

## Entwicklung der Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen 1989-2000

Prof. Dr. H. Häberlin

Bernere Fachhochschule, Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Burgdorf

Labor für Photovoltaik, Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ

Tel: +41 34 426 68 11, Fax: +41 34 426 68 13 , e-mail heinrich.haeberlin@hti.bfh.ch

### 1. Einführung

Die HTA Burgdorf (vormals ISB) führt seit 1988 Tests von Wechselrichtern für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen im Leistungsbereich 0,1kW bis 20kW durch. Spezielles Gewicht wird dabei auf Geräte gelegt, die von Herstellern aus der Schweiz stammen oder auf Geräte, welche in der Schweiz vermutlich eine bedeutende Marktpräsenz aufweisen werden. Bei allen Wechselrichtern wurden DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad, Oberschwingungsströme, EMV-Verhalten, Selbstlauf, Rundsteuersignalempfindlichkeit, Einschaltleistung, Nennspannungsbereich und Betrieb bei Leistungsüberangebot untersucht. Im Rahmen mehrerer Langzeit-Messprojekte registriert die HTA Burgdorf zudem seit vielen Jahren den Energieertrag und die Zuverlässigkeit von über 40 PV-Anlagen mit etwas älteren, bereits früher (1990 – 1995) getesteten Wechselrichtern.

Die seit 1993 in Betrieb stehende Testanlage von 60kWp wurde in den letzten Jahren weiter ausgebaut. Es stehen nun auch einige Solargenerator-Simulatoren mit  $U_{OC} \leq 750V$ ,  $I_{SC} \leq 25A$  und  $P_{max} \leq 25kW$  zur Verfügung. Damit können Tests von Wechselrichtern in Zukunft viel rascher durchgeführt werden. Ferner wurde eine Netznachbildung für EMV-Messungen auf der DC-Seite entwickelt und ein Teststand für Inselwechselrichter bis 3,5 kW aufgebaut.

Im ersten Teil dieses Beitrags wird auf Grund der umfangreichen Datenbasis über die durchgeführten Tests eine kurze Übersicht über die beobachtete technische Entwicklung gegeben. Im zweiten Teil werden dann noch einzelne interessante Testergebnisse über neuere Wechselrichter angegeben.

### 2. Entwicklung der Wechselrichterkonzepte

In den ersten Jahren wurden ausschliesslich Wechselrichter mit Leistungen ab etwa 1,5 kW hergestellt, welche eine ausgedehnte, relativ aufwendige Gleichstromverkabelung erforderten (aus mehreren parallelen Strängen mit jeweils mehreren Modulen in Serie). Besonders dreiphasige Wechselrichter wurden oft noch als netzgeführte Thyristorwechselrichter ausgeführt. Bei den kleineren einphasigen Wechselrichtern wurden von mehreren Herstellern nach dem Vorbild des SI-3000 zunächst selbstgeführte Geräte mit Pulsbreitenmodulation und galvanischer Trennung mittels HF-Trafo gebaut. Da das verwendete Konzept relativ viele Bauteile erforderte, vermochte die Zuverlässigkeit dieser Geräte aber oft nicht zu befriedigen. Neuere Konzepte verwenden deshalb wieder NF-Trafos. Bald erschienen auch selbstgeführte dreiphasige Wechselrichter mit Pulsbreitenmodulation, welche ein besseres Oberschwingungsverhalten zeigten.

Um den Aufwand für die DC-seitige Verkabelung zu senken, erschienen nach einigen Jahren sogenannte String-Wechselrichter, welche nur noch für einen Strang aus mehreren Modulen in Serie ausgelegt waren. Die logische Weiterentwicklung dieser Idee war schliesslich der Modulwechselrichter, der im Prinzip nur noch für ein mittleres oder grösseres Modul ausgelegt ist, so dass keine Gleichstromverkabelung mehr nötig ist.

Seit einigen Jahren werden auch trafolose (String-) Wechselrichter von 1 – 4 kW hergestellt. Sie arbeiten auf der Gleichstromseite mit hohen Gleichspannungen, welchen oft auch einen Teil der Netzspannung überlagert ist. Dadurch gelingt es, den Wirkungsgrad nochmals um etwa 2% zu steigern.

### 3. Wichtigste Testergebnisse

In Tabelle 1 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):

$$h = 0.03h_5 + 0.06h_{10} + 0.13h_{20} + 0.1h_{30} + 0.48h_{50} + 0.2h_{100}$$

#### 3.1 Wirkungsgrad

Generell zeigte sich, dass die getesteten Netzwechselrichter im Laufe der Zeit deutliche Fortschritte gemacht haben. Während der europäische Wirkungsgrad von Wechselrichtern von 1,5kW bis 3,3kW aus den Jahren 1988 bis 1990 im Bereich 85,5 - 90% lag, stieg er Mitte der 90-er Jahre auf Werte von 90 - 92% für Geräte mit galvanischer Trennung DC-AC. Mittlere und grössere Wechselrichter ohne galvanische Trennung erreichen gar Werte im Bereich 92,5 – 94,4% .

Auch bei den seit 1995 aufgekommenen Modulwechselrichtern (100 - 200W) liegt der europäische Wirkungsgrad aller getesteten Geräte (trotz zum Teil kleiner Nennleistung) über 90%, bei den trafo-

losen Geräten gar zwischen 92,5% und 94,4%. Bei den traflosen Geräten wurden Spitzenwirkungsgrade zwischen 93,3% und 95,4% erreicht. Der Wirkungsgrad ist bei manchen Geräten von der Betriebsspannung abhängig. Der Solarmax DC30+ mit galvanischer Trennung hat gegenüber Vorgängermodellen einen um gut 1,5% höheren Wirkungsgrad dank einer etwas höheren Betriebsspannung.

Typ	Test-Jahr	S <sub>N</sub> [kVA]	U <sub>DC</sub> (typ) [V]	Europ. η [%]	Trafo	Strom-Harm. (0.1-2kHz)	EMV AC	EMV DC	RSS- Empf.	Insel- Betr.
SI-3000	89	3.0	48	90	HF	0	-	-	0 <sup>3)</sup>	-/++ <sup>3)</sup>
SOLCON	90/91	3.3	96	90	HF	+	- <sup>1)</sup>	--	+ <sup>3)</sup>	-/++ <sup>3)</sup>
EGIR 10	91	1.7	165	89	NF	-	-	-	n.t.	n.t.
PV-WR-1500	91	1.5	96	85.5	HF	++	0	-	0	++ <sup>5)</sup>
ECOVERTER	91/92	1.0	64	92	HF	++	0	0	+	++
PV-WR-1800	92	1.8	96	86.5	HF	+	++	0	0	++ <sup>5)</sup>
TCG 1500	92	1.5	64	89.5	NF	+	+ <sup>1)</sup>	0 <sup>1)</sup>	++	-/++ <sup>3)</sup>
TCG 3000	92	3.0	64	91.5	NF	0	+ <sup>1)</sup>	0 <sup>1)</sup>	++	-/++ <sup>3)</sup>
EcoPower20 *	94/95	20	760	92.6	NF <sup>6)</sup>	0	0/+ <sup>1)</sup>	++	++	0
Solcon3400	94/95	3.4	96	91.9	HF	0	0/+ <sup>1)</sup>	0	+	++
NEG 1600	95	1.5	96	90.4	NF	+	++	0	++	++
SolarMax S	95/98	3.3	550	91.7	ohne <sup>6)</sup>	+	-/+ <sup>7) 8)</sup>	+	++	0/++ <sup>3)</sup>
SolarMax20 *	95	20	560	89.4	NF	0	+	-/0 <sup>1)</sup>	++	++
TCG II 2500/4	95	2.2	64	91.9	NF	0	+	0	++	++
TCG II 2500/6	95	2.2	96	90.4	NF	0	+	-	++	++
TCG II 4000/6	95	3.3	96	90.2	NF	0	0/+ <sup>2) 8)</sup>	-/++ <sup>2)</sup>	++	++
Edisun 200	95/96	0.18	64	90.7	HF <sup>6)</sup>	++	++	0 <sup>4)</sup>	++	++
SPN 1000	95/96	1.0	64	89.8	NF	+	+	++	0	++
Sunrise 2000	96	2.0	160	89.3	NF	0	++	+	0	++
SWR 700	96	0.7	160	90.8	NF	0	0 <sup>8)</sup>	++	+	++
TCG III 2500/6	96	2.25	96	91.5	NF	+	+ <sup>8)</sup>	++	++	++
TCG III 4000	96	3.5	96	91.9	NF	+	+ <sup>8)</sup>	++	++	++
Top Class	98/99	1.35	180	90.6	NF	++	+ <sup>8)</sup>	++	++	++
OK4E-100	98/99	0.1	32	90.3	HF	++	+	- - <sup>4)</sup>	++	0
Solcolino	99/00	0.2	64	90.6	HF <sup>6)</sup>	++	0	- - <sup>4)</sup>	++	++
Convert 4000	99/00	3.8	550	92.5	ohne <sup>6)</sup>	++	+ <sup>8)</sup>	++	++	++
SWR1500	99/00	1.5	400	94.4	ohne <sup>6)</sup>	++	+ <sup>8)</sup>	++	++	++

++ Sehr gut, Grenzwerte weit unterschritten + gut, Grenzwerte eingehalten 0 genügend, Grenzwerte beinahe eingehalten - ungenügend, Grenzwerte überschritten -- schlecht, Grenzwerte massiv überschritten n.t. nicht getestet * 3 phasiges Gerät	1) nach Modifikation durch HTA Burqdorf 2) mit optionaler DC-Ringkerndrossel 3) mit neuer Steuersoftware 4) genügt für Modul-WR (kleine Modulverdrahtung) 5) nur mit 3-phasigem Anschluss 6) ohne galvanische Trennung DC-AC 7) neues, verbessertes Modell 8) leichte Grenzwertüberschreitung < 300kHz
---	---

**Tabelle 1:** Überblick über die wichtigsten Daten und Testresultate der an der HTA Burgdorf von 1989 bis 2000 getesteten Netzwechselrichter.

### 3.2 Oberschwingungen

Mit Ausnahme des EGIR 10 waren alle getesteten Wechselrichter selbstgeführt mit hochfrequenter Pulsbreitenmodulation. Deshalb liegen die Oberschwingungsströme meist unter den Grenzwerten der anwendbaren Normen (EN61000-3-2 resp. IEC 1000-3-4). Im praktischen Betrieb sollten deshalb in der Regel keine Probleme mit Oberschwingungen auftreten, wenn die Netzimpedanz nicht ungewöhnlich hoch ist.

Bei vielen parallel geschalteten String- und Modulwechselrichtern genügt die Einhaltung der EN61000-3-2 durch jeden Wechselrichter nicht, um das Auftreten von Oberschwingungsproblemen sicher auszuschliessen. In diesem Fall sollte die gesamte Anlage (n Wechselrichter parallel) die entsprechenden Grenzwerte einhalten!

### 3.3 Selbstlauf

Während bei den ersten Geräten beim Selbstlauffest nach den aktuellen Schweizer Vorschriften (Betrieb mit angepasster Last) [1, 2] oft noch Selbstlauf festgestellt werden konnte, tritt bei neueren Wechselrichtern meist kein Selbstlauf mehr auf, d.h. die Hersteller haben das Problem weitgehend (mit und ohne ENS) im Griff.

### 3.4 Empfindlichkeit gegen Rundsteuersignale (RSS)

Während bei den ersten Wechselrichtern ein zu einem ungünstigen Zeitpunkt auftretendes, starkes Rundsteuersignal (RSS) unter Umständen einen Hardwaredefekt verursachen konnte, scheint das Problem bei neueren Geräten gelöst zu sein. Seit 1991 werden alle Wechselrichter mit einem Rundsteuersignal-Simulator mit simulierten Rundsteuersignalen verschiedener Frequenzen getestet. Obwohl hohe Spannungen (bis zu 18V) verwendet wurden, traten höchstens kurzzeitige Abschaltungen, aber keine Wechselrichterdefekte mehr auf (vor allem bei Geräten mit ENS).

### 3.5 Elektromagnetische Verträglichkeit

In den Jahren 1989 bis 1991 waren viele Wechselrichter eigentliche Störsender (siehe Tabelle 1) und überschritten die massgebenden Grenzwerte um bis zu 50dB $\mu$ V. Zunächst setzte sich bei den Herstellern die Erkenntnis durch, dass die üblichen AC-seitigen Grenzwerte eingehalten werden müssen, was an den ab etwa 1992-1994 deutlich besseren Testresultaten zu erkennen ist. Probleme bereitet manchen Herstellern wegen der heute doch recht hohen PWM-Frequenzen von einigen 10kHz noch der Bereich 150kHz – 300kHz (vermutlich weniger aus technischen als aus wirtschaftlichen Gründen). In den letzten Jahren hat sich die Situation auch auf der DC-Seite wesentlich verbessert. Bei neueren Wechselrichtern liegen die HF-Störspannungen nun meist deutlich unter den massgebenden Normen (z.B. EN55014). Sie liegen sogar oft noch unter dem von der Projektgruppe des EU-Projektes PV-EMI (Partner: FhG/ISE, HTA Burgdorf, KEMA) für den Bereich über 500kHz vorgeschlagenen neuen Grenzwert von 64dB $\mu$ V (siehe Beitrag über „Netznachbildungen und EMV-Grenzwerte auf der Gleichstromseite von Photovoltaik-Anlagen“, ebenfalls in diesem Band). Bei Modulwechselrichtern ist auf Grund der geringeren Grösse des Solargenerators und der damit verbundenen kleineren Abstrahlung auf der Gleichstromseite nicht der gleiche Entstöraufwand erforderlich wie bei grösseren Geräten.

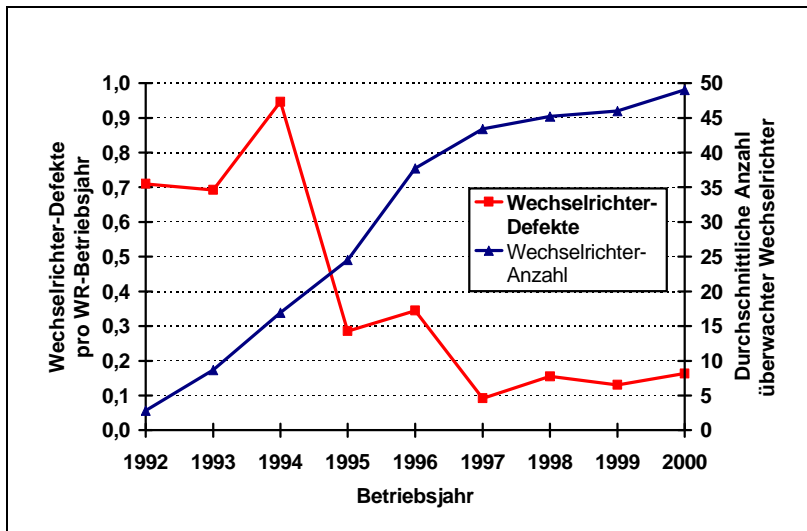
### 3.6 Maximum-Power-Point-Tracking

Sporadische Maximum-Power-Point-Tracking-Probleme treten häufig beim ersten von neuen Herstellern entwickelten Wechselrichtertyp auf. Ausser in offensichtlichen Fällen sind sie im Labor nur relativ schwer nachzuweisen, und es sind dazu aufwendige Einrichtungen (programmierbare Solargenerator-Simulatoren) nötig.

### 3.7 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit der in den Langzeit-Monitoring Projekten überwachten Wechselrichter entwickelt sich weiterhin zufriedenstellend (siehe Bild 1). Mittlerweile werden bei fast allen erfassten Geräten weniger als 0,3 Hardwaredefekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr registriert. In den letzten Jahren liegt der Mittelwert bei 0,1 - 0,15 Defekten pro Wechselrichter-Betriebsjahr. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die meisten dieser Geräte von erfahrenen Herstellern stammen.

Wegen des besonders in der BRD stark wachsenden PV-Marktes drängen aber auch neue Hersteller ohne die notwendige Erfahrung auf den Markt, deren Geräte unter Umständen nicht so ausgereift sind. Deshalb ist eine systematische Weiterführung der Tests von neuen Produkten sicher angezeigt. Auf Wunsch kann die HTA Burgdorf neue Wechselrichter vor der Markteinführung eingehend testen.



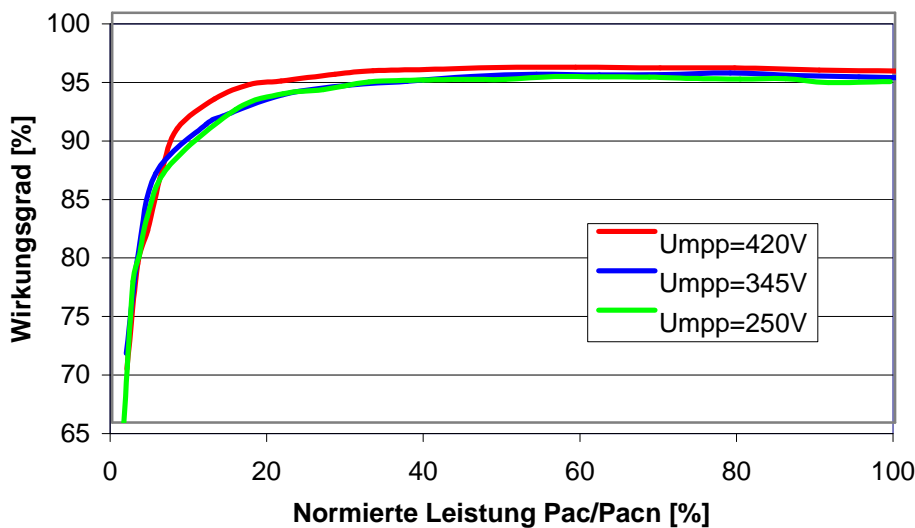
**Bild 1:**

Wechselrichter-Defekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr und durchschnittliche Anzahl von der HTA Burgdorf überwachter Wechselrichter. In den Jahren 1988 - 1991 traten oft 3-4 Defekte pro Jahr auf. Im Vergleich dazu ist die heutige Zuverlässigkeit um ca. Faktor 20, im Vergleich zu den Jahren 1992 – 1994 noch um etwa den Faktor 5 höher. Die Werte der ersten 9 Monate des Jahres 2000 wurden auf ein ganzes Jahr hochgerechnet.

#### 4. Einige interessante Testergebnisse von neueren Wechselrichtern

Der Wirkungsgrad von traflosen (String-) Wechselrichtern mit weitem Eingangsspannungsbereich ist abhängig von der Spannung. Die Art der Abhängigkeit ist je nach Wechselrichtertyp verschieden:

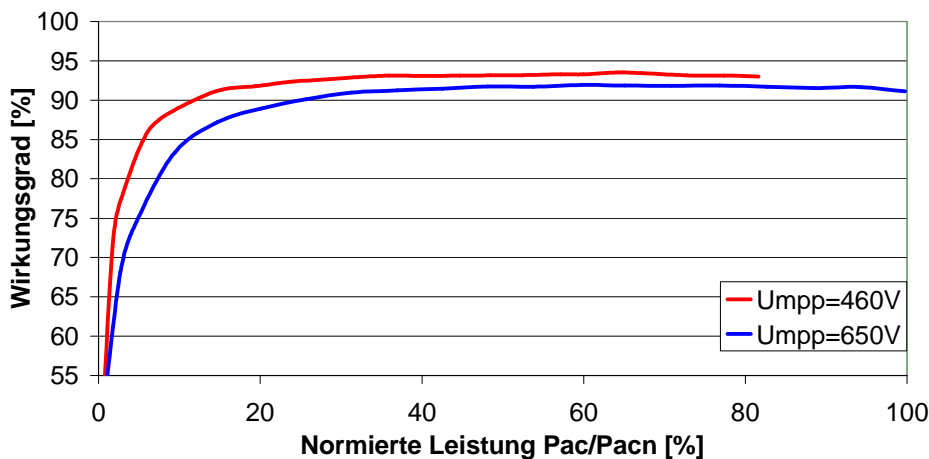
**SunnyBoy SWR1500 Wirkungsgradkennlinien**



**Bild 2:**

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung von 1.5kW<sub>AC</sub>) Wechselstromleistung des einphasigen, traflosen Wechselrichters SunnyBoy SWR 1500. Bei kleineren DC-Spannungen ist der Wirkungsgrad kleiner.

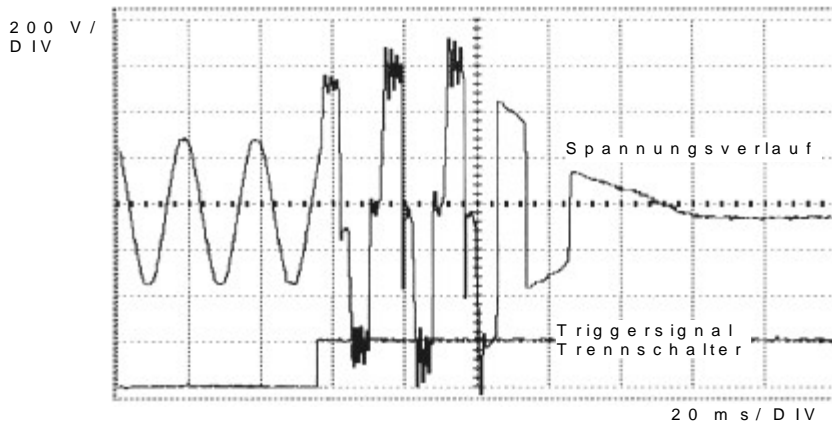
**Convert 4000 Wirkungsgradkennlinien**



**Bild 3:**

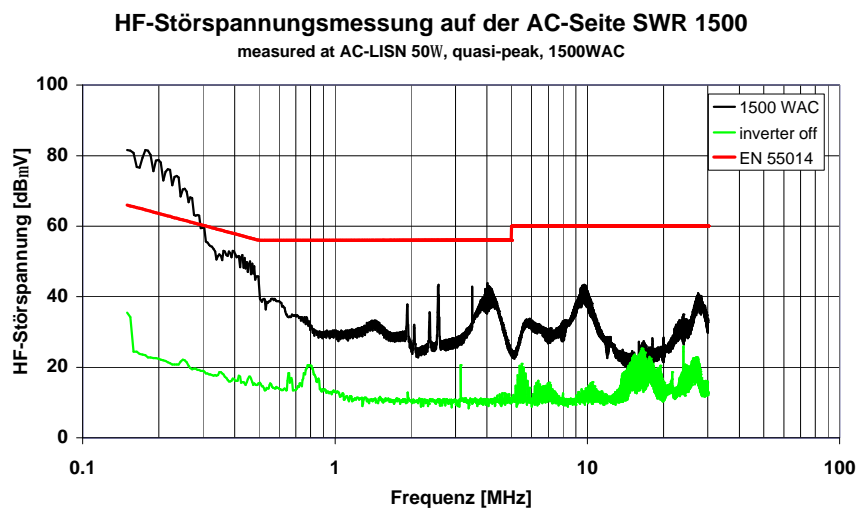
Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung 3.8kW<sub>AC</sub>) Wechselstromleistung des einphasigen, traflosen Wechselrichters Convert 4000. Bei höheren DC-Spannungen ist der Wirkungsgrad kleiner.

Bei Unterbruch der Verbindung zum Netz (ohne angepasste Last) kann bei einem SWR 700 während mehrerer Perioden eine Ausgangsspannung von bis zu 760V auftreten (siehe Bild 4). Das ist mehr als das 2,3-fache der normalen Amplitude. Sind parallel dazu Verbraucher kleiner Leistung angeschlossen, können sie durch solche Überspannungen zerstört werden. Beim SWR 1500, einem neueren Geräten des gleichen Herstellers, ist dieser Effekt deutlich weniger ausgeprägt. Auch andere Wechselrichter zeigen bei entsprechenden Versuchen oft ein ähnliches Verhalten, allerdings mit deutlich kleineren Amplituden (z.B. 400V).

**Bild 4:**

Spannungsverlauf des SWR 700 bei Leerlaufabschaltung. Die maximal auftretende Amplitude beträgt ca. 760V.

Bei einem SWR 1500 (aus Platzgründen nicht gezeigt) steigt die Amplitude bei einer analogen Abschaltung während drei Perioden noch auf etwa 500V.

**Bild 5:**

HF-Störspannungen, die ein SWR 1500 auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.

Die Grenzwerte werden für  $f < 300\text{kHz}$  etwas überschritten.

Viele andere moderne Wechselrichter (z.B. der Convert 4000, Top Class 4000 Grid III usw.) zeigen ein ähnliches Verhalten.

## Verdankungen

Der Autor dankt allen gegenwärtigen und ehemaligen Assistenten des PV-Labors, welche die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Messungen durchgeführt haben, für ihre wertvollen Beiträge. Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden vom Bundesamt für Energie finanziert. Die Aktivitäten der HTA Burgdorf auf dem Gebiet der Photovoltaik wurden auch von den IBB Burgdorf, dem PSEL und dem EWB unterstützt.

## Literatur

- [1] H. Häberlin, F. Käser, Ch. Liebi und Ch. Beutler: "Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests an Wechselrichtern für Netzverbundanlagen". Referate des 11. Symposiums Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein / BRD, 1996.
- [2] H. Häberlin: "Vergleichsmessungen an Photovoltaik-Wechselrichtern". Referate des 9. Symposiums Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein / BRD, 1994.
- [3] J. D. Graf und H. Häberlin: "Qualitätssicherung von Photovoltaikanlagen". Schlussbericht des BFE-Projektes DIS 2744 / 61703, ENET Nr. 200023. Erhältlich bei ENET, Egnacherstr. 69, CH-9320 Arbon

Informationen über weitere Aktivitäten des Photovoltaik-Labors der HTA Burgdorf und weitere Publikationen (teilweise online) sind unter <http://www.pvtest.ch> zu finden.