

# Photon

## DAS SOLARSTROM-MAGAZIN

plus 32 Seiten Messe-Sonderteil: Vorschau auf Valencia



## Tschüss Tankstelle! Hallo Steckdose!

Die neuen Elektroautos und Plug-in-Hybride:  
Wann sie kommen, was sie kosten

## Solarförderung 2.0

Ein progressiver Einspeisetarif  
für Spaniens Solarmarkt

## Wachstum mit Hindernissen

Welchen Engpass die  
Solarbranche als Nächstes  
überwinden muss

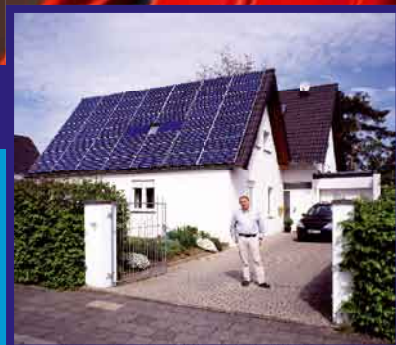
## Silizium sparen

(R)evolutionäre Ideen  
für die Wafer-Produktion

## Mehr Solarstrom

Ein Stallgebäude mit  
rotierendem Solardach

**Sonderdruck  
Refusol**



NACH 20 JAHREN

## Das goldene Ende von Solarstromanlagen

über 1.500 Händleradressen • Solarstrahlungsatlas • Praktika

# Vorhang auf: Hier ist der Refusol

## Der Wechselrichter Refusol 11 K von Refu im Test



Klein, aber (fast) unglaublich effizient: Der äußerst kompakt aufgebaute Refusol 11 K erreicht Wirkungsgrade auf Rekordniveau. Dass er sich dabei überhitzen könnte, ist jedoch nicht zu befürchten: Die Thermografie zeigt maximale Bauteiltemperaturen von weniger als 70 Grad Celsius.

Vor fast einem Jahr stellten wir an dieser Stelle den Sunny Central 8000TL von SMA vor und taufte ihn »Liebling der Redaktion« (PHOTON 10-2007). Das Gerät überzeugte im Testlabor mit sehr guten Eigenschaften und setzte sich in der Bewertung weit von seinen Konkurrenten ab. Es gab den Sunny Central 8000TL – und dann lange Zeit erst mal nichts. Dass schon vor Ablauf eines Jahres ein zweites Gerät mit ähnlich bemerkenswerten Ergebnissen das Labor verlassen würde, hätte die Redaktion noch vor einem Monat nicht geglaubt. Doch das heute vorliegende Gerät von der schwäbischen Firma Refu Elektronik mit Sitz in Metzingen zieht mit dem Wechselrichter von SMA nicht nur gleich, es ist noch einen winzigen Tick besser – weshalb der Refusol nun die Liste der vom Testlabor geprüften Geräte anführt. Was das konkret heißt, zeigt dieser Testbericht. Kurz und bündig gesagt, handelt es sich um ein sehr gutes Gerät, das kaum Kapriolen an den Tag legt und einen hohen Wirkungsgrad sowie ein äußerst stabiles Wandlungsverhalten demonstriert. Die Redaktion schmilzt erneut dahin und spricht eine Empfehlung aus.

Erhältlich ist der Refusol 11 K seit einem Jahr. Die Wechselrichterserie ist die

erste aus der Produktion der schwäbischen Firma Refu Elektronik. Diese wurde 1965 gegründet und hat in der Antriebs- und Leistungselektronik einen klangvollen Namen. Auf den Gebieten der Textil-, der Netz- und der Energietechnik sowie im Bereich von Fahrtrieb und der Vakuumtechnik ist das Unternehmen aktiv. Das Portfolio wurde innerhalb der vergangenen zwölf Monate um sieben Photovoltaikwechselrichter erweitert, von denen fünf zu den Großgeräten im Schrankformat zählen.

Der Zentralwechselrichter Refusol 11 K wurde im Juli 2008 vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Eine Vereinbarung mit dem PHOTON-Testlabor wurde getroffen.

### Aufbau

Das vorliegende Gerät ist Teil der Refusol-Familie. Sie umfasst zwei Geräte

mit den AC-Nennleistungen von 11 und 15 Kilowatt. Es handelt sich um dreiphasige Geräte mit einem MPP-Tracker. Alle Modelle dieser Familie beruhen auf einer Schaltung ohne Netztrenntrafo. Es kann aber optional ein 50-Hertz-Trafo von Refu Elektronik erworben und vorgeschaltet werden.

Der Aufbau des Testkandidaten ist übersichtlich und stellt sich in zwei Ebenen dar. Der Leistungsteil ist auf einer großen Leiterkarte untergebracht, die auf der unteren Ebene montiert ist. Die Leistungshalbleiter sind in vier integrierten Halbleitermodulen untergebracht und direkt in die Leistungsteilplatine eingelötet. Ein großer Hochleistungskühlkörper dient als Montageplattform, auf der die Halbleitermodule zur Kühlung befestigt sind. Die Kühlung des Gerätes beruht auf Konvektion, sie benötigt also keinen zusätzlichen Lüfter. Intern wird ein Lüfter verwendet, der eine Temperaturschichtung und heiße Stellen verhindern soll. Dieser Lüfter hat eine Lebensdauer von 40.000 Stunden bei 70 Grad Celsius.

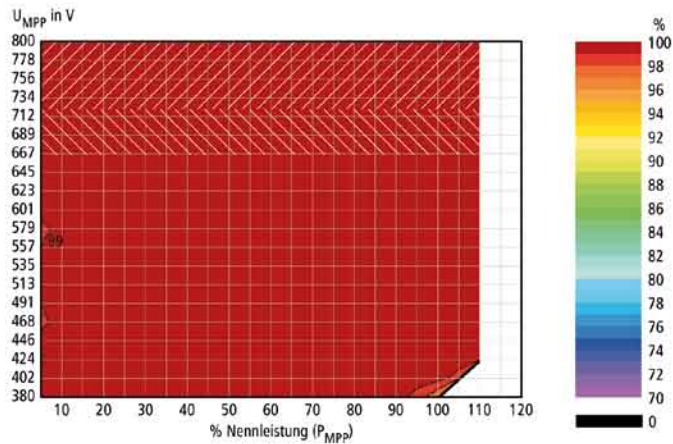
Da er durch die hohe Schutzart des Wechselrichtergehäuses von IP 65 vor Verschmutzung geschützt ist, sollte beides für eine lange Lebensdauer sprechen. Der Lüfter ist bei einem Ausfall mit relativ geringem Aufwand demontier- oder austauschbar.



Ein exzellentes Gerät mit: Mit rund 97 Prozent Wirkungsgrad für mittlere und hohe Einstrahlung übertrifft der Refusol 11 K die bislang von PHOTON getesteten Geräte um mindestens zwei Prozentpunkte. Nur der SMC 8000TL von SMA ist diesem Wechselrichter in puncto Effizienz ebenbürtig.

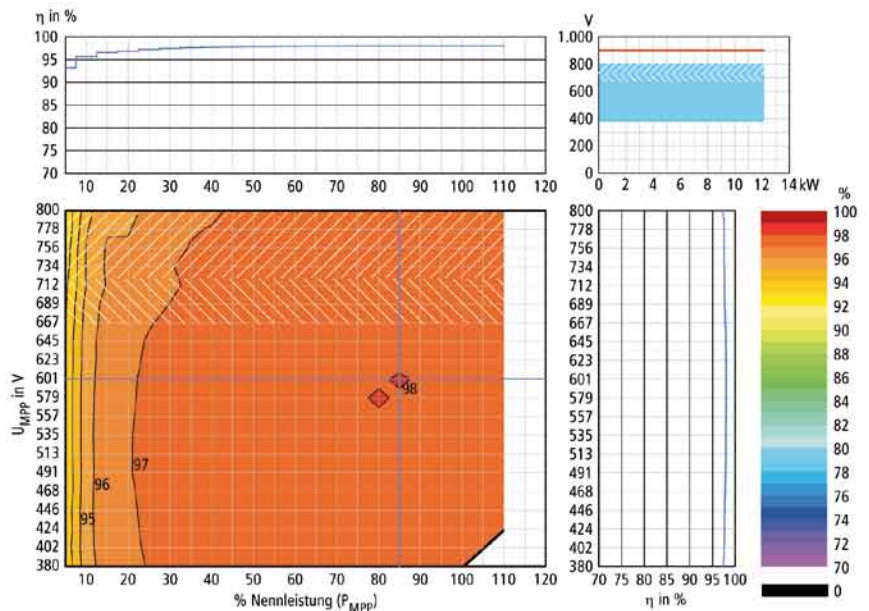
## MPPT-Anpassungswirkungsgrad

An drei Ecken fällt der MPPT-Wirkungsgrad unter 99 Prozent, sonst bleibt er konstant knapp unter der 100-Prozent-Marke – ein tadelloses Tracking-Verhalten



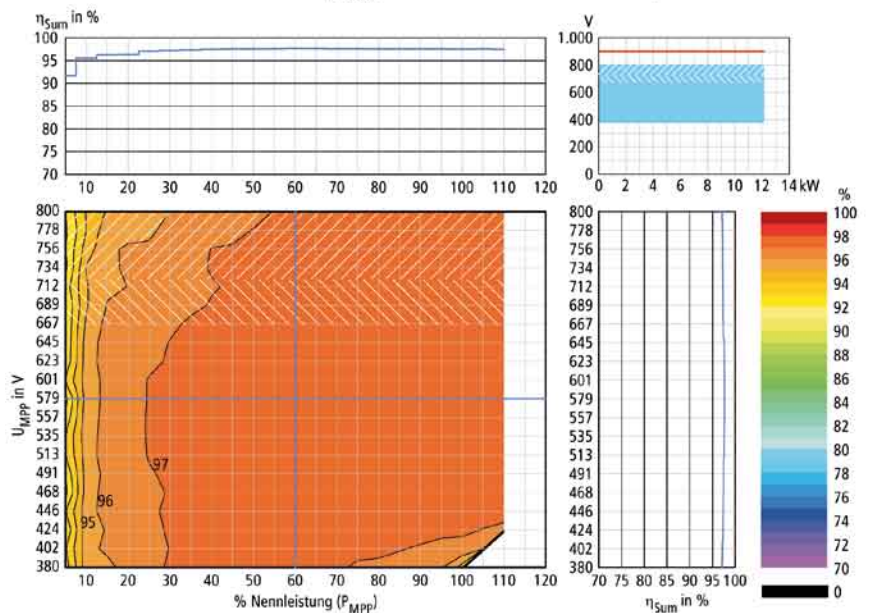
## × Umwandlungswirkungsgrad

An zwei Punkten klettert der maximale Wirkungsgrad auf 98 Prozent – das ist bisher einmalig. Fast über den gesamten Nennleistungsbereich bleibt der Wirkungsgrad sehr stabil und sinkt nur wenig ab. Ein saubereres und stabileres Arbeitsverhalten legt kaum ein Gerät, das im Testlabor geprüft wurde, an den Tag. Festzuhalten bleibt zudem der weite Spannungsbereich, den der Refusol abdeckt.



## = Gesamtwirkungsgrad

Das Diagramm weicht nur marginal von dem darüber abgebildeten ab. Der Grund ist das ausgezeichnete MPP-Tracking des Wechselrichters, durch das dem Wechselrichter fast kein vom Generator erzeugtes Watt verloren geht. Zu weiten Teilen werden so mehr als 97 Prozent der in den Modulen produzierten Energie vom Refusol in Wechselstromform an das Netz oder den Verbraucher abgegeben.



In der zweiten sichtbaren Ebene gibt es eine Leiterkarte auf der sich der DC-Funkentstörfilter und das Schaltnetzteil befinden. Eine weitere Leiterkarte beherbergt die Steuerung des Gerätes. Die Drosseln der Hochsetzsteller und des Sinusfilters sind fest eingegossen im Ober- teil des Gehäuses und mit der Leistungs- teilleiterkarte über Leitungen kontak- tiert. Das Display ist per Kabel mit der Steuerung verbunden und auf der Rück- seite der Geräteabdeckung befestigt. Es ragt durch einen Ausbruch durch die Ab- deckung. Das Gehäuse besteht aus drei zusammenschweißten Teilen aus Alumi- nium und dem Kühlkörper als Montage- plattform. Es hat die Schutzart IP 65 und eignet sich für die Montage außer- halb eines Gebäudes.

Für die Sicherheit sorgt eine selbsttä- tige Freischaltstelle, die das Netz auf kor- rekte Spannung und Frequenz kontrol- liert. Eine Isolationsprüfung des Solarge- nerators checkt den Widerstand zwischen den Anschlüssen des Solargenerators und der Erde. Der Gerätezustand wird durch das Display und vier LEDs vermittelt.

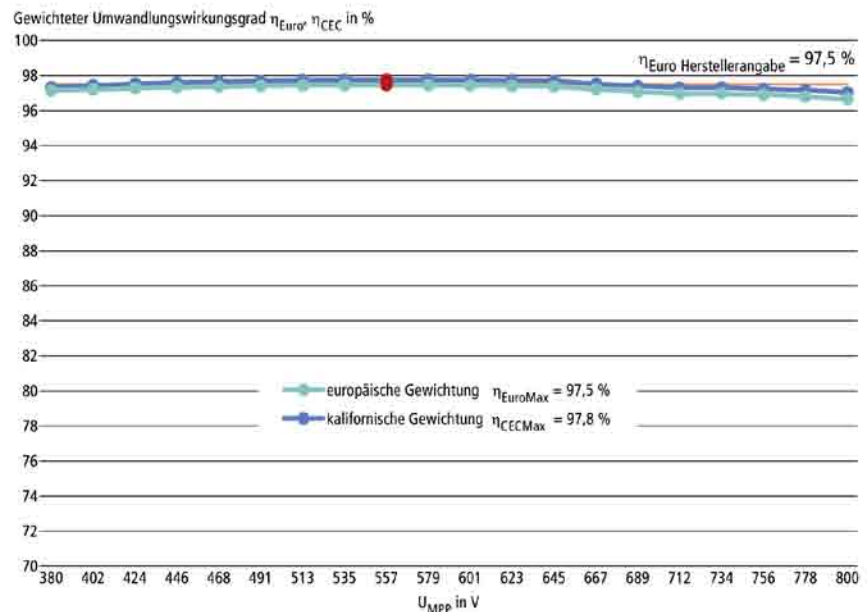
Das Gerät macht insgesamt einen gu- ten und vollwertigen Eindruck und ist für ein dreiphasiges Gerät dieser Leistung sehr leicht und klein. Der interne Aufbau ist aufgeräumt und kompakt.

Die eingesetzten Elektrolytkondensa- toren im Leistungsteil und in der Steuer- elektronik gehören der Temperaturklasse 105 Grad Celsius an, sind also bezogen auf die Umgebungstemperatur gut ausge- legt. Die Anschlüsse für den Solargenera- tor und das Netz sind durch Steckverbin- der ausgeführt. Für die DC-Anschlüsse ist der Steckertyp wählbar. Der Netzan- schluss erfolgt mit einem großen fünfpol- igen Stecker von Phoenix Contact.

Der Wechselrichter besitzt fünf An- schlussmöglichkeiten – über Ethernet, USB, die Schnittstelle RS485, einen po- tenzialfreien Relaiskontakt und über ei- nen Einstrahlungssensor mit Tempera- turfühler. Eine Kommunikation erlaubt die Software Refuvis über die USB- oder Ethernet-Schnittstelle. Zusätzlich ent- hält das Gerät einen internen Daten- logger, der insgesamt 40 Messwerte auf- nehmen kann. Die Messwerte müssen einzeln eingeschaltet und parametrisiert werden.

Der Wechselrichter besitzt zwei Opti- onen: Galvanische Trennung durch das Vorschalten eines 50-Hertz-Trafos. Der maximale Wirkungsgrad der Gesamt- konstellation wird dabei auf 96 Prozent

## Gewichteter Umwandlungswirkungsgrad



Ob er in mitteleuropäischen oder südlichen Breiten – der Wechselrichter arbeitet unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen sehr gut, zeigt aber noch mehr Effizienz bei der Arbeit unter stärkerer Sonnenstrahlung. Die Herstellerangaben stimmen exakt mit den Messungen im Labor überein – zu dem Unternehmen lässt sich leicht Vertrauen aufbauen.

reduziert. Daneben sind diverse Photo- voltaiksteckverbinder möglich.

### Handhabung

Das Gerät kommt gut verpackt und ge- schützt beim Anwender an. An der Wand wird der Wechselrichter mithilfe einer Wandhalterung aus Aluminium befestigt. Mit seinen 38 Kilogramm ist der Re- solut 11 K ein Leichtgewicht.

Ist der Solargenerator richtig ausge- legt und der interne DC-Freischalter ein- geschaltet, kann der Wechselrichter an den Start. Circa 70 Sekunden benötigt er für verschiedene Tests. Dann geht er ans Netz und beginnt mit der Arbeit.

Das Display ist auf der Rückseite der Frontabdeckung montiert und ragt durch diese hindurch. Es ist grafikfä- higer und zeigt maximal acht Zeilen an. Durch die Hinterleuchtung sind der Kon- trast und die Lesbarkeit gut, ohne Hinter- leuchtung ist es zu dunkel. Die Display- sprache ist zurzeit in Deutsch, Englisch und Spanisch verfügbar. Die Anzeige wird aktiv, sobald die DC-Spannung an- liegt. Die Hinterleuchtung schaltet sich nach einigen Minuten ohne Bedienung wieder ab.

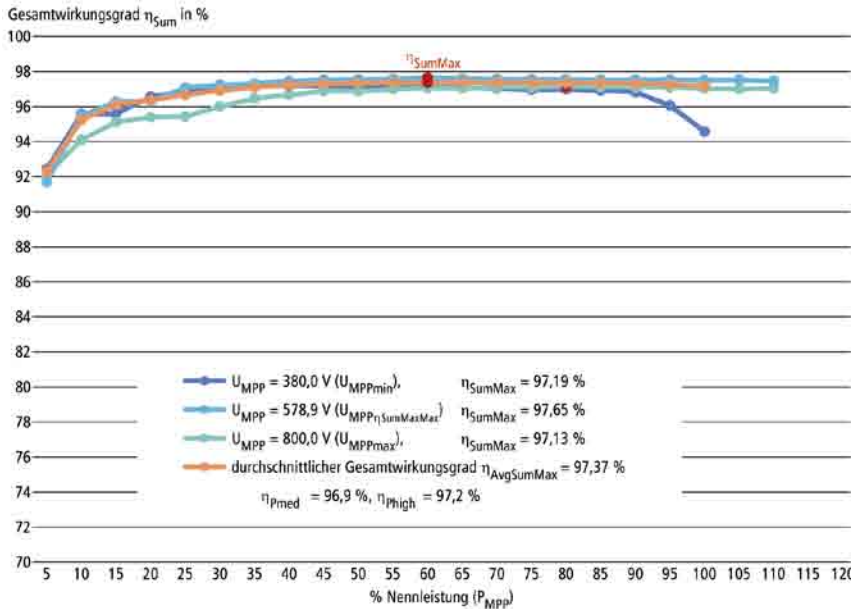
Mithilfe von vier Menü- und vier Cursortasten werden Einstellungen vor-

genommen, und es kann durch das um- fangreiche Menü navigiert werden. Ne- ben diversen Status- und Fehlermeldun- gen werden folgende Istwerte angezeigt: die Wechselstromleistung, die Wechsel- spannung, die Gleichspannung und sehr ausführliche Ertragsdaten. Damit stehen die wichtigsten Messwerte zur Verfü- gung. Weitere Werte sind über den Da- tenlogger abrufbar. Dies funktioniert allerdings in diesem Gerät nicht, da das Display bei Anwahl dieses Menüpunktes dunkel wurde und nicht mehr bedient werden konnte.

### Bedienungsanleitung

Dem Gerät beigelegt ist eine vorläufige Bedienungsanleitung in deutscher Spra- che, die teilweise noch in Bearbeitung ist. Es gibt sie zurzeit auch in englischer und spanischer Sprache. Die umfangrei- che Bedienungsanleitung umfasst neben einigen allgemeinen Erläuterungen die Montage, den Anschluss, Erläuterungen zum Betriebsverhalten und zum Display. Zusätzlich gibt es eine umfangreiche Auflistung von Einstellparametern und von möglichen Störmeldungen. Die Be- dienungsanleitung in Deutsch und Eng- lisch kann auch von der Website des Her- stellers heruntergeladen werden.

## Gesamtwirkungsgrade bei unterschiedlichen Spannungen $U_{MPP}$



Kein Schwanken, keine Ausreißerwerte – stattdessen ist eine vollkommen stabile Arbeitsweise bezeichnend für den Refusol. Der leichte Abfall bei niedriger Nennleistung ist kaum der Rede wert.

### Schaltungsaufbau

Der Schaltungsaufbau des dreiphasigen Wechselrichters ist im Prinzip zweistufig, entspricht aber nicht einer klassischen Topologie. Zunächst gelangt die Energie des Solargenerators über einen Funkentstörfilter in die Leistungsstufe. Das Gerät besitzt einen zweigeteilten Zwischenkreiskondensator, dessen Mittelpunkt mit dem N-Leiter des Netzes verbunden ist. Er besitzt zwei dreiphasige Ausgangsbrücken, die ausgangseitig parallelgeschaltet sind. Die erste Ausgangsbrücke ist spannungsmäßig direkt mit dem DC-Eingang verbunden. Die zweite wird versorgt über zwei Hochsetzsteller, die in der Plus- und der Minusleitung des DC-Eingangs platziert sind und den zweiten zweigeteilten Zwischenkreiskondensator speisen. Die Modulation für die Sinuswellen wird nun so zwischen diesen beiden Ausgangsbrücken aufgeteilt, dass beide nur einen Teil des Spannungshubes zur Erzeugung des sinusförmigen Stromes in den Ausgangsdrosseln durchführen. Dadurch werden die Verluste in den Leistungstransistoren und in den Ausgangsdrosseln reduziert. Zudem gibt es im Ausgang für jede Phase einen Freilaufzweig, der verhindert, dass die in den Ausgangsdrosseln gespeicherte Energie zum Zwischenkreiskondensator zurückfließt

und zusätzliche Verluste bewirkt. Durch diese vielen Schaltungskomponenten ist das Gerät zwar sehr aufwendig konstruiert, hat aber einen hohen Wirkungsgrad, gute EMV-Eigenschaften und ein DC-Potenzial an den DC-Anschlussklemmen, das sich symmetrisch zum Erdpotenzial einstellt. Die Schaltung ist zum Patent angemeldet.

Ein nachfolgender Filter glättet die modulierten Spannungsblöcke zur sinusförmigen Spannung mit der Netzfrequenz von 50 Hertz. Eine selbsttätige Schaltstelle trennt den Wechselrichter vom Netz, sobald die Netzspannung oder die Netzfrequenz von den vorgegebenen Grenzwerten abweicht, ebenso, wenn auf der Netzseite ein Fehlerstrom auftritt. Auf der Gleichspannungsseite wird der Isolationswiderstand gemessen. Auftretende Funkstörungen beseitigt ein Ausgangsfilter, der direkt vor den Netzklemmen angeordnet ist.

### Messungen

Alle folgenden Messungen beziehen sich auf eine Netzspannung von 230 Volt. Für den Bereich der MPP-Spannungen über 733 Volt musste die Leerlaufspannung des Simulators begrenzt werden, da diese bei einem Kennlinienfüllfaktor von 75 Prozent schon mehr als 900 Volt

beträgt. Die maximale DC-Spannung des Refusol 11 K beträgt 900 Volt.

Bei kleinen Leistungen wird nicht mehr in drei Phasen eingespeist, sondern der sich verringernden Leistung folgend, zur Erhöhung des Teillastwirkungsgrades, ein oder zwei Phasen der Ausgangsbrücke abgeschaltet. Dadurch kommt es in diesen Arbeitspunkten auf der Eingangsseite zu leichten Schwankungen der Eingangsspannung.

Bei kleinen MPP-Spannungen kam es in den Leistungsstufen 5 und 15 Prozent wegen Schwingungsverhaltens zu Abschaltungen mit der Fehlermeldung: Kurzausfall, Fehler I\_Wandler.

Beim Durchblättern des Menüs und Betätigen des Menüpunktes Datenlogger wurde das Display dunkel und war nicht mehr bedienbar, der Wechselrichter lief aber weiter.

**Auffinden des MPP:** Bei einer vorgegebenen Kennlinie mit Nennleistung und einer  $U_{MPP}$  von 601 Volt benötigt der Wechselrichter etwa 70 Sekunden, bis er sich auf das Netz aufschaltet. Zu Beginn der Messung waren die DC-Seite sowie die AC-Seite ausgeschaltet. Nach circa 22 weiteren Sekunden erreicht der Wechselrichter den MPP. Beim Wechsel von 601 Volt nach 579 Volt benötigt er sieben Sekunden, der Wechsel in den nächstniedrigeren MPP-Bereich dauert ebenfalls circa sieben Sekunden.

**MPP-Bereich:** Der MPP-Bereich reicht von 380 bis 800 Volt und entspricht dem eines Superweitbereich-Wechselrichters. Die maximale MPP-Spannung von 800 Volt liegt, bei heutigen Füllfaktoren, zu nah an der maximalen Eingangsspannung von 900 Volt.

**Umwandlungswirkungsgrad:** Der Umwandlungswirkungsgrad ist das Verhältnis von  $P_{AC}$  zu  $P_{DC}$ . Zur Darstellung der Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Eingangsspannung  $U_{MPP}$  und der Eingangsleistung  $P_{DC}$  wurde der MPP-Spannungsbereich in 20 Schritte und der DC-Leistungsbereich in 24 Schritte unterteilt. Daraus resultieren 480 verschiedene Solargeneratorkennlinien, sodass ein Messdurchlauf aus 480 Messungen besteht. Jede Kennlinie besitzt einen Füllfaktor von 75 Prozent. Aus dieser Messreihe erhielten wir 480 Messwerte für den Wirkungsgrad, die die Basis bilden für die dreidimensionale Darstellung der Abhängigkeiten des Wirkungsgrades. Die dritte Dimension ist dabei die Farbe. Das Farbspektrum und die Umsetzung in die Messwerte sind neben dem Diagramm

abgebildet. Die vorgegebene Leistung  $P_{MPP}$  ist normiert auf die Nennleistung  $P_{DCN}$  des Wechselrichters und in Prozent der  $P_{MPP}$ -Nennleistung angegeben.

Sowohl über als auch rechts neben dem Diagramm sind entsprechende Querschnitte durch das dreidimensionale Farbdigramm mit den Abhängigkeiten des Wirkungsgrades von der normierten Leistung und des Wirkungsgrades von der Spannung  $U_{MPP}$  zu sehen. Rechts oben ist eine Einordnung des Arbeitsbereichs des Wechselrichters bezogen auf den MPP-Spannungsbereich und die MPP-Leistung zu finden. Der Wechselrichter kann im MPP-Spannungsbereich von 380 Volt bis 800 Volt mit 110 Prozent der Nennleistung arbeiten. Deshalb konnte für diesen Diagrammbereich der Wirkungsgrad ermittelt werden.

Im dreidimensionalen Farbdigramm sind flächige Bereiche gleicher Farbe, also gleichen Wirkungsgrades, zu erkennen. Der Bereich des maximalen Wirkungsgrades bildet eine große einheitliche Fläche über den gesamten Spannungsbereich und ab einer Eingangsleistung von circa 25 Prozent.

Bei einer maximalen DC-Spannung von 900 Volt gibt es einen oberen schraffierten Bereich, der auf Einschränkungen des MPP-Spannungsbereichs beim Einsatz von kristallinen Modulen hinweist; und es gibt einen weiteren Bereich mit entgegengesetzter Schraffur, der auf Einschränkungen beim Einsatz von Dünnschichtmodulen aufgrund des zu geringen Spannungsabstandes von maximaler MPP-Spannung und maximaler DC-Spannung hinweist.

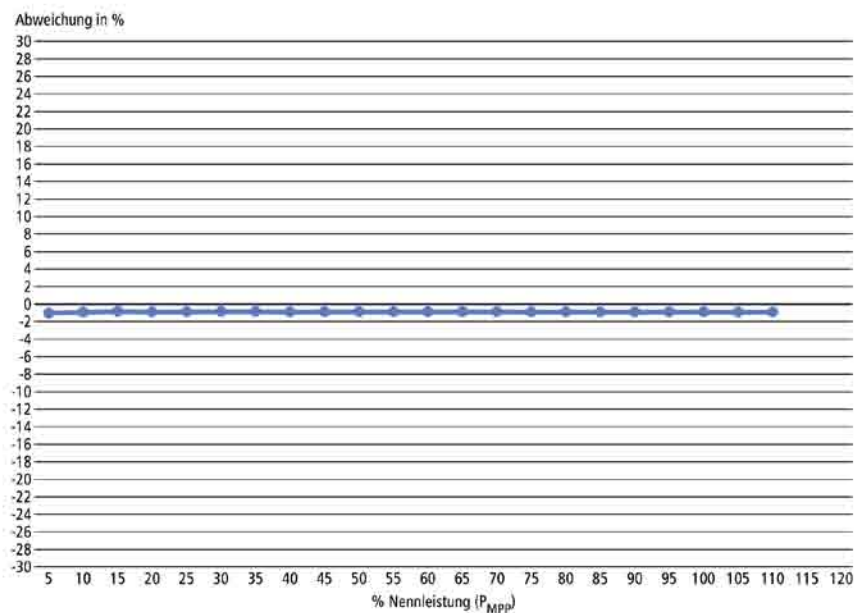
Die senkrechte Schnittlinie bei 85 Prozent Nennleistung und die waagerechte Schnittlinie bei  $U_{MPP} = 601$  Volt gehen durch das Wirkungsgradmaximum von 98 Prozent. Über den gesamten MPP-Spannungsbereich variiert der maximale Umwandlungswirkungsgrad nur um 0,5 Prozentpunkte.

Die DC-Nennleistung des Gerätes beträgt  $P_{DCN} = 11.000$  Watt. Die Herstellerangabe für den maximalen Wirkungsgrad von 98 Prozent wurde während der Messungen exakt erreicht. Bei kleinen Leistungen, unter 15 Prozent der Nennleistung, fällt der Wirkungsgrad bei diesem Gerät nur um circa fünf Prozentpunkte.

Es stellte sich bei Nennleistung ein Leistungsfaktor  $\cos \phi$  von circa 1 ein.

**Gewichteter Umwandlungswirkungsgrad:** Der gewichtete Umwandlungswir-

## Genauigkeit der Wechselrichteranzeige



Genau wie ein Zähler: Der Wechselrichter gibt maximal ein Prozent der Ausgangsleistung zu wenig an, wie die Messung im Labor ergeben hat

ungsgrad wird mit europäischer und mit kalifornischer Gewichtung angegeben. Der Europäische Wirkungsgrad ist maximal im Bereich von  $U_{MPP} = 491$  Volt bis 645 Volt und trifft ebenfalls exakt die Herstellerangabe von 97,5 Prozent. Auch ist die Differenz zwischen maximalem Wirkungsgrad und Europäischem Wirkungsgrad mit nur 0,5 Prozentpunkten sehr gering. Der Kalifornische Wirkungsgrad ist mit 97,8 Prozent sogar noch höher und nur 0,2 Prozentpunkte niedriger als der maximale Umwandlungswirkungsgrad und ist auch maximal im Bereich von  $U_{MPP} = 491$  Volt bis 645 Volt.

Der Kalifornische Wirkungsgrad ist von der California Energy Commission (CEC) definiert worden.

**MPPT-Anpassungswirkungsgrad:** Der Vergleich von vorgegebener DC-Leistung  $P_{MPP}$  zur aufgenommenen DC-Leistung des Wechselrichters gibt Aufschluss über das statische MPP-Tracking des Gerätes, also darüber, wie viel der vorgegebenen  $P_{MPP}$ -Leistung der Wechselrichter übernimmt. Der MPPT-Anpassungswirkungsgrad ist über den ganzen Arbeitsbereich ausgesprochen gleichmäßig und hoch. Bei vorgegebenen Leistungen zwischen 5 und 110 Prozent Nennleistung beträgt die MPP-Leistung des Wechselrichters im gesamten Spannungsbereich weit mehr als 99 Prozent der vorgegebenen Leistung.

Im Überlastbereich bei kleinster MPP-Spannung erkennt man eine beginnende DC-Strombegrenzung. Die schon oben beschriebenen Schwankungen auf der Eingangsspannung bewirken in der kleinsten Leistungsstufe leicht geringere Anpassungswirkungsgrade in vier Spannungsstufen.

**Gesamtwirkungsgrad:** Der Gesamtwirkungsgrad wird errechnet und ist die Multiplikation des Umwandlungswirkungsgrades und des MPPT-Anpassungswirkungsgrades für alle 480 Messpunkte. Sowohl über als auch rechts neben dem Diagramm sind entsprechende Querschnitte durch das dreidimensionale Farbdigramm mit den Abhängigkeiten des Gesamtwirkungsgrades von der normierten Leistung und des Gesamtwirkungsgrades von der Spannung  $U_{MPP}$  zu sehen. Rechts oben ist eine Einordnung des Arbeitsbereichs des Wechselrichters bezogen auf den MPP-Spannungsbereich und die MPP-Leistung zu finden.

Im dreidimensionalen Farbdigramm sind flächige Bereiche gleicher Farbe, also gleichen Wirkungsgrades, zu erkennen. Der Bereich des maximalen Gesamtwirkungsgrades erstreckt sich über den gesamten Spannungsbereich ab Leistungen von mehr als 30 Prozent. Nur bei höheren Spannungen und bei kleinen Spannungen und hohen Leistungen wird der Bereich etwas schmaler.

Bei einer maximalen DC-Spannung von 900 Volt gibt es wie zuvor im Diagramm zum Umwandlungswirkungsgrads einen oberen schraffierten Bereich, der auf Einschränkungen des MPP-Spannungsbereichs beim Einsatz von kristallinen Modulen hinweist, und einen weiteren Bereich darunter mit entgegengesetzter Schraffur, der auf Einschränkungen beim Einsatz von Dünnschichtmodulen aufgrund des zu geringen Spannungsabstandes von maximaler MPP-Spannung und maximaler DC-Spannung hinweist.

Die senkrechte Schnittlinie bei 60 Prozent Nennleistung und die waagerechte Schnittlinie bei  $U_{MPP} = 579$  Volt gehen durch das Gesamtwirkungsgradmaximum von 97,7 Prozent.

**Gesamtwirkungsgradverläufe, durchschnittlicher Gesamtwirkungsgrad und PHOTON-Wirkungsgrad:** Im folgenden Diagramm ist der Gesamtwirkungsgradverlauf für die minimale und die maximale MPP-Spannung zu finden mit den jeweiligen maximalen Werten. Der durchschnittliche Gesamtwirkungsgradverlauf wird durch Mittelung aller Gesamtwirkungsgradergebnisse ermittelt. Dazu erfolgt in einer Leistungsstufe die Mittelung aller Gesamtwirkungsgradergebnisse über alle Spannungsstufen. Daraus ergibt sich eine zweidimensionale Kurve. Die Auswertung erfolgt über den gesamten vom Hersteller angegebenen  $U_{MPP}$ -Bereich inklusive der schraffierten Bereiche. Die Bildung des Durchschnitts erfolgt für die Leistungsstufen von 5 bis 100 Prozent. Die Bestimmung des PHOTON-Wirkungsgrades erfolgt aus den errechneten Werten zum durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrad.

Der PHOTON-Wirkungsgrad für mittlere Einstrahlung liegt bei 96,9 Prozent, der PHOTON-Wirkungsgrad für hohe Einstrahlung liegt bei 97,2 Prozent.

**Einspeisung der Nennleistung:** Der Wechselrichter speist über den Eingangsspannungsbereich von 380 bis 800 Volt und bei einer Umgebungstemperatur von 25 Grad Celsius 100 Prozent der Nennleistung ein.

**Angezeigte Ausgangsleistung:** In einer weiteren Messreihe wurde der Wechselrichter bei konstanter MPP-Spannung von 601 Volt, also im mittleren Bereich, nacheinander mit verschiedenen Leistungen von 5 bis 110 Prozent Nennleistung gespeist. Dabei wurden jeweils die Messwerte für die Wechselrichterausgangsleistung aufgenommen, die vom

Wechselrichter und auch vom Leistungsanalysator angezeigt wurden.

Die vom Wechselrichter gemessene und angezeigte Ausgangsleistung liegt bei kleinen Leistungen um ein Prozent unter dem Messwert des Leistungsanalysators. Ab 15 Prozent Nennleistung verringert sich die Abweichung, und der vom Wechselrichter angezeigte Wert liegt nur um 0,9 Prozent unter dem vom Leistungsanalysator gemessenen. Damit entspricht die Anzeigegenauigkeit der eines Zählers der Genauigkeitsklasse B, früher Genauigkeitsklasse 1.

**Betrieb bei höherer Umgebungstemperatur:** Erhöht man die Umgebungstemperatur, speist der Wechselrichter bis zu einer Umgebungstemperatur von circa 55 Grad Celsius mit 100 Prozent der Nennleistung ins Netz ein. Beim Erreichen dieser Temperatur reduzierte der Wechselrichter seine Leistung.

Der gewählte Arbeitspunkt war  $P_{DC} = 11.000$  Watt und  $U_{MPP} = 601$  Volt. Der Wirkungsgrad fiel über diesen Temperaturbereich um circa 0,15 Prozent. Der Montageort des Wechselrichters kann sich, bedingt durch den sehr weiten Temperaturbereich, von minus 20 bis plus 55 Grad Celsius und der Schutzklasse IP 65 nahezu uneingeschränkt unter dem Dach oder auch draußen befinden. Zu berücksichtigen ist dabei aber die Leistungsreduzierung ab einer Umgebungstemperatur von 55 Grad Celsius.

**Überlastverhalten:** Bietet man dem Refusol 11 K bei  $U_{MPP} = 601$  Volt und einer Umgebungstemperatur von 28 Grad Celsius eine Überlast des 1,3-Fachen der Eingangsnennleistung an, also 14.300 Watt, begrenzt er auf eine DC-Leistung von circa 12.315 Watt. Dies entspricht einer Überlast von 11,9 Prozent bei einer DC-Nennleistung von 11.000 Watt. Bei dieser Leistungsbegrenzung verschiebt das Gerät den Arbeitspunkt auf der Kennlinie in Richtung höhere Eingangsspannung. Die DC-Spannung stellt sich auf einen Wert von circa 660 Volt ein.

**Eigen- und Nachtverbrauch:** Der Eigenverbrauch des Gerätes im getesteten Grundbauzustand beträgt circa 0,6 Watt auf der AC-Seite – der Hersteller macht hier keine Angabe – und 29 Watt auf der DC-Seite. Nachts zieht das Gerät rund 0,6 Watt Wirkleistung aus dem Netz. Hier gibt der Hersteller 0,2 Watt an.

**Thermografie:** Die Thermografie zeigt eine Draufsicht des Wechselrichters, während er bei einer Umgebungstemperatur von 29 Grad Celsius mit Nennleistung ar-

beitet. Sie zeigt Bauteiltemperaturen auf den Leiterkarten von bis zu 67 Grad Celsius. Es handelt sich dabei nur um sichtbare Bauteile, da das Gerät in mehreren Lagen aufgebaut ist. 67 Grad Celsius betrug die Oberflächentemperatur von Transistoren im Schaltnetzteilbereich, wie in der Abbildung zu erkennen ist. Die Platinenoberfläche, auf der der Prozessor auf der Unterseite sitzt, wies eine Oberflächentemperatur von 65,8 Grad Celsius auf. Vom Leistungsteil konnte nur ein kleiner Ausschnitt unterhalb des Lüfters betrachtet werden, der keine Besonderheiten aufwies. Hier war auch ein Elektrolytkondensator zu sehen, dessen Temperatur im grünen Bereich lag.

Von der Leistungsteilleiterkarte wurde nichtsdestotrotz eine zweite Thermografie bei einer Umgebungstemperatur von 29 Grad Celsius und Nennleistung angefertigt, die hier nicht abgebildet wird. Denn die Bauteile lagen auch hier im grünen Bereich. Zwar verstrichen 20 Sekunden, ehe die Aufnahme gemacht werden konnte, weil einige Befestigungsteile und Kabel entfernt werden mussten. Die Oberflächentemperatur der Netzrelais betrug jedoch unbedenkliche 60,9 Grad Celsius und der Elektrolytkondensatoren 56 Grad Celsius.

### Kommentar des Herstellers

Soweit wir aus den Messungen ersehen können, entsprechen Ihre Daten den von uns intern und extern gemessenen im Rahmen der Messtoleranzen. Die Dokumentation sowie die Displaysprache werden bis Ende des Jahres zusätzlich auch in Flämis, Französisch und Italienisch verfügbar sein.

Die Beobachtung, dass es bei niedrigen DC-Eingangsspannungen um die 400 Volt zu einer Störung der I-Wandler kommen kann, ist begründet in einer ab Mai 2008 neu implementierten Sicherheitsfunktion zur Überwachung von Messeinrichtungen im Gerät. Leider ist diese, wie sich erst im Feld herausstellte, für die Verhältnisse bei besonders niedrigen Eingangsspannungen unter 400 Volt zu empfindlich eingestellt. Anlagen, die mit höheren DC-Nennspannungen arbeiten, sind von diesem Verhalten in der Regel nicht betroffen. Mit dem kommenden Softwarestand ab September 2008 wird diese Gerätereaktion beseitigt. Ein Softwareupdate ist in diesem Fall für unsere Kunden kostenlos.

Das sich verdunkelnde Bedienfeld ist chargenabhängig, also auf eine ungüns-

tige Hardwarekonfiguration zurückzuführen. Es handelt sich um einen Schönheitsfehler, da das Gerät unabhängig davon weiterläuft. Trotzdem werden wir mit einem Firmware-Update die Funktion des Displays verbessern. Mit der ab September 2008 erhältlichen Software stellen wir sicher, dass es zu keiner Verdunkelung des Displays beim Umschalten der Menüpunkte mehr kommen kann.

Die Arbeitspunkte bei 5 und 15 Prozent der Nennleistung liegen ziemlich genau an den Punkten zur Modulumschaltung unseres hoch effizienten, dreiphasigen Teillast-Einspeiseverfahrens. Dies kann zwar ausschließlich unmittelbar an den Umschaltpunkten zu minimalen Änderungen des Anpassungswirkungsgrads führen (wie durch Ihre simulierte konstante Messumgebung nachgewiesen), was aber unter Einsatzbedingungen nachweislich keine relevante Auswirkung auf den Ertrag hat.

## Fazit

Ein Spitzenwirkungsgrad, eine kompakte Bauform, wie sie kein zweiter Wechselrichter dieser Leistungsklasse besitzt, und eine außergewöhnlich stabile Arbeitsweise: Mit dem Refusol 11 K hat die Firma Refu Elektronik ein ausgezeichnetes Gerät vorgelegt. In Anbetracht aller guten Eigenschaften sollte eines nicht vergessen werden: Dieser Wechselrichter ist der erste, den Refu Elektronik entwickelt hat. Welches Potenzial noch in der Firma hinsichtlich

des neuen Geschäftsfeldes schlummert, lässt sich anhand des gelungenen Debüts im Photovoltaikmarkt nur erahnen und macht neugierig auf Folgeprodukte.

Besagtes erstes Gerät macht insgesamt einen sehr guten und vollwertigen Eindruck und ist für ein dreiphasiges Gerät dieser Leistung sehr leicht und klein. Durch die neuartige Topologie des Leistungsteils ist es möglich, die Potenziale des DC-Anschlusses symmetrisch zum Erdleiter aufzuteilen und einen sehr hohen Wirkungsgrad zu erhalten. Dafür gehört das Gerät nicht zu den leisen Arbeitern – verantwortlich dafür sind die Drosseln.

Der maximale Umwandlungswirkungsgrad beträgt glatt 98 Prozent. Solch ein Wert wurde zuvor im Testlabor nur einmal gemessen: Der SMC 8000TL von SMA weist im Großen und Ganzen ähnlich sehr gute Eigenschaften auf. Über den gesamten Spannungs- und Leistungsbereich arbeitet der Refusol sehr konstant. Dies ist auch beim Europäischen und Kalifornischen Wirkungsgrad zu sehen: Der Europäische Wirkungsgrad liegt gerade einmal 0,5 Prozentpunkte und der Kalifornische Wirkungsgrad sogar nur 0,2 Prozentpunkte unter dem maximalen Umwandlungswirkungsgrad. Begünstigt wird die Effizienz des Geräts durch den sehr gleichmäßigen und hohen MPPT-Anpassungswirkungsgrad. So ergibt sich für den Refusol 11 K ein PHOTON-Wirkungsgrad von 96,9 Prozent für mittlere Einstrahlung, womit das Gerät mit dem

bereits erwähnten Wechselrichter von SMA gleichzieht und ebenfalls die Note »sehr gut +« erhält. Mit einem PHOTON-Wirkungsgrad für hohe Einstrahlung von 97,2 Prozent erzielt das Gerät einen geringfügig besseren Wert als das SMA-Produkt und verdient sich damit ebenfalls die Note »sehr gut +«.

Der nächste Vorteil des Refusol ist sein sehr weiter MPP-Spannungsbereich, der von 380 bis 800 Volt reicht. Das ist selten, aber hier liegt auch ein Schwachpunkt des Geräts: Der Bereich ist so weit, dass es zu Einschränkungen in der Verwendung von Modulen kommen kann. Dies ist angedeutet durch die beiden Schraffuren in den Farbdigrammen. Für die Auslegung des MPPs einer Photovoltaikanlage kann daher der gesamte MPP-Spannungsbereich bis circa 720 Volt gewählt werden.

Der Wechselrichter besitzt eine Überlastfähigkeit von 110 Prozent. Die Anzeige der Ausgangsleistung des Wechselrichters ist sehr genau und hält jedem Vergleich stand. Der Temperaturbereich des Gerätes ist sehr weit. Eine Abregelung der Leistung trat erst bei einer Temperatur von 55 Grad Celsius ein. Die Temperaturabhängigkeit des Umwandlungswirkungsgrades des Wechselrichters ist mit minus 0,15 Prozent sehr gering.

Der Wechselrichter ist, abgesehen von einigen wenigen Punkten, die der Hersteller jedoch im Blick hat, ein Spitzengerät, von dessen Schlag sich die Redaktion noch viele weitere wünscht.

Heinz Neuenstein, Ines Rutschmann

## Testergebnisse im Überblick

Wechselrichter	betrachteter Spannungsbereich	mittlere Einstrahlung			hohe Einstrahlung			Ausgabe
		Wirkungsgrad <sub>P<sub>med</sub></sub>	Note	Platz	Wirkungsgrad <sub>P<sub>high</sub></sub>	Note	Platz	
Refusol 11 K	380 - 800 V	96,9 %	sehr gut +	1	97,2 %	sehr gut +	1	9-2008
SMA SMC 8000TL	335 - 487 V	96,9 %	sehr gut +	1	97,0 %	sehr gut +	2	10-2007
Sunways AT 4500	250 - 600 V	94,6 %	gut	3	94,8 %	gut	5	7-2008
Fronius IG Plus 50	230 - 500 V	94,5 %	gut	4	94,8 %	gut	5	8-2008
Phoenixtec PVG 2800 (überarbeitetes Modell)	250 - 450 V	94,4 %	gut	5	95,1 %	sehr gut	3	5-2008
Conergy IP 5000 vision	301 - 706 V	94,0 %	gut	6	94,7 %	gut	7	7-2007
Delta Energy SI 3300	150 - 435 V	93,9 %	gut	7	94,7 %	gut	7	5-2008
Mitsubishi PV-PNS06ATL-GER	260 - 650 V	93,9 %	gut	7	94,6 %	gut	9	6-2008
Sputnik SolarMax 2000C*	165 - 515 V	93,8 %	gut	9	93,1 %	befriedigend	16	4-2007
Sunways NT 2600 (unterer Spannungsbereich)	350 - 623 V	93,8 %	gut	9	95,1 %	sehr gut	3	11-2007
Ingeteam Ingecon Sun 3,3 TL	159 - 414 V	93,4 %	befriedigend	11	94,3 %	gut	10	8-2007
SMA SB 3800	208 - 395 V	93,2 %	befriedigend	12	93,6 %	gut	13	2-2007
Diehl AKO Platinum 4600S	320 - 628 V	92,9 %	befriedigend	13	93,3 %	befriedigend	15	4-2008
Kaco Powador 3501xi	350 - 597 V	92,6 %	befriedigend	14	92,9 %	befriedigend	17	6-2007
Kaco Powador 2500xi	350 - 597 V	92,5 %	befriedigend	15	93,4 %	befriedigend	14	12-2007
Sunways NT 2600 (oberer Spannungsbereich)	476 - 749 V	92,3 %	befriedigend	16	93,9 %	gut	11	1-2008
Mastervolt QS 2000*	212 - 366 V	92,3 %	befriedigend	16	92,7 %	befriedigend	18	11-2007
Riello HP 4065REL	255 - 435 V	91,7 %	ausreichend	18	93,9 %	gut	11	9-2007
Fronius IG 30	150 - 397 V	91,4 %	ausreichend	19	92,2 %	befriedigend	19	1-2007
Siemens Sitop solar 1100 Master*	200 - 552 V	90,2 %	ausreichend	20	91,7 %	ausreichend	20	5-2007
Phoenixtec PVG 2800 (ursprüngliches Modell)*	255 - 435 V	78,4 %	mangelhaft	21	85,8 %	mangelhaft	21	2-2008

\* nur noch Lagerbestände, Gerät wird nicht mehr produziert