

Neue Photovoltaik-Wechselrichter im Test

Autor(en): **Häberlin, H. / Röthlisberger, H. R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **84 (1993)**

Heft 10

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902692>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

An der Ingenieurschule Burgdorf (ISB) wurden seit 1988 zahlreiche verschiedene einphasige Wechselrichter für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen eingehend getestet. Neben einem generellen Überblick über die Ergebnisse aller Tests wird in diesem Aufsatz vor allem über die Ergebnisse der im Jahre 1992 durchgeführten Tests an den neuesten Geräten berichtet.

Neue Photovoltaik-Wechselrichter im Test

■ H. Häberlin und H.R. Röthlisberger

Einführung

Wegen des in der westlichen Welt faktisch weitgehend bestehenden Kernkraftwerkmotoriums interessieren sich seit einigen Jahren auch die Elektrizitätswerke vermehrt für neue erneuerbare Energien (Photovoltaik, Windenergie, Biogas usw.). Besonders die Photovoltaik, die Technik der direkten Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom, hat das Potential, mittel- und langfristig einen substantiellen Beitrag an die Stromversorgung der Schweiz zu liefern [1, 7].

In Gebieten mit vorhandenem Stromnetz werden Photovoltaikanlagen zweckmässigerweise mit dem Netz gekoppelt. Das Herzstück und zugleich das kritische Element jeder Netzeinspeisung ist nach wie vor der Wechselrichter. Seit 1988 wurden die wichtigsten einphasigen Photovoltaik-Wechselrichter im Leistungsbereich von 1 bis 3 kW, die in der Schweiz auf dem Markt erhältlich sind, an der Ingenieurschule Burgdorf (ISB) eingehend getestet. Bei vielen Geräten konnte der Hersteller aufgrund der vom ISB-Photovoltaiklabor durchgeführten Messungen wesentliche Verbesserungen vornehmen.

In früheren Artikeln wurde eingehend über den Aufbau unserer Testanlage Solab 3 und über die Probleme mit den zuerst auf dem Markt erschienenen Wechselrichtern [8, 9] oder über generelle Probleme mit solchen Wechselrichtern und mögliche Gegen-

massnahmen berichtet [6]. In [3] findet man eine ausführliche Beschreibung aller Testergebnisse. In dieser Arbeit wird über die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen der neuen Wechselrichter PV-WR-1800 von SMA, Top Class 1500 und Top Class 3000 von ASP und Solcon 3400 von Hardmeier berichtet.

Ergebnisse der Wechselrichtertests

Die wichtigsten bei den Tests festgestellten Probleme waren:

- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV): Unzulässig hohe Funkstörspannungen auf DC- und AC-Anschlusseleitungen.
- Ungenügende Immunität gegen Rundsteuersignale (manchmal sogar Hardwaredefekte infolge von Rundsteuersignalen).
- Zu hohe Oberschwingungsströme auf der Netzseite (manchmal nur sporadisch oder in bestimmten Leistungsbereichen).
- Störungen/Defekte infolge der Spannungsanhebung auf der Speiseleitung im Betrieb (siehe auch [6]).
- Sporadische Probleme mit dem «Maximum Power Tracking».

Um die Rundsteuersignal-Empfindlichkeit der Wechselrichter nicht nur bei den zufällig am Ort unserer Testanlage vorhandenen Frequenzen, sondern systematisch und reproduzierbar testen zu können, wurde in der zweiten Hälfte des Jahres 1991 ein Rundsteuersignal-Simulator mit variabler Frequenz und Spannung entwickelt. Damit kann

Adresse der Autoren:

Dr. H. Häberlin, dipl. El.-Ing. ETH,
Professor an der Ingenieurschule Burgdorf,
Zentrum für Elektrotechnik, Ilcoweg 1, 3400 Burgdorf,
und H.R. Röthlisberger, El.-Ing. HTL,
Assistent an der Ingenieurschule Burgdorf,
Zentrum für Elektrotechnik, Ilcoweg 1, 3400 Burgdorf.

Typ	S _N [VA]	U _{DC} [V]	Ein-schalt-leistung [W _{DC}]	Trans-formator	Europäischer Wirkungs-grad [%]	Prinzip s: selbst-geführt n: netz-geführt	Strom-oberwellen (<2kHz)	EMV AC	EMV DC	Empfindlichkeit auf Rund-steuer-signale	Ge-räusch
SI-3000	3000	48	100	HF	90	s	o	-	-	o (mod)	-
SOLCON	3300	96	60	HF	90	s	+	-(mod)	--	+(mod)	++
SOLCON 3400	3400	96	40	HF	91,4	s	+	++	+	+	++
PV-WR-1500	1500	96	20	HF	85,5	s	++	o	-	o	+
PV-WR-1800	1800	96	20	HF	86,5	s	+	++	o	o	o
TOP-CLASS 1500	1500	64	15	NF	89,5	s	+	+(mod)	o (mod)	++	+
TOP-CLASS 3000	3000	64	18	NF	91,5	s	o	+(mod)	o (mod)	++	+
ECOVERTER 1000	1000	64	10	HF	92	s	++	o	o	+	+
EGIR 10	1700	165	17	NF	89	n	-	-	+	-	-

++ sehr gut, erfüllt Norm mit Reserve
 + gut, Norm erfüllt
 o befriedigend, Norm beinahe erfüllt
 - mangelhaft, Norm nicht erfüllt
 -- ungenügend, Norm bei weitem nicht erfüllt
 (mod) nach Modifikation

Tabelle 1 Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse der Wechselrichtertests der ISB

ein Gerät bei verschiedenen Netzspannungen auf seine Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale mit unterschiedlichen Signalpegeln und Frequenzen getestet werden, ohne dass das Netz dadurch beeinflusst wird. Alle neuen Wechselrichter wurden mit diesem Simulator eingehend auf ihre Rundsteuer-signal-Empfindlichkeit getestet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Testergebnisse (Endstand, d.h. nach eventuellen Modifikationen durch den

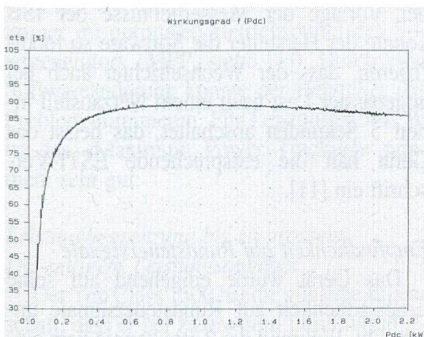


Bild 1 Wirkungsgrad des PV-WR-1800 als Funktion der Gleichstrom-Eingangleistung

Hersteller) und erlaubt einen Vergleich der neuen Wechselrichter mit den früher getesteten Geräten. In den folgenden Unterkapiteln folgen die detaillierten Testergebnisse der neuen Wechselrichter.

Der in der Tabelle 1 angegebene «europäische Wirkungsgrad» ist ein Durchschnittswert, der zur näherungsweisen Berechnung des Energieertrags bei mitteleuropäischen Strahlungsverhältnissen verwendet werden kann. Er wird nach folgender Formel aus den Werten bei verschiedenen Prozentsätzen der Nennleistung berechnet:

$$n = 0,03 n_5 + 0,06 n_{10} + 0,13 n_{20} + 0,1 n_{30} + 0,48 n_{50} + 0,2 n_{100}$$

Wechselrichter PV-WR-1800

Der PV-WR-1800 ist eine verbesserte Version des Vorgängermodells PV-WR-1500 und wird von der Firma SMA hergestellt. Er hat eine um 300 W erhöhte Nennleistung von 1800 W, ein wesentlich verbessertes EMV-Verhalten auf der Gleichstromseite und als spezielle Eigenschaft die Fähigkeit, im «Master Slave»-Betrieb zu arbeiten.

Wirkungsgrad

Bild 1 zeigt den Wirkungsgrad in Funktion der Eingangsleistung des PV-WR-1800. Der vom Hersteller angegebene Wirkungsgrad wird nicht ganz erreicht. Der gemessene maximale Wirkungsgrad liegt bei 89%. Im Teillastbereich liegt der Wirkungsgrad leicht über dem des Vorgängermodells PV-WR-1500. Bei 10% der Nennleistung beträgt der Wirkungsgrad noch 78%.

Oberschwingungen

Die niederfrequenten Stromoberschwingungen im Bereich 100 Hz–2 kHz liegen unter den Grenzwerten von EN 60555-2 bzw. SEV 3601.2. Bild 2 zeigt das Spektrum der Stromoberschwingungen der Harmonischen 1–50 bei einer Ausgangsleistung von 1500 W.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Der PV-WR-1800 ist im Gegensatz zum Vorgängermodell PV-WR-1500 nun auch

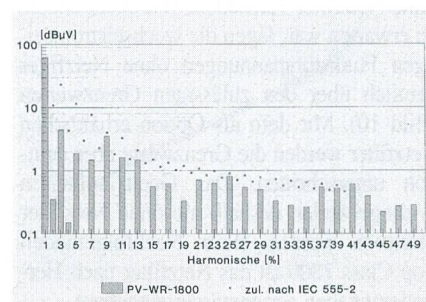


Bild 2 Spektrum der Oberschwingungsströme des PV-WR-1800 bis zur 50. Harmonischen bei P_{ac} = 1,5 kW

auf der Gleichstromseite mit einem eingebauten Netzfilter entfällt. Auf der AC-Seite (Bild 3) werden die Grenzwerte von EN 55014 über den ganzen Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz deutlich unterschritten. Auch auf der DC-Seite (Bild 4) sind wesentliche Verbesserungen festzustellen. Die Grenzwerte werden nur noch im Bereich von 5 bis 6 MHz leicht überschritten.

Selbstlauf nach einem Netzausfall

Wird dieser an sich einphasige Wechselrichter nach den Vorschriften des Herstellers dreiphasig angeschlossen, kann in der Testschaltung nach [9] kein Selbstlauf festgestellt werden.

Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale

Bild 5 zeigt die Empfindlichkeit des PV-WR-1800 auf Rundsteuersignale bei verschiedenen Netzspannungen in Funktion der Frequenz. Bei Pegeln über den angegebenen Kurven wird der Wechselrichterbetrieb jeweils für 1–2 Minuten unterbrochen, danach

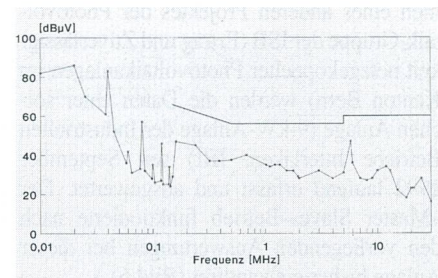


Bild 3 Vom PV-WR-1800 erzeugte hochfrequente Störspannungen auf der Wechselstromseite

erfolgt ein automatischer Neustart. Es wurden keine Hardwaredefekte beobachtet. Zusätzlich ist in Bild 5 noch der nach SEV 3600-1 maximal zu erwartende Rundsteuer-signal-Pegel angegeben.

Minimale Einschaltleistung

Für das Einschalten des Wechselrichters ist auf der Gleichstromseite eine minimale Leistung von etwa 20 W erforderlich.

Geräusentwicklung

Mangels exakter Messmöglichkeiten konnte die Geräusentwicklung nur qualitativ und nach dem subjektiven Empfinden des Testers beurteilt werden. Die im Betrieb vom PV-WR-1800 produzierten Geräusche waren deutlich lauter als beim PV-WR-1500, aber insgesamt noch erträglich.

«Master Slave»-Betrieb

Die Möglichkeit des «Master Slave»-Betriebs bei grösseren Anlagen ist eine Spezialität des PV-WR-1800. Es können bis zu vier Geräte (ein «Master» und bis zu drei «Slaves») gleichstromseitig parallel betrieben

Wechselrichter im Test

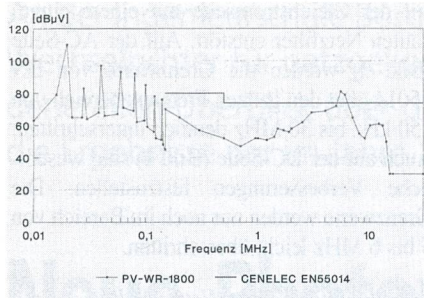


Bild 4 Vom PV-WR-1800 erzeugte hochfrequente Störspannungen auf der Gleichstromseite

werden, während sie wechselstromseitig sogar an verschiedenen Phasen angeschlossen werden können. Bei kleiner Einstrahlung läuft nur ein Gerät, der «Master». Bei stärkerer Einstrahlung werden nach Bedarf weitere «Slaves» zugeschaltet und bei voller Leistung laufen alle Geräte. Auf diese Weise kann der Teillastwirkungsgrad der Gesamtanlage deutlich gesteigert werden. Im Rahmen eines anderen Projektes der Photovoltaik-Gruppe der ISB (Ertrag und Zuverlässigkeit netzgekoppelter Photovoltaikanlagen im Kanton Bern) werden die Daten einer solchen Anlage (9-kW-Anlage der Industriellen Betriebe Interlaken, IBI) seit September 1992 laufend erfasst und ausgewertet. Der «Master Slave»-Betrieb funktionierte nach den vorliegenden Auswertungen bei dieser Anlage bisher einwandfrei (Bild 6).

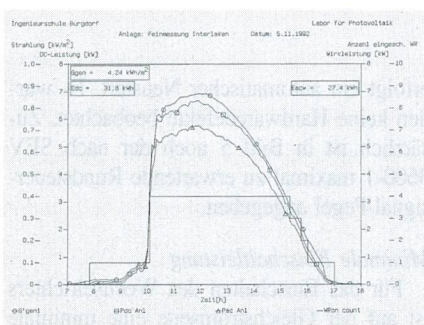


Bild 6 Einstrahlung, produzierte Gleich- und Wechselstromleistung sowie Anzahl der aktiven Wechselrichter (Treppenkurve) im «Master Slave»-Betrieb am 5. November 1992 bei der 9-kW-Anlage der IBI

Leistungsbegrenzung bei zu grossem DC-seitigem Leistungsangebot

Der PV-WR-1800 hat wie sein Vorgänger PV-WR-1500 die angenehme Eigenschaft, dass er bei zu grossem Leistungsangebot auf der Gleichstromseite (z.B. infolge leicht überdimensioniertem Solargenerator oder «Cloud Enhancement»-Situationen) auf seine wechselstromseitige Nennleistung zurückregelt (vgl. [5, 6] oder Bild 12).

Wechselrichter Top Class 1500

Der Top Class 1500 ist ein neuer 1,5-kW-Wechselrichter von ASP, der gegenüber den meisten Konkurrenzmodellen auf der Netzseite schaltungsmässige Vereinfachungen aufweist. Inzwischen ist er nach Herstellerangaben bereits durch ein verbessertes 1,8-kW-Modell (Top Class 1800) ersetzt worden.

Wirkungsgrad

Bild 7 zeigt den Wirkungsgrad des Top Class 1500 (mit eingebautem Netzfilter) in Funktion der Eingangsleistung. Bei 10% der Nennleistung beträgt der Wirkungsgrad bereits 87,5%. Bei Leistungen >400 W überschreitet er die 90%-Marke. Der Maximalwert von rund 92% wird bei etwa 1 kW erreicht.

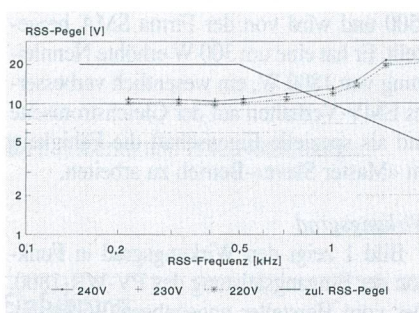


Bild 5 Empfindlichkeit des PV-WR-1800 auf Rundsteuersignale bei verschiedenen Netzspannungen

Oberschwingungen

Bei kleinen Ausgangsleistungen bis etwa 100 W weist der Top Class 1500 sehr starke Stromüberschwingungen auf (siehe Bild 8), die aber wegen der kleinen Leistung die Grenzwerte von EN 60555-2 bzw. SEV 3601-2 nicht überschreiten. Für grössere Leistungen sind die Oberschwingungen wesentlich kleiner. Bild 9 zeigt das Spektrum der Oberschwingungsströme bei einer eingespissten Leistung von 1500 W.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Der Top Class 1500 wurde anfänglich ohne Netzfilter vertrieben. Wie nicht anders zu erwarten war, lagen die wechselstromseitigen Funkstörspannungen ohne Netzfilter deutlich über den zulässigen Grenzwerten (Bild 10). Mit dem als Option erhältlichen Netzfilter werden die Grenzwerte aber deutlich unterschritten. Das Gerät sollte in Wohngebäuden deshalb nie ohne Netzfilter betrieben werden. Beim Nachfolgemodell Top Class 1800 ist das Netzfilter nach Herstellerangaben serienmässig eingebaut.

In Bild 11 ist zu erkennen, dass auf der Gleichstromseite die Grenzwerte leicht über-

schrritten werden. Durch eine einfache Entstörmassnahme (HF-mässige Erdung der Anschlüsse + und -) konnte eine gewisse Verbesserung erzielt werden, so dass die gleichstromseitigen Grenzwerte nur noch geringfügig überschritten werden.

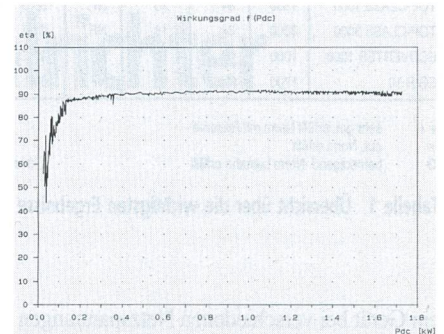


Bild 7 Wirkungsgrad des Top Class 1500 in Funktion der Gleichstrom-Eingangsleistung

Selbstlauf nach einem Netzausfall

Mit der ersten Softwareversion neigte der Top Class 1500 in der in [9] beschriebenen Testschaltung bei angepasster Last zum Selbstlauf. Dies ist nicht aussergewöhnlich und wurde auch bei den ersten Tests mit Konkurrenzmodellen oft beobachtet. Nach der Vorlage der Messergebnisse der ISB konnte der Hersteller die Software so modifizieren, dass der Wechselrichter auch bei angepasster Last nach einem Netzausfall in 5 Sekunden abschaltet, das heisst das Gerät hält die entsprechende ESTI-Vorschrift ein [11].

Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale

Das Gerät wurde eingehend auf seine Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale untersucht. Während des Tests konnte kein einziger Ausfall infolge Rundsteuersignalen festgestellt werden.

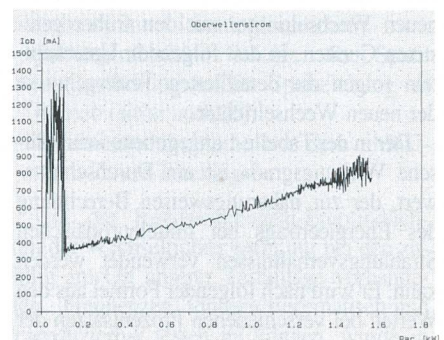


Bild 8 Effektivwert des Oberschwingungsstromes beim Top Class 1500 in Funktion der Ausgangsleistung

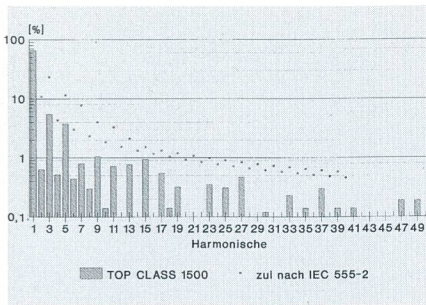


Bild 9 Spektrum der Oberschwingungsströme des Top Class 1500 bis zur 50. Harmonischen bei $P_{ac} = 1,5 \text{ kW}$

Minimale Einschaltleistung

Für das Einschalten des Gerätes ist eine minimale Leistung des Solargenerators notwendig. Die Einschaltswelle liegt beim Top Class 1500 sehr tief, nämlich bei bloss 15 W.

Geräusentwicklung

Das Gerät entwickelt im Betrieb nur sehr geringe Geräusche, die nicht störend wirken.

«Maximum Power Tracking»

Wie manche Konkurrenzprodukte hatte auch der Top Class 1500 zu Beginn gewisse Probleme mit dem «Maximum Power Tracking» [3], das heisst das Gerät arbeitete nicht immer im optimalen Betriebspunkt des Solargenerators (MPP, siehe [1]). Durch eine Softwareänderung konnte der Hersteller das Problem eliminieren. Für Leistungen >80 W ist das «Maximum Power Tracking» nunmehr sehr gut.

Leistungsbegrenzung bei zu grossem DC-seitigem Leistungsangebot

Der Top Class 1500 hat die günstige Eigenschaft, dass er bei zu grossem Leistungsangebot auf der Gleichstromseite (z.B. infolge leicht überdimensioniertem Solargenerator oder «Cloud Enhancement»-Situationen) nicht abschaltet, sondern auf seine wechselstromseitige Nennleistung zurückregelt (Bild 12).

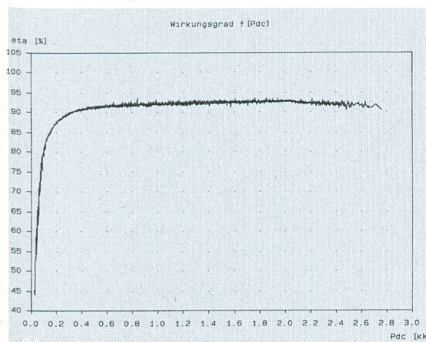


Bild 13 Wirkungsgrad des Top Class 3000 als Funktion der Gleichstrom-Eingangleistung

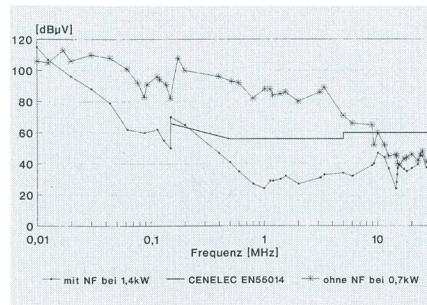


Bild 10 Vom Top Class 1500 produzierte hochfrequente Störspannungen auf der Wechselstromseite (mit und ohne Netzfilter)

Netzunterbruch im Betrieb

Im Gegensatz zu einigen Konkurrenzprodukten, die Hardwareschäden erleiden können, wenn im Betrieb die Verbindung zum Netz plötzlich unterbrochen wird, erträgt der Top Class solche Unterbrüche problemlos und nimmt den Betrieb nach dem Wiedereinschalten des Netzes sofort wieder auf.

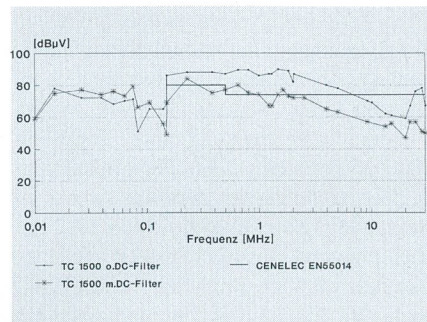


Bild 11 Vom Top Class 1500 produzierte hochfrequente Störspannungen auf der Gleichstromseite mit und ohne Entstörmassnahmen

Wechselrichterausfälle

Während der Tests des Top Class 1500 ist kein Hardwaredefekt aufgetreten. Auch die harten Strapaziertests mit hoher Netzspannung und gleichzeitig vorhandenen starken Rundsteuersignalen lösten keine Hardwaredefekte aus.

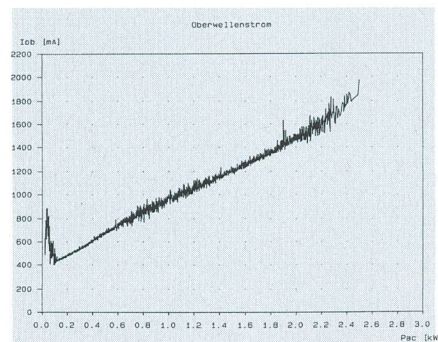


Bild 14 Effektivwert des Oberschwingungsstromes beim Top Class 3000 in Funktion der Ausgangsleistung

Wechselrichter Top Class 3000

Der Top Class 3000 ist ein neuer 3-kW-Wechselrichter von ASP, der wie das kleinere Modell Top Class 1500 die galvanische Trennung mit einem 50-Hz-Ringkerntrafo durchführt und somit eine wesentlich einfachere Schaltung aufweist als die meisten Konkurrenzgeräte.

Wirkungsgrad

Da der Top Class 3000 ohne Netzfilter unzulässige HF-Störungen verursacht und somit für den Betrieb in Wohngebäuden ein Netzfilter unabdingbar ist, wurde für die Wirkungsgradmessung auf der Netzseite ein externes Netzfilter montiert und die Verluste dieses Filters ebenfalls dem Wechselrichter zugerechnet. Bild 13 zeigt, dass der Wirkungsgrad des Top Class 3000 trotzdem sehr hoch ist. Bereits bei einer Gleichstromleistung von 100 W liegt er bei 83%. Bei 10% der Nennleistung werden beinahe 90% erreicht. Der maximale Wirkungsgrad liegt bei etwa 93%.

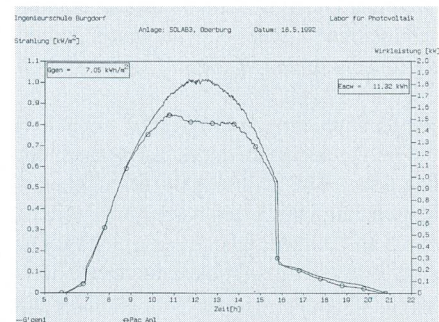


Bild 12 Bei zu grosser eingespeister Gleichstromleistung regelt der Top Class 1500 auf die wechselstromseitige Nennleistung zurück

Oberschwingungen

Wie der Top Class 1500 produziert auch der Top Class 3000 bei kleinen Leistungen bis etwa 100 W relativ starke Stromoverschwingungen (Bild 14), überschreitet jedoch dabei die zulässigen Grenzwerte noch nicht. Bei grösseren Leistungen erzeugt das Gerät auf einzelnen Frequenzen Stromoverschwingungen, welche die zulässigen Grenzwerte nach EN 60555-2 bzw. SEV 3601-2 leicht überschreiten (Bild 15, Grenzwerte bei der 15., 25., 33. und 35. Harmonischen überschritten). Bei eher hohen Netzimpedanzen am Verknüpfungspunkt können deshalb zu hohe Oberschwingungsspannungen auftreten. Wird dagegen der Netzanschluss entsprechend dimensioniert [6], sind keine Probleme zu erwarten.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Die erste Serie wurde ohne Netzfilter auf der Wechselstromseite ausgeliefert. Wie Bild 16 zeigt, werden die Grenzwerte von

Wechselrichter im Test

EN 55014 in dieser Ausführung aber über einen weiten Frequenzbereich massiv überschritten. In Wohngebäuden sollte deshalb ein Top Class 3000 nicht ohne Netzfilter betrieben werden.

Nach der Montage eines wirksamen Netzfilters auf der Wechselstromseite wurden die gleichen Messungen nochmals wiederholt. In Bild 16 ist zu erkennen, dass die Grenzwerte mit Netzfilter oberhalb 150 kHz nun deutlich unterschritten werden. Im Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 150 kHz, in dem die meisten Normen keine Grenzwerte vorgeben (Ausnahme z.B. VDE871), sind die Störspannungspegel teilweise noch relativ hoch, da dort das Netzfilter noch praktisch keine Wirkung hat. Besonders im hörbaren Bereich bei etwa 12 kHz wurden relativ hohe Pegel gemessen, die einmal sogar zu Störungen eines an der gleichen Phase angeschlossenen Gerätes führten.

In Bild 17 ist zu erkennen, dass auf der Gleichstromseite die Grenzwerte leicht überschritten werden. Durch eine einfache Entstörmassnahme (HF-mässige Erdung der Anschlüsse + und -) konnte eine gewisse Verbesserung erzielt werden, so dass die gleichstromseitigen Grenzwerte nur noch geringfügig überschritten werden.

Selbstlauf nach einem Netzausfall

Wie das kleinere Modell neigte auch der Top Class 3000 in der in [9] beschriebenen Testschaltung bei angepasster Last zunächst zum Selbstlauf. Auch bei diesem Gerät konnte der Hersteller das Problem durch eine Softwaremodifikation eliminieren, so dass die Vorschriften des ESTI [11] nunmehr eingehalten werden.

Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale

Wie das kleinere Modell wurde auch der Top Class 3000 gründlich auf seine Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale untersucht. Wiederum konnte kein einziger Ausfall infolge eines Rundsteuersignals registriert werden.

Minimale Einschaltleistung

Mit nur 18 W liegt die minimale Einschaltleistung beim Top Class 3000 nur wenig höher als beim kleineren Modell.

Geräuschentwicklung

Auch der Top Class 3000 entwickelt im Betrieb nur geringe Geräusche, die nicht störend wirken.

«Maximum Power Tracking»

Da das Gerät die gleiche Software benützt wie das kleinere Modell, traten auch hier zunächst Probleme mit dem «Maximum Power Tracking» auf, die jedoch ebenfalls durch eine Softwaremodifikation behoben werden konnten.

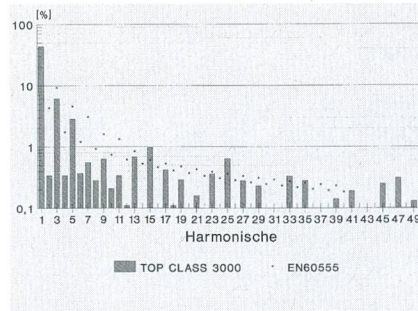


Bild 15 Spektrum der Oberschwingungsströme des Top Class 3000 bis zur 50. Harmonischen bei 2,7 kW eingespeister Leistung

Netzunterbruch im Betrieb

Auch beim Top Class 3000 kann die Verbindung zum Netz im Betrieb unterbrochen werden, ohne dass Schäden auftreten. Nach dem erneuten Einschalten des Netzes nimmt er den Betrieb sofort wieder auf.

Wechselrichtererausfälle

Das im Photovoltaik-Labor der ISB getestete Gerät erlitt während der ganzen, intensiven Tests (inkl. Strapaziertests mit hohen Netzspannungen und starken Rundsteuersignalen) keinen einzigen Hardwaredefekt. Im Rahmen eines weiteren Projekts werden auch die Daten einer mit einem Top Class 3000 ausgerüsteten 3-kW-Photovoltaikanlage über einen längeren Zeitraum untersucht. Bei dieser Anlage wurden im Juli 1992 zunächst mehrere Ausfälle registriert, die einen manuellen Restart erforderten (Fehler Typ B nach [9]). Am 24. Juli 1992 trat sogar ein Hardwaredefekt auf (Fehler Typ C nach [9], siehe Bild 18). Da bei diesem Projekt weit aus weniger Daten erfasst werden als in unserem Photovoltaik-Labor, konnte die genaue Ursache dieses Ausfalls nicht eindeutig bestimmt werden. Nach einer Modifikation des Gerätes durch den Hersteller traten keine weiteren Störungen oder Ausfälle mehr auf.

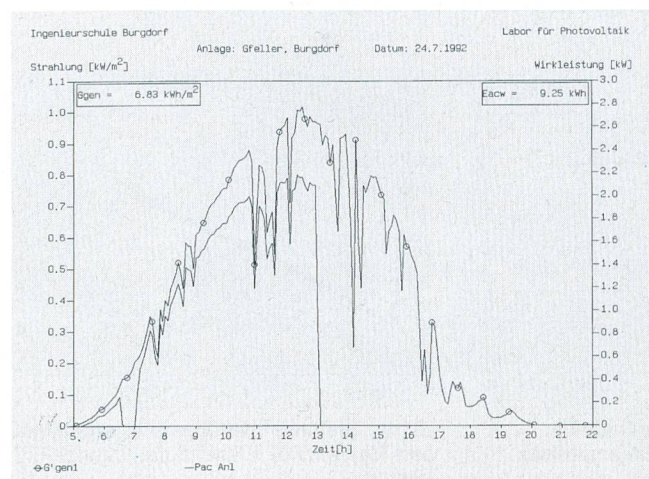


Bild 18 Wechselrichter-ausfall mit Hardwaredefekt am 24. Juli 1992 bei einer Top Class 3000 bei einer 3-kW-Photovoltaikanlage in Burgdorf

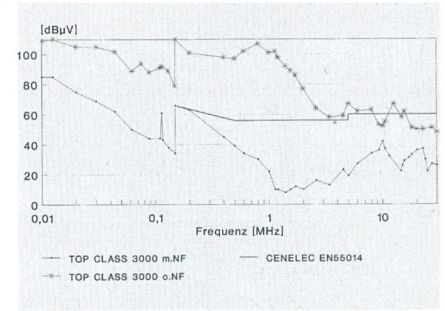


Bild 16 Vom Top Class 3000 erzeugte hochfrequente Störspannungen auf der Wechselstromseite (mit und ohne Netzfilter)

Wechselrichter Solcon 3400

Der Solcon 3400 ist ein überarbeitetes und verbessertes Nachfolgemodell des Solcon. Er hat neu wechselstromseitig 3400 W Nennleistung und ein wesentlich verbessertes EMV-Verhalten. Die Messungen wurden an einem Prototyp des Solcon 3400 durchgeführt.

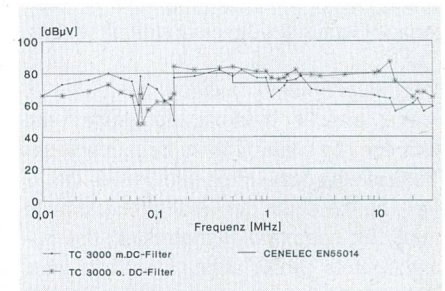


Bild 17 Vom Top Class 3000 erzeugte hochfrequente Störspannungen auf der Gleichstromseite mit und ohne Entstörmassnahmen

Wirkungsgrad

Gegenüber dem Vorgängermodell konnte der Wirkungsgrad nochmals leicht gesteigert werden. Bild 19 zeigt den Wirkungsgrad des Solcon 3400 in Funktion der Gleichstrom-

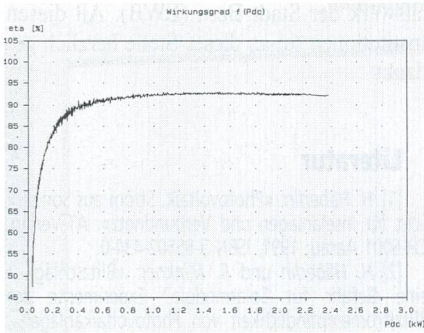


Bild 19 Wirkungsgrad des Solcon 3400 als Funktion der Gleichstrom-Eingangsleistung

Eingangsleistung. Bei 10% der Nennleistung beträgt er bereits etwa 88,5%. Der Maximalwirkungsgrad beträgt bei knapp halber Nennleistung nun etwa 93% und nimmt bei höheren Leistungen nur noch wenig ab.

Oberschwingungen

Wie bereits das Vorgängermodell Solcon 3000 versucht auch der Solcon 3400 vom Konzept her, die Sinusform des Netzes zu verbessern. Die von ihm produzierten Stromüberschwingungen hängen deshalb primär vom Gehalt des Netzes an Oberschwingungsspannungen und weniger von der eingespeisten Leistung ab. Die gemessenen Stromüberschwingungen des Solcon 3400 lagen deutlich unter den Grenzwerten von EN 60555-2 bzw. SEV 3601-2 (Bild 20). Ist das Gerät in Betrieb, werden am Verknüpf-

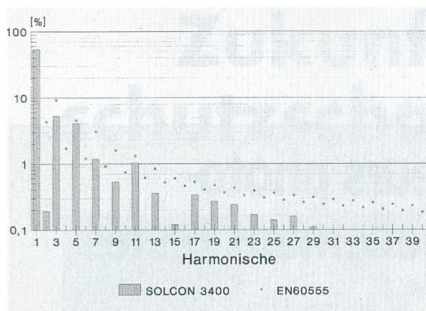


Bild 20 Spektrum der Oberschwingungsströme des Solcon 3400 bis zu 50. Harmonischen bei 3,1 kW eingespeister Leistung

fungspunkt mit dem Netz geringere Oberschwingungsspannungen gemessen als bei ausgeschaltetem Gerät [1, 3, 9]. Der Solcon 3400 kämpft aber andererseits auch gegen Rundsteuersignale an und kann diese bei relativ hohen Netzimpedanzen in seiner Umgebung etwas abschwächen.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Bei der elektromagnetischen Verträglichkeit wurden gegenüber dem Vorgängermodell (in der Urform ein kleiner Störsender)

wesentliche Fortschritte erzielt. Die gemessenen Funkstörspannungen liegen auf der AC-Seite (Bild 21) oberhalb 300 kHz um 12 dB bis 30 dB unter den Grenzwerten von EN 55014. Sie liegen sogar unter den sehr strengen Grenzwerten von VDE 871B. Auch auf der Gleichstromseite (siehe Bild 22) liegen die gemessenen Störspannungen deutlich unter den Grenzwerten von EN 55014 und liegen etwa auf den Grenzwerten von VDE 871A. Einzig im Bereich von etwa 200 kHz bis 300 kHz, der für die Verhältnisse in der Schweiz von geringer Bedeutung ist, werden die Grenzwerte noch leicht überschritten. Der Radioempfang in der Umgebung wird durch einen Solcon 3400 deshalb kaum mehr gestört.

Selbstlauf nach einem Netzausfall

Bei den durchgeführten Tests konnte in der Testschaltung nach [9] auch bei angepasster Last kein Selbstlauf festgestellt werden, das heisst die Vorschriften gemäss [11] werden eingehalten.

Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale

Bild 23 zeigt die Empfindlichkeit des Solcon 3400 auf Rundsteuersignale bei verschiedenen Netzspannungen in Funktion der Frequenz. Bei Pegeln über den angegebenen Werten schaltet das Gerät kurz ab, startet aber sofort wieder neu auf.

Tritt vier- bis fünfmal kurz hintereinander (innert ein bis zwei Minuten) ein solcher Ausfall auf, wird das Gerät jedoch endgültig abgeschaltet und muss manuell neu gestartet werden. Andernfalls erfolgt meist erst am andern Morgen ein automatischer Neustart.

Zweimal konnte das Gerät nach einem durch ein Rundsteuersignal verursachten Ausfall nur noch eine konstante Leistung von etwa 100 W einspeisen (Schleichbetrieb [3]). Nach etwa fünf Minuten erkannte das Gerät diesen Fehler selbst und suchte selbständig wieder den «Maximum Power Point» auf.

Minimale Einschaltleistung

Für das Einschalten des Wechselrichters ist auf der Gleichstromseite eine minimale Leistung von etwa 40 W notwendig.

Geräuschentwicklung

Das Gerät erzeugt im Betrieb nur kaum hörbare Geräusche.

«Maximum Power Tracking»

Wie beim Vorgängermodell war das «Maximum Power Tracking» bei kleinen Leistungen unterhalb etwa 300 W nicht immer optimal, funktionierte bei grösseren Leistungen (>300 W) jedoch einwandfrei.

Netzunterbruch im Betrieb

Im Gegensatz zu seinem Vorgängermodell, das dabei Hardwaredefekte erleiden

kann, erträgt der Solcon 3400 nun auch das Unterbrechen der Verbindung zum Netz im Betrieb ohne Probleme oder Hardwaredefekte. Die Verbindung zum Netz wurde bei einer Gleichstromleistung von etwa 2 kW mehrmals allpolig unterbrochen. Nach dem Wiedereinschalten des Netzes nahm das Gerät den Betrieb jeweils ordnungsgemäss wieder auf.

Wechselrichtererausfälle

Das im Photovoltaiklabor der ISB getestete Gerät erlitt während der ganzen, intensiven Tests (inkl. Strapaziertests mit hohen Netzspannungen und starken Rundsteuersignalen) keinen einzigen Hardwaredefekt.

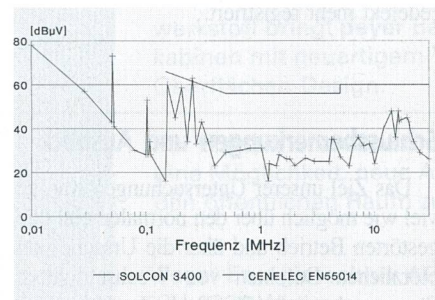


Bild 21 Vom Solcon 3400 erzeugte hochfrequente Störspannungen auf der Wechselstromseite

Im Rahmen eines anderen Projektes werden auch die Daten einer hochalpinen Photovoltaikanlage in Birg (Mittelstation der Schilthornbahn), die mit einem Solcon 3400 ausgerüstet ist, über einen längeren Zeitraum erfasst und untersucht. Bei dieser Anlage, deren Solargenerator eine Spitzenleistung von 4134 Wp bei STC aufweist, trat am 25. Dezember 1992 wegen des grossen Leistungsangebots auf der Gleichstromseite ein Hardwaredefekt auf (Bild 24), der nach Herstellerangaben auf eine Zerstörung von im Prototyp zu knapp dimensionierten Leiterbahnen im Leistungsteil zurückzuführen ist. Dieser Fehler wurde vom Hersteller in der Zwischenzeit behoben.

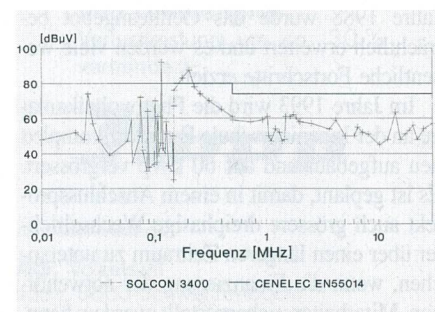


Bild 22 Vom Solcon 3400 erzeugte hochfrequente Störspannungen auf der Gleichstromseite

Wechselrichter im Test

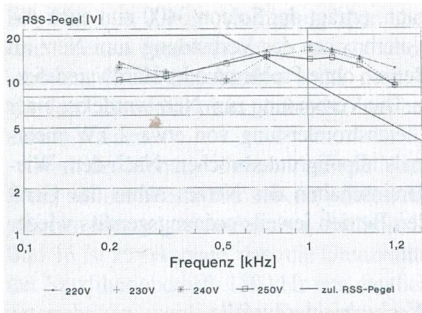


Bild 23 Empfindlichkeit des Solcon 3400 auf Rundsteuersignale bei verschiedenen Netzspannungen

Seither wurden keine Ausfälle mit Hardwaredefekt mehr registriert.

Schlussbemerkungen und Ausblick

Das Ziel unserer Untersuchungen war, so viel wie möglich über den normalen und den gestörten Betrieb und über die Ursache von plötzlichen Defekten von Wechselrichtern für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen herauszufinden und einen Beitrag zur technischen Weiterentwicklung dieser Geräte zu leisten, jedoch nicht eine Beurteilung oder eine Qualifikation der Testobjekte. Es wurde versucht, dabei streng neutral vorzugehen. Die Hersteller oder Generalimporteure der Wechselrichter wurden jeweils so schnell wie möglich und vor einer eventuellen Publikation über die Testergebnisse ihrer eigenen Geräte informiert, jedoch nicht über die der Konkurrenz. Nach eventuellen Verbesserungen wurden die Geräte jeweils erneut getestet, um die Wirksamkeit solcher Verbesserungen zu überprüfen.

Die durchgeführten Tests zeigen, dass die Zuverlässigkeit und die Leistung vieler Wechselrichter, die gegenwärtig auf dem Markt angeboten werden, vermutlich noch nicht für einen jahrelangen störungsfreien Betrieb genügt. Mit den an der ISB durchgeführten Tests konnte ein Beitrag zur Überwindung der Kinderkrankheiten dieser Geräte geleistet werden. Seit den ersten Tests im Jahre 1988 wurde das Geräteangebot beträchtlich erweitert und es wurden viele wesentliche Fortschritte erzielt.

Im Jahre 1993 wird die Photovoltaikanlage an der Ingenieurschule Burgdorf komplett neu aufgebaut und auf 60 kWp vergrößert. Es ist geplant, damit in einem Anschlussprojekt auch grössere dreiphasige Wechselrichter über einen längeren Zeitraum zu untersuchen, wenn die Finanzierung der notwendigen Mitarbeiter sichergestellt werden kann. Im Rahmen dieses Projektes ist weiter beabsichtigt, auch die Immunität der Wechsel-

richter gegen transiente Überspannungen auf der DC- und AC-Seite zu untersuchen.

Verdankungen

Wir danken den ehemaligen Assistenten der Photovoltaikgruppe, D. Renevey und H.P. Nyffeler, die wesentlich beim Aufbau des ISB-Photovoltaiklabors mitgearbeitet haben. Dank gebührt auch S. Oberli, der die Auswertungssoftware besonders im letzten Jahr wesentlich ausgebaut hat. Ausser vom Bundesamt für Energiewirtschaft, das diese Untersuchungen an Wechselrichtern ab Ende 1989 finanziert hat, erhielt das Photovoltaiklabor der ISB bereits ab 1988 wesentliche

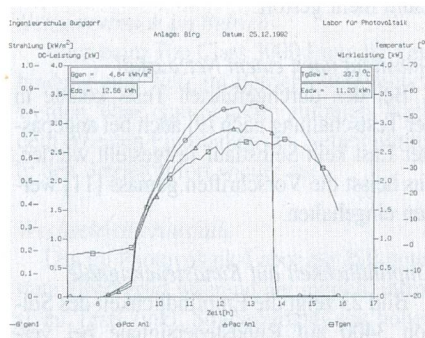


Bild 24 Wechselrichterausfall mit Hardwaredefekt am 25. Dezember 1992 bei einem Prototyp des Solcon 3400 auf der hochalpinen 4,1-kW-Photovoltaikanlage Birg (Mittelstation Schilthornbahn)

Unterstützungen von den Industriellen Betrieben Burgdorf (IBB), der Bernischen Kraftwerke AG (BKW) und dem Elektrizitätswerk der Stadt Bern (EWB). All diesen Institutionen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

tätswerk der Stadt Bern (EWB). All diesen Institutionen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Literatur

- [1] H. Häberlin: «Photovoltaik. Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz». AT-Verlag, CH-5001 Aarau, 1991, ISBN 3-85502-434-0.
- [2] H. Häberlin und R. Minkner: «Blitzschläge – eine Gefahr für Solarmodule? Experimente zur Blitzstromempfindlichkeit von Photovoltaikanlagen». SEV-Bulletin 1/93.
- [3] H. Häberlin und H.R. Röthlisberger: «Vergleichsmessungen an Photovoltaik-Wechselrichtern». Schlussbericht des BEW-Projektes EF-REN(89)045, 1993 (erhältlich bei der Enet-Dokumentationsstelle, c/o BEW, 3003 Bern).
- [4] H. Häberlin: «Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen in Tourismusregionen». Elektroniker 11/92.
- [5] H. Häberlin und H.R. Röthlisberger: «PV-Inverter für Grid-Connection – Results of Extended Tests». Proc. of the 11th EC-PV-Conference, Montreux, 1992.
- [6] H. Häberlin: «Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen, Normen, Vorschriften, Testergebnisse, Probleme, Lösungsmöglichkeiten». Elektroniker 6/92 und 7/92.
- [7] H. Häberlin: «Fotovoltaik in der Schweiz». Elektroniker 5/91 + 6/91.
- [8] H. Häberlin: «Zwei Wechselrichter im Test». Sonnenenergie 4/90.
- [9] H. Häberlin, H.P. Nyffeler und D. Renevey: «Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen im Vergleichstest». SEV-Bulletin 10/90.
- [10] H. Häberlin: «Praktische Fotovoltaik». Elektroniker 3/89.
- [11] Eidgenössisches Starkstrominspektorat: «Provisorische Sicherheitsvorschrift für photovoltaische Energieerzeugungsanlagen», Ausgabe Juni 1990, STI Nr. 233.0690 d.
- [12] H.K. Köthe: «Stromversorgung mit Solarzellen». Franzis-Verlag, München, 1991, ISBN 3-7723-9432-9.

De nouveaux onduleurs photovoltaïques sont actuellement testés

Dans les zones d'approvisionnement en électricité, les installations photovoltaïques sont raccordées au réseau. L'élément à la fois essentiel et critique de chaque injection d'électricité dans le réseau reste l'onduleur. L'Ecole d'ingénieurs de Berthoud (ISB) teste soigneusement, depuis 1988, les principaux onduleurs monophasés d'une puissance allant de 1 à 3 kW, qui sont actuellement commercialisés en Suisse. Les fabricants ont pu, dans de nombreux cas, améliorer nettement leurs appareils en fonction des mesures effectuées par le laboratoire photovoltaïque de l'ISB.

Cet article présente les principaux résultats des analyses des nouveaux ondu-

leurs PV-WR-1800 de SMA, Top Class 1500 et Top Class 3000 d'ASP et Solcon 3400 de Hardmeier.

Les tests réalisés ont montré que la fiabilité et le rendement de nombreux onduleurs, qui sont actuellement proposés sur le marché, semblent pour l'heure encore insuffisants pour une exploitation de longue durée, exempte de perturbations. Grâce aux mesures effectuées par l'ISB, les défauts initiaux de ces appareils ont pu être éliminés plus facilement. Depuis la réalisation des premiers tests en 1988, l'éventail des appareils a été considérablement élargi et des progrès techniques importants ont été atteints.



PK-System-Verteilkabine

Ortsnetz-Verteilkabinen von **peyer** als neue Gestaltungselemente für die heute veränderten, differenzierten Anforderungen an Design und Umweltintegration.

Zusätzlich zur bewährten Kabinen-Linie aus Verbundwerkstoff bringt **peyer** Betonkabinen mit neuartigem Tür-Oberflächen-Design.

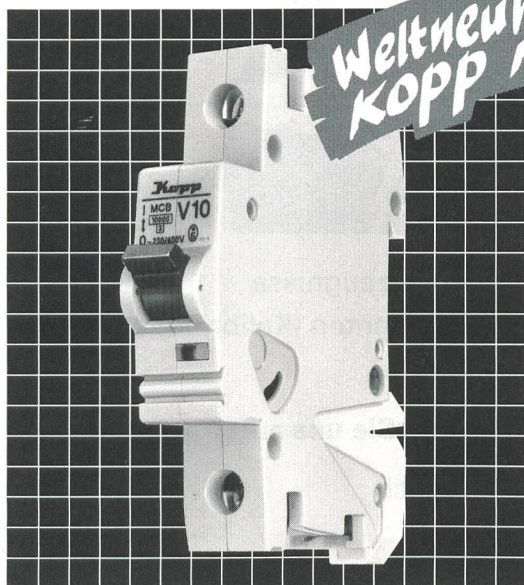
Für Elektrizitätswerke und Planer eine Möglichkeit, neue Akzente in den öffentlichen Raum zu setzen.

Peyer Energietechnik AG

CH-8832 Wollerau
Telefon 01 / 784 46 46
Fax 01 / 784 34 15

Jetzt hat Ihr Erfolg exklusiv grüne Welle.
Kopp bringt die neue Gerätegeneration für den Verteilereinbau.

Zukunftsweisende Leitungsschutzschalter-Technik: Kopp MCB.



Weltneuheit
Kopp MCB

Der neue Leitungsschutzschalter Kopp MCB überzeugt auch Sie durch:

- **Innovative Technik.**
Auslösesystem mit Bimetall-Schnappscheibe.
- **Montagekomfort.**
Schnellbefestigungselement zur rationalen Installation.
- **Perfekte Anschluss technik.**
Anschlussklemmen beidseitig bereits geöffnet.
- **Maximale Zuverlässigkeit.**
Nennstromsicherheit bis + 60° C.
- **Wirtschaftlichkeit und Umweltplus.**
Verlustleistung um ca. 30 % vermindert.

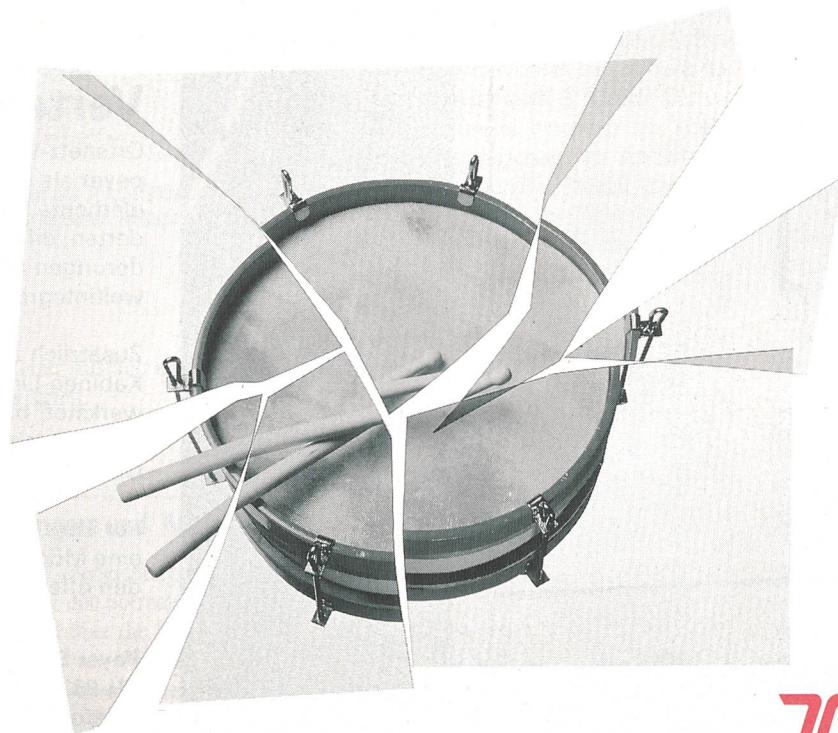


Generalvertretung Schweiz/Fürstentum Liechtenstein:



Julius Fischer AG, Volketswil
Postadresse: Postfach, 8603 Schwerzenbach
Telefon 01/ 946 00 22, Fax 01/ 946 00 44
Bestellungen: 01/ 946 00 33

**Bei bestimmten Schadenfällen waren wir bisher sprachlos.
Mit dem neuen TeleAlarm nicht mehr.**



TeleAlarm kann zwar nicht verhindern, dass in der ARA, im Unterwerk oder in einer anderen Anlage etwas passiert. Aber TeleAlarm verhindert, dass noch mehr passiert. Weil die neuen Systeme nicht einfach nur telefonisch Alarm schlagen. Sondern den Schaden präzise lokalisieren und unmissverständlich weitermelden. Satz für Satz, in beliebigem Wortlaut und in fast beliebiger Länge.
Weitere Informationen: ebenfalls per Telefon: 01 821 91 00.

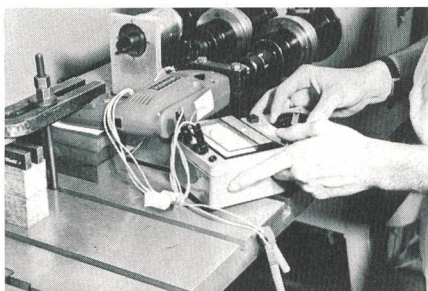
Kriesbachstrasse 3
8600 Dübendorf

 **TELETRONIC**

 Schweizerischer Elektrotechnischer Verein
Association Suisse des Electriciens
Associazione Svizzera degli Elettrotecnici
Swiss Electrotechnical Association



Die SEV-Prüfstelle Zürich



- **prüft** die Sicherheit elektrischer Niederspannungserzeugnisse
- **kalibriert** die Genauigkeit von elektrischen Messinstrumenten (Kalibrierdienst)
- **führt** Abnahmen, Expertisen und Beratungen durch

Unsere Fachspezialisten stehen zu Ihrer Verfügung. **Rufen Sie uns an!**

Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Prüfstelle Zürich
Seefeldstrasse 301, Postfach, 8034 Zürich
Telefon 01/ 384 91 11 – Telex 817 431 – Telefax 01/422 14 26

