

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: 81 (1990)

Heft: 10

Artikel: Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen im Vergleichstest

Autor: Häberlin, H. / Nyffeler, H. P. / Renevey, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903119>

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: 26.01.2026

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

Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen im Vergleichstest

H. Häberlin, H. P. Nyffeler, D. Renevey

An der Ingenieurschule Burgdorf wird seit Oktober 1988 eine netzgekoppelte 3-kW-Photovoltaikanlage betrieben. Bis Mitte November 1989 wurde der amerikanische Wechselrichter SI-3000 von Photoelectric Inc. einem Langzeittest unterzogen. Seit Ende November 1989 wird der neue Schweizer Wechselrichter Solcon untersucht. Die Ergebnisse dieser Messungen am SI-3000 und erste Resultate der Messungen am Solcon sind in diesem Bericht zusammengefasst.

Une installation photovoltaïque (3 kW) raccordée au réseau est depuis octobre 1988 en exploitation à l'école d'ingénieurs de Berthoud. L'onduleur américain SI-3000 Photoelectric Inc. testé jusqu'à la mi-novembre 1989 a été remplacé dès la fin novembre 1989 par le nouvel onduleur suisse Solcon. Les résultats des mesures obtenues avec le SI-3000 et les premiers résultats de celles du Solcon sont présentés dans cet article.

Adresse der Autoren

Dr. Heinrich Häberlin, dipl. El.-Ing. ETH, techn. Vizedirektor, Hans Peter Nyffeler, El.-Ing. HTL und Dominique Renevey, El.-Ing. HTL, Assistenten am Photovoltaik-Labor, Ingenieurschule Burgdorf (ISB), Burgdorf.

Einleitung

Die Zahl der photovoltaischen Netzverbundanlagen mit einer Nennleistung von einigen Kilowatt nimmt laufend zu. Immer mehr Schweizer wollen Dach- und Fassadenflächen zur Stromerzeugung nutzen. Das Herzstück und zugleich das kritischste Element jeder Netzeinspeisung ist der Wechselrichter. Gegenwärtig wird in der Schweiz für kleine netzgekoppelte Photovoltaikanlagen meist der Solar-Inverter SI-3000 (Nennleistung 3 kW) verwendet. Vor kurzem ist nun auch von einer Schweizer Projektgruppe unter Leitung der Alpha Real AG ein Konkurrenzprodukt entwickelt worden. Dieser neue Solarwechselrichter Solcon ist seit Ende 1989 auf dem Markt erhältlich [1]. Bei beiden Wechselrichtern handelt es sich um selbstgeführte Wechselrichter mit Hochfrequenztransformator [2]. Es ist sehr wichtig, das Verhalten solcher Wechselrichter am öffentlichen Stromnetz unter schweizerischen Bedingungen genau zu kennen.

Aufbau der Photovoltaik-Testanlage Solab 3

Der Solargenerator unserer Testanlage Solab 3 besteht aus 54 Panels des Typs Arco Solar M55 mit einer gesamten Spitzenleistung von 2,97 kW_p bei Normbedingungen. Durch einfaches Umstecken im Innenanschlusskasten lässt sich die Generatorspannung jedem Wechselrichtertyp anpassen [3]. Gleichstromseitig und netzseitig ist der zu testende Wechselrichter mit Varistoren gegen Überspannungen geschützt. Zur Reduktion der vom Wechselrichter erzeugten hochfrequenten Störspannungen auf der Anschlussleitung ist überdies ein Netzfilter eingebaut.

Die wichtigsten Anlagenparameter werden jede Sekunde von einem Personal-Computer on-line erfasst. Im Normalbetrieb bildet der PC aus den erfassten Messwerten Minutenmittelwerte und speichert nur diese ab. Seit Herbst 1989 wird beim Auftreten einer Wechselrichterstörung jeweils zusätzlich ein sogenanntes «Errorfile» abgelegt, das alle Sekundenmesswerte während mindestens einer Minute vor und nach dem Störfall umfasst. Ausser für die Datenerfassung lässt sich der PC gleichzeitig auch für die Auswertung der gewonnenen Daten einsetzen. Die Software für die Erfassung und Auswertung wurde von der ISB entwickelt.

Als Messwandler für Strom, Spannung und Wirkleistung auf der Netzseite wurden handelsübliche Geräte eingesetzt (Camille Bauer, Genauigkeitsklasse 0,5). Die Sensoren für die Messung der Gleichspannung, des Gleichstromes und der netzseitigen Stromüberschwingungen wurden selbst entwickelt (siehe Bild 1). Seit August 1989 besteht zusätzlich auch noch eine Rundsteuersignal-Empfangsschaltung, mit der alle am Standort unserer Anlage vorkommenden Rundsteuersignale detektiert werden können.

Resultate der Messungen am SI-3000

In mehrmonatigen Messungen an einem serienmässigen SI-3000 wurden folgende Resultate erzielt [4]:

Wirkungsgrad

Der gemessene maximale Wirkungsgrad liegt bei etwa 92% statt wie zuerst vom Hersteller angegeben bei 95% (siehe Bild 2). Bei einem Besuch des Direktors der Herstellerfirma (J.

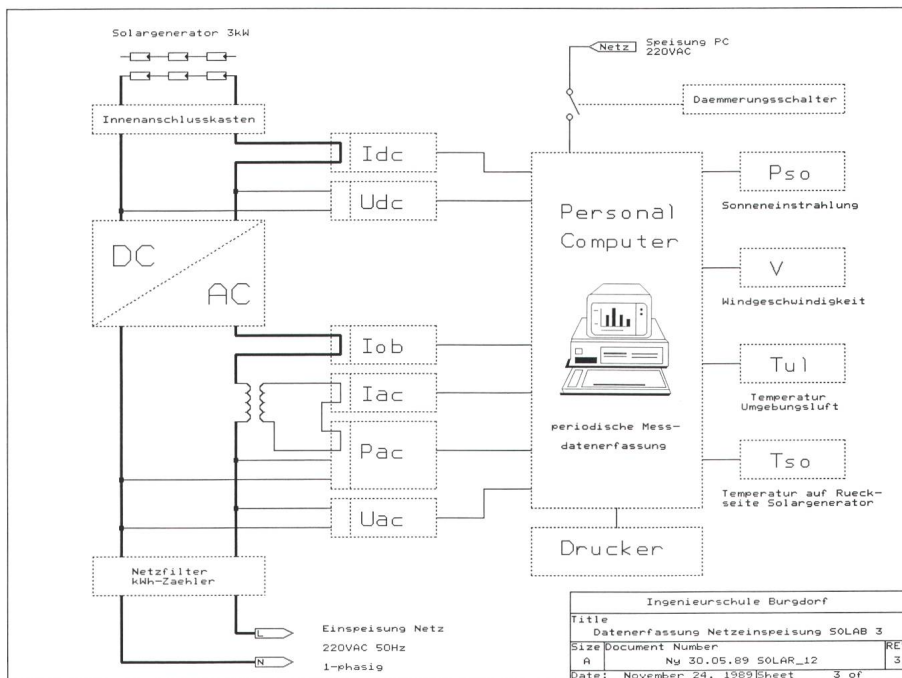


Bild 1 Blockscheema der 3-kW-Photovoltaikanlage SOLAB 3.

Ross) am 21.4. 1989 in unserem Labor wurde die Korrektheit unserer Messungen anerkannt. Im neuen Datenblatt wird deshalb noch ein Maximalwirkungsgrad von 93% angegeben.

Oberschwingungen

Durch kontinuierliche Messung des Effektivwertes der Oberschwingungsströme mit dem PC konnte festgestellt werden, dass bei eingespeisten Leistungen von $>1,8$ kW sporadisch (recht häufig, aber nicht regelmässig) wesentlich stärkere Oberschwingungsströme auftreten als im Datenblatt an-

gegeben (siehe Bild 3). Durch eine kleine Modifikation auf dem Steuerprint konnte der Hersteller diese Erscheinung beheben. Die danach gemessenen Oberschwingungsströme liegen aber dennoch deutlich über den im Datenblatt angegebenen Werten (siehe Bild 4). Neben dem Gesamteffektivwert der Stromberschwingungen wurde auch das Spektrum der Oberschwingungsströme (Bild 5) und der Oberschwingungsspannungen mit (Bild 6) und ohne (Bild 7) Wechselrichter bei einer eingespeisten Leistung von etwa 2,3 kW mit einem Netzoberwellenanalysator Nowa-1 von Wandel

& Goltermann untersucht. Die Messung erfolgte dabei direkt am Anschlusspunkt (Netzimpedanz Z etwa $0,79 \text{ Ohm}$) statt am Verknüpfungspunkt mit dem Netz. Dies ergibt bei den Oberschwingungsspannungen natürlich etwas zu hohe Werte. Ein Vergleich von Bild 6 und Bild 7 zeigt, dass die nach der Norm SEV 3600.1 zulässigen Oberschwingungsspannungsbeiträge trotzdem nicht überschritten werden. Bei einigen Harmonischen (z.B. der 2. und der 3.) werden durch den Betrieb des Wechselrichters die Oberschwingungsspannungen sogar reduziert.

Minimale Einschaltleistung

Für das Einschalten des Wechselrichters ist eine gewisse minimale elektrische Leistung des Solargenerators notwendig. Diese Einschaltsschwelle lag zu Beginn unserer Messungen bei knapp 200 W. Durch eine Modifikation des Steuerprints konnte der Hersteller die erforderliche Einschaltleistung annähernd halbieren auf etwa 100 W (wechselstromseitig etwa 33 W). Mit dieser Änderung wurde der Energiewirkungsgrad an trüben Tagen erheblich gesteigert.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Im Rahmen einer Diplomarbeit [5] im Frühjahr 1990 konnte mit einem durch das BEW finanzierten Messplatz die Funkstörspannung des SI-3000 im Bereich 10 kHz bis 30 MHz gemessen werden. Die gemäss der schweizerischen Störschutzverordnung zulässigen Werte werden sowohl

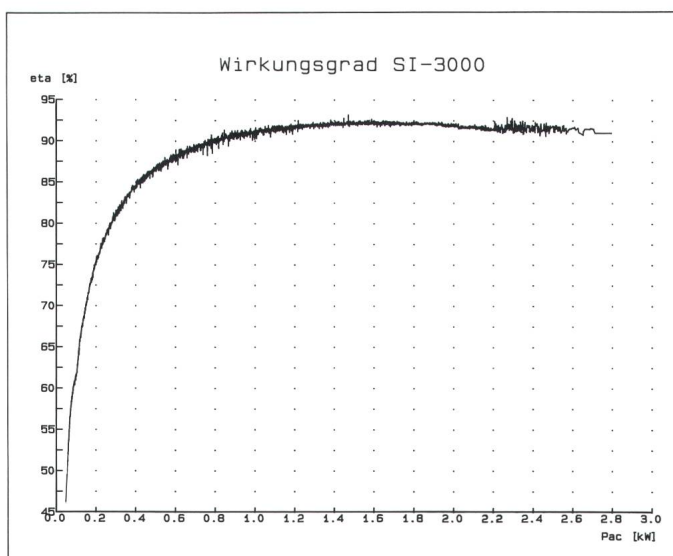


Bild 2 Wirkungsgrad des SI-3000 in Funktion der Ausgangsleistung P_{ac} .

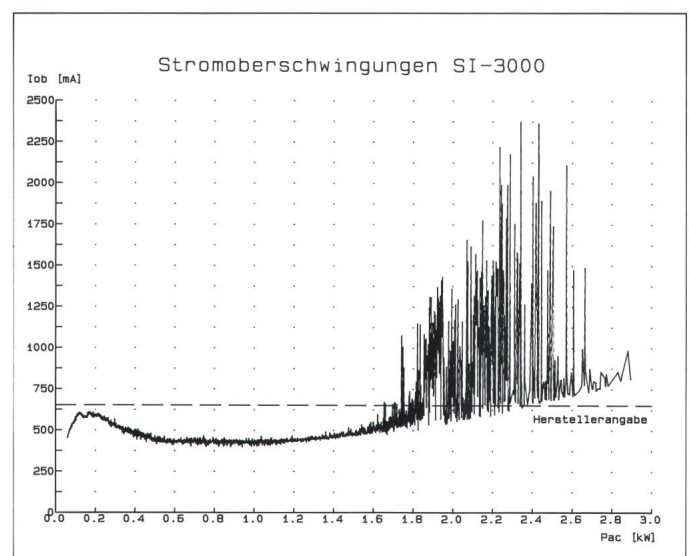


Bild 3 Stromberschwingungen I_{ob} in Funktion der Ausgangsleistung P_{ac} vor Modifikation.

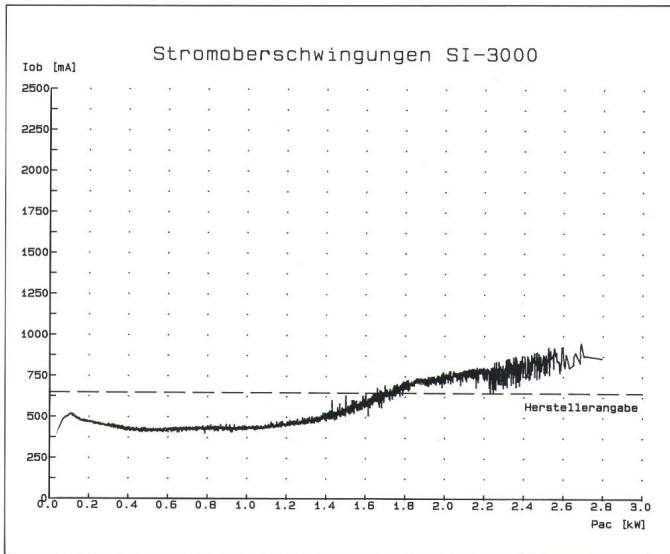


Bild 4
Stromüberschwingungen I_{ob} in Funktion der Ausgangsleistung P_{ac} nach Modifikation.

dingungen kann er jedoch einen abgeschalteten Teil des Netzes noch während kurzer Zeit (nach unseren Messungen 8 bis 20 s) im Inselbetrieb speisen.

Bild 10 zeigt die verwendete Versuchsanordnung. Ein parallel zum SI-3000 geschalteter Widerstand wird so eingestellt, dass der vom Ampèremeter angezeigte Netzstrom minimal wird. Bild 11 zeigt oben das Oszillogramm der Ausgangsspannung des SI-3000, wenn in diesem Fall die Verbindung zum Netz unterbrochen wird. Unten ist zur genauen Markierung des Schaltzeitpunktes die über einen gleichzeitig unterbrochenen zweiten Kontakt geführte Netzspannung dargestellt. Man erkennt, dass die Span-

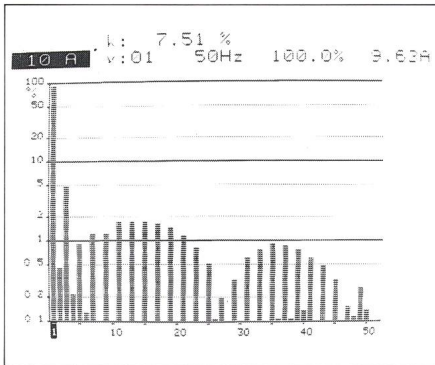


Bild 5 Spektrum der Oberschwingungsströme des SI-3000 bis zur 50. Harmonischen (2,5 kHz); eingespeiste Leistung $P_{ac} = 2,3 \text{ kW}$.

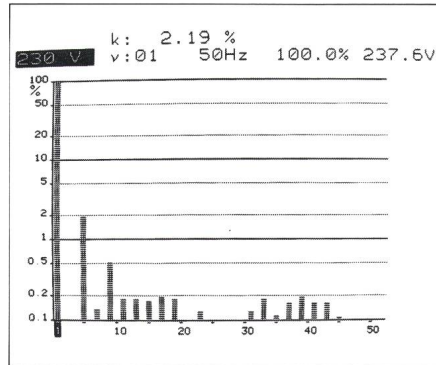


Bild 6 Spektrum der Oberschwingungsspannungen am Anschlusspunkt des SI-3000; eingespeiste Leistung $P_{ac} = 2,3 \text{ kW}$.

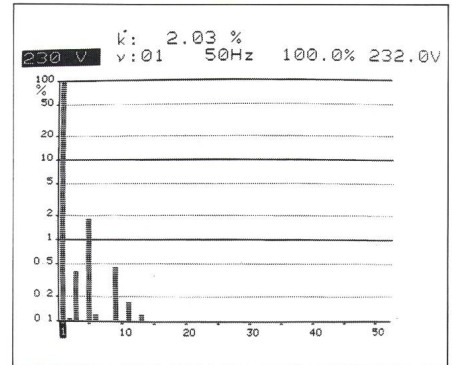


Bild 7 Spektrum der Oberschwingungsspannungen am Anschlusspunkt des SI-3000; eingespeiste Leistung $P_{ac} = 0$.

auf der Gleichstromseite (Bild 8) als auch auf der Wechselstromseite (Bild 9) beträchtlich überschritten. Nur durch den Einsatz zusätzlicher externer Netzfilter (auf beiden Seiten) können die Grenzwerte eingehalten werden. Der Radioempfang auf Lang-, Mittel- und Kurzwellen wird durch einen SI-3000, der ohne Zusatzfilter im gleichen Gebäude betrieben wird, ziemlich stark gestört.

Selbstlauf des SI-3000 nach einem Netzausfall

Der SI-3000 kann ohne Verbindung mit dem Netz nicht starten. Wird seine Verbindung mit dem Netz während des Betriebs unterbrochen, so schaltet er sich normalerweise sehr rasch (inert etwa 100 ms) ab. Unter gewissen, in der Praxis sehr selten erfüllten Be-

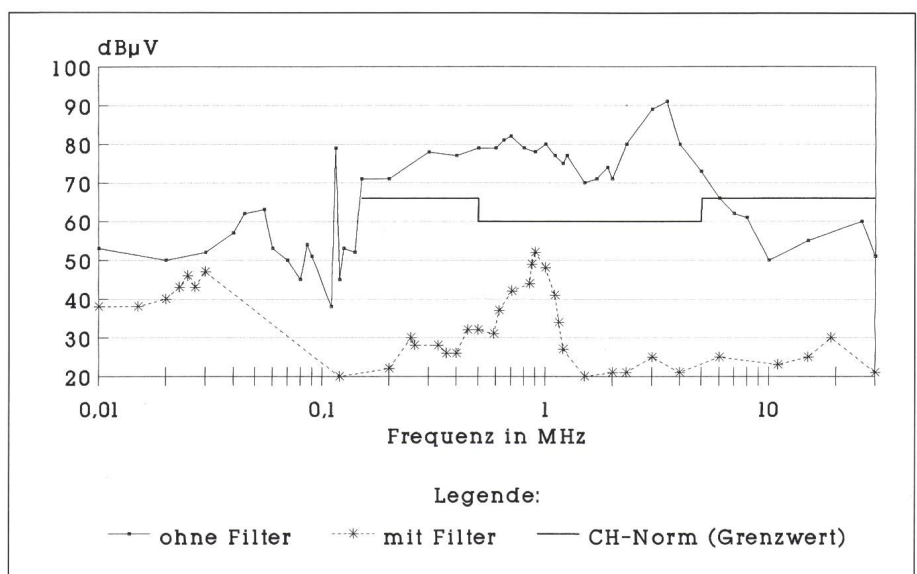


Bild 8 Vom SI-3000 produzierte hochfrequente Störspannung (asymm.) auf der Gleichstromseite (mit und ohne Filter).

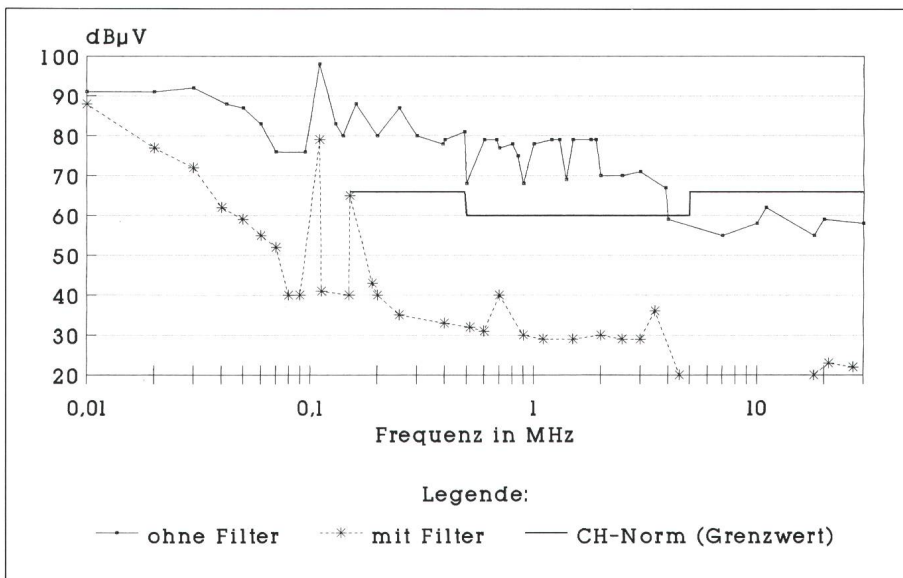


Bild 9 Vom SI-3000 produzierte hochfrequente Störspannung (asymm.) auf der Wechselstromseite (mit und ohne Filter).

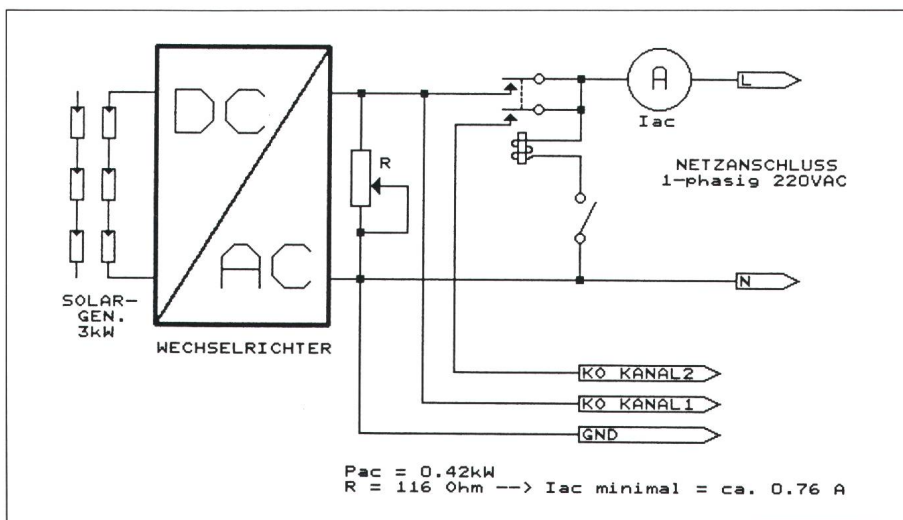


Bild 10 Schaltung zur Provokation des Selbstlaufs des SI-3000.

nung des SI-3000 etwas zusammenfällt und die Frequenz auf etwa 37 bis 40 Hz sinkt. Dieser Zustand ist während 8 bis maximal 20 Sekunden stabil, dann schaltet der SI-3000 wegen zu tiefer Frequenz ab.

Der Hersteller konnte dieses Problem inzwischen durch eine Softwaremodifikation lösen. Im Dezember 1989 erhielten wir einen neuen Prozessor für den SI-3000, mit dem kein Selbstlauf mehr auftritt. Ob durch diese Softwareänderung andere Eigenschaften des SI-3000 beeinflusst werden, konnte aus Zeitgründen nicht mehr untersucht werden.

Wechselrichterausfälle

Die beobachteten Wechselrichterausfälle können in 3 Kategorien eingeteilt werden:

- A: Kurzzeitige Ausfälle von etwa 5 bis 30 s, danach automatischer Start des SI-3000. Solche Störungen bewirken zwar Leistungsschwankungen im Netz, sind aber für die Energieproduktion kaum von Bedeutung.
- B: Langzeitausfälle ohne Hardwaredefekt, die einen Stillstand des Wechselrichters bis zu einem manuellen Neustart zur Folge haben.
- C: Langzeitausfälle mit Hardwaredefekt, die eine Reparatur des Wechselrichters erforderlich machen.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass fast alle beobachteten Ausfälle durch Netzkommandos verursacht wurden. Am Ort unserer Versuchsanlage treten Rundsteuersignale der EVO (725 Hz), der BKW (316,7

Hz) und gelegentlich auch der IBB (492 Hz) auf.

Vor dem Besuch des Herstellers wurden täglich bis zu 14 durch Rundsteuersignale verursachte Ausfälle vom Typ A registriert (siehe Bild 12). Die Empfindlichkeit gegen Rundsteuersignale konnte durch eine weitere vom Hersteller vorgenommene Änderung stark reduziert werden (Bild 13). Allerdings traten seither insgesamt 7 längere Ausfälle (3 vom Typ B und 4 vom Typ C) auf, die mit einer Ausnahme alle durch Rundsteuersignale ausgelöst wurden (siehe Bild 14). Tabelle I zeigt den Ausdruck eines Errorfiles, das bei einem Ausfall vom Typ C am 8.11.89 registriert wurde.

Die 4 Typ-C-Ausfälle wurden alle durch einen Defekt in der HF-Gleichrichterbrücke verursacht. Es scheint, dass dort ein gewisser Schwachpunkt des SI-3000 liegt.

Geräuscentwicklung im Betrieb

Der SI-3000 verursacht im Betrieb ein für einen statischen Wechselrichter eigentlich erstaunlich lautes Geräusch. Er sollte deshalb nur in unbewohnten Räumen (Keller, Estrich usw.) installiert werden.

Resultate der ersten Messungen am neuen Schweizer Wechselrichter Solcon

Wirkungsgrad

Nach unseren Messungen weist der Solcon im Vergleich zum SI-3000

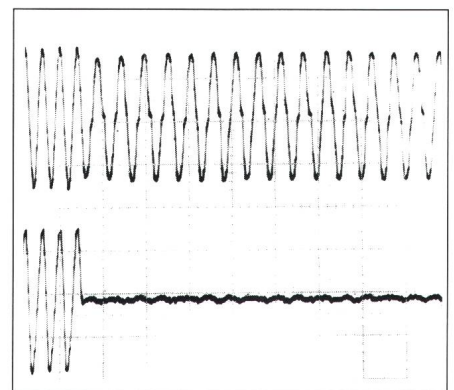


Bild 11 Selbstlauf des SI-3000 bei $P_{ac} = 420 \text{ W}$ und angepasster Last in der Schaltung nach Bild 10. Oben: Oszillogramm der Ausgangsspannung des SI-3000. Unten: Gleichzeitig abgeschaltete Netzspannung. Vertikal: 200 V/div. Horizontal: 50 ms/div.

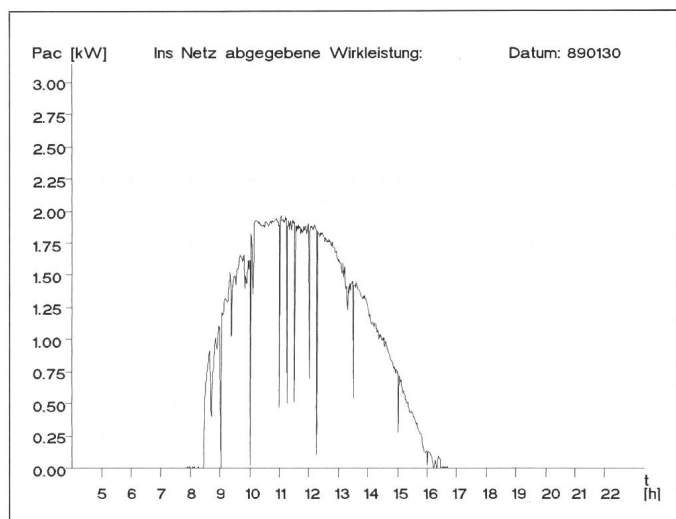


Bild 12 Kurzzeitige Ausfälle durch Netzkommandos am 30.1.1989; abgegebene Tagesenergie $W = 10,03$ kWh.

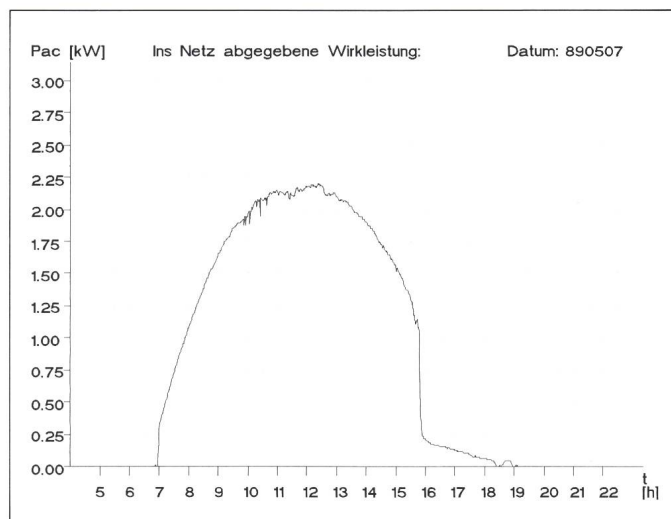


Bild 13 Keine Ausfälle durch Netzkommandos mehr am 7.5.1989; abgegebene Tagesenergie $W = 15,43$ kWh.

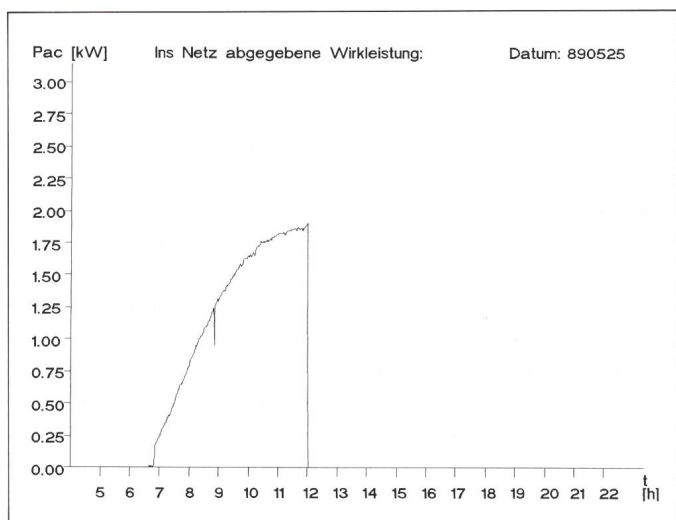


Bild 14 Elektronikdefekt infolge Netzkommando um 12.00 Uhr am 25.5.1989; abgegebene Tagesenergie $W = 6,71$ kWh.

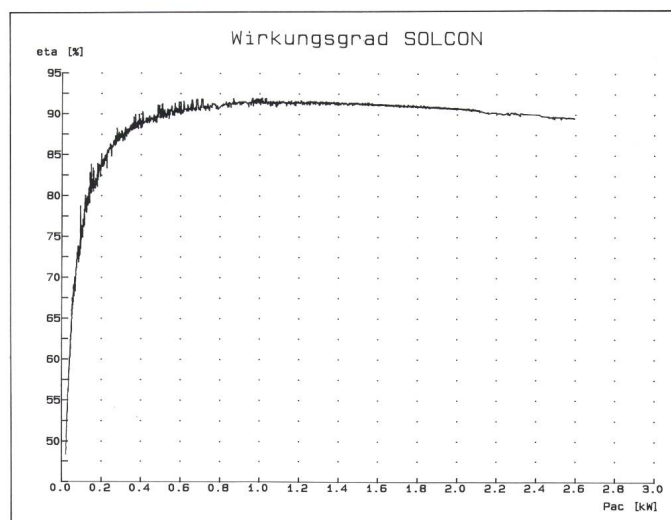
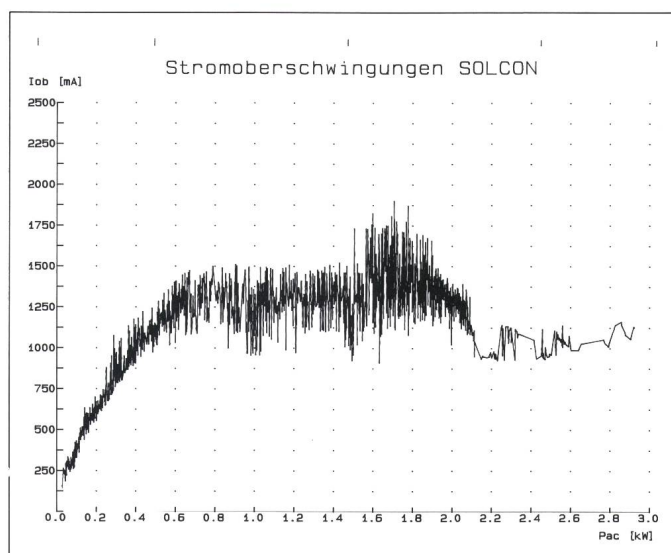


Bild 15 Wirkungsgrad des SOLCON in Funktion der Ausgangsleistung P_{ac} .

einen besseren Wirkungsgradverlauf im Teillastbereich auf (siehe Bild 15). Dies wird sich vor allem im schweizerischen Mittelland günstig auswirken. Solcon-Anlagen dürften unter gleichen Bedingungen im Mittelland deshalb etwas mehr Energie produzieren als SI-3000-Anlagen.

Bild 16 Stromüberschwingungen I_{ob} in Funktion der Ausgangsleistung P_{ac} .



Oberschwingungen

Durch den Betrieb des Solcon werden die niederfrequenten Spannungsüberschwingungen auf der Netzzuleitung reduziert. Dies hat zur Folge, dass der Effektivwert der Stromüberschwingungen hauptsächlich vom Netzzustand und nicht von der Ausgangsleistung abhängt (siehe Bild 16). Im Spektrum der Spannungsüber-

schwingungen (siehe Bild 17 und 18) ist deutlich ersichtlich, dass der Wechselrichter vor allem die 3., 9. und 11. Harmonische reduziert. Bild 19 zeigt die auftretenden Oberschwingungsströme, die den Oberschwingungsgehalt verringern.

Der Solcon verursacht im praktischen Betrieb keine Probleme bezüglich Oberschwingungen; er hält alle anwendbaren Normen ein (SEV 3601.2 und SEV 3600.1 am Anschlusspunkt).

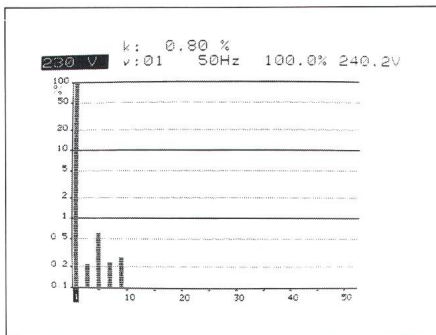


Bild 17 Spektrum der Oberschwingungsspannungen am Anschlusspunkt des SOLCON; eingespeiste Leistung $P_{ac} = 2,3 \text{ kW}$.

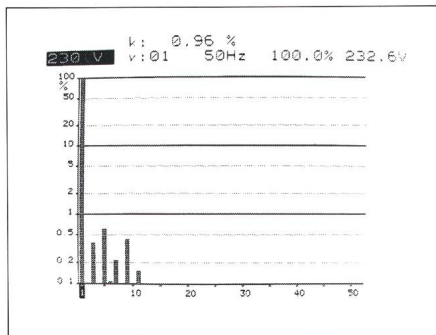


Bild 18 Spektrum der Oberschwingungsspannungen am Anschlusspunkt des SOLCON; eingespeiste Leistung $P_{ac} = 0$.

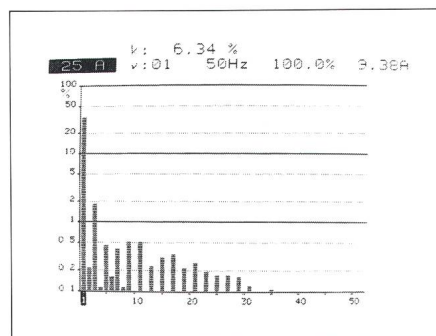


Bild 19 Spektrum der Oberschwingungsströme des SOLCON bis zur 50. Harmonischen (2,5 kHz); eingespeiste Leistung $P_{ac} = 2,3 \text{ kW}$.

Der Solcon versucht vom Konzept her, die Sinusform der Netzspannung zu verbessern. Er kämpft deshalb auch gegen Rundsteuersignale auf dem Netz an. Bei relativ niedrigen Rundsteuersignalpegeln in einem weichen Netz mit relativ hoher Netzimpedanz ist es somit denkbar, dass beim Betrieb eines Solcon benachbarte Netzkommandoempfänger nicht mehr richtig ansprechen.

Minimale Einschaltleistung

Die für das Einschalten des Wechselrichters notwendige minimale Leistung des Solargenerators liegt beim Solcon bei knapp 60 W (wechselstrom-

seitig etwa 33 W) und ist somit deutlich kleiner als beim SI-3000. Der Solcon läuft deshalb auch an sehr trüben Wintertagen praktisch immer an.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Bei der Umrüstung der automatischen Datenerfassung auf den Solcon traten zunächst verschiedene Messprobleme auf, die durch vom Wechselrichter produzierte hochfrequente Störspannungen verursacht wurden. Die gemäss Störschutzverordnung zulässigen Grenzwerte für die Funkstörspannungen werden sowohl auf der Gleichstromseite (Bild 20) als auch auf der Wechselstromseite (Bild 21) mas-

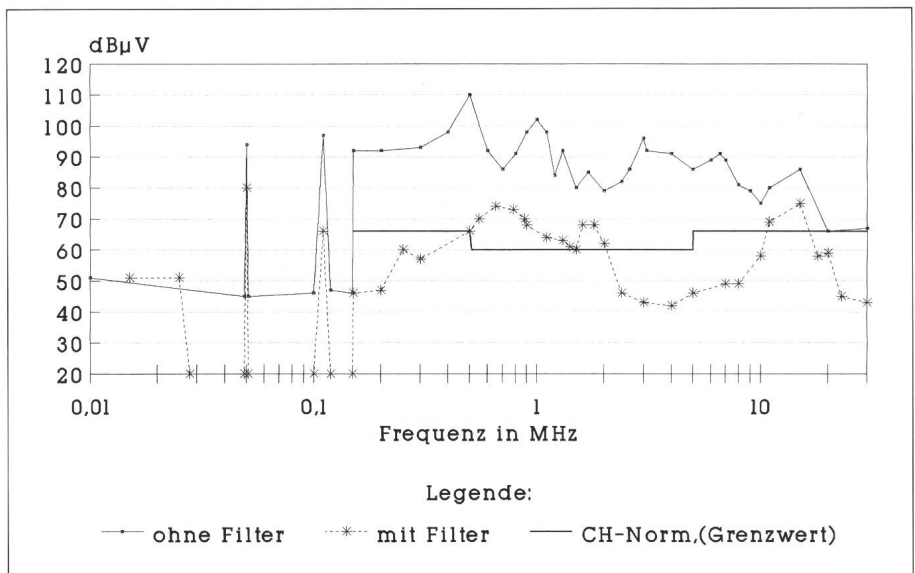


Bild 20 Vom SOLCON produzierte hochfrequente Störspannungen (asymm.) auf der Gleichstromseite (mit und ohne Filter).

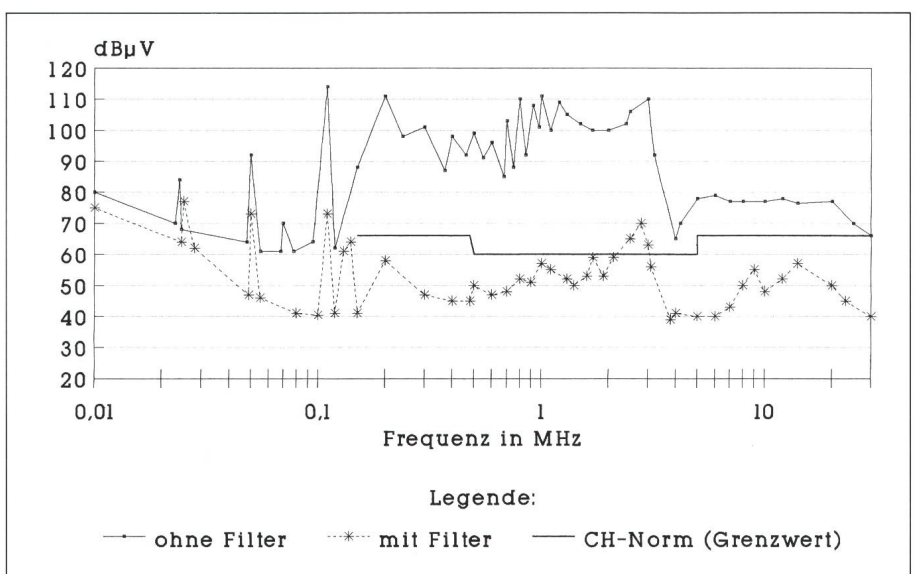


Bild 21 Vom SOLCON produzierte hochfrequente Störspannungen (asymm.) auf der Wechselstromseite (mit und ohne Filter).

siv überschritten (bis über 50 dB!). Die vom Solcon produzierten hochfrequenten Störspannungen konnten durch den Einsatz zusätzlicher externer Netzfilter (auf beiden Seiten) zwar beträchtlich reduziert werden, liegen aber immer noch über den zulässigen Grenzwerten. Ein ohne Zusatzfilter in einem Wohngebäude betriebener Solcon wirkt in der gegenwärtigen Ausführung als eigentlicher Störsender

und beeinträchtigt den Radioempfang auf Lang-, Mittel-, Kurz- und teilweise sogar Ultrakurzwellen sehr stark.

Selbstlauf nach einem Netzausfall

Mit der in Bild 22 gezeigten Versuchsschaltung kann der Solcon ohne weiteres mehrere Stunden einen Inselbetrieb aufrechterhalten (siehe Bild 23). Diese Neigung zum Selbstlauf sollte wie beim SI-3000 durch geeignete

Änderungen in der Software verbessert werden.

Wechselrichterausfälle

Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurden an unserem Standort keine Ausfälle infolge Netzkommmandos registriert. Dagegen trat bisher ein Ausfall mit Hardwaredefekt (Typ C) auf, der von einem Defekt an einer Überspannungsschutzdiode verursacht wurde.

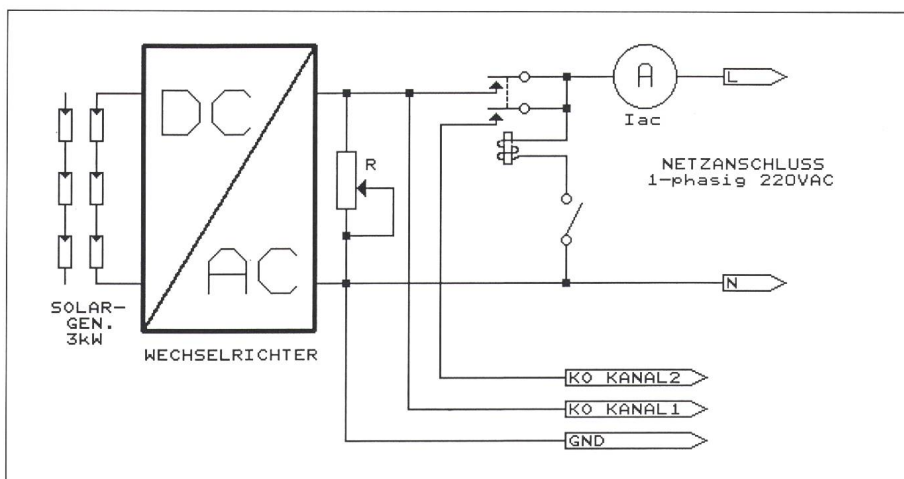


Bild 22 Schaltung zur Provokation des Selbstlaufs des SOLCON. R wurde so gewählt, dass minimaler Strom I_{ac} fließt: $R = 130 \Omega \rightarrow I_{ac} = 1,80 \text{ A}$ bei $P_{ac} \approx 420 \text{ W}$.

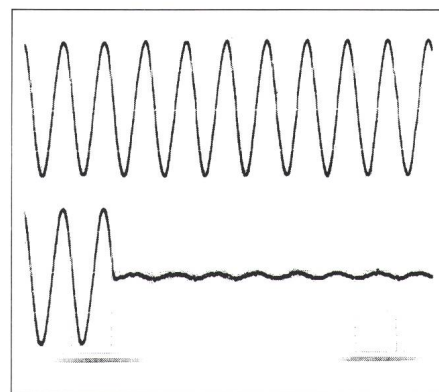


Bild 23 Selbstlauf des SOLCON bei $P_{ac} = 420 \text{ W}$ und angepasster Last in der Schaltung nach Bild 22. Oben: Oszillogramm der Ausgangsspannung. Unten: Gleichzeitig abgeschaltete Netzspannung. Vertikal: 200 V/div. Horizontal: 20 ms/div.

| Zeit | Idc [A] | Udc [V] | Iac [A] | Uac [V] | Pac [W] | Iob [A] | --- | --- | Pso50 [W/m2] | PsoCH [W/m2] | Tso [°C] | Tu [°C] | Uu [m/s] | Tu [°C] | --- | --- | EWI | IEB | BKW |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|-----|--------------|--------------|----------|---------|----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 11:14:20 | 53,56 | 48,9 | 10,03 | 239,4 | 2377 | 0,793 | 0 | 0 | 760 | 790 | 25,6 | 7,4 | 0,5 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:21 | 53,73 | 48,7 | 10,04 | 239,2 | 2372 | 0,797 | 0 | 0 | 762 | 792 | 25,4 | 7,3 | 0,6 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:22 | 53,64 | 48,8 | 10,03 | 239,4 | 2377 | 0,799 | 0 | 0 | 761 | 794 | 25,6 | 7,4 | 0,7 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:23 | 53,60 | 48,8 | 10,04 | 239,2 | 2373 | 0,798 | 0 | 0 | 760 | 794 | 25,6 | 7,4 | 1,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:24 | 53,72 | 48,6 | 10,03 | 239,3 | 2371 | 0,790 | 0 | 0 | 760 | 795 | 25,5 | 7,4 | 1,0 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:25 | 53,59 | 48,7 | 10,02 | 239,3 | 2370 | 0,785 | 0 | 0 | 760 | 796 | 25,7 | 7,5 | 1,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:26 | 53,56 | 48,7 | 10,01 | 239,5 | 2367 | 0,789 | 0 | 0 | 758 | 796 | 25,8 | 7,5 | 0,9 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:27 | 53,50 | 48,7 | 10,01 | 239,5 | 2364 | 0,788 | 0 | 0 | 755 | 795 | 25,7 | 7,4 | 1,0 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:28 | 53,44 | 48,8 | 10,03 | 239,4 | 2362 | 0,902 | 0 | 0 | 755 | 795 | 26,0 | 7,5 | 1,0 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:29 | 53,41 | 48,9 | 10,01 | 239,1 | 2364 | 0,794 | 0 | 0 | 759 | 795 | 26,0 | 7,4 | 1,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:30 | 53,46 | 48,8 | 10,00 | 239,2 | 2363 | 0,806 | 0 | 0 | 755 | 794 | 25,8 | 7,4 | 1,1 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:31 | 53,36 | 48,9 | 10,01 | 239,1 | 2367 | 0,784 | 0 | 0 | 758 | 794 | 26,0 | 7,6 | 0,9 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:32 | 53,55 | 48,7 | 10,00 | 239,2 | 2367 | 0,786 | 0 | 0 | 756 | 794 | 25,7 | 7,6 | 0,8 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:33 | 53,39 | 48,9 | 10,02 | 239,0 | 2367 | 0,783 | 0 | 0 | 758 | 794 | 25,9 | 7,8 | 0,7 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:34 | 53,20 | 49,0 | 10,01 | 239,1 | 2366 | 0,783 | 0 | 0 | 761 | 794 | 26,0 | 7,8 | 0,6 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:35 | 53,46 | 48,8 | 10,01 | 239,1 | 2364 | 0,786 | 0 | 0 | 758 | 794 | 25,8 | 7,6 | 0,5 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:36 | 53,39 | 48,9 | 10,01 | 239,5 | 2370 | 0,815 | 0 | 0 | 757 | 795 | 25,9 | 7,9 | 0,4 | 0,0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 11:14:37 | 53,47 | 48,7 | 9,99 | 239,4 | 2358 | 0,809 | 0 | 0 | 756 | 794 | 25,8 | 7,8 | 0,3 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 11:14:38 | 53,26 | 48,9 | 10,00 | 239,4 | 2363 | 0,787 | 0 | 0 | 755 | 794 | 25,9 | 7,8 | 0,4 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:39 | 53,25 | 48,9 | 9,99 | 239,5 | 2364 | 0,788 | 0 | 0 | 757 | 794 | 26,1 | 7,9 | 0,3 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:40 | 53,07 | 49,0 | 9,99 | 239,3 | 2356 | 0,814 | 0 | 0 | 755 | 795 | 25,9 | 7,8 | 0,3 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:41 | 53,10 | 49,0 | 9,96 | 239,4 | 2356 | 0,790 | 0 | 0 | 757 | 795 | 26,0 | 7,9 | 0,3 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11:14:42 | 0,51 | 64,4 | 0,33 | 6,8 | 32 | 0,195 | 0 | 0 | 749 | 795 | 26,1 | 8,0 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 11:14:43 | 0,32 | 64,4 | 0,03 | 0,4 | 4 | 0,017 | 0 | 0 | 749 | 791 | 26,0 | 7,9 | 0,2 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:44 | 0,30 | 64,4 | 0,01 | 0,1 | 2 | 0,004 | 0 | 0 | 750 | 790 | 26,1 | 8,0 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:45 | 0,27 | 64,4 | 0,01 | 0,1 | 2 | 0,002 | 0 | 0 | 751 | 790 | 26,3 | 8,2 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:46 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,1 | 2 | 0,002 | 0 | 0 | 751 | 788 | 26,2 | 8,0 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:47 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,1 | 2 | 0,002 | 0 | 0 | 749 | 788 | 26,4 | 8,2 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:48 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,1 | 1 | 0,002 | 0 | 0 | 751 | 788 | 26,5 | 8,1 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:49 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,1 | 1 | 0,002 | 0 | 0 | 753 | 787 | 26,3 | 7,9 | 0,2 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:50 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,1 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 753 | 788 | 26,6 | 8,0 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:51 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,1 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 760 | 790 | 26,4 | 7,7 | 0,2 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:52 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | -0,0 | 1 | 0,002 | 0 | 0 | 759 | 791 | 26,6 | 7,9 | 0,2 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:53 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,0 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 765 | 793 | 26,7 | 7,8 | 0,2 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:54 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | -0,0 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 769 | 795 | 26,6 | 7,5 | 0,2 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:55 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,0 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 772 | 798 | 26,9 | 7,7 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:56 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | -0,0 | 0 | 0,001 | 0 | 0 | 775 | 801 | 26,8 | 7,4 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:57 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | -0,0 | 1 | 0,002 | 0 | 0 | 778 | 804 | 26,9 | 7,3 | 0,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:58 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | -0,1 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 779 | 807 | 27,0 | 7,4 | 0,2 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:14:59 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,0 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 780 | 810 | 26,9 | 7,0 | 0,2 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:15:00 | 0,27 | 64,4 | 0,00 | 0,0 | 1 | 0,001 | 0 | 0 | 781 | 813 | 27,0 | 7,0 | 0,2 | -0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle I Errorfile eines Ausfalls des SI 3000 vom Typ C infolge Netzkommando BKW

Geräuschentwicklung

Durch den Betrieb des Solcon-Wechselrichters werden keine nennenswerten Geräusche verursacht.

Leistungsschwankungen bei Schwachlast

Bei kleinen Leistungen (Gleichstromleistung in der Grössenordnung von 200 W) kann der Solcon sporadisch in einen instabilen Betriebszustand geraten, bei dem die ins Netz eingespeiste Leistung bei unveränderter Einstrahlung zunächst abfällt und dann zwischen 0 und diesem Wert hin und her pendelt. Dieser Zustand kann nach unseren Messungen bis zu etwa 30 Minuten andauern. Diese Instabilität wird möglicherweise durch ein internes EMV-Problem oder einen Softwarefehler verursacht. Tabelle II zeigt ein Errorfile der Anfangsphase eines solchen instabilen Betriebszustandes mit Leistungsschwankungen.

Abschliessende Bemerkungen

Beim SI-3000 konnten dank unseren Messungen bereits verschiedene Details verbessert werden.

Der maximale Wirkungsgrad von SI-3000 und Solcon liegt bei etwa 92%. Beim Solcon ist der Teillastwirkungsgrad, beim SI-3000 der Wirkungsgrad bei grosser Last etwas höher.

Die von neueren Versionen des SI-3000 und vom Solcon produzierten

Oberschwingungen dürften im praktischen Betrieb zumindest in verkabelten Netzen keine Probleme verursachen. Bei älteren Versionen des SI-3000 sollte der Steuerprint ausgetauscht werden, damit keine unzulässig hohen Oberschwingungsströme auftreten.

Die von beiden Geräten auf der Gleich- und Wechselstromseite produzierten hochfrequenten Störspannungen im Bereich 150 kHz bis 30 MHz sollten durch im Gerät eingebaute Filter noch deutlich reduziert werden (für den problemlosen Einsatz in Wohngebieten wären die Grenzwerte nach VDE871B anzustreben).

Da Solargeneratoren mit einer Leistung von einigen kW zusammen mit ihrer recht ausgedehnten Verkabelung strahlungsfähige Gebilde darstellen, sollten auf der Gleichstromseite die gleichen Grenzwerte angewendet werden wie auf der Wechselstromseite.

Beim SI-3000 sollte die Zuverlässigkeit noch verbessert werden. Rundsteuersignale auf den Anschlussleitungen dürfen keine Hardwaredefekte verursachen. Bei älteren Geräten sollte der Prozessor ausgetauscht werden, damit sicher kein Selbstlauf mehr auftritt.

Beim Solcon sollte die Neigung zum Selbstlauf wie beim SI-3000 durch eine geeignete Modifikation der Software unterdrückt werden, bevor eine grössere Anzahl Geräte produziert wird. Zwar ist die Erfüllung der Anpassbe-

dingung in einem abgeschalteten Teil des Netzes im Einzelfall ziemlich unwahrscheinlich. Bei einer grösseren Anzahl im Netz verteilter Solcon-Geräte dürfte aber ab und zu ein Inselbetrieb auftreten, wenn dieses Problem nicht beseitigt wird.

Der beobachtete Diodendefekt ist möglicherweise nicht zufällig aufgetreten, sondern auf einen Mangel in der Schaltung zurückzuführen. Auch die sporadisch auftretenden Leistungsschwankungen bei Schwachlast sind lästig und verursachen unnötige Energieverluste. Es ist zu hoffen, dass die noch vorhandenen Probleme beim Solcon bald behoben werden können, bevor eine grössere Serie produziert wird. Entsprechende Kontakte mit dem Hersteller wurden bereits aufgenommen.

Literatur

- [1] P. Toggweiler: Neuer Wechselrichter für dezentrale Solarzellenanlagen im Netzverbund. Bulletin SEV/VSE 16/1989, S. 1017 bis 1020.
- [2] E.T. Schönholzer: Wechselrichter für Photovoltaikanlagen im Netzverbund. Bulletin SEV/VSE 23/1988, S. 1441 bis 1447.
- [3] H. Häberlin: Praktische Photovoltaik. Elektriker 3/1989, S. 49 bis 56.
- [4] H. Häberlin, H.P. Nyffeler und D. Renevey: Betriebserfahrungen mit Photovoltaik-Wechselrichtern. Referate der Fachtagung «Photovoltaik-Nutzung 1990» an der ETH Zürich vom 20.1.90, S. 125 bis 130.
- [5] M. Bill: Messungen am Wechselrichter Solcon/SI-3000. Diplomarbeit am Labor für Elektrotechnik und Photovoltaik der Ingenieurschule Burgdorf, März 1990 (interner Bericht).

| Zeit | Idc [A] | Udc [V] | Iac [A] | Uac [V] | Pac [W] | Iob [A] | --- | --- | Pso50 [W/m2] | PsoCM [W/m2] | Tso [°C] | Tu [°C] | Uu [m/s] | Tm [°C] | --- | --- | EWI | IBB | EWI |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|-----|--------------|--------------|----------|---------|----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16:12:01 | 1.86 | 98.9 | 0.96 | 233.3 | 162 | 0.549 | 0 | 0 | 85 | 89 | 12.2 | 6.9 | 0.1 | -0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:02 | 1.82 | 100.2 | 0.74 | 233.2 | 119 | 0.461 | 0 | 0 | 90 | 89 | 12.5 | 7.0 | 0.1 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:03 | 1.78 | 101.4 | 0.93 | 233.2 | 164 | 0.519 | 0 | 0 | 91 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:04 | 1.83 | 99.9 | 0.94 | 233.4 | 166 | 0.547 | 0 | 0 | 92 | 88 | 12.4 | 7.0 | 0.0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:05 | 1.86 | 98.8 | 0.85 | 233.2 | 140 | 0.510 | 0 | 0 | 91 | 89 | 12.4 | 7.1 | 0.0 | -0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:06 | 1.73 | 102.2 | 0.84 | 233.2 | 145 | 0.493 | 0 | 0 | 85 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | -0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:07 | 1.81 | 100.4 | 0.87 | 233.3 | 147 | 0.499 | 0 | 0 | 85 | 88 | 12.5 | 7.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:08 | 1.87 | 98.6 | 0.89 | 233.3 | 149 | 0.530 | 0 | 0 | 92 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:09 | 1.53 | 106.3 | 0.61 | 233.3 | 101 | 0.386 | 0 | 0 | 92 | 88 | 12.4 | 6.9 | 0.0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:10 | 1.29 | 109.5 | 0.62 | 233.3 | 106 | 0.366 | 0 | 0 | 91 | 89 | 12.4 | 7.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:11 | 1.31 | 109.2 | 0.65 | 233.2 | 110 | 0.385 | 0 | 0 | 92 | 87 | 12.2 | 6.7 | 0.0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:12 | 1.24 | 110.0 | 0.58 | 233.0 | 98 | 0.337 | 0 | 0 | 92 | 88 | 12.4 | 6.9 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:13 | 1.17 | 110.8 | 0.57 | 233.0 | 96 | 0.304 | 0 | 0 | 92 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:14 | 1.16 | 110.8 | 0.58 | 233.0 | 98 | 0.308 | 0 | 0 | 85 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | -0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:15 | 1.14 | 111.0 | 0.56 | 233.2 | 92 | 0.295 | 0 | 0 | 91 | 88 | 12.4 | 7.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:16 | 0.21 | 117.5 | 0.34 | 232.9 | -1 | 0.084 | 0 | 0 | 91 | 87 | 12.2 | 6.7 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:17 | 0.78 | 113.8 | 0.52 | 233.2 | 82 | 0.207 | 0 | 0 | 84 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:18 | 0.59 | 115.0 | 0.40 | 233.0 | 13 | 0.160 | 0 | 0 | 86 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:19 | 0.61 | 114.9 | 0.50 | 233.1 | 75 | 0.181 | 0 | 0 | 92 | 87 | 12.2 | 6.8 | 0.1 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:20 | 1.03 | 111.9 | 0.53 | 233.2 | 86 | 0.264 | 0 | 0 | 92 | 87 | 12.4 | 6.9 | 0.1 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:21 | 1.05 | 111.8 | 0.53 | 233.3 | 82 | 0.269 | 0 | 0 | 92 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.1 | -0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:22 | 0.29 | 117.0 | 0.40 | 233.0 | 37 | 0.129 | 0 | 0 | 88 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.1 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:23 | 1.00 | 112.1 | 0.53 | 233.0 | 84 | 0.256 | 0 | 0 | 91 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.1 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:24 | 1.06 | 111.6 | 0.54 | 233.0 | 87 | 0.273 | 0 | 0 | 92 | 87 | 12.2 | 6.7 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:25 | 0.15 | 117.7 | 0.33 | 232.6 | -3 | 0.071 | 0 | 0 | 86 | 88 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | -0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:26 | 0.99 | 112.3 | 0.52 | 233.2 | 82 | 0.252 | 0 | 0 | 92 | 87 | 12.3 | 6.7 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:27 | 1.06 | 111.6 | 0.54 | 233.2 | 87 | 0.272 | 0 | 0 | 92 | 87 | 12.2 | 6.6 | 0.0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:28 | 0.24 | 117.3 | 0.34 | 232.7 | -1 | 0.090 | 0 | 0 | 91 | 87 | 12.4 | 6.7 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:29 | 0.95 | 112.5 | 0.53 | 233.0 | 83 | 0.243 | 0 | 0 | 91 | 87 | 12.3 | 6.5 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:30 | 1.05 | 111.6 | 0.54 | 233.2 | 87 | 0.272 | 0 | 0 | 92 | 87 | 12.3 | 6.6 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:31 | 0.37 | 116.4 | 0.35 | 232.7 | 1 | 0.119 | 0 | 0 | 91 | 87 | 12.3 | 6.7 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:12:32 | 0.89 | 112.9 | 0.53 | 233.1 | 84 | 0.230 | 0 | 0 | 91 | 87 | 12.2 | 6.6 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle II Errorfile in der Angangphase eines instabilen Betriebszustandes des Solcon