



PROTOKOLL SEKUNDARSTUFE I

Modul: Photovoltaik

Versuch: Solarzelle

I. AUFGABENSTELLUNG

- Für ein Photovoltaik-Modul ist die Beleuchtungsstärke E in Abhängigkeit vom Abstand x einer Glühlampe zu bestimmen und grafisch darzustellen.
- Bei verschiedenen Beleuchtungsstärken E sind die Leerlaufspannung U_{OC} und der Kurzschlussstrom I_{SC} einer Solarzelle zu messen und die elektrische Leistung $P = U_{OC} \times I_{SC}$ zu berechnen. Die Funktion $P = f(E)$ ist grafisch darzustellen.
- Für verschiedene Einfallswinkel α des Lichts sind U_{OC} und I_{SC} einer Solarzelle zu messen, P zu berechnen und als Funktion von α und $\cos \alpha$ grafisch darzustellen.
- Für Reihen- und Parallelschaltungen aus 2, 3 und 4 Solarzellen sowie für eine einzelne Solarzelle sind jeweils U_{OC} und I_{SC} zu messen.
- Schrittweise zunehmend sind $1/4$; $2/4$; $3/4$ und $4/4$ der Fläche eines Photovoltaik-Moduls abzudecken (abzuschatten) – einmal in horizontaler und einmal in vertikaler Richtung. Dabei ist der Abdeckungsgrad zu registrieren, nachdem ein mit dem Photovoltaik-Modul verbundener Motor stehen bleibt.

1

II. VERSUCHSPLANUNG

Zu Aufgabe a)

Die Intensität D (in Watt/m^2) der Sonnenstrahlung nimmt bekanntlich mit zunehmender Entfernung r zwischen Sonne und Erde ab. Betrachtet man die Sonne aus großer Entfernung r als punktförmige Lichtquelle, die nach allen Seiten hin gleich stark strahlt, so ist die Intensität D auf einer Kugeloberfläche $A_K (= 4 \pi r^2)$, auf deren Oberfläche der Beobachter und in deren Mittelpunkt die Sonne steht, mit der Gleichung $D = P_S / A_K = P_S / 4 \pi r^2$ berechenbar. P_S ist die Gesamtleistung der Sonnenstrahlung. Die Intensität der Sonnenstrahlung nimmt demnach für große Abstände zur Sonne mit dem Quadrat der Entfernung $D \sim 1/r^2$ ab. Die Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes wird geprüft, indem man zunächst die Beleuchtungsstärke E ($E \sim D \times \cos \alpha$) mittels eines Luxmeters an der Oberfläche eines Photovoltaik-Moduls für verschiedene Abstände x einer Glühlampe misst, die verschiebbar auf einer optischen Bank senkrecht zur Moduloberfläche

(Licht-Einfallswinkel $\alpha \approx 0^\circ$, $\cos \alpha \approx 1$, s. Abbildung) angeordnet ist, und anschließend E in Abhängigkeit von x grafisch darstellt.

Die beiden Voraussetzungen

- senkrechter Lichteinfall
- die Lichtquelle ist ein Punktstrahler

werden näherungsweise erfüllt, indem man einen Mindestabstand x zwischen Solarmodul und Glühlampe von ca. 0,60 m wählt, der mehrfach größer ist als die Breite einer Solarzelle und die Länge des Glühfadens.



Ergibt sich für die Funktion $E = f(x)$ eine gekrümmt abfallende Kurve, wird bestätigt, dass die Beleuchtungsstärke E nicht umgekehrt proportional zum Abstand x ($E \neq c \cdot 1/x$) der Lichtquelle abnimmt. Ergibt sich für die Funktion $E = f(1/x^2)$ eine Gerade, wird die Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes auch für diese Versuchsanordnung bestätigt.

Zu Aufgabe b)

In Solarzellen wird das Sonnenlicht unter Ausnutzung des physikalischen Photoeffekts in Strom umgewandelt. Daher ist eine proportionale Zunahme des Kurzschlussstroms I_{SC} (Photostroms) mit steigender Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke E zu erwarten. Mit der Annahme, dass sich die Leerlaufspannung U_{OC} einer Solarzelle nur wenig mit der Beleuchtungsstärke E ändert, ist auch eine annähernd proportionale Zunahme der elektrischen Leistung $P = U_{OC} \times I_{SC}$ mit wachsender Beleuchtungsstärke E zu erwarten. (Anmerkung: die praktisch erreichbare maximale Leistung einer Solarzelle P_{MPP} ist um den sog. Füllfaktor FF kleiner als P . Es gilt: $P_{MPP} = FF \times P$ mit $FF \approx 0,7 \dots 0,85$).

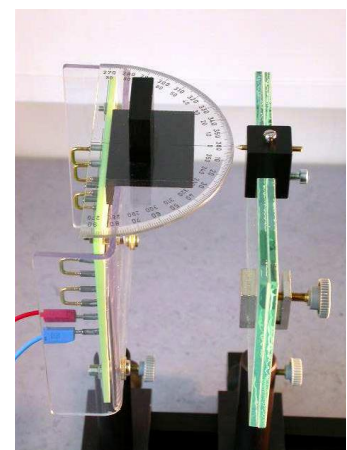


Der Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung $P = U_{OC} \cdot I_{SC}$ und der Beleuchtungsstärke E wird geprüft, indem man die Leerlaufspannung U_{OC} und den Kurzschlussstrom I_{SC} einer Solarzelle für unterschiedliche Beleuchtungsstärken E misst, die elektrische Leistung mit $P = U_{OC} \cdot I_{SC}$ berechnet und die Funktion $P = f(E)$ grafisch dargestellt. Die Beleuchtungsstärke E wird mit dem Glühlampenabstand x verändert. Der Zusammenhang zwischen E und x ist mit der Funktion $E = f(x)$ gegeben, die in Aufgabe a) ermittelt wurde.

Ergibt sich für die Funktion $P = f(E)$ eine Gerade, wird die Proportionalität zwischen der Leistung P und der Beleuchtungsstärke E bestätigt. Verändert sich die Leerlaufspannung U_{OC} nur wenig mit der Beleuchtungsstärke E , ist die Änderung der Leistung P in erster Linie mit der Änderung des

Photostroms verbunden.

Zu Aufgabe c) Die Bestrahlungsstärke E (in Watt/m^2) ist das Produkt aus der Strahlungs-Intensität D (in Watt/m^2) und dem Kosinus des Winkels α zwischen der Strahlungsrichtung und der Normalen der Solarzellen-Fläche: $E = D \cdot \cos \alpha$. Mit der Annahme, dass sich die elektrische Leistung $P = U_{OC} \cdot I_{SC}$ (U_{OC} -Leerlaufspannung, I_{SC} - Kurzschlussstrom der Solarzelle) proportional zur Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke E ($P \sim E = D \times \cos \alpha$) verhält, ist auch eine



Änderung von P proportional zu $\cos \alpha$ zu erwarten, wenn D konstant bleibt. Der Zusammenhang zwischen P und $\cos \alpha$ wird geprüft, indem man die Leerlaufspannung U_{OC} und den Kurzschlussstrom I_{SC} einer Solarzelle für verschiedene Winkel α zwischen Solarzelle und Glühlampe bei konstantem Abstand misst, die Leistung mit $P = U_{OC} \cdot I_{SC}$ berechnet und die Funktionen $P / P_{max} = f(\alpha)$ und $P / P_{max} = f(\cos \alpha)$ grafisch dargestellt. Ergibt sich für $P / P_{max} = f(\alpha)$ eine Kurve, deren Form einer Kosinusfunktion gleicht und für $P / P_{max} = f(\cos \alpha)$ eine Gerade, wird bestätigt, dass sich P - ebenso wie E - proportional zu $\cos \alpha$ verhält.

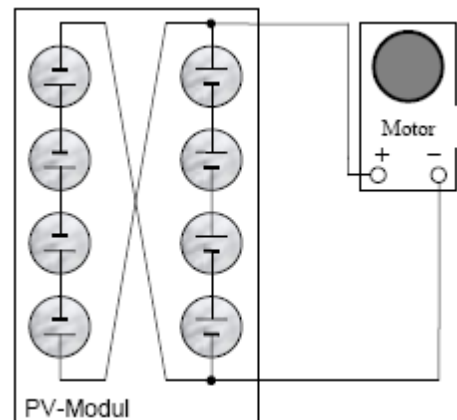
Zu Aufgabe d)

Werden mehrere Solarzellen gleicher Bauart mit der gleichen Bestrahlungsstärke bestrahlt, haben alle Solarzellen denselben Innenwiderstand R_i , dieselbe Leerlaufspannung U_{OC} und denselben Kurzschlussstrom I_{SC} . Demzufolge ist für miteinander verschaltete Solarzellen das gleiche $U_{OC} - I_{SC}$ - Verhalten zu erwarten wie für miteinander verschaltete beliebige Spannungsquellen, nämlich eine Addition ihrer Teilspannungen bei einer Reihenschaltung und eine Addition ihrer Teilströme bei einer Parallelschaltung von Spannungsquellen. Dieser Sachverhalt wird entsprechend der Aufgabenstellung geprüft.

Zu Aufgabe e)

In Solarfeldern sind im Allgemeinen die einzelnen Solarzellen sowohl parallel als auch in Reihe geschaltet, um am Ausgang die gewünschten Strom- und Spannungswerte zu erhalten. Nach dem Abschatten einer Solarzelle wächst ihr Innenwiderstand, der den Stromfluss in ihr behindert. Damit sinkt der Strom in allen Solarzellen, die mit der abgeschatteten Solarzelle in einer Reihe verbunden sind und ebenso die Abgabeleistung der in dieser Reihe liegenden Solarzellen. Demnach ist zu erwarten, dass die Abgabeleistung eines Solarfeldes nicht allein vom Abschattungsgrad ihrer Fläche abhängt, sondern zusätzlich von der Anzahl der Strings (in Reihe liegende Module), die zumindest teilweise in der abgeschatteten Fläche eines Solarfeldes liegen. Dieser Sachverhalt wird entsprechend der Aufgabenstellung mit einem Photovoltaik-Modul geprüft, dessen Solarzellen gemäß dem nebenstehenden Schaltplan miteinander verbunden sind.

Ergeben sich gleiche Abgabeleistungen für verschiedene Abschattungsgrade der Modulfläche in horizontaler und vertikaler Richtung, wird bestätigt, dass die Abgabeleistung von Solarzellen, die parallel und in Reihe verschaltet sind, nicht nur von ihrem Abschattungsgrad sondern auch von ihrer Lage zur Bewegungsrichtung des Schattens abhängt.



III. DURCHFÜHRUNG und AUSWERTUNG

Versuchszubehör (Kontrolle):

- optische Bank mit Reflektorglühlampe, Photovoltaik-Modul (aus 8 Solarzellen bestehend mit Winkelmesseinrichtung) und Hitzeschild aus Glas
- Labornetzgerät XT7-6, Luxmeter LX-1108, Digitalmultimeter VC160
- Solarmotor, 14 Kabel incl. 2 Reduzierstecker, 7 Steckbrücken, Abdeckplatte.

Zu Aufgabe a)

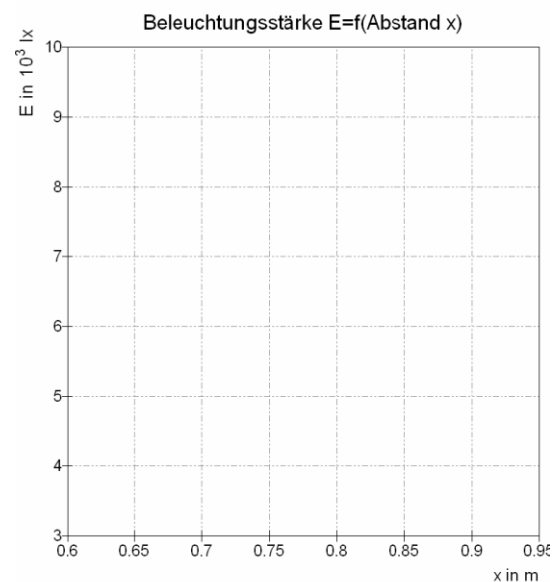
Messbedingungen:

- Photovoltaik-Modul auf der 0,02m-Marke, Wärmeschutzscheibe auf der 0,10m- Marke und Glühlampe auf der 0,60m-Marke der optischen Bank angeordnet.
- Lichtsensor des Luxmeters unmittelbar vor dem PV-Modul zentral befestigt (Kette des Sensors am Haken der Winkelmesseinrichtung einhängt).
- Hinweis: Range-Taster des Luxmeters mehrfach drücken, bis Werte im Display erscheinen. Den im Display angezeigten Faktor berücksichtigen.

Messungen:

- Messung der Beleuchtungsstärken E (in 10^3 lx) für verschiedene Abstände zwischen Glühlampe und PV-Modul im Bereich von 0,60m bis 0,95m mit einer Schrittweite von 0,05m. Folgende Werte wurden ermittelt:

Abstand x/m	Bel.-Stärke $E/10^3$ lx
0,60	
0,65	
0,70	
0,75	
0,80	
0,85	
0,90	
0,95	



4

Auswertung:

- Öffnen der Software „ReGraPhys“ und Laden der Datei „ $E=f(x)$ “, die eine Diagramm-Vorlage entsprechend dem oben rechts stehenden Muster enthält. Übernahme der Messwerte für E in die 1 y -Spalte von „ReGraPhys“. Grafische Darstellung der Messwerte (Plot-Taster drücken) und Ausdruck des Diagramms.
- Transformation der x-Werte in „ReGraPhys“ mit $1/x$ und $1/x^2$ ($1/x$ bzw. $1/x^2$ in der ersten Zeile ausgewählt) und Beurteilung der Kurvenform. Ergebnis ankreuzen:

- $E = f(x)$ ist die beste Gerade
- $E = f(1/x)$ ist die beste Gerade
- $E = f(1/x^2)$ ist die beste Gerade

Zu Aufgabe b)

Messbedingungen:

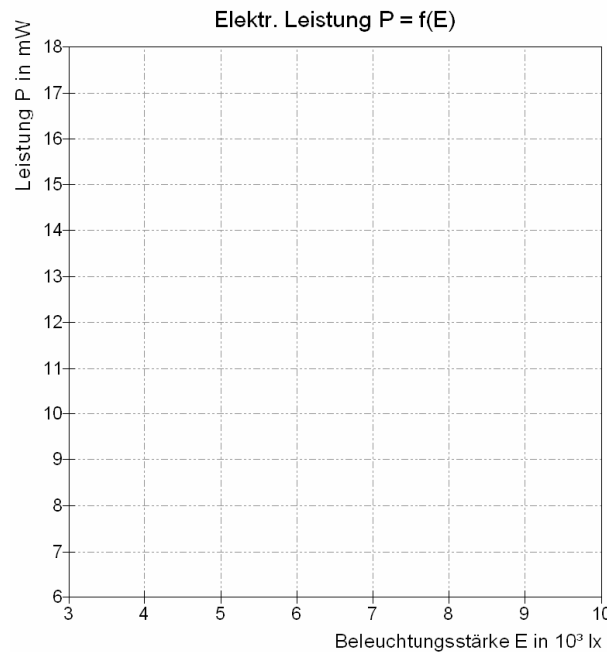
- Luxmeter entfernt und Digitalmultimeter VC160 mit einer Solarzelle verbunden („+“ an V/mA-Buchse, „-“ an COM-Buchse, Reduzierstecker verwendet)
- Glühlampe auf der 0,60m-Marke der optischen Bank positioniert.

Messungen:

- Messung der Leerlaufspannung U_{OC} und des Kurzschlussstromes I_{SC} (Messbereichsschalter des DMM von V auf mA) für verschiedene Abstände zwischen Glühlampe und PV-Modul im Bereich von 0,60m bis 0,95m mit einer Schrittweite von 0,05m.

Folgende Werte wurden ermittelt:

x/m	$E/10^3 \text{ lx}$	U_{OC} / V	I_{SC} / mA
0,60			
0,65			
0,70			
0,75			
0,80			
0,85			
0,90			
0,95			



5

- Die zu den x -Werten gehörigen E Werte wurden aus der Tabelle von Aufgabe a) übertragen.

Auswertung:

- Öffnen der Software „ReGraPhys“ und Laden der Datei „ $P = f(E)$ “, die eine Diagramm-Vorlage entsprechend dem oben rechts stehenden Muster enthält. Übernahme der Messwerte für E , U_{OC} und I_{SC} in die x -, 1 y - und 2 y -Spalten von „ReGraPhys“ (die elektr. Leistung $P = U_{OC} \cdot I_{SC}$ wird automatisch in der 3 y -Spalte berechnet). Grafische Darstellung der P - E -Wertepaare inkl. Regressionsgerade (Plot- und Reg3-Taster betätigt) und Ausdruck des Diagramms.
- Beurteilung der Kurvenform von $P = f(E)$. Ergebnis (ankreuzen):
 - $P = f(E)$ ist eine ansteigende Gerade
 - $P = f(E)$ ist eine abfallende Gerade
 - $P = f(E)$ ist nicht annähernd eine Gerade

- Beurteilung der Änderungen von U_{OC} in Abhängigkeit von E (s. Tabellenwerte).

Ergebnis:

- U_{OC} verändert sich überhaupt nicht mit E .
- U_{OC} ändert sich deutlich stärker als I_{SC} .
- U_{OC} ändert sich deutlich weniger als I_{SC} .

Zu Aufgabe c)

Messbedingungen:

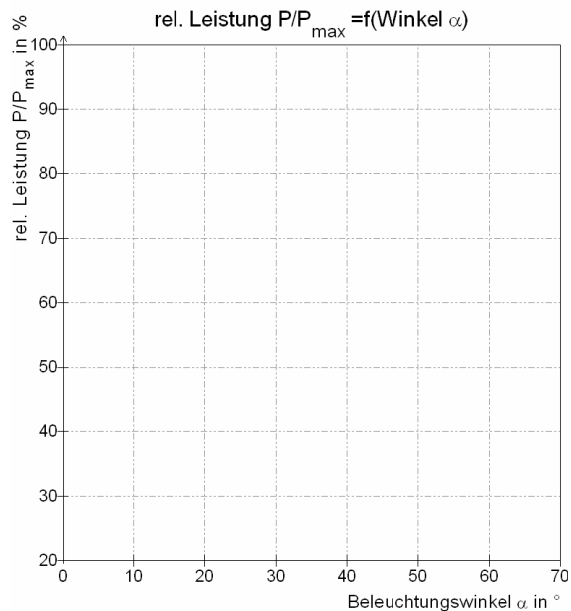
- Digitalmultimeter VC160 bleibt mit der Solarzelle verbunden.
- Glühlampe auf der 0,90m-Marke der optischen Bank positioniert.

Messungen:

- Messung der Leerlaufspannung U_{OC} und des Kurzschlussstromes I_{SC} für verschiedene Winkel α zwischen Glühlampe und PV-Modul im Bereich von 0° bis 70° mit einer Schrittweite von 10° .

Folgende Werte wurden ermittelt:

$\alpha / ^\circ$	U_{OC} / V	I_{SC} / mA
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		



6

Auswertung:

- Laden der „ReGraPhys“-Datei „P= f(alpha)“. Übernahme der U_{OC} - I_{SC} -Messwerte in die 1 y - und 2 y -Spalten von „ReGraPhys“. Die rel. elektr. Leistung $P / P_{max} = U_{OC} \cdot I_{SC} / P_{max} \cdot 100\%$ wird automatisch in der 3 y -Spalte mit der Formel $y_3 = y_1 \times y_2 / 7 \cdot 100$ ($P_{max,alt} = 7mW$) berechnet. Neuberechnung von P_{max} ($P_{max,neu} = U_{OC,0^\circ} \cdot I_{SC,0^\circ}$; U - I -Werte bei $\alpha = 0^\circ$) mit einem Taschenrechner. Ersetzen von $P_{max,alt} = 7mW$ durch $P_{max,neu}$. Grafische Darstellung (Plot-Taster) und Ausdruck der P_{max} / P -a -Wertepaare.

- Beurteilung der Kurvenform von $\max P / P = f(\alpha)$. Ergebnis (ankreuzen):

- $P / P_{max} = f(\alpha)$ gleicht einer Kosinus-Funktion
- $P / P_{max} = f(\alpha)$ gleicht einer Sinus-Funktion
- $P / P_{max} = f(\alpha)$ gleicht keiner cos- oder sin-Funktion

- Transformation der x-Werte (= α -Werte) in „ReGraPhys“ mit $\cos x$ (Auswahl in erster Tabellenzeile) und Beurteilung der Kurvenform. Ergebnis (ankreuzen):

- $P / P_{max} = f(\cos \alpha)$ ist eine Gerade
- $P / P_{max} = f(\cos \alpha)$ ist nicht annähernd eine Gerade

Zu Aufgabe d)

Messbedingungen:

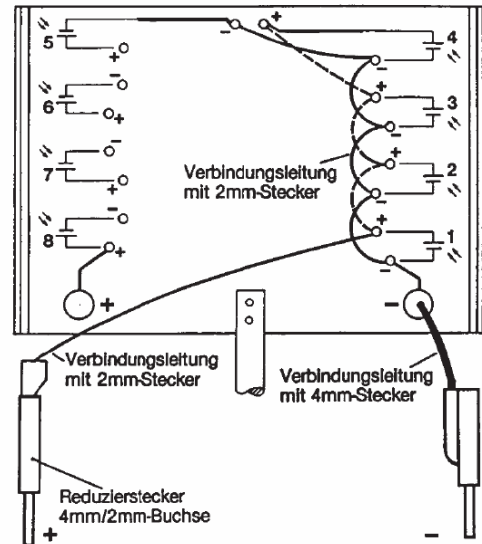
- Glühlampe bleibt auf der 0,90m-Marke der optischen Bank positioniert.
- Das PV-Modul ist senkrecht ($\alpha = 0^\circ$) zur Glühlampe ausgerichtet.
- Reihenschaltung der Solarzellen mit Kurzschlusssteckern. Parallelschaltung der Solarzellen mit Verbindungsleitungen.

Messungen:

- Für die folgenden Schaltungen
 - Reihenschaltung aus 2 Solarzellen
 - Reihenschaltung aus 3 Solarzellen
 - Reihenschaltung aus 4 Solarzellen
 - Parallelschaltung aus 2 Solarzellen
 - Parallelschaltung aus 3 Solarzellen
 - Parallelschaltung aus 4 Solarzellen
 - Einzelne Solarzelle

wurden jeweils U_{oc} und I_{sc} gemessen.

In der nebenstehenden Skizze ist als Beispiel eine Parallelschaltung aus 4 Solarzellen schematisch dargestellt (Kreise sind Buchsen auf der Rückseite des PV-Moduls).



Folgende Werte wurden gemessen (U_{oc} - und I_{sc} -Werte für die einzelne Solarzelle sowohl unter Reihen- als auch Parallelschaltung eingetragen):

7

Zellen	Reihenschaltung		Parallelschaltung	
	U_{oc} / V	I_{sc} / mA	U_{oc} / V	I_{sc} / mA
1				
2				
3				
4				

Auswertung:

- Beobachtungsergebnisse bzgl. der U_{oc} - I_{sc} -Werte bei Reihenschaltung von Solarzellen:

- Der U_{oc} -Wert ist ein Vielfaches der Zellenzahl
- Der I_{sc} -Wert ist ein Vielfaches der Zellenzahl
- Die U_{oc} - I_{sc} -Werte sind Vielfache der Zellenzahl

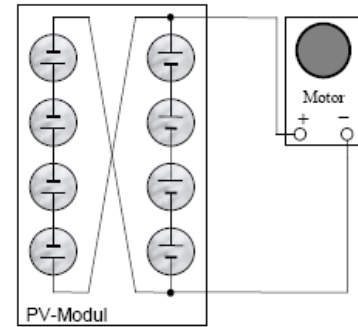
- Beobachtungsergebnisse bzgl. der U_{oc} - I_{sc} -Werte bei Parallelschaltung von Solarzellen:

- Der U_{oc} -Wert ist ein Vielfaches der Zellenzahl
- Der I_{sc} -Wert ist ein Vielfaches der Zellenzahl
- Die U_{oc} - I_{sc} -Werte sind Vielfache der Zellenzahl

Zu Aufgabe e)

Messbedingungen:

- Glühlampe bleibt auf der 0,90m-Marke der optischen Bank positioniert.
- Verschaltung der Solarzellen eines PV Moduls entsprechend der nebenstehenden Skizze (2 Reihenschaltungen aus je 4 Solarzellen mittels Kurzschlusssteckern = 2 Strings und Parallelschaltung der Strings mittels Kabelverbindungen zu einem Solarmotor);



Messungen:

- PV-Modul schrittweise zunehmend abgedeckt – einmal durch horizontale und einmal durch vertikale Verschiebung der lichtdichten Platte. Die Schrittweite beträgt $\frac{1}{4}$ der Modulfläche. Dabei wurde beobachtet, bei welchem Abdeckungsgrad die Motorachse stehen bleibt.
- Ergebnis ($\frac{1}{4}$; $\frac{2}{4}$; $\frac{3}{4}$ oder $\frac{4}{4}$ eintragen):

	Vertikale Verschiebung	Horizontale Verschiebung
Abdeckungsgrad bei Stillstand		

Auswertung (ankreuzen):

- Der Abdeckungsgrad war in horizontaler und vertikaler Richtung gleich.
- Der Abdeckungsgrad war in horizontaler und vertikaler Richtung verschieden
- horizontal kleiner als vertikal
- horizontal größer als vertikal

8

IV. ZUSAMMENSTELLUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Nicht zutreffende Worte streichen!

- Die Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes $E = f(1/x^2)$ wurde/wurde nicht bestätigt.
- Die elektrische Abgabeleistung P einer Solarzelle ist nicht proportional zur Bestrahlungsstärke E , weil die/der Leerlaufspannung/Kurzschlussstrom einer Solarzelle nicht proportional zur Bestrahlungsstärke E ist.
- Die elektr. Abgabeleistung P einer Solarzelle ist nicht proportional zum Kosinus des Winkels α zwischen ihrer Flächennormalen und der Lichteinfallrichtung, weil die Projektionsfläche des Lichts mit zunehmender Neigung der Solarzelle gegenüber der senkrechten Lichteinfallrichtung kleiner/größer wird.
- Bei einer Reihenschaltung aus gleichartigen Solarzellen addieren sich ihre Teilspannungen/ Teilströme. Bei einer Parallelschaltung aus gleichartigen Solarzellen addieren sich ihre Teilspannungen/ Teilströme.
- Die Abgabeleistung eines teilverschatteten Solarfeldes, das aus in Reihe und parallel verschalteten Solarzellen besteht, ist nicht vom Grad der verschatteten Fläche und nicht von der Verschattungsrichtung abhängig, weil durch Solarzellen, die mit einer verdunkelten Solarzelle in Reihe liegen, ein/kein Strom fließt.