

TU Bergakademie Freiberg - Institut für Werkstofftechnik
Schülerlabor
„science meets school“ - Werkstoffe und Technologien in Freiberg



GRUNDLAGEN ausgearbeitet von Dr. Hartmut Bergelt

Modul: Photovoltaik

Versuch: Solarzelle

I. AUFGABEN

SEKUNDARSTUFE I

- 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

SEKUNDARSTUFE II

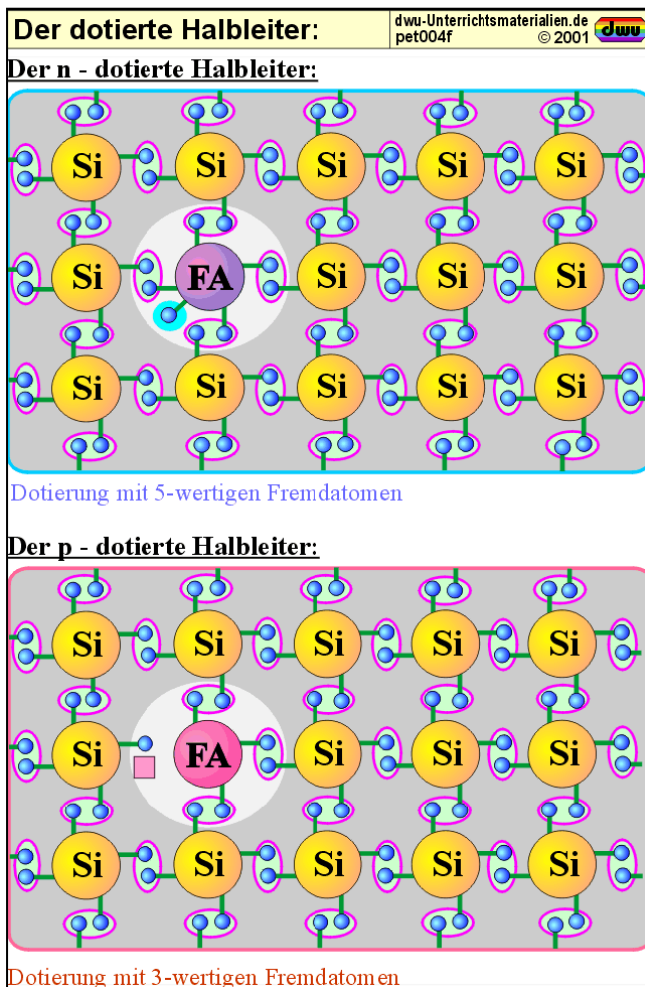
- Für ein Photovoltaik-Modul ist die Beleuchtungsstärke E in Abhängigkeit vom Abstand x einer Glühlampe zu bestimmen und grafisch darzustellen.
- Die I - U -Kennlinien eines Photovoltaik-Moduls sind zwischen 0V und 4,2V für zwei Beleuchtungsstärken E und für den unbeleuchteten Fall aufzunehmen.
- Die Leistungsentnahme einer Solarzelle ist in Abhängigkeit vom äußeren Lastwiderstand R_a für zwei Beleuchtungsstärken E zu ermitteln und grafisch darzustellen.

II. GRUNDLAGEN

Die Energieerzeugung durch regenerative Energieträger gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dabei steht die Energieumwandlung der Sonnenstrahlung, sowohl die solar-thermische (Heißwasserbereitung) als auch die photovoltaische (Elektroenergie-Erzeugung), im Vordergrund. Speziell der Photovoltaikmarkt ist in den letzten Jahren stark gewachsen. Unter Photovoltaik versteht man die direkte Umwandlung des Sonnenlichts in elektrischen Strom unter Ausnutzung des physikalischen Photoeffektes mithilfe von Solarzellen.

i. AUFBAU UND FUNKTION EINER SOLARZELLE

Der Aufbau einer Solarzelle gleicht weitgehend dem einer Diode. Deshalb verhält sich eine lichtdicht abgedeckte Solarzelle auch wie eine Diode. Die beleuchtete Solarzelle andererseits wirkt selbst wie eine Stromquelle, die Gleichstrom abgibt. Somit ist die Solarzelle Diode und Stromquelle zugleich, genauer gesagt eine Diode, deren Bauform so ausgelegt ist, dass Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

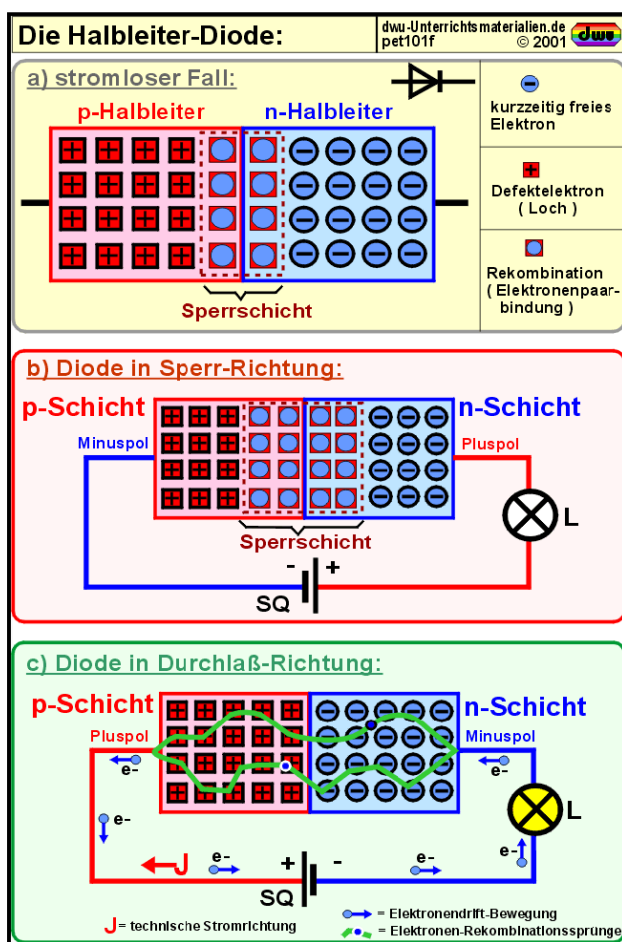


Eine Diode besteht aus Halbleiter-Materialien (z.B. 4-wertiges Silizium), die wie der Name schon sagt, halb leitend sind. Ihre elektrische Leitfähigkeit ist besser als die von Isolatoren, wie Keramik, aber schlechter als die von typischen Leitern, wie Kupfer. Durch das Einbringen von Fremdatomen (FA) in einen Halbleiterkristall, das so genannte Dotieren, kann man die Leitfähigkeit von Halbleitern erhöhen. Dabei werden durch die Fremdatome auch zusätzliche Ladungsträger in das dotierte Material eingebracht. Diese, die Leitfähigkeit steigernden Ladungsträger, können negative als auch positive Ladungsträger sein, je nachdem, mit welchem Material man dotiert. Halbleiter, die so dotiert wurden, dass die zusätzlichen Ladungsträger negativ geladen sind, heißen n-dotierte Halbleiter, die welche so dotiert wurden, dass positive Ladungsträger zusätzlich dazu kamen, nennt man p-dotierte Halbleiter. Die n-Dotierung des Halbleiters wird durch Einbau 5-wertiger Fremdatome

(Donator-Atome z.B. Phosphor) in das reine Halbleitergitter erreicht. Die dadurch entstehenden Störstellen sorgen im Zusammenhang mit den Wärmeschwingungen des Gitters für mehr im Gitter frei bewegliche Elektronen (negativ geladen) und verringern somit den elektrischen Widerstand des Halbleiters. Die p-Dotierung des Halbleiters wird durch den

Einbau 3-wertiger Fremdatome (Akzeptor-Atome z.B. Aluminium) erreicht. Die dadurch entstehenden Störstellen sorgen im Zusammenhang mit den Wärmeschwingungen des Gitters für mehr positive frei bewegliche Ladungsträger = Defektelektronen / Löcher, was ebenfalls den elektrischen Widerstand des Halbleiters verringert. Die Dotierung erfolgt im Verhältnis von ca. 1 Fremdatom: 1 Million Halbleiteratome.

Bringt man einen p- und einen n-dotierten Halbleiter in Kontakt, hat man einen p/n-Übergang. In diesem Grenzgebiet treten die frei beweglichen negativen und positiven Ladungsträger in das jeweils andere Gebiet über. Dabei verlassen die freien Ladungsträger die ursprünglich zu ihnen gehörigen Atome, die fest im Kristallgitter verankert und somit nicht „reisefähig“ sind. Die zurückbleibenden Atomrümpfe verlieren daraufhin ihre Neutralität und nehmen eine Ladung mit entgegengesetzter Polarität zu den verlassenden Ladungsträgern an.



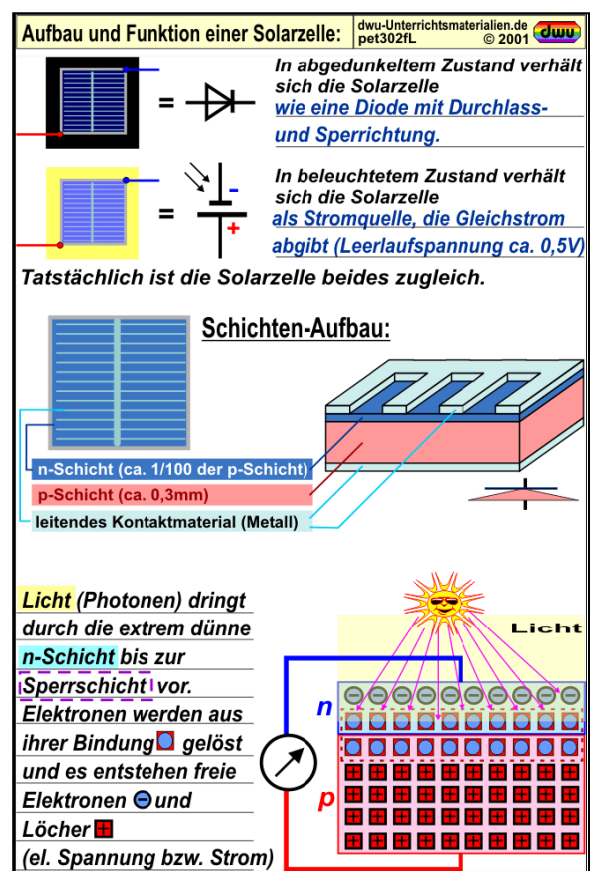
In der nebenstehenden Abbildung sind nur die frei beweglichen Ladungsträger und nicht die entgegengesetzt zu diesen geladenen Atomrümpfe dargestellt. Je mehr freie Ladungsträger in das jeweils andere Gebiet übertreten desto mehr geladene Atomrümpfe verbleiben im ehemaligen Herkunftsgebiet der freien Ladungsträger zurück. Aufgrund der gegensätzlichen Ladungen der sich auf beiden Seiten des Grenzgebiets gegenüber stehenden Atomrümpfe entsteht zwischen ihnen eine innere (sozusagen in die Diode eingebaute) Spannung, die mit zunehmender Abwanderung der freien Ladungsträger immer größer wird. Mit dieser inneren Spannung ist ein elektrisches Feld verbunden, das auf die freien Ladungsträger eine entgegengesetzt zu ihrem Abwanderungs-Antrieb (Diffusion) gerichtete rücktreibende Kraft ausübt. Weil mit der zunehmenden Abwanderung der freien Ladungsträger auch die Gegenkraft, die ihre Abwanderung verhindert, immer mehr

anwächst, wird sich schließlich zwischen dem Abwanderungs-Antrieb und dieser Gegenkraft ein Gleichgewicht (bei einer inneren Spannung von ca. 0,6-0,7 Volt) einstellen, das eine weitere Zunahme der Abwanderung und damit eine sich über den gesamten Diodenraum erstreckende Vermischung der freien Ladungsträger verhindert - im Gegensatz zu zwei sich berührenden Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Farbe und beiderseits „reisefähigen“ Atomen, die nach einiger Zeit eine über das gesamte Volumen hinweg gemeinsame Mischfarbe annehmen (ohne umrühren zu müssen).

Was passiert nun weiter mit den abwandernden Ladungsträgern? Diese treffen sich im Grenzgebiet und bilden aufgrund ihrer gegensätzlichen Ladung sehr schnell neutrale Gemeinschaften (man sagt dazu: sie rekombinieren). Im Grenzgebiet (Sperrschicht) gibt es

demzufolge nur wenige freie Ladungsträger. Deshalb ist die elektrische Leitfähigkeit in der Sperrschicht und damit auch für die gesamte Diode sehr klein bzw. der Widerstand sehr groß. Legt man an die Diode eine äußere Spannung in Sperr-Richtung (s. Abb.), so werden die in der Umgebung der Sperrschicht und auch die wenigen in der Sperrschicht vorhandenen negativen Ladungsträger vom Pluspol bzw. die positiven Ladungsträger vom Minuspol abgesaugt. Die Sperrschicht wird breiter und ihre Leitfähigkeit und die der Diode noch kleiner. Daraus ergibt sich die Bezeichnung „Sperr-Richtung“. Legt man aber eine äußere Spannung in Durchlass-Richtung an die Diode (s. Abb.) so treibt der Minuspol die negativen Ladungsträger und der Pluspol die positiven Ladungsträger in die Sperrschicht hinein. Übersteigt die äußere Spannung die innere Gleichgewichtsspannung von 0,6-0,7 Volt, so wird die Sperrschicht mit Ladungsträgern überflutet. Die ehemalige Sperrschicht wird sehr gut leitfähig und ihrem Namen nicht mehr gerecht, sie verschwindet.

Das Besondere einer Solarzelle im Vergleich mit einer Diode ist (s. Abb., Schichtenaufbau), dass die der Sonne zugewandte n- Schicht extrem dünn angefertigt ist, damit Licht (die Photonen) bis zur Sperrschicht im p/n-Grenzbereich vordringen kann. Dann kann ein eingestrahktes Photon bei Atomen in der Zone des p/n-Gebiets Elektronen aus der Hülle schlagen (Photoeffekt) und aus ehemals neutralen Gemeinschaften (s. Diode) geladene Elektronen-Loch-Paare erzeugen. Das entstehende Elektron wird dann durch die eingebaute Spannung in den n-dotierten Bereich gezogen. Das passiert mit vielen dieser Elektronen, die sich so in der n-dotierten Schicht stauen. Diese Elektronen-Ansammlung erzeugt die so genannte Photospannung, die am gesamten Halbleiter anliegt und somit als Spannungsquelle dienen kann. Die Photospannung hat ohne Verbindung zwischen den Zellen-Anschlüssen einen Wert von ca. 0,5 V und heißt dann Leerlaufspannung U_{oc} , weil kein Strom fließt. Nach dem Herstellen einer leitfähigen äußeren Verbindung fließt dann solange Strom, wie Licht-Energie auf die Solarzelle fällt. Dabei werden ständig neue Elektronen im p/n-Übergang gebildet, die über die äußere Verbindungsleitung von der n-Schicht zur p-Schicht strömen, um erneut zu rekombinieren, also Elektron-Loch-Bindungen wieder herzustellen. Der größte mögliche Strom, der so genannte Kurzschlussstrom I_{sc} einer Solarzelle fließt dann, wenn man die Anschlüsse der Solarzelle ohne zusätzlichen Widerstand ($R = 0 \Omega$) direkt verbindet.



ii. DIE LEISTUNG EINER SOLARZELLE

i. Wirkungsgrad

Die wichtigste Kenngröße einer Solarzelle ist ihr Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad gibt den Anteil der Leistung an, den die Solarzelle vom einfallenden Licht in elektrischen Strom umwandelt. Als Formel sieht das so aus:

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{elektrische Leistung } P_{MPP}}{\text{Leistung des einfallenden Sonnenlichts } P}$$

(Die Größen P und P_{MPP} werden in den beiden folgenden Kapiteln behandelt)

Der Wirkungsgrad erreicht bei den industriell z.B. von der Deutschen Solar AG gefertigten Solarzellen 15 bis 17%. Mit hohem Aufwand können im Labor Wirkungsgrade von bis zu 25% mit Silizium erzielt werden.

ii. Leistung P des einfallenden Sonnenlichts

Dazu erst einmal zwei Begriffserklärungen. Unter Strahlungs-**Intensität** D (in Watt/m²) versteht man die Strahlungsenergie En (in Js), die in der Zeit t (in s) durch eine Fläche A_{\perp} (in m²) senkrecht hindurchgeht. Unter Berücksichtigung der Leistung $P = En / t$ (P in Watt) kann man D mit der folgenden Gleichung definieren

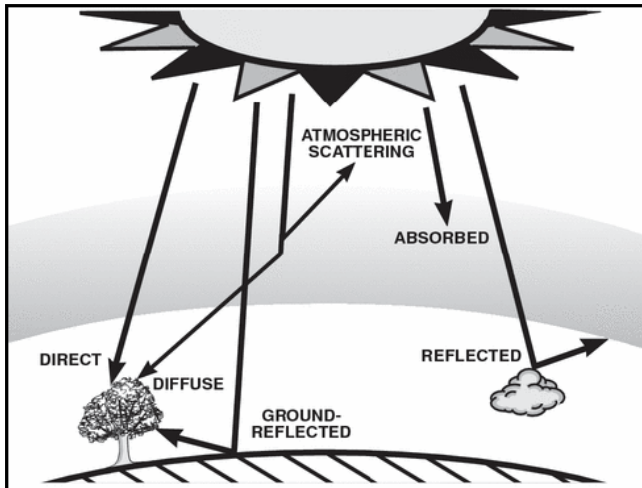
$$D = P/A_{\perp}. \quad (1)$$

Wird die Normale einer Empfangsfläche A um den Winkel α gegen die Strahlungsrichtung geneigt, so besteht zwischen den beiden Flächen A_{\perp} und A die Beziehung $A_{\perp} = A \cdot \cos \alpha$ (versuchen Sie $A_{\perp} = A \cdot \cos \alpha$ mittels einer Skizze herzuleiten). Setzt man $A_{\perp} = A \cdot \cos \alpha$ in die Gleichung (1) ein, erhält man die Formel $D = P / (A \cdot \cos \alpha)$ und nach einer Multiplikation mit $\cos \alpha$ die Formel $D \cdot \cos \alpha = P/A$. Das Produkt $D \cdot \cos \alpha$ ist die so genannte (richtungsabhängige) **Bestrahlungsstärke** E (in Watt/m²). Damit ergibt sich die Gleichung

$$P = E \cdot A. \quad (2)$$

Oder in Worten: Die Leistung P des auf eine Solarzelle einfallenden Sonnenlichts ist proportional zur Fläche A der Solarzelle und proportional zur (richtungsabhängigen) Bestrahlungsstärke E .

Nun zu einigen Phänomenen, die die Bestrahlungsstärke und somit die Leistung des einfallenden Sonnenlichts beeinflussen. Die Sonnenstrahlung, die eine Solarzelle erreicht, setzt sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammen. Diffuse Strahlung gelangt über Umwege durch Streuung und Reflexion an Atomen, Molekülen, Staubteilchen und Tröpfchen in der Atmosphäre zu uns.

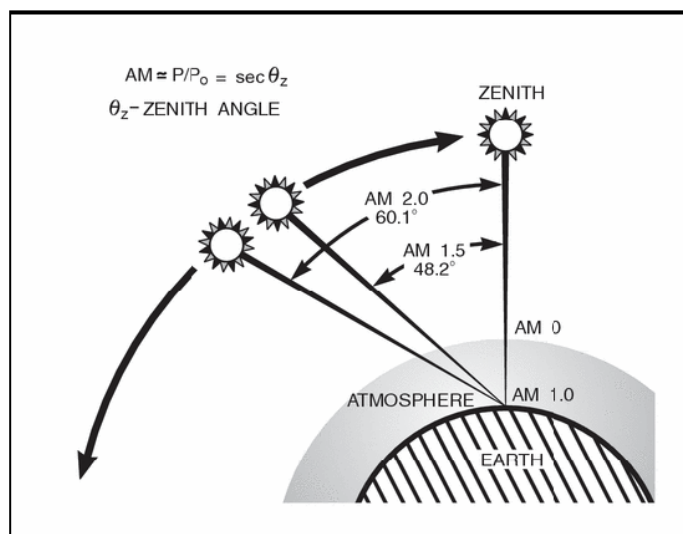


Beide Anteile ergeben die globale Bestrahlungsstärke. Auf ihrem direkten oder indirekten Weg durch die Atmosphäre werden die wellenlängenabhängigen Strahlungsanteile (Spektralanteile) unterschiedlich geschwächt (absorbiert). Bei einem hohen Anteil an Wasserdampf in der Luft werden z.B. besonders stark Spektralanteile mit ca. 900 nm und 1100 nm absorbiert. Somit verändern sich die Intensität, die Bestrahlungsstärke und die Spektralverteilung des Lichts mit der Zusammensetzung der Atmosphäre und dem in ihr

zurückgelegten Weg.

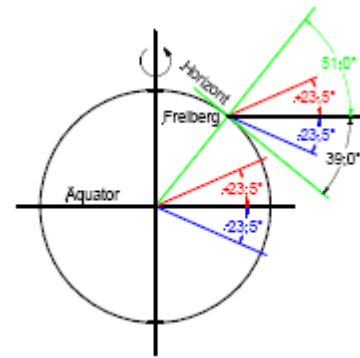
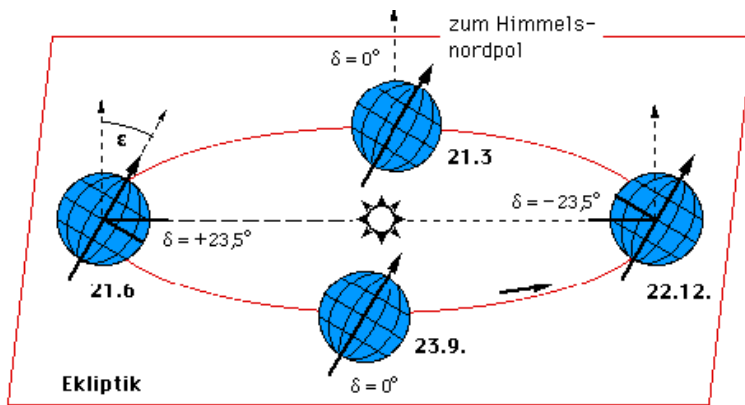
Das wichtigste Beispiel für solche Veränderungen sind Wolken, die einen Großteil der direkten Strahlung blockieren und somit die Bestrahlungsstärke beeinflussen. Während bei blauem Himmel ca. 1 kW/m² und bei Bewölkung nur 20-250 W/m² gemessen werden, beträgt die Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre bei einer mittleren Entfernung zur Sonne von 1 AU (Astronomische Einheit: 149597890 km) 1,36 kW/m².

Bedeutende Änderungen sind auch mit der Erdrotation verbunden. Damit ist eine tageszeitabhängige Änderung der Weglänge verbunden, die die Strahlung bis zum Boden zurücklegen muss. Daher kommt es im Tagesverlauf nicht nur zu den sichtbaren Veränderungen der Helligkeit, sondern auch zu einer Änderung des Spektrums aufgrund der weglängenabhängigen Absorption und Streuung des Lichts. Die Luftmasse AM (Air Mass) gibt einen Wert für den zurückgelegten Weg in relativen Einheiten bezogen auf den

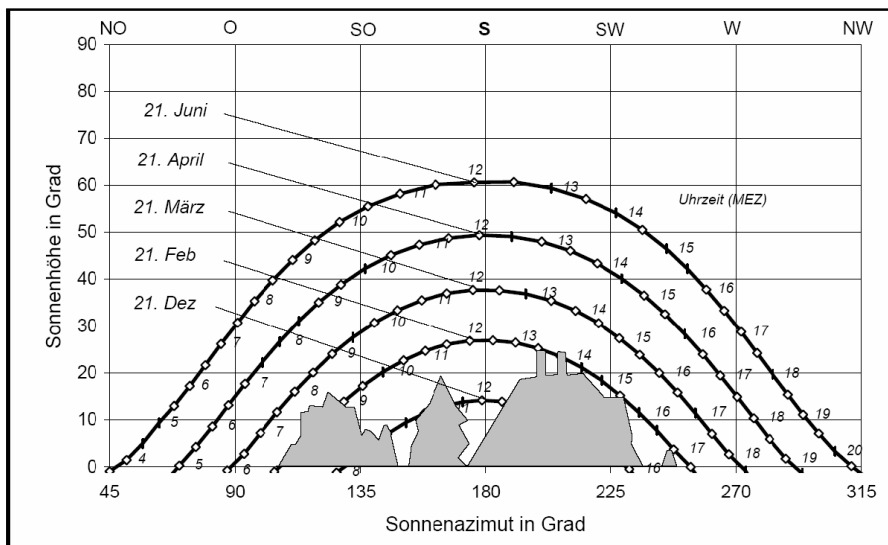


kürzesten Weg durch die Atmosphäre im Zenith der Sonne an. Unabhängig von der Wechselwirkung mit der Atmosphäre ändert sich die Leistung des einfallenden Sonnenlichts auch jahreszeitlich mit dem sich ändernden Abstand zur Sonne und der sich ändernden Sonnenhöhe zur Mittagszeit.

Dazu folgende Überlegungen. Während sich die Erde auf einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegt, bleibt die Rotationsachse der Erde raumfest um 23,5° zur Achse der Umlaufbahn geneigt.



Daraus ergibt sich für den Einfallswinkel der Sonnenstrahlung bezüglich des Äquators eine jahreszeitliche Änderung im Bereich von $-23,5$ bis $+23,5^\circ$. Freiberg hat eine in Winkelmaß angegebene Entfernung zum Äquator (Breitengrad) von 51° und somit einen zum Äquator um 39° ($=90^\circ - 51^\circ$) geneigten Horizont. Deshalb sieht man die Sonne mittags in Freiberg höchstens (am 21. Juni) unter einem Winkel von $62,5^\circ$ ($=39^\circ + 23,5^\circ$) und wenigstens (am 21. Dezember) unter einem Winkel von $15,5^\circ$ ($=39^\circ - 23,5^\circ$). Und deshalb kann man auch täglich verschiedene Sonnenbahnen beobachten. Ein paar davon sind unten abgebildet.



Vor der Errichtung einer Solarstromanlage wird die Schatten werfende Umgebung in solche Diagramme eingezeichnet und damit (neben anderen Größen) der voraussichtliche Jahresenergieertrag am geplanten Standort berechnet.

Nun, zurück zum Einfluss des Sonnenabstandes und der Mittags-Sonnenhöhe auf die Bestrahlungsstärke.

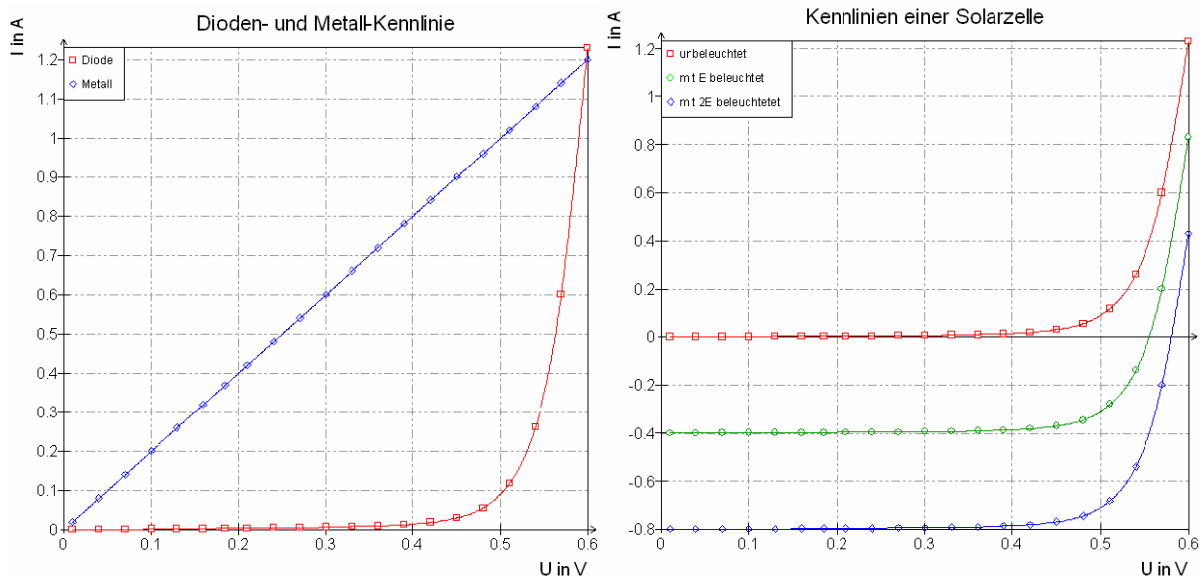
Während sich die Erde auf einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegt, ändert sich ihr Abstand zur Sonne. Der kleinste und der größte Abstand betragen 147,1 und 151,1 Millionen km. Entsprechend der Gleichung (1) ist die Lichtintensität D das Verhältnis aus empfangener Strahlungsleistung P zu senkrecht bestrahlter Fläche A . Betrachtet man die Sonne aus großer Entfernung als punktförmige Lichtquelle, die nach allen Seiten hin gleich stark strahlt, so kann man die Intensität D auf einer Kugeloberfläche $A_K = (4\pi r^2)$, in deren Mittelpunkt die Sonne steht, mit der nahezu konstanten Gesamtleistung der Sonnenstrahlung S_P berechnen. Unter diesen Bedingungen ergibt sich die Intensität aus der Formel $D = P_S/A_K = P_S/4\pi r^2$. Die Intensität D der Sonnenstrahlung nimmt demnach mit zunehmender Entfernung r von der Sonne ab, sie nimmt sogar quadratisch mit r ab. Das „quadratische Entfernungsgesetz“ gilt nicht nur für die Gesamtstrahlung, sondern für jeden Sonnenstrahl, der eine Solarzelle trifft.

Mit der sich im Verlauf des Jahres ändernden Entfernung zur Sonne ist eine Schwankung der Licht-Intensität von ca. 5 % verbunden.

Mit dem höchsten und niedrigsten Sonnenstand in Freiberg und der Gleichung $E = D \cdot \cos \alpha$ kann man berechnen, dass sich die Bestrahlungsstärke der direkten Strahlung aufgrund ihrer Richtungsabhängigkeit um mindestens 8 % im Jahresverlauf ändert (abgesehen vom veränderlichen Leistungsverlust auf dem Weg durch die Atmosphäre).

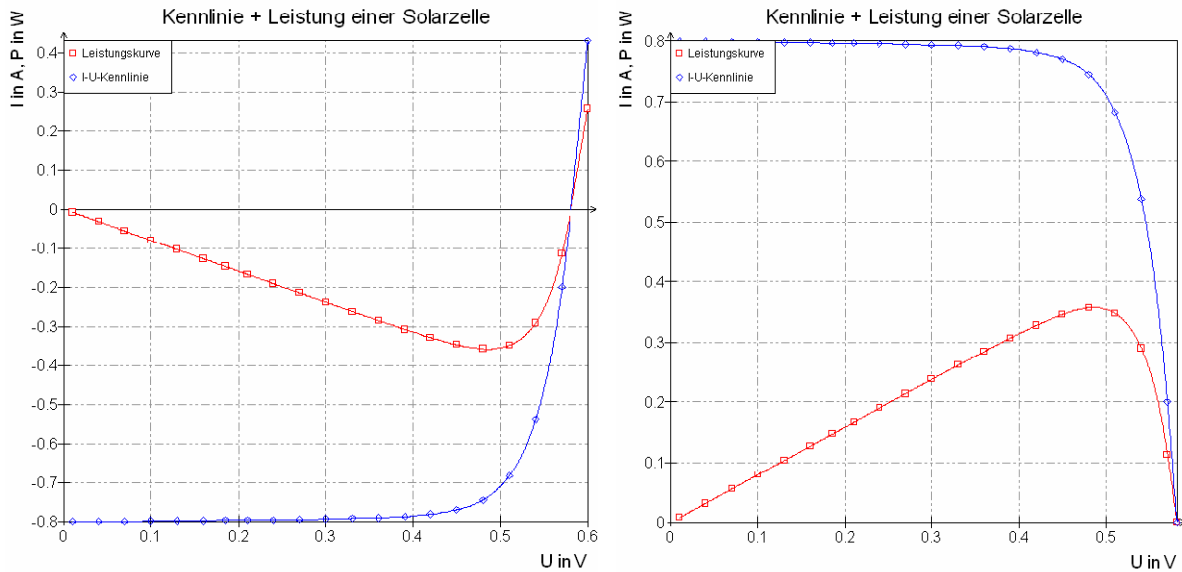
iii. Elektrische Leistung P_{MPP}
(Sek. II: erforderlich; Sek. I: wahlfrei)

Wenn ein Strom I durch ein Material fließen soll, legt man eine Spannung U an. Das Material begrenzt den Stromfluss mit seinem Widerstand R . Zwischen diesen drei Größen besteht die Beziehung $R = U / I$ (Ohmsches Gesetz). Verschiedene Materialien haben verschiedene Widerstände. In manchen Fällen ist für ein und dasselbe Material der Widerstand von der angelegten Spannung abhängig. Kennzeichnend für die verschiedenen Widerstandsverhalten der Materialien sind ihre Kennlinien, die man aufnimmt, indem man verschiedene Spannungswerte anlegt, den dadurch verursachten Strom misst und danach die I - U -Wertepaare grafisch darstellt. Auf diese Weise erhält man eine Gerade für einen metallischen Leiter (s. Abb. unten) mit konstantem Widerstand und nichtlineare Kurven sowohl für eine in Durchlassrichtung gepolte Diode als auch für eine Solarzelle, die erstens unbeleuchtet war, zweitens mit der Bestrahlungsstärke E und drittens mit $2E$ beleuchtet wurde. Nichtlineare Kurven weisen darauf hin, dass sich der Widerstand mit der Spannung ändert. Bei Solarzellen ändert sich der (Innen-) Widerstand auch noch mit der Bestrahlungsstärke.



Die Leistung $P (=U \times I)$ einer Solarzelle verändert sich ebenfalls mit der Spannung (s. Abb. unten links). Mit steigender Spannung wächst der negative Betrag von P , durchläuft ein Minimum, kreuzt die U -Achse und wird positiv. Negative P -Werte stehen definitionsgemäß für abgegebene Leistungen und positive P -Werte für verbrauchte Leistungen. Da Solarzellen praktisch immer als Energielieferant betrieben werden, versteht man unter der Leistung einer Solarzelle immer die von ihr abgegebene Leistung. Deshalb kann man die Leistung

einer Solarzelle ohne Vorzeichen angeben und bei der Aufnahme ihrer Kennlinie auf den Teil, in dem Leistung verbraucht wird, verzichten (s. Abb. unten rechts).



In den Kennlinien und Leistungskurven (s. Abb. oben rechts) von Solarzellen oder Solarmodulen (Zusammenschaltung mehrerer Solarzellen) werden oft zwei Punkte mit „MPP“ und „ P_{MPP} “ hervorgehoben. P_{MPP} steht für die maximale elektrische Leistung einer Solarzelle bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 . MPP (Maximum Power Point) kennzeichnet die dazugehörigen I - U -Werte ($P_{MPP} = U_{MPP} \times I_{MPP}$) in der Kennlinie.

In diesem Zusammenhang betrachte man noch einmal die beiden Diagramme auf der vorhergehenden Seite. Erstens ist erkennbar, dass die Kennlinien der Diode und der unbeleuchteten Solarzelle gleich sind. Zweitens wird die Kennlinie einer Solarzelle parallel zur I -Achse um den Strombetrag I bei der Bestrahlungsstärke E und um den Strombetrag $2I$ bei der Bestrahlungsstärke $2E$ verschoben. Das ist mit der Zunahme des Photostroms erklärbar, der linear mit der Bestrahlungsstärke E steigt und zum Strom der Diodenkennlinie hinzukommt. Genauso wie der Strom steigt auch die Leistung der Solarzelle mit dem Photostrom und der Bestrahlungsstärke. Um verschiedene Solarzellen miteinander vergleichen zu können, wird deshalb die Leistung P_{MPP} bei der maximalen Sonneneinstrahlung von 1000 W/m^2 angegeben. Als Einheit für P_{MPP} wird dann Wattpeak (Wp) und nicht Watt (W) verwendet.

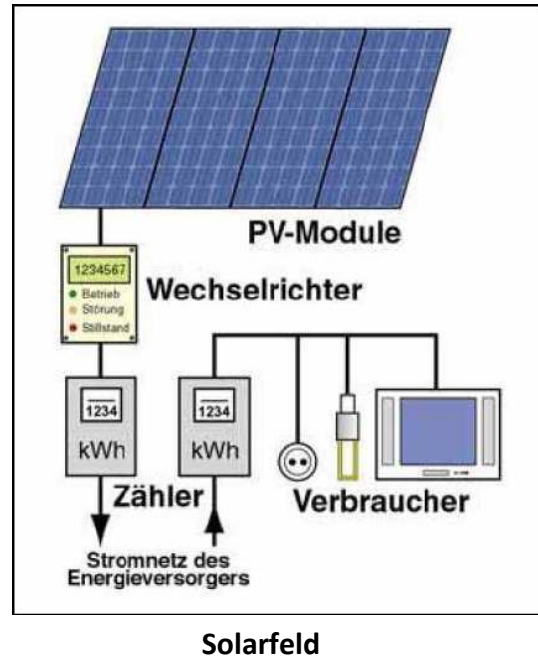
Die Kennlinien der Solarzelle bestätigen die Aussage aus Kapitel 2.1, das sich einerseits eine lichtdicht abgedeckte Solarzelle wie eine Diode verhält und andererseits eine beleuchtete Solarzelle wie eine Stromquelle wirkt, die Gleichstrom abgibt. Die Solarzelle ist also Diode und Stromquelle zugleich.

iii. SOLARSTROMANLAGEN

Netzgekoppelte Solarstromanlagen bestehen aus:

- Solarfeldern, die i.d.R. aus mehreren PV-Modulen (PV=Photovoltaik) mit jeweils mehreren Solarzellen bestehen,
- Wechselrichtern, die Gleichstrom in Wechselstrom transformieren und
- Verbrauchern, die über das Stromnetz mit der Anlage verbunden sind.

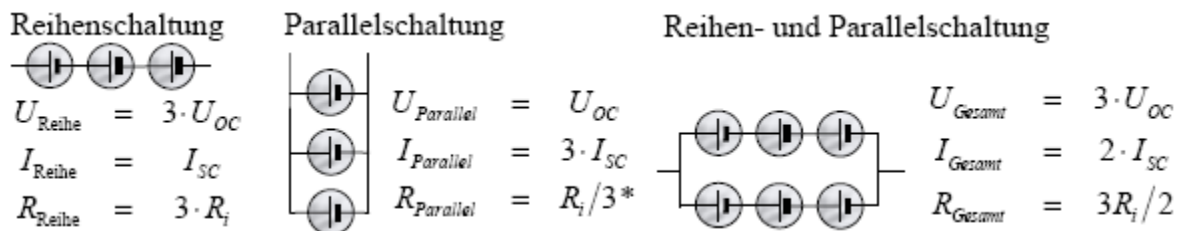
Die Komponenten müssen genau aufeinander abgestimmt sein, um eine möglichst hohe Ausbeute des erzeugten Stroms zu erreichen. Zwei Aspekte, die bei der Abstimmung der Komponenten zu beachten sind, werden in den beiden folgenden Kapiteln behandelt.



i. Verschaltung von Solarzellen

In Solarfeldern und Modulen sind die einzelnen Solarzellen sowohl parallel als auch in Reihe geschaltet, um am Ausgang die gewünschten Strom- und Spannungswerte zu erhalten. Die Wirkungen der Schaltungsarten sind schnell erklärt.

Im Kapitel 2.2.3 wurde darauf hingewiesen, dass sich der Innenwiderstand einer Solarzelle mit der Bestrahlungsstärke ändert. Werden alle (sich gleichenden) Zellen eines Solarmoduls mit der maximalen Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² bestrahlt, haben alle Zellen denselben Innenwiderstand R_i , dieselbe Leerlaufspannung U_{OC} und denselben Kurzschlussstrom I_{SC} . Aufgrund der geltenden Gesetze (Kirchhoffsche Gesetze) ergeben sich für die Reihen und/oder Parallelschaltung von Solarzellen verschiedene U -, I - und R -Werte, die nachfolgend anhand von 3 Beispielen berechnet werden.



Die sich mit der Auswahl der Schaltungsart einstellenden U -, I - und R -Werte eines Solarfeldes sind bei der Auswahl und Anpassung des Wechselrichters zu berücksichtigen.

Häufig werden Solarfelder in so genannte Strings unterteilt. Jeder String enthält mehrere in Reihe verschaltete Module. Dann sind die U -, I - und R -Werte der Strings bei der Auswahl des Wechselrichters zu beachten.

*Man kann $R_{Parallel}$ mit $R_{Parallel} = U_{Parallel} / I_{Parallel}$ oder mit $1/R_{Parallel} = 1/R_i + 1/R_i + 1/R_i$ berechnen

Zum Knobeln: Der Innenwiderstand R_i einer zunächst beleuchteten Solarzelle werde nach dem Abdunkeln 7-mal größer. Wie groß wird der Gesamtwiderstand für eine Reihen- und Parallelschaltung aus 6 Solarzellen (s. Abb.) nach dem Abdunkeln von 2 Solarzellen, die beide in einer Reihe liegen? Wie groß wird der Gesamtwiderstand der gleichen Schaltung nach dem Abdunkeln von je einer Solarzelle in jeder Reihe?

ii. *Wechselrichter-Widerstand*
(Sek. II: erforderlich, Sek. I: wahlfrei)

Solarzellen haben ein für Spannungsquellen typisches Verhalten. Wenn der Stromkreis nicht geschlossen ist, liegt zwischen den Polen der Spannungsquelle die Leerlaufspannung U_{OC} . Bei geschlossenem Stromkreis muss der elektrische Strom auch durch die Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand R_i fließen. Auf Grund des inneren Spannungsabfalls $U_i = R_i \cdot I$ steht nur noch die kleinere Klemmspannung U_K zur Verfügung

$$U_K = U_{OC} - U_i = U_{OC} - R_i \cdot I \quad (3)$$

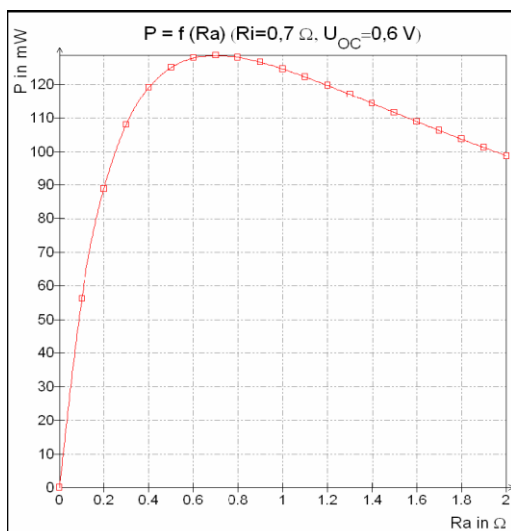
Für einen geschlossenen Stromkreis mit dem äußeren Lastwiderstand R_a (R_a liegt in Reihe mit R_i) gilt die Beziehung

$$I = \frac{U_{OC}}{R_i + R_a} \quad (4)$$

Setzt man die Gleichungen (3) und (4) in die Gleichung $P_K = U \times I$ zur Berechnung der Abgabeleistung ein, erhält man nach ein paar Formelumstellungen das Ergebnis

$$P = U_{OC}^2 \frac{R_a}{(R_i + R_a)^2} \quad (5)$$

Für eine bestimmte Bestrahlungsstärke E sind U_{OC} und R_i der Solarzelle konstant, so dass die abgegebene Leistung P der Solarzelle nur noch von ihrem Lastwiderstand R_a abhängt.



Aus der grafischen Darstellung der Funktion $P = f(R_a)$ für eine Solarzelle mit $U_{OC} = 0,6V$ und $R_i = 0,7\Omega$ ist ablesbar, dass die abgegebene Leistung P bei einem Lastwiderstand von $R_a = 0,7\Omega$ am größten ist. Die Leistungsausbeute ist also dann am größten, wenn der Lastwiderstand R_a etwa so groß ist wie der Innenwiderstand R_i . Das gilt nicht nur für dieses Beispiel, sondern für beliebige Verschaltungen von Solarzellen.

D.h., die mögliche Leistung eines Solarfeldes/Strings wird am besten ausgeschöpft, wenn der Widerstand des Wechselrichters (=Lastwiderstand des Solarfeldes) so groß ist wie der Innenwiderstand des Solarfeldes/Strings. Weil sich der Innenwiderstand eines Solarfeldes/Strings mit der Bestrahlungsstärke E ändert, sind Wechselrichter mit einer elektronischen Schaltung ausgestattet, die den Wechselrichter- Widerstand automatisch an den aktuellen Innenwiderstand des Solarfeldes/Strings anpassen.

III. HINWEISE ZUR VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zu Aufgabe 1.a) (Sek.-St. I und II)

Für diese und weitere Aufgaben steht eine optische Bank zur Verfügung, auf der ein Photovoltaik-Modul (8 Solarzellen), eine Glühlampe mit Reflektor und eine Glasscheibe befestigt sind. Die Glasscheibe schützt das Photovoltaik-Modul vor zu starker Wärmestrahlung. Die Beleuchtungsstärke E^* (in 10^3 lx - Lux) ist mit einem Luxmeter in der Mitte des PV-Moduls für verschiedene Lampen-Abstände im Bereich von 0,60m bis 0,95m mit einer Schrittweite von 0,05m zu messen. Die Messwerte können mit der Spezialsoftware „ReGraPhys“ grafisch dargestellt werden ($E = f(x)$, E in 10^3 lx, x in m).



Zu Aufgabe 1.b) (Sek.-St. I)

Für diese Aufgabe steht zusätzlich ein Digitalmultimeter (DMM) zur Verfügung, das mit einer Solarzelle des PV-Moduls verbunden wird. Die Glühlampe ist wieder im Bereich von 0,60m bis 0,95m mit einer Schrittweite von 0,05m auf der optischen Bank zu verschieben. Für jeden



Abstand sind die Spannung U_{oc} (Leerlaufspannung) und der Strom I_{sc} (Kurzschlussstrom) der Solarzelle zu messen. Nachdem die gemessenen U_{oc} - I_{sc} - Wertepaare und die unter Aufgabe 1.a) ermittelten E -Werte in „ReGraPhys“ eingetragen wurden (E in 10^3 lx, U in V, I in mA), können die Leistungen $P = U_{oc} \cdot I_{sc}$ mittels eines in „ReGraPhys“ vorhandenen Taschenrechners berechnet und grafisch dargestellt werden ($P = f(E)$, E in 10^3 lx, P in mW).

Zu Aufgabe 1.c) (Sek.-St. I)

Während das DMM mit der Solarzelle verbunden bleibt, ist die Glühlampe im Abstand von 0,90m zum PV-Modul aufzustellen. Danach ist das PV-Modul mit dem daran befestigten Winkelmesser in 10° -Schritten von 0° bis 70° zu drehen. Für jeden Winkel α sind die Spannung U_{oc} und der Strom I_{sc} der Solarzelle zu messen. α ist der Winkel zwischen einem Lichtstrahl, der auf die Solarzelle fällt, und deren Normalen ihrer Oberfläche. Nachdem die Winkel α und die dazugehörigen U_{oc} - I_{sc} - Wertepaare in „ReGraPhys“ eingetragen wurden

(α in $^\circ$, U_{OC} in V, I_{SC} in mA), kann die relative Leistung $\max P/P_{max}$ (in %) der Solarzelle mittels des „ReGraPhys“-Taschenrechners und der Gleichung $P/P_{max} = U_{OC} \cdot I_{SC} / P_{max} \cdot 100\%$ für jedes Wertepaar berechnet werden. Die Funktion $P/P_{max} = f(\alpha)$ ist grafisch darzustellen.

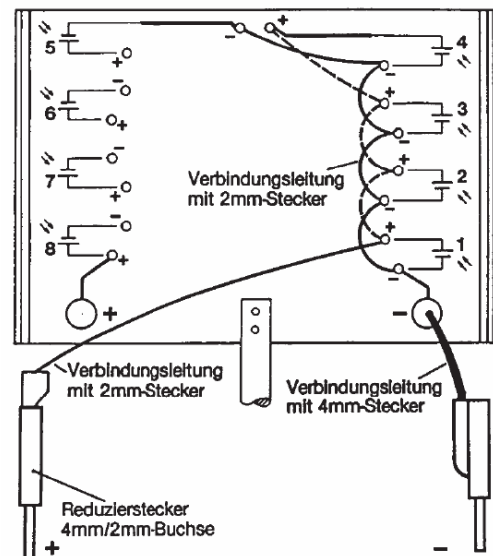
*Die Größen Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke sind sich sehr ähnlich aber nicht gleich. Im Gegensatz zur physikalischen Messgröße Bestrahlungsstärke ist die Beleuchtungsstärke eine physiologische Messgröße, bei der die Wellenlängen (Farben) des Lichts unter Berücksichtigung der Farb-Empfindlichkeit des Auges unterschiedlich gewichtet werden. Z.B. werden bei der Messung der Beleuchtungsstärke ultraviolette und infrarote Strahlungsanteile nicht erfasst, weil diese nichts zu unserem Helligkeitsempfinden beitragen. In unserer Versuchsanordnung entsprechen 30 Lux ca. $1W/m^2$.

Zu Aufgabe 1.d) (Sek.-St. I)

Das PV-Modul wird zunächst senkrecht zur 0,9m entfernten Glühlampe ausgerichtet. Anschließend sind folgende Schaltungen nacheinander aufzubauen und mit einem Digitalmultimeter zu verbinden:

- Reihenschaltung (mit Kurzschlusssteckern)
 - o aus 2 Solarzellen,
 - o aus 3 Solarzellen,
 - o aus 4 Solarzellen,
- Parallelschaltung (mit Verbindungsleitungen)
 - o aus 2 Solarzellen,
 - o aus 3 Solarzellen,
 - o aus 4 Solarzellen,
- einzelne Solarzelle.

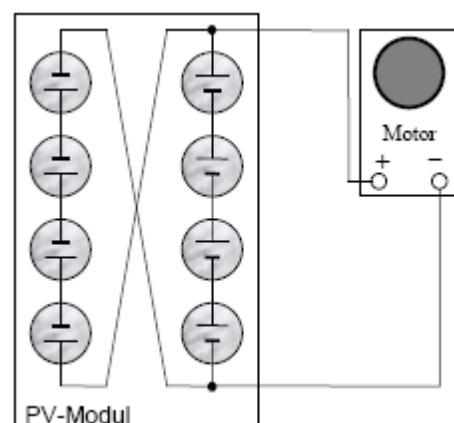
Für jede Schaltung sind jeweils die Spannung U_{OC} und der Strom I_{SC} zu messen.



Rückseite des PV-Moduls mit Verbindungsleitungen für eine Parallelschaltung aus 4 Solarzellen (o-Buchsen)

Zu Aufgabe 1.e) (Sek.-St. I)

Zunächst sind die auf beiden Seiten des PV-Moduls übereinander liegenden 4 Solarzellen in je einer Reihe miteinander zu verbinden. Danach sind beide Reihen parallel zu schalten und mit einem Motor zu verbinden. Das PV-Modul ist anschließend mit einer lichtdichten Platte schrittweise zunehmend sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung abzudecken. Gleichzeitig ist die Motorachse zu beobachten. Als Schrittweite ist $\frac{1}{4}$ der Modulfläche zu wählen.



Zu Aufgabe 1.f) (Sek.-St. II)

Siehe Aufgabe 1.a)

Zu Aufgabe 1.g) (Sek.-St. II)

Die 8 Solarzellen des PV-Moduls sind sowohl untereinander als auch mit einem Strommessgerät und einem Labornetzgerät in Reihe zu schalten. Für die folgenden Fälle

- Solarzelle lichtdicht abgedeckt,
- Solarzelle mit E beleuchtet (Lampen-Abstand $x = 0,95\text{m}$),
- Solarzelle mit $2E$ beleuchtet (Lampen-Abstand $x = 0,70\text{m}$).

ist die Spannung des Netzgerätes im Bereich von 0V bis 3,00V in 0,50V-Schritten und im Bereich von 3,20V bis 4,20V in 0,20V-Schritten einzustellen und der dazugehörige Strom zu messen. Zur Strommessung bei 0V sind die Kabelenden am Netzgerät zu verbinden. Die drei I - U -Kennlinien sind in einem gemeinsamen Diagramm mittels „ReGraPhys“ grafisch darzustellen.

Zu Aufgabe 1.h)

Es ist eine Reihenschaltung aus Solarzelle, Strommesser und Lastwiderstand aufzubauen. Die Klemmen der Solarzelle sind außerdem mit einem Spannungsmesser zu verbinden. Der Lastwiderstand R ist in 10W-Stufen von 0Ω bis 100Ω einstellbar. Für jede Widerstandsstufe sind der Strom I und die Spannung U der Solarzelle zu messen, die erstens mit E ($x = 0,95\text{m}$) und zweitens mit $2E$ ($x = 0,70\text{m}$) zu beleuchten ist. Die Widerstandswerte und die dazugehörigen I - U - Wertepaare (U in V, I in mA) sind in „ReGraPhys“ einzutragen. Nach der Berechnung der Leistung $P = U \cdot I$ sind die Funktionen $P = f(R)$ für beide Beleuchtungsstärken in je einer Grafik darzustellen.