

# VERGLEICHSMESSUNGEN AN PHOTOVOLTAIK-WECHSELRICHTERN

*Prof. Dr. H. Häberlin*

*Ingenieurschule Burgdorf (ISB), Abteilung Elektrotechnik*

*Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf*

*Tel. +34 236 811, Fax +34 236 813*

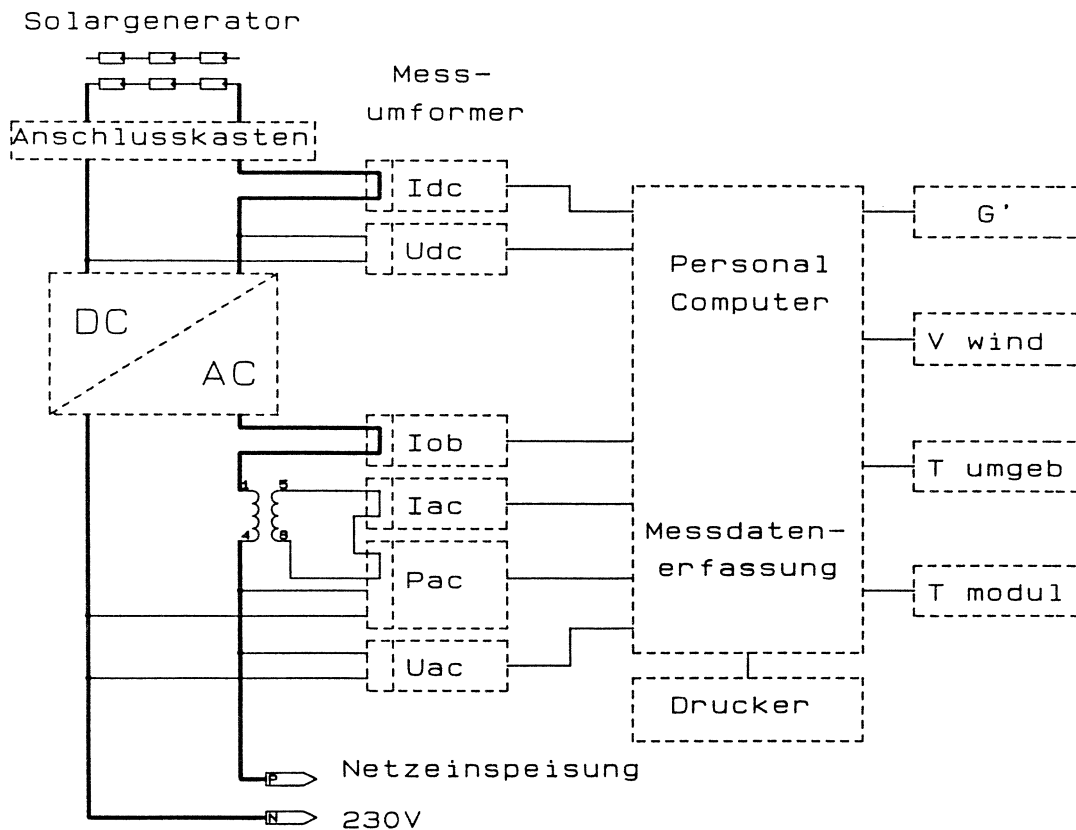
## 1. Einleitung

An der Ingenieurschule Burgdorf wird seit Oktober 1988 eine netzgekoppelte 3kW-Photovoltaikanlage betrieben. Das Herzstück und zugleich das kritische Element jeder Netzeinspeisung ist der Wechselrichter. In den Jahren 1989 - 1992 wurden Vergleichsmessungen an Photovoltaik-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen im Auftrag des BEW durchgeführt. Bei diesen Arbeiten konnten verschiedene Probleme solcher Wechselrichter aufgezeigt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden laufend den Herstellern mitgeteilt und in Fachzeitschriften und einem Buch publiziert. Dadurch konnte ein Beitrag zur Erkennung noch vorhandener Mängel und zur Verbesserung der Qualität und der Zuverlässigkeit solcher Geräte geleistet werden. Seit Januar 1994 steht eine neue Anlage von 60kWp für Tests auch an grösseren Wechselrichtern zur Verfügung.

## 2. Aufbau der Testanlage

Der Solargenerator der alten Anlage bestand aus 54 an einer Fassade montierten Siemens-Modulen M55 ( $P_{max} = 2970Wp$ ). Durch einfaches Umstecken im Innenanschlusskasten liess sich die Generatorspannung an jeden Wechselrichtertyp anpassen. Um richtige Messergebnisse zu erhalten, waren aufwendige Massnahmen zum Schutz vor Ueberspannungen und vor von den Wechselrichtern erzeugten hochfrequenten Störspannungen nötig. Der Solargenerator der analog konzipierten neuen Anlage besteht aus 60 verschiedenen Arrays aus insgesamt 1056 Modulen M55HO. Die wichtigsten Anlageparameter werden jede Sekunde von einem PC online erfasst. Im Normalfall werden aus den erfassten Messwerten Minutenmittelwerte gebildet. Beim Auftreten einer Störung wird jeweils ein sogenanntes "Errorfile" abgelegt, das alle Sekundenmittelwerte während mindestens einer Minute vor und nach dem Auftreten einer Störung umfasst. Bild 1 zeigt das Blockscheema der alten 3kW-Testanlage und der dazugehörigen Datenerfassung.

Da bereits kurz nach Beginn der Arbeiten nachgewiesen werden konnte, dass Rundsteuersignale den ordnungsgemässen Wechselrichterbetrieb stören und sogar Hardwaredefekte auslösen können [1, 2, 5, 7, 9, 10, 12], wurde die Anlage durch eine Rundsteuersignal-Empfangsschaltung ergänzt, mit der alle am Ort der Anlage auftretenden Rundsteuersignale untersucht werden können. Um die Rundsteuersignal-Empfindlichkeit nicht nur bei den am Ort der Anlage zufällig vorhandenen Frequenzen, sondern systematisch und reproduzierbar testen zu können, wurde 1991 ein Rundsteuersignalgenerator mit variabler Frequenz und Spannung entwickelt. Damit kann ein Gerät bei verschiedenen Netzspannungen gezielt mit Rundsteuersignalen mit unterschiedlichen Signalpegeln und Frequenzen getestet werden, ohne dass das Netz dadurch beeinflusst wird. Alle seither untersuchten Wechselrichter wurden mit diesem Rundsteuersignalgenerator eingehend auf ihre Rundsteuersignal-Empfindlichkeit getestet.



**Bild 1: Blockschemata der alten 3kW-PV-Anlage (inklusive Datenerfassung)**

### 3. Ergebnisse der Wechselrichtertests

Im Jahre 1989 wurde der Wechselrichter SI-3000, im Jahre 1990 der SOLCON getestet. 1991 wurde neben dem SOLCON auch der PV-WR-1500, der EGIR 10 und der ECOVERTER 1000 untersucht. 1992 wurde der PV-WR-1800, eine verbesserte Version des ECOVERTER 1000, der TOP CLASS 1500 und TOP CLASS 3000 sowie der Prototyp einer verbesserten SOLCON-Version (SOLCON 3400) getestet. Im Jahre 1993 erfolgte der Umzug des Photovoltaiklabors in den Neubau der Abteilung Elektrotechnik und der Aufbau der neuen 60kW-Photovoltaik-Testanlage.

#### Wichtigste bei den Tests festgestellte Probleme:

- **Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV):**  
Unzulässig hohe Funkstörspannungen auf DC- und AC-Anschlussleitungen.
- **Ungenügende Immunität gegen Rundsteuersignale (RSS):**  
Sporadische Funktionsstörungen, ja sogar Hardwaredefekte infolge RSS.
- **Oberschwingungen:**  
Zu hohe Oberschwingungsströme auf der Netzseite (auch nur sporadisch).
- **Spannungsanhebung / Netzimpedanz:**  
Störungen / Defekte wegen der AC-seitigen Spannungsanhebung im Betrieb.
- **Sporadische Maximum-Power-Tracking-Probleme:**  
Gelegentlicher Betrieb ausserhalb des Punktes maximaler Leistung (MPP).
- **Selbstlauf nach Netzausfall (vor allem bei Neuentwicklungen)**

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Testergebnisse (Endstand, d.h. nach eventuellen Modifikationen durch den Hersteller). Der in dieser Tabelle angegebene europäische Wirkungsgrad wurde aus den Teillastwirkungsgraden nach folgender Formel berechnet (Index = Prozentuale Belastung bezogen auf Vollast):

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

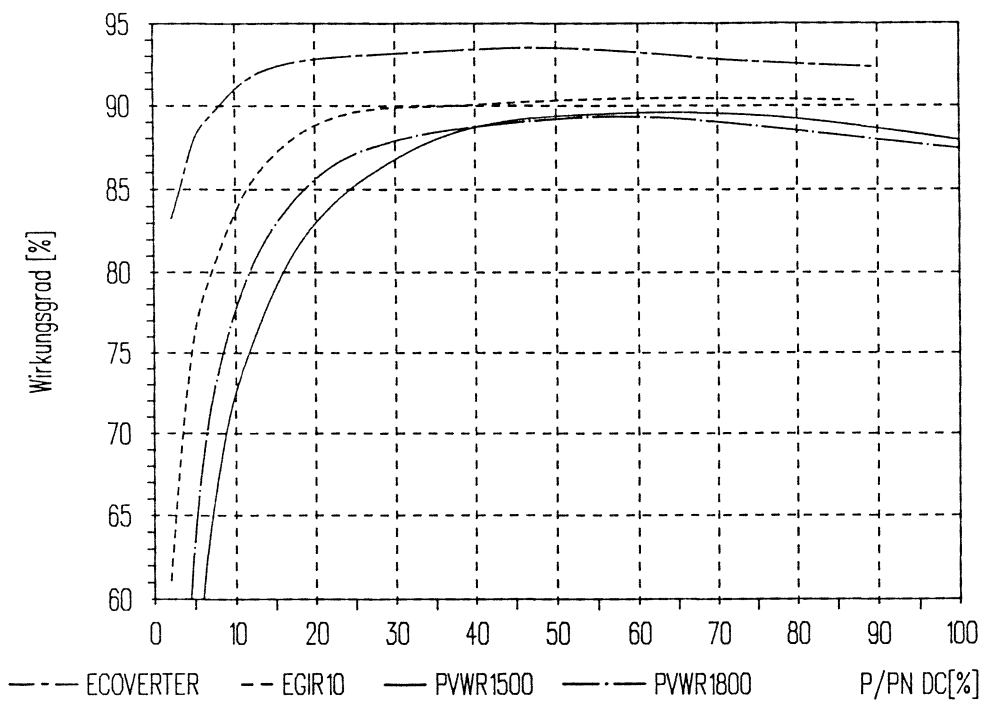
| Typ            | S <sub>N</sub><br>[VA] | U <sub>DC</sub><br>[V] | Ein-schalt-leistung<br>[W <sub>DC</sub> ] | Trans-formator | Europäischer Wirkungsgrad [%] | Prinzip: s: selbst-geführt n: netz-geführt | Strom-oberwellen (<2kHz) | EMV AC | EMV DC | Empfindlichkeit auf Rundsteuer-signale | Ge-räusch |
|----------------|------------------------|------------------------|---|----------------|-------------------------------|--|--------------------------|--------|--------|--|-----------|
| 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

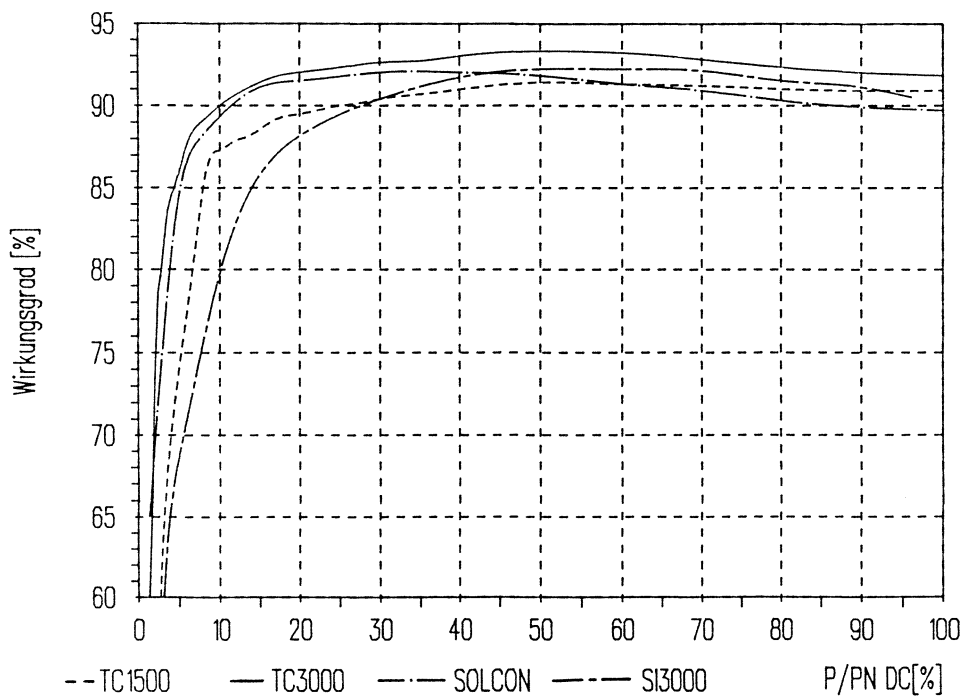
- mangelhaft, Norm nicht erfüllt  
-- ungenügend, Norm bei weitem nicht erfüllt  
(mod) nach Modifikation

**Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse der ISB-Tests .**

Auf den folgenden Seiten sind exemplarisch weitere interessante Eigenschaften der getesteten Wechselrichter angegeben. Bild 2 und 3 zeigen den auf die Nennleistung bezogenen Wirkungsgrad. Wie Bild 4 zeigt, waren die ersten Wechselrichter eigentliche Störsender und verursachten teils massive Störungen des Radioempfangs. Bild 5 zeigt die wesentlich verbesserten Werte bei einem neueren Gerät. Bild 6 zeigt einen Wechselrichterausfall mit Hardwaredefekt bei einer 9kW-Anlage in Interlaken mit 4 PV-WR-1800 im Master-Slave-Betrieb, dessen Ursache infolge der beschränkten Anzahl Messgrößen nicht genau bestimmt werden konnte. Bild 7 zeigt einen durch ein Rundsteuersignal um 12:00 (bei relativ hoher Netzspannung) verursachten Ausfall mit Hardwaredefekt bei einem alten SOLCON. Bild 8 zeigt die mit dem Rundsteuersignalgenerator gemessene Empfindlichkeit des PV-WR1800 auf Rundsteuer-signale. Wie bei den meisten Geräten ist die Empfindlichkeit bei tiefen Frequenzen grösser als bei hohen Frequenzen. Bild 9 zeigt eine weitere, systemtechnisch sehr erwünschte Eigenschaft neuerer Wechselrichter: Bei zu grossem DC-seitigem Leistungsangebot (z.B. wegen leicht überdimensioniertem Solargenerator oder "Cloud-Enhancement") schaltet das Gerät nicht ab, sondern regelt auf seine wechselstrom-seitige Nennleistung zurück (PV-WR-1500 und 1800 sowie TOP CLASS 1500 und 3000). Selbstgeführte Wechselrichter neigen nach einem Netzausfall beim Betrieb mit angepasster Last zu Selbstlauf. Bild 10 zeigt die für diese Tests verwendete Testschaltung, Bild 11 das Weiterlaufen des Wechselrichters nach dem Netzausfall.



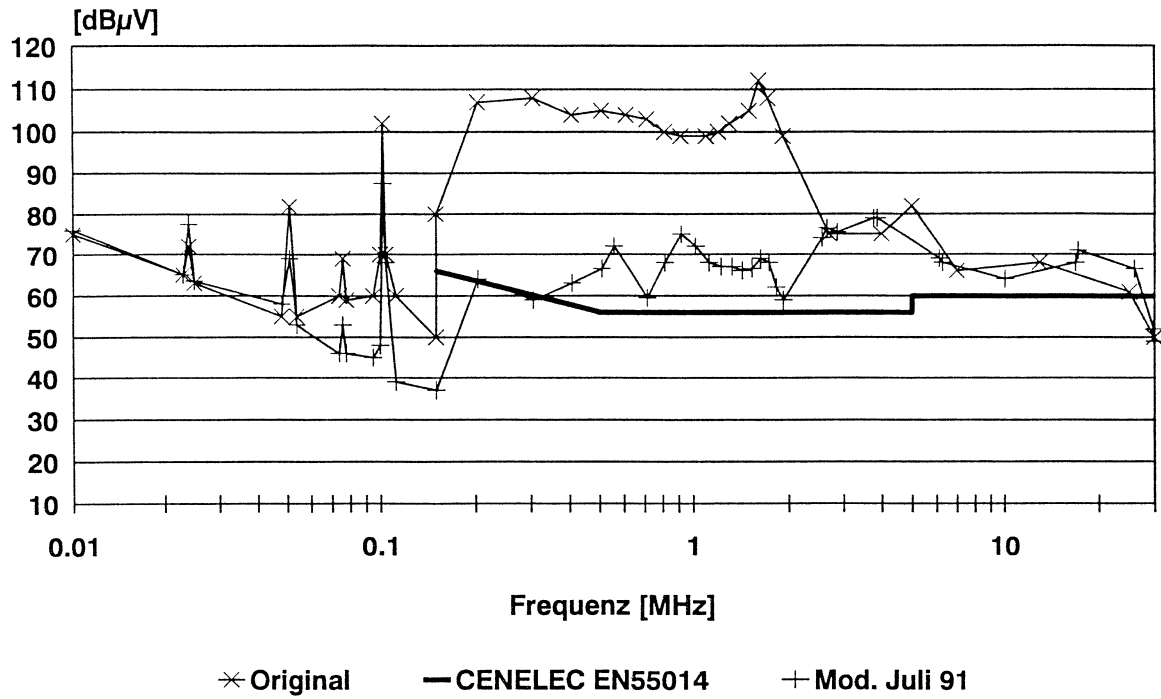
**Bild 2:** Wirkungsgrad in Funktion der normierten (auf Nennleistung bezogenen) Gleichstromleistung (ECOVERTER 1000: 1kW, PV-WR-1500 und EGIR 10: 1,5kW, PV-WR1800: 1,8kW).



**Bild 3:** Wirkungsgrad in Funktion der normierten (auf Nennleistung bezogenen) Gleichstromleistung (TOP CLASS 1500: 1,5kW, SI-3000, SOLCON und TOP CLASS 3000: 3kW).

# Funkstörgrad SOLCON 3000

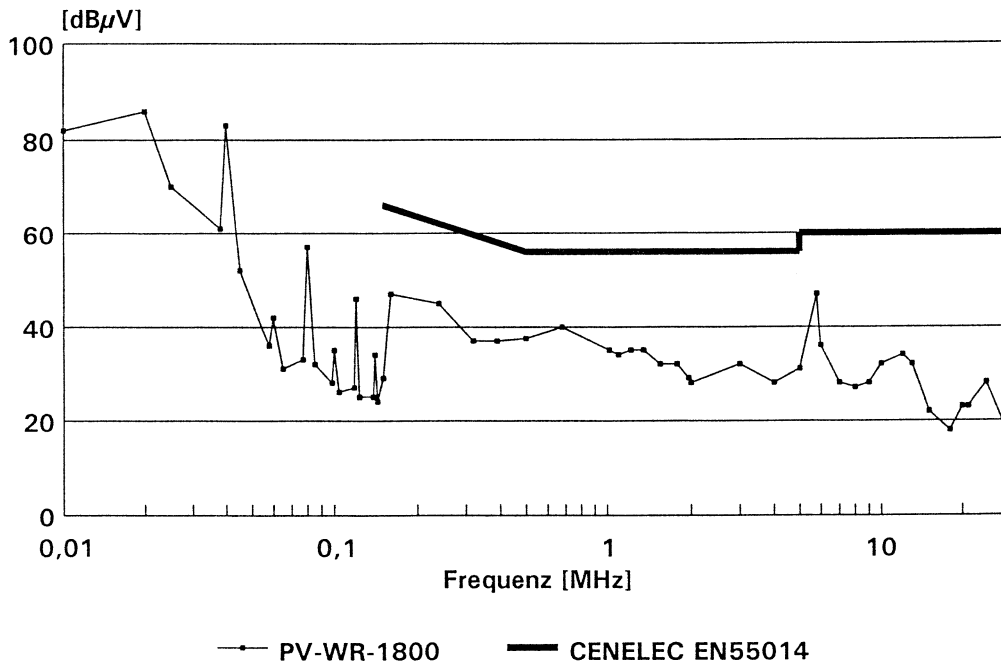
CISPR-Messung, AC-Seite, Pac=1.8kW



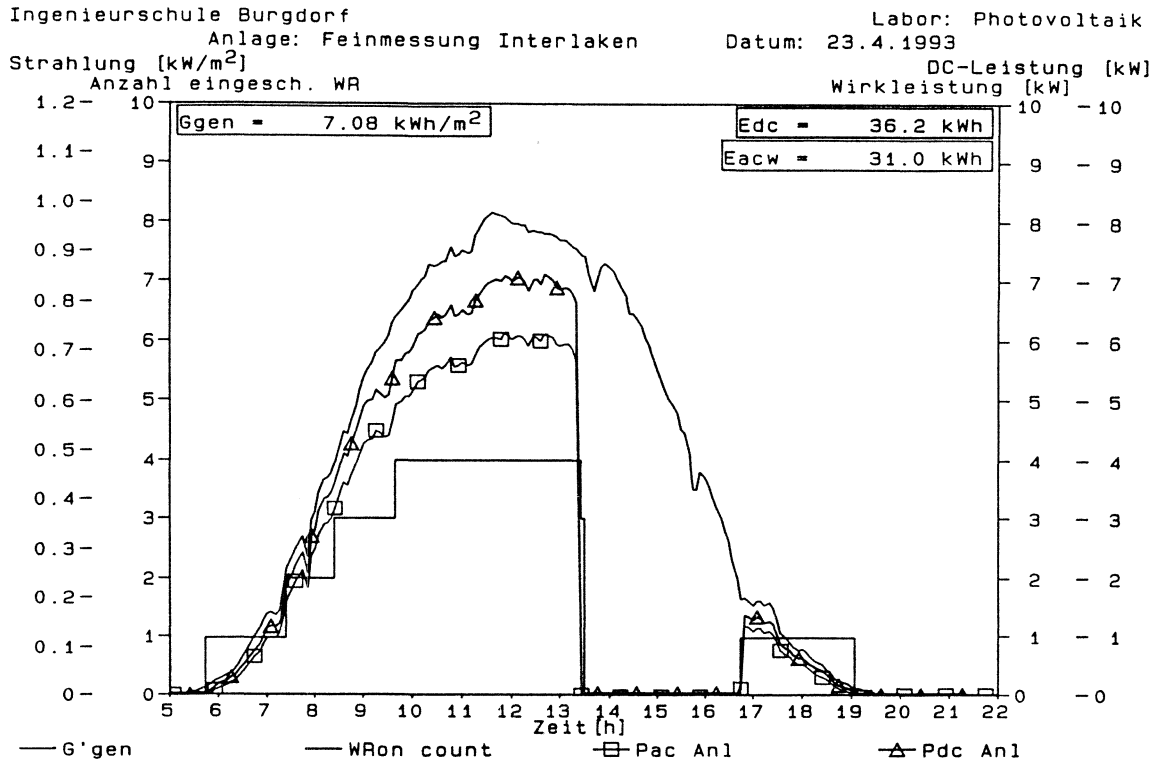
**Bild 4:** Funkstörspannungen des alten SOLCON 3000 auf der Wechselstromseite vor und nach der Modifikation von Juli 1991.

# Funkstörgrad PV-WR-1800

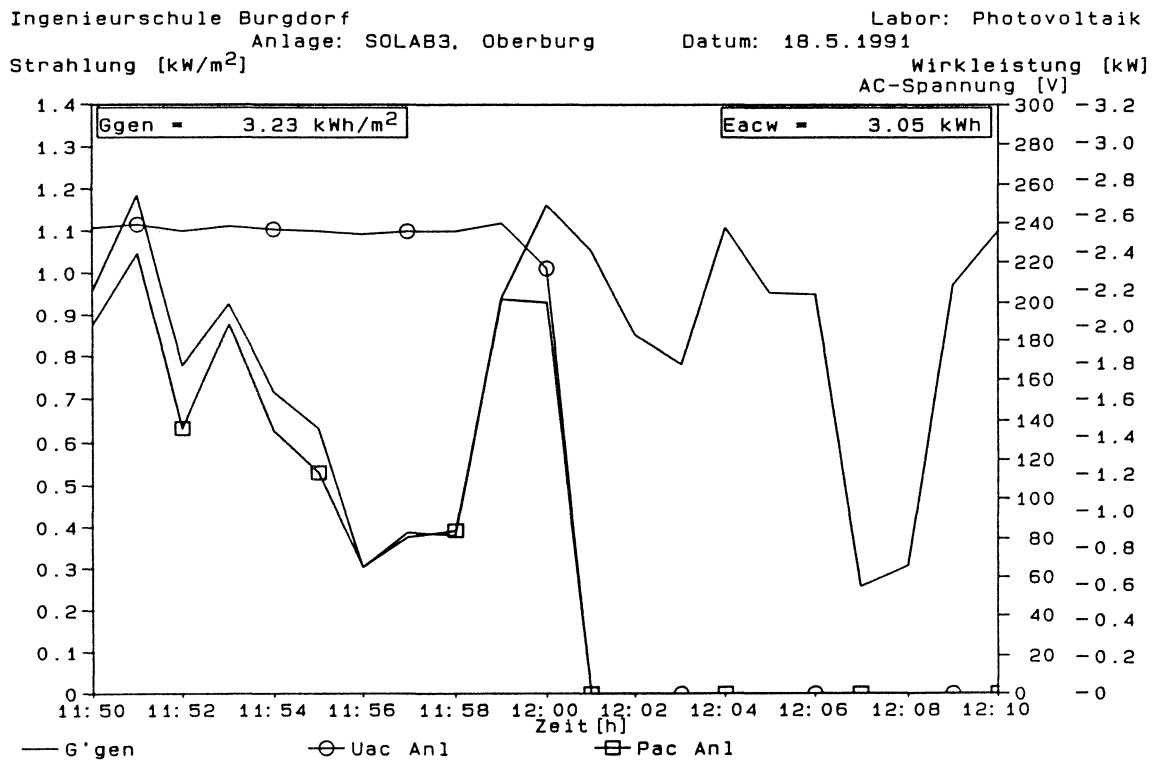
CISPR-Messung, AC-Seite, Pac = 150W



**Bild 5:** Funkstörspannungen des PV-WR-1800 auf der Wechselstromseite

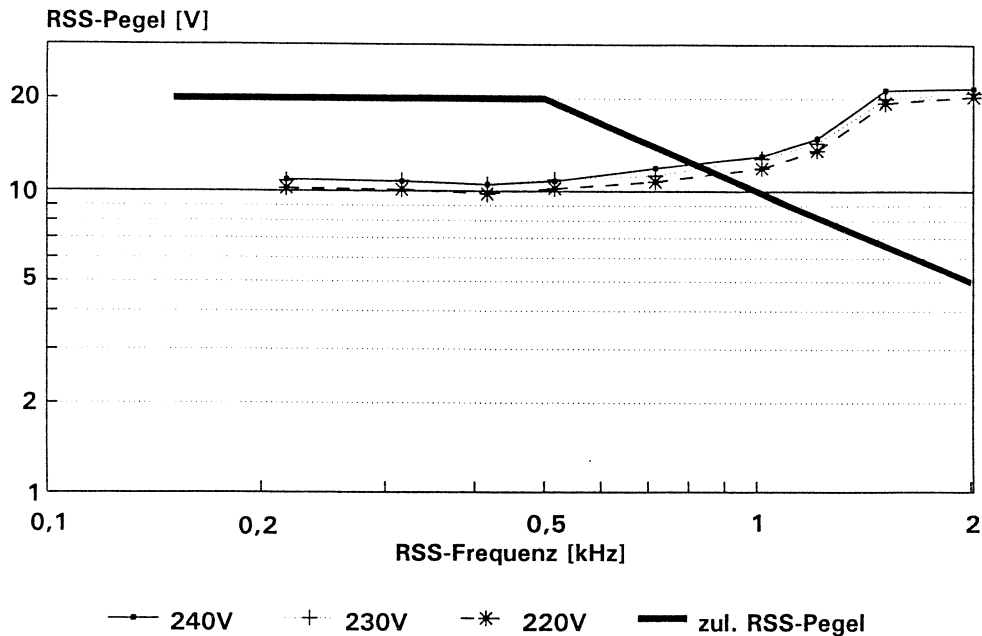


**Bild 6: Wechselrichterausfall mit Hardware-Defekt bei einer 9kW-Anlage mit 4 PV-WR-1800 in Master-Slave-Konfiguration am 23.4.93.**

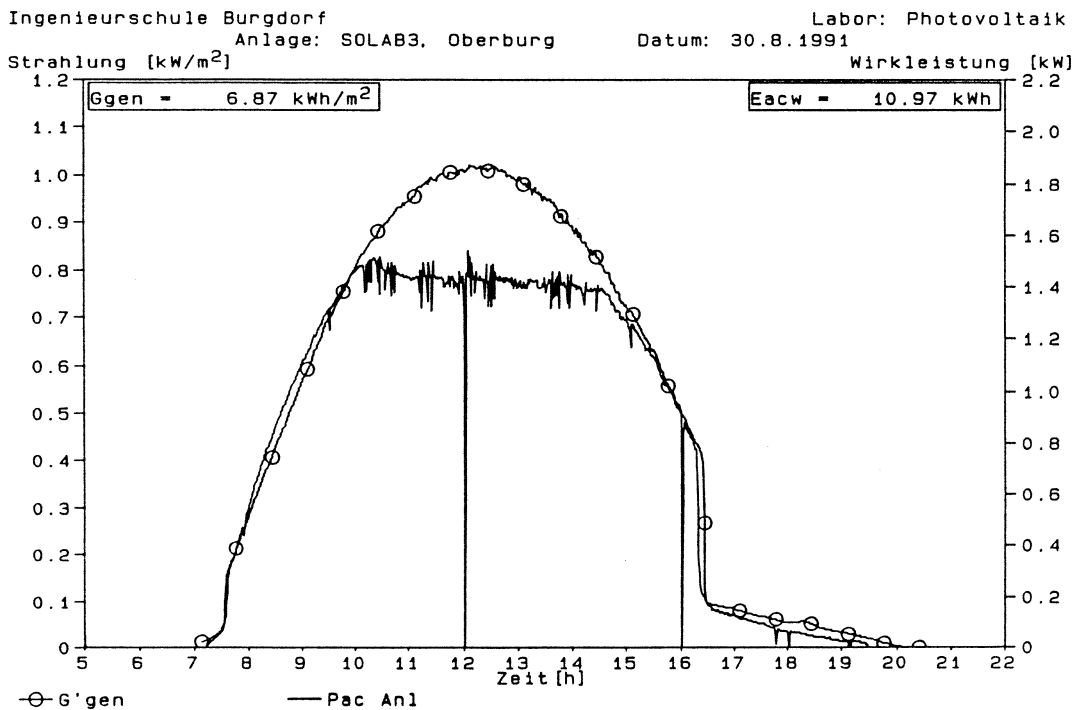


**Bild 7: SOLCON-Ausfall mit Hardwaredefekt am 18.5.91 durch hohe 50Hz-Spannung und Rundsteuersignal mit  $f = 317\text{Hz}$ .**

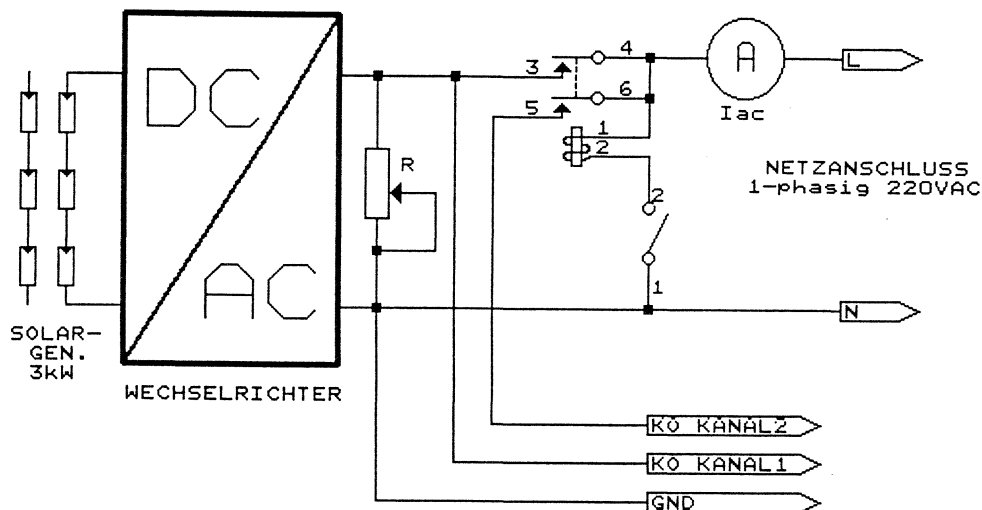
**Empfindlichkeit des PV-WR-1800  
auf Rundsteuersignale,  $P_{ac} = 350W$**



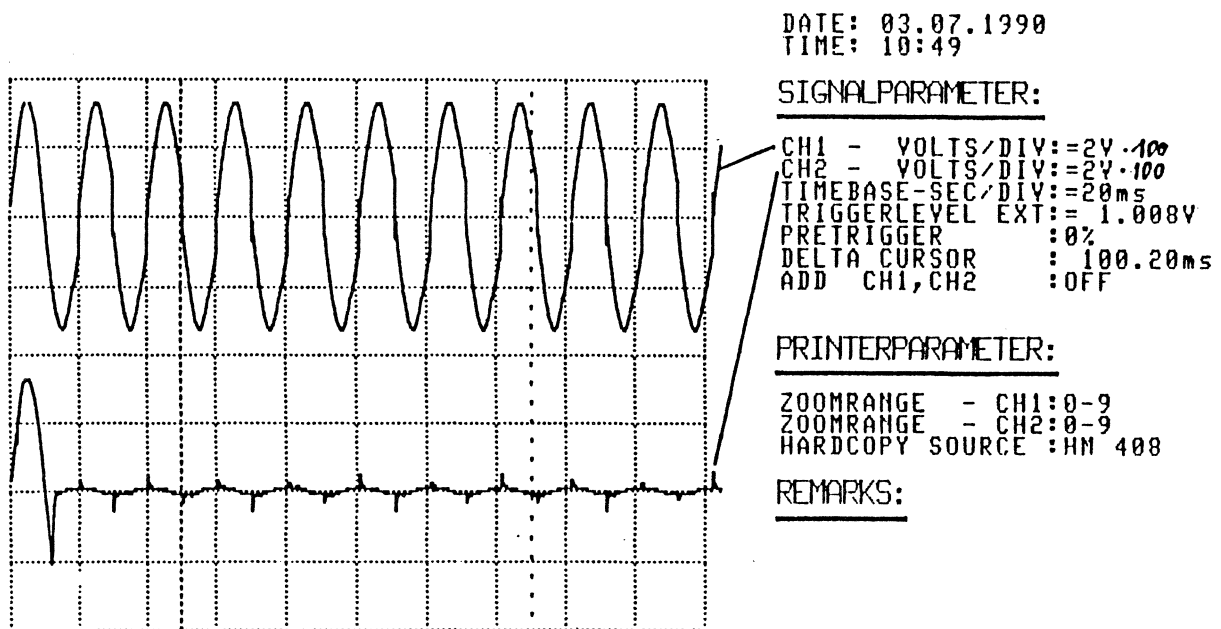
**Bild 8: Rundsteuersignalempfindlichkeit des PV-WR-1800 (kurzzeitige Ausfälle ohne Hardwaredefekt bei höheren Signalpegeln).**



**Bild 9: Leistungsbegrenzung auf AC-seitige Nennleistung bei zu grossem Leistungsangebot auf der DC-Seite bei einem PV-WR-1500 an einem Solargenerator mit  $P_{max} = 2970Wp$  bei STC. Der PV-WR1800, TOP CLASS 1500 und 3000 verhalten sich analog.**



**Bild 10:** Testschaltung zur Provokation des Selbstlaufs bei einphasigen selbstgeführten Wechselrichtern. R wird so eingestellt, dass  $I_{ac}$  minimal wird, darauf wird die Verbindung zum Netz unterbrochen.



**Bild 11:** Selbstlauf nach Netzausfall bei einer frühen SOLCON-Version. Analoges Verhalten zeigten die ersten SI-3000 und beide Geräte von TOP CLASS. Durch eine Softwaremodifikation konnte das Problem bei allen Wechselrichtern behoben werden. Damit beim PV-WR-1500 und 1800 kein Selbstlauf auftritt, müssen diese (einphasigen) Geräte *dreiphasig* angeschlossen werden.



## 4. Ausblick

Die neue 60kWp-Photovoltaikanlage, die gegenwärtig in Betrieb genommen wird, wird die Weiterführung der bisherigen praxisorientierten Arbeiten der ISB auf dem Gebiet der Photovoltaik und speziell die Untersuchung auch grösserer dreiphasiger Wechselrichter ermöglichen. Im Rahmen eines neuen Projektes werden die beiden 20kW-Wechselrichter SOLARMAX 20 und ECOPOWER 20 getestet werden. Daneben ist im Rahmen der vorhandenen Möglichkeiten auch die Untersuchung weiterer ein- und dreiphasiger Wechselrichter vorgesehen. Bis in einem Jahr dürften weitere interessante Ergebnisse vorliegen.

Neben den Untersuchungen an Photovoltaik-Wechselrichtern werden am ISB-Photovoltaiklabor Arbeiten auf folgenden Gebieten durchgeführt:

- Feinmessungen an netzgekoppelten PV-Anlagen im Kanton Bern, speziell an der ISB-Aussenstation von 1,15kWp auf dem Jungfrauoch (3454m), der höchstgelegenen netzgekoppelten Photovoltaikanlage der Welt.
- Untersuchungen zum Blitz- und Ueberspannungsschutz von PV-Anlagen
- Schutz- und Sicherheitstechnik bei Photovoltaikanlagen

## Verdankungen

Ein grosser Teil der Arbeiten der ISB auf dem Gebiet der Photovoltaik wurde im Rahmen mehrerer Aufträge des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) durchgeführt. Die Aktivitäten der ISB auf dem Gebiet der Photovoltaik wurden auch durch die Industriellen Betriebe Burgdorf (IBB), die Bernische Kraftwerke AG (BKW) sowie das Elektrizitätswerk der Stadt Bern (EWB) unterstützt. All diesen Institutionen, die unsere Arbeiten durch ihre Zuwendungen ermöglicht haben, sei herzlich gedankt.

## Literatur

- [1] H. Häberlin: "Photovoltaik - Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz". AT-Verlag, Aarau, 1991, ISBN 3-85502-434-0.
- [2] H. Häberlin, H.R. Röthlisberger: "Neue Photovoltaik-Wechselrichter im Test". SEV-Bulletin 10/93.
- [3] H. Häberlin und R. Minkner: "Blitzschläge - eine Gefahr für Solarmodule?". SEV-Bulletin 1/93.
- [4] H. Häberlin: "Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen in Tourismusregionen". Elektroniker 11/92.
- [5] H. Häberlin and H.R. Röthlisberger: "PV-Inverters for Grid-Connection - Results of Extended Tests". Proc. 11th EC-PV-conf., Montreux 1992.
- [6] H. Häberlin and R. Minkner: "Tests of Lightning Withstand Capability and Measurements of Induced Voltages at a Model of a PV-System with ZnO-Surge-Arresters". Proc. 11th EC-PV-conf., Montreux, 1992.
- [7] H. Häberlin: "Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen - Normen, Vorschriften, Testergebnisse, Probleme, Lösungsmöglichkeiten". Elektroniker 6/92 und 7/92.
- [8] H. Häberlin: "Fotovoltaik in der Schweiz". Elektroniker 5/91 und 6/91.
- [9] H. Häberlin: "Zwei Wechselrichter im Test". Sonnenenergie 4/90.
- [10] H. Häberlin, H.P. Nyffeler und D. Renevey: "Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen im Vergleichstest". SEV-Bulletin 10/90.
- [11] H. Häberlin: "Praktische Fotovoltaik". Elektroniker 3/89.
- [12] H. Häberlin und H.R. Röthlisberger: "Vergleichsmessungen an Photovoltaik-Wechselrichtern". Schlussbericht BEW-Projekt EF-REN(89)045. Erhältlich bei ENET, c/o BEW, CH-3003 Bern.