

Experiment 04

Wirkungsgrad

Lernziel:

Durch Bestimmen charakteristischer Größen wird der maximale Wirkungsgrad des PV-Moduls bestimmt. Darüber hinaus wird das Verhalten des Wirkungsgrad auf eine Temperaturänderung des Moduls untersucht.

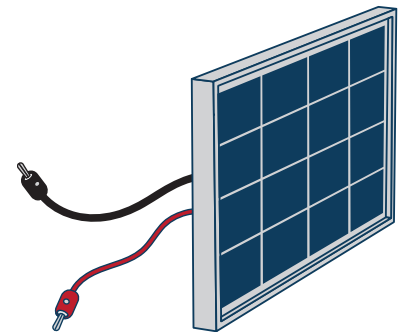
Kurzbeschreibung:

Mit einem Geodreieck, einem Multi- und Luxmeter werden charakteristische Größen des Moduls gemessen und der Wirkungsgrad mittels genäherter Formeln bestimmt. Das Modul wird mit einem Fön erhitzt bzw. indem man es für fünf Minuten in die Tiefkühltruhe (z.B. der Schulmensa) legt, gekühlt. Die Leistungsänderung aufgrund der unterschiedlichen Modultemperatur wird gemessen.

Vorüberlegungen

Der Wirkungsgrad ist eine entscheidende Größe jeder Energiewandlungstechnik wie auch in der Photovoltaik. Von ihm hängt es ab, ob sich eine Technik etablieren kann. An seiner Optimierung arbeiten die Wissenschaft, als auch die Industrie intensiv.

- Wie unterscheiden sich Leerlaufspannung U_{ll} und Kurzschlussstrom I_{ks} hinsichtlich Stromfluss?
- Was denkst du, passiert mit der Leistungsabgabe einer Solarzelle, wenn sie *wärmer* wird? Deine Vermutung kannst du später bestätigen oder korrigieren



1. Abb.: Zu benutzendes Modul

Beim Kurzschluss fließt maximaler Strom, bei Leerlaufspannung fließt ein Strom von 0A.

Die Leistungsabgabe des PV-Moduls sinkt bei wärmeren Temperaturen und ansonsten gleichen Bedingungen.

- Mess-Tipp: Ist das PV-Modul direkt mit dem Multimeter verbunden, lassen sich U_{ll} und I_{ks} messen, ohne die Verschaltung des Multimeters zu verändern, indem das Drehrad des Multimeters einfach auf die Stellung „Volt“ bzw. „Ampere“ gebracht wird

Teilversuch 01: Abschätzung des MPP

Eine Solarzelle hat einen optimalen Betriebspunkt, d.h. es existiert ein Widerstand, den man an ein Modul anschließen kann, unter dem das Produkt aus Spannung und Strom am größten ist. Wie dieser MPP ermittelt wird, ist Gegenstand des Versuchs Nr. 3.

Aus der genauen Form des MPP-Graphen lässt sich folgende Formel für eine Abschätzung der maximalen Leistung begründen:

$$P_{MPP} \approx I_{ks} \cdot U_{ll} \cdot 0,75 \quad (1)$$

Dabei bezeichnet man den Faktor 0,75 als **Füllfaktor**, dieser variiert prinzipiell zwischen 0,7 und 0,9.

- Stecke das Modul in die Grundplatte und schalte die Halogenlampe an
- Messe den Kurzschluss-Strom des Moduls und dessen Leerlaufspannung
- Berechne daraus den geschätzten MPP

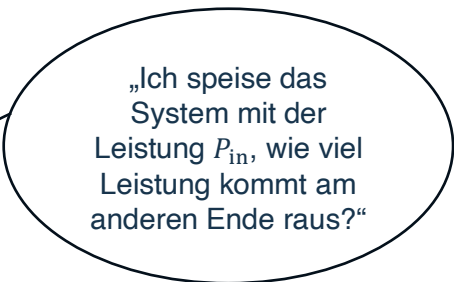
$$P_{MPP} \approx 11,38V \cdot 136mA \cdot 0,75 \approx 1,16W$$

Konzept 01: Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines physikalischen Systems ist definiert über

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

P bezeichnet dabei die Leistung („Power“), also wie viel Joule Energie pro einer Sekunde fließt. Energie wiederum ist eine Zahl, die misst, wie wahrscheinlich jegliche „Änderung“ in einem System ist.



„Ich speise das System mit der Leistung P_{in} , wie viel Leistung kommt am anderen Ende raus?“

Eine PV-Zelle wandelt Lichtenergie in elektrische Energie um.

Der Wirkungsgrad ist also das Verhältnis aus der umgesetzten elektrischen Leistung und der auf das Modul einfallenden Lichtleistung. Aus der allgemeinen Formel (2) folgt also folgende für PV-Module spezifische Formel:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{Licht}} \quad (3)$$

Für P_{el} lässt sich einfach P_{MPP} (z.B. aus Teilversuch 1) einsetzen. Wie lässt sich aber P_{Licht} bestimmen? Eine typische Vorgehensweise in der Astrophysik, die wir hier anwenden können, ist es, die **Bestrahlungsstärke** Φ in $\frac{Watt}{m^2}$ zu messen. Dann folgt mit der **bestrahlten Fläche** A in m^2 die Lichtleistung:

$$P_{Licht} = \Phi \cdot A_{PV-Modul} \quad (4)$$

Konzept 02: Das Luxmeter

Mit einem Luxmeter kann man die sogenannte **Beleuchtungsstärke** Φ_v messen, das ist wie hell die einfallende Strahlung für das menschliche Auge erscheint. Ihre Einheit ist „Lumen pro Quadratmeter“, was man wiederum als „Lux“ definiert – daher der Name „Luxmeter“.

$$1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

Lumen,
Einheit für
den
Lichtstrom

(5)

Lux: Das,
was ein
Luxmeter
misst

Die Beleuchtungsstärke Φ_v in Lux ist **nicht** dasselbe wie die physikalische Bestrahlungsstärke Φ in Watt pro Quadratmeter aus Gleichung (4). Es muss nämlich noch mit dem sogenannten **Strahlungsäquivalent** K umgerechnet werden:

$$\Phi \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = \Phi_v \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] \cdot \frac{1}{K} \left[\frac{\text{W}}{\text{lm}} \right] \quad (6)$$

K ist dabei eine relativ komplizierte Größe und kann nur in Spezialfällen einfach bestimmt werden. Einer dieser Fälle ist unserer Sonne, da sie fast wie ein perfekter „Schwarzkörper“ ausstrahlt. Es gilt:

$$K_{\text{Sonne}} \approx 93 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \quad (7)$$

K variiert über den Tag und hängt auch von der Wolkendicke ab. Dies ignorieren wir hier, da wir nur an einer Abschätzung interessiert sind.

Teilversuch 02: Abschätzung des Wirkungsgrads

Für diesen Teilversuch muss deine Gruppe mit dem Photovoltaik-Modul, einem Luxmeter und einem Multimeter hinaus gehen.

Ist es ein wolkiger oder sonniger Tag? Wolkig Sonnig

- Verbinde das PV-Modul mit dem Multimeter und messe die Leerlaufspannung. Sie sollte ca. der maximalen Spannung (Siehe Infoblatt am Modulrücken) entsprechen. Ist dies nicht der Fall, dann sind die Lichtverhältnisse nicht gut genug, um den Versuch durchzuführen
- Messe nun den Kurzschluss-Strom und finde die Neigung des Moduls gegenüber der Horizontalen, bei der der größte Strom fließt. **Achtung:** An einem sehr hellen Tag, musst du die richtige Größenordnung einstellen, also unter anderem die „A“-Buchse anstatt der „mA“-Buchse benutzen. Ansonsten kann das Multimeter kaputt gehen!
Tipp: An einem sonnigen Tag, kannst du dich am Schattenwurf von Objekten um dich rum orientieren.
- Sobald die optimale Neigung gefunden hast, notiere dir den Stromwert in Tabelle 1. Behalte nun die Neigung unbedingt bei!
- Messe nun auch die Leerlaufspannung mit dem Multimeter und die Beleuchtungsstärke in Lux, die auf das Modul fällt, indem du das Luxmeter an das Modul anlegst. Tragt die Werte in Tabelle 1 ein.
- Nun könnt ihr wieder zurück an die Grundplatte

Durchführungs-Tipp: An einem sonnigen Tag fließt der maximale Strom, wenn das Modul Richtung Sonne geneigt ist (an Schattenwurf orientieren). An einem komplett mit Wolken bedeckten Himmel fließt der größte Strom wenn man das Modul parallel zum Boden Richtung Himmel neigt: Die Wolken reflektieren die einfallende, gerichtete Sonnenstrahlung und machen sie somit diffus.

Tabelle 1: Beleuchtungsstärke, Stromstärke und Spannung unter Sonneneinstrahlung

Φ_V in lx	U_{II} in V	I_{ks} in A	$\approx P_{MPP}$ in W
90.000	11,38	1,04	8,87

- Berechne nun analog zu Teilversuch 1 den geschätzten MPP und trage in Tabelle 1 ein
- Berechne mithilfe Formel (6) und dem Sonnen-Strahlungsäquivalent Formel (7) die Bestrahlungsstärke Φ aus deinem Wert für die Beleuchtungsstärke aus Tabelle 1

$$\Phi = \frac{1}{K} \cdot \Phi_V = \frac{1}{93} \cdot \frac{W}{lm} \cdot 90.000 \frac{lm}{m^2} = \frac{968W}{m^2}$$

- Messe so genau wie möglich die Fläche des Moduls, die mit Solarzellen bedeckt ist. Notiere dir diese Größe unten bei $A_{PV-Modul}$. Nun kannst du über Formeln (3) und (4) den Wirkungsgrad berechnen. Überrascht dich der Wert?

$$A_{PV-Modul} = 540cm^2$$

$$P_{Licht} = \Phi \cdot A_{PV-Modul} = 968W/m^2 \cdot 540cm^2 = 968W/m^2 \cdot 0,054m^2 = 52,3W$$

$$\eta = P_{MPP} / P_{Licht} = 8,87W / 52,3W$$

$\eta \approx 17\%$

(8)

Teilversuch 03: Einfluss der Temperatur auf den Wirkungsgrad

- Stecke das PV-Modul in die Grundplatte und bringe die Lampe an
- Verbinde ein Multimeter und messe den Kurzschluss-Strom und die Leerlaufspannung. Das ist die Referenzmessung bei Raumtemperatur. Berechne den geschätzten MPP und trage alle Werte in Tabelle 2 ein
- Mache analog eine zweite Referenzmessung bei Raumtemperatur, diesmal mit eingeschaltetem Fön: So lassen sich systematische Fehler umgehen, sollte die Leistung der Lampe bei Einschalten des Föns einbrechen, was z.B. passieren kann, wenn Lampe und Fön durch eine Mehrfachsteckdose parallel geschaltet sind.
- Schalte die Lampe aus

Tabelle 2: MPP-Referenzmessung bei Raumtemperatur mit und ohne Fön

	U_{II} in V	I_{ks} in mA	$\approx P_{MPP}$ in W
Mit Fön	10,75	141,8	1,143
Ohne Fön	10,4	150,0	1,170

Wirkungsgrad eines PV-Moduls.
Wie effizient sind Solarzellen?

- Lege nun das Modul für fünf Minuten in die Tiefkühltruhe (z.B. der Schulmensa). Nachdem die Zeit vergangen ist, bringt das Modul so schnell wie möglich zurück zu seiner Position an der Grundplatte
- Schalte die Lampe an und messe den Kurzschluss-Strom und Leerlaufspannung. Berechne daraus den geschätzten MPP nach fünf Minuten kühlen. Schalte die Lampe aus und trage in Tabelle 3 ein

Tabelle 3: Verhalten des MPP bei Temperaturänderung

	U_{II} in V	I_{ks} in mA	$\approx P_{MPP}$ in W	Referenz-MPP in W aus Tabelle 2
Nach 5 min. Tiefkühltruhe	10,96	151,8	1,247	Bei Raumtemperatur: 1,17
Nach 5 min. Föhnen	9,54	148,6	1,063	Bei Raumtemperatur und eingeschaltetem Fön: 1,143

- Lass nun das Modul sich komplett auf Raumtemperatur erwärmen
- Schalte erst dann die Lampe ein und föhne das Modul für fünf Minuten
- Messe den Kurzschluss-Strom und die Leerlaufspannung nach den fünf Minuten und schalte erst nach der Messung den Fön aus! Berechne den geschätzten MPP und trage in Tabelle 3 ein

Fazit 04: In welcher Jahreszeit gewinnt man die meiste Energie?

Beantworte folgende Fragen:

- a.) Sinkt oder steigt P_{MPP} bei Erwärmung bzw. Kühlung im Vergleich zum Referenzwert bei ausgeschaltetem bzw. eingeschaltetem Fön? Um wie viel Prozent jeweils?
- b.) In welcher Jahreszeit wird die meiste Energie mit Photovoltaik gewonnen? Stimmt das mit deinen Feststellungen überein, bei welcher Temperatur die Leistung am größten ist?
- c.) Vergleiche den Kurzschluss-Strom unter Erwärmung in Tabelle 3 mit dem Kurzschluss-Strom in der Referenztabelle 2. Fällt dir etwas auf, was dich verwundert?

a.) Wir sehen, dass der MPP bei Erwärmung sinkt im Vergleich zu seinem Referenzwert und bei Kühlung steigt. Erwärmung: $1,247W/1,17W \approx 106,5\%$ und Kühlung $1,063W/1,143W \approx 93\%$.

b.) Das bedeutet, dass bei kälteren Temperaturen, also im Winter der MPP und somit auch η tendentiell höher sind. Trotzdem werden die höchsten Erträge im Sommer erzielt. Grund dieser Diskrepanz ist lediglich die höhere Einstrahlzeit im Sommer die zu einem größeren Gesamtenergiegewinn führt.

c.) Nächste Seite

Der Kurzschluss-Strom steigt beim Erwärmen im Vergleich zum Strom aus der Referenztafel:
148,6mA > 141,8mA. Dies ist verwunderlich, da eine höhere Temperatur eine größere Stör-
bewegung der Ladungsträger im Leiter bedeutet und somit der Widerstand steigt. Es gibt jedoch
einen anderen Effekt, der diesen überwiegt: Durch die gewonnene kinetische Energie verringert
sich die sogenannte Bandlücke des Halbleiters, weswegen das Licht mehr Elektronen aus der
Oberfläche des Metalls lösen kann. Dieser Effekt sollte in die andere Richtung (also beim Kühlen
des Moduls) ebenfalls sichtbar sein, was bei unseren Messwerten nicht der Fall ist. Eventuell kann
es sein, dass sich die Belichtungsstärke kurzzeitig verändert hat.