

Solarzellen und Solargeneratoren

Laborbericht Für Labor Physik und Grundlagen der Elektrotechnik SS 2003

Erstellt von: G. Schley, B. Drollinger
Mat.-Nr.: 290933, 291339
Datum: 06.08.2003
Uhrzeit: etwa 10 Uhr
IP-Adresse: 141.47.69.77

1 Inhalt

1	Inhalt	2
2	Einleitung	3
2.1	Licht als Energieträger	3
2.2	Definition. Einheiten und messtechnische Erfassung	3
2.2.1	Sonnenstrahlung	3
2.2.2	Was ist eigentlich Strahlung?	3
2.2.3	Aufbau und Theorie von Solarzellen	4
2.2.4	Energiespeicher für photovoltaische Systeme	6
3	Versuchsablauf	7
3.1	Leerlauf – Spannung	7
3.1.1	Aufgabenstellung	7
3.1.2	Auswertung	7
3.2	Kurzschlußstrom	8
3.2.1	Aufgabenstellung	8
3.2.2	Auswertung	8
3.3	Maximum Power Point	8
3.3.1	Aufgabenstellung	8
3.3.2	Auswertung	8
3.4	Leistung	11
3.4.1	Aufgabenstellung	11
3.4.2	Auswertung	11
3.5	Winkelabhängigkeit	12
3.5.1	Auswertung	12
3.6	Wirkungsgrad	13
3.6.1	Auswertung	13
4	Tabellen	15
5	Literatur	17

2 Einleitung

2.1 Licht als Energieträger

2.2 Definition. Einheiten und messtechnische Erfassung

2.2.1 Sonnenstrahlung

Die Sonne strahlt am Äquator jährlich eine Energie von ca. 2200 Kilowattstunden pro Quadratmeter auf die Erde. Hier in Europa beträgt dies zwischen 800 und 1700 kWh/m². Würde man 10% der Wüste Sahara mit heutigen Solarstromgeneratoren nutzen, so würde man fast den gesamten Energiebedarf der Erde decken.

2.2.2 Was ist eigentlich Strahlung?

Dem Licht wird der Welle-Teilchen-Dualismus zugeordnet, d.h. man kann es als Welle mit einer bestimmten Wellenlänge betrachten und als Teilchen, welche Photonen (griech. phos: Licht) oder Lichtquanten genannt werden. Diese Photonen sind durch die folgenden Eigenschaften gekennzeichnet:

- Photonen sind unteilbar, sie können nur als ganzes entstehen bzw. verschwinden.
- Jedes Photon transportiert eine ganz bestimmte Energiemenge W , daher auch die Bezeichnung Lichtquant (lat. quant: ganz, soviel).

- Im Vakuum gilt für die Wellenlänge λ des Photons: $\lambda = \frac{c}{f}$

wobei c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = 299 792 km/s

- Das Lichtquant läßt sich durch die Masse $m = \frac{h}{\lambda \cdot c}$ und den Impuls $p = mc = \frac{h}{\lambda}$ charakterisieren.

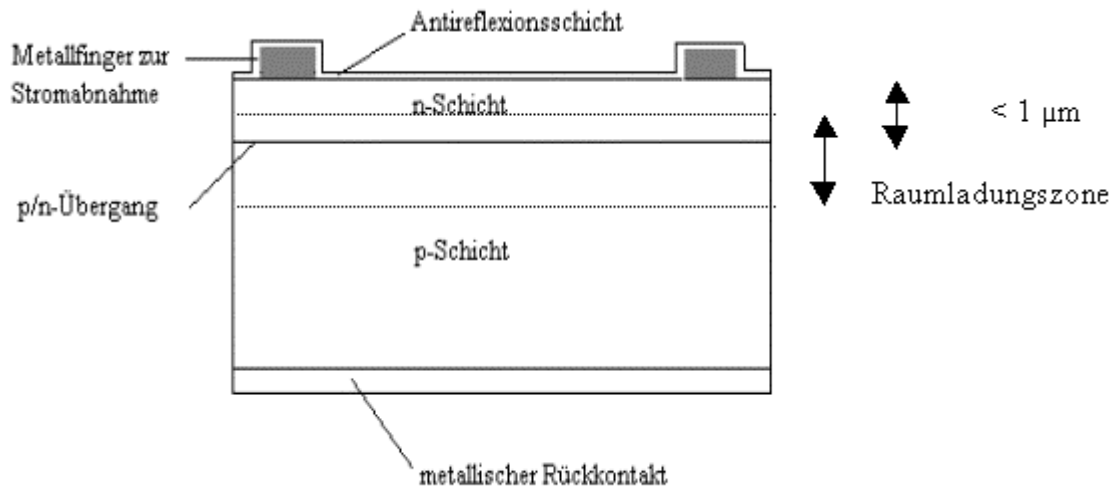
(Beispiel für sichtbares Licht: Die Masse eines Quants beträgt ca. $5 \cdot 10^{-36}$ kg.)

Man kann Photonen, im Gegensatz zu anderen Teilchen, keine Ruhemasse zuordnen, man spricht daher von masselosen Teilchen im Ruhezustand. Wie oben schon erwähnt, kann man Photonen Wellenlängen zuordnen. Die Wellenlänge bestimmt die Energie, je geringer die Wellenlänge ist, also je größer die Frequenz ist, desto größer ist ihre Energie:

$$W = h \cdot f \quad \text{mit } h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js Plancksches Wirkungsquantum}$$

Die Sonne emittiert Strahlung mit unterschiedlichen Wellenlängen. Einen Teil dieser Strahlung können wir mit dem menschlichen Auge in Form von Farben wahrnehmen, die wir also sehen. Diese Farben werden auch durch Brechung an einem Prisma in Form eines Farbspektrums sichtbar gemacht, welches z.B. vom Regenbogen bekannt ist.

2.2.3 Aufbau und Theorie von Solarzellen



Die klassische Silizium-Solarzelle besteht im wesentlichen aus zwei Schichten: einer ca. 0,001 mm dicken n-Schicht, welche in das ca. 0,6 mm dicke p-leitende Si-Substrat eingebracht wurde (die Dicken variieren je nach Hersteller). Der Übergang zwischen n-Schicht und p-Substrat heißt p/n-Übergang, auch Grenzsicht genannt. Bei der monokristallinen Siliziumsolarzelle wird die n-Schicht durch oberflächennahes Einbringen von ca. 1000 Phosphor-Atomen / cm^3 in das p-leitende Si-Substrat durch sog. Dotieren erzeugt. Die n-Schicht ist deshalb so dünn, damit der energiereiche Anteil des Sonnenlichtes besonders in der Raumladungszone am pn-Übergang absorbiert wird. Das p-leitende Si-Substrat muß dick genug sein, um die tiefer eindringenden Sonnenstrahlen absorbieren zu können. Das p-Substrat wird in Form einer Silizium-Scheibe (Wafer) bereitgestellt, die über ein spezielles (kosten- und energieintensives) Kristallzüchtungsverfahren hergestellt wird. Das Substrat ist auch deswegen so dick, weil es der gesamten Solarzelle mechanische Stabilität bieten muß.

Schon vor dem Auftreffen des Sonnenlichtes geschieht folgender Vorgang im p-bzw. n-leitenden Silizium: Die jeweils freie 4. Bindung der Bor-Atome im Siliziumgitter (typische Konzentration $N_{\text{Bor}} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) der p-Schicht wird von frei beweglichen Elektronen aus dem Valenzband besetzt. Es entstehen somit negativ geladene Borionen, weil sie jetzt ein Elektron zusätzlich aufgenommen haben.

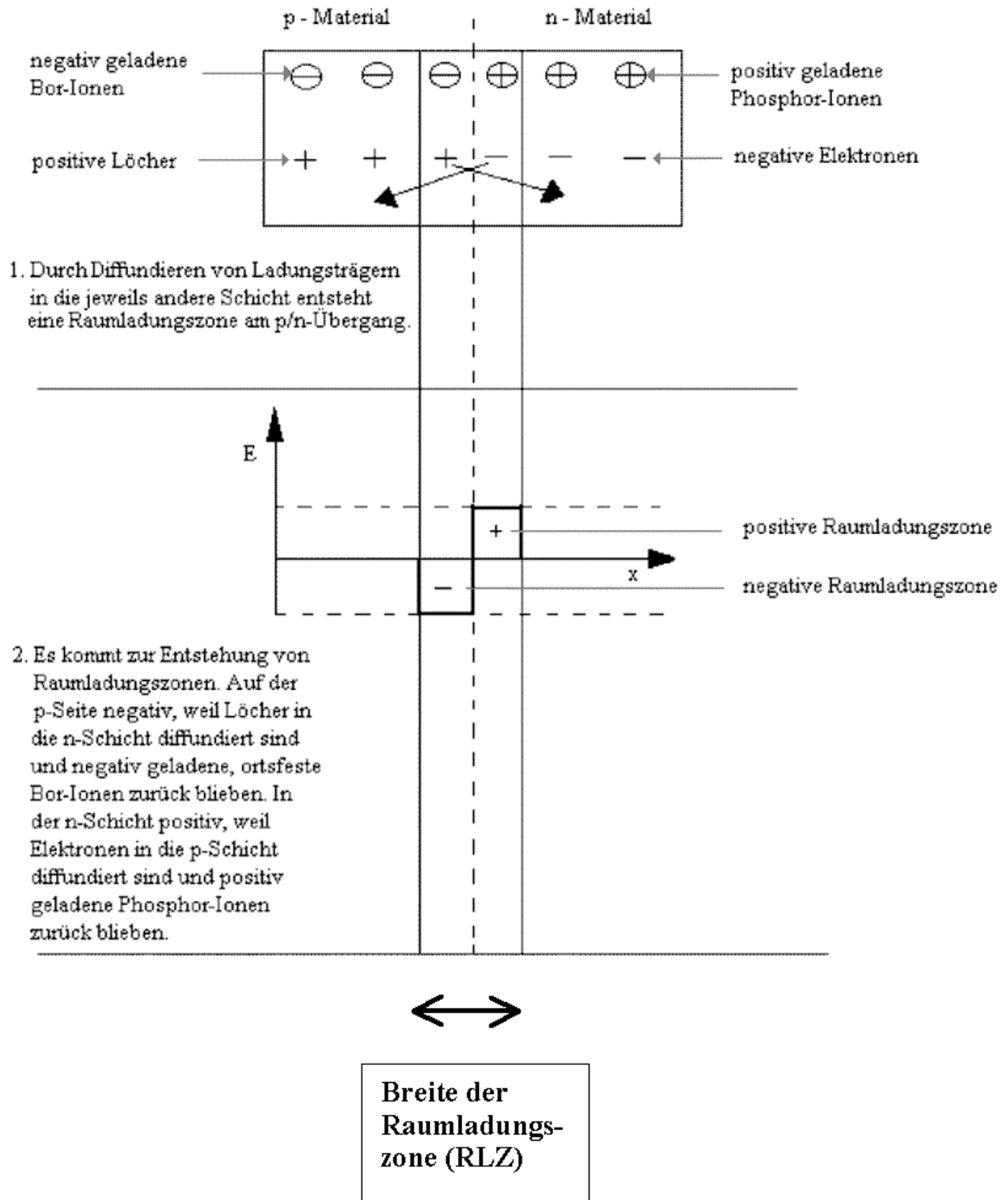
Analog dazu geben die fünf-wertigen Phosphoratome ($N_{\text{Phosphor}} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) der n-Schicht bei Zimmertemperatur praktisch all ihre ungebundenen Valenzelektronen an das Leitungsband ab, wobei positiv geladene Phosphorionen entstehen. Das Energieniveau der ungebundenen Valenzelektronen (also des jeweiligen 5. Elektrons) der P-Atome liegt nur knapp unter dem Leitungsband des Si-Kristalls; deshalb kann die "Bindung" des 5. Elektrons schon bei minimaler Wärmezufuhr (z.B. Zimmertemperatur) leicht aufgebrochen werden. Am p/n-Übergang selbst bewegen sich (diffundieren) nun frei bewegliche Elektronen, die in der n-Schicht im Überfluß existieren, in die p-Schicht; analog dazu wandern die frei beweglichen Löcher aus der p-Schicht in die n-Schicht. Die Bor- und Phosphorionen sind aber ortsfest, können sich also im Kristall bei Betriebsbedingungen der Solarzelle nicht frei bewegen. Durch diese ortsfesten Ionen und deren Wechselwirkung entsteht ein elektrisches Feld, was dem weiteren Abwandern von beweglichen Ladungsträgern entgegenwirkt.

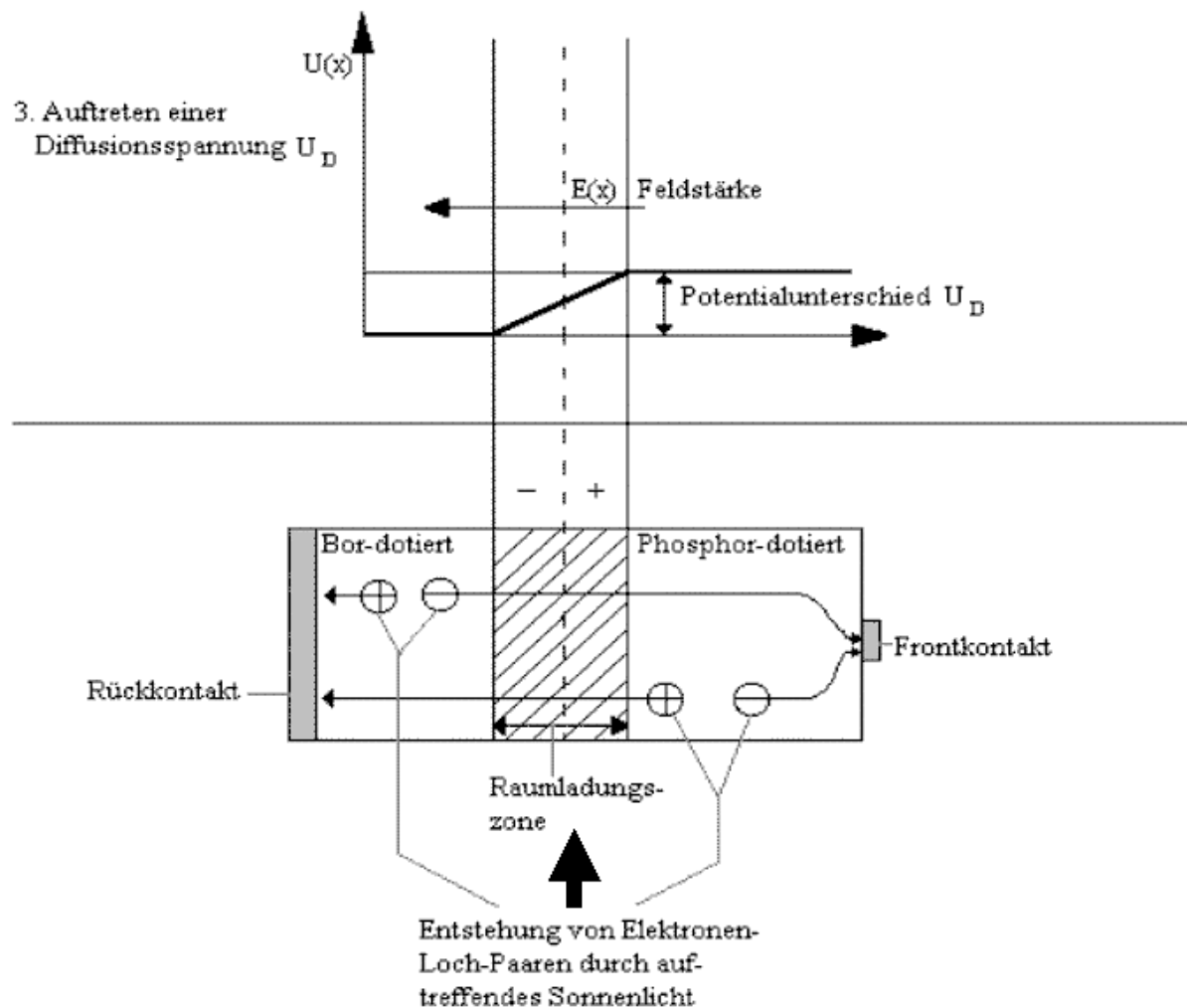
Relativ schnell stellt sich ein Gleichgewicht ein und es entsteht am pn-Übergang eine Raumladungszone RLZ mit einer bestimmten Breite, d.h. ein Ladungsgebiet mit einem negativen Pol in der p-Schicht (negativ geladene Borionen + zugewanderte Elektronen) und einem positiven Pol in der n-Schicht (positiv geladene Phosphorionen und zugewanderte Löcher). Diese zwei Pole, Raumladung genannt, und die dadurch erzeugte elektrische Feldstärke dienen als "Motor" der Solarzelle.

Treffen nun Photonen mit dem richtigen Energiebetrag auf ein "gebundenes Elektron" im Valenzband, so kann dieses Elektron in das Leitungsband gelangen. Gleichzeitig entsteht dabei ein positiv geladenes Loch, es entsteht also ein Elektronen-Loch-Paar.

Solarzellen und Solargeneratoren

Dieser Prozeß wird dann für die Solarzelle interessant, wenn er in der Raumladungszone selbst oder dessen Umgebung stattfindet. Durch den oben beschriebenen "Motor" der Solarzelle (also das innere elektrische Feld in der RLZ) wandert das negative Elektron in das n-Gebiet und weiter zur metallischen Kontaktfläche am n-leitenden Silizium. Dagegen wandert das positiv geladene Loch durch die Einwirkung des elektrischen Feldes in Richtung Kontaktfläche des p-leitenden Siliziums. Dieser Vorgang wird Ladungsträgertrennung genannt. Dadurch kommt es zur Bildung einer Klemmspannung, die nun von einem Verbraucher abgenommen und genutzt werden kann.





4. Die gebildeten Ladungsträger werden durch das elektrische Feld getrennt und bewegen sich in Richtung der Kontakte. Dadurch entsteht an den Kontakten ein Potentialunterschied (eine Leerlaufspannung), welcher dann durch Anschlüsse abgenommen und genutzt werden kann.

Darstellung der Vorgänge an einer kristallinen Siliziumsolarzelle

2.2.4 Energiespeicher für photovoltaische Systeme

Um die zeitliche Variation der Sonneneinstrahlung infolge des Wechsels von Tag und Nacht wie auch von Sonnenschein und Bewölkung auszugleichen, ist ein Energiespeicher nötig. Bei Anlagen die auf Gebäuden mit Anschluss ans öffentliche Stromnetz betrieben werden, wird das Netz als Speicher verwendet.

3 Versuchsablauf

Benutzt wurde eine Solarzelle mit den Daten :

Länge : 12,2 cm

Breite 11,5 cm

Leistung : 686 mW

Leerlaufspannung : 24,5 V

Kurzschlußstrom : 49 mA;

IP-Adresse: 141.47.69.77 Uhrzeit: ca. 10 Uhr

Hinweis: Diese Daten gelten bei starkem, direktem Sonnenlicht (ca. 100.000 lx)

3.1 Leerlauf – Spannung

3.1.1 Aufgabenstellung

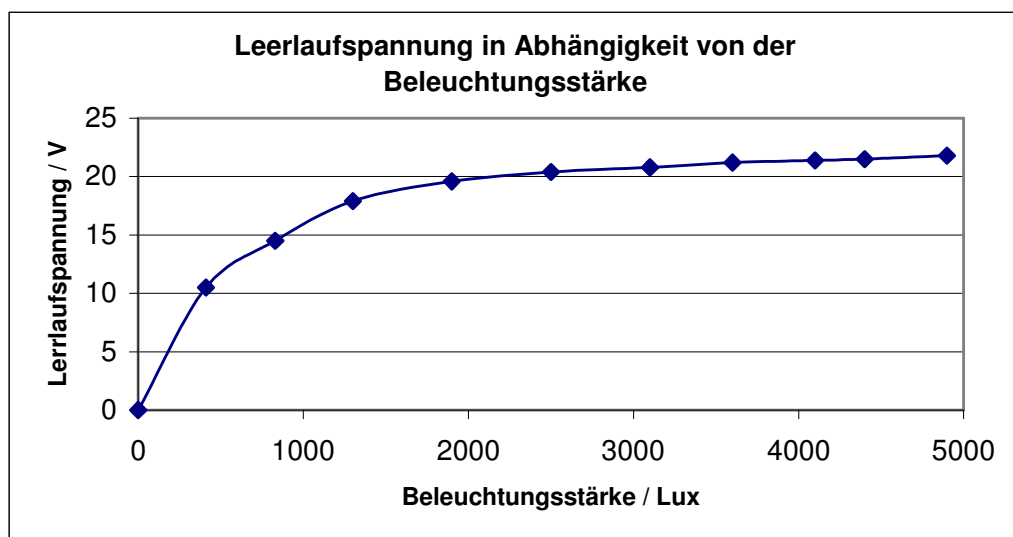
Spannungsmessung ohne Last bei variabler Beleuchtung, senkrechter Lichteinfall.

- Wie verhält sich die Leerlauf-Spannung?

3.1.2 Auswertung

Anhand von **Abb. 3.1.2.1** ist deutlich zu sehen das die Leerlaufspannung im Bereich bis 2000 Lux stark von der Beleuchtungsstärke abhängt. Bei Beleuchtungswerten größer als 2000 Lux ändert sich die Leerlaufspannung kaum noch und geht gegen einen Wert von 22 V (Sättigung). Hieraus ist zu erkennen, daß bei Sonnenbestrahlung (100000 Lux) sich die Leerlaufspannung praktisch nicht mehr ändert und sich auf ein Maximum von 24,5 V (siehe Datenblatt) einstellt.

Abb. 3.1.2.1



3.2 Kurzschlußstrom

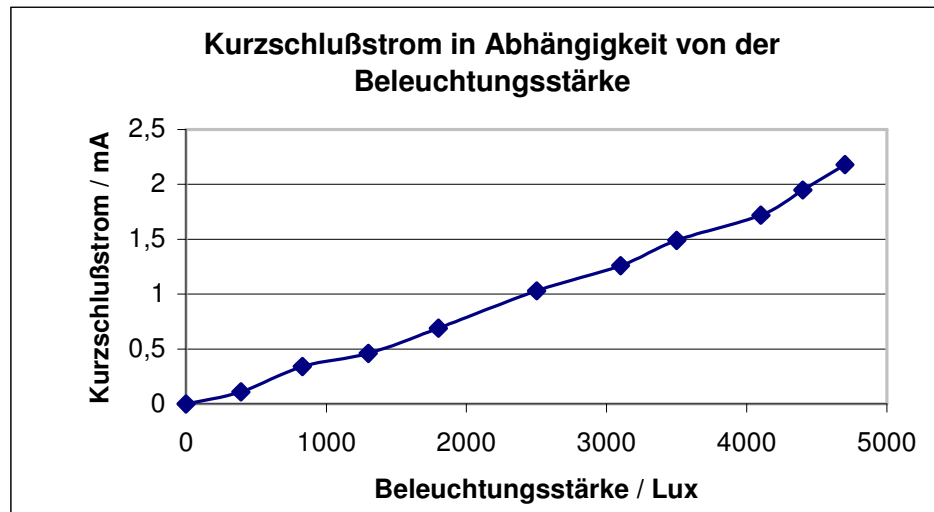
3.2.1 Aufgabenstellung

Strommessung bei Kurzschluß bei variabler Beleuchtung, senkrechter Lichteinfall

- Wie verhält sich der Kurzschluß-Strom?

3.2.2 Auswertung

Abb. 3.2.2.1



In dem in **Abb. 3.2.2.1** dargestellten Bereich steigt der Kurzschlußstrom proportional mit der Beleuchtungsstärke an. Dies stimmt mit der Theorie überein.

3.3 Maximum Power Point

3.3.1 Aufgabenstellung

Ermittlung der maximalen Leistungsabgabe (MPP) bei 30% und 100% Beleuchtung, senkrechter Lichteinfall.

- Wie verhält sich die Leistung in Abhängigkeit von der Solarzellen-Spannung?
- Gibt es eine Abhängigkeit von der Beleuchtung?

3.3.2 Auswertung

Maximum Power Point (MPP):

engl. für Punkt maximaler Leistung. In diesem Arbeitspunkt der I-U-Kennlinie einer Solarzelle bzw. eines Moduls kann die maximale Leistung entnommen werden. Durch MPP-Tracking kann dieser Punkt bei jedem Betriebszustand gefunden und eingestellt werden.

Solarzellen und Solargeneratoren

Die abgegebene Leistung ist das Produkt aus Stromstärke und Spannung im momentanen Arbeitspunkt. Bildet man dieses Produkt punktwise für alle Spannungen vom Kurzschluß bis zum Leerlauf so erhält man die in den drei folgenden Abbildungen dargestellte Kurvenform für die Leistung

Abb. 3.3.2.1 (Allgemeine Darstellung Strom-Spannungskennlinie und Leistungskurve)

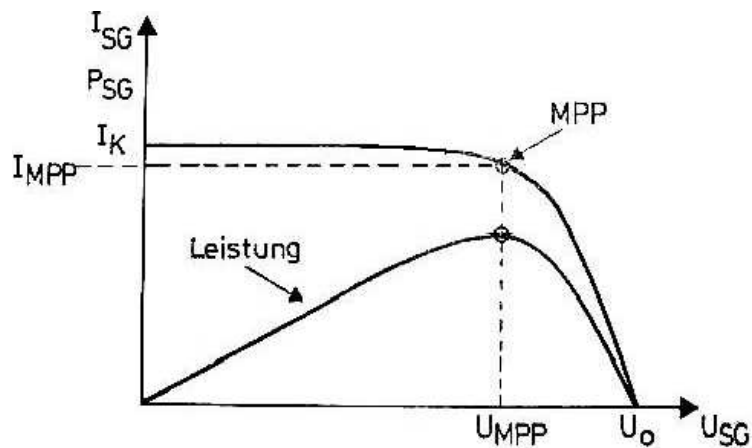
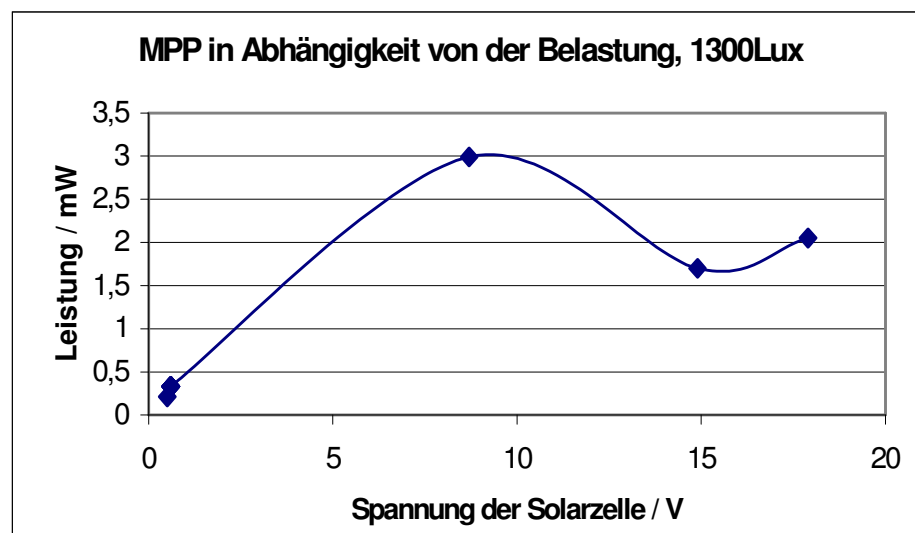
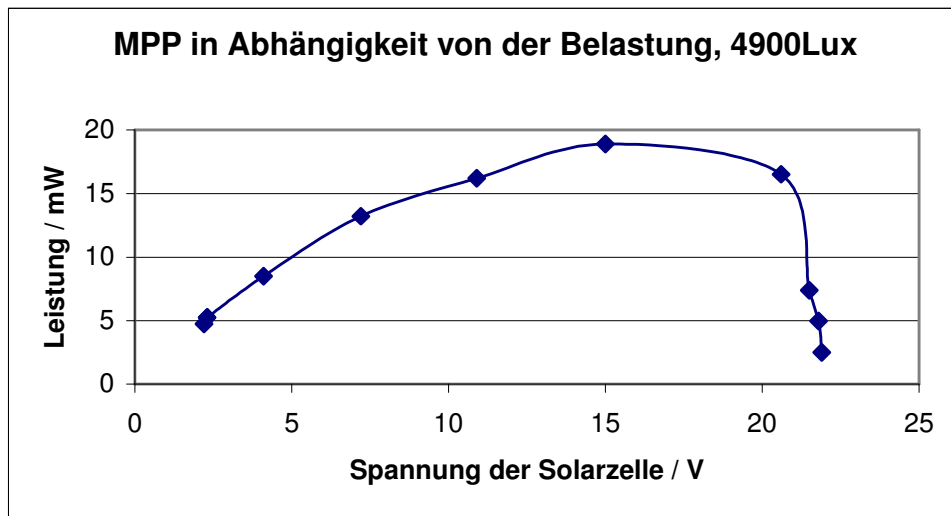


Abb. 3.3.2.2 (Darstellung für Leistungsabgabe bei etwa 30% Beleuchtungsstärke)



Laut Theorie müsste die Kurve nachdem sie ihr Maximum erreicht hat (hier bei 8,7V) kontinuierlich fallen (siehe auch **Abb. 3.3.2.3**). Demnach handelt es sich bei dem Messpunkt bei 17,9V um einen Ausreißer noch oben.

Abb. 3.3.2.3 (Darstellung für Leistungsabgabe bei 100% Beleuchtungsstärke)



Ist das Produkt aus Strom und Spannung maximal bricht die Leistung ein. Der Einbruch der Leistung in **Abb. 3.3.2.2** und **Abb. 3.3.2.3** geschieht also unmittelbar nach dem Punkt maximaler Leistung auch MPP (Maximum Power Point) genannt. Um einen optimalen Energieertrag zu erhalten sollte das Solarmodul in der Nähe des MPP betrieben werden.

Da sowohl Strom als auch Spannung von der Beleuchtung abhängen, muss auch die Leistung von ihr abhängen.

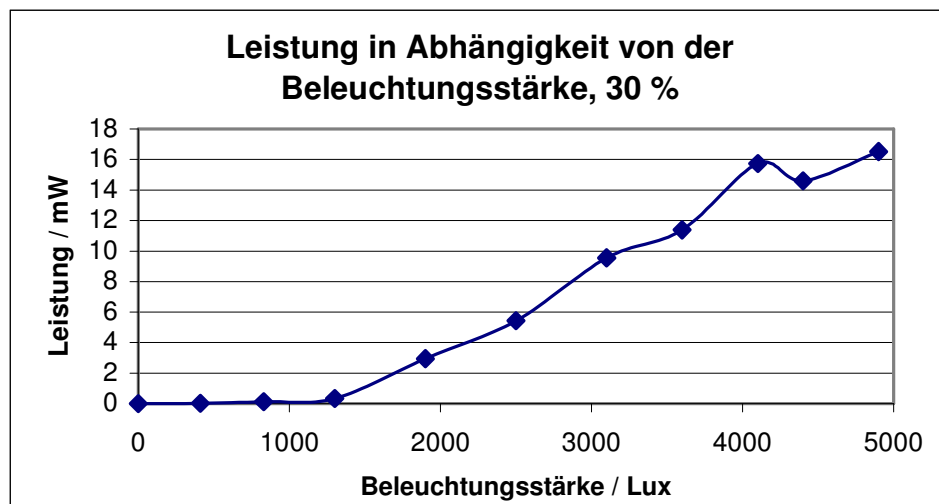
3.4 Leistung

3.4.1 Aufgabenstellung

Messung der Leistungsabgabe bei 'moderater' Last und senkrechtem Lichteinfall in Abhängigkeit von der Beleuchtung.

- Wie verhält sich die Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtung?

3.4.2 Auswertung



MPP-Tracking:

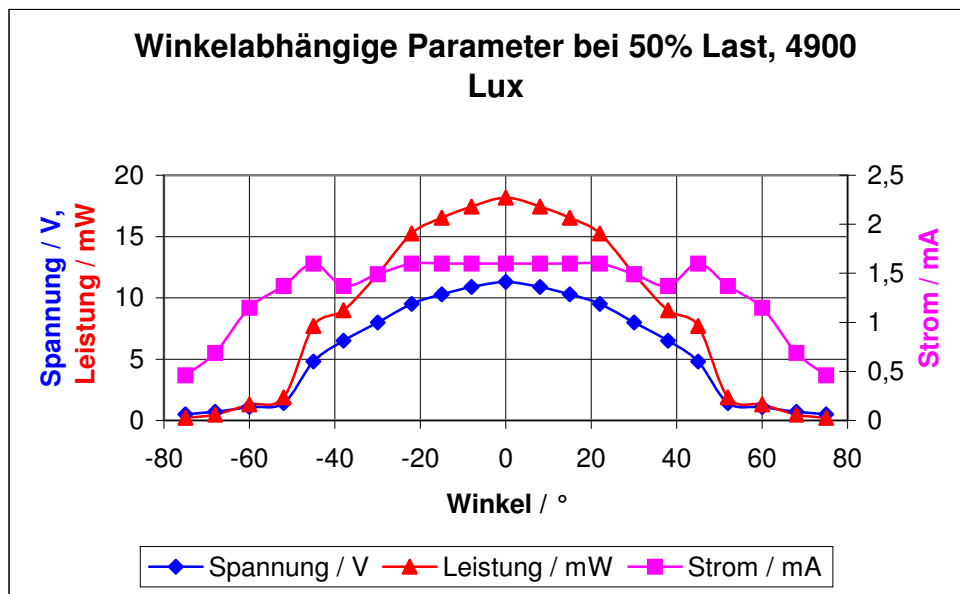
Nachregeln der Leistungsentnahme, so dass ein Photovoltaikgenerator möglichst ständig im Maximum Power Point betrieben wird. Dieser Arbeitspunkt der I-U-Kennlinie variiert mit den Bestrahlungs- und Temperaturverhältnissen der Module. Eine MPP-Regelung optimiert die elektrische Leistungsentnahme und gehört zur Ausstattung von Wechselrichtern und Laderegler.

3.5 Winkelabhängigkeit

Einstrahlwinkelabhängige Messung (Sonnenvorlauf); Messung bei 'moderater Last'. Gemessen wird nur der halbe Gesamtwinkel, da symmetrisch.

- Wie äußert sich die Winkelabhängigkeit?
- Gibt es hier eine Korrelation zur effektiv bestrahlten Fläche (Lambertsches Gesetz)?

3.5.1 Auswertung



Spannung und Leistung haben unter einem Winkel von 0° beide ihren maximalen Wert. Für Winkel kleiner oder größer 0 (bis $\pm 90^\circ$) nehmen ihre Werte ab.

Der Strom hingegen ist in einem Bereich von -20° bis $+20^\circ$ nahezu konstant maximal. Gegen $\pm 45^\circ$ wird der Strom etwas kleiner, steigt jedoch gegen $\pm 45^\circ$ nochmals auf ein Maximum an. Da die Messung aus Symmetriegründen nur für einen Winkel zwischen 0 und 90° durchgeführt wurde, kann man hier nicht feststellen, ob die Abweichung bei 45° durch eine ungewollte Reflexion bedingt ist.

Für Werte kleiner -45° und größer $+45^\circ$ sinkt der Strom stetig ab.

Definition des Lambertschen Gesetzes:

Die Lichtstärke einer strahlenden Ebene ist in Richtung des Ausstrahlungswinkels dem Kosinus dieses Winkels proportional.

Ist der Winkel zwischen Flächennormalen und Sonnenstrahlen 0° (parallel zueinander) so ist laut der Formel $I = I_0 \cdot \cos \alpha$ die Lichtintensität und die bestrahlte Fläche maximal. Für einen Winkel $\neq 0^\circ$ nimmt die Intensität ab, damit treffen pro Flächenstück weniger Lichtstrahlen auf der Solarzelle auf. Spannung, Strom und somit die Leistung stehen also in Beziehung mit der effektiv bestrahlten Fläche.

3.6 Wirkungsgrad

Die spezifizierten Daten der verwendeten Solarzelle lauten:

Länge: 12,2 cm; Breite 11,5 cm; Leistung: 686 mW; Leerlaufspannung: 24,5 V; Kurzschlußstrom: 49 mA;

Hinweis: Diese Daten gelten bei starkem, direktem Sonnenlicht (ca. 100.000 lx)

- Wie fällt der Vergleich mit den gemessenen Daten aus?
- Wie groß ist die theoretische Maximalleistung der eingesetzten Solarzelle bei 100.000 lx unter Berücksichtigung des 'Umwandlungswertes': 1 Lux = (1/683) W/m² (gilt streng genommen nur für grünes Licht)?
- Wie groß ist der Wirkungsgrad aus gelieferter und theoretischer Leistung (Perzeugt / PLicht) für die Spezifikationsangaben und die Meßergebnisse (lineare Skalierung der Beleuchtungsstärke 'erlaubt')?
- Wodurch kommt es zu Abweichungen zwischen Theorie und Praxis?
Beispiele : Lampenspektrum entspricht nicht dem Sonnenspektrum, die spektrale Empfindlichkeit von Beleuchtungsmesser (LDR) und Solarzelle ist verschieden, der 'Umwandlungswert' gilt nur für grünes Licht, Streuung in der Produktion der Solarzelle, Alterungsprozesse, ...

3.6.1 Auswertung

Die Leerlaufspannung beträgt bereits bei 4900 Lux einen Wert von maximal 22V. Da bei direktem Sonnenlicht eine Leerlaufspannung von 24,5V anliegt kann man erkennen, daß sich die Leerlaufspannung nur noch geringfügig ändert.

Geht man von einem Kurzschlußstrom von 49mA bei direktem Sonnenlicht aus und berechnet mittels Dreisatz den Kurzschlußstrom für 4900 Lux, so erhält man einen Wert (2,4 mA) nahe dem gemessenen Wert (2,2 mA).

Theoretischer Wirkungsgrad

Bei senkrechtem Sonnenlichteinfall bei 100000 lx ergibt sich laut der Umrechnung $1 \text{ Lux} = \frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (streng

genommen gilt dies nur bei grünem Licht) eine Maximalleistung von etwa 2,05 W pro Solarzelle.

Über die Formel $\frac{P_2}{P_1} = \eta$ lässt sich der theoretische Wirkungsgrad errechnen.

$P_2 = 686 \text{ mW}$ (aus spezifizierte Daten der Solarzelle)

$P_1 = 2,05 \text{ W}$

daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad von 33%

Man kann bei Sonneneinstrahlung auf Solarzellen davon ausgehen, dass alle Zellen mit der gleichen Beleuchtungsstärke bestrahlt werden. Bei einem Strahler hingegen nimmt die Beleuchtungsstärke an den Rändern des Lichtkegels ab, so dass keine gleichmäßige Bestrahlung stattfindet.

Solarzellen und Solargeneratoren

Errechnetes Ergebnis

$$P_{erzeugt} = 2200mV \cdot 2,18mA = 4,73mW$$

$$P_{Licht} = \frac{4700W}{683m^2} \cdot 0,01403m^2 = 96,5mW$$

daraus ergibt sich der Wirkungsgrad von $\eta = \frac{P_{erzeugt}}{P_{Licht}} = \frac{4,73mW}{96,5mW} = 4,97\%$.

4 Tabellen

Zu Aufgabe Leerlauf-Spannung

Beleuchtungsstärke /Lux	Winkel / °	Last /%	Spannung /V	Strom /mA	Leistung /mW
0	0	0	0	0	0
410	0	0	10,5	0	0
830	0	0	14,5	0	0
1300	0	0	17,9	0	0
1900	0	0	19,6	0	0
2500	0	0	20,4	0	0
3100	0	0	20,8	0	0
3600	0	0	21,2	0	0
4100	0	0	21,4	0	0
4400	0	0	21,5	0	0
4900	0	0	21,8	0	0

Zu Aufgabe Kurzschluß-Strom

Beleuchtungsstärke /Lux	Winkel / °	Last /%	Spannung /V	Strom /mA	Leistung /mW
0	0	100	0	0	0
390	0	100	0,1	0,11	0,01
830	0	100	0,3	0,34	0,12
1300	0	100	0,5	0,46	0,21
1800	0	100	0,7	0,69	0,47
2500	0	100	1	1,03	1,06
3100	0	100	1,3	1,26	1,59
3500	0	100	1,5	1,49	2,22
4100	0	100	1,7	1,72	2,95
4400	0	100	1,9	1,95	3,79
4700	0	100	2,2	2,18	4,73

Zu Aufgabe MPP 30%

Beleuchtungsstärke /Lux	Winkel / °	Last /%	Spannung /V	Strom /mA	Leistung /mW
1300	0	0	17,9	0,11	2,05
1300	0	10	14,9	0,11	1,7
1300	0	20	8,7	0,34	2,99
1300	0	30	0,6	0,57	0,33
1300	0	40	0,6	0,57	0,33
1300	0	50	0,6	0,57	0,33
1300	0	60	0,6	0,57	0,33
1300	0	70	0,6	0,57	0,33
1300	0	80	0,6	0,57	0,33
1300	0	90	0,6	0,57	0,33

Solarzellen und Solargeneratoren

1300	0	100	0,5	0,46	0,21
------	---	-----	-----	------	------

Zu Aufgabe MPP 100%

Beleuchtungsstärke /Lux	Winkel / °	Last /%	Spannung /V	Strom /mA	Leistung /mW
4900	0	0	21,9	0,11	2,5
4900	0	10	21,8	0,23	4,98
4900	0	20	21,5	0,34	7,4
4900	0	30	20,6	0,8	16,52
4900	0	40	15	1,26	18,9
4900	0	50	10,9	1,49	16,2
4900	0	60	7,2	1,83	13,22
4900	0	70	4,1	2,06	8,5
4700	0	80	2,3	2,29	5,25
4900	0	90	2,3	2,29	5,25
4700	0	100	2,2	2,18	4,73

Zu Aufgabe Leistung

Beleuchtungsstärke /Lux	Winkel / °	Last /%	Spannung /V	Strom /mA	Leistung /mW
0	0	30	0	0	0
410	0	30	0,1	0,11	0,01
830	0	30	0,3	0,34	0,12
1300	0	30	0,6	0,57	0,33
1900	0	30	3,7	0,8	2,94
2500	0	30	7,9	0,69	5,43
3100	0	30	11,9	0,8	9,55
3600	0	30	14,2	0,8	11,38
4100	0	30	17,2	0,92	15,74
4400	0	30	18,2	0,8	14,6
4900	0	30	20,6	0,8	16,52

Zu Aufgabe Winkelabhängigkeit

Beleuchtungsstärke /Lux	Winkel / °	Last /%	Spannung /V	Strom /mA	Leistung /mW
4900	-75	50	0,5	0,46	0,21
4900	-68	50	0,7	0,69	0,47
4900	-60	50	1,1	1,15	1,31
4900	-52	50	1,4	1,37	1,89
4900	-45	50	4,8	1,6	7,71
4900	-38	50	6,5	1,37	8,97
4900	-30	50	8	1,49	11,93
4900	-22	50	9,5	1,6	15,24
4900	-15	50	10,3	1,6	16,52
4900	-8	50	10,9	1,6	17,44
4900	0	50	11,3	1,6	18,18
4900	8	50	10,9	1,6	17,44
4900	15	50	10,3	1,6	16,52

Solarzellen und Solargeneratoren

4900	22	50	9,5	1,6	15,24
Beleuchtungsstärke /Lux	Winkel / °	Last /%	Spannung /V	Strom /mA	Leistung /mW
4900	30	50	8	1,49	11,93
4900	38	50	6,5	1,37	8,97
4900	45	50	4,8	1,6	7,71
4900	52	50	1,4	1,37	1,89
4900	60	50	1,1	1,15	1,31
4900	68	50	0,7	0,69	0,47
4900	75	50	0,5	0,46	0,21

5 Literatur

Jürgen Schmid - Photovoltaik : Strom aus der Sonne
 Lindner – Physik für Ingenieure
 Hagmann – Grundlagen der Elektrotechnik
<http://www.solarcontact.de/>