie, wenn die aufgesammelte Energie auch effizient gespeichert und transportiert werden kann.

---

<sup>1</sup>Beschreibt das Verhältnis zwischen Erzeugter zu verbrauchter Energie



## 4 Anwendungsgebiete

### 4.1 Niedrigverbrauchapplikationen

Solarzellen eignen sich hervorragend zur Energieversorgung für vorwiegend bedienungsfreie Applikationen wie eigenständige Sensoren (z.B.: Wetterstation, Luft- oder Wasserqualitätssensoren), da diese oft einen geringen stetigen Energieverbrauch aufweisen, welcher bei Nacht oder schlechten Wetterverhältnissen mit einer Batterie überbrückt werden kann.

### 4.2 Raumfahrt

Auch für die Stromversorgung von Satelliten oder Raumstationen eignen sich Solarzellen hervorragend, da im Vakuum das Auffangen elektromagnetischer Strahlung nicht durch atmosphärische Effekte beeinflusst wird. Die geringe Masse der Zellen und die draus resultierende Treibstoffeffizienz ist ein weiterer Grund für die Nutzung in der Raumfahrt.

### 4.3 Alternative zu fossilen Brennstoffen

#### 4.3.1 Kalifornien, USA

Der US-Bundesstaat Kalifornien bietet ein gutes Beispiel für sowohl Vorteile als auch Nachteile von Solarenergie. In hinreichend sonnigen Regionen wie Kalifornien reicht die durchschnittliche durch Solar produzierte Energie zum Decken des durchschnittlichen Energieverbrauchs aus. Allerdings sind sowohl Produktion als auch Verbrauch von Energie nicht konstant. Solaranlagen produzieren ihre Energie hauptsächlich zwischen 7 Uhr und 18 Uhr.

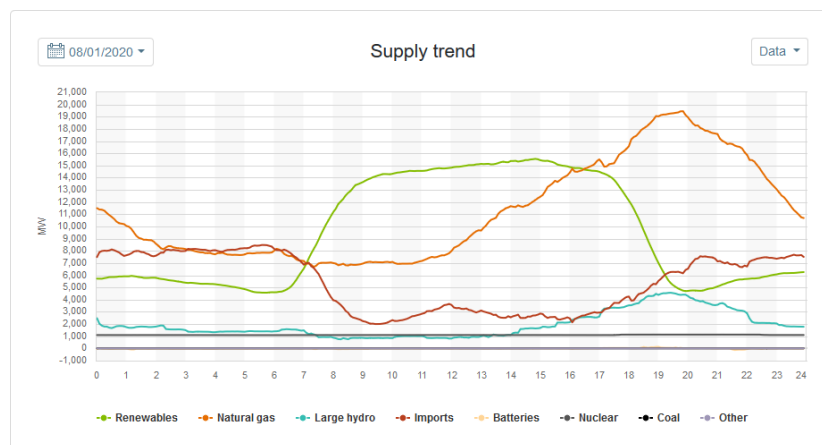


Abbildung 5: Angebot an Energie in Kalifornien, USA, 01.08.2020 [11]

Der tägliche Verbrauch erreicht vor allem um 17 Uhr bis 22 Uhr Höchstwerte.

Nächte und Schlechtwettertage müssen dann durch gespeicherte, importierte oder lokale nicht-Solarenergie überbrückt werden, trotz der großartigen Voraussetzungen für Solarenergie. [12, 13]

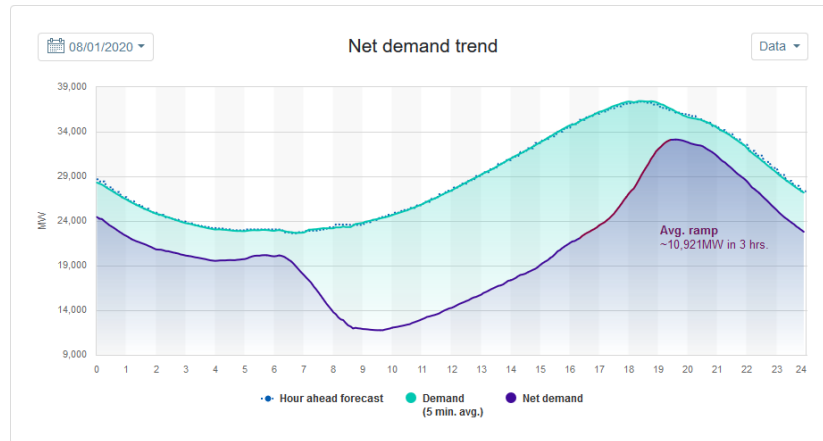


Abbildung 6: Nachfrage an Energie in Kalifornien, USA, 01.08.2020 [14]

#### 4.3.2 Deutschland

In Deutschland wird Solarenergie seit 2000 zunehmend ausgebaut und staatlich gefördert, von 2000 bis 2011 stieg der Solarenergieanteil von 64GWh auf 19TWh, befindet sich aber mit einem Energienteil von gerade mal rund 7% (stand 2019) noch lange nicht auf dem Niveau von Kalifornien [15].

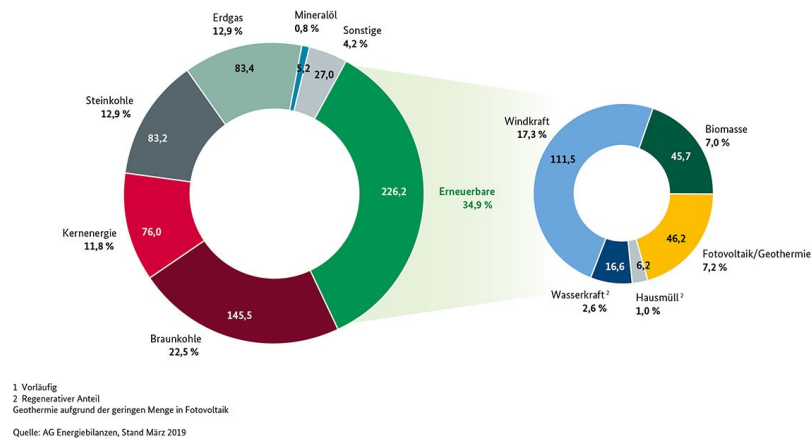


Abbildung 7: Anteil der Energieproduktion Deutschland, Stand März 2019 [16]

## 5 Anwendungsbeispiel

### 5.1 Problemstellung

Gegeben sei eine Wetterstation mit einem Sensor in einem abgelegenen Teil der westlichen Sahara, welche eine Leistungsaufnahme zwischen 1W bis 2W besitzt. Wie kann eine solche Anlage kostengünstig und relativ wartungsfrei betrieben werden?

Hier lohnt es sich die starke Sonnenenergie der Region auszunutzen, eine Solareinrichtung von geringer Größe kann über den Tag genug Sonnenenergie sammeln um sowohl die Wetterstation zu versorgen als auch eine Batterie zur Überbrückung der Nacht aufzuladen.

Um den dauerhaften Betrieb der Wetterstation gewährleisten zu können müssen zu jedem Zeitpunkt 2W an Leistung zur Verfügung stehen.

### 5.2 Theorie

Eine photovoltaische Zelle wandelt eingehende Leistung  $P_e$  mit einem Wirkungsgrad  $\eta$  in ausgehende Leistung  $P_a$  um, die eingehende Leistung ist abhängig von der Bestrahlungsstärke, also Sonnenleistung pro Bestrahlungsfläche  $E_e = [\frac{P_s}{A_s}]$  und der Fläche  $A$  der photovoltaischen Zelle.

$$P_a = \eta \cdot P_e$$

Dabei ist die eingehende Leistung

$$P_e = E_e \cdot A$$

woraus folgt dass

$$P_a = \eta \cdot E \cdot A$$

Von den gegebenen Werten kann sowohl der Wirkungsgrad, so wie die eingehende Sonnenenergie nur bedingt beeinflusst werden. Damit Die benötigte ausgehende Leistung ist also von der Fläche der Zelle abhängig.

Der Wirkungsgrad  $\eta$  einer photovoltaischen Zelle wird zur Laborkonditionen getestet, also bei  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$  Umgebungstemperatur,  $1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  Bestrahlungsstärke und 1.5 spektraler Distribution [17].

### 5.3 Praxis

In der Sahara beträgt die durchschnittliche Temperatur am Tag rund  $30^\circ\text{C}$ , die Bestrahlungsstärke rund  $2\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  bis  $2.5\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  und die durchschnittliche tägliche Sonnenzeit rund 9 Stunden (Sonnenstand höher als  $30^\circ$ ) [18, 19].

Folgende Werte werden für die nachfolgenden Berechnungen verwendet, wovon Basiswirkungsgrad  $\eta_{STC}$  und Temperaturkoeffizienten der Leistung  $\gamma$  aus dem Beispieldatenblatt eines Solarmoduls entnommen wurden [20]:

- $E_e = 2000\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- $t_{Tag} = 9\text{h}$
- $\eta_{STC} = 0.161$
- $\gamma = -\frac{0.0043}{\text{K}}$
- $T_B = 30^\circ\text{C}$

Angesichts der geringen Zeit in der genug Sonnenenergie gesammelt werden kann, muss zu dieser Zeit auch die Energie zu Überbrückung der restlichen 15 Stunden gesammelt werden. Die gesamte benötigte Energie ergibt sich aus:

$$E_G = P_G \cdot t_G$$

$$E_G = 2\text{W} \cdot 24\text{h} = 48\text{Wh}$$

Woraus sich wiederum die Tagesleistung  $P_{Tag}$  für die Tageszeit  $t_{Tag}$  ergibt:

$$P_{Tag} = \frac{E_G}{t_{Tag}}$$

$$P_{Tag} = \frac{48\text{Wh}}{9\text{h}} = 5.3\text{W}$$

Die Temperaturdifferenz und der draus resultierende wirkliche Wirkungsgrad bei Betriebstemperatur  $T_B$  ergeben sich aus:

$$\Delta T = T_B - T_{STC}$$

$$\Delta T = 30^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 5\text{K}$$

$$\eta = \eta_{STC} + \gamma\Delta T$$

$$\eta = 0.161 - \frac{0.0043}{\text{K}} \cdot 5\text{K} = 0.1285$$

Daraus folgt die benötigte Größe  $A$  der photovoltaischen Zelle in Abhängigkeit von eingehender Sonnenenergie, tatsächlichem Wirkungsgrad und benötigter Ausgangsleistung.

$$A = \frac{P_a}{\eta E_e} \approx 0.0184464\text{m}^2 \approx 185\text{cm}^2$$

Bei einer Betriebsspannung von  $U = 24\text{V}$  wird ein maximaler Betriebsstrom von  $I_B = 83.3\text{mA}$  erwartet. Die benötigte Kapazität des Speichermediums ergibt sich aus Betriebsstrom und gewünschter Entladungsdauer.

$$Q = t_{\text{Nacht}} \cdot I_B$$

$$Q = 15\text{h} \cdot 0.083\text{A} = 1.249\text{Ah} \approx 1250\text{mAh}$$

## 5.4 Konklusion

Bei einer photovolatischen Zelle mit einer Fläche von etwa  $185\text{cm}^2$  bis  $200\text{cm}^2$  ist der Energiebedarf einer solchen Wetterstation selbst bei schlechten Verhältnissen gedeckt in sofern ein Speichermedium mit einer Kapazität von mindestens  $1.25\text{Ah}$  zur Verfügung steht. Eine vereinfachte Schaltung der Stromversorgung einer solchen Station könnte wie folgt aussehen:

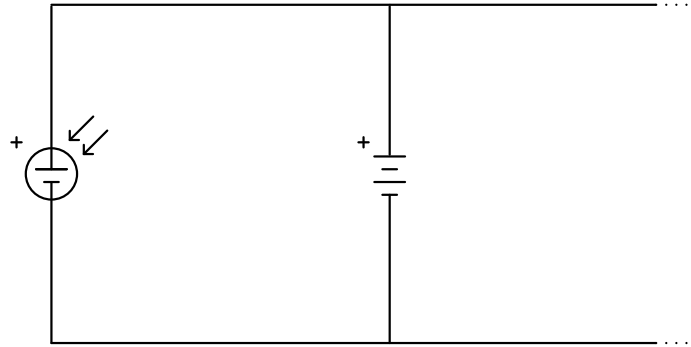


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Stromversorgung

Dabei sind Steuer- und Regelemente die das Speichermedium vor Schäden durch zu oft Entladung schützen würden, sowie Filterelemente zur filterung Stromschwankungen ausgelassen.

## 6 Schlusswort

Bei ausreichend fester Regulation der Produktion zur Sicherung der Anwendung umweltfreundlicher Produktionsverfahren kann Solar in Verbindung mit anderen Erneuerbaren Energien als valide Alternative zu fossilen Brennstoffen gesehen werden. Gerade zur Zeit der Verfassung dieser Arbeit in der Bedenken an die Zukunft unserer Umwelt immer größer werden lohnt es sich diese Alternativen erneut zu betrachten. Ich hoffe in dieser Arbeit die Vor- und Nachteile von Solarenergie sowie die Anwendungsgebiete und Funktionsweise ausreichen beschrieben zu haben. Darüber hinaus hoffe ich zum Nachdenken über erneuerbare Energien angeregt zu haben.

## 7 Quellen

- [1] Wikipedia: Photoelektrischer Effekt  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Photoelektrischer\\_Effekt](https://de.wikipedia.org/wiki/Photoelektrischer_Effekt)
- [2] Wikipedia: Geschichte der Photovoltaik  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_der\\_Photovoltaik](https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Photovoltaik)
- [3] Wikipedia: Vanguard-Projekt  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Vanguard-Projekt>
- [4] Wikipedia: Shockley-Queisser-Grenze  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Shockley-Queisser-Grenze>
- [5] Wikipedia: Solarzelle  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>  
Wikipedia: Solar cell (Englisch)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell)
- [6] EnergySage: Solar panel maintenace (Englisch)  
<https://www.energysage.com/solar/101/solar-panel-maintenance/>
- [7] CarbonBrief: Solar, wind and nuclear have ‘amazingly low’ carbon footprints (Englisch)  
<https://www.carbonbrief.org/solar-wind-nuclear-amazingly-low-carbon-footprints>
- [8] EnergySage: Solar cell efficiency (Englisch)  
<https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>
- [9] YouTube: Real Engineering - The Mystery Flaw of Solar Panels  
<https://www.youtube.com/watch?v=yVOnHWnLSeU>
- [10] Basic Photovoltaic and Methods (Englisch) Chapter 3, Page 22/24  
Technical Information Office, Solar Energy Reseach Institute:  
<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/1448.pdf>
- [11] Caiso: California ISO Supply (Englisch)  
<http://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/supply.html>
- [12] Caiso: California ISO (Englisch)  
<http://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/index.html>
- [13] YouTube: Real Engineering - California’s Renewable Energy Problem  
<https://www.youtube.com/watch?v=h5cm7HOAqZY>
- [14] Caiso: California ISO Demand (Englisch)  
<http://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/index.html>

- [15] Wikipedia: Photovoltaik in Deutschland  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik\\_in\\_Deutschland](https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik_in_Deutschland)
- [16] Energieproduktion Deutschland  
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>
- [17] Wikipedia: Solar efficiency (Englisch)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell\\_efficiency](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency)
- [18] Wikipedia: Solar power in Africa (Englisch)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power\\_in\\_Africa](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_in_Africa)
- [19] Sunlight hours in West Sahara, El Alaiún  
<https://www.timeanddate.com/astronomy/western-sahara/el-aiun>
- [20] aelo solar AG: Datenblatt des Beispiel Solarmoduls  
[https://www.photovoltaik4all.de/media/pdf/c8/31/56/s\\_19-265-280-de-de-de-53-43.pdf](https://www.photovoltaik4all.de/media/pdf/c8/31/56/s_19-265-280-de-de-de-53-43.pdf)