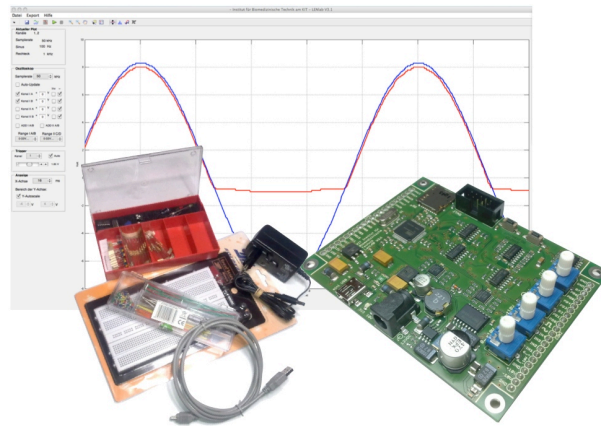


Kurs 1  
**Messwerterfassung und regenerative  
Energieerzeugung**



Gruppe 116

Vorname	Nachname	Matrikel-Nr.	u-Account	E-Mail
Jailan	Oweda	2257347	ujzpo	ujzpo@student.kit.edu
MainAnh	Vu	2217409	uxgce	uxgce@student.kit.edu
Andreas	Tsouchlos	2238886	uhhxt	uhhxt@student.kit.edu

14. Dezember 2018

# Abstract

In diesem Dokument werden die Ergebnisse der Bearbeitung des ersten Kurses des Workshops Elektro- und Informationstechnik wiedergeben und diskutiert. Hierbei handelt es sich um die Energiegewinnung mittels einer Solarzelle und der Zwischenspeicherung dieser Energie. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung und Vermessung einer Solarzelle. Als erstes wird dafür die I-U- Kennlinie und die daraus ableitbare Leistung bestimmt. Danach wird an die Schaltung ein Kondensator angeschlossen. Sein Verhalten wird beim Laden sowie Entladen beobachtet und analysiert. Zuletzt wird das Verhalten des gesamten Aufbaus betrachtet.

Zur Ausführung dieses Projekts werden eine Solarzelle, verschiedene Lichtquellen, das TI-Board als A/D- Wandler und Messgerät, ein Speicherkondensator sowie weitere elektronische Komponenten (z.B. Widerstände und Dioden) verwendet.

Zum Einarbeiten in die Thematik und um die Funktionsweise einiger Bauteile nachzuvollziehen, wurden Literaturen herangezogen. Für das Arbeiten mit den Messwerten wurde darüber hinaus die Software MATLAB des Unternehmens MathWorks eingesetzt.

Grundsätzlich kommt man zur Schlussfolgerung, dass die Leistungen in Abhängigkeit von der Beleuchtung variieren, dass die gemessenen Spannungen der Solarzelle unter den natürlichen Bedingungen von vielen Faktoren abhängen und abschließend dass Kondensatoren als Energiespeicher dienen, jedoch nicht optimal sind. Anschließend werden der Verlauf und die Resultate des Workshops in Latex dokumentiert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1. Projektorganisation . . . . .	5
1.2. Theoretische Grundlagen/ Literaturrecherche . . . . .	5
<b>2. Aufgaben</b>	<b>6</b>
2.1. Vermessung der Solarzelle POW112D2P . . . . .	6
a. Aufnehmen der I-U Kennlinie . . . . .	6
b. Bestimmung des Maximum-Power-Points (MPP) . . . . .	8
c. MPP-Anpassung . . . . .	11
2.2. Langzeitmessung . . . . .	12
a. Spannungsverlauf und Leistung . . . . .	12
b. Energiegewinnung . . . . .	14
2.3. Energiespeicherung und Verhalten von Solarzellen . . . . .	15
a. Theoretische Betrachtung . . . . .	15
b. Messung . . . . .	19
c. Modellbildung . . . . .	21
d. Gesamtenergie und Wirkungsgrad . . . . .	22
2.4. Verhalten Photovoltaik mit und ohne Energiespeicher . . . . .	23
a. Messung . . . . .	23
b. Auswirkung des Speicherkondensators . . . . .	24
<b>3. Zusammenfassung</b>	<b>25</b>
<b>4. Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>

# Abbildungsverzeichnis

1. Benutzter Schaltkreis . . . . .	7
2. Matlab code zur graphischen Darstellung der Spannung . . . . .	7
3. Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung bei der Halogenlampe . . . . .	8
4. Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung bei der Leuchtstoffröhre . . . . .	8
5. Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung bei der LED . . . . .	8
6. Matlab code zur Berechnung der Spannung bzw. Stromstärke und des MPP . . . . .	9
7. Darstellung MPP bei benutzun von Halogenlampe . . . . .	10
8. Darstellung MPP bei benutzun von Leuchtstoffröhre . . . . .	10
9. Darstellung MPP bei benutzun von LED . . . . .	11
10. Matlab code zur Berechnung der Energie . . . . .	12
11. Spannungsverlauf über 2 Stunden . . . . .	13
12. Leistungsverlauf über 2 Stunden . . . . .	14

13.	Matlab code zur graphischen Darstellung des theoretischen Spannungsverlaufes bei Entladung eines Kondensators . . . . .	16
14.	Theoretischer Spannungsverlauf bei Entladung . . . . .	18
15.	Matlab code zur graphischen Darstellung des Spannungsverlaufes bei der Aufladung des Kondensators . . . . .	19
16.	Matlab code zur graphischen Darstellung des Spannungsverlaufes bei der Entladung des Kondensators . . . . .	19
17.	Spannungsverlauf bei Aufladung des Kondensators . . . . .	20
18.	Spannungsverlauf bei Entladung des Kondensators . . . . .	20
19.	Matlab code zur Berechnung des Wirkungsgrades . . . . .	22
20.	Matlab-Skript zur graphischen Darstellung der Spannung . . . . .	23
21.	Spannungsverlauf mit und ohne Kondensator . . . . .	24

## Tabellenverzeichnis

1.	Aufgabeneinteilung . . . . .	5
2.	Angaben über Lichtquellen . . . . .	7

---

# 1. Einleitung

## 1.1. Projektorganisation

Die Projektorganisation lässt sich in zwei Teile untergliedern. In der ersten Phase wurden sämtliche Messungen durchgeführt, während in der zweiten Phase die Aufgaben nach ihrer Aufgabenstellung erarbeitet und verschriftlicht wurden. Gemessen wurde mit der ganzen Gruppe, sodass jeder die Schaltung nachvollziehen konnte. Nachdem die Werte vorlagen, wurde ein grober Ablaufplan für den Überblick erstellt. Dabei wurden die Aufgaben auch in ihre Teilbereiche unterteilt. Die Einzelarbeit verlief dann aufgabenweise, während noch weitere Aufgaben aufgeteilt wurden wie die Überarbeitung des Quellcodes, oder die Strukturierung in Latex. Als letztes wurde gemeinsam die Ergebnisse der Aufgaben durchgegangen und Feinheiten noch entschieden. Folgende Tabelle stellt die grobe Aufgabeneinteilung dar.

Tabelle 1: Aufgabeneinteilung

Verfasser	Aufgabe	Beschreibung
Alle	1	Abstract/Einleitung
Mai Anh	2.1	Vermessung der Solarzelle
Andreas	2.2	Langzeitmessung
Jailan	2.3	Energiespeicherung und Verhalten von Solarzellen
Alle	2.4	Verhalten Photovoltaik mit/ohne Energiespeicher

Es ist anzumerken, dass streng genommen jedes Gruppenmitglied an jeder Aufgabe mitgearbeitet hat, da diese im Verlauf der Arbeit mehrmals überarbeitet oder ergänzt wurden.

## 1.2. Theoretische Grundlagen/ Literaturrecherche

Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit bei der Energiegewinnung nehmen heutzutage an Bedeutung immer mehr zu. Hierbei spielt besonders regenerative Energieerzeugung eine immer größer werdende Rolle, vor allem auch hinsichtlich der Umweltbelastung herkömmlicher Energieerzeugungsmethoden. Unter regenerative Energieerzeugung fallen unter anderem Windenergie, Wasserkraft, Geothermie und Photovoltaik, welche alle auf die Solarstrahlung basieren. Dabei hat in den letzten Jahren die Bedeutung der Photovoltaik, die als einzige direkt die Solarenergie in elektrische Energie umwandelt, immer weiter zugenommen.

Erneuerbare Energiequellen sind aufgrund vieler Aspekte attraktiv. Bereits der Name impliziert, dass deren Energien nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehen. Für die Nachhaltigkeit ist auch gesorgt, da die Energieerzeugung ohne Emissionen erfolgt und damit weit weniger umweltbelastend ist als herkömmliche Methoden. Es entstehen keine Kosten

für jegliche Brennstoffe, im Gegensatz z.B zur Kohleenergie. Dazu kommt, dass die Energiequelle grundsätzlich vom Standort unabhängig ist, weshalb auch Entwicklungsländer in der Lage sind, ihre eigene Energie zu produzieren.

Allerdings handelt es sich bei regenerativer Energieerzeugung noch um eine relativ neue Technologie, weshalb sie wirtschaftlich in vielen Faktoren mit herkömmlichen Energieerzeugungsverfahren nicht mithalten kann. So ist der Ertrag im Gegensatz z.B zu dem von Kohle sehr gering, weshalb mit großen Investitionen gerechnet werden muss, wenn herkömmliche durch regenerative Quellen ersetzt werden sollen. Die hohen Kosten, die dadurch entstehen, machen sie wirtschaftlich unattraktiv. Da die regenerative Erzeugung von Energie stark vom Umfeld der Anlagen hinsichtlich der Umweltfaktoren abhängt, die diese produzieren, kommen weitere Kosten auf, um die Bevölkerung zuverlässig mit Energie versorgen zu können.

Im Vergleich zur Windenergie, Wasserkraft oder Geothermie, die indirekt durch Solarenergie angetrieben werden, wandelt Photovoltaik Solarenergie direkt in elektrische Energie um. Hierzu nutzt sie den photovoltaischen und den photoelektrischen Effekt: Solarstrahlung trifft auf die Oberfläche einer Solarzelle. Dadurch werden manche Elektronen der äußeren Schichten der Atome der Solarzelle angeregt und fließen vom Valenzband ins sogenannte Leitungsband. Eine spezielle Bearbeitung des Materials verhindert, dass die Elektronen das Leitungsband wieder verlassen. Dadurch entsteht auf der einen Seite der Solarzelle ein Elektronenüberschuss und auf der anderen Seite ein Mangel, was anschließend zu einem Strom führt.

Die I-U-Kennlinie beschreibt die Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung. So gibt der Flächeninhalt dieser die Leistung wieder. Ist die Fläche unter dem Graphen maximal, handelt es sich um den Maximum Power Point: Dem Punkt, an dem die Solarzelle mit maximaler Leistung arbeitet.

Eine Möglichkeit zur Energiespeicherung ist es, eine Energieart in eine andere umzuwandeln. Mehrmalige Umwandlungen sind zwar mit Energieverlust verbunden, haben im Vergleich zur direkten Energiespeicherung, z.B durch Kondensatoren, verschiedene Vorteile. Allgemein betrachtet hat jede Form der Energiespeicherung ihre Stärken und Schwächen, weshalb je nach Situation andere Methoden benutzt werden müssen. Durch weitere Forschung in diesem Gebiet, kann jedoch die Effizienz vieler dieser Methoden verbessert werden.

## 2. Aufgaben

### 2.1. Vermessung der Solarzelle POW112D2P

#### a. Aufnehmen der I-U Kennlinie

##### Methode

Zunächst soll die Solarzelle mit drei unterschiedlichen Lichtquellen bestrahlt werden.

Hierbei wird eine Schaltung aufgestellt, bestehend aus einer Diode, welche eine umgekehrte Stromrichtung verhindert, einer Zener-Diode, die die maximale Spannung eingrenzt, und einem Spannungsteiler. Angeschlossen werden die Solarzelle sowie das TI-Board.

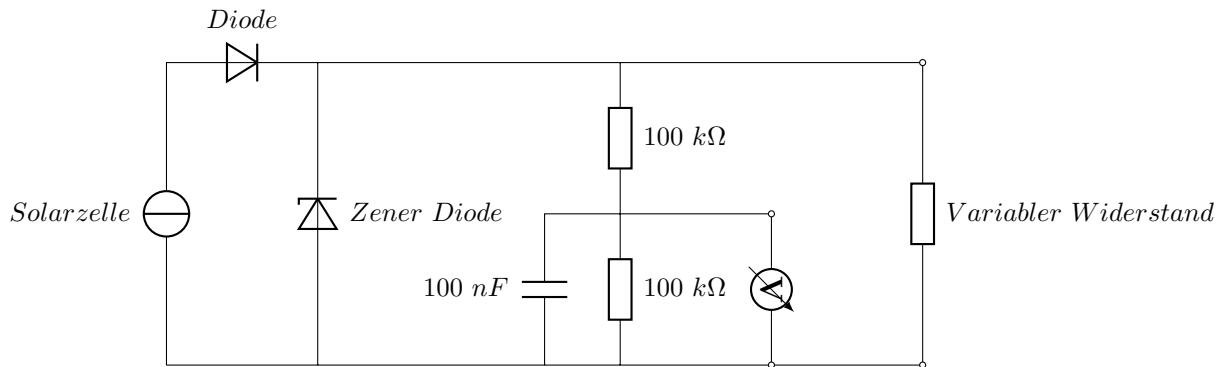


Abbildung 1: Benutzter Schaltkreis

Unter gleichbleibenden Bedingungen wurde die Spannung in Abhängigkeit des Widerstandes gemessen, indem Widerstände in Reihe geschaltet wurden. Es wurden in diesem Fall zwölf Widerstände in einem Intervall zwischen  $10\Omega$  bis  $5200\Omega$  verwendet. Mit MatLab lässt sich die Stromstärke aufgrund von  $I = U/R$  ermitteln, sodass man sich den Graphen der Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung zeichnen lassen kann. (vgl. S.18, [?]) Die Werte der Lichtquellen sind in Tabelle 2 abgebildet:

Tabelle 2: Angaben über Lichtquellen

Art	Leistung	Abstand
Halogenlampe	500W	70cm
Leuchtstoffröhre	24W	13cm
LED	40W	2,5cm

Zur graphischen Darstellung wurde folgender Matlab code verwendet:

```

1 % V: Vektor mit Spannungen
2 % R: Vektor mit Widerständen
3
4 I = V ./ R;
5
6 plot(V, I)

```

Abbildung 2: Matlab code zur graphischen Darstellung der Spannung

### Ergebnis

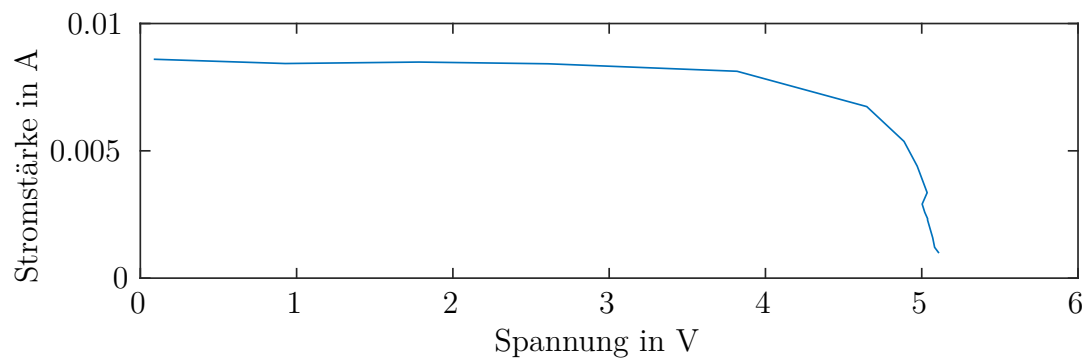


Abbildung 3: Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung bei der Halogenlampe

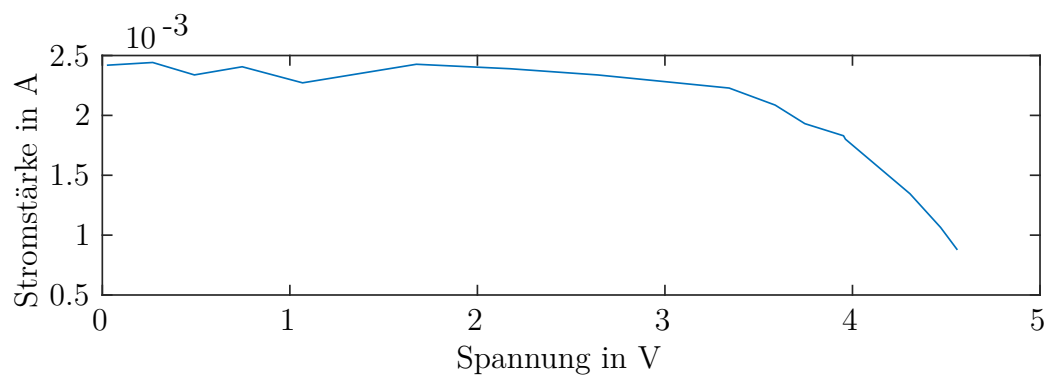


Abbildung 4: Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung bei der Leuchtstoffröhre

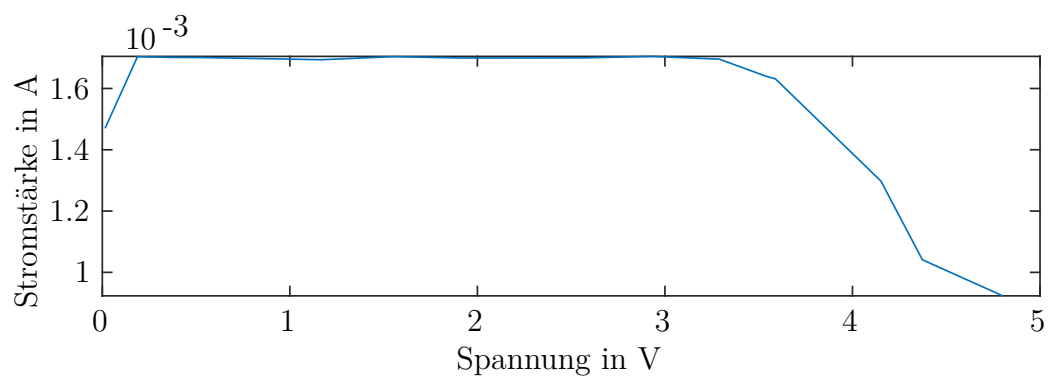


Abbildung 5: Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung bei der LED

### b. Bestimmung des Maximum-Power-Points (MPP)

#### Methode



Die Leistung hängt von der Spannung sowie der Stromstärke ab aufgrund des Zusammenhanges  $P = U * I$ . Alternativ gilt wegen  $I = U/R$  ebenfalls  $P = U^2/R$ , welche hier bevorzugt wird, da die Spannung sowie der Widerstand direkte Messwerte sind. Das vorhandene Skript für die Ermittlung der Stromstärke wird um einen Vektor für die Leistung erweitert. Der Maximum Power Point (wird nun MPP abgekürzt) bezeichnet nun den Punkt, an dem die Leistung am größten ist. Dieser maximale Wert für die Leistung sowie der dementsprechende Widerstand lassen sich ablesen / von folgendem Matlab code ausgeben:

```
1 % V: Vektor mit Spannungen
2 % R: Vektor mit Widerständen
3
4 V = V * 2;
5
6 I = V ./ R;
7
8 P = V .* V ./ R;
9
10 [p, u] = max(P);
11
12
13 hold on
14
15 yyaxis left
16 plot(V, I)
17 ylabel('Stromstärke in A');
18 line([0 V(u)], [I(u) I(u)], 'Color', [1 0 1], 'LineStyle', '--');
19 line([V(u) V(u)], [0 I(u)], 'Color', [1 0 1], 'LineStyle', '--');
20
21 yyaxis right
22 plot(V, P)
23 ylabel('Leistung in W');
24
25 xlabel('Spannung in V');
26
27 hold off
```

Abbildung 6: Matlab code zur Berechnung der Spannung bzw. Stromstärke und des MPP

### Ergebnis

Der MPP der Solarzelle unter der Verwendung einer Halogenlampe beträgt ca. 0,0313W und tritt bei 690 Ohm auf. Mit einer Leuchtstoffröhre liegt die maximale Leistung bei ungefähr 0,0075W, welche bei einem Widerstand von 1720 Ohm erreicht wird. Wird hingegen eine LED als Lichtquelle eingesetzt, befindet sich der MPP bei ca. 0,0059W bei einem Widerstand von 2200 Ohm.

Anzumerken ist, dass es sich hierbei nur um einen groben Näherungswert handelt, da

lediglich zwölf Messwerte für die Leitung vorliegen. Für eine genauere Bestimmung des MPPs kann mithilfe dieser Werte eine Näherungsfunktion aufgestellt werden, mit dessen Ableitung das Maximum ermittelt werden kann. Diskussion:

Eine weitere Methode zur Bestimmung des MPPs ist über die Spannung und die Stromstärke möglich. So ist die Leistung das Produkt dieser, was auf die I-U-Kennlinie bezogen bedeutet, dass die Leistung den Flächeninhalt unter einem Punkt des Graphen wieder spiegelt. So bezeichnet man den Punkt der Kennlinie als MPP, unter dem die Fläche  $U \cdot I$  am größten ist.

(vgl. S.99, Photovoltaik)

Dieser Zusammenhang wird in dem folgenden Diagramm veranschaulicht.

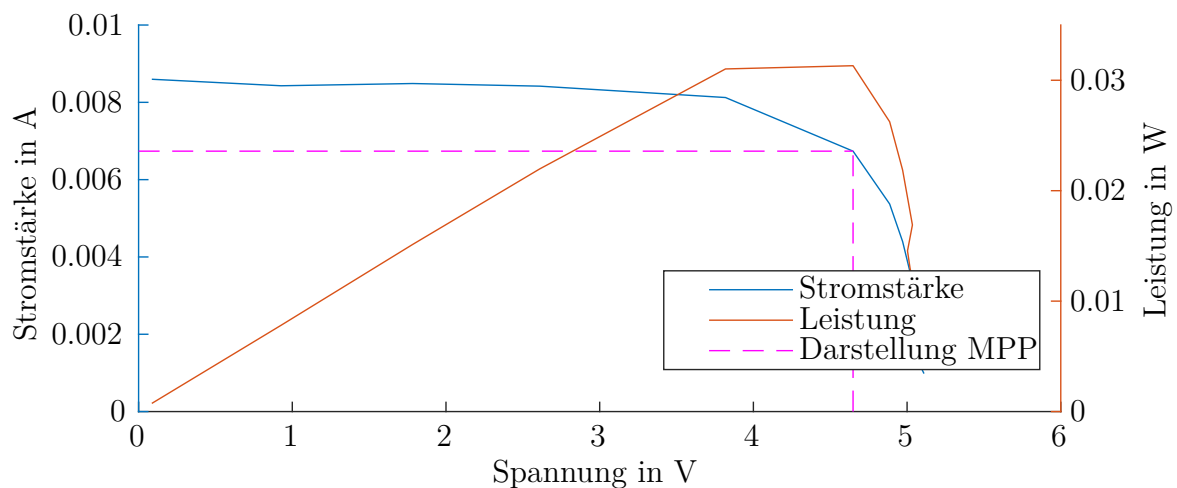


Abbildung 7: Darstellung MPP bei Benutzung von Halogenlampe

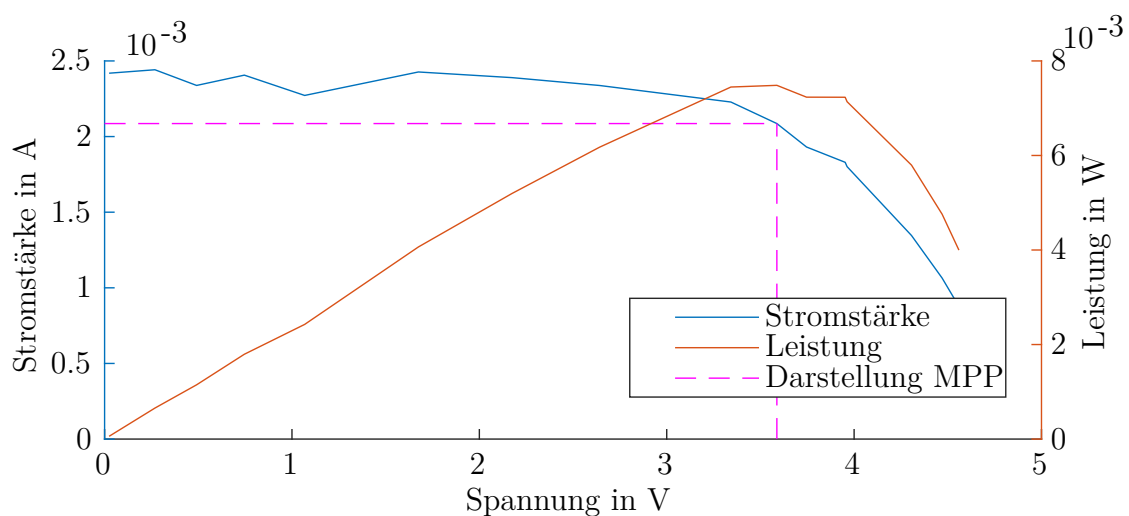


Abbildung 8: Darstellung MPP bei Benutzung von Leuchtstoffröhre

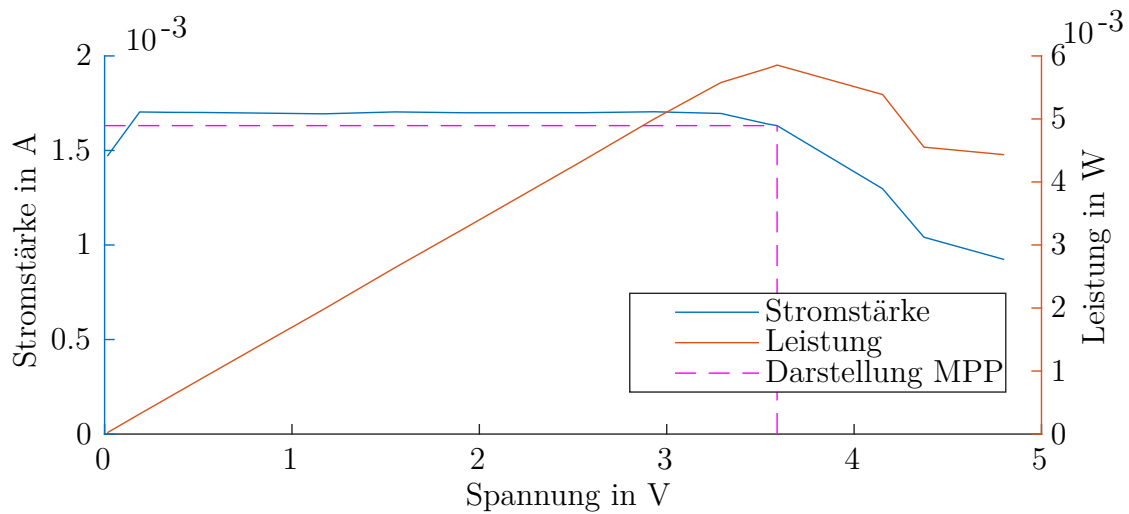


Abbildung 9: Darstellung MPP bei benutzun von LED

### c. MPP-Anpassung

### Diskussion

Solarwechselrichter sind dafür zuständig, die von der Solarzelle produzierte Gleichspannung in Wechselspannung umzuwandeln. Für die maximale Leistungsausbeute wird der MPP benötigt (bildet der im Solarwechselrichter enthaltene MPP-Tracker den optimalen Widerstand für den MPP), welcher jedoch unter natürlichen Bedingungen von verschiedenen äußeren Faktoren wie Verschattung, Temperatur oder Lichteinfall abhängt, sodass der MPP stets neu ermittelt werden muss (vgl. S.8f, Diplomarbeit).

Vernachlässigt wurden Diode/Zehnerdiode, da dort auch Spannung noch abfallen, kleiner Messfehler.

Zu Beginn des Workshops ging es zunächst stockend voran. So wurde die erste Messung verworfen, die in einem Seminarraum mit der Deckenlampe durchgeführt wurde. Es konnte keine gleichmäßige Bestrahlung gewährleistet werden und auch die Entfernung zu der Lichtquelle war zu groß, sodass die Werte der Spannung klein waren. Bei der nächsten Messung wurde eine Schreibtischlampe verwendet, dessen Werte auf dem ersten Blick besser aussahen. Bei der Betrachtung des Graphen der Leistung fiel auf, dass diese in der Messung noch nicht den Hochpunkt erreicht hatte. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass auch in dem Versuch der Abstand zu klein war. (?) So wurde in den darauffolgenden Messungen mit dem größten Widerstand begonnen. Der Abstand richtete sich je nachdem, wo die Spannung ungefähr die 2,5V erreicht.

### 2.2. Langzeitmessung

#### a. Spannungsverlauf und Leistung

##### Methode

Es wurde eine leicht abgewandelte Version der Schaltung aus Abbildung 1 benutzt, nämlich mit einem konstanten Widerstand von  $1\text{ k}\Omega$  anstatt des variablen Widerstandes.

Gemessen wurde am 5.12.2018 am Forum des KIT - Campus zwischen 11:30 Uhr und 13:30 Uhr, mit leichter Bewölkung und einer Temperatur zwischen  $10^\circ\text{C}$  und  $15^\circ\text{C}$ .

Die erzeugte Energie wurde mit folgendem Matlab coded ausgerechnet:

```
1 % U: Vektor mit Spannungen, Anzahl der Elemente entspricht der Zeit in ↵
   Sekunden
2
3 G = 1/200000 + 1/1000;
4 R = 1 / G;
5
6 P = U .* U ./ R;
7
8 W_s = trapz(P); % Energie in Wattsekunden
9 W_h = (W_s/60)/60; % Energie in Wattstunden
```

Abbildung 10: Matlab code zur Berechnung der Energie

##### Ergebnis

Folgende Graphen zeigen den Verlauf der Spannung und der Leistung in abhängig der Zeit.

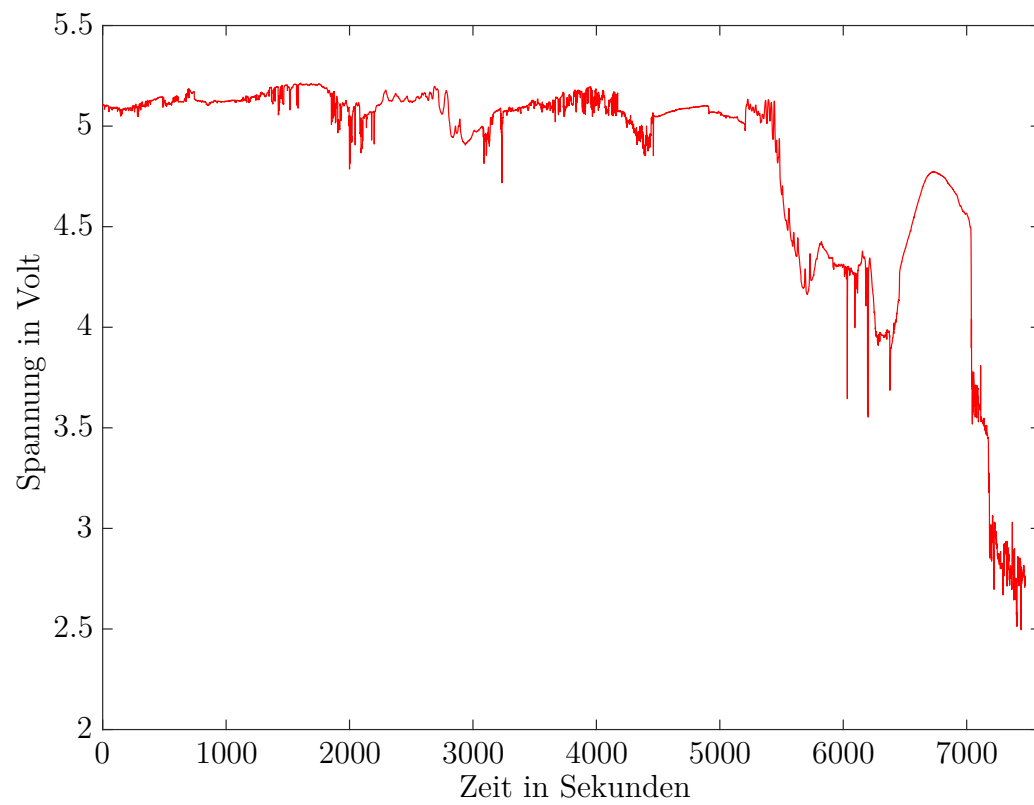


Abbildung 11: Spannungsverlauf über 2 Stunden

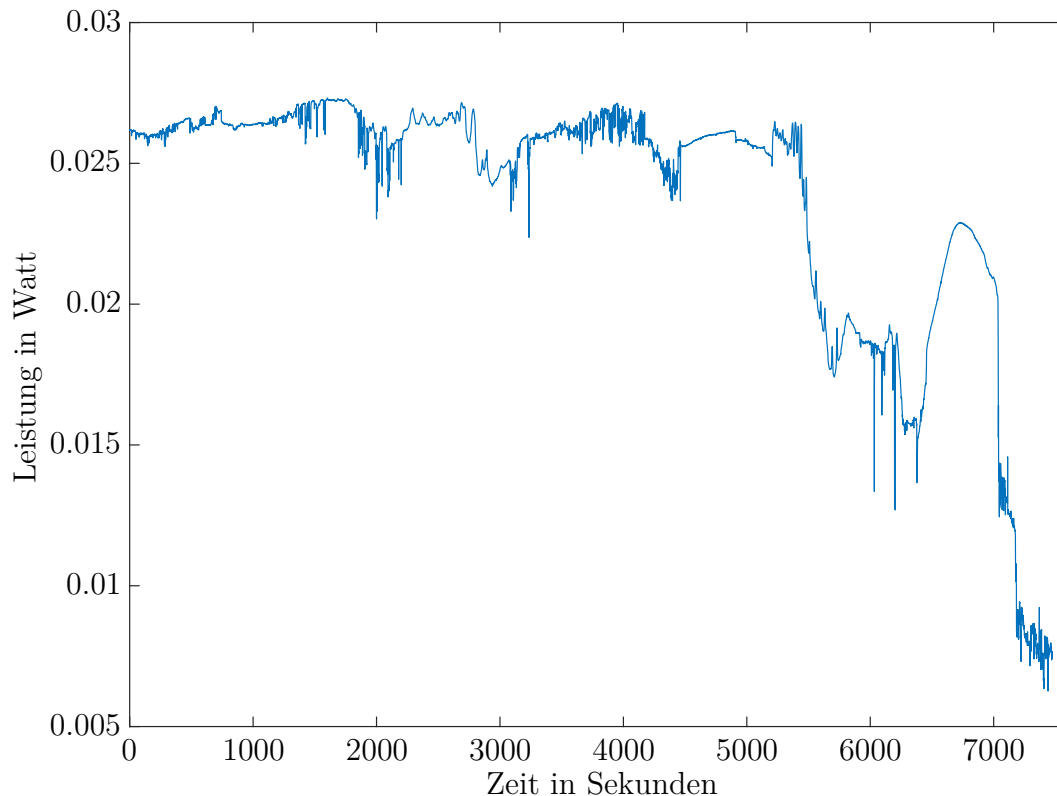


Abbildung 12: Leistungsverlauf über 2 Stunden

Die erzeugte Energie beträgt ungefähr  $177.34 \text{ Ws}$  bzw.  $0.0493 \text{ Wh}$ .

### Diskussion

Der Energieertrag der Solarzelle wird bei unterschiedlichen Jahreszeiten durch viele Faktoren wie Temperatur oder der Anzahl der Sonnenstunden beeinflusst, doch der ausschlaggebende Faktor ist der unterschiedliche Winkel, unter dem die Sonnenstrahlung auf die Solarzelle trifft. Ist der Sonnenstand niedriger, wie im Winter, trifft weniger Strahlung auf die Solarzelle und somit wird weniger Energie produziert.

Das Verhältnis sommerlicher und winterlicher Strahlung ist durchschnittlich 3:1 (<https://www.solaranlagenratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-leistung/photovoltaik-ertrag-in-sommer-und-winter>, 13.12.2018 21:00 Uhr) und der Energieertrag der Solarzelle hätte im Hochsommer entsprechend bis auf  $532.02 \text{ Ws}$  bzw.  $0.1479 \text{ Wh}$  gestiegen.

### b. Energiegewinnung

Die Energiegewinnung mit Solarzellen wird von vielen Faktoren beeinflusst, die von der Umwelt der Solarzelle, aber auch von der Zelle selbst abhängen.

- Der Winkel in dem die Strahlung auf die Solarzelle eintrifft: Beträgt dieser genau

90°, so ist die Energiegewinnung maximal. Umso größer der Winkel ist, desto kleiner ist die Menge an Strahlung, die von der Solarzelle abgefangen wird.

- Die Temperatur: Bei wechselnder Temperatur bleibt die Spannung größtenteils unverändert. Doch je größer die Temperatur ist, desto kleiner wird die Stromstärke die von der Solarzelle ausgeht, und damit auch die Leistung und die Energie.
- Das Wetter bzw. Klima: Zum einen beeinflusst es den Einfallswinkel des Lichtes, zum Anderen die Intensität der Strahlung selbst, indem z.B Wolken die direkte Bestrahlung der Zelle verhindern. Die Energiegewinnung mit einer Solarzelle ist also auch Orts- bzw. Zeit-abhängig.
- Das Material aus dem die Solarzelle angefertigt wurde: Wird beispielsweise sogenanntes monokristallines Silicium verwendet, ist der Wirkungsgrad besonders hoch, ungefähr 25%. Wird polykristallines Silicium benutzt, fällt der Wirkungsgrad auf 18 - 20 % und bei amorphem Silicium sind es 5 - 7 %.

## 2.3. Energiespeicherung und Verhalten von Solarzellen

### a. Theoretische Betrachtung

#### Methode

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes wird folgender Matlab code zur graphischen Darstellung des theoretischen Spannungsabfalles bei der Entladung eines Kondensators verwendet:

## 2. Aufgaben

---

```
1 % Wie in der Diskussion hergeleitet, ist die Formel zur Berechnung der ↵
   Spannung in Abhängigkeit der Zeit bei der Entladung eines Kondensators↵
   folgende:
2 %  $U = U_0 * e^{(-t / \tau)}$ 
3 % Für dieses Beispiel wird  $U_0 = 0.42$  V gesetzt, was in etwa der ↵
   maximalen Spannung der Kondensators im realen Experiment entspricht
4
5 tau = 110; % Wie in der Diskussion berechnet
6
7
8 % Graphische Darstellung der Spannung
9
10
11 x = [1:600]; % Zeit in Sekunden
12 y = 0.84 * exp(1) .^ (- x ./ tau);
13
14 plot(x, y);
15
16
17 % Weitere Betonung bestimmter Zeitpunkte
18
19
20 t1 = tau;
21 t2 = 2 * tau;
22 t3 = 3 * tau;
23 t4 = 4 * tau;
24 t5 = 5 * tau;
25
26 y1 = 0.84 * exp(1) .^ (- t1 ./ tau);
27 y2 = 0.84 * exp(1) .^ (- t2 ./ tau);
28 y3 = 0.84 * exp(1) .^ (- t3 ./ tau);
29 y4 = 0.84 * exp(1) .^ (- t4 ./ tau);
30 y5 = 0.84 * exp(1) .^ (- t5 ./ tau);
31
32 hold on
33
34 line([0 t1], [y1 y1], 'Color', 'red');
35 line([0 t2], [y2 y2], 'Color', 'red');
36 line([0 t3], [y3 y3], 'Color', 'red');
37 line([0 t4], [y4 y4], 'Color', 'red');
38 line([0 t5], [y5 y5], 'Color', 'red');
39
40 line([t1 t1], [0 y1], 'Color', 'red');
41 line([t2 t2], [0 y2], 'Color', 'red');
42 line([t3 t3], [0 y3], 'Color', 'red');
43 line([t4 t4], [0 y4], 'Color', 'red');
44 line([t5 t5], [0 y5], 'Color', 'red');
```

Abbildung 13: Matlab code zur graphischen Darstellung des theoretischen Spannungsverlaufes bei Entladung eines Kondensators



## Diskussion

Ein Kondensator besteht aus zwei Metallflächen, die durch einen Isolator getrennt sind. Er dient zur Ladungsspeicherung, indem man ihn an eine Spannungsquelle schaltet. Die davor gleichmäßig verteilten Elektronen werden vom Minus-Pol gezogen, welches mit dem Plus-Pol der Quelle verbunden ist. Somit wird der Kondensator elektrisch geladen. Würde man jetzt die Spannungsquelle mit einem Widerstand wechseln, dann würde der Kondensator als Spannungsquelle fungieren und sich entladen. Der Minus-Pol des Kondensators, wo sich früher die Elektronen gelagert haben wird neutral, indem die Elektronen über dem Widerstand vom Plus-Pol weggezogen werden. Der Isolator sorgt dafür, dass der Minus- und Plus-Pol nie direkt in Verbindung kommen, so dass die Elektronen immer über einen Leiter wandern müssen.

$$\delta Q = C * \delta U \quad (1)$$

$$\delta Q = I * \delta t \quad (2)$$

$$C * \delta U = I * \delta t \quad (3)$$

$$I = \frac{C * I}{\delta t} \quad (4)$$

$$I_0 = C \frac{\delta U}{\delta t} = C \frac{U - 0V}{t - 0V} = C \frac{U}{t} \quad (5)$$

$$I_0 = \frac{U_0}{R} \quad (6)$$

$$C \frac{U}{t} = \frac{U}{R} \quad (7)$$

$$t = \tau = C * R \quad (8)$$

$$I = -\frac{U}{R} * e^{-\frac{t}{\tau}} = -I_0 * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

$$\frac{I}{I_0} = -e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

$$U = U_0 * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

$$\frac{U}{U_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

$$t = \tau \quad (13)$$

$$\frac{I}{I_0}(t = \tau) = -e^{-\frac{\tau}{\tau}} = -e^{-1} = -\frac{1}{e} \quad (14)$$

$$t = 2\tau \Rightarrow \frac{I}{I_0} = -\frac{1}{e^2} \approx -0.14 \text{ A} \quad (15)$$

$$t = 3\tau \Rightarrow \frac{I}{I_0} = -\frac{1}{e^3} \approx -0.05 \text{ A} \quad (16)$$

$$t = 4\tau \Rightarrow \frac{I}{I_0} = -\frac{1}{e^4} \approx -0.02 \text{ A} \quad (17)$$

$$t = 5\tau \Rightarrow \frac{I}{I_0} = -\frac{1}{e^5} \approx -0.01 \text{ A} \quad (18)$$

$$\frac{U}{U_0}(t = \tau) = e^{-\frac{\tau}{\tau}} = e^{-1} \quad (19)$$

Mit dem hiesigen experimentellen Aufbau gilt:

$$\tau = R * C = 500\Omega * 220mF = 110s \quad (20)$$

Setzen wir  $U_0 = 0.84 \text{ V}$ , was in etwa der maximalen Spannung des Kondensators im realen Experiment entspricht, bekommen wir folgenden Graphen:

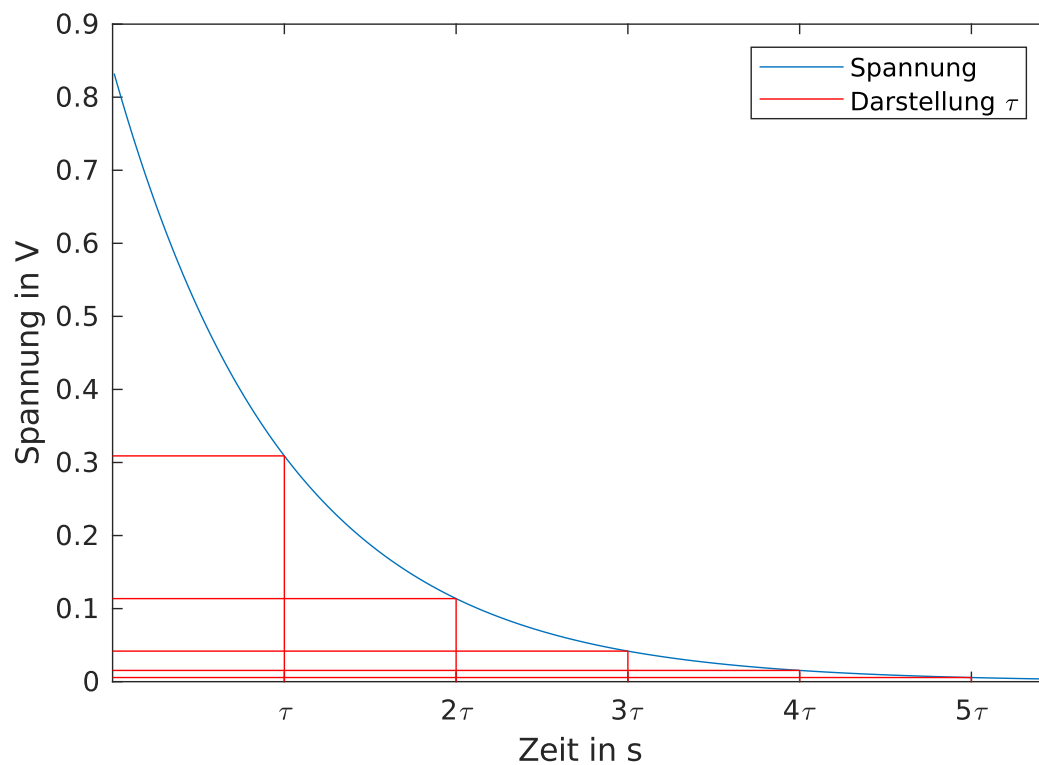


Abbildung 14: Theoretischer Spannungsverlauf bei Entladung

### b. Messung

#### Methode/Materialien

Hier soll an der bisherigen Schaltung ein Speicherkondensator ( $V = 5,5 \text{ V}$ ;  $C = 220,0 \text{ mF}$ ) angeschlossen werden. Unter konstanter Bestrahlung der Solarzelle wird die Spannung beim Aufladen des Kondensators gemessen. Als nächstes soll das Licht ausgeschaltet werden und der Kondensator soll mit einem  $500 \text{ Ohm}$  Widerstand angeschlossen werden, damit er sich entlädt.

Für die Graphische Darstellung wurde folgender Matlab code verwendet:

```
1 % V_auf: Vektor mit Spannungen bei Aufladung des Kondensators
2
3 plot(V_auf, 'r');
```

Abbildung 15: Matlab code zur graphischen Darstellung des Spannungsverlaufes bei der Aufladung des Kondensators

```
1 % V_ent: Vektor mit Spannungen bei Entladung des Kondensators
2
3 plot(V_ent);
```

Abbildung 16: Matlab code zur graphischen Darstellung des Spannungsverlaufes bei der Entladung des Kondensators

### Ergebnis

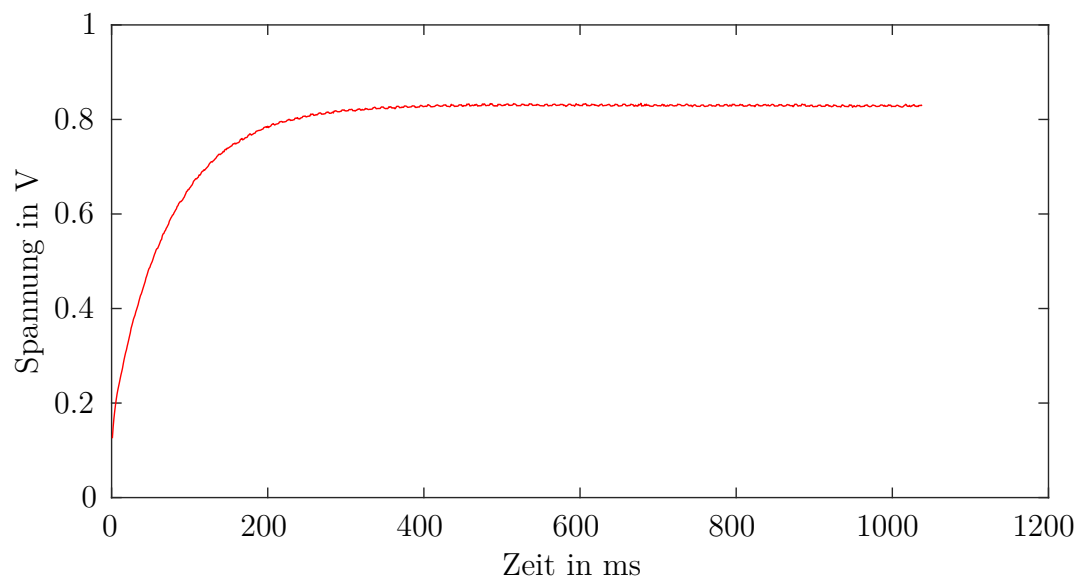


Abbildung 17: Spannungsverlauf bei Aufladung des Kondensators

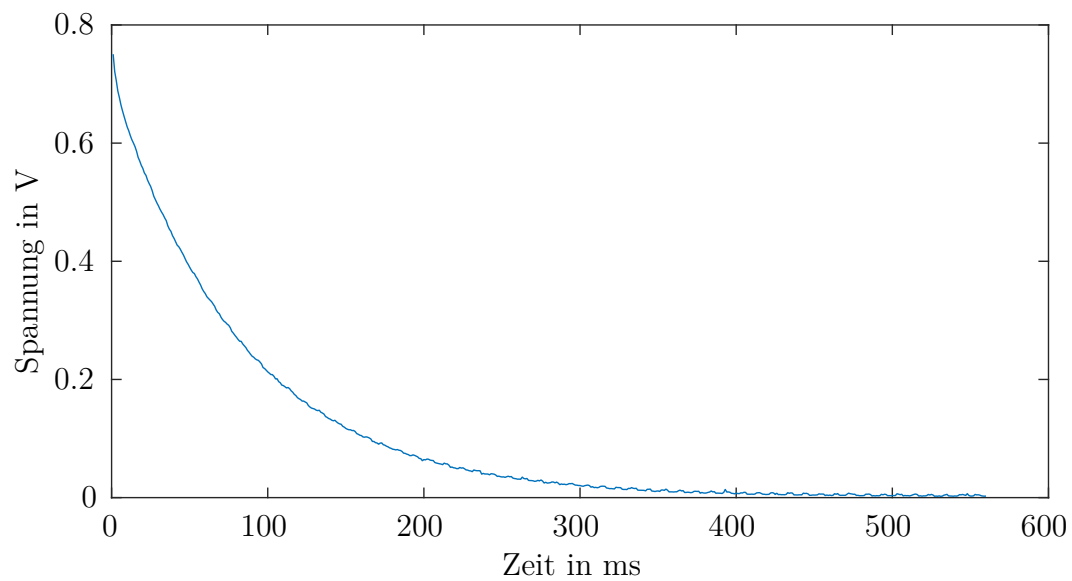


Abbildung 18: Spannungsverlauf bei Entladung des Kondensators

### c. Modellbildung

#### Diskussion

Die in der letzten Teilaufgabe gezeigten U-I-Diagramme sind hier zu vergleichen. Beim Aufladen sieht man, dass je größer die Spannung wird, umso mehr sich die Stromstärke dem Wert Null annähert. Die Kurve fängt bei einem Wert von ungefähr 2.7mA an, wo noch fast keine Spannung fließt. Die Stromstärke sinkt rapide. Je näher sie sich der Null nähert, umso langsamer sinkt sie. Die Spannung dagegen steigt kontinuierlich, bis sie ihren Grenzwert bei ungefähr 0.42V erreicht. Beim Entladen sollte man den Graphen von rechts nach links lesen, weil die Spannung sinkt. Die Kurve fängt bei ca. -3.5mA und 0.36V an. Hier sind die Werte von der Stromstärke im negativen Bereich zu sehen. Wieder nähert sich die Stromstärke der Null an, aber diesmal indem sie steigt. Je kleiner die Spannung ist, umso größer wird die Stromstärke.

Beim Aufladen eines Kondensators, steigt die Spannung bis zum Maximalwert. Dabei steigt auch der Widerstand des Kondensators, denn er kann ab einer bestimmten Spannung zerstört werden. Weil es weniger Elektronen gibt, die auf dem Pluspol des Kondensators sind, fließt weniger Strom durch. Wird der Maximalwert der Spannung erreicht, dann fließt kein Strom mehr. Der Widerstand des Kondensators wird dabei unendlich groß.

Beim Entladevorgang wirkt der Kondensator wie eine Spannungsquelle mit einem sehr kleinen Innenwiderstand. Es fließt ein Strom in der entgegengesetzten Richtung, was erklärt, warum die Stromstärke im negativen Bereich liegt. Die Spannung sinkt vom Maximalwert auf Null und genauso sinkt die Stromstärke. Wenn der Kondensator entladen ist, dann fließt kein Strom mehr. Um die Solarzelle besser zu beschreiben, soll eine Stromquelle als Modell benutzt werden, denn die Stromstärke verändert sich im Verhältnis zur Spannung kaum.

### d. Gesamtenergie und Wirkungsgrad

#### Methode/Materialien

```
1 % V_auf: Vektor mit Spannungen bei Aufladen des Kondensators
2 % V_end: Vektor mit Spannungen bei Entladen des Kondensators
3
4
5 len = length(V_auf);
6
7 % t: Zeitvektor, in Millisekunden
8
9 t = [1:len];
10 t = t.';
11
12 I = 220*10^-3 .* (diff(V_auf) ./ diff(t));
13 V_auf = V_auf(1:(len-1)); % Ein Element des Spannungsvektors muss ←
    weggelassen werden, da wegen der 'diff' Funktion der Vektor 'I' ein ←
    Element weniger enthält
14 Q = V_auf .* I;
15 q = trapz(Q); % Gesamte Energie die zum Aufladen des Kondensators ←
    verbraucht wurde
16
17
18 len = length(V_end);
19 t = [1:len];
20 t = t.';
21
22 I = 220*10^-3 .* (diff(V_end) ./ diff(t));
23 V_end = V_end(1:(len-1));
24 P = V_end .* I;
25 p = trapz(P); % Gesamte Energie die beim entladen des Kondensators ←
    freigesetzt wurde
26
27
28 wirk = abs(p) / abs(q); % Berechnung des Wirkungsgrades
```

Abbildung 19: Matlab code zur Berechnung des Wirkungsgrades

#### Ergebnis

Wirkungsgrad: 82.3%

#### Diskussion

Recherchen zeigen (Quelle aus Internet), dass der Wirkungsgrad unserer Messung um 10 % abweicht, da sie bei 90 % liegen sollte. Diese Differenz kann auf mehrere Faktoren

zurückgeführt werden. In der letzten Teilaufgabe ist zu sehen, dass das Aufladen des Kondensators bei ca. 0.42V aufhört und das Entladen bei ca. 0.36V anfängt. Dies bedeutet, dass zwischen den beiden Vorgängen Spannung verloren gegangen ist. (Speicherdauer)

Außerdem könnten es Messfehler geben. Z.B. könnte der Raum beim Entladevorgang nicht dunkel genug gewesen sein, sodass die falschen Spannungen gemessen wurden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Wärmeverluste immer mitgemessen wurden. (Einen Messfehler aufgrund von Wärmeverlust kann ausgeschlossen werden, da dieser sowohl bei der Aufladung als auch bei der Entladung bereits enthalten war). Auffällig sind zudem die Graphen beider Messungen. Die Werte schwanken relativ stark. Eine Begründung für diese Schwankungen können äußere Faktoren sein. So wurde die Messung in einem nicht vollständig abgedunkelten Raum durchgeführt. (Wie genau Einfluss?) Im Nachhinein hätte man, statt die Solarzelle abzudunkeln, diese abkoppeln können, sodass auch Restlicht keinen Einfluss hat. Mittlerweile ist die Technik so weit weiterentwickelt, dass der Wirkungsgrad schon bei 97 % liegt (vgl. KIT PAPER)

## 2.4. Verhalten Photovoltaik mit und ohne Energiespeicher

### a. Messung

#### Methode

Die Messungen werden wie in der Schaltskizze ausgeführt. Beim zweiten Durchlauf wird ein Kondensator parallelgeschaltet. Mit folgendem Matlab-Skript wurde Abbildung 20 dargestellt:

```
1 % V_withC: Vektor mit Spannung mit Kondensator
2 % V_withoutC: Vektor mit Spannungen ohne Kondensator
3
4 plot(V_withC);
5 plot(V_withoutC);
```

Abbildung 20: Matlab-Skript zur graphischen Darstellung der Spannung

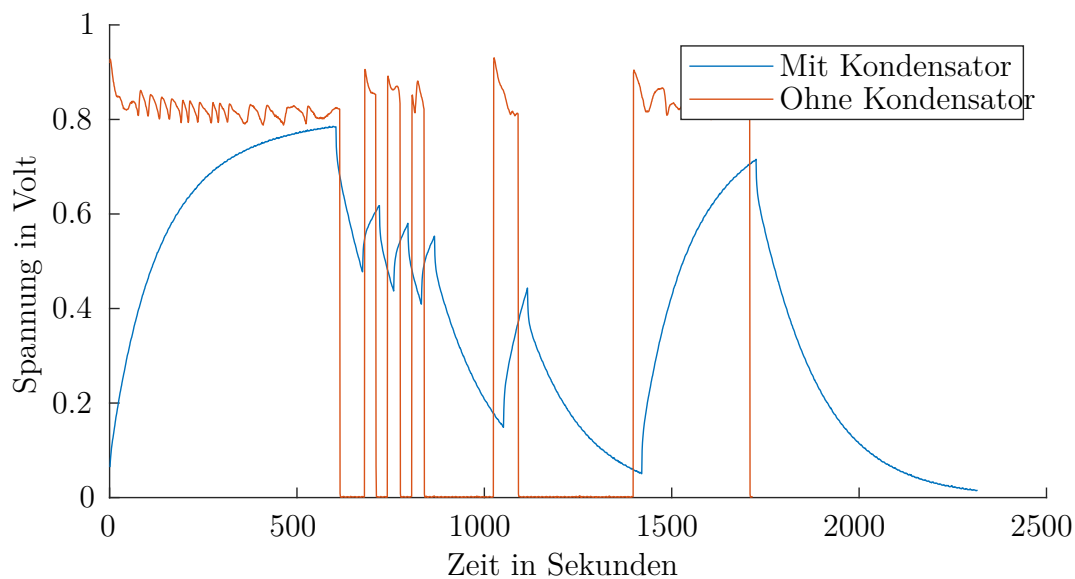


Abbildung 21: Spannungsverlauf mit und ohne Kondensator

### b. Auswirkung des Speicherkondensators

#### Diskussion

Auf dem ersten Blick fallen die Werte der Messung ohne dem Kondensator auf, welche trotz gleichmäßiger Beleuchtung um einen Mittelwert, einer Spannungskonstante, schwanken. Solche oszillierende(?) Werte treten mit einem Kondensator nicht auf. Schaltet man einen Kondensator dazu, so erreicht dieser erst nach ca. 10 Minuten Beleuchtung die Spannungskonstante der Schaltung ohne Kondensator. Der Graph steigt exponentiell an, sodass mit der Zeit die Spannungsänderung kleiner wird. Wird die Solarzelle im Anschluss beschattet, so fällt der Graph im Gegensatz zu der ohne dem Kondensator exponentiell, weshalb die Spannung in der kurzen Beschattungszeit auf ungefähr 0,5V statt auf 0V sinkt. Der Übergang zwischen den beiden Phasen bei dem Graphen ohne dem Kondensator hingegen ist abrupt.

Betrachtet man die Werte im Intervall, in der alle 30 Sekunden die Phase wechselt, so lässt sich feststellen, dass bei der ersten Messung die Spannung bei jeder Bestrahlung näherungsweise gleich hoch ist. Bei der zweiten jedoch nimmt die maximale Spannung mit jedem Durchlauf ab.

Allgemein lässt sich sagen, dass ohne einem Kondensator bei konstantem Lichteinfall die Spannung gleichbleibt und bei der Verschattungszeit diese auf null fällt. Der Wechsel zwischen den beiden Phasen verläuft annähernd sprunghaft. Mit einem Kondensator steigt die Spannung exponentiell an unter Lichteinfluss. Bei Abwesenheit dieser nimmt die Spannung dementsprechend exponentiell ab.

(zu überarbeiten: Speicherkondensatoren können daher als Energiespeicher fungieren, jedoch sind diese nur teils dafür geeignet. Während der Entladung nimmt die Spannung



---

mit der Zeit ab, sodass sie sich nicht als konstante Spannungsquelle infrage kommt. Nichtsdestotrotz ist von Vorteil, dass der Kondensator die elektrische Energie direkt speichert, ohne diese in eine andere Energie umzuwandeln.)

Bei erneuerbarer Energie sind die schwankenden Umweltfaktoren entscheidend. So wurde zuvor (vgl. 2.3) abgeschätzt, wie stark sich die Messung in der Sommerzeit verändert hätte. Bei einer Solarzelle kommen noch weitere Einflüsse wie Verschattung und Einfallswinkel des Lichts hinzu. In diesen Momenten wirkt der Speicherkondensator einem direkten Abbruch der Spannung entgegen. Daher spielt bei den erneuerbaren Energien die Energiespeicherung eine besonders große Rolle. Zwar helfen Speicherkondensatoren bei kürzeren Spannungseinbrüchen, jedoch stellt sich eine langanhaltende Speicherung als schwierig heraus, da der Speicher selber in Laufe der Zeit Energie verliert (Quelle), sodass es wirtschaftlich effizienter ist, die Energie in einer anderen Energieart zwischen zu speichern trotz Energieverlust bei den Umwandlungen. (Quelle)

### 3. Zusammenfassung

Ziel dieses Workshops war es, erstmals Praxiserfahrungen mit einem Projekt zu sammeln. Thematisch geht es um die Energiegewinnung, respektive um Photovoltaik. Zunächst wurde sich generell mit dem Thema Energiegewinnung und der Funktionsweise einer Solarzelle befasst. Hierzu sollte selbstständig Messungen durchgeführt werden, welche im Anschluss analysiert und ausgewertet wurden, sodass man folgende Rückschlüsse hinsichtlich der optimalen Leistung sowie der Energiespeicherung ziehen konnte. Für eine möglichst effiziente Energiegewinnung wird der Maximum-Power-Point ermittelt, an der die Leistung am größten ist. Dieser ist von der verwendeten Bestrahlungsart abhängig. Beim Einsatz im Freien fallen mehrere Einflussfaktoren zusammen aufgrund der sich verändernden Witterung. So entstehen Schwankungen einerseits in kleinen Intervallen von Tagen als auch größer betrachtet in einem längeren Zeitraum aufgrund der Jahreszeiten. Infolgedessen ist die Versorgungssicherheit nicht gewährleistet, sodass nun die Energiespeicherung einer Solarzelle genauer betrachtet wurde. Nach einer theoretischen Betrachtung wurden eigene Versuche zur Kondensatorauf- bzw. entladung durchgeführt. Als Folgerung lässt sich die Solarzelle vielmehr als Stromquelle beschreiben. Der Wirkungsgrad wurde berechnet, wobei dieser von dem Erwartungswert abweicht, welches auf eine ungenaue Messung schließen lässt. Anschließend wurde beobachtet, inwiefern der verwendete Speicherkondensator als Energiespeicher infrage kommt. So kommen wir zu dem Resultat, dass Speicherkondensatoren für Langzeiteinsätze weniger geeignet sind sowohl von der Effizienz als auch vom wirtschaftlichen Standpunkt her.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Photovoltaik als Mittel zur Energieerzeugung großes Potential besitzt. Jedoch ist es als zukünftige konkurrenzfähige Alternative zu herkömmlichen Methoden vonnöten, dass für eine Effizienzsteigerung in die Weiterforschung investiert wird.

## 4. Literaturverzeichnis

### Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt. *Erneuerbare Energien in Deutschland*. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/180315\\_uba\\_hg\\_eeinzahlen\\_2018\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/180315_uba_hg_eeinzahlen_2018_bf.pdf), Abrufdatum: 11. Dezember 2018.
- [2] K. Mertens. *Photovoltaik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Leipzig, 4. Auflage, 2018.
- [3] L. Constantinescu-Simon. *Handbuch elektrische Energietechnik*. Verlag Vieweg, Braunschweig, 2. Auflage, 1997.
- [4] P. Gruss und F. Schüth (Hrsg.). *Die Zukunft der Energie*. Verlag Beck, München, 3. Auflage, 2008.
- [5] H-G. Wagemann, H. Eschrich. *Photovoltaik*. Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2. Auflage, 2010.
- [6] O. Dössel. *Vorlesungsskript zur Vorlesung Lineare Elektrische Netze*. Institut für Biomedizinische Technik, 2018.
- [7] F. Konrad. *Planung von Photovoltaik-Anlagen*. Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2. Auflage, 2008.
- [8] R. N. H. Vasquez. *Entwicklung und Aufbau eines Solarwechselrichters mit MPP-Tracking*. [http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2010/1055/pdf/Diplomarbeit\\_Ruediger\\_Heidenreich\\_2010.pdf](http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2010/1055/pdf/Diplomarbeit_Ruediger_Heidenreich_2010.pdf), Abrufdatum: 10. Dezember 2018.
- [9] Baden-Württemberg/Innovationsbeirat. *Zukunft der Energieversorgung*. Verlag Springer, Berlin, 7. Auflage, 2003.
- [10] M. Gommeringer, A. Schmitt, F. Kammerer, M. Braun. An Ultra-Efficient Maximum Power Point Tracking Circuit for Photovoltaic Inverters In: *IECON 2015 – 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000052985>, Abrufdatum: 13. Dezember 2018