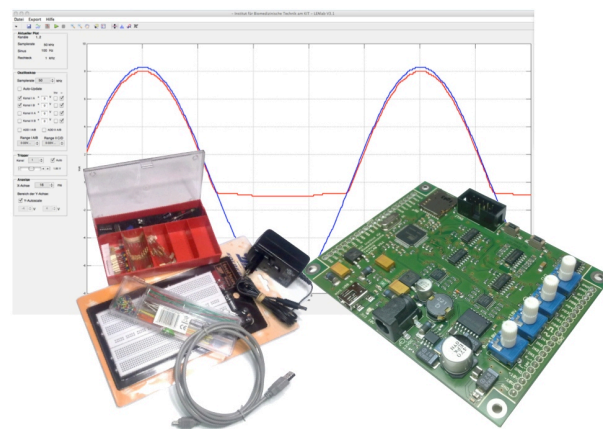


Kurs 1

# Messwerterfassung und regenerative Energieerzeugung



Gruppe 57

Vorname	Nachname	Matrikel-Nr.	u-Account	E-Mail
Yekta	Ahmadi Simab	2476855	unkho	unkho@student.kit.edu
Pratham	Gupta	2395144	ufuxl	ufuxl@student.kit.edu
Ronja	Wenzel	2492373	ujwys	ujwys@student.kit.edu

16. Dezember 2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Motivation . . . . .	4
1.2	Literaturrecherche . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Aufgaben</b>	<b>6</b>
2.1	Allgemeiner Aufbau . . . . .	6
2.2	Vermessung der Solarzelle . . . . .	7
2.2.1	Materialien und Methoden . . . . .	7
2.2.2	Ergebnisse . . . . .	13
2.2.3	MPP-Anpassung . . . . .	18
2.2.4	Diskussion . . . . .	18
2.3	Langzeitmessung . . . . .	19
2.3.1	Materialien und Methoden . . . . .	19
2.3.2	Ergebnisse . . . . .	20
2.3.3	Energiegewinnung . . . . .	20
2.3.4	Diskussion . . . . .	21
2.4	Energiespeicherung und das Verhalten einer Solarzelle . . . . .	22
2.4.1	Theoretische Betrachtung . . . . .	22
2.4.2	Materialien und Methoden . . . . .	23
2.4.3	Ergebnisse . . . . .	24
2.4.4	Vergleich Lade- und Entladekurve . . . . .	25
2.4.1	Gesamtenergie und Wirkungsgrad . . . . .	25
2.4.2	Diskussion . . . . .	25
2.5	Vergleich Photovoltaik mit und ohne Energiespeicher . . . . .	26
2.5.1	Materialien und Methoden . . . . .	26
2.5.2	Ergebnisse . . . . .	26
2.5.3	Vergleich Messkurven . . . . .	26
2.5.4	Verwendung von Kondensatoren . . . . .	27
2.5.5	Was ist das Ziel der Energiespeicherung im Allgemeinen und was kann hierbei verbessert werden? . . . . .	27
2.5.6	Diskussion . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>29</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Allgemeine Schaltskizze mit auswechselbarem Bauteil X . . . . .	6
2	Foto von allgemeinem Schaltungsaufbau . . . . .	6
3	I-U-Kennlinie bei Bestrahlung mit 17 W LED . . . . .	14
4	I-U-Kennlinie bei Bestrahlung mit 17 W Kompaktleuchtstofflampe . . . . .	15
5	I-U-Kennlinie bei Bestrahlung mit 60 W Glühlampe . . . . .	16
6	Leistung bei Bestrahlung . . . . .	17
7	P-U-Kennlinie, I-U-Kennlinie und MPP bei Bestrahlung mit 17 W LED . . . . .	18
8	Langzeitmessung einer Solarzelle unter der Sonne . . . . .	20
9	ideale Entladung . . . . .	22
10	Spannungsverlauf beim Laden und Entladen des Kondensators . . . . .	24
11	Vergleich mit und Ohne Energiespeicher . . . . .	27

## Tabellenverzeichnis

1	Messwerte LED . . . . .	14
2	Messwerte Kompaktleuchtstoffröhre . . . . .	15
3	Messwerte Glühbirne . . . . .	16

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten ist deutlich geworden, dass Kohlenstoffdioxid, das bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen frei wird und in die Atmosphäre gelangt, den Treibhauseffekt stärker antreibt. Somit erhöht es die globale Durchschnittstemperatur und beschert den Menschen durch ein verändertes Klima viele Katastrophen. Außerdem sind fossile Brennstoffe nur in endlichen Mengen verfügbar und werden in absehbarer Zeit aufgebraucht sein. Aus diesen Gründen forschen Wissenschaftler schon lange anderen Möglichkeiten der Energiegewinnung. [1]

Eine weitere aktuelle Entwicklung, die diese Bemühungen noch weiter angetrieben hat, ist die aktuelle Energiekrise in Europa, da die Europäer keine fossilen Brennstoffe mehr aus Russland beziehen und ihre Energieversorgung unabhängiger machen wollen.

Die Grundidee dieser Forschungen ist es, Energieformen zu verwenden, die überall und langfristig verfügbar sind und bei deren Umwandlung in elektrische Energie kein Kohlenstoffdioxid frei wird. Solche Energieträger nennen wir „regenerative Energien“.

Eine Möglichkeit der regenerativen Energieerzeugung ist die Solarzelle. Um diese besser zu verstehen und bewerten zu können, führen wir mit dieser nun einige Versuche durch.

Im Rahmen des Workshops lernen wir bei der Bearbeitung der Aufgaben verschiedenste, für das weitere Studium relevante Arbeitstechniken, sowie Literaturrecherche. Wir bauen beispielsweise eigene Schaltungen auf und führen an diesen Spannungsmessungen mithilfe eines Mikrocontrollers durch. Ein Bauteil, mit dem wir uns sehr intensiv beschäftigen ist dabei die Diode im allgemeinen und Photodiode im Besonderen. Im Zuge der Auswertung der Messwerte haben wir uns auch ausführlich mit dem Programm MATLAB beschäftigt und bei der Ausarbeitung haben wir Erfahrungen mit LaTeX gesammelt.

## 1.2 Literaturrecherche

### **Wie funktioniert die Gewinnung elektrischer Energie mithilfe von Photovoltaik?**

Den Begriff Photovoltaik im Allgemeinen definiert Mertens als "die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie"[1] und eine Photovoltaikanlage besteht aus Solarzellen. Eine einzelne Solarzelle besteht aus einem Halbleiter, zumeist Silizium, mit einem pn-Übergang. Wenn die Solarzelle nun mit Licht bestrahlt wird, absorbiert sie die Photonen und nutzt die Energie, um Elektronen aus der Kristallstruktur des Halbleiters zu lösen. Aufgrund der Dotierung bewegt sich das Elektron nun zum n-dotierten Ende des Halbleiters, an dem ein einfacher Leiter angeschlossen ist. Über diesen Leiter und den Leiter am p-dotierten Ende ist somit eine Spannung von ungefähr 0,5 V messbar. Um den Strom nun in das Netz einspeisen zu können, werden mehrere Solarzellen in Reihe geschaltet, damit die Spannung größer wird. Außerdem muss noch ein Wechselrichter angeschlossen werden, der den Gleichstrom der Solarzellen in den für das Netz notwendigen Wechselstrom umwandelt.[1]

### **Was beschreibt die I-U-Kennlinie und was versteht man unter dem Maximum-Power-Point einer Solarzelle?**

Wir verwenden durchgehend das „Erzeugerpfilsystem“ [1], da uns im Wesentlichen der Solarzellenbetrieb der Photodiode interessiert.

#### **I-U-Kennlinie**

Eine I-U-Kennlinie im Allgemeinen bildet für ein bestimmtes elektrisches Bauteil die Stromstärke über die Spannung ab.

Eine typische Kennlinie einer Solarzelle bei verschiedenen Bestrahlungsstärken ist in der Abbildung zu sehen. Im zweiten Quadranten wird die Solarzelle als Photodiode verwendet. Somit fließt mehr Strom, wenn die Bestrahlungsstärke größer ist, da dann zusätzlich zum angelegten Sperrstrom ein weiterer Strom in der Photodiode erzeugt wird. Am Übergang zwischen dem ersten und zweiten Quadranten ist die Leerlaufspannung sichtbar, das heißt die Spannung, die die Solarzelle erzeugt, wenn keine Spannung angeschlossen ist. Im ersten Quadranten ist die I-U-Kennlinie für den Solarbetrieb dargestellt. Dort bei positiver angelegter Spannung ein negativer Strom erzeugt, da die erzeugte Spannung der angelegten entgegengerichtet ist. [1]

#### **Maximum-Power-Point**

Im ersten Quadranten ist auch der Maximum-Power-Point zu finden, denn an diesem Punkt ist nach  $P = U \cdot I$  die Leistung maximal. Das heißt, es ist der Punkt, an dem der Flächeninhalt des Rechtecks aus den Koordinatenachsen und den Verbindungslinien zwischen dem Punkt und den Achsen maximal ist.

Der Maximum-Power-Point ist der Punkt, an dem idealerweise auch der Arbeitspunkt der Solarzelle sein sollte, das heißt die anliegende Spannung sollte immer entsprechend angepasst werden. [1]

### **Welche Möglichkeiten zur Speicherung von (regenerativ erzeugter) Energie gibt es?**

Bei der Energieerzeugung mit Solarzellen kann man die Zeitpunkte der Erzeugung nicht vom momentanen Verbrauch abhängig machen, sondern nur von den Sonnenstunden. Da aber nicht mehr Energie ins Netz eingespeist werden kann, als verbraucht wird, muss die erzeugte Energie gespeichert werden. Dafür gibt es viele verschiedene Möglichkeiten. So gibt unterschiedlich Batterien, wie Blei-Säure-Batterien, Natrium-Schwefel-Batterie und Redox-Flow-Batterie. Außerdem gibt es noch viele weitere Möglichkeiten, wie Pumpspeicherkraftwerk, Druckluftspeicher, Latentwärmespeicher und Doppelschichtkondensatoren. [2]

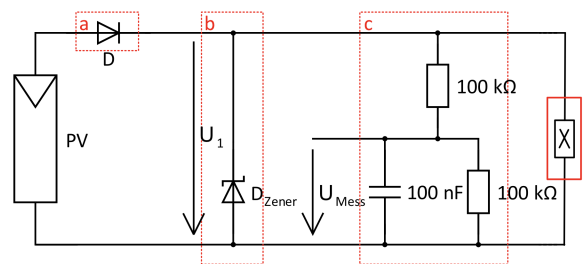


Abbildung 1: Allgemeine Schaltskizze mit auswechselbarem Bauteil X

## 2 Aufgaben

### 2.1 Allgemeiner Aufbau

Wir verwenden für alle nachfolgenden Messungen im Wesentlichen die gleiche Schaltung, die in der Schaltskizze in Abbildung 1 zu sehen ist. Wir verwenden eine 5 Watt Solarzelle, an deren Eingang wir eine Diode anschließen, damit kein Strom hineinfließt. Zwischen diese Diode und Ausgang der Solarzelle schalten wir eine Zener-Diode, die die Spannung auf 5,1 V begrenzt. Zusätzlich haben wir noch einen Spannungsteiler verwendet, um die Spannung über dem Messgerät (Mikrocontroller) auf 2,55 V zu beschränken, somit beschädigen wir keins der Bauteile. Der Spannungsteiler besteht aus zwei 100 kΩ Widerständen und einem Kondensator mit einer Kapazität von 100 nF. Über die Spannungsteiler messen wir mithilfe des TI-Boards, das als Voltmeter fungiert, die Spannung. Das Bauteil, das wir an der Stelle des Bauteil X einbauen, je nach Messung unterschiedlich.

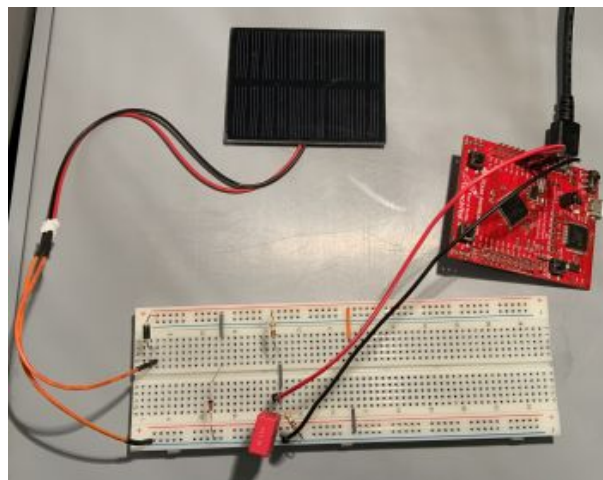


Abbildung 2: Foto von allgemeinem Schaltungsaufbau

## 2.2 Vermessung der Solarzelle

### 2.2.1 Materialien und Methoden

#### I-U-Kennlinie

Zunächst schließen wir in der Schaltung 1 anstatt des Bauteils X 16 verschiedene Lastwiderstände an und positionieren die gesamte Schaltung 38 cm unterhalb einer Fassung, in die wir unterschiedliche Leuchtmittel schrauben. Das Licht strahlt senkrecht (Winkel von  $90^\circ$ ) auf die Solarzelle.

Um die einzelnen Messwerte zu bestimmen, verwenden wir für 16 Messungen ein Leuchtmittel und wechseln zwischen den einzelnen Messungen nur den Widerstand. Gemessen haben wir immer wenige Sekunden mit einem Messintervall von 100 ms, um dann hinterher den Mittelwert zu bestimmen, damit wir kurzzeitig auftretende, starke Messfehler erkennen.

Um die Widerstände von  $900\ \Omega$  und  $1220\ \Omega$  zu erhalten, haben wir zwei Widerstände in Reihe geschaltet. Zum Erstellen der I-U-Kennlinie haben wir die Stromstärke mithilfe der Formel  $I = \frac{U}{R}$  berechnet und diese dann gegen die Spannung aufgetragen. Konkret haben wir das mit diesem MATLAB-Skript durchgeführt:

```

1 clear all;
2 %R_mess = 100kOhm
3 R_mess = 100000;
4 Widerstaende = [0, 10, 22, 47, 100, 220, 470, 680, 900, 1000, 1220, ↵
   1500, 2200, 3300, 4700, inf ];
5 %LQ1= LED
6
7 LQ1 = zeros(16, 2);
8 %Gemessene Spannungen einfuegen als U_ges = 2 * U_mess
9 LQ1(:, 1) = 2 * [0.011
10 0.015
11 0.017
12 0.027
13 0.061
14 0.120
15 0.246
16 0.341
17 0.454
18 0.498
19 0.596
20 0.736
21 1.039
22 1.486
23 1.713
24 2.224];
25 %I_ges = ((2*U_mess)*(R_mess+R_L))/(R_mess*R_L)
26 for i = 1 : 16
27     %Schon als 2*U_mess eingespeichert
28     U_mess_2 = LQ1(i, 1);
29     R_L = Widerstaende(i);
30     %in mA umrechnen: *1000

```

## 2 Aufgaben

---

```
31 LQ1(i, 2) = (U_mess_2 * (R_mess + R_L)) / (R_mess * R_L)*1000;
32 end
33 LQ1 = sortrows(LQ1);
34 %LQ2= ESL
35 LQ2 = zeros(16, 2);
36 %Gemessene Spannungen einfuegen als U_ges = 2 * U_mess
37 LQ2(:, 1) = 2 * [0.011
38 0.011
39 0.012
40 0.013
41 0.016
42 0.028
43 0.063
44 0.091
45 0.161
46 0.145
47 0.153
48 0.198
49 0.277
50 0.417
51 0.574
52 1.70];
53 %I_ges = ((2*U_mess)*(R_mess+R_L))/(R_mess*R_L)
54 for i = 1 : 16
55     %Schon als 2*U_mess eingespeichert
56     U_mess_2 = LQ2(i, 1);
57     R_L = Widerstaende(i);
58     %in mA umrechnen: *1000
59     LQ2(i, 2) = (U_mess_2 * (R_mess + R_L)) / (R_mess * R_L) * 1000;
60 end
61 LQ2 = sortrows(LQ2);
62 %LQ3= Glühlampe
63 LQ3 = zeros(16, 2);
64 %Gemessene Spannungen einfuegen als U_ges = 2 * U_mess
65 LQ3(:, 1) = 2 * [0.013
66 0.0142
67 0.0197
68 0.0368
69 0.0753
70 0.1673
71 0.3469
72 0.4896
73 0.7066
74 0.7243
75 0.9359
76 1.0834
77 1.4671
78 1.8620
79 2.0760
80 2.3612];
```



```
81 %I_ges = ((2*U_mess)*(R_mess+R_L))/(R_mess*R_L)
82 for i = 1 : 16
83     %Schon als 2*U_mess eingespeichert
84     U_mess_2 = LQ3(i, 1);
85     R_L = Widerstaende(i);
86     %in mA umrechnen: *1000
87     LQ3(i, 2) = (U_mess_2 * (R_mess + R_L)) / (R_mess * R_L) * 1000;
88 end
89 LQ3 = sortrows(LQ3);
90
91 figure1 = figure;
92 plot(LQ1(:, 1), LQ1(:, 2), '-x', 'LineWidth', 1.5);
93 title('I-U-Kennlinie für eine LED');
94 grid on;
95 xlabel('Spannung [V]');
96 ylabel('Stromstärke [mA]');
97 ylim([0.5, 3.1]);
98 xlim([0, 3]);
99
100 figure2 = figure;
101 plot(LQ2(:, 1), LQ2(:, 2), '-x', 'LineWidth', 1.5);
102 title('I-U-Kennlinie für Kompaktleuchtstofflampe');
103 grid on;
104 xlabel('Spannung [V]');
105 ylabel('Stromstärke [mA]');
106 ylim([0, 2.5]);
107 xlim([0, 1.2]);
108
109 figure3 = figure;
110 plot(LQ3(:, 1), LQ3(:, 2), '-x', 'LineWidth', 1.5);
111 title('I-U-Kennlinie für eine Glühlampe');
112 grid on;
113 xlabel('Spannung [V]');
114 ylabel('Stromstärke [mA]');
115 ylim([0.5, 3]);
116 xlim([0, 4.2]);
```

### Leistung und MPP

Zunächst haben wir die Leistung für jeden einzelnen Messwert mit der Formel  $P = \frac{U^2}{R}$  berechnet, um Fehler durch mehrfaches Runden zu vermeiden.

Zur Bestimmung des MPPs haben wir dann für jede Lichtquelle ermittelt, welche der errechneten Leistungen am größten ist.

Danach haben wir für die 17 W LED noch die I-U-Kennlinie, die P-U-Kennlinie und den MPP ist, einer Abbildung abgebildet.

Zum Erstellen dieser Abbildungen haben wir folgendes MATLAB-Skript verwendet:

```
1 clear all;
2 %R_mess = 100kOhm
3 R_mess = 100000;
4 Widerstaende = [0
5 10
6 22
7 47
8 100
9 220
10 470
11 680
12 900
13 1000
14 1220
15 1500
16 2200
17 3300
18 4700
19 inf];
20
21 %Gemessene Spannungen einspeisen
22 %LQ1= 17W LED
23 LQ1 = zeros(16, 2);
24 %Gemessene Spannungen einfuegen als U_ges = 2 * U_mess
25 LQ1(:, 1) = 2 * [0.011
26 0.015
27 0.017
28 0.027
29 0.061
30 0.121
31 0.246
32 0.35
33 0.454
34 0.498
35 0.596
36 0.736
37 1.039
38 1.486
39 1.713
40 2.224
```

```
41 ];
42 %I_ges = ((2*U_mess)*(R_mess+R_L))/(R_mess*R_L)
43 for i = 1 : 16
44     %Schon als 2*U_mess eingespeichert
45     U_mess_2 = LQ1(i, 1);
46     R_L = Widerstaende(i);
47     %in mA umrechnen: *1000
48     LQ1(i, 2) = (U_mess_2 * (R_mess + R_L)) / (R_mess * R_L) * 1000;
49 end
50 %LQ2 = 17W Kompaktleuchtstofflampe
51 LQ2 = 2 * [0.011
52 0.011
53 0.013
54 0.013
55 0.017
56 0.028
57 0.063
58 0.091
59 0.162
60 0.145
61 0.153
62 0.198
63 0.277
64 0.417
65 0.574
66 1.7
67 ];
68
69 %LQ3= Glühlampe
70 LQ3 = 2 * [0.013
71 0.014
72 0.02
73 0.037
74 0.075
75 0.167
76 0.347
77 0.49
78 0.707
79 0.724
80 0.936
81 1.083
82 1.467
83 1.862
84 2.076
85 2.361
86 ];
87
88 drawMPP(Widerstaende, LQ1(:, 1), 1);
89 drawMPP(Widerstaende, LQ2, 2);
90 drawMPP(Widerstaende, LQ3, 3);
```

## 2 Aufgaben

```
91
92 %Zeichne U-I-Kennlinie links und Leistung rechts
93 figure1 = figure;
94 plot(LQ1(:, 1), LQ1(:, 2), '-x');
95
96 A = zeros(16, 1);
97 for i = 1 : 16
98     %In mW umrechnen
99     A(i) = LQ1(i, 1)^2 / Widerstaende(i) * 1000;
100 end
101
102
103 title("P-U-Kennlinie einer LED");
104 xlabel("Spannung [V]");
105 ylabel("Stromstaerke [mA]");
106 ylim([0, 4]);
107 line([2.972 2.972], [0.930326 0], 'Color', 'Black', 'linewidth', 1);
108 line([0 2.972], [0.930326 0.930326], 'Color', 'Black', 'linewidth', 1);
109 line([2.972 2.972], [2.6766 0.930326], 'Color', 'Black', 'LineStyle', ':↵',
      'linewidth', 1);
110
111 yyaxis right;
112 ylabel("Leistung [mW]");
113 ylim([0, 4]);
114 hold on;
115 plot(LQ1(:, 1), A, '-x');
116 grid on;
117
118 function [] = drawMPP(Widerstande, Spannung, Typ)
119     names = ["LED", "Kompaktleuchtstofflampe", "Glühlampe"];
120     A = zeros(16, 1);
121     figure1 = figure;
122     for i = 1 : 16
123         %In mW umrechnen
124         A(i) = Spannung(i)^2 / Widerstande(i) * 1000;
125     end
126     plot(Widerstande, A, '-x');
127     title(["Maximum-Power-Point einer ", names(Typ)]);
128     xlabel("Widerstand [Ohm]");
129     ylabel("Leistung in [mW]");
130     grid on;
131 end
```

### 2.2.2 Ergebnisse

Aus den Spannungsmesswerten bei der Bestrahlung der Solarzelle mit der 17 W LED in der Tabelle 1 ergibt sich unsere I-U-Kennlinie in der Abbildung 3. Die LED hat dabei eine Farbtemperatur von 2700 K und die Unterseite der Birne ist 26,5 cm von der Solarzelle entfernt.

Aus den Spannungsmesswerten bei der Bestrahlung der Solarzelle mit der 17 W Kompaktleuchtstofflampe („Energiesparlampe“) in der Tabelle 2 ergibt sich unsere I-U-Kennlinie in der Abbildung 4. Die Unterseite der Birne ist dabei 28 cm von der Solarzelle entfernt.

Aus den Spannungsmesswerten bei der Bestrahlung der Solarzelle mit der 60 W Glühlampe in der Tabelle 3 ergibt sich unsere I-U-Kennlinie in der Abbildung 5. Bei der Glühlampe handelt es sich um eine klare Glühbirne, deren Glühfaden 34 cm von der Solarzelle entfernt ist.

Tabelle 1: Messwerte LED

Widerstand [ $\Omega$ ]	Spannung [V]
0	0,011
10	0,015
22	0,017
47	0,027
100	0,061
220	0,120
470	0,264
680	0,341
900	0,454
1000	0,498
1220	0,596
1500	0,736
2200	1,039
3300	1,486
4700	1,713
inf	2,224

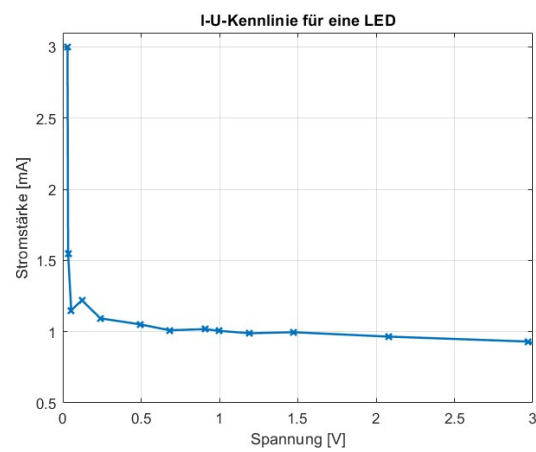


Abbildung 3: I-U-Kennlinie bei Bestrahlung mit 17 W LED

Tabelle 2: Messwerte Kompaktleuchtstoffröhre

Widerstand [ $\Omega$ ]	Spannung [V]
0	0,011
10	0,011
22	0,012
47	0,013
100	0,016
220	0,028
470	0,063
680	0,091
900	0,161
1000	0,145
1220	0,153
1500	0,198
2200	0,277
3300	0,417
4700	0,574
inf	1,70

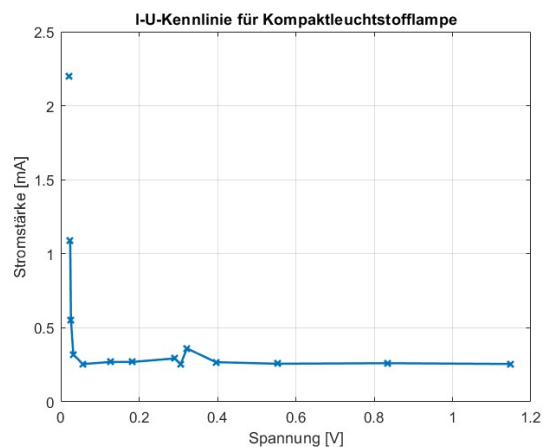


Abbildung 4: I-U-Kennlinie bei Bestrahlung mit 17 W Kompaktleuchtstofflampe

Tabelle 3: Messwerte Glühbirne

Widerstand [ $\Omega$ ]	Spannung [V]
0	0,0131
10	0,0142
22	0,0197
47	0,0368
100	0,0753
220	0,1673
470	0,3469
680	0,4896
900	0,7066
1000	0,7243
1220	0,9359
1500	1,0834
2200	1,4671
3300	1,8620
4700	2,0760
inf	2,3612

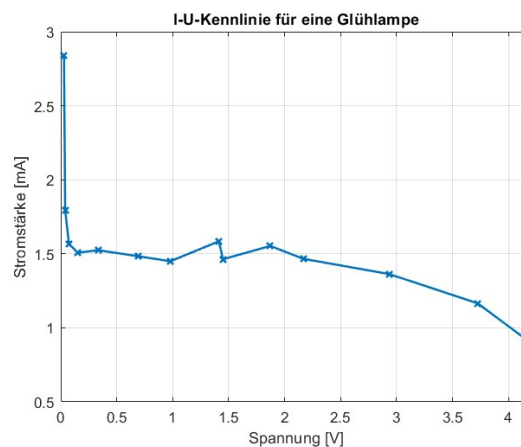


Abbildung 5: I-U-Kennlinie bei Bestrahlung mit 60 W Glühlampe



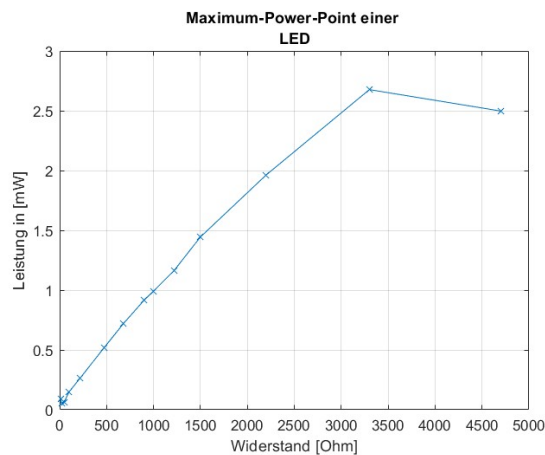
### Leistung und MPP

In der Abbildung ?? ist die Leistung für die Bestrahlung der Solarzelle mit der 17 W LED mit den zugehörigen Widerstandswerten zu sehen. Darin erkennt man, dass die Leistung bei  $4,7\text{ k}\Omega$  am größten ist und bei  $2,8\text{ mW}$  liegt.

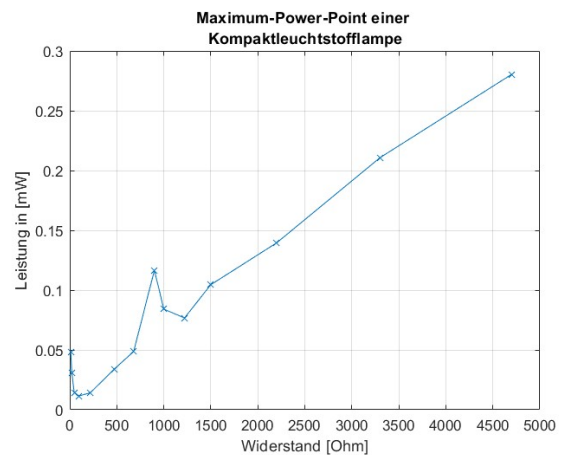
In der Abbildung ?? ist die Leistung für die Bestrahlung der Solarzelle mit der 17 W Kompaktleuchtstoffröhre zu sehen, mit den zugehörigen Widerstandswerten zu sehen. Darin erkennt man, dass die Leistung bei  $3,3\text{ k}\Omega$  am größten ist und bei  $2,7\text{ mW}$  liegt.

In der Abbildung ?? ist die Leistung für die Bestrahlung der Solarzelle mit einer 60 W Glühlampe mit den zugehörigen Widerstandswerten zu sehen. Darin erkennt man, dass die Leistung bei  $3,3\text{ k}\Omega$  am größten ist und bei  $4,2\text{ mW}$  liegt.

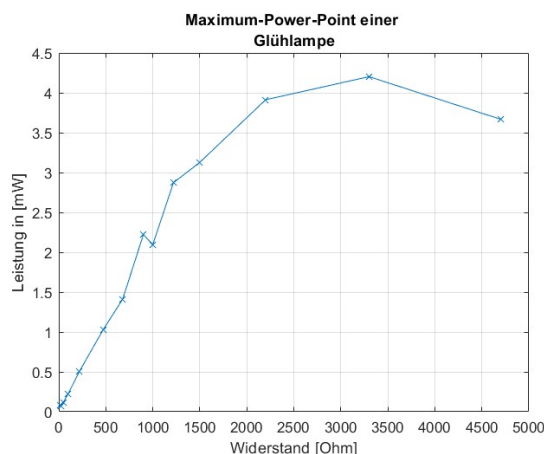
In der Abbildung ist die I-U-Kennlinie, die P-U-Kennlinie und das Rechteck am MPP für das Bestrahlen der Solarzelle dargestellt.



17W LED



17W ESL



60W AGL

Abbildung 6: Leistung bei Bestrahlung

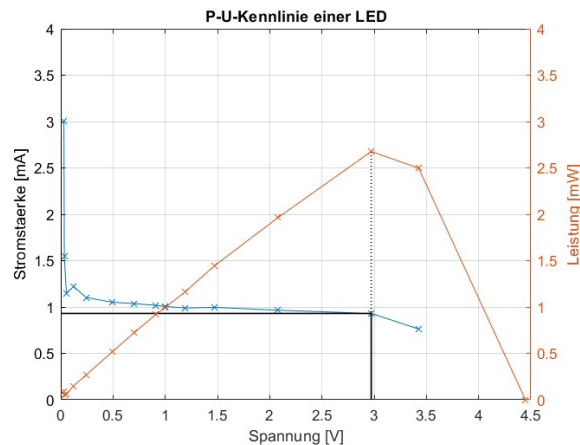


Abbildung 7: P-U-Kennlinie, I-U-Kennlinie und MPP bei Bestrahlung mit 17 W LED

### 2.2.3 MPP-Anpassung

**Welche Aufgabe haben Solarwechselrichter und warum bestimmen sie den MPP? Wie häufig sollte der MPP bestimmt werden?**

Ein Solarwechselrichter besteht aus mehreren verschiedenen Bauteilen. Zunächst gibt ein Bauteil, das sowohl den Arbeitspunkt, als auch den MPP für die aktuelle Bestrahlung der Solarzelle bestimmt. Aufgrund dieser Daten verändert ein DC/DC-Wandler („Gleichstromwandler“) die Spannung und somit auch die Stromstärke, damit die Leistung nach dem Energieerhaltungssatz gleich bleibt. Des weiteren ist in einem Solarwechselrichter noch der eigentlich Wechselrichter eingebaut, der den Gleichstrom in den für das Stromnetz notwendigen Wechselstrom umwandelt.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Wetterbedingungen und somit der MPP innerhalb weniger Sekunden stark ändern kann, muss der MPP sehr regelmäßig überprüft werden. [1]

### 2.2.4 Diskussion

Die ersten Werte der I-U-Kennlinie passen nicht in unsere Erwartung, die Spannung müsste an diesen Stellen ungefähr genauso groß sein, wie bei den anderen Werten. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Null nicht stimmt, denn wir haben bei einem Widerstand von  $0 \Omega$  nicht die Spannung von  $0 \text{ V}$ . Somit ist entweder das Messgerät nicht richtig geeicht oder der Stabilitätskondensator hat für solch kleine Messwerten eine zu große Kapazität. Es könnte auch sein, dass die Messwerte so klein sind, dass das Lauchpad sie nicht genau genug erfassen kann und die Werte deshalb abweichen. Außerdem weichen die Messwerte bei ungefähr  $1 \text{ k}\Omega$  etwas ab, was daran liegen könnte, dass wir uns bei den zusammengesetzten Messwerten eine falsche Schaltung haben, dies würde auch die Abweichungen im Leistungsdiagramm erklären.

## 2.3 Langzeitmessung

### 2.3.1 Materialien und Methoden

Wir ersetzen das Bauteil X durch einen  $1\text{ k}\Omega$  und stellen die Schaltung nach draußen auf die Fensterbank im ersten Stock, die nach Süden hinausgeht. Die Solarzelle stellen wir möglichst senkrecht zur Sonne auf. Wir messen am 12.12.2022 von 12 Uhr bis die Sonne hinter den Häusern verschwindet in Walldorf bei durchgehendem Sonnenschein. Um das  $U(t)$ -Diagramm zu erstellen, haben wir folgendes MATLAB-Skript verwendet:

```

1 clear all;
2 langzeitmessung = importdata('Langzeitmessung.csv');
3 len_L = height(langzeitmessung);
4 R_L = 1000;
5
6 for i = 1 : len_L
7     %Doppelte Spannung ist U_ges
8     double_U = langzeitmessung(i, 2) * 2;
9     langzeitmessung(i, 2) = double_U;
10    %Leistung berechnen:  $U^2/R$  in W
11    langzeitmessung(i, 3) = (double_U^2 / R_L);
12 end
13
14 %Spannung ueber Zeit
15 figure1 = figure;
16 plot(langzeitmessung(:, 1), langzeitmessung(:, 2), '-');
17 title('U-t-Kennlinie einer Solarzelle');
18 grid on;
19 xlabel('Zeit [s]');
20 ylabel('Spannung [V]');
21 ylim([0, 6]);
22
23 %Leistung ueber Zeit
24 figure2 = figure;
25 plot(langzeitmessung(:, 1), langzeitmessung(:, 3), '-');
26 title('P-t-Kennlinie einer Solarzelle');
27 grid on;
28 xlabel('Zeit [s]');
29 ylabel('Leistung [W]');
30 ylim([0, 0.1]);
31
32 %Berechnung der Energie durch die Leistung und die Zeit
33 E = trapz(langzeitmessung(:, 1), langzeitmessung(:, 3));
34 disp('Erzeugte Energie:');
35 disp(E);
36 % Langzeitmessung
37 % Erzeugte Energie:
38 % 211.5379

```

### 2.3.2 Ergebnisse

In der Abbildung 8 sind der Spannungsverlauf und Leistungsverlauf zu sehen, an denen sich eine über die ganze Zeitspanne produzierte Energie von 211,5370 J ergibt.

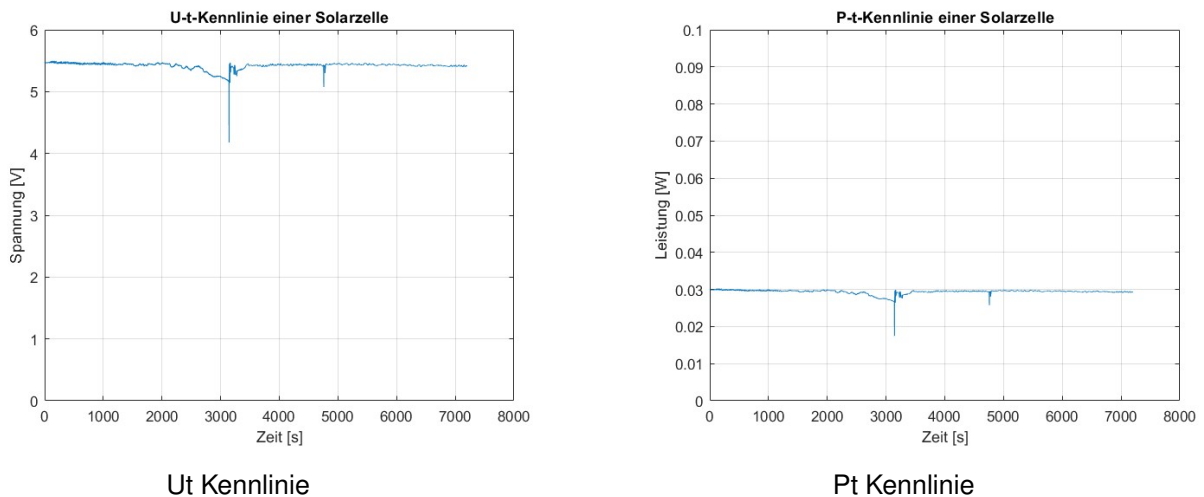


Abbildung 8: Langzeitmessung einer Solarzelle unter der Sonne

### 2.3.3 Energiegewinnung

**Schätzen sie die Energie, welche die Solarzelle im Hochsommer während des Langzeitversuchs erzeugt hätte**

Die erzeugte Energie über die Leistung abhängig von der Stromstärke und aus [1] wissen wir, dass der Photostrom proportional zur Bestrahlungsstärke ist. Da Sonne im Winter in einem deutlich flacheren Winkel strahlt, ist unsere Vermutung, dass die Bestrahlungsstärke fünfmal niedriger ist, somit ist die von der Solarzelle erzeugte Energie, je nach Wetterbedingungen im Sommer fünf- bis zehnmal höher.

**Was beeinflusst die Energiegewinnung mit Solarzelle?**

Aus den von uns durchgeführten Messungen wird erkennbar, dass die Bestrahlungsstärke wichtig, also wie viel Licht aus welchem Winkel auf die Solarzelle fällt. Somit sind auch die Wetterbedingung, wie die Bewölkung, die Sonnenstunden, Anzahl der Stunden an denen es hell ist. Nicht nur Wolken können die Solarzelle verschatten, sondern auch Dreck oder Feinstaub in der Luft, der weniger Licht durchlässt.

Wie wir sehen ist es für die effiziente Energiegewinnung auch wichtig, dass der Arbeitspunkt auf dem MPP liegt. Deshalb hängt die Energiegewinnung auch davon ab, wie gut der Solarwechselrichter funktioniert und auch wie gut dessen Wirkungsgrad ist[1]. Außerdem macht die Temperatur einen Unterschied, da die Elektronen bei höhere Temperatur beweglich sind

und öfter mit Atomrümpfen zusammenstoßen[1]. Somit sind sie letztendlich langsamer und der Wirkungsgrad der Solarzelle sinkt.

### 2.3.4 Diskussion

Ab ungefähr Sekunde 2600 sinken die Messwerte etwas, weil eine Tanne ihren Schatten auf die Solarzelle geworfen hat. Danach schwanken die Messwerte kurz stark, da wir die Solarzelle umpositioniert haben. Bei Sekunde 4800 müssen wir sie nochmal neu positionieren, da erneut der Schatten eines Baums die Solarzelle zu verschatten droht.

## 2.4 Energiespeicherung und das Verhalten einer Solarzelle

### 2.4.1 Theoretische Betrachtung

#### Theorie zum Entladen eines Kondensators über einen Widerstand

Beim Entladen eines Kondensators besteht die Schaltung im Wesentlichen immer aus einem Kondensator, einem Widerstand und keiner Quelle. Somit ist der aufgeladene Kondensator durch die getrennten Ladung die Quelle und die Spannung über den Kondensator verursacht einen Stromfluss. Durch den Stromfluss wird die Ladungsdifferenz zwischen den Platten geringer und die Spannung sinkt. Dies hat zur Folge, dass auch die Stromstärke geringer ist. Allerdings sinkt die Spannung über dem Kondensator aufgrund der geringeren Stromstärke nun langsamer. Deshalb sinken Stromstärke und Spannung immer langsamer und beschreiben einen exponentiellen Abfall. Somit sind sie zu Beginn maximal, um sich dann der Null anzunähern, bis die Spannung und Stromstärke nicht mehr messbar sind.[3]

#### Zeitkonstante

$$C = 220 \text{ mF}, R = 500 \Omega$$

$$\text{Zeitkonstante } \tau = R \cdot C = 110 \text{ s}$$

#### Idealer Verlauf der Kondensatorspannung

Der ideale Spannungsverlauf bei Entladen des Kondensators ist in Abbildung 9 zu sehen

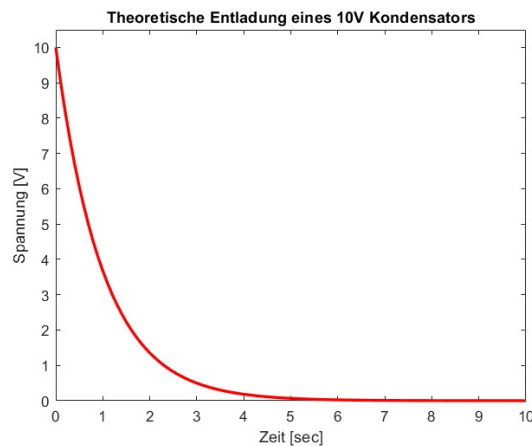


Abbildung 9: ideale Entladung

### 2.4.2 Materialien und Methoden

Für diese Messung schalten wir den Kondensator mit einer Kapazität von 220 mF zunächst kurz, um sicherzugehen, dass er vollständig entladen ist. Danach ersetzen wir den Lastwiderstand durch diesen Kondensator, damit er über die Solarzelle geladen wird. Die Solarzelle wird während dieser Messung senkrecht von einer 60 Watt Glühlampe, deren Glühfaden 34 cm entfernt ist, bestrahlt.

Zum Entladen entfernen wir die Solarzelle und verbinden den Kondensator mit 500Ω Widerstand den wir aus einem 470Ω und zwei 15Ω Widerständen zusammen gesetzt haben. Um das U(t)-Diagramm beider Vorgänge zusammen darzustellen, haben wir folgendes MATLAB-Skript verwendet:

```

1 clear all;
2 aufladen = importdata('Aufladen.csv');
3 entladen = importdata('Entladen.csv');
4 len_aufladen = height(aufladen);
5 len_entladen = height(entladen);
6 R_L = 500;
7 C = 220/1000;
8
9 %Doppelte Spannung ist U_ges
10 aufladen(:, 2) = aufladen(:, 2) * 2;
11 entladen(:, 2) = entladen(:, 2) * 2;
12
13 %Diff der Spannung
14 A_df = diff(aufladen(:, 2));
15 E_df = diff(entladen(:, 2));
16 A_df(length(A_df) + 1) = A_df(length(A_df));
17 E_df(length(E_df) + 1) = E_df(length(E_df));
18
19 %Leistung: U^2/R
20 %aufladen(:, 3) = (aufladen(:, 2).^2 / R_L) * 1000;
21 %entladen(:, 3) = (entladen(:, 2).^2 / R_L) * 1000;
22 %Leistung: U*I
23 aufladen(:, 3) = aufladen(:, 2) .* A_df * 1000;
24 entladen(:, 3) = entladen(:, 2) .* E_df * 1000;
25
26 %Aufladen ueber Zeit
27 figure1 = figure;
28 plot(aufladen(:, 1), aufladen(:, 2), '-');
29 %Entladen ueber Zeit (nach Aufladungskurve dranhaengen)
30 hold on;
31 plot(entladen(:, 1) + 3500, entladen(:, 2), '-');
32
33 title('U-t-Kennlinie eines ladenden/entladenden Kondensators');
34 legend('Aufladen', 'Entladen');
35 grid on;
36 xlabel('Zeit [s]');
37 ylabel('Spannung [V]');
```

## 2 Aufgaben

```
38 xlim([0, 5000]);
39 ylim([0, 6]);
40
41 %Berechnung der Energie fuer das Aufladen durch die Leistung und die ←
    Zeit
42 energie_Aufladung = trapz(aufladen(:, 1), aufladen(:, 3));
43 disp('Aufgenommene Energie:');
44 disp(energie_Aufladung);
45
46 %Berechnung der Energie fuer das Entladen durch die Leistung und die ←
    Zeit
47 energie_Entladung = trapz(entladen(:, 1), entladen(:, 3));
48 disp('Abgegebene Energie:');
49 disp(energie_Entladung);
50
51 % Aufgenommene Energie:
52 % 1.0051e+03
53 %
54 % Abgegebene Energie:
55 % -1.0730e+03
```

### 2.4.3 Ergebnisse

In der Abbildung 10 ist der Spannungsverlauf beim Laden und Entladen des Kondensators dargestellt. Aus diesem Verlauf ergibt sich eine aufgenommene Energie von 1005,073 489 334 12 J und eine abgegebene Energie von −1072,964 415 267 91 J.

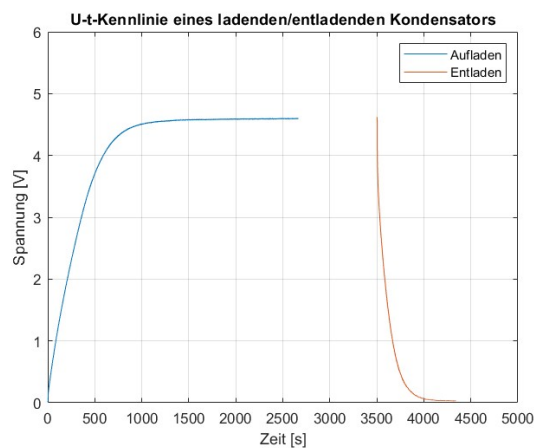


Abbildung 10: Spannungsverlauf beim Laden und Entladen des Kondensators



### 2.4.4 Vergleich Lade- und Entladekurve

Beim Vergleich der zwei Kurven fällt auf, dass die Ladekurve zunächst nahezu konstant ansteigt bevor sie sich langsam dem Sättigungswert nähert. Bei der Entladung hingegen nimmt die Spannung zunächst rapide und dann immer schneller ab, bis sie sich der 0 annähert. Die zwei Kurven unterscheiden sich, da bei der Laden des Kondensators die Stromstärke zu Beginn, wie in der I-U-Kennlinie erkennbar, konstant bleibt. Bei der Entladekurve hingegen ändert sich die Stromstärke ständig und somit auch die Spannung. Im ersten Abschnitt steigt die Ladekurve konstant an, da die Spannung über dem Kondensator bei konstanter Stromstärke konstant ansteigt. In zweiten Abschnitt ist Spannung über dem Kondensator so groß geworden, dass die Strömstärke nach der I-U-Kennlinie bei weiter steigender Spannung sinkt. Ab diesem Punkt steigt somit auch die Spannung über den Kondensator langsamer an.

### Welches Modell beschreibt die Solarzelle besser?

An der I-U-Kennlinie und der Ladekurve des Kondensators erkennen wir, dass die Solarzelle trotz unterschiedlicher Spannung einen konstanten Strom liefert. Darum können wir sagen, dass das Modell der Stromquelle die Solarzelle am besten beschreibt.

### 2.4.1 Gesamtenergie und Wirkungsgrad

Die aufgenommene Energie beträgt 1005,07 J und die abgegebene Energie – 1072,96 J. Daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad von  $\frac{\text{abgegebene Energie}}{\text{aufgenommene Energie}} = \frac{1073,0}{1005,1} = 106,7555 \%$ .

### 2.4.2 Diskussion

Der Spannungsverlauf entspricht den Erwartungen. Allerdings passt der berechnete Wirkungsgrad nicht unseren Erwartungen. Bei der Messung mussten wir nach dem Aufladen für das Entladen eine neue Messung starten, weil das TI-Board überlastet war. Vermutlich haben wir damit die Schaltung etwas verschoben. Es kann sein, dass sich dadurch unsere Abbildung etwas verschoben hat, weil sich die Bestrahlungsstärke geändert hat und nun der Betrag der aufgenommenen Energie kleiner ist als der Betrag der abgegebenen Energie. Dies ist rein physikalisch nicht möglich, es handelt sich um einen Messfehler. Aufgrund der Tatsache, dass unsere Messung des Wirkungsgrads fehlerhaft ist, können wir nicht einschätzen, ob der wahre Wirkungsgrad als gut oder schlecht einzuschätzen ist.

### 2.5 Vergleich Photovoltaik mit und ohne Energiespeicher

#### 2.5.1 Materialien und Methoden

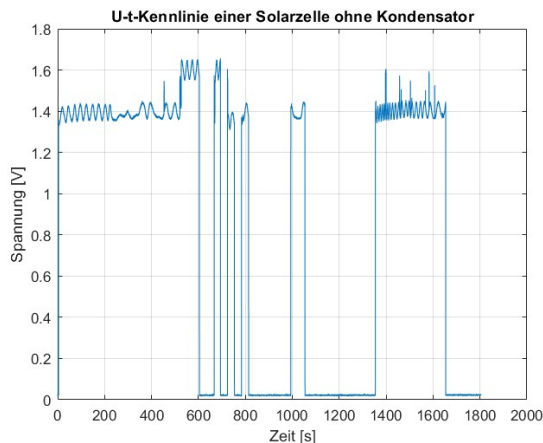
Zunächst schalten wir in der allgemeinen Schaltung 1 anstelle des Bauteils X einen  $1\text{ k}\Omega$  Widerstand und verschatten die Solarzelle nach dem vorgegebenen Zeitplan. Für den zweiten Teil der Messung schalten wir parallel zu dem  $1\text{ k}\Omega$  Widerstand noch einen Kondensator mit einer Kapazität von  $220\text{ mF}$  und Verschatten wieder nach der Vorgabe.

```
1 clear all;
2 ohne_Kondensator = importdata('Vergleichohne.csv');
3 mit_Kondensator = importdata('Vergleichmit.csv');
4 len_ohne = height(ohne_Kondensator);
5 len_mit = height(mit_Kondensator);
6
7 %U_ges = 2*U_mess
8 ohne_Kondensator(:, 2) = ohne_Kondensator(:, 2) * 2;
9 mit_Kondensator(:, 2) = mit_Kondensator(:, 2) * 2;
10
11 %Spannung ueber Zeit
12 figure1 = figure;
13 plot(ohne_Kondensator(:, 1), ohne_Kondensator(:, 2), '-');
14 title('U-t-Kennlinie einer Solarzelle ohne Kondensator');
15 grid on;
16 xlabel('Zeit [s]');
17 ylabel('Spannung [V]');
18
19 %Spannung ueber Zeit
20 figure2 = figure;
21 plot(mit_Kondensator(:, 1), mit_Kondensator(:, 2), '-');
22 title('U-t-Kennlinie einer Solarzelle mit Kondensator');
23 grid on;
24 xlabel('Zeit [s]');
25 ylabel('Spannung [V]');
```

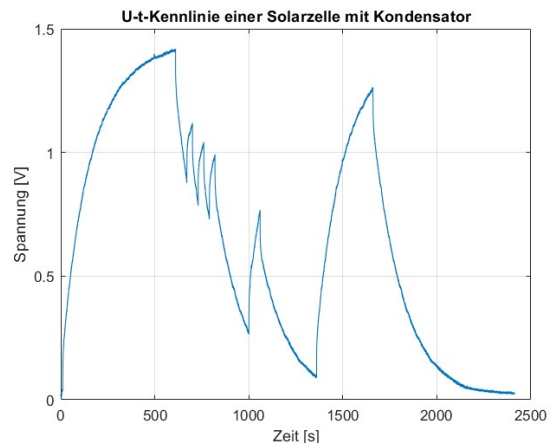
#### 2.5.2 Ergebnisse

#### 2.5.3 Vergleich Messkurven

In der ersten Messkurve ohne Kondensator ist die Spannung über den gesamten Zeitraum, in dem die Solarzelle abgedeckt ist, 0. Mit Kondensator hingegen sinkt die Spannung beim Abdecken erst stark und dann immer weniger, aber sie wird nie 0. Auch in den Intervallen, in denen die Schaltung nicht abgedeckt ist, unterschieden sich die Graphen. Ohne Kondensator springt die Spannung direkt auf einen hohen Wert, um den sie dann schwankt. Im Gegensatz dazu steigt die Spannung mit Kondensator erst schnell an und dann langsamer. Wenn das Zeitintervall lang genug ist, steigt Spannung bis auf den Wert, den sie auch ohne Kondensator erreicht.



Spannungsverlauf ohne Kondensator



Spannungsverlauf mit Kondensator

Abbildung 11: Vergleich mit und Ohne Energiespeicher

### 2.5.4 Verwendung von Kondensatoren

Der Vorteil eines Kondensators ist, dass er bei sehr kurzen Spannungseinbrüchen gewährleisten kann, dass die Spannung nicht direkt auf 0 fällt und weiterhin ein Strom fließt. Des Weiteren verringert sich bei Kondensatoren durch häufiges Aufladen und Entladen nicht die Speicherkapazität. Somit sinkt der Wirkungsgrad im Vergleich zu Batterien oder Akkus bei Kondensatoren nicht durch häufiges Verwenden.

Allerdings können Kondensatoren nur sehr kurz eine hohe Spannung liefern. Daher eignen sich Kondensatoren an Stellen, an denen man häufig mit kurzen Spannungseinbrüchen rechnen muss. Wenn man allerdings ein Gerät über lange Zeit mit einem Energiespeicher betreiben möchte, sind Kondensatoren ungünstig.

### 2.5.5 Was ist das Ziel der Energiespeicherung im Allgemeinen und was kann hierbei verbessert werden?

Ziel der Energiespeicherung ist es, dass die Energie universal (jederzeit, überall) verfügbar ist. So ist es in mobilen Endgeräten wichtig, dass die Energie transportierbar ist. Bei Solarenergie ist, wie in der Einleitung erwähnt, das Hauptproblem, dass ihre Verfügbarkeit wetterabhängig und zeitabhängig ist. Deshalb ist bei der Energiegewinnung mit Sonnenlicht das Ziel der Speicherung, dass immer Energie verfügbar ist und dass der Produktionsüberschuss genutzt werden kann. [1]

Es gibt bereits viele verschiedene Technologien zur Energiespeicherung, allerdings lässt sich sicher sagen, dass wir keinen von diesen einen Wirkungsgrad von 100% hat. Deshalb ist der Wirkungsgrad immer etwas, bei dem man an Verbesserungen arbeiten kann. Vermutlich werden wir in Zukunft noch mehr Energie speichern wollen, dass man kann die Speicherkapazität erhöhen. Dies sollte allerdings am besten ohne eine Vergrößerung des Volumens oder der Masse des Speichers geschehen. Bei Kondensatoren müsste man dementsprechend die Kapazität erhöhen, zum Beispiel doch das Vergrößern der Platten. Aber dabei sollen diese nicht

schwerer werden, deshalb müsste man die Platten gleichzeitig dünner machen.

### 2.5.6 Diskussion

Beim Spannungsverlauf ohne Kondensator schwankt entgegen unserer Erwartung die Spannung, wenn die Solarzelle bestrahlt wird, stark. Für diese Beobachtung könnte es mehrere Gründe geben. Zum einen kann es sein, dass die Bestrahlungsstärke der Glühbirne nicht konstant ist, sondern geringfügig schwankt. Außerdem können wir nicht genau einschätzen, welchen Einfluss der Stützkondensator hat. Möglicherweise lädt und entlädt es sich zwischenzeitlich. Eine weitere Ursache für diese Messwerte könnte auch das TI-Board sein, da wir nicht wissen, wie genau es die Spannung misst.

---

### 3 Zusammenfassung

Durch die Bearbeitung der Aufgaben haben wir viel über Solarzellen und Speicherkondensatoren gelernt. Wir wissen nun, dass die Energieerzeugung der Solarzelle von der Bestrahlungsintensität abhängig ist, das heißt von Abstand, Winkel und Helligkeit der Lichtquelle oder Sonne abhängig ist. Außerdem ist diese von der Verschattung der Solarzelle abhängig. Durch die vielen sich ändernden Komponenten bestimmen Photovoltaikanlagen regelmäßig den Maximum-Power-Point und passen die DC/DC-Wandlung entsprechend an.

Von Kondensatoren wissen wir nun, dass man sie als Energiespeicher verwenden kann. Somit können sie in Zusammenhang mit einer Solarzelle bewirken, dass bei Verschattung dieser die Spannung nicht sofort einbricht. Allerdings liefern sie keine konstante Spannung, sondern eine exponentiell abfallende, weshalb sie nur fürs Abfangen kurzer Spannungseinbrüche geeignet ist.

### Literaturverzeichnis

- [1] Konrad Mertens. *Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. Carl Hanser Verlag, München, 6., aktualisierte und erweiterte Auflage, 2022
- [2] Armin U. Schmiegel. *Energiespeicher für die Energiewende - Auslegung und Betrieb von Speichersystemen*. Carl Hanser Verlag, München, 2., erweiterte Auflage, 2022.
- [3] Begründer: Prof. Dr. Franz Bader, Prof. Friedrich Dorn *Dorn.Bader, Physik Kursstufe, Gymnasium Baden-Württemberg*. Westermann Gruppe, Braunschweig, Druck a, 2021.