

Warum MPPT-Solarregler ?

Wenn ich so manche einschlägigen Foreneinträge lese, wo manch einer versucht, die wenigen Euro Mehrkosten für einen MPPT-Solarregler gegenüber einem SR-/PWM-Solarregler schlecht zu reden, dann frage ich mich schon manchmal, ob es zusammenpasst, ein Wohnmobil für 50-150k€ (oder mehr) zu kaufen und sich dann wegen ein paar Euro für was „G’scheites“ so aufzuregen.

Vor allem auch die öfters zu lesende Aussage, „dann mache ich eher ein zusätzliches Modul auf’s Dach,, ist totaler Nonsens, da Ersten teurer und zum Zweiten hat man dann dennoch in vielen Situationen keinen guten Solarertrag.

Aber diesen Leuten muss ich zugute halten, sie wissen es nicht besser und können den Unterschied ja auch nicht „erleben“, geschweige verstehen.

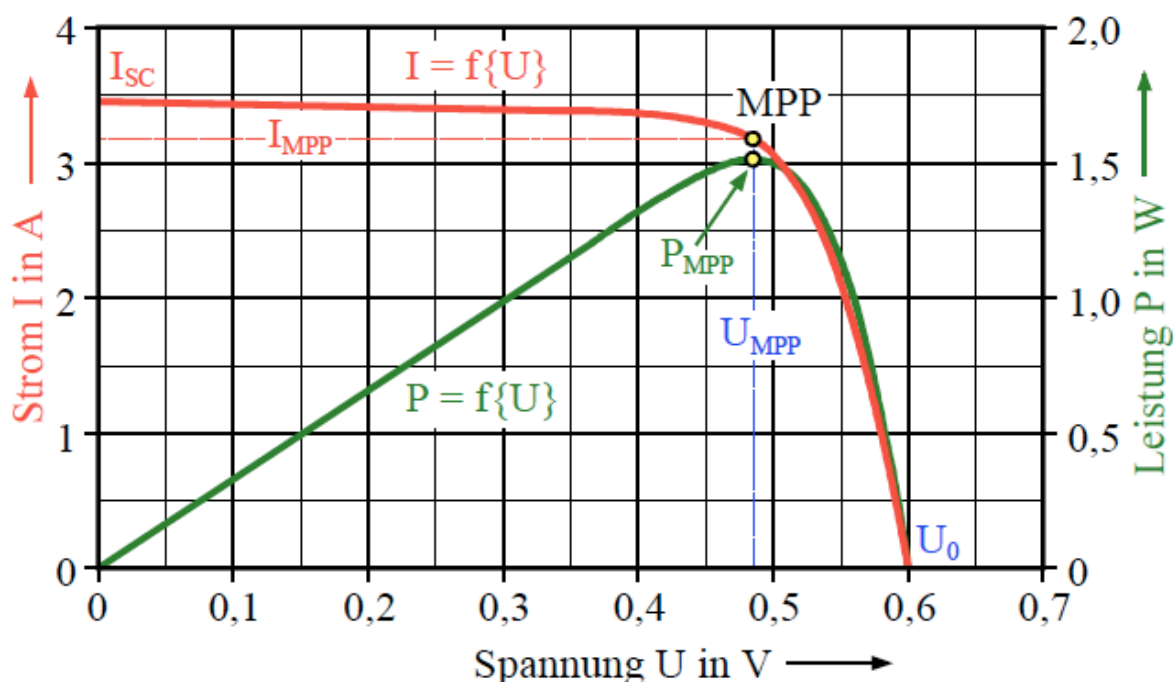
Wollen wir doch mal die Aspekte, die für einen MPPT (**M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking) - Regler, auf deutsch einen Regler, der den maximalen Leistungspunkt (Maximum Power Point) der Solarmodule sucht und diesem dann folgt (tracked), wenn sich z.B. die Umgebungsparameter ändern - Temperatur, Beleuchtungsstärke, Teilabschattung, aber auch Lastverhalten -.

Zum besseren Verständnis erst noch etwas über die „Energiequelle“ Solarmodul, dann gefolgt von den Funktionsbeschreibungen der Regler-Typen.

Solarmodul

Ein Solarmodul ist aus mehreren Solarzellen, die in Reihe geschaltet sind, aufgebaut. Eine Zelle stellt vereinfacht gesagt eine Foto-Transistor dar. Das

Modul / die Zelle liefert nahezu linear zur Beleuchtungsstärke einen Strom, ist also ein Stromquelle. Aufgrund der Halbleiterbasis liefert jede Zelle maximal (bei null Strom) etwa 0.6V (U_{oc}), woher die Leerlaufspannung von etwa 22V bei 36-zelligen Modulen herrührt. Unter Last, also bei Stromabgabe, bricht diese Spannung etwas ein, der Punkt, an dem Strom und Spannung multipliziert ein Maximum erreicht, wird als MPP (Maximum Power Point) bezeichnet und mit der Angabe des Spannungswertes U_{mpp} , bei 36-zelligen Modulen bei ca. 18V, beschrieben.



Typische Kennwerte einer Solarzelle, 36 Zellen dieser Größe ergeben ein 55Wp - Modul mit $U_{mpp} = 17.2V$

Nun denn, wenn es so einfach wäre; erstens ist dieser Arbeitspunkt je nach Beleuchtungsstärke nicht wirklich konstant, zum zweiten (vor allem) stark von der Temperatur abhängig.

Dazu kommt aber auch, das die Strom, den die Zelle hierbei liefert, wenn auch sehr gering, der Temperatur unterworfen ist.

Die Temperatur, die sich an einer Zelle ergibt ist sehr stark von der solaren Strahlung und den mechanischen Verhältnissen abhängig, sie kann bei starker Sonneneinstrahlung durchaus Werte von 80-90°C erreichen.

Nehmen wir nun als Beispiel mal eines realen „12V“-Solarmodul, also ein Modul mit 36 Zellen, einer U_{mpp} von **17.2V** und einer U_{oc} von **21.6V**. Die Leistung erst mal egal. Die Zelle, deren Werte im Diagramm oben abgebildet ist, würde z.B. ein 55Wp Modul ergeben.

Diese Werte sind angegeben bezogen auf die **NOCT** (**N**ormal **O**perating **C**ell **T**emperature), die der Hersteller für das beispielhaft angeführte Modul bei 45°C angibt (die Bezugstemperatur - NOCT, geben die Hersteller aber auch unterschiedlich an -> Wieder so eine Sache mit den Äpfeln und Birnen).

Die Spannungsänderung über die Temperatur beträgt gemäß Herstellerangabe -0.45%/K, die Stromänderung über die Temperatur +0,033%/K (das ist marginal, vergessen wir erstmal), die Leistungsänderung über die Temperatur mit -0.44%/K. Dies sind übrigens durchaus typ. Werte für ein kristallines Solar-Modul.

Nehmen wir nun mal an, das Modul erwärmt sich in praller Sonne auf 90°C, dann haben wir eine Übertemperatur von 45K am Modul bezogen auf die NOCT. Der U_{mpp} - Spannungswert fällt dann um $(45\text{K} * -0.0045/\text{K} * 17.2\text{V}) = -3.48\text{V}$, die U_{mpp} beträgt dann in diesem Arbeitspunkt nur noch $(17.21\text{V} - 3.48\text{V}) = \mathbf{13.71\text{V}}$, die U_{oc} beträgt dann **17.32V**. Aufgrund der Leistungsminderung fällt die Leistung im MPP um etwa 20% auf rund 40W.

Im umgekehrten Fall, 0°C am Solarmodul, steigt unsere U_{mpp} auf $(17.21\text{V} + 3.48\text{V}) = \mathbf{20.69\text{V}}$, die U_{oc} beträgt dann **25.97V**. Die Leistung im MPP steigt auf rund **60W** (ein eher theoretischer Wert, da wir in unseren Breiten bei solchen Temperaturen aufgrund Sonnenstand sowieso nicht mehr die Bezugseinstrahlung von $1000\text{W}/\text{m}^2$ erreichen, aber wichtig, bei Kälte steigt die relative Leistungsfähigkeit der Solarzelle).

Mit diesen drei Werten betrachten wir weiter unten die Leistungsfähigkeit der SR-/PWM-Regler, nun jedoch die Funktionsbeschreibung dieser beiden Reglerbauarten.

SR-Regler

Ein SR (Serien) - Regler ist die einfachste Art und Weise, er regelt nur die Batteriespannung, die Verhältnisse der Spannung am Solarmodul beachtet er

nicht.

Im Vollastbetrieb (Batterie kann mehr Strom aufnehmen als das Solarmodul liefern kann) regelt er vollkommen auf, in folge wird das Solarmodul soweit kurzgeschlossen, das dessen Spannung der aktuellen Akkuspannung entspricht, also maximal 14.7V (AGM-Akku) oder auch weniger (je nach Ladezustand des Akku). Der nun fließende Strom ergibt sich aus der Modulkennlinie. Der Arbeitspunkt des Solarmoduls wird sich also links vom MPP befinden, der Ladestrom = Modulstrom liegt minimal über dem MPP - Stromwert, die Spannung des Solarmoduls jedoch unterhalb dem MPP - Wert.

Die Differenz zwischen aktueller U_{mpp} (der sinnvoll optimalen Spannung) und aktueller Batteriespannung wird also nicht genutzt, der fließenden Strom ist aufgrund der etwas schrägen Kennlinie des Moduls zwar minimal höher, jedoch liegt die Leistung (das rechnerische Produkt aus Strom und Spannung) aufgrund der deutlich niedrigeren Spannung niedriger als er im MPP wäre.

Ein großer Nachteil dieser Reglertypen ist jedoch, wenn der Akku nicht mehr den vollen möglichen Solarstrom aufnehmen kann, dann beginnt der SR-Regler analog zu regeln, lässt die Solarmodulspannung soweit ansteigen (fährt an der Modulkennlinie entlang nach rechts herunter), bis nur noch der Strom fließt, den der Akku gerade aufnehmen kann. Die Folge ist, das der SR-Regler nun den Spannungsunterschied zwischen aktueller Solarspannung (dem aktuellen Arbeitspunkt) und der Akkuspannung (die ist im Betrachtungsmoment als fester Wert zu sehen), multipliziert mit dem gerade aktuell fließendem Strom, als Verlustleistung in Form von Wärme an die Umgebung abgeben muss. Dies kann zu nicht unerheblichen Abwärmemengen führen!

Der Wirkungsgrad eines SR-Reglers selbst, also das was er selbst an Energie verbraucht, liegt im allgemeinen bei 2-3%, ganz billige durchaus bei 5%.

PWM-Regler

Der PWM-Regler arbeitet ähnlich dem SR-Regler, vermeidet aber das Auftreten höherer Verlustleistungen (am Regler), in dem er die Solarmodule nur so lange an den Akku anschaltet, bis im Mittel (50% ein, 50% aus ergeben 50% Strom) der gerade mögliche Ladestrom fließt. Er schaltet variabel EIN/AUS, wobei er die EIN-Zeit und die AUS-Zeit variiert. Das „Takten“ erfolgt mit einer Frequenz von mehreren tausend Schaltvorgängen pro Sekunde. Im Regler werden

Kondensatoren zum „glätten“ dieser pulsartigen Ströme verwendet.

Vorteil diese Reglers, seine Verlustleistung ist deutlich geringer, denn die Halbleiterschalter werden entweder voll EIN, oder völlig AUS geschaltet, die Verluste an ihnen sind dadurch minimiert, zuzüglich dynamischer Schaltverluste (dies ginge hier aber zu weit, dies näher zu erklären)

Der Eigenverbrauch liegt ähnlich dem eines MPPT-Reglers, also im Bereich 3-5%, wobei auch hier gilt, die etwas teurerem haben im allgemeinen einen geringeren Eigenverbrauch.

Der PWM-Regler vermeidet also die möglicherweise hohe Verlustleistung im Teillastbetrieb des SR-Reglers.

Beide Reglertypen (SR und PWM) kümmern sich also nicht um den bestmöglichen Arbeitspunkt am Solarmodul (U_{mpp}), sondern arbeiten nur auf die aktuell gültige Akkuspannung als Arbeitspunkt, die sie auf den vorgegebenes Wert begrenzen/regeln.

Nehmen wir nun mal die Spannungswerte, die ich oben beim Solarmodul angegeben / berechnet habe:

- Betriebspunkt bei **NOCT (45°C)** am Solarmodul. Das Solarmodul könnte optimalerweise **17.21V** liefern, der Regler knüppelt diese aber (gehen wir mal von nahezu vollem AGM-Akku aus) auf 14.7V zusammen. Es werden also mindestens $17.21V - 14.7V = 2.5V$ oder 14.6% der Spannung „nicht genutzt“. Wenn man das obige Diagramm betrachtet und die Arbeitspunkte genau einträgt und ausrechnet, ergeben sich die Werte $U=14.7V$, $I=3.33A$, das ergibt eine Leistung von 49.0W. Der MPP hat aber die Werte $U=17.21V$, $I=3.167A$, das ergäbe eine Leistung von 54.5W. Die **Leistungsminderung** in diesem Betriebsfall beträgt also $((49.0W/54.5W) - 1) * 100 = -10.1\%$. Wenn wir das mit einer Nassbatterie betrachten (also 14.4V), wäre natürlich die Leistungsminderung noch größer (-16%).
- Betriebspunkt bei **0°C (45K unter NOCT)**. Wie oben, jedoch werden nun mindestens $20.69V - 14.7V = 5.99V$ oder fast 29% der möglichen Spannung nicht ungenutzt. Wenn man das obige Diagramm wiederum

heranzieht und die Arbeitspunkte genauso einträgt und ausrechnet, ergeben sich die Werte $U=14.7V$, $I=3.367A$, ergibt eine Leistung von $49.5W$. Der MPP hat die Werte $U=20.69V$, $I=3.167A$, die Leistung ergibt sich zu $65.5W$. Die **Leistungsminderung** in diesem Betriebsfall beträgt also mindestens $((49.5W/65.5W) - 1) * 100 = -24.4\%$ (-30% bezogen auf $14.4V$).

- Betriebspunkt bei **90°C (45K über NOCT)**. Wie oben, jedoch wird der optimale Spannungspunkt wieder nicht im MPP gefunden, es stellt sich der Wert $U=13.7V$. Die Spannung des Solarmoduls liegt bereits unter der Ladeschlussspannung des Akku, die **Leistungsminderung** in diesem Betriebsfall lässt sich nicht mehr bestimmen, da die Batterie einfach nicht mehr vollgeladen wird, es kann nur noch ein geringer bis gar kein Ladestrom mehr fließen, ein Solarertrag wäre nur noch dann gegeben, wenn ein Laststrom fließen würde.

Ergebnisbewertung:

In zwei der drei Fälle erreicht der SR- oder PWM-Regler nicht annähernd den MPP und nutzt somit die vom Solarmodul lieferbare Energie nicht voll aus, der dritte Fall ist eben jener, Sonne genug, aber die Batterien werden nicht mehr (richtig) voll.

Insbesondere der Betrieb bei niedrigen Temperatur, also im Winter, wo wir sowieso nicht mit Sonne verwöhnt sind, bleiben rund 24% der möglichen Erträge ungenutzt.

Die Eigenverbräuche der Regler blieben in diesen Rechenbeispielen unberücksichtigt, da am Ergebnis sich relativ nichts ändert, ebenso ändert die Strahlungsleistung nichts an den prinzipiellen Relationen.

Kurzum, der SR-/PWM-Regler macht es praktisch nie richtig, in Schulnoten ausgedrückt maximal ein AUSREICHEND.

MPPT - Solarregler

MPPT-Regler sind normalerweise (hier das Datenblatt prüfen, oder beim Hersteller nachfragen) als sogenannte Buck-Boost-Wandler (Tiefsetz-/Hochsetz-Steller) aufgebaut.

Sie können sowohl eine höherer Spannung am Eingang (also vom Solarmodul) korrekt umsetzen in eine niedriger Spannung am Akku. Der Spannungsunterschied wird hier in einen Stromunterschied umgewandelt, in diesem Fall ist der Ausgangsstrom dann höher als der Solarmodulstrom (Eingangsstrom). Er wandelt also Energie mit einem höheren Spannungsniveau auf eines mit niedrigerem Spannungsniveau, praktisch nahezu verlustfrei (3-4% Verluste) um. Er kann somit die höheren Spannungen bei normalen und kühlen Umgebungsbedingungen optimal nutzen. Die im obigen Beispiel errechneten und dort „verschwendeten“ 14-24% werden, für die Akkuladung effizient genutzt.

Aber eben auch umgekehrt, er kann auch die Spannung von Eingang zu Ausgang hochsetzen (dann etwa mit 4-5% Verlusten), wodurch der oben aufgeführte Betriebspunkt mit heißem Solarmodul, wenn der MPP unterhalb der notwendigen Akkuladespannung liegt, zu 100%, da ein normaler Betriebsfall.

Der MPPT-Regler weist prinzipbedingt zwei Regelsysteme auf, das erste ist die Akkuspannungsregelung, übergeordnet die MPP-Regelung.

Bis dahin würde ich die Schulnote GUT bis Sehr GUT vergeben.

Solarregler bei Teilverschattung

Aber betrachten wir mal „übliche“ Betriebsbedingungen, das WoMo steht ja nicht immer in der prallen Sonne mit baumloser Umgebung. Im vorherigen Beitrag habe ich die Fälle von teilbeschatteten Solarmodulen im Beispiel ausführlich beschrieben.

Nehmen wir den einfachsten Fall, das oben aufgeführte Solarmodul wird teilbeschattet, so das z.B. die Hälfte der Zellen ausfällt (die andere Hälfte ist aufgrund der Bypassdiode in der Lage Strom an den inaktiven Zellen vorbei zu liefern), dann liefert ein **MPPT-Regler**, bei dann nur noch $U_{mpp} \sim 8.0V$ (8.6V (halbe) Solarspannung im MPP abzgl. etwa 0.6V der Bypassdiode) dennoch Energie; halt nur noch etwa **46.5%**, aber es wird liefert (das er hier etwas weniger als die Hälfte liefert, liegt ja nicht am Regler, sondern an der Bypassdiode, die zu einem Spannungsverlust führt).

Der SR-/PWM-Regler kann hier nichts mehr liefern, weil sie U_{oc} des Solarmoduls auch halbiert ist und **unterhalb der Akku-Ruhe-spannung** liegt, also ergibt sich in diesem Fall **0% Energieertrag**.

Man könnte auch sagen, in diesem Falle liefert der MPPT-Regler unendlich mehr als ein SR-/PWM-Regler, denn $45.6\%/0\% = \text{unendlich}$. Quatsch, sicher sind aber **46,5%** der Nennleistung ist wesentlich (enorm) besser als **gar nichts**.

In Schulnoten möchte ich hier die obigen Noten nun für diesen Fall folgendermaßen korrigieren,

- Der **SR-/PWM-Regler** erhält einen Notenabzug von einer vollen Note, da der diesen, doch wohl häufig auftretenden Betriebsfall überhaupt nicht verarbeiten kann, im Ergebnis dann eine **UNGENÜGEND**.
- Der **MPPT-Regler** hat eine Zuschlag von einer Note hier redlich verdient, im Ergebnis dann **SEHR GUT**, er holt immer noch das mögliche aus den Solarmodulen.

Mehr brauche ich da wohl nicht dazu ausführen ...

*Aber **Achtung**: Es gibt auch (leider sehr viele) MPPT-Regler, die als reine Tiefsetzsteller ausgelegt sind, die haben dann nur Vorteile, solange die U_{mpp} gleich oder größer der Akkuspannung ist, aber bei Teilabschattung versagen diese dann zwangsläufig*

Anpassen von 24V-Solarmodulen an 12V-Akkusystem

Diese 72-zelligen (oder auch als 60-zellige am Markt verfügbar) Solarmodule können nicht mit einem SR-/PWM-Regler wirtschaftlich an einem 12V-Akkusystem betrieben werden, technisch ist das durchaus zwar möglich, entspricht dann etwa „dem Autofahren mit angezogener Handbremse“. Ausschließlich mit einem MPPT-Regler kann dies dann auch wirtschaftlich sinnvoll umgesetzt werden, da dieser eben Energie auf unterschiedlichen Spannungsniveau's korrekt behandeln kann.

Gleiches gilt auch für Solarmodule mit deutlich unter 36 Zellen, wie ich z.B. schon beruflich in einer Anwendung realisieren durfte. Dort konnten aus Platzgründen nur 18 Solar-Zellen sinnvoll am Gerät untergebracht werden aufgrund der zur Verfügung stehenden Fläche für das Solarmodul - hier wurde ein

kundenspezifisch gefertigtes Modul verwendet -, bei normalen und heißen Temperaturen lag da die MPP immer unter der Akkuspannung (ebenso bei Schwachlicht), nur bei Kälte und starker Einstrahlung darüber. Mit einem MPPT-Regler (hier als eigene Schaltung in die Elektronik integriert) konnte hier bei allen Bedingungen dann eine gute Ausbeute realisiert werden.

Hier macht es der MPPT-Regler eben möglich; einzig das Tiefsetzen/Hochsetzen der Spannung sollte sich auf max. Faktor 2.5 (beim Hochsetzen eher unter Faktor 2 bleiben) beschränken, sonst arbeitet der Spannungswandler nicht mehr in einem Bereich, wo Wirkungsgrade um die 95% und höher erreichbar sind. -> *Dies ist auch der Grund, warum gängige Dünnschicht-Solarmodule, die meist mit einer U_{mpp} von 90V bis 110V am Markt verfügbar sind, weniger geeignet erscheinen für die Ladung eines 12V-Akku.*

Speziell aber für die Anwendung von 24V-Modulen (oder zwei 12V-Modulen in Serie) ist es optimal einen MPPT-Regler einzusetzen, die Minderung der Ströme und somit der Zuleitungsverluste Solarmodul zu MPPT-Regler sind hier deutlich geringer, so das der Gesamtwirkungsgrad immer höher ausfällt, als mit gleicher Leistung und 12V-Modulen.

Auch hier kann er problemlos dann die Teilverschattungsfälle noch abdecken.

Fazit:

Der richtige MPPT-Regler liefert meistens zwischen 10% bis über 32% mehr Energie aus den 12V-Solarmodulen, als ein SR-/PWM-Regler. Im Betrieb bei Teilverschattung ist nur dieser ein Garant, das überhaupt noch Energie vom Solarmodul geliefert werden kann.

Die andere Seite, der MPPT - Regler ist auch die einzigste Möglichkeit, Solarmodule mit nahezu beliebiger Zellenzahl an ein Akkusystem anzupassen.