



Soft durch Licht

Die einfache Formel, mehr Verbraucher, mehr Solarzellen, ist sicher für Optimisten eine gangbare Lösung. Eigner sollten schon etwas mehr wissen, wenn es um die Erzeugung von Strom an Bord geht. Georg Seifert liefert eine Übersicht handelsüblicher Modultypen und gibt Hinweise wie die Einpeisung in das Bordnetz über geeignete Laderegler erfolgen sollte.

Wenn das Boot nicht im Heimathafen festgemacht wird beginnt am Ende eines Segeltages für den Skipper die Aufgabe eine Steckdose zum Aufladen der Bordakkumulatoren zu finden. Mit dem schwarzen Festmacher in der Hand ist die Suche zwar immer lästig, aber nicht immer von Erfolg gekrönt, denn je nach Fahrtgebiet und Liegeplatz sind Stromanschlüsse rar oder nicht vorhanden. Beim An-

kern in lauschigen Buchten, längeren Schlägen auf See oder Liegeplätzen außerhalb der Yachthäfen erübrigt sich die Suche, aber auch das Laden über das Landnetz.

Verzicht wäre die richtige Wahl. Aber das Gegenteil ist die Regel. Fahrtensegler fahren immer mehr auf ständige Energieversorgung angewiesene Geräte spazieren, wobei die Energiefresser wie Kühlboxen und Selbststeueranlagen nur die

Spitze des Eisberges bilden. Steht keine Stromtankstelle zur Verfügung muss der Motor viele Stunden laufen. Hier sollte der Skipper wissen, dass Akkus nicht mehr als 10 bis 15 Prozent ihrer Nennkapazität pro Stunde aufnehmen. Da muss der Motor schon mehrere Stunden Lärm machen um den Verbrauch des Tages auszugleichen. Um zumindest einen Teil der benötigten Ladung zu ernten, sieht man



Leistungsfähige monokristalline Panele am Heck einer Fahrtenyacht: Mit 22 bis 24 Prozent Ausbeute heute State of the Art. Nachteil: Bruchgefährdet, eigentlich für die feste Montage an Land gedacht.

auch in unseren Breiten immer häufiger Solarmodule auf Yachten. Bevor Sie über die Funktionen, den Modellen und Bauarten für Yachten lesen, sollen die physikalisch-technischen Grundlagen näher beleuchtet und etwas Grundlagenwissen vermittelt werden. So haben Sie eine fundierte Entscheidungsbasis.

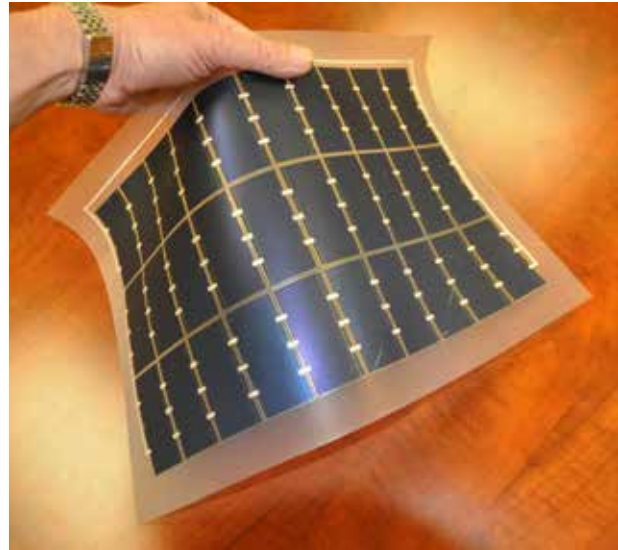
Photovoltaik

Das im Sonnenlicht erhebliche Energie steckt merkt jeder der in der Sonne sitzt. Das nicht nur Wärme transportiert wird haben neugierige Wissenschaftler schon vor 180 Jahren bemerkt. Bereits 1839 beobachtete und beschrieb der französische Physiker Alexandre Edmond Becquerel als erster den photoelektrischen Effekt, bei dem durch Lichteinstrahlung eine Spannung entsteht. Wie so oft eine Zufallsentdeckung: Becquerel befasste sich mit den Ursachen der Phosphoreszenz (Nachleuchten von Stoffen nach der Bestrahlung mit Licht), arbeitete mit den ersten Batterien und beobachtete, dass manche Stoffe einfallendes Licht anscheinend in Energie umsetzen konnten oder wieder abstrahlten. Erst fast 50 Jahre später wurde 1883 die erste Solarzelle auf Basis von Selen durch den Amerikaner Charles

Fritts hergestellt – mit einem Wirkungsgrad von knapp über einem Prozent. Nicht überragend, aber doch ein erster Ansatz der Nutzung der Lichtenergie.

Verstanden, was da eigentlich vor sich geht, hat Albert Einstein 1905, damals 26 Jahre alt. Er legte dar, das Licht einen Teilchenstrom aus Photonen darstellt und nicht (nur) eine Welle, diese Photonen aus der Atomstruktur Elektronen anschubsen können und daher ein elektrischer Strom fließen kann. Weiter schuf er so die Grundlage der Quantenmechanik, da er den Versuch aufgrund der Lichtquantenhypothese erklärte. Einstein wurde 1921 für diese Arbeit mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet, nicht wie oft fälschlich angenommen, für die Relativitätstheorie.

Die Herstellung von Modulen kam gegen 1953 in Schwung: Als Nebenprodukt ihrer Forschung zur Entwicklung eines Transistors schufen Fuller, Pearson und Chapin in den Bell-Laboratories die erste halbwegs leistungsfähige Solarzelle. Ihre Karriere starteten Solarmodule mit der Raumfahrt in den 60-er Jahren, da sie im Weltraum die Energieversorgung der Satelliten kontinuierlich ohne Rückstände oder Alterung aufrechterhalten können. ►



Links: Polykristalline Oberfläche, die während des Erkalts nach dem Einschmelzen entsteht. Leistungsgrad bis 16 Prozent.

Oben: Hochflexibles Modul der NASA mit amorphen Zellen.

Ausgangsbasis

Silizium gilt nach wie vor als ideales Ausgangsmaterial für die industrielle Massenherstellung von Solarzellen: Das eigentlich nichtleitende Halbmetall Silizium ist nach dem Sauerstoff das zweithäufigste Element der Erdoberfläche. Etwa 90 Prozent der Erdkruste bestehen aus Siliziumverbindungen, Glas wird aus Siliziumverbindungen (Quarzsand) hergestellt, weiter wird es als Sand für jedes Bauwerk benötigt, ebenso ist Silizium ein Hauptbestandteil von Silikon.

Die mit den beschriebenen Experimenten zur Herstellung elektronischer Schaltkreise in den 50-er Jahren aufkommende Halbleitertechnologie, bei der ein reiner, eigentlich isolierender Stoff durch gezieltes „Dotieren“ mit Fremdatomen verunreinigt und dadurch leitend wird, führte 1954 in den Bell Telephone Labs zu den ersten Silizium-Solarzellen, wie wir sie auch heute noch antreffen, und kann als der Startschuss der kommerziellen Nutzung der seit über 100 Jahren bekannten Photovoltaik-Technologie betrachtet werden.

Herstellung einer Solarzelle

Um Strom aus Sonnenlicht zu erhalten ist allerdings etwas mehr Physik und Hochtechnologie notwendig, als gemeinhin angenommen wird. Die trotz millionenfacher Stückzahlen immer noch hohen Einstandspreise von Solarmodulen geben einen Hinweis auf die Komplexität des Herstellungsverfahrens.

Um die Leistung der Solarzellen von anfangs 1 bis 6 Prozent auf heute übliche 20 Prozent Wirkungsgrad anzuheben, wird zunächst hochreines Silizium (99,999%) in einem aufwendigen Herstellungsprozess gewonnen. Möglichst reiner Quarzsand (SiO_2 : Kieselsäureanhydrit) wird eingeschmolzen, dann trennt man den Sauerstoff durch Zufügen von Kohlenstoff vom Silizium. Das nun zu 98% reine Silizium wird gemahlen und in Salzsäure zu Trichlorsilan gelöst, destilliert und mit Wasserstoff zu reinem Silizium reduziert. Ab hier unterscheidet sich der weitere Lebensweg der späteren Solarzelle: Für monokristalline Zellen wird das Reinsilizium bei rund 1.400 Grad Celsius eingeschmolzen und ein monokristalliner Zylinder von 10

bis 15 Zentimeter Durchmesser und bis zu 1 Meter Länge aus der Schmelze gezogen. Dieser Zylinder wird dann mit Diamantsägen in 0,3 Millimeter dünne Scheiben und in die spätere rechteckige Form gesägt. Dies aufwendige Verfahren bringt die höchste Leistungsausbeute der späteren Solarzelle aufgrund der hohen Gleichmäßigkeit des Silizium-Kristallgitters, ist aber auch am teuersten. Monokristalline Solarzellen sind an der charakteristischen gleichmäßig dunkelblauen bis schwarzen Farbe erkennbar und haben heute einen Wirkungsgrad von 12 bis 20 Prozent.

Für polykristalline Zellen wird die Schmelze in einen Block gegossen, der dann ebenfalls in Zellen zersägt wird. Polykristalline Zellen sind an der schillernden Oberfläche, verursacht durch die unterschiedlich angeordnete Kristallstruktur (und eben das ist der Grund für die geringere Leistungsausbeute), die während des Erkalts der Schmelze entsteht, leicht zu erkennen und haben heute 10 bis 16 Prozent Wirkungsgrad. Amorphe Zellen werden durch Aufdampfen von Reinsilizium auf ein geeignetes Trägermaterial hergestellt.

Dieser kostengünstigste Weg der Herstellung bringt nur leider wenig Ertrag: Mehr als 4 bis 8 Prozent sind heute noch nicht machbar. Amorphe Zellen sind aber sehr flexibel und daher vornehmlich auf hochflexiblen Modulen erhältlich und durch ihre bräunliche Oberflächenfärbung gut zu unterscheiden.

Weitere Produktionsschritte der kristallinen Zellen beinhalten die Dotierung der Scheiben mit Phosphor und Bor (dazu mehr im folgenden Kapitel) und das Aufdampfen des charakteristischen Aluminiumgitters (der späteren Stromabnehmer) im Vakuum. Fehlt noch die Antireflexionsschicht aus Titandioxid – die glatte Siliziumoberfläche, eigentlich mattgrau, würde sonst fast 30 Prozent des eingestrahnten Lichts wieder reflektieren – übrigens erhalten die Solarzellen dadurch ihre blaue Grundfarbe. Die so entstandenen Solarzellen werden auf ein Trägermaterial in Reih und Glied verlegt und elektrisch miteinander verbunden, man legt sie zwischen Glasplatten oder schweißt sie in Kunststoff ein, stellt eine wasserdichte Kontaktstelle nach außen her – das Solarmodul ist geschaffen.

Die Umwelt

Natürlich darf nicht verschwiegen werden, das zur Herstellung eines Solarmoduls Energie und Rohstoffe benötigt werden. Nichtsdestotrotz sind Solarmodule eines der wenigen Produkte, die eine positive Ökobilanz erwirtschaften: Nach bereits zwei bis sechs Jahren, je nach Modultyp, haben Sie die zur Herstellung benötigte Energie wieder erwirtschaftet – bei einer Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren durchaus ein ökologisches Argument!

Ausblick

Die Entwicklung geht langsam aber stetig voran: Im Labor sind bereits 40 Prozent Wirkungsgrad erreicht worden, allerdings mit exotischen Gallium-Arsenid, Cadmiumtellurid und Indium-Schwefel-Selen-Verbindungen. Diese steigern den Wirkungsgrad, allerdings (noch) ►



So viel Fläche bieten in der Regel nur Katamarane an. Hier ist es leicht möglich zu einer Vollversorgung der elektrischen Verbraucher zu kommen.

auch die Herstellungskosten um ein Vielfaches.

Geforscht wird auch an sogenannten Konzentrator-Zellen, die man sich wie ein Brennglas vorstellen kann welche die Sonneneinstrahlung auf eine spezielle, kleinere Halbleiterzelle bündelt. Dies wird eher nicht für den Bootsbereich interessant sein: Lediglich die benötigte Halbleiterfläche und somit die Kosten werden geringer, an der notwendigen Fläche zur Sonneneinstrahlung ändert das wenig. Zukunftsmusik sind noch organische Zellen aus Kohlenwasserstoff-Verbindungen, also Kunststoffen: Diese könnten hauchdünn, hochflexibel und sogar farbig eingefärbt werden – zudem verspricht man sich die Druckfähigkeit von Solarflächen auf geeignete Trägermaterialien. Diese sind aber Stand heute mit einem Ertrag von um die 10 Prozent und hohen Produktionskosten noch nicht marktreif.

Von der Zelle zum Modul

Die heute meist verwendeten Solarzellen haben eine Kantenlänge von 12 bis 15 Zentimeter mit

abgeschrägten Ecken. Eine einzelne Zelle liefert eine Gleichspannung von etwa 0,5 bis 0,6 Volt – von daher werden je nach Anwendung 36 bis 144 Zellen in Reihe geschaltet um auf die erforderliche Ladespannung zu kommen.

Die auf Yachten gebräuchlichen Module bestehen überwiegend aus 36 Zellen, in Reihe geschaltet macht das nach Adam Riese um die 18 bis 20 Volt. Da die Spannung durch die zwangsläufige Erwärmung des Moduls abnimmt werden gerne auch mehr Zellen gesetzt, bis 44



Durch die Standardabmessungen lassen sich Nachrüstungen sehr penibel planen.

Zellen auf einem 12-Volt-Panel sind am Markt.

Die Spannung (Volt) ändert sich mit steigender Größe nicht, sehr wohl aber der Strom: Je größer die einzelne Zelle desto höher der Strom. Ebenso interessant und wichtig für die später behandelte Regelungstechnik: Bei einer gegebenen Zelle ändert sich je nach Sonneneinstrahlung der abgegebene Strom (A) nicht, aber die Spannung (V), mithin die Leistung W als Produkt von Strom und Spannung.

Energieausbeute

Welchen Ertrag können wir von einem Solarmodul erwarten? Nehmen wir ein gängiges Hochleistungsmodul mit monokristallinen Zellen, welches mit den Abmessungen von rund 1,0 x 0,5 Meter eine Spitzenleistung von 110 Wp erzielt. Dieses Modul wird in unseren Breiten an einem sonnigen Tag einen Ertrag von $4 \times W_p = 440 \text{ Wh}$ als Daumenregel erzielen. Bei einer Bordspannung von 12 Volt kommen wir also auf einen Ertrag von rund 36 Ah pro Panel. (In niedrigeren Breiten und

sonnigen Gegenden wie im Mittelmeer können wir mit 5 x Wp kalkulieren = 45 Ah). Die in den Produktdatenblättern ausgewiesenen Wp-Werte basieren auf 25 Grad Celsius Modultemperatur und 1.000 Watt Einstrahlung pro Quadratmeter – und sind somit nicht wirklich realistisch, aber können gut als Vergleichsbasis dienen.

Bedarf und Wirklichkeit

Es ist also leicht auszurechnen, dass der durchschnittliche Fahrtensegler, ich nehme einmal unser Schiff, mit 80 Ah Tagesbedarf drei derartiger Module spazieren fahren muss, um den Durchschnittsverbrauch sicher abzudecken.

Dies ist, je nach Schiffsgröße und Montagemöglichkeit, nur mit einigem Aufwand zu realisieren.

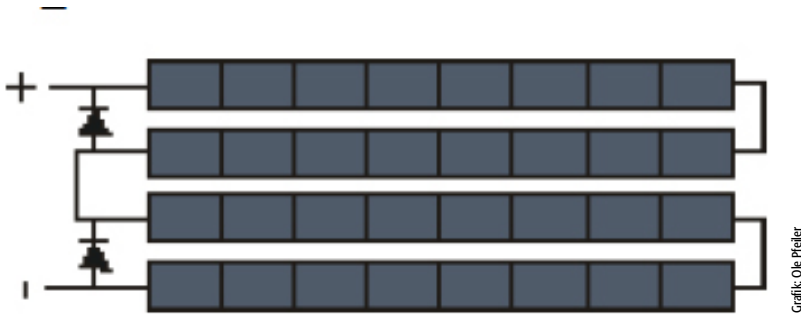
So theoretisch diese Beispielrechnung auch sein mag so zeigt sie doch, dass neben der sinnvollen Erhaltungsladung nur große Flächen oder aber eiserner Sparwille beim Stromverbrauch den Traum von der Autarkie alleine durch Solarstrom erfüllen kann. Helfen tut es allerdings immer um zumindest einen Teil des Verbrauchs nachzuladen.

Eigenschaften

Nun gibt es eine Reihe von Do's und Don'ts bei der Auswahl und Montage von Solarmodulen zu berücksichtigen:

- Abschattungen

Wichtigster Punkt ist ein Aufstellungsort mit möglichst wenig Abschattung. Auf einem Motorboot oder Katamaran mag das einfach umzusetzen zu sein. Das Problem ist bekannt: Ist die Beleuchtung einzelner Zellen durch Schatten beeinträchtigt, so wird die Leistungsfähigkeit des Solarmoduls auf den Wert reduziert, den die am schwächsten beleuchtete Solarzelle liefert. Im Extremfall kann eine abgeschattete Zelle als Verbraucher arbeiten und der durch die anderen, beleuchteten Zellen erzeugte Strom erhitzt die abgeschattete Zelle bis zur Beschädigung. ►



Grafik: Ole Pfeiler

Zur Minimierung des Lichterketten-Syndroms werden einzelne Reihen von Zellen per Bypass-Diode aus dem Verbund herausgenommen.



Nachführung: Nur bei ruhigem Wetter oder vor Anker zu empfehlen.

Dieses Lichterketten-Syndrom wird häufig durch zwischengeschaltete Bypass-Dioden versucht zu umgehen. Eine Diode lässt den Strom nur in eine Richtung fließen. Nun werden in der Regel einzelne Reihen von Zellen über eine Diode so miteinander verschaltet, dass bei Abschattung oder Ausfall einer oder mehrerer Zellen der Strom an den unproduktiven Zellen vorbei geleitet wird. Damit nun nicht immer der Strom über die Bypass-Dioden läuft und somit keine Leistung mehr vorhanden wäre sind es spezielle Dioden die erst ab einer bestimmten Schaltschwelle, üblich sind 100-Volt-Sperrspannung und 3-Ampere-Mindeststromstärke, aktiviert werden und dann den nicht nutzbaren String aus dem Modul abschalten.

Man kann bei handelsüblichen Modulen davon ausgehen das bereits bei Abschattung einer Zelle die Leistung auf rund 80 Prozent zurückgeht, bei einer kompletten Reihe von Zellen auf Zweidrittel, noch deutlicher wenn mehrere Reihen selbst nur teilabgeschattet werden und die Leistung dann nicht mehr zur Ladung der Batterien ausreicht. Ohne Bypass-Dioden wäre dieser Effekt weitaus dramatischer.

• Temperatur

Die Temperatur der Moduloberfläche hat einen deutlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, jedoch nicht so dramatisch wie oftmals angenommen. Leistungsangaben von Solarmodulen sind immer auf 25 Grad Celsius Oberflächentemperatur

bezogen, die in der Praxis aufgrund Sonneneinstrahlung und damit verbundener Einbringung von Wärme naturgegeben nicht realisierbar sind. So fällt die Leistung einer Zelle von 100 Prozent bei 25 Grad Celsius recht linear auf 88 Prozent bei 60 Grad Celsius Oberflächentemperatur, mithin 12 Prozent Verlust. Die Hinterlüftung von Solarmodulen löst das Problem nicht umfänglich: Der Energieertrag entstammt vornehmlich aus der obersten nur 1 µm starken Schicht – und die heizt sich natürlich sofort und unmittelbar auf. Dennoch hilft die Hinterlüftung, denn vor allem sinkt

die Spannung des Solarmoduls bei steigender Temperatur und das ist gerade für die Ladung angeschlossener Verbraucher wichtig.

• Sonneneinstrahlung

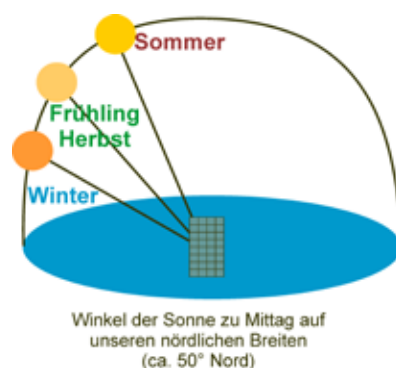
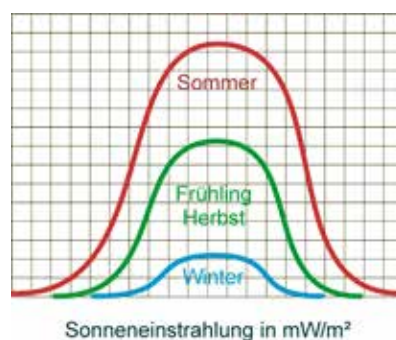
Jedem Eigner ist bewusst, dass die mögliche Energieausbeute von der Sonnenintensität abhängt. Die Grafiken verdeutlichen die Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit.

• Nachführung

Hieraus ergibt sich zwangsläufig die Frage der Nachführung von Solarmodulen. Natürlich bringt ein Panel die maximale Leistung nur wenn es senkrecht zum Lichteinfall steht – aber genau das ist auf einem Boot, vor allem vor Anker oder auf See, nahezu unmöglich. Selbst an Land wird wegen der kostspieligen, weil notwendig sturmfesten Umsetzung darauf verzichtet und dafür lieber mehr Paneele montiert. Es gibt am Markt natürlich ausreichend Systeme, die auch Nachführungen für Boote anbieten. Die Frage bleibt: Wer justiert jede halbe Stunde die Module aus? Schlimmer noch bei schwöjendem Schiff vor Anker – da ist jede Nachführung obsolet.

• Reinigung

Solarmodule reagieren natürlich empfindlich gegen Sand, Staub und Verschmutzungen, die, wenn auf der Modulfläche aufliegend, umgehend die Leistung herabsetzen. Die Flächen sind aufgrund ihrer glatten Oberflächen jedoch schnell und problemlos zu reinigen, im Idealfall reicht der





Tragbar: Solarmodule müssen nicht fest installiert sein.

allfällige Regenschauer. Zu vermeiden sind Reinigungszusätze aller Art, gerade unsere Haushaltsreiniger sind Gift für die Oberflächen und Abdichtungen – nehmen Sie schlicht klares Wasser.

• Lebensdauer und Garantie

Die Zellen der Module unterliegen kaum einem Verschleiß. Die dem permanenten Photonenbeschuss ausgesetzten Flächen verlieren nur sehr langsam ihre Leistungsfähigkeit, so sind auch Leistungsgarantien der Hersteller von bis zu 25 Jahren bei 80 Prozent Leistung keine Verkaufsversprechen.

Achtung: Bitte nicht die Leistungsgarantie mit der Produktgarantie verwechseln! Wenn Sie, aus Kostengründen oder weil es halt passt, handelsübliche für Hausdachmontage konzipierte Glasmodule verwenden wollen, so denken Sie bitte daran dass die Garantie von in Deutschland 6 Monaten und weiteren 18 Monaten Gewährleistung zumeist nicht für den Einbau auf Booten, schon gar nicht im Salzwasser-Milieu, gilt. Hersteller von explizit für Yachten geeignete Module gewähren hingegen in der Regel drei bis fünf Jahre Gewährleistung. Lassen Sie sich im Zweifel vom Hersteller oder Händler die Gewährleistungsfristen bei Montage auf einem Schiff bestätigen.

• Pimp my module

Abgesehen von der notwendigen stabilen Anbringung (die Module dürfen keinesfalls flattern, ►



Maximale Ausbeute: Unterschiedliche Größen erlauben die Nutzung des Aufbaus, aber – wie erkennbar – mit den Nachteilen der Abschattungen.



Morgens und nachmittags sorgt der Mastenwald für Abdeckungen.

vibrieren oder mechanisch beansprucht werden) kann man bei Standard-Hausdachmodulen auf die Idee kommen die Verbindungsschrauben des Rahmens gegen solche aus VA 4 oder Monel-Nieten zu tauschen um Korrosion vorzubeugen. An Land ist das kein Problem, im aggressiven Seewassermilieu können diese Verbindungen auf längere Sicht schon einmal für Ausblühungen sorgen.

Regelung

Solarmodule müssen immer über einen Regler mit den Batterien verbunden werden. Grund ist die Modulspannung von um die 17 Volt bei 12-Volt-Panelen, die nach Erreichen der Vollladung eines angeschlossenen Batterieblocks letztendlich die Batterie überladen und zerstören würde – auch kleine Solarmodule schaffen das mit hinreichend Zeit. Im maritimen Bereich arbeiten die Solar-Module mit 12 Volt oder recht selten auch 24 Volt, die Modulspannung beträgt dann bei maximaler Leistung zwischen 17 und 39 Volt. Der Regler gehört so dicht wie möglich in Batterienähe. Er misst zumeist intermittierend bei gleichzeitiger Ladestromunterbrechung die Spannung der Akkus und sollte nicht durch lange Leitungen oder

viele Verbinder mit Übergangswiderständen irritiert werden.

Regler: Installation

Die Installation aller Regler ist in jedem Fall simpel: Einfach die beiden Leitungen vom Solarmodul an den Eingang des Reglers anschließen, die zwei Ausgänge mit den Batteriebänken verbinden – das war es. Bitte nur nicht die Polarität verwechseln, Plus und Minus muss man schon unterscheiden können. Die einwandfreie Funktion zeigen alle besseren Regler durch Leuchtdioden an.

Regler: Schaltung der Panele

Sind es mehrere Panele werden in aller Regel die Leitungen parallel auf

dem Regler aufgelegt: Plus an Plus und Minus an Minus. Das kann schon mal eng werden, denn aus unerfindlichen Gründen sparen viele Hersteller an den Klemmengrößen – mehr als 6 Quadratmillimeter lassen sich kaum anschließen. Das ist in Abhängigkeit von installierter Leistung und Leitungslänge oft zu wenig. Nicht verzagen: Falls nötig legen Sie alle Leitungen zum Regler auf Sammelschienen auf, von da ab ein (kurzes!) Kabel zum Regler mit der maximal möglichen Stärke. Auf kurzen Wegen besteht keine Gefahr von Überlastung – genau der Grund dafür das die Regler in die Nähe der Batterie(n) gehören.

Regler: Art und Technik

Ein Standardregler, gegen wenige Euros beim Ausrüster erhältlich, trennt bei Erreichen der (oftmals zumindest nach Gel- oder Bleiakku einzustellenden) Ladeschlussspannung den Stromkreis, ohne das die Batterie wirklich voll wird, zudem findet bereits bei kleinen Abschattungen oder starker Aufheizung des Solarmoduls aufgrund der fallenden Modulspannung faktisch keine Ladung mehr statt. Vorteil: sehr preiswert, unter 30 Euro, aber wegen der schlechten Ausbeute kaum noch am Markt.



PWM (Pulsweiten-modulierter) Regler: Gesteuerte Unterbrechung der Ladung zur Vermeidung von Überladung.

Pulsweiten-modulierte Regler

Bessere PWM-Regler arbeiten mindestens dreistufig, haben also bereits eine Ladekennlinie, Überladungsschutz und oft zwei Ausgänge. Hier gibt es sogar recht ansehnliche Einbauregler mit Strom- und Spannungsanzeige im Display zum Einbau in das Schaltpanel. Diese Art Regler arbeitet meist nach dem PWM (pulsweiten-modulation)-Verfahren. Hierbei wird bei Erreichen der Ladeschlussspannung die Ladung unterbrochen, dies mehrfach pro Sekunde, um den effektiv wirkenden Strom zu begrenzen und die Batterie möglichst voll zu bekommen.

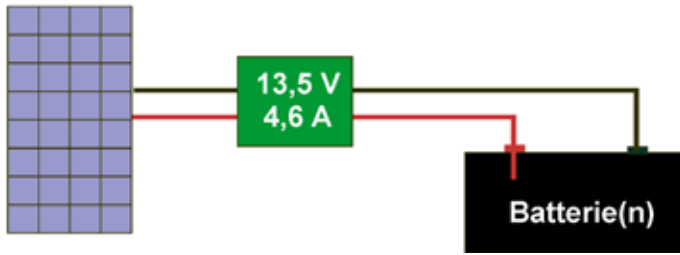
Der Nachteil der PWM-Regler liegt darin begründet, dass sie die am Panel anliegende Leistung 1:1 auf die Batterie durchschalten: Solange diese Ladung aufnimmt sind die Spannungen an Batterie und Panel annähernd gleich.

Das Panel, was eine Leerlaufspannung von unter 17 Volt hat, wird auf die Batteriespannung von sagen wir 13,5 Volt heruntergezogen. Wichtig an diesem Punkt: Der Strom, den das Solarpanel liefert ist konstant, also sowohl bei 13,5 als auch 17 Volt! Zur Erklärung: Alle Solarpaneele haben ein Datenblatt oder Aufkleber auf der Rückseite welches über die Eigenschaften Auskunft gibt, so wie hier: ►

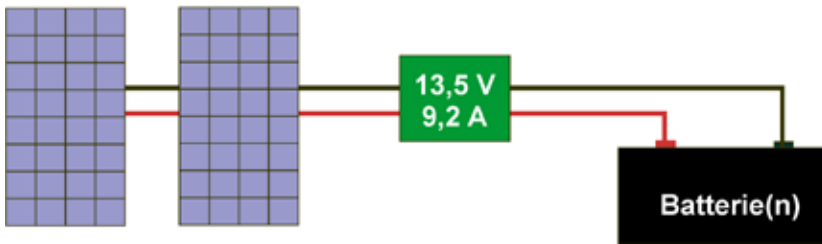


Solarmodul-Datenblatt.

Solarmodul



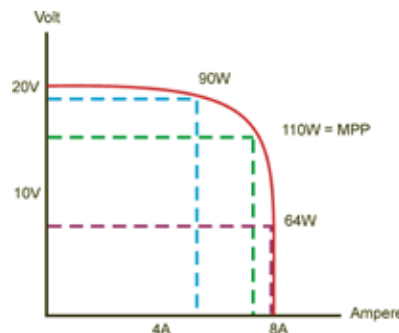
2 Solarmodule, parallel



Dies Beispielmodul hat als maximale Leistungsangabe angegeben mit 16,8 Volt und 5,4 Ampere, macht nach Adam Riese $16,8 \text{ V} \times 5,4 \text{ A} = 90,72 \text{ W}$. Bei Nutzung eines normalen PWM-Reglers kommen an der Batterie aber lediglich $13,5 \text{ V} \times 5,4 \text{ A} = 72,9 \text{ W}$ an – mithin 20 Prozent weniger. Wie immer auch hier Laborwerte: Durch Aufheizung verliert das Panel weitere circa 15 Prozent, von den 16,8 Volt verbleiben noch 14,28 Volt, die Differenz beträgt effektiv also nur 5 Prozent. PWM-Regler gibt es für 12 und 24-Volt-Systeme, wobei die Nennspannung die gleiche sein muss. Aus diesem Grunde werden PWM-Regler überwiegend für kleinere Systeme mit einem oder mehreren Panels in Parallelschaltung angeboten:

MPP(T)-Regler

Multi-Power-Point (Tracking)-Regler sind die Antwort findiger Elektroniker auf die oben ausgeführte Minderleistung herkömmlicher Regler. Diese Technik ist nicht neu, wird in der Haustechnik schon lange angewandt und erweitert die Regelung der Batterieladung (nach Spannung an der Batterie, also dem Ladezustand) um die Regelung der Eingangsspannung und Stromstärke des Solarmoduls. Dies kann ja nur



liefern und ist nicht steuerbar, aber der Regler kann es durch gleitende Anpassung von Strom und Spannung. Zitat Votronic: „Bei der MPP-Technologie ermittelt der Regler immerzu automatisch mehrmals pro Sekunde die

maximale Leistungsausbeute (MPP) der Solar-Module. Er transformiert dann den Spannungsüberschuss des Solar-Moduls auf einen höheren Ladestrom für die Batterie um (verwirklicht durch Hochfrequenz-Schaltreglertechnologie mit hohem Wirkungsgrad.“ Angemerkt sei das sich die Parameter laufend in Abhängigkeit von Sonneneinstrahlung, Temperatur und Ladezustand der Batterie ändern. Wie funktioniert das nun? Das Solarmodul aus dem oben genannten Beispiel hat eine maximale Leistung von 5,4 Ampere bei 16,8 Volt, die angeschlossene Batterie eine Spannung von 13,5 Volt. Um die Differenz von 16,8 zu 13,5 Volt zu nutzen transformiert der MPP-Regler nun die 16,8 Volt-Modulspannung auf 13,5 Volt herunter. Dadurch steigt nach den Ohm’schen Gesetzen gerechnet der Strom von 5,4 auf 6,72 Ampere – voilà ! – und schon ist die maximale Leistung des Panels von 90 Wp ausgenutzt. Wie schon angeführt theoretisch, aber in der Praxis nachweisbar. Es gibt im Internet eine Reihe von Versuchsaufbauten, die dies eindrucksvoll belegen, schauen Sie einmal interessehalber bei YouTube nach „MPP PWM Vergleich“. Bei einer aktuell gegebenen Spannung eines Solarmoduls und einer ebenso aktuellen Spannung der angeschlossenen Batterie ergibt sich die nachfolgende Kurve aus Spannung (Volt) und Strom (Ampere), wir betrachten zur Erläuterung lediglich einen momentanen Zustand:



Aktueller MPP-Regler aus deutscher Produktion mit optionaler Fernanzeige für Wissbegierige, Temperaturfühler anschließbar.

Wir sehen die Kurve der Leistung eines Solarmoduls (rot) an einem momentanen Leistungspunkt, und beispielhaft drei mögliche Lastpunkte (Multi-Power-Point) aus denen der MPP-Regler den mit der maximal möglichen Leistung auswählt (grün). Dies geschieht laufend, schnell und angepasst (gleitend), womit nun auch der vierte Buchstabe des MPPT „Tracking“ erklärt ist. (Die Mathematiker unter uns haben sofort erkannt das der MPP-Punkt eine Ecke des grünen Rechtecks mit der maximalen Fläche bestimmt.) Hieraus ergibt sich auch: Je höher die Spannungsdifferenz zwischen Solarmodul und Batterie, desto größer die mögliche Leistung ist. Eine hohe Spannungsdifferenz stellt sich bei nur einem 12 Volt-Standardpanel jedoch immer nur dann ein, wenn das Solarmodul relativ kalt bleibt oder die Batterie relativ leer ist. Daher liegt eine besondere Stärke der MPP-Regler vornehmlich bei Anwendung in der kalten Jahreszeit (Herbst, Winter, Frühjahr) oder auch bei diffuser Bewölkung sowie bei relativ leeren Batterien aufgrund hoher Verbräuche. Für uns im Norden eine sinnvolle Investition für knapp unter 100 Euro. Aktuelle MPPT-Regler (Maximum-Power-Point Tracking) verfügen zumeist über eine vierstufige IUoU-Ladekennlinie, haben zwei Ausgänge, Überladungsschutz und häufig auch einen Anschluss für einen Temperatursensor – bei Batterien im Motorraum oder in heißeren Gegenden dieser Welt eine sinnvolle Option. Weiter sind häufig Displays für die Fernanzeige zu haben. Die Ladestromzunahme der MPPT-Regler beträgt im Mittel gegenüber herkömmlichen Reglern um 10 bis 30 Prozent – sagen viele Prospekte – vorsichtigere Produzenten sprechen von rund 10 Prozent per Saldo.

Elektriktrick

Die Eigenschaft der MPP-Regler, Spannung und Strom steuern zu können, kann genutzt werden um höhere Modulspannungen auf die benötigte Bordspannung herunter zu transformieren: So kann man ►



Für Leistungshungrige: Zur Erzielung der maximal möglichen Ausbeute bekommt jedes Panel einen eigenen MPPT-Regler.

zum Beispiel zwei 12-Volt-Module in Reihe schalten, bekommt dadurch die doppelte Spannung, welche nun der Regler in Abhängigkeit von Batterietyp und nach Ladezustand gewünschter Spannung umsetzt. Sinn der Maßnahme zum einen ist die bei größeren Installationen mit mehreren Panelen und/oder langen Leitungswegen möglichen dünneren Kabelquerschnitten. Zum anderen erhalte ich die bei MPP-Reglern gewünschte höhere Differenz zwischen Panel- und Batteriespannung. Bei Hausdachanlagen ist dies die Regel, hier gehen die Spannungen bis weit über 100 Volt, aber für den Einsatz auf Yachten würde ich wegen der Abschattungsproblematik eher zu 24-Volt-Modulen raten. Wie immer ein Kompromiss: Diese sind meist nur in recht großen Dimensionen erhältlich – so kann es sinnvoll sein mehrere kleine 12 Volt in Reihe zu setzen, möglich ist auch eine Kombination aus zwei in Reihe, davon zweimal parallel, um beispielsweise mehrere kleine Flächen maximal nutzen zu können.

Nun könnte der Eigner auf die Idee kommen, weil sich ja die MPP-Regler auf das angeschlossene Panel einstellen, für jedes Panel einen eigenen Regler zu nehmen. Bei ab 100 Euro pro Regler kein

billiger, aber effektiver Weg, um wirklich das letzte aus den Panelen herauszuholen. Diesen Weg wird man wohl nur einschlagen wenn es notwendig ist oder bei massiven Abschattungsproblemen.

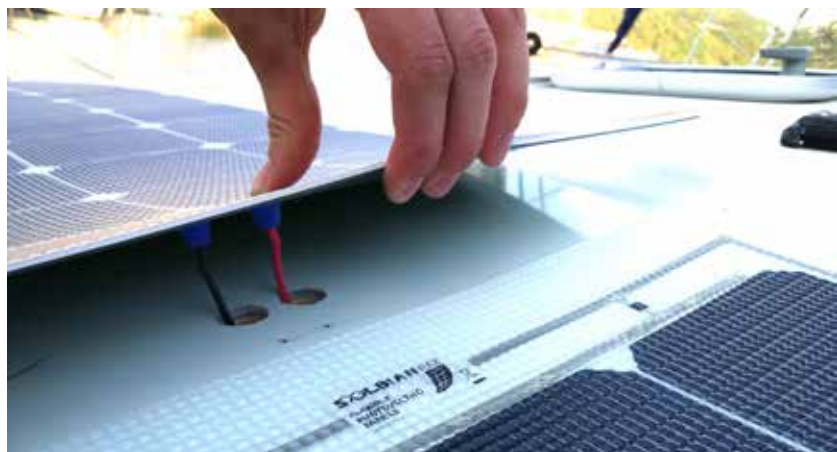
Mehrere Ladequellen

Was passiert eigentlich, wenn mehrere Quellen gleichzeitig die Batterie laden wollen? Charles Sterling, der Guru moderner Ladetechnik hat es mir einmal so erklärt: Solange die Batterien nicht voll sind und die

Spannung der Lader höher ist als die der Batterie fließt ein Ladestrom. Dieser wird begrenzt durch die Aufnahmefähigkeit der Batterien, diese wiederum ist abhängig vom Ladezustand (wie voll ist die Batterie), zudem muss noch die Temperatur der Batterie berücksichtigt werden. Eine Blei-/Säure-Batterie herkömmlicher Bauart nimmt über den groben Daumen rund 10 Prozent ihrer Kapazität auf – bei AGM sind es bis zu 30 Prozent, bei LiIon bis zum dreifachen der Kapazität. Dieser Faktor begrenzt also die maximal mögliche Aufnahme. Vergleichbar mit einem Trichter: Er hat nur eine begrenzte Durchflussmenge, nimmt aber durchaus zeitgleich mehrere Quellen auf – zumindest solange der maximal mögliche Durchfluss nicht überstiegen wird:

Also: Mehrere Ladequellen wie beispielsweise Windgenerator, Solarmodule und Lichtmaschine sind kein Problem. Alle Geräte haben (sinnvollerweise) einen eigenen Regler, optimal temperaturgeführt, und reagieren auf den Trichter. Denn bei steigender Füllung der Batterie steigt deren Spannung – das hat irgendwann zur Folge das schwächere Lader abschalten weil die Spannung des Systems aus Ladern und Batterie oberhalb der Schaltschwelle zu liegen kommt.

Nehmen wir die parallele Installation von Windgenerator und Solarmodul an einem sonnigen und windigen



Solarpanale zum Aufkleben auf Deck sind auch mit Stromabnehmern auf der Rückseite erhältlich: So ist eine stolperfreie Montage möglich.

Tag: Ist die Batterie recht vollgeladen wird ein Windgenerator-Regler älterer Bauart, der bei seiner eingestellten Spannung von sagen wir 13,8 Volt seine Ladung unterbricht, gegen die Regelung eines MPPT-Reglers verlieren. Der Solarregler lädt weiter, der des Windgenerators nicht mehr. Das ist absolut nicht tragisch, denn die Batterie ist ja bereits recht voll und eine Vollladung kann eh nur ein IuU-Regler erzielen.

Famous last words

Ganz wichtig wenn auch lästig: Schauen Sie sich GENAU die Datenblätter sowohl der ausgesuchten Solarpanele als auch die der Regler an – das muss zusammenpassen! Wenn Sie 24-Volt-Module auf einen reinen 12-Volt-Regler loslassen gibt das zumindest eine abgerauchte Sicherung im Regler. Planen Sie den Einsatz eines MPPT-Reglers und Module höherer Spannung als den der Bordspannung dann berücksichtigen Sie unbedingt die maximale Eingangsleistung des Reglers in Volt und Watt. Rechnen Sie großzügig: Bei kalten Modulen kann die Spannung und somit Leistung noch um einiges über die auf 25 Grad Celsius bezogenen Daten steigen – 10 Prozent mehr Leistung zu kalkulieren ist das Minimum.

Merksätze

- Lieber mehrere kleine als wenige große Panele (Abschattung)
- Regler in die Nähe der Batterie, ggfs. Fernanzeige in die Navigationsecke
- Kabelquerschnitte so groß wie irgend möglich
- Übergangswiderstände minimieren durch geeignete Verbinder oder Verlöten
- Regler eine Nummer größer wählen als notwendig

Mit dem hier aufgezeigten Basiswissen ausgerüstet gehen wir in der nächsten Folge an die Installation. Wie wir zeigen werden ist die Installation kein Hexenwerk, wenn ein paar Regeln beachtet werden. 