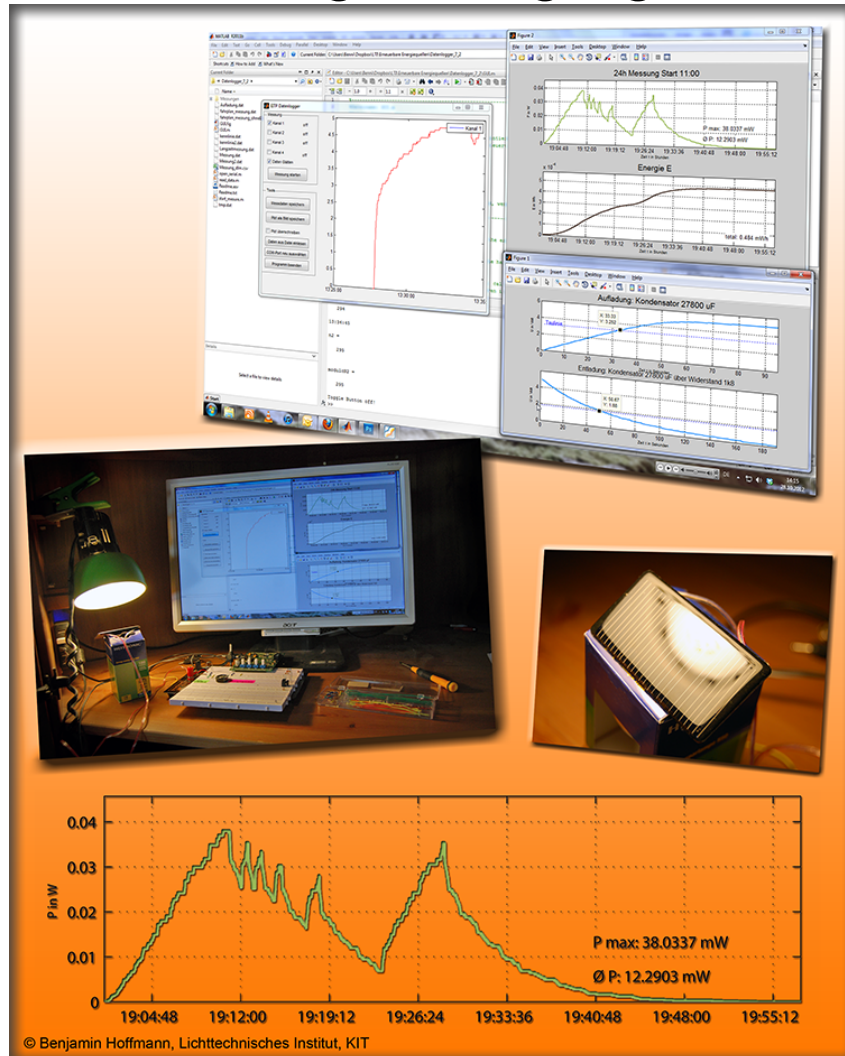


# Lineare Elektrische Netze Workshop A

## Messwerterfassung und regenerative Energieerzeugung



WS 2023/24

Wir bedanken uns bei unseren Sponsoren für die finanzielle Unterstützung des Workshops.

**HENSOLDT**  
Detect and Protect

**HARMAN**  
A SAMSUNG COMPANY

**SEW**  
EURODRIVE

**SICK**  
Sensor Intelligence.

**TRANSNET BW**

**TEXAS**  
INSTRUMENTS

**WE** **WÜRTH**  
ELEKTRONIK  
MORE THAN  
YOU EXPECT

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Projektbeschreibung</b>	<b>3</b>
<b>2. Aufgaben</b>	<b>6</b>
2.1. Literaturrecherche . . . . .	6
2.2. Vermessung der Solarzelle POW112D2P . . . . .	6
2.2.(a).Aufnahmen der Strom-Spannungs-Kennlinie . . . . .	7
2.2.(b).Bestimmung des Maximum-Power-Points (MPP) . . . . .	8
2.2.(c).MPP-Anpassung . . . . .	8
2.3. Langzeitmessung . . . . .	8
2.3.(a).Spannungsverlauf & Leistung . . . . .	8
2.3.(b).Energiegewinnung . . . . .	9
2.4. Energiespeicherung & Verhalten von Solarzellen . . . . .	9
2.4.(a).Theoretische Betrachtung . . . . .	9
2.4.(b).Messung . . . . .	9
2.4.(c).Modellbildung . . . . .	10
2.4.(d).Gesamtenergie & Wirkungsgrad . . . . .	10
2.5. Vergleich Photovoltaik mit und ohne Energiespeicher . . . . .	10
2.5.(a).Messung . . . . .	10
2.5.(b).Auswirkung des Speicherkondensators . . . . .	11
<b>3. Allgemeine Informationen</b>	<b>12</b>
3.1. Ausarbeitung . . . . .	12
3.2. Literaturrecherche . . . . .	13

## Abbildungsverzeichnis

2. Beschriftung und Ausrichtung der Zener-Diode . . . . .	4
3. Polarität Speicherkondensator . . . . .	4
4. Beschriftung Keramik-Kondensator . . . . .	5
5. Beschriftung Folienkondensator . . . . .	5
6. Abtrennen einzelner Kabel vom Flachbandkabel . . . . .	5
7. Schaltplan mit Zener-Diode und Spannungsteiler. Je nach Aufgabenteil muss der Aufbau entsprechend 7a oder 7b angepasst werden. . . . .	7
8. Fahrplan für Messung . . . . .	11

## Tabellenverzeichnis

1. Benötigtes Material . . . . .	3
----------------------------------	---

# 1. Projektbeschreibung

In Lineare Elektrische Netze Workshop A sollen Sie sich mit der Energiegewinnung mittels einer Solarzelle und der Zwischenspeicherung dieser Energie beschäftigen. Sie werden grundlegende Eigenschaften von Solaranlagen und deren optimalen Betrieb sowie die Thematik der Energiespeicherung kennenlernen. Zudem erhalten Sie einen Einblick in die Möglichkeiten des Datenloggings, sowie in den Umgang mit dem Programm MATLAB von MathWorks.

Einen guten Überblick über das Thema Energieerzeugung mit Solarzellen liefert z.B. *Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* von Konrad Mertens, welches in der KIT-Bibliothek sowohl digital als auch als Buch erhältlich ist.

## Einleitung

Die Aufgabe dieser Projektarbeit ist die Untersuchung und Vermessung einer Solarzelle. Zunächst erfolgt dafür die Bestimmung der I-U-Kennlinie und des daraus ableitbaren, optimalen Arbeitspunkts. Im Anschluss wird der Aufbau um einen Energiespeicher erweitert, dessen Verhalten beim Laden sowie Entladen beobachtet und analysiert wird. Abschließend wird das Betriebsverhalten des aufgebauten Gesamtsystems betrachtet.

Für die Bearbeitung stehen Ihnen eine Solarzelle, das TI-Board als A/D-Wandler und Messgerät, ein Kondensator als Energiespeicher sowie weitere elektronische Komponenten aus dem Baukasten zur Verfügung.

## Benötigtes Material

Tabelle 1 zeigt die neben dem TI-Board für ihr Projekt benötigten Materialien.

Tabelle 1: Benötigtes Material

Bauteiltyp	Bezeichnung / Beschreibung	Wert
Solarzelle	SEED Studio POW112D2P	$U_{oc} = 5,5 \text{ V}$ $I_{sc} = 4 \text{ mA}$ bei 5 klx
Diode	1N 4148	$U_{sperr} = 100 \text{ V}$ $I_{F(av)} = 0,15 \text{ A}$
Zener-Diode	ZF 5,1 5,1 V 0,5 W	$U = 5,1 \text{ V}$ $P = 0,5 \text{ W}$
Speicherkondensator	Panasonic 5,5 V 220 mF	$U = 5,5 \text{ V}$ $C = 220 \text{ mF}$
Stützkondensator	X7R-5 100N	Keramik $C = 100 \text{ nF}$
Widerstand	Kohleschichtewiderstände	$10 \Omega - 1 \text{ M}\Omega$ $P = 0,25 \text{ W}$
Steckbrett	Breadboard	
Drahtbrücke	Drahtbrücken-Set 140-teilig	

## Erläuterungen zu Bauteilen

### Zener-Diode

Im Baukasten befinden sich Zener-Dioden für 2,7 V und 5,1 V. Die Zener-Dioden haben einen kleinen Glas-Körper mit einer schwarzen Markierung am Ende. Dieses Ende ist die Kathode (-). Bitte achten Sie darauf, die 5,1 V Zener-Diode auszuwählen. Sie ist mit C 5V1 5T beschriftet (Abb. 2).

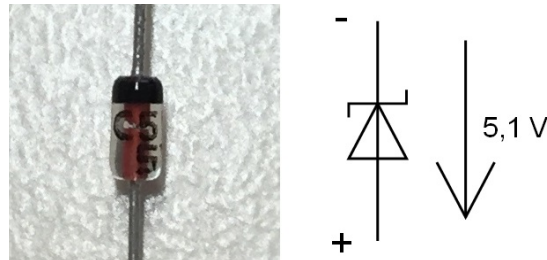


Abbildung 2: Beschriftung und Ausrichtung der Zener-Diode

### Speicherkondensator

Der Speicherkondensator besitzt eine Polarität; achten Sie **unbedingt** auf die richtige Polung beim Anschluss, da er sonst zerstört werden kann. Die weißen Pfeile auf dem Kondensator zeigen von + nach -; der negative Pin ist mit einem eingepprägtem Minus markiert (Abb. 3).



Abbildung 3: Polarität Speicherkondensator

### Stützkondensator

Im Baukasten befinden sich Keramik-Kondensatoren oder Folienkondensatoren mit verschiedenen Kapazitäten. Die Keramik-Kondensatoren haben einen kleinen gelben Keramikkörper (Abb. 4). Die Folienkondensatoren haben einen roten rechteckigen Körper (Abb. 5). Bitte achten Sie darauf, den 100 nF Kondensator auszuwählen. Er ist mit der Aufschrift 104 (Keramik) oder 104K (Folie) versehen.

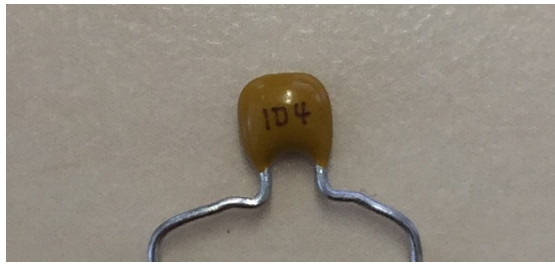


Abbildung 4: Beschriftung Keramik-Kondensator

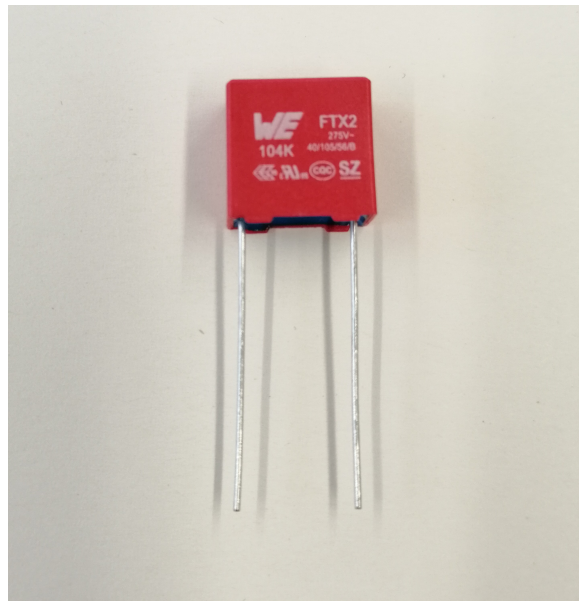


Abbildung 5: Beschriftung Folienkondensator

### Flachbandkabel

Das Flachbandkabel im Baukasten ist zum Zertrennen (Abziehen einzelner Kabel) gedacht, damit Sie mehrere einzelne Kabel erhalten (Abb. 6).

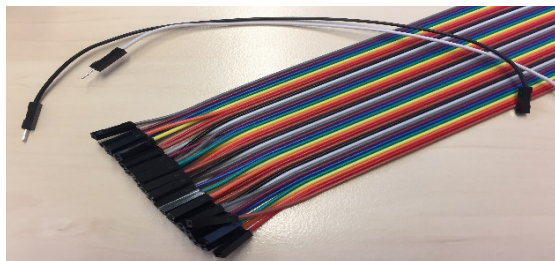


Abbildung 6: Abtrennen einzelner Kabel vom Flachbandkabel

## 2. Aufgaben

### 2.1. Literaturrecherche

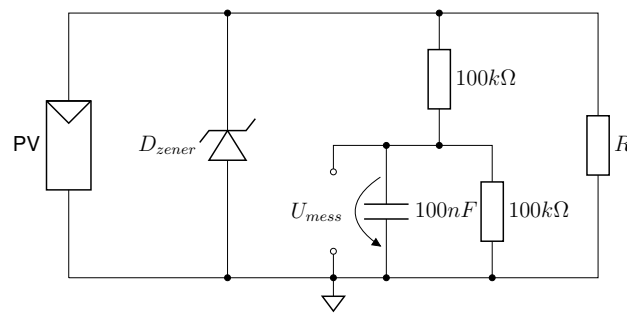
Informieren Sie sich über die Möglichkeiten regenerativer Energieerzeugung, deren Potentiale und Probleme. Verfassen Sie für die Ausarbeitung eine Einleitung über regenerative Energieerzeugung. Gehen Sie dabei näher auf die folgenden Punkte ein:

- Wie funktioniert die Gewinnung elektrischer Energie mit Hilfe von Photovoltaik?
- Was beschreibt die U-I-Kennlinie und was versteht man unter dem Maximum-Power-Point (MPP) einer Solarzelle?
- Welche Möglichkeiten zur Speicherung von (regenerativ erzeugter) elektrischer Energie gibt es?
- **Hinweis:** Der Umfang sollte ungefähr eine Seite sein.

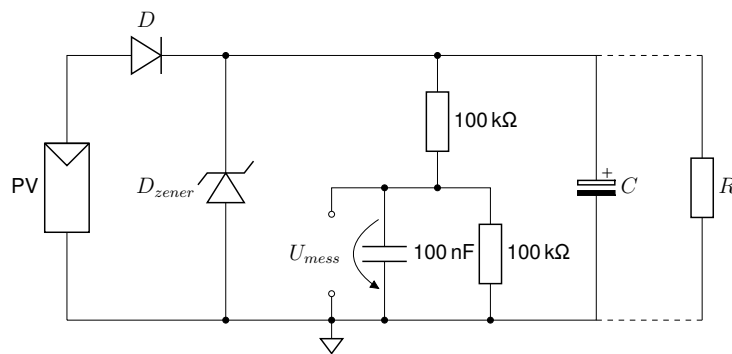
### 2.2. Vermessung der Solarzelle POW112D2P

Vermessen Sie die Solarzelle mit drei verschiedenen, unterschiedlich starken Bestrahlungsquellen (bspw. Glühbirne, Halogenlampe, Leuchtstoffröhre, ...). Nutzen Sie dafür den in Abb. 7 gegebenen Schaltplan und achten Sie insbesondere auf folgenden Hinweise.

- Die Zener-Diode  $D_{\text{Zener}}$  (Abb. 7) antiparallel zur Solarzelle begrenzt die maximale Spannung in der Schaltung auf  $U_{1,\text{max}} = 5,1 \text{ V}$ . Dies ist zum Schutz des Kondensators elementar, da die Spannung der Solarzelle die maximale Eingangsspannung des Kondensators von  $5,5 \text{ V}$  übersteigen und zur Zerstörung des Bauteils führen kann. Eine Zener-Diode wird oberhalb ihrer Sperrspannung leitend und begrenzt die maximale Spannung.
- Der Spannungsteiler (Abb. 7) halbiert die gemessene Spannung, um den Eingang des TI-Boards nicht zu überlasten ( $U_{\text{max}} = 5,1 \text{ V}$ ,  $U_{\text{TI,max}} = 3,3 \text{ V}$ ). Da das TI-Board mit einem Eingangswiderstand von ca.  $1 \text{ M}\Omega$  das Teilverhältnis während dem Abtastzeitpunkt verändert wird ein parallel geschalteter Kondensator notwendig, der den entsprechenden Spannungseinbruch verhindert.  
Berücksichtigen Sie das Teilverhältnis bei der Verarbeitung der Messwerte.  
**ACHTUNG: Schließen Sie das TI-Board unbedingt nur wie eingezeichnet ( $U_{\text{Mess}}$ ) an. An anderen Punkten in Ihrer Schaltung können zu hohe Spannungen für das TI-Board auftreten.**
- Die Diode D (Abb. 7, b) in Serie zur Solarzelle PV (von Photovoltaik) verhindert einen Stromfluss hin zur Solarzelle, so dass diese die restliche Schaltung bei Verschattung nicht beeinflusst. Sie muss nur für die Aufgabenteile 2.4 und 2.5 eingebaut werden.



(a) Aufgabenteil 2.2 und 2.3



(b) Aufgabenteil 2.4 und 2.5

Abbildung 7: Schaltplan mit Zener-Diode und Spannungsteiler. Je nach Aufgabenteil muss der Aufbau entsprechend 7a oder 7b angepasst werden.

### 2.2.(a). Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinie

- Bestimmen Sie die U-I-Kennlinie der Solarzelle für drei verschiedene Lichtquellen, indem Sie die Solarzelle nacheinander mit den verschiedenen Lichtquellen bestrahlen, mit verschiedenen Widerständen belasten und aus der Spannungsmessung den Strom berechnen. Sorgen Sie dabei für gleichbleibende Strahlungsintensitäten während der Versuchsdurchführung (Abstand & Winkel). Dokumentieren Sie sowohl die U-I-Kennlinien sowie Leistung, Art und Abstand der Lichtquellen.
- Verwenden Sie mindestens 10 Widerstandswerte zwischen  $10\ \Omega$  und  $5\ \text{k}\Omega$ . Eine gleichmäßige Verteilung und feinere Abstufung im Bereich von  $500\ \Omega$  bis  $1500\ \Omega$  erweist sich als sinnvoll.
- **Hinweis:** Für die Versuchsdurchführung steht ausschließlich eine Spannungsmessung zur Verfügung. Überlegen Sie, wie Sie daraus den fließenden Strom ableiten können.
- **Hinweis:** Die Kennlinie einer Solarzelle oder einer Diode wird mit dem Strom auf der y-Achse und der Spannung auf der x-Achse gezeichnet.
- **Hinweis:** Verwenden Sie nur künstliche Lichtquellen mit einer ausreichend großen Leistung (über  $10\ \text{W}$ ). Smartphone-LED funktionieren nicht gut, da diese zu klein sind und die Solarzelle über ihre Fläche nicht ausreichend gleichmäßig bestrahlen.

**2.2.(b). Bestimmung des Maximum-Power-Points (MPP)**

- Bestimmen Sie für jede Lichtquelle mit Hilfe eines MATLAB-Skripts die Leistung, welche die Solarzelle in Abhängigkeit vom Widerstand liefert.
- Bestimmen Sie die jeweiligen MPPs der Solarzelle und geben Sie die den Widerstandswert sowie die maximale Leistungsabgabe an (Der MPP-Widerstand bei 5 klx Bestrahlungsstärke beträgt etwa 1 k $\Omega$ ).
- Überlegen Sie, wie die U-I-Kennlinie und die Leistung zusammenhängen. Berechnen Sie für eine Ihrer Lichtquellen die in Abhängigkeit der Spannung erzeugte Leistung. Stellen Sie die U-I-Kennlinie für diese Lichtquelle sowie die erzeugte P-U-Kennlinie in einer gemeinsamen Grafik mit zwei Skalen dar. Zeichnen Sie weiterhin das Rechteck der Fläche  $P = U \cdot I$  am MPP ein.
- **Hinweis:** Für das Zeichnen mehrerer Kurven in einem Plot in MATLAB nutzen Sie den Befehl `hold on`.
- **Hinweis:** Für die Implementierung einer zweiten Skala in MATLAB nutzen Sie vor dem Zeichnen der neuen Kurve den Befehl `yyaxis right`.
- **Hinweis:** Für das Zeichnen horizontaler und waagrechtlicher Linien in MATLAB nutzen Sie den Befehl `line([x1 x2], [y1 y2])`.

**2.2.(c). MPP-Anpassung**

- Welche Aufgabe haben Solarwechselrichter und warum bestimmen sie den MPP? Wie häufig sollte der MPP bestimmt werden?
- **Hinweis:** Antworten Sie in wenigen Sätzen (2-3).

**2.3. Langzeitmessung****2.3.(a). Spannungsverlauf & Leistung**

- Messen Sie die Spannung, welche die Solarzelle bei Sonnenlicht während einer Messzeit von zwei Stunden über einem Widerstand von 1 k $\Omega$  erzeugt. Führen Sie Ihre Messung Mittags bei höchstem Sonnenstand und bei möglichst gutem Wetter durch. Nutzen Sie ein zeitliches Messintervall von 1 s. Stellen Sie sowohl Spannung als auch Leistung über der Zeit dar. Dokumentieren Sie auch Wetterbedingungen, Datum, Zeit und Ort der Messung.
- Lesen Sie die Messdaten in MATLAB ein und bestimmen Sie mit einem MATLAB-Skript die von der Solarzelle erzeugte Energie.



- Im Winter ist der Energieertrag von Solarzellen wegen der geringen Strahlungsleistung bei niedrigem Sonnenstand geringer als im Sommer. Schätzen Sie die Energie, welche die Solarzelle im Hochsommer während dieses Versuches erzeugt hätte.
- **Hinweis:** Zur Bestimmung der Energie berechnen Sie das Integral  $\int_T P(t) dt$  (Matlab-Funktion *trapz*).
- **Hinweis:** Deaktivieren Sie für diese Messung eventuelle Energiesparfunktionen Ihres PCs/Laptops. Insbesondere dürfen die USB-Schnittstellen nicht zu Stromsparszwecken abgeschaltet werden.

### 2.3.(b). Energiegewinnung

- Was beeinflusst die Energiegewinnung mit Solarzellen?

## 2.4. Energiespeicherung & Verhalten von Solarzellen

**Bevor Sie fortfahren,** bauen Sie ihre Schaltung entsprechend dem Schaltplan in Abbildung 7b um. Das heißt Sie müssen in Reihe zur Solarzelle die Diode  $D$  einbauen. Diese verhindert ein Entladen des Kondensators bei Verschattung der Solarzelle, andernfalls werden sie falsche Entladekurven erhalten.

### 2.4.(a). Theoretische Betrachtung

- Fassen Sie kurz die Theorie zum Entladen eines Kondensators über einen Widerstand zusammen.
- Bestimmen Sie die Zeitkonstante für das Entladen des Kondensators über einen Lastwiderstand von  $500 \Omega$ . Zeichnen Sie den Verlauf der Kondensatorspannung.

### 2.4.(b). Messung

- Messen Sie die Spannung über dem Kondensator beim Aufladen mit dem Solarmodul, welches von einer konstanten Strahlungsquelle bestrahlt wird.
- Messen Sie den Entladevorgang über einen  $500 \Omega$  Lastwiderstand.
- **Hinweis:** Der Speicherkondensator besitzt eine Polarität. Diese ist mit weißen Pfeilen (von + nach -) und dem kleinen Minus-Zeichen auf dem entsprechenden Anschlusspin gekennzeichnet. Achten Sie sorgfältig darauf, diese Polarität einzuhalten. Bereits eine kurzzeitige Verpolung (und Überlastung) kann zur Zerstörung des Kondensators führen.

**2.4.(c). Modellbildung**

- Vergleichen Sie die Lade- und Entladekurve. Warum unterscheiden diese sich? Erklären Sie das Verhalten der Ladekurve in zwei Abschnitten. Argumentieren Sie mit dem U-I-Diagramm der Solarzelle.
- Die beiden grundlegenden Modelle zur Beschreibung einer Quelle in einer elektrischen Schaltung sind die Spannungsquelle und die Stromquelle. Während die Spannungsquelle eine konstante Spannung bei beliebigem Strom hält, erzeugt die Stromquelle einen konstanten Strom mit beliebiger Spannung. Welches Modell beschreibt die Solarzelle besser?

**2.4.(d). Gesamtenergie & Wirkungsgrad**

- Bestimmen Sie aus den Messwerten mit Hilfe eines MATLAB-Skriptes die beim Laden in den Kondensator eingebrachte und die beim Entladen gelieferte Energie. Geben Sie sowohl das verwendete Skript als auch die Ergebnisse an. Berechnen Sie die Energie-Integrale aus den Messwerten über die Zeit.
- Bestimmen Sie aus den berechneten Werten den Wirkungsgrad der Energiespeicherung.
- Wie schätzen Sie den von Ihnen ermittelten Wirkungsgrad ein?
- **Hinweis:** Berechnen Sie zunächst  $P(t)$  für jeden Messwert und danach das Integral  $\int_T P(t) dt$  (Matlab-Funktion *trapz*).
- **Hinweis:**  $I(t) = C \cdot \frac{\partial U(t)}{\partial t}$  (Matlab-Funktion *diff*).
- **Hinweis:** Verwenden Sie nicht irgendeine theoretische Lösung des Integrals, ohne geprüft zu haben, ob das Modell, das der Lösung zugrunde liegt, auf diesen Fall anwendbar ist. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf nicht-ideales Verhalten realer Bauteile.

**2.5. Vergleich Photovoltaik mit und ohne Energiespeicher****2.5.(a). Messung**

- Schließen Sie die Solarzelle an einen 1 k $\Omega$  Widerstand an. Fahren Sie den in Abb. 8 gezeigten Fahrplan bei konstanter Bestrahlung, z.B. durch eine Glühlampe, ab. Messen Sie die Spannung über dem Widerstand zuerst ohne Kondensator, dann mit parallel angeschlossenem Kondensator und messen Sie dabei die Spannung über dem Widerstand. Vergleichen Sie die beiden Kurven.
- **Hinweis:** Verschatten Sie die Solarzelle, wenn gefordert, vollständig. Decken Sie sie beispielsweise mit einem Schreibblock, einem Karton oder Ähnlichem ab. Einzelne oder wenige Blatt Papier sind nicht ausreichend.

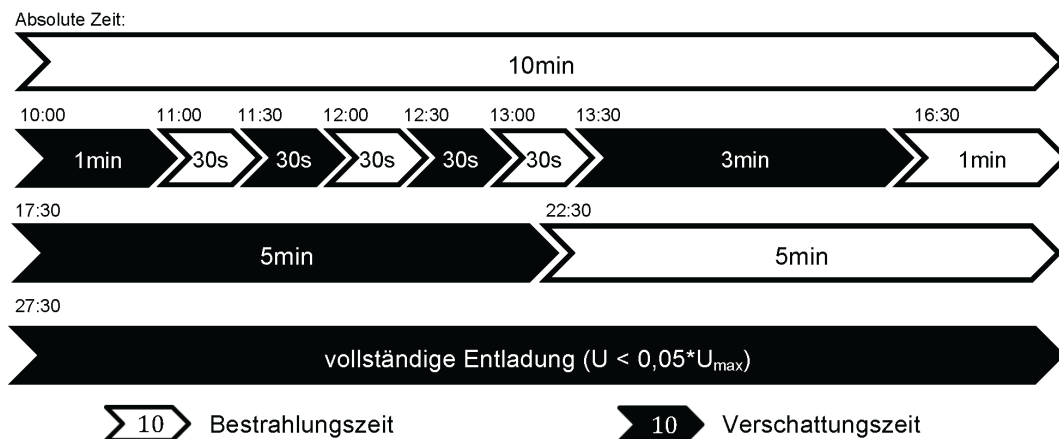


Abbildung 8: Fahrplan für Messung

**2.5.(b). Auswirkung des Speicherkondensators**

- Was unterscheidet die beiden Messkurven aus Aufgabenteil (a)?
- Was können Sie aufgrund dieses Versuchs über die Eignung von Speicherkondensatoren als Energiespeicher für Anwendungen wie Kühlschränke, Ladegeräte, Industrie, Infrastruktur, Fernseher, usw. aussagen? Wo sehen Sie Vorteile bei der Verwendung von Speicherkondensatoren?
- Was ist das Ziel der Energiespeicherung im Allgemeinen und was kann hierbei verbessert werden?

### 3. Allgemeine Informationen

- In dieser Arbeit werden Messungen und deren Auswertung mit MATLAB verlangt. Bitte beachten Sie, dass Sie entsprechende Diagramme und Skripte in Ihrer Dokumentation einbinden. Konkrete Hinweise darauf, was Ihre Dokumentation enthalten sollte, finden Sie in den jeweiligen Aufgaben.
- Versuchen Sie beim Aufbau der Schaltung sauber und sorgfältig zu arbeiten. Verwenden Sie die vorhandenen Drahtbrücken. Versuchen Sie ein Überkreuzen zu vermeiden und legen Sie Drahtbrücken nur waagrecht und senkrecht. Dies hilft Ihnen bei einer eventuellen Fehlersuche. Halten Sie sich an den Versuchsaufbau in Abb. ???. Insbesondere die Spannungsteilerschaltung und die Zener-Diode zum Schutz des TI-Boards sind notwendig. Andernfalls können Sie Ihr neues Board zerstören.

#### 3.1. Ausarbeitung

Die Ausarbeitung soll an einen ingenieurwissenschaftlichen Bericht angelehnt werden und sich daher an den Ihnen gestellten Aufgaben orientieren. Das während der Durchführung der Versuche erworbene Verständnis wird dabei für die strukturierte Darlegung benötigt.

Die Struktur der Ausarbeitung kann wie folgt aufgebaut sein:

- Eine *Einleitung*, die in diesem Fall neben den in der Literaturrecherche erworbenen Kenntnissen auch die Ausgangssituation und Motivation der Arbeit beleuchtet.
- Das Kapitel *Aufgaben* mit den wertungsfrei beschriebenen Beobachtungen und Diagrammen, sowie der wertenden Diskussion der Ergebnisse. Die einzelnen Aufgaben sind folgendermaßen zu untergliedern:
  1. Der Bereich *Materialien und Methoden* beschreibt das Vorgehen bei dem Versuch sowie die eingesetzten Hilfsmittel. Hilfreich sind hier oft Schaltungspläne und Fotografien zur Veranschaulichung sowie die von Ihnen verwendeten MATLAB-Skripte.
  2. Das Kapitel *Ergebnisse* umfasst die Dokumentation der Messungen und Beobachtungen der Aufgabe.
  3. Die abschließende *Diskussion* beinhaltet die Interpretation der Ergebnisse sowie Schlussfolgerungen und die Antworten auf Fragen aus der Aufgabenstellung.
- Eine *Zusammenfassung* mit dem Gesamtergebnis der Arbeit. In diesem Fall eignen sich die Antworten auf die Fragen nach den Auswirkungen von Speicherkondensatoren aus Aufgabe 2.5 (b).

Bitte beachten Sie die in Ilias zusätzlich bereitgestellten Hinweise zur Erstellung wissenschaftlicher Ausarbeitungen sowie das Beispiel aus der Saalübung.

### 3.2. Literaturrecherche

Der Brockhaus und Wikipedia sind Lexika und eignen sich gut, um schnell einen Überblick über ein neues Thema zu erhalten. Sie gelten aber nicht als Fachliteratur für den wissenschaftlichen Diskurs oder für das tiefgehende Studium. Vermeiden Sie in wissenschaftlichen Arbeiten Zitate aus Lexika sowie aus unzuverlässigen Quellen, wie etwa private Internetseiten oder Beiträge in Tageszeitungen. Geeignet sind andere wissenschaftliche Veröffentlichungen, Fachartikel in wissenschaftlichen Zeitschriften sowie Fachbücher.

Einen guten Überblick über die Thematik Energieerzeugung mit Photovoltaik liefert z.B. das Buch *Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* von Konrad Mertens, welches in der KIT-Bibliothek sowohl digital als auch als Buch erhältlich ist.

**WICHTIG:** Achten Sie bei der anfänglichen Literaturrecherche darauf, Quellen vollständig anzugeben und insbesondere Zitate als solche kenntlich zu machen. In jedem Fall ist das Übernehmen ganzer Textpassagen zu unterlassen und kann zu der Bewertung "nicht bestanden" führen. Bei Internetquellen sollten Sie neben der Adresse auch das Datum und die Uhrzeit des Abrufs angeben.