Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 87 (1996)

Heft: 10

Artikel: Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests an Photovoltaik-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen

Autor: Häberlin, H. / Käser, F. / Liebi, Ch.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902324

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Das Photovoltaiklabor der Ingenieurschule Burgdorf (ISB) hat in den vergangenen Jahren viele Tests an kleineren Photovoltaik-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen durchgeführt [1, 2]. Im Laufe des Jahres 1994 wurde das neue 60-kW_p-Testzentrum für Photovoltaiksysteme in Betrieb genommen [3], das auch Untersuchungen an grösseren Geräten ermöglicht. In diesem Aufsatz werden die Ergebnisse von intensiven, teils mehr als ein Jahr dauernden Tests an neuen ein- und dreiphasigen Wechselrichtern im Bereich 1 kW bis 20 kW dargestellt. Die durchgeführten Tests ergeben zusammen mit Daten aus einem anderen Projekt auch erste Informationen über die Langzeit-Zuverlässigkeit der verwendeten Wechselrichter.

Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests an Photovoltaik-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen

■ H. Häberlin, F. Käser, Ch. Liebi, Ch. Beutler

Testprogramm

Die wichtigsten im Rahmen dieses Projekts untersuchten Eigenschaften waren DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad, Oberschwingungsströme, Selbstlauf nach Netzausfall, Rundsteuersignal-Empfindlichkeit und EMV-Verhalten. Mit der an der ISB entwickelten verfeinerten normierten Darstellung [4] kann auch die Qualität des MPP-Trackings (MPP: maximum power point) beurteilt werden.

Folgende Wechselrichter wurden während mindestens einem Jahr genau getestet:

- SolarMax 20 (20 kW, dreiphasig, galvanische Trennung DC-AC), von Sputnik Engineering AG
- EcoPower 20 (20 kW, dreiphasig, keine galvanische Trennung DC-AC) von Invertomatic AG
- Solcon 3400 (3,4 kW, einphasig), von Hardmeier Electronics AG
- TopClass 4000 (3,3 kW, einphasig), von ASP AG

Einige andere neue Inverter wurden ebenfalls kurz getestet, nämlich der Top Class 2500/4 und 2500/6 (2,2 kW, einphasig), SolarMax S (3,4 kW, einphasig, trafolos), NEG 1600 (1,5 kW, einphasig) und Siemens SPN 1000 (1 kW, einphasig). Ferner wurde ein Testplatz für Modul-Wechselrichter aufgebaut und in Betrieb genommen. Gegenwärtig wird ein Prototyp eines 200-W-Modulinverters getestet.

Wichtigste Testergebnisse

In Tabelle I sind die wichtigsten Daten und Testergebnisse der getesteten Geräte dargestellt. Der in dieser Tabelle angegebene Europäische Wirkungsgrad wurde nach folgender Formel berechnet (Indexwert = Prozent der Nennleistung):

$$\eta = 0{,}03\eta_5 + 0{,}06\eta_{10} + 0{,}13\eta_{20} + 0{,}1\eta_{30} + 0{,}48\eta_{50} + 0{,}2\eta_{100}$$

Wirkungsgrad

Speziell der Teillastwirkungsgrad der getesteten Wechselrichter hat gegenüber früheren Geräten (z.B. SI-3000, PV-WR-1800) meist deutlich zugenommen. Die Bilder 1 bis 4 zeigen die auf die Nennleistung normierten Wirkungsgradkurven. Für Wechselrichter mit galvanischer Trennung liegt der Spitzenwirkungsgrad zwischen 91,5% und 93%, der Europäische

Adresse der Autoren:
Dr. *Heinrich Häberlin*, dipl. El.-Ing. ETH, Professor,
Frank Käser, El.-Ing. HTL, Assistent,
Christoph Liebi, El.-Ing. HTL, Assistent,
Christian Beutler, El.-Ing. HTL, Assistent,
Ingenieurschule Burgdorf, Photovoltaik-Labor,
Jlcoweg 1, 3400 Burgdorf.

Typ	S_N	U_{DC}	Ein-schalt-leis-tung	1: 1-phasig 3: 3-phasig	ENS Netz-impedanz -über-wachung	Transfor -mator	Euro-Wirkungs-grad	Strom-Harmoni-sche (<2kHz)	Selbst-lauf	Rund-steuer-signal-empfind-lichkeit	EMV AC	EMV DC	Geräusch-entwick-lung
	kVA	V	W_{DC}				%						
EcoPower20	20	760	450	3	keine	NF	92.6	0	0	++	0/+[1]	++	0
SolarMax20	20	560	283	3	keine	NF	89.4	0	++	++	+	-/0[1]	0
SPN1000	1.0	64	15	1	ja	NF	89.8	+	++	0	+	++	+
SolarMax S	3.3	550	66	1	keine	ohne	91.7	+	0/++[4]	++	-/+[1]	+	+/-[3]
Solcon3400	3.4	96	25	1	keine	HF	91.9	0	++	+	0/+[1]	0	++
TCG 4000/6	3.3	96	26	1	keine	NF	90.2	0	++	++	+	-/++[2]	+
TCG 2500/6	2.2	96	14	1	keine	NF	90.4	0	++	++	+	-	+
TCG 2500/4	2.2	64	15	1	keine	NF	91.9	0	++	++	+	0	+
NEG 1600	1.5	96	15	1	keine	NF	90.4	+	++	++	++	0	++

Tabelle I Wichtigste Daten und Testergebnisse.

++ Sehr gut, Norm mit Reserve erfüllt
+ Gut, Norm erfüllt
0 Befriedigend, Norm beinahe erfüllt
- Mangelhaft, Norm nicht erfüllt
- - Ungenügend, Norm bei weitem nicht erfüllt

1) Nach der Modifikation durch die ISB
2) Mit optionaler DC-Ringkern-Drossel
3) Mit Taktfrequenz 9 kHz
4) Mit neuer Software

Wirkungsgrad zwischen 89,4% und 91,9%. Beim EcoPower 20 ohne galvanische Trennung beträgt der Spitzenwirkungsgrad 95%, der Europäische Wirkungsgrad 92,6%. Beim SolarMax 20 ist eine neue, verbesserte Version in Entwicklung, die gemäss ersten Tests an der ISB einen um gegen 2% höheren Wirkungsgrad aufweisen dürfte.

Wichtiger Hinweis: Wenn bei einem Wechselrichter die Hochfrequenz-Störspannungen zu hoch waren, wurden die Wirkungsgradmessungen unter Einbezug der notwendigen Zusatzfilter durchgeführt, um einen fairen Vergleich zwischen allen Geräten zu ermöglichen.

Beim trafolosen SolarMax S sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Sein Wirkungsgrad hängt von der Betriebstemperatur und der Schaltfrequenz ab. Bei hohen Kühlkörpertemperaturen ist der Wirkungsgrad unter sonst gleichen Betriebsbedingungen etwa 1% tiefer als bei niedrigen Temperaturen. Wenn der Wechselrichter mit einer Schaltfrequenz von 9 kHz betrieben wird (bei Kühlkörpertemperaturen über etwa 66 °C), ist der Wirkungsgrad

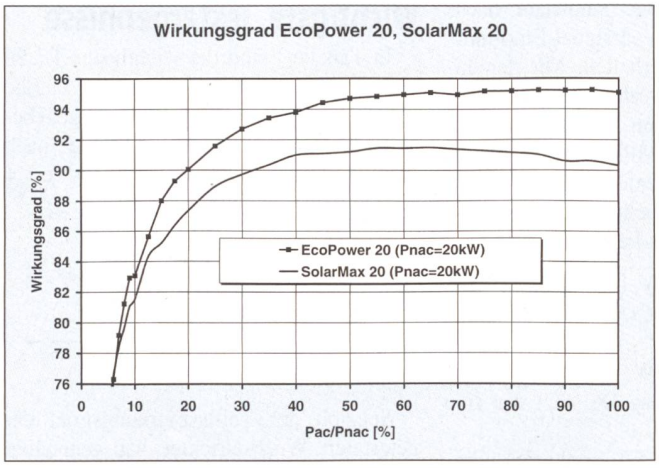

Bild 1 Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung) Wechselstromleistung der dreiphasigen 20-kW-Wechselrichter EcoPower 20 und SolarMax 20. Der EcoPower 20 ohne galvanische Trennung DC-AC, drei Anschlüssen (+, 0, –) und hohen Betriebsspannungen auf der DC-Seite (bis 1000 V zwischen + und –) hat einen um etwa 3% höheren Maximalwirkungsgrad als der SolarMax 20 mit voller galvanischer Trennung zwischen DC und AC, nur zwei Anschlüssen und nur etwa 70% der Betriebsspannung auf der DC-Seite. Eine etwas verbesserte Version des SolarMax 20 ist in Entwicklung.

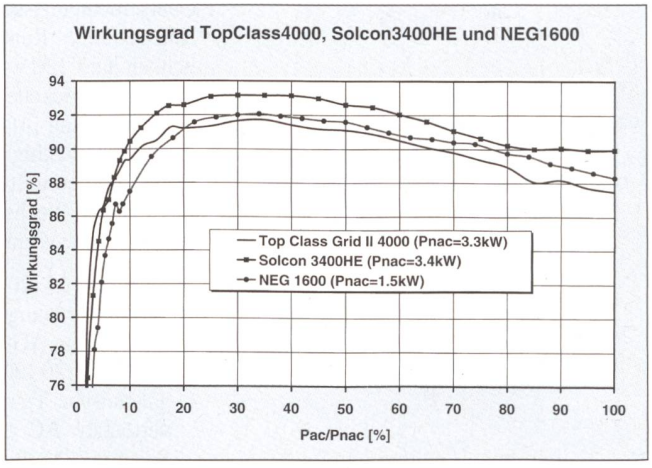

Bild 2 Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung) Wechselstromleistung der einphasigen Wechselrichter TopClass 4000 (3,3 kW), Solcon 3400 (3,4 kW) und NEG 1600 (1,5 kW).

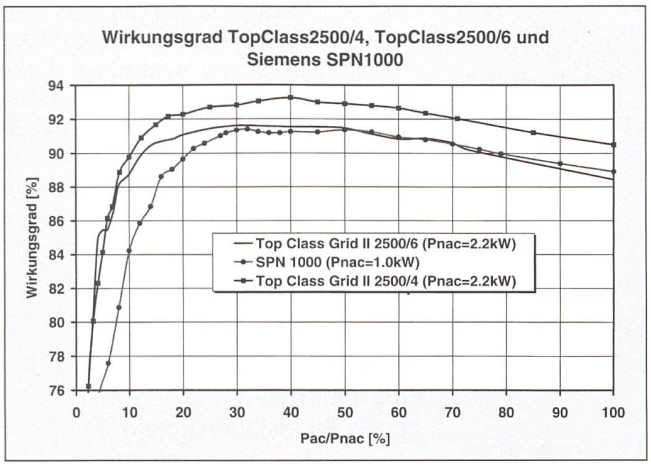

Bild 3 Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung) Wechselstromleistung der einphasigen Wechselrichter TopClass 2500/4 und 2500/6 (je 2,2 kW) und SPN 1000 (1 kW). Der Wirkungsgrad des TopClass 2500/4 für vier Module in Serie ist etwas höher als beim TopClass 2500/6 für sechs Module in Serie.

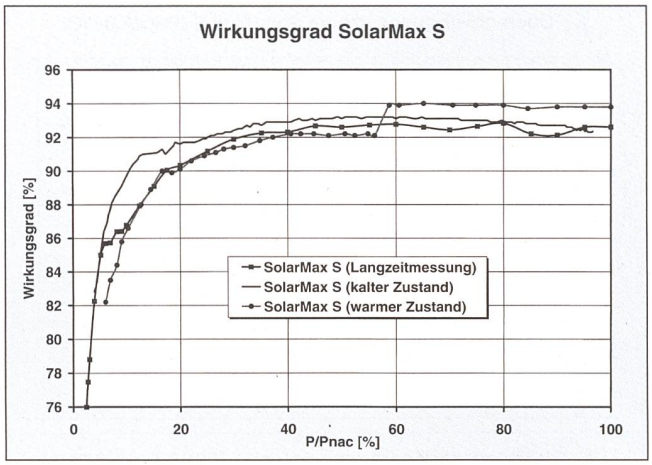

Bild 4 Wirkungsgrad in Funktion der normierten Wechselstromleistung des einphasigen Wechselrichters SolarMax S (3,3 kW, trafolos) im kalten und warmen Zustand sowie durchschnittliche Kurve, die während einigen Tagen effektivem Betrieb gemessen wurde.

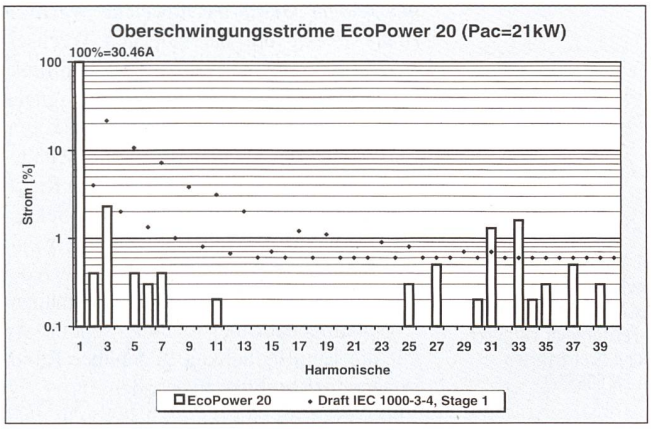

Bild 5 Stromoberschwingungen des EcoPower 20 bei einer AC-Leistung von 21 kW im Vergleich zu den Grenzwerten des Normentwurfs IEC 1000-3-4 («Stage 1» für uneingeschränkten Anschluss).

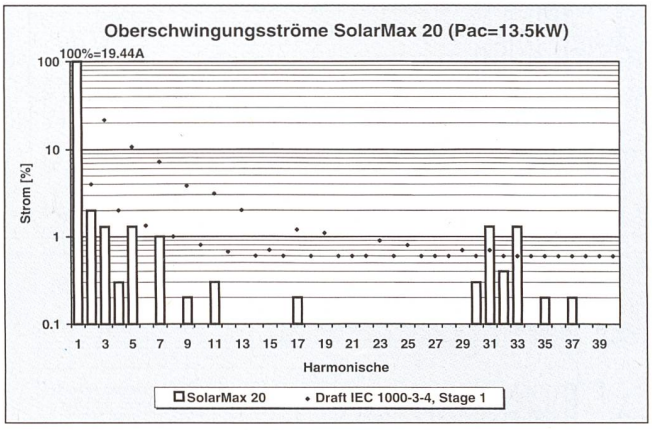

Bild 6 Stromoberschwingungen des SolarMax 20 bei einer AC-Leistung von 13,5 kW im Vergleich zu den Grenzwerten des Normentwurfs IEC 1000-3-4 («Stage 1» für uneingeschränkten Anschluss).

etwa 1,5% höher als beim Betrieb mit einer Schaltfrequenz von 18 kHz, aber dafür ist die Geräuschentwicklung recht stark. Um nicht allzu lästige Geräusche zu erzeugen, arbeitet das Gerät deshalb normalerweise mit 18 kHz, das heisst mit einem tieferen Wirkungsgrad, und schaltet erst auf 9 kHz um, wenn die Kühlkörpertemperatur sehr hoch wird. Dank dem bei 9 kHz höheren Wirkungsgrad kann so die Hitzeentwicklung reduziert werden. Bild 4 zeigt den Wirkungsgrad eines SolarMax S bei tiefen und hohen Kühlkörpertemperaturen und eine durchschnittliche Kurve, die während einiger Tage effektivem praktischem Betrieb ermittelt wurde.

Oberschwingungen

Alle getesteten Wechselrichter sind selbstgeführt mit hochfrequenter Pulsbreitenmodulation. Deshalb sollten die Oberschwingungsströme im praktischen Betrieb keine Probleme verursachen, wenn die Netzimpedanz nicht ungewöhnlich hoch ist.

Für Geräte mit Strömen über 16 A liegt ein neuer Normentwurf für Stromharmonische vor (IEC 1000-3-4). Die von den beiden dreiphasigen 20-kW-Wechselrichtern erzeugten Stromoberschwingungen liegen bei den meisten Frequenzen unterhalb den Grenzwerten dieses Normentwurfs für uneingeschränkten Anschluss («limits stage 1»). Wenn sie bei höheren Leistungen betrieben werden, können die Grenzwerte dieses Entwurfs bei einigen Frequenzen (> 25. Harmonische) überschritten werden. Möglicherweise hängen diese Überschreitungen auch mit den lokalen Netzverhältnissen an der ISB zusammen.

Liegt jedoch die Kurzschlussleistung S_{KV} am Verknüpfungspunkt mindestens 120mal höher als die Nennscheinleistung S_{WR} des Wechselrichters, sind höhere Grenzwerte («limits stage 2») anwendbar. Diese Bedingung ist für vernünftig dimensionierte Netzanschlussleitungen meist erfüllt. Die in Bild 5 und 6 angegebenen Oberschwingungsströme liegen unter diesen höheren Grenzwerten. Deshalb sollten durch den Betrieb eines EcoPower 20 oder SolarMax 20 in der Praxis keine Oberschwingungsprobleme auftreten.

Die Oberschwingungsströme der kleinen Wechselrichter liegen meist unter den Grenzwerten von EN 60555-2 (siehe Bilder 7–9). Nur wenn die Geräte nahe bei der Nennleistung betrieben werden, können die Grenzwerte bei einigen höheren Harmonischen (meist >15. Harmonische) leicht überschritten werden.

Da der Solcon 3400 die Sinusform des Netzes zu verbessern versucht, können bei grösserer Leistung auch bei niedrigeren Harmonischen (z.B. der 3. Harmonischen) grössere Oberschwingungsströme auftreten, wenn die entsprechende Oberschwingungsspannung am Verknüpfungspunkt, die von anderen Verbrauchern verursacht wurde, zu gross ist. Nach Angaben der Firma Siemens hat der SPN 1000 die gleiche Eigenschaft.

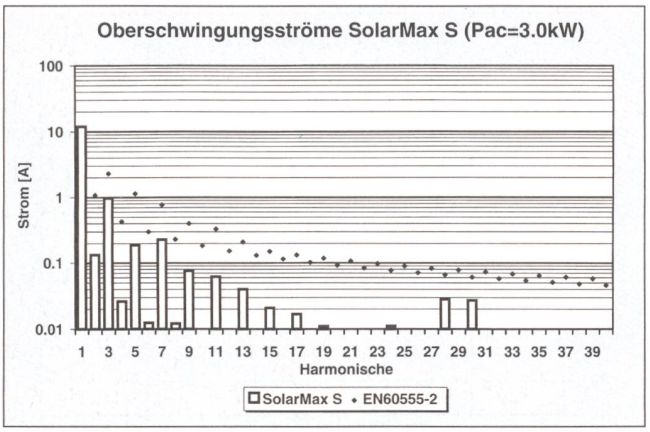

Bild 7 Stromoberschwingungen des SolarMax S bei 3 kW AC-Leistung im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 60555-2.

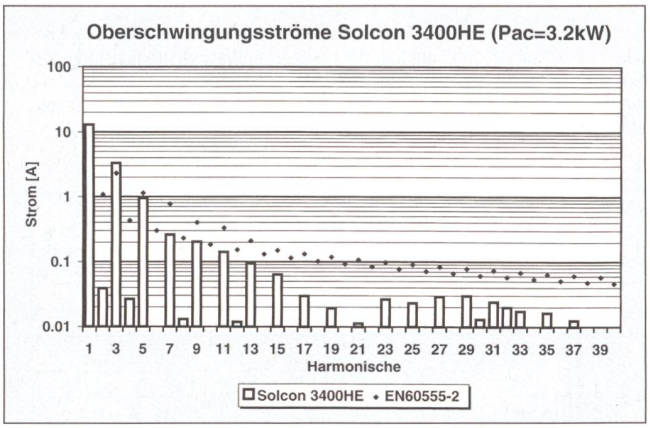

Bild 8 Stromoberschwingungen des Solcon 3400 HE bei 3,2 kW AC-Leistung im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 60555-2.

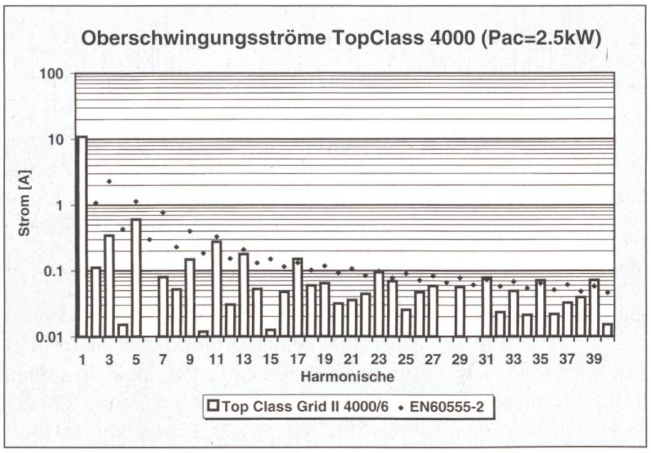

Bild 9 Stromoberschwingungen des TopClass 4000 bei 2,5 kW AC-Leistung im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 60555-2.

Selbstlauf nach Netzausfall

Selbstgeführte Wechselrichter haben prinzipiell eine Tendenz zum Selbstlauf nach einem Netzausfall. Dies muss aus Sicherheitsgründen vermieden werden. Für die Durchführung des Selbstlauftests wird in Deutschland neuerdings die Überwachung der Netzimpedanz und eine relativ komplizierte Testschaltung vorgeschlagen [5]. Mit etwas Netzwerktheorie kann man diese Schaltung in eine einfachere, äquivalente Schaltung umwandeln, die viel leichter zu handhaben ist (Bild 10).

Die Elemente R, C und L werden so abgeglichen, dass die Anzeige des Ampèremeters A minimal ist, danach wird der Schalter S geöffnet. CH1 dient zur Feststellung des Schaltzeitpunktes. Für den Test nach der aktuellen Schweizer Vorschrift wird Z = unendlich gesetzt. Für den Test nach dem neuen BRD-Vorschlag wird Z so gewählt, dass sich zusammen mit der zwischen L und N vorhandenen Netzimpedanz die für den Test erforderliche Gesamtimpedanz ergibt. Nach fünf Sekunden muss der Wechselrichterstrom (CH3) jeweils 0 sein.

Beim Test nach der aktuellen Schweizer Vorschrift hatte bei den kleineren Wechselrichtern nur der SolarMax S ein anfängliches Selbstlaufproblem unter speziellen Betriebsbedingungen (beim Betrieb mit angepasster Last), das nur bei kleinen Leistungen auftrat. Es konnte durch eine Softwareänderung rasch behoben werden. Bei bereits früher ausgelieferten SolarMax S, die in bestehenden Anlagen eingebaut sind, sollte aus Sicherheitsgründen das EPROM ebenfalls ausgetauscht werden, um dieses Problem zu eliminieren. Bei den grossen Wechselrichtern trat beim SolarMax 20 kein Selbstlauf auf. Beim EcoPower 20 kann dagegen bei grösseren Leistungen (>14 kW) beim Betrieb mit angepasster Last ab und zu Selbstlauf auftreten. Der SPN 1000 bestand auch den Selbstlauftest nach BRD-Vorschlag.

Empfindlichkeit gegen Rundsteuersignale

Alle Wechselrichter wurden mit einem Rundsteuersignal-Simulator mit simulierten Rundsteuersignalen verschiedener Frequenzen getestet. Obwohl hohe Spannungen (bis zu 18 V) verwendet wurden, traten *bei keinem Gerät irgendwelche Wechselrichterdefekte* auf. Die meisten Wechselrichter zeigten überhaupt keine Fehlfunktionen infolge dieser Rundsteuersignale. Der Solcon 3400 und in etwas stärkerem Masse auch der Siemens SPN 1000 schalteten nach dem Auftreten eines starken Rundsteuersignales manchmal für einige Sekunden ab, nahmen jedoch bereits nach wenigen Sekunden den normalen Betrieb wieder auf. Die im SPN 1000 realisierte permanente Netzimpedanzüberwachung scheint somit die Empfindlichkeit gegenüber Rundsteuersignalen etwas zu erhöhen.

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Verglichen mit früheren Geräten haben die hochfrequenten Störspannungen auf der AC-Seite beträchtlich abgenommen und liegen nun meist deutlich unter den massgebenden Normen (z.B. EN 55014 bzw. EN 50081) [6]. Bei einigen Geräten sind die HF-Störspannungen auf der Gleichstromseite (DC) aber immer noch zu hoch. Niedrige HF-Störspannungen auch auf der Gleichstromseite sind nicht nur zur Verhinderung von Störungen benachbarter elektronischer Geräte oder Radios nötig, sondern auch um die Anwendung neuer Sicherheitseinrichtungen auf der Gleichstromseite (Lichtbogendetektor) zu ermöglichen.

Auf der Wechselstromseite (AC) lagen die hochfrequenten Störspannungen bei einer Leistung zwischen 50% und 100% der Nennleistung meist unter den entsprechenden Grenzwerten. Die Geräte TopClass 2500 und 4000 lagen bei allen Frequenzen unter diesen Werten, SolarMax 20 und Solcon 3400 nur bei Frequenzen oberhalb von 500 kHz. Nur beim EcoPower 20 und beim

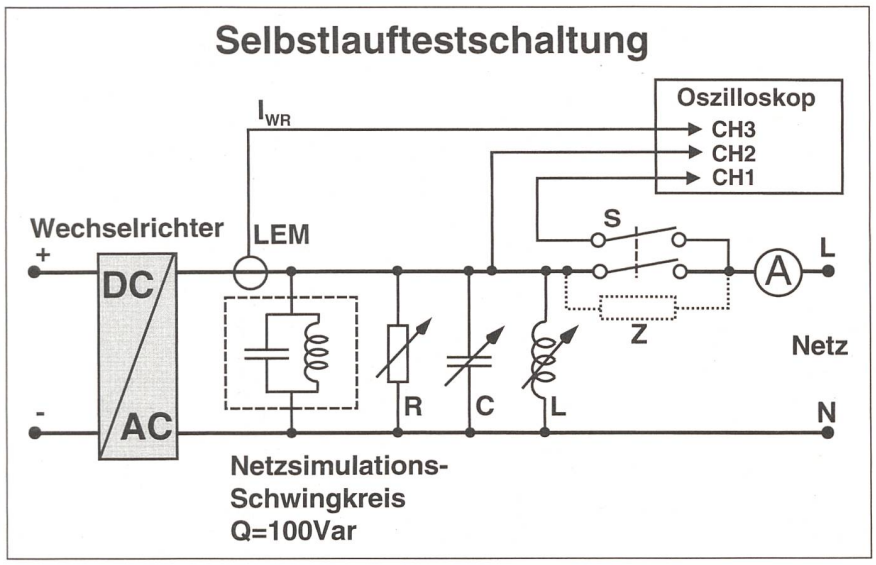

Bild 10 Einfache Testschaltung für Selbstlauftests nach den aktuellen Vorschriften in der Schweiz und in Deutschland.

SolarMax S wurden diese Grenzwerte im Originalzustand in einem grösseren Frequenzbereich deutlich überschritten. Während bei einigen Wechselrichtern die HF-Pegel relativ unabhängig von der umgesetzten Leistung waren, zeigten andere einen deutlichen Anstieg bei höheren Leistungen. Es ist deshalb sinnvoll, die Emissionsmessungen wenn möglich bei Leistungen in der Nähe der Nennleistung vorzunehmen.

Bei Geräten, bei denen die Grenzwerte der massgebenden Normen überschritten wurden, wurden die Hochfrequenz-Störspannungen in Zusammenarbeit mit dem Hersteller durch zusätzliche Filtermassnahmen weiter reduziert. Die so erzielten Verbesserungen sind in den Bildern 11 bis 20 ebenfalls dargestellt. Der NEG 1600 wies auf der Netzseite ein externes Zusatzfilter auf, das sicher dazu beigetragen hat, dass die Resultate auf der AC-Seite so gut sind. Der Siemens SPN 1000 war das erste an der ISB getestete Gerät, das bereits im Originalzustand (ohne externe Filter) beidseitig die EMV-Normen auf Anhieb erfüllte.

Zumindest als Option sollten nun von allen Herstellern Wechselrichter mit sowohl auf der DC- als auch auf der AC-Seite genügender Entstörung erhältlich sein. Ausreichende Dämpfung der emittierten hochfrequenten Störspannungen ist auch ein sehr taugliches Mittel, um die Immunität der Geräte gegen transiente Überspannungen und damit die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Viele Hersteller sind sich dieser Tatsache noch viel zu wenig bewusst. Bei neuen TopClass-Geräten wird das für die verbesserte Kurve in Bild 20 verwendete Zusatzfilter nach Herstellerangaben nun bei allen Geräten *serienmässig* eingebaut.

Zuverlässigkeit

In der Vergangenheit (1989–1991) waren bei Wechselrichtern einige Hardware-Defekte pro Jahr üblich. Die bei den jüngsten Wechselrichtertests beobachtete Zuverlässigkeit war aber meist deutlich höher. Aus einem anderen Projekt der ISB [7] konnten weitere wertvolle Daten über die Langzeit-Zuverlässigkeit von Wechselrichtern gewonnen werden.

Die heute beobachtete Zuverlässigkeit ist beträchtlich höher. Im Mittel tritt nun weit weniger als ein Hardware-Defekt jährlich auf. An zwei Standorten verursachten ungewöhnlich starke Transienten auf dem Netz einige Ausfälle, bevor die Geräte erfolgreich dagegen immunisiert werden konnten. Unter normalen Netzverhältnissen wären sicher bedeutend weniger Ausfälle aufgetreten. Die Testergebnisse zeigten auch, dass bei einigen Anlagen die Energieproduktion nicht nur durch Hardware-Defekte, sondern auch durch sporadische Wechselrichter-Fehlfunktionen beeinträchtigt werden kann. Eine Verbesserung der Wechselrichter in dieser Hinsicht würde den Energieertrag sicher noch etwas erhöhen.

Bei den zur Beurteilung der Wechselrichter-Zuverlässigkeit verwendeten Anlagen wurde mindestens die mittlere Energieproduktion in einem Intervall von 15 Minuten (oder kürzer) erfasst. Deshalb war es möglich, zwischen Hardware-Defekten und sporadischen Wechselrichter-Fehlfunktionen (z.B. Fehler im Maximum-Power-Tracking, Aufstartprobleme usw.). zu unterscheiden. Solche Phänomene können nur durch detaillierte Messungen, wie sie im erwähnten Projekt durchgeführt wurden, überhaupt festgestellt werden. Durch einen blossen Vergleich der monatlichen Energieproduktionswerte können nur ernsthafte Probleme längerer Dauer erkannt werden. Wegen des relativ hohen Aufwandes und der damit verbundenen Kosten war aber die Anzahl der erfassten Anlagen beschränkt (Stand Ende 1995: 23 Wechselrichter, etwa 49 erfasste Wechselrichter-Betriebsjahre).

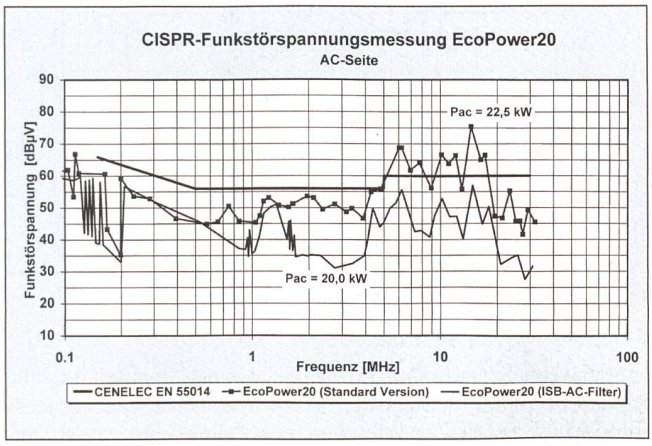

Bild 11 Von einem EcoPower 20 auf der AC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014/EN 50081.

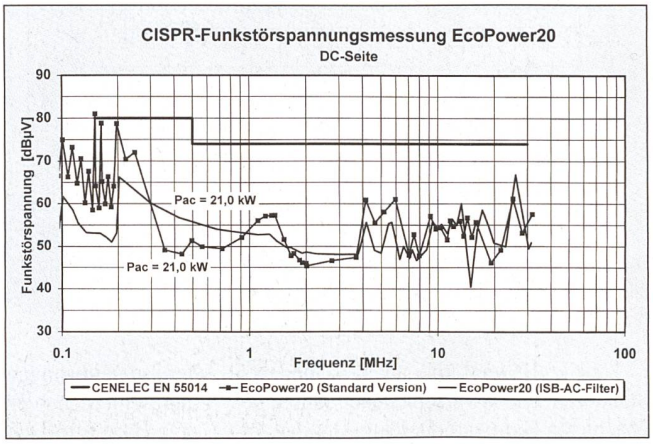

Bild 12 Von einem EcoPower 20 auf der DC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014.

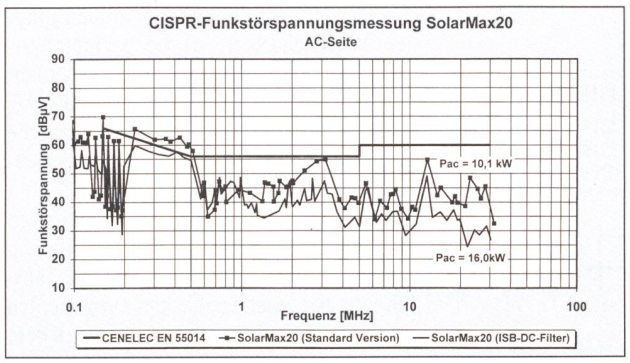

Bild 13 Von einem SolarMax 20 auf der AC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014/EN 50081.

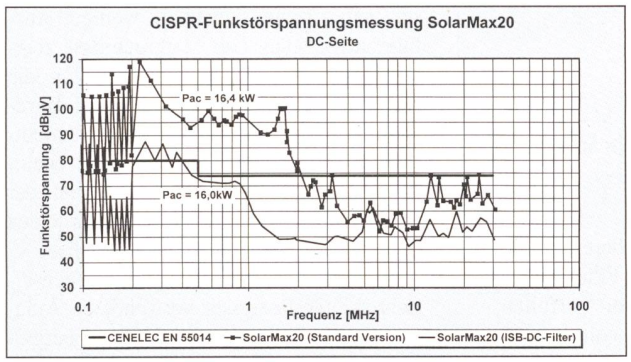

Bild 14 Von einem SolarMax 20 auf der DC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014.

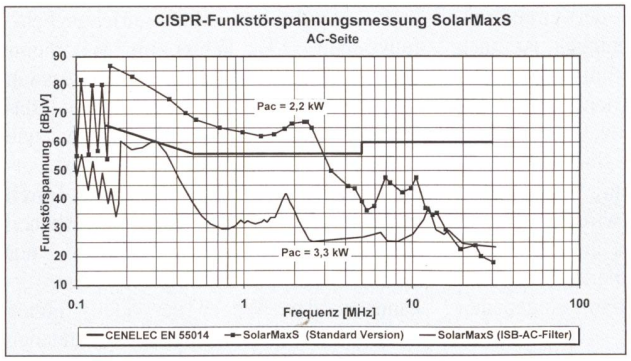

Bild 15 Von einem SolarMax S auf der AC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014/EN 50081.

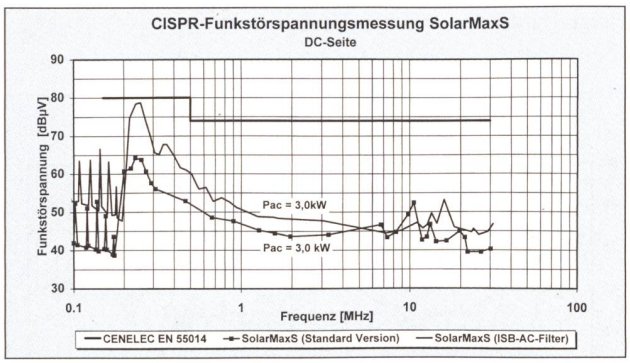

Bild 16 Von einem SolarMax S auf der DC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014.

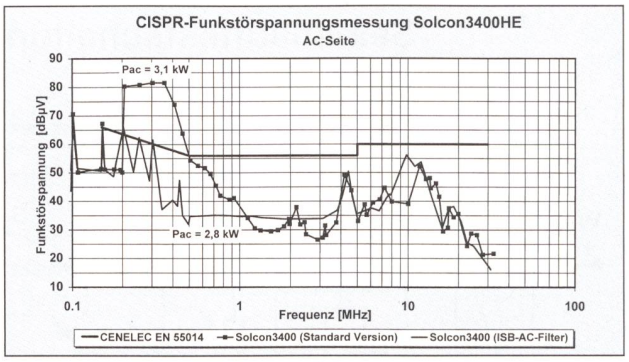

Bild 17 Von einem Solcon 3400 HE auf der AC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014/EN 50081.

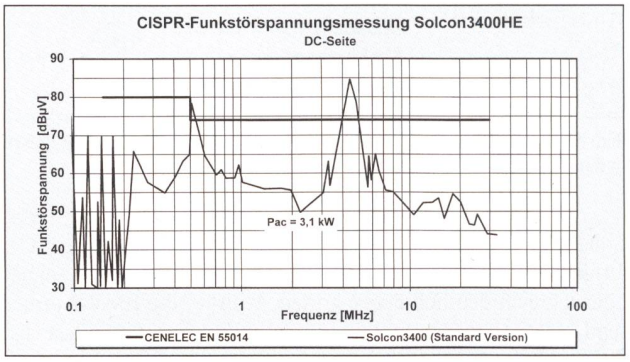

Bild 18 Von einem Solcon 3400 HE auf der DC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014.

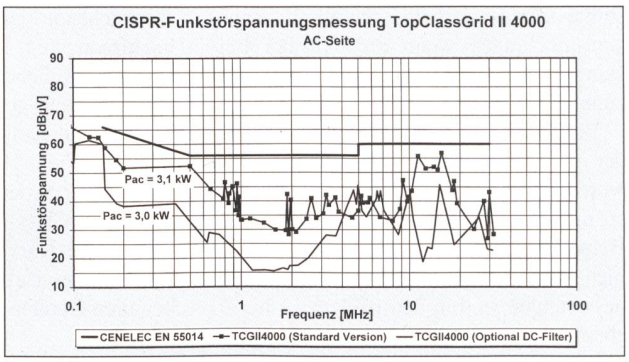

Bild 19 Von einem TopClass 4000 auf der AC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014/EN 50081.

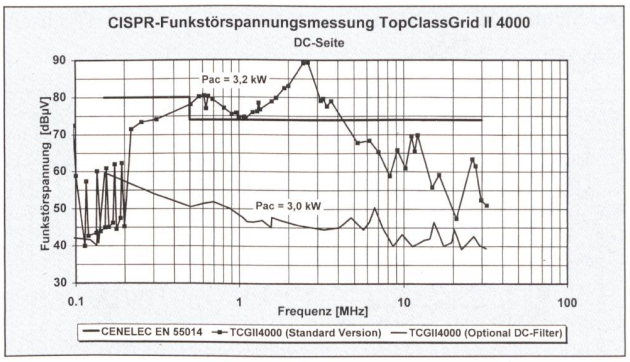

Bild 20 Von einem TopClass 4000 auf der DC-Seite produzierte HF-Störspannungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN 55014.

Tabelle II zeigt die an verschiedenen Standorten und in verschiedenen Jahren beobachteten Hardware-Defekte. Bei der Anlage Birg/Schilthorn (2670 m ü.M.) führte das Anfahren der Ward-Leonard-Gruppe der Luftseilbahn jeweils zu schweren Spannungseinbrüchen auf der Netzseite, die einige Hardware-Defekte am Wechselrichter verursachten. Erst Ende 1994 konnte das Gerät dagegen immunisiert werden. Bei der Anlage Interlaken, wo die meisten Ausfälle registriert werden mussten, wird ein technisch schon relativ altes Gerät im «Master-slave»-Betrieb verwendet, das sich in der Praxis nicht so zu bewähren scheint. Bei

Anlage	Wechselrichter	Betriebs-monate	Hardwaredefekte pro Jahr				HW-Defekte total	HW-Defekte pro WR-Betriebsjahr
			92	93	94	95		
Lohe/Burgdorf	PVWR 1500	41	0	0	0	0	0	0.0
IBI/Interlaken	PVWR 1800 (4x)	40	0	3	5	4	12	0.9
Lugeon/Burgdorf	Solcon 3300	43	0	0	0	0	0	0.0
Birg/Schilthorn	Solcon 3400HE	36	1	1	3	0	5	1.7
Schlossmatt 4	Solcon 3400HE	20			1	0	1	0.6
Schlossmatt 6	Solarmax S	10				0	0	0.0
Schlossmatt 7	Solarmax S	10				0	0	0.0
Schlossmatt 8	Solarmax S	10				0	0	0.0
Schlossmatt 9	Solarmax S	6				0	0	0.0
IBB/Gsteighof	Solarmax 15	8				0	0	0.0
Jungfraujoch	TopClass 1800	26		0	0	0	0	0.0
Schlossmatt 3	TopClass 2500/6	20			0	0	0	0.0
Gfeller/Burgdorf	TopClass 3000	42	1	2	0	1	4	1.1
Aebi/Burgdorf	TopClass 3000	30		0	1	0	1	0.4
Schlossmatt 1	TopClass 4000/6	20			0	1	1	0.6
Schlossmatt 2	TopClass 4000/6	20			0	0	0	0.0
ISB/Burgdorf	TopClass 4000/6	19			0	1	1	0.6
ISB/Burgdorf	Solcon 3400HE	23			0	0	0	0.0
ISB/Burgdorf	SolarMax20	24			1	0	1	0.5
ISB/Burgdorf	EcoPower20	23			5	0	5	2.6

Tabelle II An verschiedenen Standorten registrierte Hardware-Defekte

Wechselrichter	Betriebs-monate	Hardwaredefekte pro Jahr				HW-Defekte total	HW-Defekte pro WR-Betriebsjahr
		92	93	94	95		
PVWR 1500	41	0	0	0	0	0	0.0
PVWR 1800 (4x)	160	0	3	5	4	12	0.9
Solcon 3300	43	0	0	0	0	0	0.0
Solcon 3400HE	79	1	1	4	0	6	0.9
Solarmax S	36	0	0	0	0	0	0.0
TopClass 1800	26	0	0	0	0	0	0.0
TopClass 2500/6	20	0	0	0	0	0	0.0
TopClass 3000	72	1	2	1	1	5	0.8
TopClass 4000/6	59	0	0	0	2	2	0.4
Solarmax 15	8	0	0	0	0	0	0.0
SolarMax20	24	0	0	1	0	1	0.5
EcoPower20	23	0	0	5	0	5	2.6
Total	591	2	6	16	7	31	0.6

Tabelle III Bei verschiedenen Wechselrichtertypen registrierte Hardware-Defekte.

der Anlage Aebi in Burgdorf verursachten durch die nahe Bahnlinie induzierte Überspannungen ebenfalls einen Hardware-Defekt, bevor das Problem durch zusätzliche Filtermassnahmen behoben werden konnte. Bei der Anlage Gfeller in Burgdorf gingen innerhalb von 34 Monaten 4,1% der Energieproduktion durch Hardware-Defekte verloren und weitere 2,9% durch sporadische Wechselrichter-Fehlfunktionen.

Tabelle III zeigt die beobachteten Hardware-Defekte für verschiedene Gerätetypen. Man erkennt, dass in vielen Fällen die Wechselrichterprobleme in den ersten Monaten nach Inbetriebnahme auftraten (z.B. beim EcoPower 20). Obwohl die Anzahl der erfassten Geräte laufend anstieg, sank die Anzahl der beobachteten Defekte im Laufe der Zeit. Betrug sie im Mittel über die ganze Zeit von 1992 bis 1995 etwa 0,6 Hardware-Defekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr, sank sie im Jahr 1995 nach den bei einigen Anlagen durchgeführten Sanierungsmassnahmen auf etwa 0,3 Hardware-Defekte pro Jahr, das heisst die Zuverlässigkeit der Geräte nimmt in letzter Zeit erfreulicherweise zu.

Schlussbemerkungen

Sowohl die Leistungen als auch die Zuverlässigkeit neuer Photovoltaik-Wechselrichter haben sich gegenüber früheren Tests [1, 2] deutlich verbessert. Es sind aber noch einige Anstrengungen nötig, um die in der Energietechnik üblichen Standards zu erreichen. Es wäre sehr interessant, zu untersuchen, ob der beobachtete Trend zu grösserer Zuverlässigkeit auch längerfristig und auch bei neueren Anlagen (mit zum Teil recht hohen Spannungen auf der Gleichstromseite!) anhält, das heisst eine Verlängerung des entsprechenden Monitoringprojektes der ISB wäre sehr sinnvoll. In Burgdorf sind auf kleinem Raum etwa dreissig netzgekoppelte Photovoltaikanlagen mit verschiedenen Wechselrichtertypen vorhanden, bei denen eine solche Untersuchung der Langzeit-Zuverlässigkeit mit relativ kleinem Aufwand möglich ist. Es ist zu hoffen, dass trotz Finanzknappheit diese einzigartige Möglichkeit genutzt werden kann.

Verdankungen

Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden im Rahmen eines Auftrages des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) durchgeführt. Die Aktivitäten der ISB auf dem Gebiet der Photovoltaik wurden und werden auch von den IBB Burgdorf, der BKW Energie AG und dem EW Bern unterstützt. All diesen Firmen und Institutionen, die durch ihre Zuwendungen unsere Arbeiten ermöglicht haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Literatur

[1] *H. Häberlin, H. P. Nyffeler* und *D. Renevey*: Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen im Vergleichstest. Bulletin SEV/VSE10/1990.

[2] *H. Häberlin* und *H.R. Röthlisberger*: Neue Photovoltaik-Wechselrichter im Test. Bulletin SEV/VSE 10/93.

[3] *H. Häberlin*: Das neue 60-kW_p-Photovoltaik-Testzentrum der Ingenieurschule Burgdorf. Bulletin SEV/VSE 22/94.

[4] *H. Häberlin* und *Ch. Beutler*: Analyse des Betriebsverhaltens von Photovoltaikanlagen durch normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung. Bulletin SEV/VSE 4/95.

[5] *U. Lappe*: Selbsttätige Freischaltstelle für Eigenerzeugungsanlagen bis 4,6 kVA bzw. bei PV-Anlagen bis 5 kW_p. 10. Symposium PV-Solarenergie, Staffelstein, 1995.

[6] *H. Häberlin*: Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen – Normen, Vorschriften, Testergebnisse, Probleme, Lösungsmöglichkeiten. Elektroniker 6/92 und 7/92.

[7] *Ch. Beutler* und *H. Häberlin*: Ertrag und Zuverlässigkeit netzgekoppelter Anlagen im Kanton Bern. Schlussbericht des BEW-Projektes DIS 2316 (3 Teile: Synthesebericht, Anhang 1 und 2). Erhältlich bei ENET, Postfach, 3003 Bern.

[8] *H. Haeberlin, F. Kaeser, Ch. Liebi* and *Ch. Beutler*: Results of recent performance and reliability tests of the most popular inverters for grid-connected PV-systems in Switzerland. Proc. 13th EU PV-conf. Nice, 1995.

Nouveaux tests de rendement et de fiabilité réalisés sur des onduleurs destinés à des installations photovoltaïques raccordées au réseau

Le laboratoire photovoltaïque de l'Ecole d'ingénieurs de Berthoud (ISB) a réalisé de nombreux tests sur de petits onduleurs destinés à des installations photovoltaïques raccordées au réseau [1, 2]. Le nouveau centre d'essais de 60 kW_p pour systèmes photovoltaïques est devenu opérationnel en 1994 [3]. Il sera dès lors possible de faire également des essais sur de grands appareils. L'article présente les résultats de tests intensifs, réalisés – en partie sur plus d'une année – sur des onduleurs monophasés et triphasés dans le domaine allant de 1 à 20 kW. Les résultats de ces tests donnent, avec ceux d'un autre projet, de premières informations sur la fiabilité à long terme des onduleurs utilisés.