

# Solarzellen

Funktion und Stand der Technik bei  
Stand-Alone-Anlagen

**Erik Bünnig**  
18.2.2021

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 . . . . .	2
2.2.1	Entdeckung . . . . .	2
2.2.2	Nennenswerte Ereignisse . . . . .	2
<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	IoT-Sensoren . . . . .	7
4.2	Weltraum . . . . .	7
4.3	Alternative zu fossilen Brennstoffen . . . . .	7
4.3.1	Deutschland . . . . .	7
4.3.2	Kalifornien, USA . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	<b>9</b>
5.1	Problemstellung . . . . .	9
5.2	Theorie . . . . .	9
5.3	Entwurf . . . . .	10
5.4	Konklusion . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Quellen</b>	<b>11</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 von Photonen mit baryonischer Materie, getrennt in inneren und äußeren photovoelektrischen Effekt und die Photoionisation. Beschreibt die Freisetzung von Elektronen durch Bestrahlung eines Materials mit elektromagnetischer Strahlung [2].

#### 2.1.2 Photovoltaischer Effekt

Teil des inneren photoelektrischen Effekts, beschreibt Bildung eines Photostroms, also Trennung von Ladungsträgerpaaren in den p- und n-dotierten Schichten einer Photodiode entgegen der Durchlassrichtung des Übergangs als Folge von elektromagnetischer Strahlung auf die Photodiode. Der photovolatische Effekt baut auf der Photoleitung auf, einem weiteren innerem Teil des photoelektrischen Effekts [2].

Der photovoltaische Effekt dient als Grundlage für die Funktionsweise von photovoltaischen Zellen.

#### 2.1.3 Photovoltaische Zelle

Elektrisches Bauelement das auf Grundlage des photovoltaischen Effekts, Strom erzeugt und aus Halbleitermaterialien (vorwiegend Silizium) besteht.

Umgangssprachlich werden photovoltaische Zellen oft Solarzellen genannt, dabei wird der Begriff oft als Synonym für Solarpanäle benutzt obwohl diese eine Ansammlung von photovoltaischen 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 durch Licht beeinflussten elektrischen Strom zwischen einer Platin-Anode und -Kathode welche je nach Licht unterschiedlich hoch war. [6]

#### 2.2.2 Nennenswerte Ereignisse

- 1876 - Beweis der direkten Konversion von elektromagnetischer Strahlung in elektrische Energie durch William Grylls Adams und Richard Evans Day
- 1907 - Theoretische Erklärung des photoelektrischen Effekts auf Basis der Lichtquantenhypothese (1905) durch Albert Einstein

- 1912 - 1916 - Experimentelle Bestätigung von Einsteins Erklärung durch Robert Adndrews Millikan
- 1958 - Erste Verwendung von Solarzellen zur Versorgung eines Satelliten der NASA (Vanguard I) [7]

## 3 Grundlegender Aufbau und Funktionsweise

### 3.1 Aufbau

Die meisten Silizium-basierten Solarzellen haben den gleichen grundsätzlichen Aufbau und nur geringe Unterschiede wie das Muster der vorderen Kontakte.

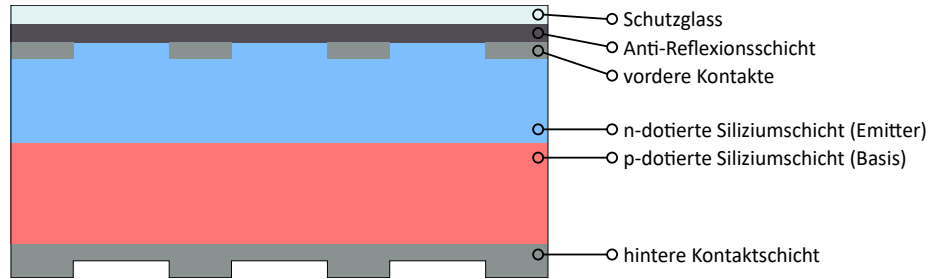


Abbildung 1: Grunlegender Aufbau einer Silizium-basierten Solarzelle

Die Dotierung der Schichten beschreibt einen Prozess bei dem der Siliziumkristall mit Unreinheiten besetzt wird um die gewünschten Eigenschaften hervorzurufen. Silizium hat 4 Valenzelektronen und bildet somit Kristallstrukturen durch Kovalente Bindungen. Durch das dotieren mit Elektronen 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.

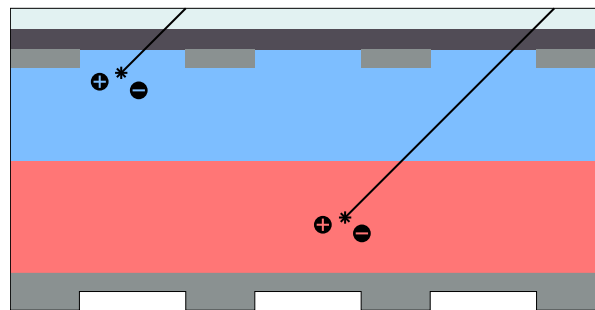


Abbildung 2: Bildung von Elektronen-Loch-Paaren

Durch die Halbleiter-Eigenschaften der Solarzelle bewegen sich befreiten Elektronen in Richtung der der n-dotierten Schicht (blau) und Löcher in Richtung der p-dotierten Schicht (rot).

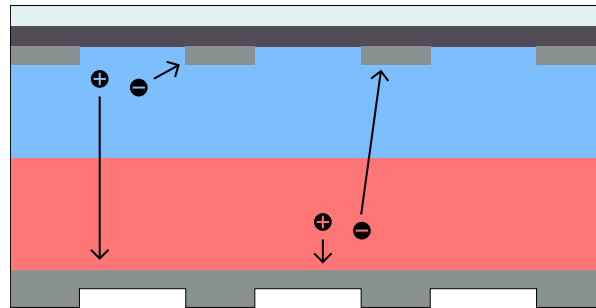


Abbildung 3: Bildung des Photostroms

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.

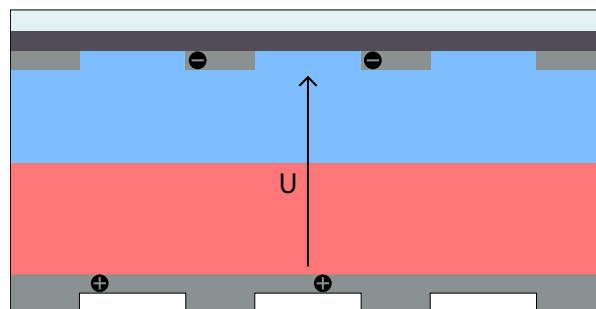


Abbildung 4: Entstehen einer messbaren Spannung

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 Sichten.

### 3.3 Vorteile

Nach der Installation von Solarzellen ist kein Rohmaterial oder Energiezufluss benötigt um Energie zu produzieren. Dadurch das Solarzellen keine beweglichen oder kontaktintensiven Teile besitzen brauchen sie beinahe keine Wartung und sind sehr robust [10].

Auch wenn Solarzellen wegen ihrer Umweltunfreundlichen Herstellung oft kritisiert werden, ist der Erntefaktor von Solarzellen etwa 26:1 (4% Energieoffset) im vergleich zu den durchschnittlich 9:1 (11% Energieoffset) von Kohle- und Ölkraftwerken [12].

### 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) [9], 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 [11] Chapter 3, Page 22/24).

Solarzellen können nur am Tag Energie produzieren und ihre Effizienz sinkt in den Herbst- und Wintermonaten, ohne einen ausreichend effizienten Speicher für die gesammelte Energie sind Solarzellen keine ernstzunehmende Alternative für Nuklear-, Wind- oder Hydroenergie, geschweige denn für fossile Brennstoffe.



## **4 Anwendungsgebiete**

### **4.1 IoT-Sensoren**

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 Weltraum**

Auch für die Stromversorgung von Satelliten oder Raumstationen eignen sich Solarzellen hervorragend, gerade deshalb weil das Auffangen elektromagnetischer Strahlung nicht durch atmosphärische Effekte behindert wird wie auf der Erde.

### **4.3 Alternative zu fossilen Brennstoffen**

#### **4.3.1 Deutschland**

Ungeachtet zuvor genannter Vor- und Nachteile bieten Solarzellen eine Alternative zu fossilen Brennstoffen. In Deutschland wird Solarenergie seit 2000-2004 zunehmend Ausgebaut und staatlich gefördert, von 2000 bis 2011 stieg der Solarenergieanteil von 64GWh auf 19TWh. [5]

#### **4.3.2 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 so flach wie ihr Durchschnitt. Solarzellen produzieren ihre Energie hauptsächlich zwischen 7 Uhr und 18 Uhr.

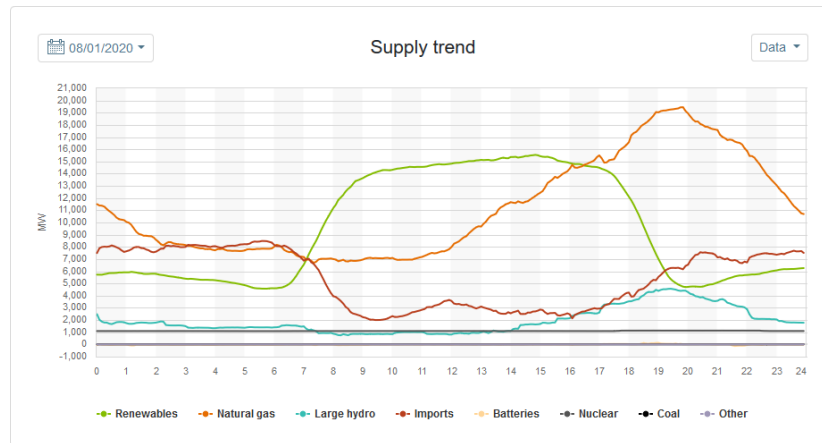


Abbildung 5: Angebot an Energie in Kalifornien, USA, 01.08.2020 [15]

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. [8, 17]

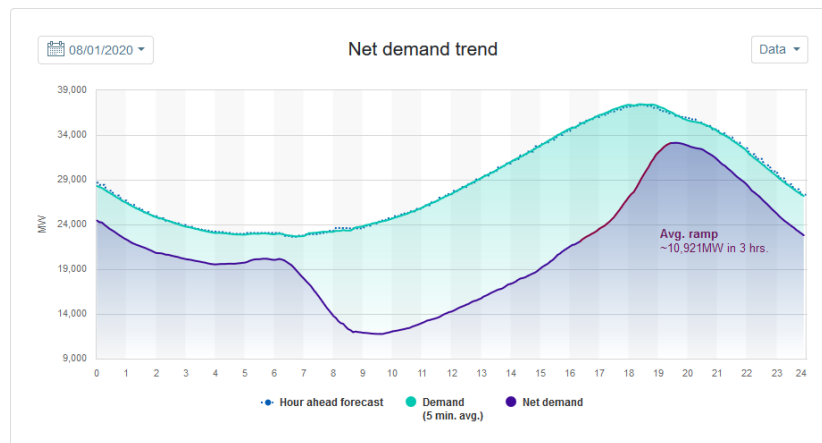


Abbildung 6: Nachfrage an Energie in Kalifornien, USA, 01.08.2020 [14]

## 5 Anwendungsbeispiel

### 5.1 Problemstellung

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

Die Antwort ist natürlich die starke Sonnenenergie der Region auszunutzen, eine Solareinrichtung von geringer Größe kann über den Tag genug Sonnenenergie sammeln um sowohl den Wettersensor zu versorgen als auch eine Batterie zur Überbrückung der Nacht auf zu laden.

Um die dauerhafte Reliabilität des Wettersensors zu gewährleisten müssen zu jedem Zeitpunkt also 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 eine Funktion von eingehender Bestrahlungsstärke, also Sonnenleistung pro Bestrahlungsfläche  $E_e = [\frac{P_s}{A_s}]$  auf die Fläche  $A$  der photovoltaischen Zelle.

$$f(P_e) = P_a = \eta P_e$$

Dabei ist die eingehende Leistung

$$P_e = E_e \cdot A$$

woraus folgt dass

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

Von den gegebenen Größen sind sowohl die Sonnenenergie, da diese vom Standort des Sensors abhängig ist, als auch die ausgehende Leistung, welche dem maximalen Verbrauch des Sensors entspricht, nicht sonderlich beeinflussbar. Es folgt also dass für eine ausreichende Leistungsabgabe der Zelle die Fläche oder der Wirkungsgrad verändert werden müssen.

Der Wirkungsgrad  $\eta$  einer photovoltaischen Zelle wird zur Laborbedingungen getestet, das bedeutet  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$  Umgebungstemperatur,  $1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  Bestrahlungsstärke und 1.5 spektraler Distribution [3]. In der Sahara beträgt die durchschnittliche Temperatur am Tag rund  $30^\circ\text{C}$  und die Bestrahlungsstärke rund  $2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  bis  $2.5 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  [4]. Der Einfachheit halber werden die folgenden Berechnungen  $E_e = 2.25 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ , eines Basiswirkungsgrades von  $\eta_{STC} = 0.15$  und Leistungstemperaturkoeffizienten  $\gamma = -\frac{0.0043}{\text{K}}$  aus dem Beispieldatenblatt eines Solarmoduls berechnet. [18]

Aus den gegebenen Werten ergibt sich die Temperaturdifferenz

$$\Delta T = T - T_{STC} = 5$$

und der draus resultierende wirkliche Wirkungsgrad bei Betriebstemperatur  $T$

$$\eta = \eta_{STC} + \gamma \Delta T = 0.1285$$

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

$$A = \frac{P_a}{\eta E_e} \approx 0.00691742 m^2 \approx 69.1742 cm^2$$

### **5.3 Entwurf**

### **5.4 Konklusion**

## 6 Quellen

- [1] Wikipedia: Solarzelle  
Wikipedia: Solar cell (Englisch)
- [2] Wikipedia: Photoelektrischer Effekt
- [3] Wikipedia: Solar efficiency (Englisch)
- [4] Wikipedia: Solar power in Africa (Englisch)
- [5] Wikipedia: Photovoltaik in Deutschland
- [6] Wikipedia: Geschichte der Photovoltaik
- [7] Wikipedia: Vanguard-Projekt
- [8] Caiso: California ISO (Englisch)
- [9] EnergySage: Solar cell efficiency (Englisch)
- [10] EnergySage: Solar panel maintenace (Englisch)
- [11] Technical Information Office, Solar Energy Reseach Institute: Basic Photovoltaic and Methods (Englisch)
- [12] CarbonBrief: Solar, wind and nuclear have ‘amazingly low’ carbon footprints (Englisch)
- [13] Wikipedia: Symbol einer Photodiode
- [14] Caiso: California ISO Demand (Englisch)
- [15] Caiso: California ISO Supply (Englisch)
- [16] YouTube: Real Engineering - The Mystery Flaw of Solar Panels
- [17] YouTube: Real Engineering - California’s Renewable Energy Problem
- [18] ?? aelo solar AG: Datenblatt des Besipiel Solarmoduls