

Samstag, 28. Juni 2014

1. Einführung

PWM- und MPPT-Laderegler werden beide viel zum Laden von Batterien mit Solarenergie genutzt.

Der PWM-Regler ist im Prinzip ein Schalter, der eine Solaranlage mit der Batterie verbindet. Als Ergebnis wird die Spannung der Anlage fast auf die Spannung der Batterie heruntergezogen.

Der MPPT-Regler ist komplexer (und teurer): Er passt seine Eingangsspannung so an, dass die Solaranlage die maximale Leistung erbringt. Dann wird diese Energie umgewandelt, um die variierenden Spannungsanforderungen der Batterie und der Last zu versorgen. Auf diese Weise entkoppelt er im Prinzip die Anlage und die Batteriespannung. So kann sich zum Beispiel auf der einen Seite des MPPT-Ladereglers eine 12 Volt Batterie befinden und auf der anderen Seite Paneele, die in Serie geschaltet sind, um 36 Volt zu erzeugen.

Es ist allgemein anerkannt, dass ein MPPT- einen PWM-Regler in einem kalten bis mäßig warmen Klima übertrifft, wohingegen beide Regler in einem subtropischen bis tropischen Klima in etwa die gleiche Leistung erbringen.

Wir werden hier die Auswirkungen von Temperatur ausführlicher betrachten und einen quantitativen Leistungsvergleich beider Regler-Topologien anstellen.

2. Die Strom-Spannungskurve und die Leistungs-Spannungskurve eines Solar-Paneels

Die Beispiele auf den kommenden Seiten basieren auf einem durchschnittlichen 100 W / 36 Zellen monokristallinen Solar-Paneel mit folgenden technischen Daten:

100 W panel

Cells	36			
Pm	100 W	Temp. coeff. of Pm	γ	-0,45 %/°C
Vm	18 V	Temp. coeff. of Vm	ϵ	-0,47 %/°C
Im	5,56 A	Temp. coeff. of Im	δ	0,02 %/°C
Voc	21,6 V	Temp. coeff. of Voc	β	-0,35 %/°C
Isc	6,12 A	Temp. coeff. of Isc	α	0,05 %/°C

Tabelle 1: Technische Daten des Solar-Paneels, wie es in den nachfolgenden Beispielen verwendet wird.

Die Strom-Spannungskurve dieses Paneels wird in Abbildung 1 angezeigt.

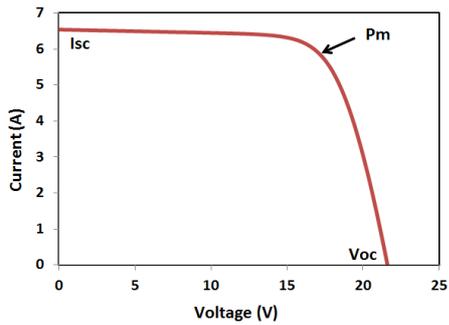


Abb. 1 Strom-Spannungskurve eines 100 W / 36 Zellen Solar-Paneels
Standardisierte Testbedingungen (STC): Zelltemperatur: 25°C, Bestrahlungsstärke:
1000 W/m², AM: 1,5

Von dieser Grundkurve lässt sich die Leistungs-Spannungskurve herleiten durch das Darstellen $P = V \times I$ gegen V .

Als Ergebnis erhalten wir die blaue Kurve in Abbildung 2 unten.

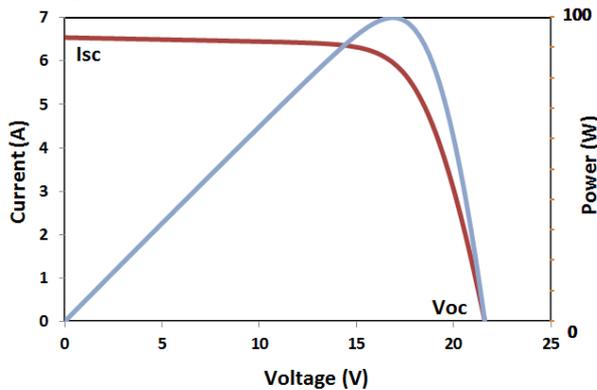


Abb. 2 Strom-Spannungskurve (braun) und ist Leistungs-Spannungskurve (blau, $P = V \times I$)

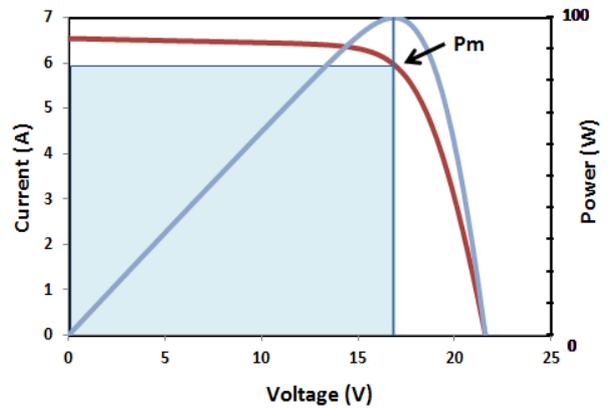


Abb. 3: Die Oberfläche des blauen Rechtecks proportional zum Produkt $P_m = V_m \times I_m$

Es ist klar, dass die vom Panel erhaltene Leistung Null ist, wenn es kurzgeschlossen wird ($0 \times I_{sc} = 0$) oder, wenn dem Panel kein Strom entnommen wird ($V_{oc} \times 0 = 0$).

Zwischen diesen beiden Null-Leistungspunkten erreicht das Produkt $P = V \times I$ ein Maximum: den Maximum Power Point (kurz: MPP, auf deutsch: Punkt maximaler Leistung) ($P_m = V_m \times I_m$).

Die Bedeutung des MPP lässt sich folgendermaßen darstellen:

Das Produkt $V_m \times I_m$ ist proportional zur Oberfläche des in Abbildung 3 angezeigten Rechtecks. P_m wird erreicht, wenn die Oberfläche dieses Rechtecks am größten ist. Abbildung 4 und 5 zeigen weniger optimale Ergebnisse, wenn die Leistung bei einer Spannung gewonnen wird, die zu niedrig oder zu hoch ist.

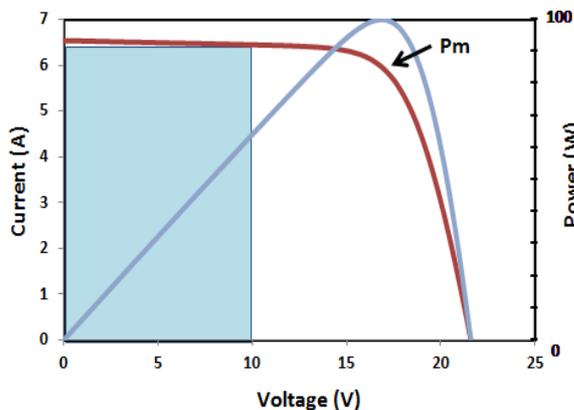


Abb. 4 Geringerer Leistungsertrag:
Spannung ist zu niedrig

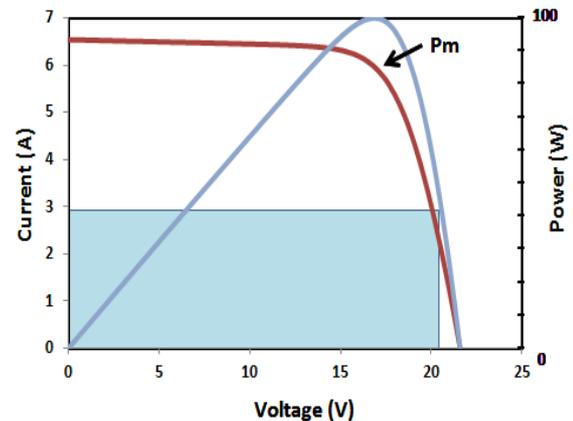


Abb. 5 Geringerer Leistungsertrag:
Spannung ist zu hoch

Der maximale Ausgang eines 100 W Solar-Panels beträgt per Definition 100 W unter STC (Zellentemperatur: 25°C, Bestrahlungsstärke: 1000 W/m², AM: 1,5).

Anhand von Abbildung 3 lässt sich ablesen, dass im Falle eines kristallinen Panels mit 100 W / 36 Zellen die Spannung, welche dem Punkt maximaler Leistung entspricht $V_m = 18$ V ist und der Strom $I_m = 5,56$ A beträgt.

Daraus ergibt sich 18 V x $5,56$ A = 100 W.

Schlussfolgerung:

Um die Höchstleistung aus einem Solar-Panel zu erhalten, sollte ein Lade-Regler in der Lage sein, den optimalen Strom-Spannungs-Punkt auf der Strom-Spannungskurve zu wählen: den Punkt maximaler Leistung.

Ein MPPT-Regler tut genau das.

Die Eingangsspannung eines PWM-Reglers entspricht im Prinzip der Spannung der an seinen Ausgang angeschlossenen Batterie (plus Spannungsverlusten in der Verkabelung und dem Regler). Das Solar-Panel wird aus diesem Grund in den meisten Fällen nicht an seinem Punkt maximaler Leistung verwendet.

3. Der MPPT-Lade-Regler

Wie in Abbildung 6 gezeigt, lässt sich die Spannung, die dem Punkt maximaler Leistung entspricht, ermitteln, indem man eine vertikale Linie durch den höchsten Punkt der Leistungs-Spannungs-Kurve zieht. Der Strom I_m lässt sich ermitteln, indem man eine horizontale Linie durch den Schnittpunkt der V_m Linie und der Strom-Spannungskurve zieht.

Diese Werte sollten den in Tabelle 1 angegebenen Werten entsprechen.

In diesem Beispiel $P_m = 100$ W, $V_m = 18$ V und $I_m = 5,56$ A.

Mit seinem Mikroprozessor und hochentwickelter Software ermittelt der MPPT-Regler den Punkt maximaler Leistung P_m . In unserem Beispiel, regelt er dann die Ausgangsspannung des Solar-Panels auf $V_m = 18\text{ V}$ und entnimmt dem Panel $I_m = 5,56\text{ A}$.

Was passiert als nächstes?

Der MPPT-Lade-Regler ist ein DC-DC-Wandler, der Energie mit einer höheren Spannung in Energie mit einer niedrigeren Spannung umwandeln kann. Die Energiemenge ändert sich dabei nicht (abgesehen von kleinen Verlusten beim Umwandlungsprozess). Ist die Ausgangsspannung niedriger als die Eingangsspannung, ist daher der Ausgangsstrom höher als der Eingangsstrom, so, dass das Produkt $P = V \times I$ konstant bleibt.

Wird eine Batterie mit $V_{bat} = 13\text{ V}$ geladen, beträgt der Ausgangsstrom daher

$$I_{bat} = 100\text{ W} / 13\text{ V} = 7,7\text{ A}.$$

(Ähnlich kann ein AC-Wandler eine Last mit $4,4\text{ A}$ bei 23 VAC versorgen ($4,4 \times 23 = 100\text{ W}$) und daher $0,44\text{ A}$ aus dem 230 V Stromnetz ($230 \times 0,44 = 100\text{ W}$) entnehmen).

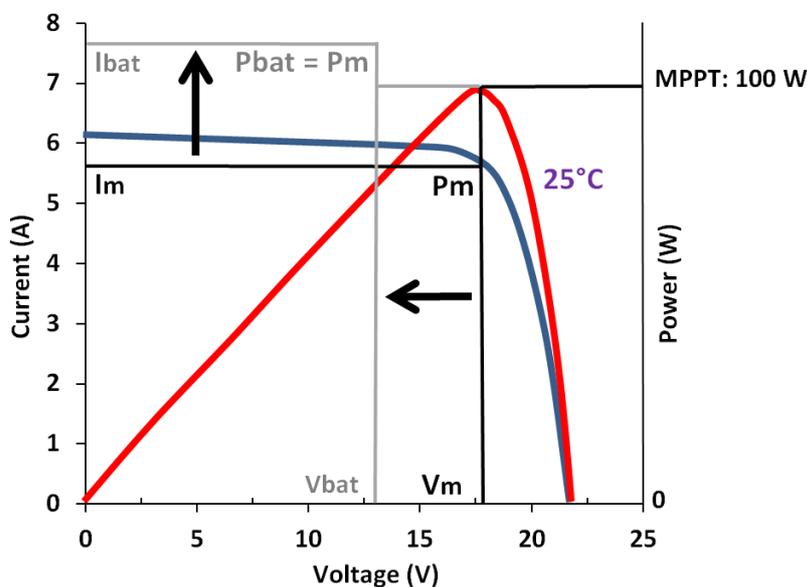


Abb. 6 MPPT-Regler, graphische Darstellung der DC-DC-Umwandlung

$$P_m = V_m \times I_m = 18\text{ V} \times 5,6\text{ A} = 100\text{ W}, \text{ und}$$

$$P_{bat} = V_{bat} \times I_{bat} = 13\text{ V} \times 7,7\text{ A} = 100\text{ W}$$

4. Der PWM-Lade-Regler

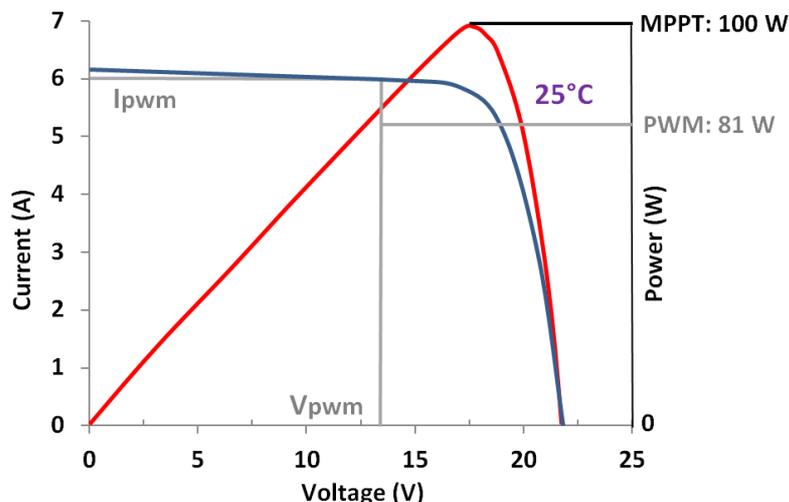


Abb. 7 PWM-Lade-Regler

In diesem Fall kann die am Solar-Panel anliegende Lade-Spannung ermittelt werden, indem eine vertikale Linie am Spannungspunkt gezogen wird, der V_{bat} plus 0,5 V entspricht. Die zusätzlichen 0,5 V stellen den Spannungsverlust in der Verkabelung und dem Regler dar. Der Schnittpunkt dieser Linie mit der Strom-Spannungs-Kurve ergibt den Strom $I_{pwm} = I_{bat}$.

Ein PWM-Regler ist kein a DC-DC-Wandler. Der PWM-Regler ist ein Schalter, der ein Solar-Panel mit der Batterie verbindet. Wenn der Schalter geschlossen ist, sind die Spannung des Panels und die der Batterie beinahe gleich. Ausgehend von einer entladenen Batterie beträgt die anfängliche Ladespannung in etwa 13 V., und geht man von einem Spannungsverlust von 0,5 V über die Verkabelung plus den Regler aus, ist das Panel bei $V_{pwm} = 13,5$ V. Die Spannung steigt langsam zusammen mit dem zunehmenden Ladezustand der Batterie an. Wenn die Konstanzspannung erreicht ist, beginnt der PWM-Regler damit, das Panel zu trennen und wieder anzuschließen, um ein Überladen zu verhindern (daher der Name: Pulse Width Modulated controller, auf Deutsch: pulsweitenmodulierter Regler).

Abbildung 7 zeigt, dass in unserem Beispiel mit $V_{bat} = 13$ V und $V_{pwm} = V_{bat} + 0,5$ V = 13,5 V, die über das Panel gewonnene Leistung $V_{pwm} \times I_{pwm} = 13,5$ V x 6 A = 81 W beträgt. Das sind 19 % weniger, als die mit dem MPPT-Regler gewonnenen 100 W.

Es ist klar, dass bei 25°C ein MPPT-Regler einem PWM-Regler vorzuziehen ist.

Temperatur hat allerdings starke Auswirkungen auf die Ausgangsspannung des Solar-Paneels. Diese Auswirkungen werden im nächsten Abschnitt behandelt.

5. Die Auswirkungen von Temperatur

5.1 Die Auswirkungen von Temperatur sind zu groß, als dass man sie vernachlässigen könnte

Wenn sich ein Paneel aufgrund der Sonneneinstrahlung erwärmt, so verringern sich sowohl die Leerspannung als auch die Spannung des Punkts maximaler Leistung. Der Strom bleibt jedoch praktisch konstant. Anders ausgedrückt: die Strom-Spannungskurve verschiebt sich mit ansteigender Temperatur nach links, wie in Abbildung 8 gezeigt.

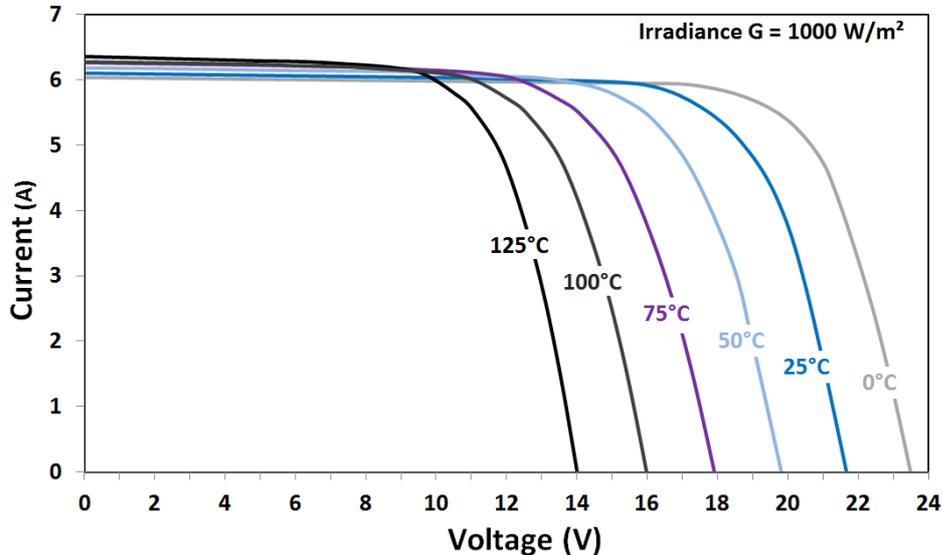


Abb. 8 Die Strom-Spannungskurve verschiebt sich mit ansteigender Temperatur nach links.

Wie in Abbildung 9 unten gezeigt, verschiebt sich offensichtlich auch der Punkt maximaler Leistung nach links und nach unten, da das Produkt $V_m \times I_m$ mit ansteigender Temperatur abnimmt.

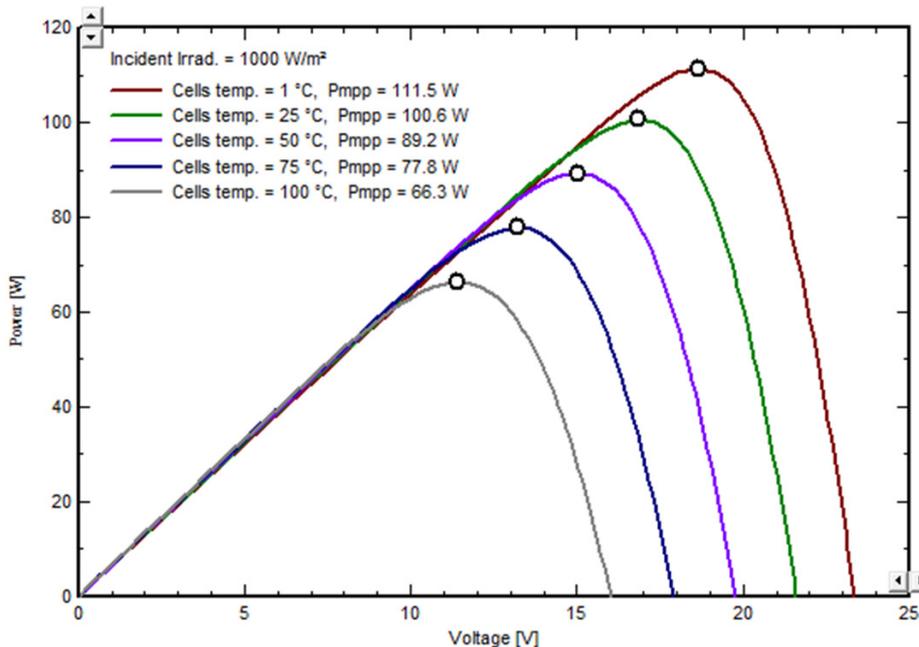


Abb. 9 Der Punkt maximaler Leistung verschiebt sich mit ansteigender Temperatur nach links und nach unten.

5.2. Der MPPT-Regler bei einer Zelltemperatur von 75°C

Die MPPT-Leistungs-, Strom- und Spannungswerte lassen sich wie folgt von den technischen Angaben des Solar-Paneels herleiten:

$$P_m(75^\circ\text{C}) = P_m(25^\circ\text{C}) \times (1 + (75^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \times \gamma) = 100 \times (1 + (50 \times -0,45 / 100)) = 77,5 \text{ W}$$

Derselben Methode folgend:

$$I_m(75^\circ\text{C}) = 5,6 \text{ A}$$

$$V_m(75^\circ\text{C}) = 13,8 \text{ V}$$

Und eine Überprüfung: $I_m(75^\circ\text{C}) \times V_m(75^\circ\text{C}) = 5,6 \times 13,8 = 77,3 \text{ W}$. Dies ist ein Unterschied von 0,2 W im Vergleich mit dem $P_m(75^\circ\text{C})$, wie wir zuvor bestimmt. Das ist nah genug und stimmt damit überein.

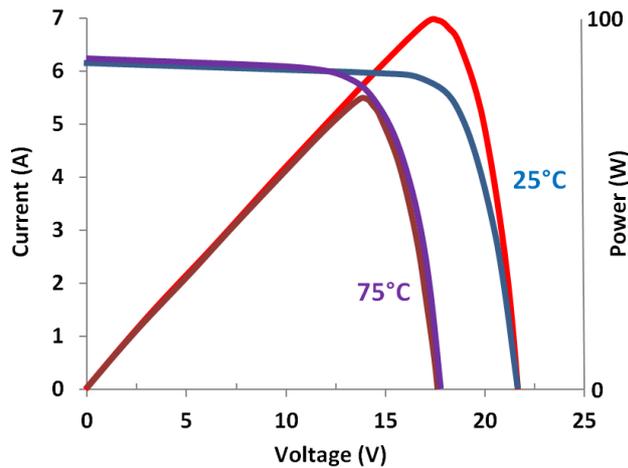


Abb. 10 Strom-Spannungs- und Leistungs-Spannungskurven bei 25°C und bei 75°C

Hinweis:

Die meisten Hersteller von Solar-Paneelen geben die Temperaturkoeffizienten von I_m (δ) und V_m (ϵ) nicht an und wenn doch, wird ϵ oft ein viel zu niedriger Wert zugeordnet. Dann ergibt sich bei der Berechnung von V_m mithilfe seiner Temperaturkoeffizienten ein falscher Wert (der in den meisten Fällen viel zu optimistisch ist). Auch $I_m \times V_m$ wird dann falsch sein, d. h. $I_m \times V_m \neq P_m$, was mathematisch gesehen unmöglich ist.

5.3 Der PWM-Regler bei einer Zellentemperatur von 75°C

Wir gehen noch immer von einer Batteriespannung von 13 V aus, die am Paneel anliegende Spannung ist 13,5 V. Mithilfe von Abbildung 11 lässt sich der PWM-Strom ermitteln, indem die vertikale Spannungslinie und die horizontale Stromlinie gezogen wird. Der sich daraus ergebende PWM-Strom ist 5,95 A und der Solar-Paneel-Ausgang beträgt $13,5 \text{ V} \times 5,7 \text{ A} = 77 \text{ W}$.

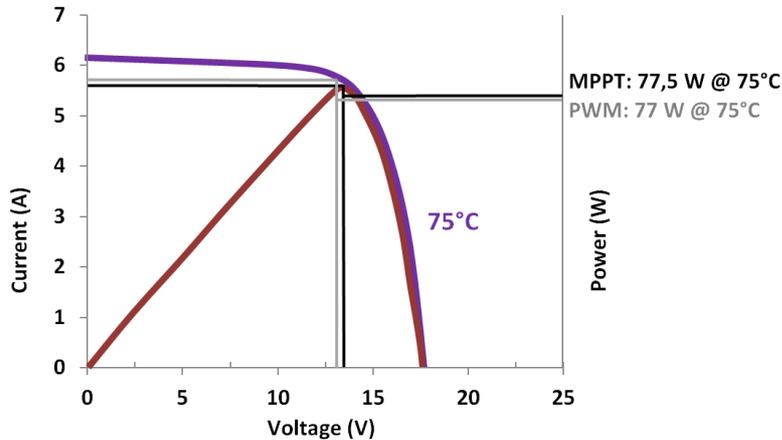


Abb. 11 Vergleich der Leistungen eines MPPT- und eines PWM-Reglers bei einer Paneel-Temperatur von 75°C.

Schwarze Linien: MPPT (77,5 W).

Graue Linien: PWM (77 W). MPPT-Leistungsvorteil: Null

Schlussfolgerung: Bei $T_{cell} = 75^\circ\text{C}$ und $V_{bat} = 13 \text{ V}$ ist der Leistungsunterschied zwischen den beiden Reglern unerheblich.

5.4 Zellentemperatur 100°C

Es ist interessant zu verfolgen, was bei noch höheren Temperaturen passiert.

Abbildung 12 zeigt, wie es sich bei 100°C verhält.

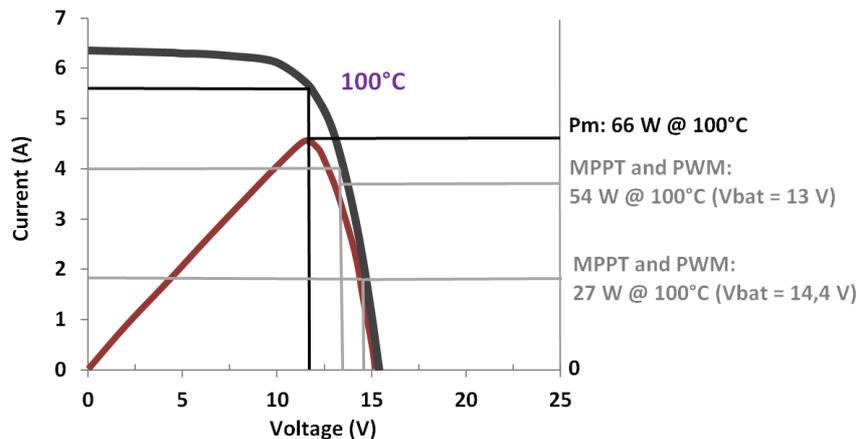


Abb. 12 Bei einer Paneel-Temperatur von 100°C liegt der Punkt maximaler Leistung bei 11,7 V

Die meisten MPPT-Regler können eine niedrigere Spannung nicht in eine höhere Spannung umwandeln, da sie dafür nicht konstruiert wurden. Wird die MPPT-Spannung V_m niedriger als V_{bat} , arbeiten sie daher wie ein PWM-Regler und schließen das Paneel direkt an die Batterie an.

Wie in Abbildung 11 gezeigt: wenn $V_{bat} = 13 \text{ V}$, ist der vom Paneel gewonnene Strom auf 4 A begrenzt.

Und die Situation verschlechtert sich bei steigender Batteriespannung (bzw. steigenden Temperaturen): Der Ladestrom reduziert sich schnell auf nur wenige Ampere.

Wenn der MPPT-Regler jedoch in dieser Situation noch immer an seinem Punkt maximaler Leistung arbeiten könnte, könnte er 66 W gewinnen, unabhängig davon, ob V_{bat} nun niedrig oder hoch ist!

6. Die Lösung

Es ist offensichtlich, dass in unseren Beispiel weder die MPPT- noch die PWM-Regler bei hohen Zelltemperaturen Leistung bringen.

Die Lösung, um die Leistung von MPPT-Reglern bei hohen Zelltemperaturen zu verbessern, liegt in der Steigerung der Paneel-Spannung durch Erhöhung der Anzahl der in Serie geschalteten Zellen.

Es ist klar, dass diese Lösung bei PWM-Reglern nicht anwendbar ist: Eine Erhöhung der in Serie geschalteten Zellen reduziert die Leistung bei niedrigen Temperaturen.

Im Falle von MPPT-Reglern: Ersetzen Sie das 12 V / 100 W Paneel durch ein 24 V / 100 W Paneel oder durch zwei in Serie geschaltete 12 V / 50 W Paneele. Hierdurch wird die Ausgangsspannung verdoppelt und der MPPT-Regler lädt eine 12 V Batterie mit 66 W (5,1 A bei 13 V), bei einer Zelltemperatur von 100°C, siehe Abbildung 13.

Ein zusätzlicher Vorteil: Da sich die Paneel-Spannung verdoppelt hat, halbiert sich der Paneel-Strom ($P = V \times I$ und P hat sich nicht verändert, jedoch hat sich V verdoppelt).

Das Ohm'sche Gesetz lehrt uns, dass die Verluste aufgrund der Kabelwiderstände P_c (Watt) = $R_c \times I^2$ betragen, wobei R_c für den Kabelwiderstand steht. **Was wir an dieser Formel erkennen können ist, dass sich bei einem vorgegebenen Kabelverlust, die Kabelquerschnittsfläche um einen Faktor von vier reduzieren lässt, wenn die Solaranlagenspannung verdoppelt wird.**

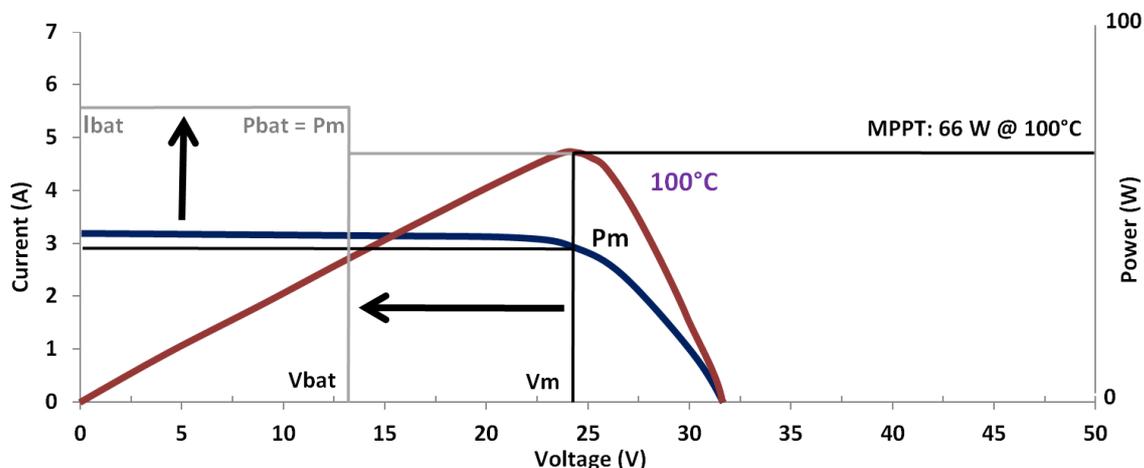


Abb. 13 Zwei 12 V / 50 W Paneele in Serie anstatt eines 12 V / 100 W Paneels

$$P_m = V_m \times I_m = 23,4 \text{ V} \times 2,8 \text{ A} = 66 \text{ W} \text{ und}$$

$$P_{bat} = V_{bat} \times I_{bat} = 13 \text{ V} \times 5,1 \text{ A} = 66 \text{ W}$$

Schlussfolgerung:

Bei der Verwendung eines MPPT-Lade-Reglers gibt es zwei überzeugende Gründe dafür, die PV-Spannung zu erhöhen (indem man die Anzahl der in Serie geschalteten Zellen erhöht):

- Es wird mit der Solaranlage so viel Leistung wie möglich erbracht, sogar bei hohen Zellentemperaturen.
- Die Kabelquerschnittsfläche wird reduziert, was auch die Kosten verringert.

7. Relative Leistungskurven

7.1 Relative Leistung als eine Funktion von Temperatur

Lassen Sie uns nun von der Annahme ausgehen, dass der MPPT-Regler an eine Solaranlage mit ausreichend in Serie geschalteten Zellen angeschlossen ist, um eine MPPT-Spannung zu erzeugen, die einige Volt höher ist, als die höchste Batteriespannung.

Zum Beispiel:

12 V Batterie: 72 Zellen (eine 24 V Anlage) oder mehr

24 V Batterie: 108 Zellen (eine 36 V Anlage) oder mehr

48 V Batterie: 216 Zellen (eine 72 V Anlage) oder mehr

Der PWM-Regler ist an eine Solaranlage mit exakt derselben Wp-Leistung mit der üblichen Anzahl an in Serie geschalteten Zellen angeschlossen und wird verwendet, um eine 12 V, 24 V bzw. 48 V Batterie zu laden: jeweils 36, 72 oder 144 Zellen.

Die relative Leistung der beiden Regler als eine Funktion von Zellentemperatur lässt sich wie in Abbildung 14 angegeben vergleichen.

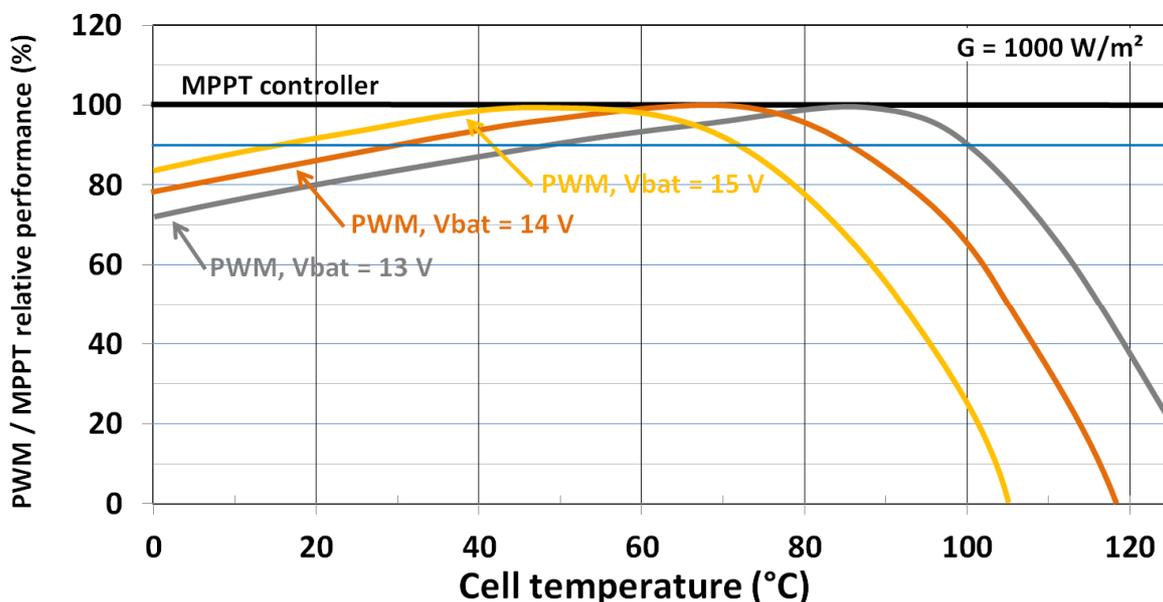


Abb. 14 Relativer PWM / MPPT-Leistungsvergleich als Funktion von Zellentemperatur und Batteriespannung unter STC und ausgehend von einem Verlust von 0,5 V in der Verkabelung plus Regler.

Die Leistung des MPPT-Reglers wird auf 100 % eingestellt. Die PWM-Leistung entspricht der MPPT-Leistung (100 % relative Leistung), wenn die Batteriespannung plus Verluste in der Verkabelung und dem Regler zufällig der MPPT-Spannung entspricht. Es werden drei relative Leistungskurven für den PWM angezeigt, die auf drei unterschiedlichen Batteriespannungen basieren. Wie erwartet wird der 100 % Punkt bei niedrigeren Temperaturen erreicht, wenn die Batteriespannung ansteigt.

7.2 Absolute Leistung als eine Funktion von Temperatur

Das Einbeziehen von Temperaturabhängigkeit von P_m ergibt die folgende Abbildung 15. Die Leistung des MPPT-Reglers wird unter Verwendung der STC bei 25 C auf 100 % eingestellt.

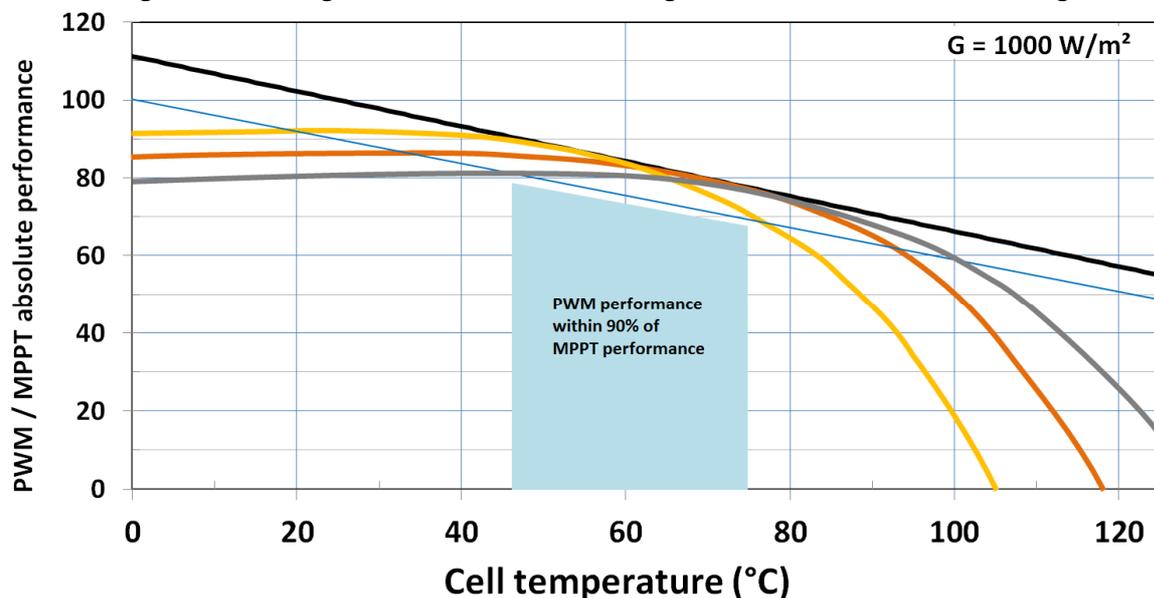


Abb. 15 Vergleich der absoluten PWM / MPPT-Leistung als Funktion der Zelltemperatur und der Batteriespannung unter STC und unter Annahme eines Verlustes von 0,5 V in der Verkabelung und dem Regler.

Der blaue Bereich zeigt, dass ein PWM-Regler über einen relativ breiten Batteriespannungs- (13 V bis 15 V) und Temperaturbereich (45°C und 75°C) nahezu eine genauso gute Leistung erbringt (innerhalb 10 %) wie ein MPPT-Regler.

Die 10 % Begrenzung wird durch die dünne blaue Linie in Abbildung 14 und 15 angegeben.

Bevor irgendwelche Schlussfolgerungen gezogen werden können, müssen zunächst noch einige andere Solarzellen- und Systemparameter betrachtet werden.

7.3 Der Einfluss der Bestrahlungsstärke

Der Ausgang eines Solar-Paneels ist in etwa proportional zur Bestrahlungsstärke. Jedoch bleibt V_m beinahe konstant, solange die Bestrahlungsstärke 200 W / m^2 überschreitet. Daher beeinflusst die Bestrahlungsstärke die Leistungskennzahl des MPPT / PWM-Reglers nicht besonders, solange sie den Wert 200 W / m^2 übersteigt (siehe Abbildung 16).

Bei geringer Bestrahlungsstärke (bedeckter Himmel, im Winter) fällt V_m jedoch rapide ab und ein MPPT-Regler, der an eine Anlage mit einer viel höheren Nennspannung als die der Batterie angeschlossen ist, erbringt weit mehr Leistung, als ein PWM-Regler.

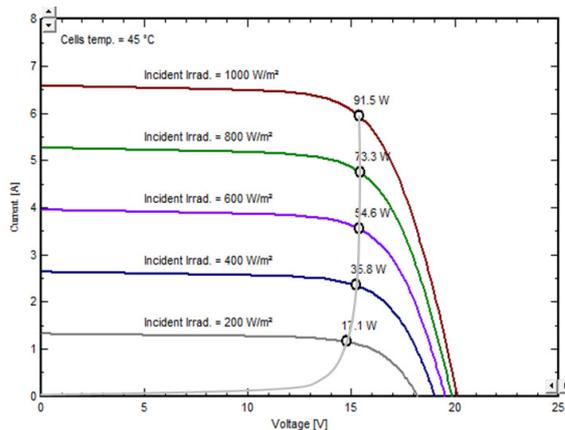


Abbildung 16: Abhängigkeit von M_p und V_{mp} von der Bestrahlungsstärke

7.4 Monokristalline oder polykristalline Paneele

Laut den Datenblättern des Herstellers ist V_m im Schnitt bei polykristallinen Paneelen ein wenig niedriger. Bei einem 12 V Paneel beträgt die Differenz zwischen 0,35 V und 0,7 V und der Temperaturkoeffizient ist bei beiden Geräten ähnlich. Hieraus ergibt sich, dass sich die PWM-Kurven in Abbildung 13 und 14 bei polykristallinen Paneelen zwischen 5 und 10°C nach links verschieben.

7.5 Teilverschattung

Teilverschattung verringert die Ausgangsspannung. Daher bietet der MPPT-Regler im Falle einer Teilverschattung einen klaren Vorteil gegenüber einem PWM-Regler.

7.6 Verluste in der Verkabelung und dem Regler selbst

Bei einer guten Anlage sind diese Verluste im Vergleich zu der Auswirkung von Temperatur nur gering. Bitte beachten Sie, dass in diesem Dokument die Werte für Leistung, Spannung und Strom am Paneel-Ausgang abgelesen werden und dabei keine Verluste berücksichtigt werden, es sei denn, es ist etwas anderes angegeben.

7.6 Zellentemperatur

Die nächste Frage, die es zu beantworten gilt, lautet: Welche Temperatur haben die Solarzellen in der Praxis?

Ein erster Hinweis gibt uns die NOCT (**N**ormal **O**perating **C**ell **T**emperature, auf Deutsch: Nennbetriebs-Zellentemperatur). Diese wird heute von den meisten Solar-Paneel-Herstellern angegeben.

Die NOCT-Bedingungen werden wie folgt definiert:

- Umgebungstemperatur: 20°C
- Bestrahlungsstärke: 800 W/m²
- Luftmasse: 1,5
- Windgeschwindigkeit: 1 m/s
- Montage: Rückseite offen (freistehende Anlage)
- Keine elektrische Last: es wird dem Paneel keine Leistung entnommen

Laut den Angaben des Herstellers beträgt die durchschnittliche NOCT = 45°C. Das bedeutet, dass unter den angegebenen Bedingungen die Solarzellentemperatur 25°C höher ist, als die Umgebungstemperatur.

Eine allgemeinere Formel zur Berechnung der Zelltemperatur T_c lautet:

$$T_c = T_a + G/U \quad \text{oder} \quad \Delta T = T_c - T_a = G/U$$

wobei

T_a : Umgebungstemperatur

G : Bestrahlungsstärke (W/m^2)

U : Wärmeverlustfaktor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \Delta T$)

Und ein einfaches Modell für den Wärmeverlustfaktor ist:

$$U = U_c + U_v \cdot W_v$$

Wobei U_c eine konstante Komponente und U_v ein zur Windgeschwindigkeit W_v (m/s) an einer Anlage proportionaler Faktor ist.

Hieraus ergibt sich für die Wärmeberechnung folgende Formel:

$$T_c = T_a + G/(U_c + U_v \cdot W_v) \quad \text{oder} \quad \Delta T = T_c - T_a = G/(U_c + U_v \cdot W_v)$$

Abgeleitet von http://files.pvsyst.com/help/index.html?noct_definition.htm und einigen anderen Websites sind die ungefähren Werte für U_c und U_v :

Freistehende Anlagen:

$$U_c \approx 20 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \Delta T$$

$$U_v \approx 12 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \Delta T / \text{m/s}$$

Anlagen mit einer vollständig isolierten Rückseite:

$$U_c \approx 10 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \Delta T$$

$$U_v \approx 6 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \Delta T / \text{m/s}$$

Abbildung 17 zeigt den sich daraus ergebenden Anstieg der Zelltemperatur in Bezug auf die Umgebungstemperatur für freistehende Anlagen und für Anlagen mit einer vollständig isolierten Rückseite.

Natürlich ist dabei der Luftstrom sehr wichtig.

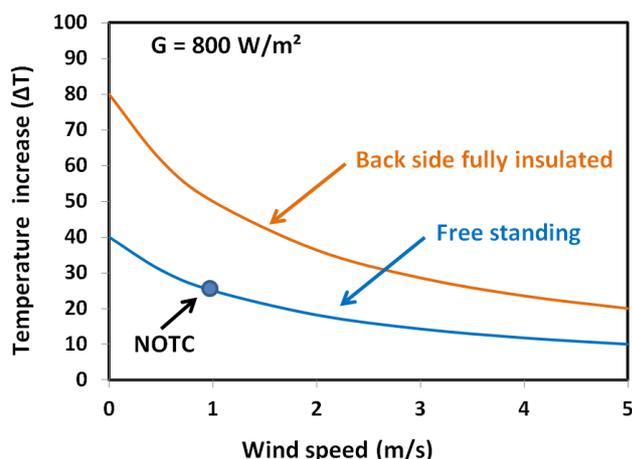


Abb. 17 Windgeschwindigkeit und Temperatur steigen an.

Freistehende Anlage

Bei Windstille kann der Temperaturanstieg von 40°C bei einer freistehenden Anlage an einem heißen sonnigen Tag in Europa zu Zelltemperaturen von 70 bis 80°C führen. Unter solchen Bedingungen liegt die PWM-Leistung 10% hinter der MPPT-Leistung.

Vollständig isolierte Rückseite.

Bei einer Anlage mit einer vollständig isolierten Rückseite kann die Zelltemperatur regelmäßig die 100°C Marke übersteigen. Das vollständige Laden einer Batterie mit einem PWM-Regler wird dann unmöglich, da der Ladestrom nur sehr niedrig oder sogar Null ist, bevor die Konstanzspannung erreicht ist.

Bei den meisten Anlagen ist die Rückseite nicht vollständig isoliert. Bei der Montage auf einem abgeschrägten Dach zum Beispiel, wurde darauf geachtet, dass zwischen dem Dach und der Rückseite der Solar-Paneele Luft zirkulieren kann.

Jedoch ist die Wärmekapazität von Luft nur sehr gering. Die unter den Paneelen zirkulierende Luft kann sich schnell an die Temperatur der Paneele anpassen, wodurch es nach den ersten paar Dezimetern des Luftweges zu gar keinem Wärmeaustausch mehr kommt. Aus diesem Grund kann man für den Großteil der Anlage den Rückseiten-U-Wert für Anlagen mit vollständig isolierter Rückseite verwenden.

8. Allgemeine Schlussfolgerung

Temperatur

Ein standardmäßiges kristallines Solar-Paneel mit einer Nennspannung von 12 V besteht aus 36 in Serie geschalteten Zellen. Bei einer Zelltemperatur von 25°C ist der Ausgangsstrom dieses Paneels nahezu konstant bei bis zu ungefähr 17 V. Oberhalb dieses Spannungswertes fällt der Strom rapide ab, wodurch die maximale Leistung bei rund 18 V erzeugt wird.

Unglücklicherweise nimmt der Spannungspunkt, bei dem der Strom anfängt zu fallen mit steigender Temperatur ab. Unterhalb dieses Spannungspunktes bleibt der Strom jedoch praktisch konstant und wird nicht durch die Temperatur beeinflusst.

Die Ausgangsleistung und die Ausgangsspannung nehmen beide ungefähr 4,5 % pro 10°C Temperaturanstieg ab.

PWM-Regler

Wenn eine Solaranlage über einen PWM-Lade-Regler an die Batterie angeschlossen ist, wird ihre Spannung nahezu auf die der Batterie herabgesetzt. Dies resultiert bei niedrigen und bei sehr hohen Solarzellentemperaturen in einer suboptimalen Wattleistung am Leistungsausgang (Watt = Amp x Volt).

In Phasen mit viel Regen oder sehr bedecktem Himmel oder bei unregelmäßigen hohen Lasten kann es vorkommen, dass die Batteriespannung unter ihren gewöhnlichen Wert abfällt. Hierdurch würde die Paneel-Spannung noch weiter herabgesetzt und so den Ausgang noch weiter vermindern.

Bei sehr hohen Zelltemperaturen kann der Rückgangspunkt der Spannung unter den Spannungswert fallen, der benötigt wird, um die Batterie voll aufzuladen.

Da die Anlagenfläche linear mit der Leistung, der Kabelquerschnittsfläche und der Kabellänge ansteigt, steigen beide mit der Leistung. Das führt zu beträchtlichen Kabelkosten bei Anlagen, die einige 100 Watt übersteigen.

Der PWM-Laderegler ist daher eine gute kostengünstige Lösung nur für kleinere Systeme, wenn die Temperatur ein wenig zu hoch ist (zwischen 45°C and 75°C).

MPPT-Regler

Abgesehen von der Funktion eines einfachen Reglers, bietet ein MPPT-Regler auch die Funktion eines DC-DC-Spannungswandlers, der die Spannung der Anlage in diejenige Spannung umwandelt, welche die Batterien benötigen. Dabei geht nur sehr wenig Leistung verloren.

Ein MPPT-Regler strebt danach, die Energie von der Anlage in Nähe seines Punktes maximaler Leistung zu gewinnen, während er den schwankenden Spannungsanforderungen der Batterie und der Lasten nachkommt. Auf diese Weise entkoppelt er im Prinzip die Anlage und die Batteriespannung. So kann sich auf der einen Seite des MPPT-Ladereglers eine 12 Volt Batterie befinden und auf der anderen Seite zwei 12 V-Paneele, die in Serie geschaltet sind, um 36 Volt zu erzeugen.

Ist er an eine PV-Anlage mit einer wesentlich höheren Nennspannung als die der Batterie angeschlossen, liefert daher ein MPPT-Regler sogar bei sehr hohen Zelltemperaturen oder bei Bedingungen mit einer niedrigen Bestrahlungsstärke einen Ladestrom. Unter diesen Umständen würde ein PWM-Regler nicht viel bringen.

Mit zunehmender Anlagengröße steigt sowohl die Kabelquerschnittsfläche als auch die Kabellänge. Die Option, mehr Paneele in Serie zu schalten und den Strom zu senken, ist ein wichtiger Grund für die Installation eines MPPT-Reglers, sobald die Anlagenleistung einige hundert Watt übersteigt (12 V Batterie), oder mehrere 100 Watt (24 V oder 48 V Batterie).

Daher ist ein MPPT-Lade-Regler die bessere Wahl:

- a) wenn die Zelltemperatur häufig niedrig (unter 45°C) oder sehr hoch (über 75°C) ist.*
- b) wenn die Verkabelungskosten wesentlich durch das Heraufsetzen der Anlagenspannung reduziert werden können.*
- c) wenn der Systemausgang bei geringer Bestrahlungsstärke wichtig ist.*
- d) wenn Teilverschattung ein Thema ist.*