

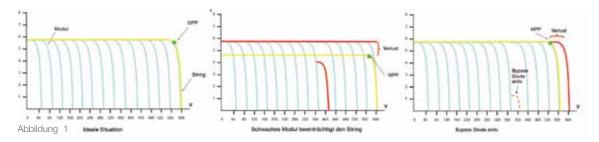
# **IMPEDANZANPASSUNG**

Der wissenschaftliche Hintergrund des seriellen Tigo Energy® Maximizer™ (MM-ES)

Tigo Energy hat eine revolutionäre Lösung entwickelt, um den Energieertrag von Photovoltaik-Anlagen zu optimieren. Wie andere modulnahe Balance-of-System Technologien (BoS) ermöglichen Tigo Energy® Maximizer™ es jedem einzelnen Modul, das jeweils mögliche Maximum an Energie an den String abzugeben und eliminieren somit negative Auswirkungen leistungsschwacher Module auf die restliche PV-Anlage. Allerdings gelingt dies nur Tigo Energy® mit einem bisher unerreichten Wirkungsgrad und Präzision, sowie mit den wenigsten zusätzlichen elektronischen Bauteilen. Dies garantiert maximale Zuverlässigkeit und minimale Kosten. Das vorliegende Dokument erläutert den neuen und patentierten Ansatz der "Impedanzanpassung" von Tigo Energy.

# DIE LÖSUNG FÜR MODULE MIT ABWEICHUNGEN

Die heutigen PV-Anlagen bestehen in der Regel aus einzelnen Modulen die über eine Reihenschaltung zu Strings miteinander verbunden werden, bis die Höchstspannung erreicht wird (600 V nach europäischen bzw. 1 kV nach US-Standards). Ein polykristallines Siliziummodul mit einer Leerlaufspannung (Uoc) von 35 V wird in der Regel mit 10 oder 11 weiteren Modulen zu einem String in Reihe geschaltet. Bei größeren Installationen werden mehrere Strings parallel geschaltet. Bedingt durch die Reihen- und Parallelschaltung bestimmt das schwächste Modul den Energieertrag aller anderen Module der Anlage. (Abbildung 1).



Es ist deshalb wichtig, dass die Module einer Photovoltaikanlage von ihrer Leistung her gut zusammenpassen und vom gleichen Hersteller stammen. Die meisten Hersteller von PV-Modulen führen präzise Messungen der einzelnen Module vor Auslieferung durch (Flashtest). Beigelegte Flashtestresultate ermöglichen es Installateuren, durch sorgfältige Zusammenstellung Modulabweichungen signifikant zu reduzieren. Doch reicht das aus, um Verluste durch Abweichungen gänzlich zu vermeiden? Laut

umfassenden Daten, die Tigo Energy auf großen, professionell geplanten Solaranlagen gesammelt hat, ist dies lediglich in den ersten Wochen nach der Installation der Fall. Umwelteinflüsse wie ungleichmäßige Verschmutzung, Siliziumalterung, ungleiche Temperaturverteilung sowie leicht unterschiedliche Ausrichtung gewinnen jedoch im Laufe der Zeit an Bedeutung und führen zu deutlichen Verlusten (selbst ohne Verschattung). Abbildung 2 zeigt die Grafik einer repräsentativen Installation in Nordkalifornien. Die Messungen wurden zur Mittagszeit

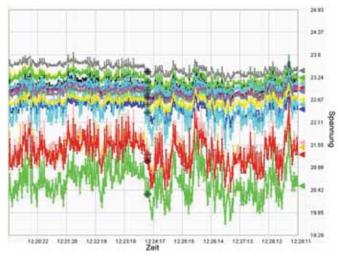


Abbildung 2 – Spannungsverteilung eines typischen kristallinen PV-Strings (Berkeley, Kalifornien - 2008)

im Juni 2008 bei voller Sonneneinstrahlung [1] durchgeführt. Die Grafik gibt die Spannung (V) der einzelnen Module eines Strings wieder, mit einer Messung pro Sekunde. Würde das System mit höchster Effizienz arbeiten, so würde jedes der 170 W multikristallinen Module um den Vmp Wert von 24,6 V operieren. Zu erwarten wäre eine breite, gerade Linie im Bereich um 24 Volt. Das ist ganz offensichtlich nicht der Fall. Die niedrige Spannung und hohe Leistungsdifferenz (15%) repräsentieren erhebliche Verluste. Die Grafik zeigt aber auch, dass ein Modul nur selten am MPP der Gesamtanlage arbeitet. Die Module, die unterhalb ihres Vmp-Wertes arbeiten, zeigen starke Spannungsschwankungen, sobald der Wechselrichter nachregelt. Hingegen sind Module mit vergleichsweise höheren Spannung weniger stark beeinträchtigt. [1] (Den vollständigen Artikel finden Sie auf unserer Website unter http://www.tigoenergy.com/brochures/PVI\_article.)

# "TRIAL-AND-ERROR" MPP TRACKING (MAXIMAL POWER POINT)

Bei den meisten der heute installierten Anlagen werden zentrale Wechselrichter mit variablen DC Eingängen eingesetzt, was als die kostengünstigste und zuverlässigeste Alternative anerkannt ist. Nur dank dem Wechselrichter als AC-DC-Wandler kann Energie in das Netz eingespeist werden. Die Prozesse zur Stromwandlung (DC/DC und DC/AC) werden seit über 50 Jahren von den führenden Wechselrichterstellern ständig optimiert, haben einen hohen Wirkungsgrad und sind weltweit von Behörden und Stromanbietern akzeptiert.

Der MPP Tracker eines Wechselrichters versucht, die Anlage ständig an ihrer höchstmöglichen Ausgangsleistung zu halten. Um den Punkt zu finden, an dem die gesamte Anlage bei gegebener Sonneneinstrahlung die maximale Leistung liefern kann, benutzt der Tracker in der Regel einen "Trial-and-Error"-Algo- rithmus, der die an das System angelegte Last reguliert. Durch Messen des Gleichstromeingangs stellt der Tracker fest, ob weiterhin in dieselbe Richtung oder in die entgegengesetzte Richtung reguliert werden soll. Dieser Prozess strebt dabei ständig nach der Spitzenleistung, mit der das System aber nur selten und auch dann nur vorübergehend arbeitet. Es gibt viele verschiedene Varianten des Algorithmus, da aber Eingangsdaten auf Strom und Spannung der Gesamtanlage beschränkt sind, haben sie alle eine nur eingeschränkte Genauigkeit. Das Tracken wird bei Änderung der Sonneneinstrahlung (z.B. durch Wolken oder Verschattung) deutlich komplexer, da sich der MPP der einzelnen Module dynamisch verschiebt. Die Stabilisierung des Systems kann noch einige Minuten in Anspruch nehmen, selbst nachdem

sich die Wolke verzogen hat. Da jedes Modul über einige Bypassdioden verfügt, kann ein besonders leistungsschwaches Modul "abgeschaltet" werden, sobald der Strom, der vom Wechselrichter angefordert wird, deutlich seine eigene Leistung übersteigt.

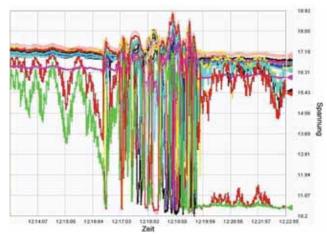


Abbildung 3 – Auswirkungen einer Wolke auf das System (Santa Cruz, Kalifornien)

Abbildung 3 zeigt Messwerte von einer kommerziellen PV-Anlage in Santa Cruz in Kalifornien an einem sonnigen Tag im Juni 2008 mit Wolken (mit Stringwechselrichter). Auf der Grafik sind extreme Spannungsschwankungen der Module erkennbar. Weil Schwankungen auch noch bestehen bleiben, als die Wolke schon längst vorübergezogen ist, ist die Photovoltaikanlage mehrere Minuten lang instabil. Schaut man sich die Strom- und Spannungskurven der multikristallinen 125 W Module an, bemerkt man kaum Änderungen der Vmp Werte bei unterschiedlicher Sonneneinstrahlung. Die nach dem Wolkenfeld auftretenden Spannungsschwankungen verstärken die Differenzen zwischen den Modulen, ziehen Dioden in Mitleidenschaft und repräsentieren Verluste, die oft sogar über 50% liegen können. In einem Umfeld, in dem es zu häufigen Änderungen der Sonnenstrahlungsintensität kommt (z.B. durch Wolken), wie etwa in östlichen Staaten der USA, in Deutschland oder in Japan, kann das Unvermögen, den Vmp Wert konstant zu halten und das System schnell zu stabilisieren, zu bedeutenden Energieverlusten führen.

#### **IMPEDANZANPASSUNG**

Nachdem die Experten von Tigo Energy die Analyse der Daten von zahlreichen "perfekten" Großinstallationen abgeschlossen hatten, war klar, dass umweltbedingte Leistungsdifferenzen nach wie vor ein Problem darstellen. Wenn es Tigo Energy gelänge, die Ausgangsleistung eines jeden Moduls individuell zu optimieren, könnten große Photovoltaikanlagen bis zu 8% höhere Erträge liefern und weniger "perfekte" Anlagen sogar bis zu 20%. Die Voraussetzung um einen zusätzlichen Mehrwert für Solarprojekte zu schaffen, war die Entwicklung eines neuartigen, zuverlässigen Lösungsansatzes mit einem hohen Wirkungsgrad (geringster Leistungsverlust durch Elektronik der PV-Module) bei gleichzeitig niedrigen Einsatzkosten. Der patentierte und innovative Ansatz zur Maximierung der Produktionsleistung wird diesen Anforderungen gerecht und liefert gleichzeitig eine anwenderfreundliche aktive Steuerungkonsole für das Projektmanagement. Der Tigo Energy® Maximizer™ ES (serielle Version) und die intelligente Controller Tigo Energy® Maximizer™ Management Unit (MMU) setzen den von Tigo Energy entwickelten Ansatz der "Impedanzanpassung" um und maximieren die Produktionsleistung jedes einzelnen Modules. Das System wurde als Overlay-Technologie ausgelegt und ist daher optimal kompati- bel mit Komponenten gegenwärtiger Anlagen, auch zur Nachrüstung auf allen bestehenden Systemen.

## WAS "IMPEDANZANPASSUNG" NICHT IST

Um die Optimierungstechnologie von Tigo Energy zu verstehen, muss man zuerst einmal klarstellen, was diese Technologie nicht ist. Der Solarindustrie ist das Problem der Modulabweichungen seit den Anfängen der Photovoltaik wohlbekannt, auch wenn bislang kein dem von Tigo Energy vorgebrachten vergleichbares Zahlenmaterial vorlag. Die Anwendung individueller Leistungspunktregelung (Maximum Power Point Tracking) auf immer kleinere Teilbereiche erbrachte zwar Fortschritte, diese wogen jedoch die Zusatzkosten in größeren Anlagen kaum auf. Die einfache Zerlegung von zentralen Wechselrichtern in kleinere Einheiten liefert nach wie vor suboptimale Ergebnisse.

#### Es ist KEIN "verteiltes MPPT"

Alle Algorithmen für das Power Point Tracking basieren auf einem "Trial-and-error"-Prinzip mit Laständerung und nachfolgender Messung der Auswirkung, und sind in der Regel im zentralen Wechselrichter einer Solaranlage implementiert. Führende Wechselrichterhersteller haben diese Algorithmen optimiert, sodass sie mit den verfügbaren Eingabewerten sehr gute Ergebnisse erzielen. Da diese Systeme aber nur mit der Eingangsspannung und -leistung arbeiten, haben diese Tracker grundlegende Probleme mit Abweichungen zwischen Modulen und schnellen Änderungen der Sonneneinstrahlung (wie zum Beispiel durch vorbeiziehende Wolkenfelder). Moderne DC-DC-Architekturen haben das "Trial- anderror" Verfahren für das Power Point Tracking auf String- und sogar Modulebene eingeführt, unter Hinzufügen von Buck-and-Boost-Wandlern und modulnaher Intelligenz für eine feinere Auflösung. Die Genauigkeit der Leistungsregelung wurde dadurch teilweise verbessert. Tigo Energy jedoch hat eine Technologie entwickelt, die keinen verteilten "Trial-and-error" Ansatz" anwendet, um den Arbeitspunkt eines jeden Moduls zu ermitteln. Die Fähigkeit zur Impedanzanpassung versetzt Tigo Energy in der Lage, den EXAKTEN optimalen Arbeitspunkt genau und schnell zu ermitteln und vermeidet gleichzeitig den Einsatz von teurer Elektronik mit relativ niedrigen Wirkungsgraden an einzelnen Modulen.

#### Es ist KEIN "Mikrowechselrichter"

Wechselrichter sind in zahlreichen Ausführungen mit einer Leistung von 200 Watt bis 2 Megawatt erhältlich und umfassen in der Regel einen MPP-Tracker, oft eine DC-DC-Verstärkerstufe, und die DC-AC-Wandlung. Indem sie die Leistung voll ausschöpfen, sind Projektplaner in der Lage, die BoS-Kosten zu minimieren (pro Watt, siehe Abb. 4) und die Effizienz der AC-Wandlung zu optimieren. Das Konzept der AC-Module ist vor vielen Jahren mit der Zielsetzung eingeführt worden, jedes Modul mit einem Wechselrichter auszustatten und die Auflösung vom Power Point Tracking dadurch zu verbessern. Diese kleinen Wechselrichter haben bei kleinen, teilverschatteten Anlagen zwar zu einigen positiven Ergebnissen geführt, bleiben aber nach wie vor weit hinter der Leistung zentraler Wechselrichter zurück, was den Wirkungsgrad und Kosten pro Watt angeht. Bei der Technologie von Tigo Energy handelt es sich nicht um Mikrowechselrichter. Das Unternehmen ist

der Ansicht, dass durch Produktinnovationen deutlich höhere (2,5% bis 3%) Wirkungsgrade erreicht werden können, und zwar mit einer höheren Zuverlässigkeit und zu geringeren Kosten als dies mit dem Verkleinern herkömmlicher Wechselrichter auf 200W möglich ist. Außerdem ist Tigo Energy ist fest davon überzeugt, dass Photovoltaikprojekte durch die Beibehaltung der heutigen Trennung von DC-Erzeugung und zentraler AC- Wandlung besser für zukünftige Anforderungen von Gleichstromverbrauchern (z.B. Rechenzentren, Fertigungsanlagen und Elektroautos) sowie den Bedürfnissen zur Stromspeicherung gerüstet sind.



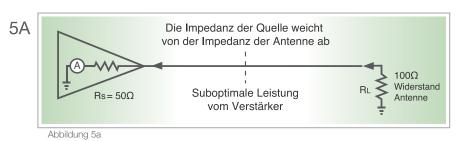
## Es ist KEIN "verteilter DC-DC-Wandler"

In vielen Regionen liegen die Obergrenzen der Stringspannung relativ niedrig (600 V oder darunter) und machen oft eine galvanische Isolierung des Systems erforderlich. Aus iesem Grund enthalten viele ein- und dreiphasige Inverter eine DC-Verstärkerstufe, um die Eingangsspannung an der Wechselspannungsbrücke

auf einen optimalen Wert für eine effiziente Wandlung zu bringen. Einige Leistungsoptimierer koppeln diese Stufe ab und verlagern sie an das Modul. Durch Buck&Boost auf Modulebene wird die Leistungsregelung lokal durchgeführt und eine fest vorgegebene Spannung (seriell oder parallel) an einen zentralen Wechselrichter geliefert. In Märkten, in denen eine galvanische Trennung gefordert wird (z.B. in den USA), können diese Lösungen einen Wirkungsgrad liefern, die mit einem herkömmlichen System vergleichbar ist, wenn ein spezieller Wechselrichter ohne Transformator, ohne Tracker und mit fester Eingangsspannung verwendet wird. Die meisten Großprojekte und Installationen in Europa setzen aber bereits potentialfreie, transformatorlose Architekturen mit sehr hohen Wirkungsgraden ein. Die Einbringung einer zusätzlichen Stufe in ein System ohne Transformator oder einem herkömmlichen Wechselrichter mit Trennung senkt den Wirkungsgrad um 2-3%. Hinzu kommt, dass die resultierenden Verluste in Form von Abwärme die Module aufheizen und deren Ertrag mindern. Tigo Energy ist der Ansicht, dass der Gesamtwirkungsgrad des Systems mehr von einer innovativen Regeltechnik profitiert als von einer Umverteilung der herkömmlichen Verstärkerstufen. Die Geräte von Tigo Energy arbeiten mit allen Wechselrichtern auf dem Markt und gewähren somit dem Kunden die Flexibilität, die beste Technologie für seine Region und seine Anforderungen auszuwählen.

#### WAS "IMPEDANZANPASSUNG" IST

Der Begriff Impedanzanpassung wird häufig im Bereich der Hochfrequenzanwendungen verwendet, wo sie äußerst wichtig für hohen Wirkungsgrad und geringste Interferenzen ist. Für maximale Sendeleistung sollte die Impedanz, die zum Sender zurückgeworfen wird, seiner internen Impedanz entsprechen. Die Antenne weist gewöhnlich einen festen ohmschen Widerstand auf, so dass maximale Leistungsübertragung bei einer gleich großen charakteristischen Impedanz erreicht wird. Als Beispiel soll der Fall eines Leistungsverstärkers dienen, mit einem inneren Widerstand von  $50~\Omega$  und einer externen Antenne mit einem Widerstand von  $100~\Omega$ , beide bei der Arbeitsfrequenz des Schaltkreises gemessen (Abbildung 5a). In dieser Konfiguration ist die Leistung des Verstärkers weit vom optimalen Wert entfernt. Um Höchstleistung zu erzielen, muss der Verstärker  $50~\Omega$  am Ausgang "sehen". Wenn ein Widerstand von  $100~\Omega$  parallel zur Antenne geschaltet wird, erreicht der Leistungsverstärker zwar seine maximale Ausgangsleistung, aber ein Großteil dieser Leistung wird durch den



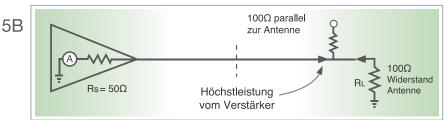


Abbildung 5b - Höchfrequenz-Impedanzanpassung



100  $\Omega$  Widerstand verbraucht, statt übertragen zu werden (Abbildung 5b). Damit keine Leistung durch den elektrischen Widerstand verschwendet wird, können ein Kondensator und eine Spule verwendet werden, um bei der Arbeitsfrequenz der Schaltung eine "virtuelle" Impedanz von 50  $\Omega$  zu reflektieren (Abbildung 5c).

Es versteht sich von selbst, dass dieser Ansatz nicht 1:1 auf die Elektronik einer Photovoltaik-Anlage übertragen werden kann. Tigo Energy setzt dieses Konzept aber auf eine einzigartige, innovative und patentierte Weise ein, um aus jedem PV-Modul den maximalen Ertrag herauszuholen. Das Tigo Energy Maximizer System verwendet weder herkömmliche DC-DC-Wandler noch Mikrowechselrichter-Technologie, die üblicherweise den Wirkungsgrad und die Erträge einer Solaranlage reduzieren. Die Elektronik des Tigo Energy® Module Maximizer<sup>TM</sup> ES hat drei Hauptfunktionen. Die erste besteht in der präzisen Erfassung von Spannung, Stromstärke und Temperatur des PV-Modules. Der MM-ES verfügt über ein Kommunikationsmodul (drahtlos oder PLC), das die Eingabeparameter überträgt und den von der MMU berechneten MPP empfängt. Außerdem verfügt der Maximizer über die Komponenten zur "Impedanzanpassung", mittels derer die Leistung jedes einzelnen Modules so geregelt wird, dass maximale Energieausbeute garantiert wird.

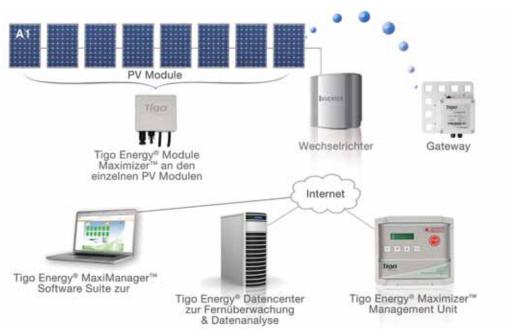


Abbildung 6 – Tigo Energy Systemkonfiguration

Am Anfang des Prozesses steht die Ermittlung der Messwerte. Spannung, Stromstärke und Temperatur jedes einzelnen Moduls werden an die MMU übertragen. Die Recheneinheit der MMU ist in der Lage, die exakte Arbeitskurve für jedes Modul zu BERECHNEN (einschließlich des gewünschten Vmp Wertes) und an den Maximizer zurückzugeben. Ein Team von Mathematikern leitete die Berechnung des Arbeitspunktes zur Optimierung der Energieausbeute vom PV- Modul und PV-String anhand der Eingabewerte ab. Tigo Energy verwendet hierzu eine optimierte Formel, ein allgemeines Beispiel [2] ist unten angegeben.

## Legende

M Anzahl der Reihen
N Anzahl der Spalten
W Höchstleistung (W)

W(1) Höchstleistung, die erzeugt wird, wenn die Zellen nicht beschattet sind (W) W(2) Höchstleistung, die erzeugt wird, wenn einige Zellen beschattet sind (W)

A.W Leistungsverlust, der durch Verschattung entsteht (W)

Pm,n Potential an der Verbindung (m,n) (V)

Jm, n Durchgangsstrom an der Verbindung (m,n) (A)

v Gesamtspannung (V)

Vm,n Spannung an der Zelle (m,n) (V) Im,n Strom durch die Zelle (m,n) (A)

(Voc)m,nLeerlaufspannung für die Zelle (m,n) (V)(lph)m,nKurzschlussstrom für die Zelle (m,n) (A)(ls)m,nSättigungsstrom für die Zelle (m,n) (A)

(Rsh)m,n Nebenschlusswiderstand direkt durch die Diode für die Zelle (m,n) = 1000  $\Omega$ 

(Rs)m,n Serienwiderstand für die Solarzelle (m,n) (fl)

n Idealitätsfaktor

Tm,n Betriebstemperatur für die Solarzelle (m,n) = 300 °K

e Elektronenladung = 1,6022 x 1019 Coulomb

k Bolzman'sche Konstante = 1,30806 x 1023 Joule/°K

Die Beziehung von Stromstärke zu Spannung für eine einzelne Dioden-Solarzelle (m,n) in einem Modul kann wie folgt berechnet werden:

$$f(V_{m,n},I_{m,n})=0$$

oder

$$I_{m,n} - \left(I_{ph}\right)_{m,n} + (I_s)_{m,n} \left\{ exp\left[\left(\frac{e}{nkT}\right)\left(V_{m,n} + I_{m,n}(R_s)_{m,n}\right)\right] - 1\right\} + \left(\frac{V_{m,n} + I_{m,n}(R_s)_{m,n}}{(R_{sh})_{m,n}}\right) = 0$$

Abbildung 7 – Beispiel für eine Gleichung zur Berechnung vom Vmp Wert

Der für jedes Modul berechnete Vmp Punkt wird an jeden Maximizer zurückgesendet. Der Impedanzanpassungsschaltkreis präsentiert jedem Modul eine virtuelle Impedanz, die der internen Impedanz des jeweiligen Moduls entspricht, so dass an jedem Modul maximale Energieausbeute erzielt wird. Da das Anlegen eines ohmschen Widerstandes zum Leistungsverlust führen würde, implementiert der Schaltkreis die Impedanz auf eine innovativere Art und Weise. Durch die Kombination eines Feldeffektivtransistors (FET) und eines kleinen Kondensators erzeugt der Maximizer einen "Stromtunnel", so dass jedes Modul mit seinem optimalen Stromund Spannungswert arbeiten kann, ohne dass der optimale Stringstrom beeinträchtigt wird und Imodul + Itunnel = Imp (String) = lout ist. Auf diese Weise ist jedes Modul in der Lage, seine Höchstleistung zu liefern, ohne die anderen Module im String zu behindern. Der Stringstrom bleibt auf dem optimalen Arbeitspunkt, der von den leistungsfähigsten Modulen des Strings unterstützt wird, und der Wechselrichter empfängt eine normalisierte I-V-Kurve vom String für ein genaues MPPT (keine lokalen Maxima).

## IMPEDANZANPASSUNG - EIN VERGLEICH



Wie oben erläutert, können PV-Module der gleichen Größe unterschiedliche Leistung liefern, je nach verfügbarer Sonneneinstrahlung und Materialeigenschaften des PV-Moduls. Die Unterschiede können sich durch Verschattung oder Verschmutzung, unterschiedliche Temperaturen und Siliziumalterung ergeben.

Wenn man die I-V-Kurven betrachtet, erkennt man, dass das schwächere Modul in seiner Leistung absinkt, sobald die Steuerung der Anlage versucht, die Erträge zu maximieren (da der Stringstrom über dem MPP des schwachen Moduls liegt und das schwache Modul dadurch gezwungen ist, seine Arbeitsspannung unter Vmpp zu senken). Die Kurve (B) auf Abbildung 9 beschreibt den optimalen Pfad für leistungsschwächere Module. Das Modul ist aber gezwungen, Pfad (A) zu nehmen, was zu einer verringerten Leistung am Modul und damit an der gesamten Photovoltaikanlage führt (wie eine undichte Stelle im Wasserrohrbeispiel). Abbildung 10 zeigt typische Spannungswerte von Modulen, die in Reihe geschaltet sind und von einem zentralen Wechselrichter gesteuert werden. Die Werte sind das Ergebnis synchroner Messungen, die im Sekundenabstand durchgeführt wurden. Die Daten wurden im Sommer 2008 in Berkeley in Kalifornien gemessen. Der Spannungsunterschied zwischen starken und schwachen Modulen der Photovoltaikanlage ist deutlich erkennbar.

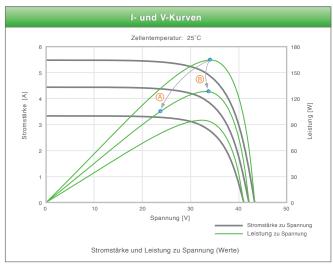
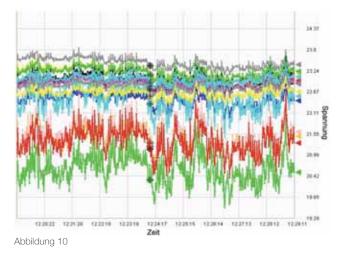


Abbildung 9 - I-,V- & Leistungskurven

Diese Effekte lösen ein "positives Feedback" aus und damit eine unerwünschte Instabilität des Systems, da "A" dazu führt, dass mehr "B" erzeugt wird, was wiederum dazu führt, dass mehr "A" erzeugt wird. Bei Photovoltaik-Anlagen mit in Reihe geschalteten PV-Modulen führt der geringere Energieertrag der Solarmodule dazu, dass mehr Leistung des Moduls in Wärme umgewandelt wird. Diese zusätzliche Wärme führt dazu, dass der Energieertrag des Moduls weiter sinkt, was wiederum zu einem Anstieg der Temperatur im Modul führt. Ergebnis ist ein Hochschaukeln,



das sich negativ auf den Gesamtenergieertrag der Anlage auswirkt.

Dieses Verfahren kommt nicht nur beim schwächsten Modul der Photovoltaikanlage zum Einsatz, sondern bei praktisch allen Modulen. Jedes Modul der Solaranlage verfügt über eine Leitung zur "Impedanzanpassung", die unabhängig programmiert werden kann, um den Strom um die Module herumzuleiten und eine maximale Energieausbeute an den Modulen zu erzielen, ohne die Leistungsausgabe der anderen Module vom String zu beeinträchtigen. Die Breite vom Bypass-Tunnel oder die Strommenge, die um jedes Panel herumgeleitet wird, wird von der MMU anhand der Informationen berechnet, die von den einzelnen Maximizern über die Spannung, die Stromstärke und die Temperatur vom Panel übertragen werden. Durch Ändern vom Stromfluss durch das Modul kann die Spannung vom Modul direkt reguliert werden, sodass die Modulspannung auf ihren optimalen Arbeitspunkt Vmp verschoben wird.

Gleichzeitige Messung von Spannung (V),
Stromstärke (I) und Temperatur (T) an jedem Modul

Übertragen der Werte an die Maximizer Management
Unit (MMU) drahtlos oder über Kabel

Die MMU berechnet die I-V-Kurve für jedes Modul
(siehe Beispielgleichung Abb. 7)

Die MMU berechnet die optimale Arbeitsspannung (VMP)
für jedes Modul (n, m)

Die MMU berechnet die erforderliche virtuelle Impedanz
Z(n,m) = (I(m), Vmp (n,m), Imp (n,m))

Übertragung der Betriebsparameter an
jeden Maximizer (drahtlos oder per Kabel)

Der Maximizer zeigt seinem Modul Z(n,m),
z.B. Z(1,1) für Modul 1 in String 1

In großen Freiflächenanlagen, in denen viele Strings parallel geschaltet werden, minimiert die Tigo Energy Technologie auch die Diskrepanz zwischen den Strings. Die Stringspannung ist zwar variabel, in den meisten Fällen aber praktisch gleich, da die Durchschnittstemperatur in allen Strings ähnlich ist. Da jedes Modul an seinem optimalen Leistungspunkt arbeitet, sind die Vmp Werte der Module praktisch gleich. Die Stringspannungen weisen unter diesen Bedingungen nur eine geringe Streuung auf, sodass eine konstante Spannung in allen parallelen Strings nicht zu einer Leistungsminderung an einem der Strings mit geringerem Energieertrag führt (anders als bei Systemen ohne Tigo Energy® Maximizer™). Im seltenen Fall, dass ein Teil der Module so stark verschattet wird, dass die Ausgangsspannung eines einzelnen Strings dadurch beeinflusst wird, schafft die Impedanzanpassung das Äquivalent eines Tunnels durch die Strings, so dass am gesamten System kein Leistungsverlust entsteht [3].

## Zusammenfassung

## VORTEILE DER IMPEDANZANPASSUNG IM VERGLEICH ZU ANDEREN TECHNOLOGIEN

(DC-DC-Wandler, verteiltes MPPT oder Mikrowechselrichter)

### Minimale Elektronik auf PV-Modul-Ebene:

- Hohe Zuverlässigkeit
- Geringe Kosten
- Kleinste Abmessungen

#### Höchste durchschnittliche Effizienz am Modul (statistisch gesehen 99,5%):

- Höchster Wirkungsgrad aller modulnahen Technologien
- Geringste Wärmeabstrahlung auf das Modul (oft geringer als die heutiger Dioden)
- Kein Erhitzen der Module und kein damit verbundener Ertragsverlust
- Polycarbonat-Gehäuse keine zusätzliche Erdung nötig
- Problemlose Integration in vorhandene Modulanschlussdosen

#### Geringste Änderungen an der bestehenden Konfiguration von Solaranlagen (Wechselrichter, Verkabelung und BoS):

- Feste Eingangsspannung am Wechselrichter nicht erforderlich (was zu Verlusten durch zusätzlich erforderliche Wandlungsstufe führen würde)
- MPPT des Wechselrichter kann beibehalten werden
- Hervorragend zum Nachrüsten auf bestehenden Anlagen geeignet
- Belegte Kompatibilität mit Produkten führender Wechselrichterhersteller

## Softwaregesteuerter Betrieb:

- Sehr geringer Kostenaufwand und höchste Genauigkeit
- Flexibel für eine Anpassung an neue Technologien und Konfigurationen
- Keine komplexen Datenverarbeitungsprozesse am Modul

## Kein Trial-and-Error-Algorithmus auf Modulebene:

• Präzise Berechnung von Vmp mit einem hochmodernen, patentierten Ansatz.

#### Zusammenfassung:

Das Verfahren von Tigo Energy verwendet Echtzeitdaten auf Modul- und Stringebene, um den optimalen Leistungspunkt für jedes einzelne Modul genau zu berechnen. Die Module werden mithilfe der Impedanzanpassung nachreguliert. Die Technologie von Tigo Energy ist in der Lage, den optimalen Arbeitsbereich für jedes Modul schnell und dynamisch zu ermitteln und das System bei Wolken oder Verschattung stabil zu halten. Durch Implementierung dieses Ansatzes zur Energiegewinnung mit einem statistischen Wirkungsgrad von 99,5% kann die Rentabilität der Anlage während ihrer gesamten Lebenszeit optimiert werden.

#### Literaturhinweise:

[1] Arditi S, Krisa J. Maximizing PV solar project production over system lifetime lifetime. Photovoltaics International, Second edition; November 2008.

[2] Gautam NK, Kaushika ND. An efficient algorithm to simulate the electrical performance of solar photovoltaic arrays. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi, India; 2002.

[3] Revolutionizing Large-scale PV Projects. InterPV; November 2009, p. 51-55.

[4] From Passive Monitoring to Active Management.InterPV; February 2010, p. 82-87.ww

Tigo Energy, Inc.	Hauptsitz:	Niederlassungen:
P: +1.408.402.0802	420 Blossom Hill Road	Frankfurt, Deutschland
F: +1.408.358.6279	Los Gatos, Kalifornien	Paris, Frankreich
www.tigoenergy.com	IISA	Monza, Italien

# Frankfurt, Deutschland Paris, Frankreich Monza, Italien Tokio, Japan





