

# Netznachbildungen und Grenzwerte für EMV-Messungen auf der Gleichstromseite von Photovoltaik-Anlagen

H. Häberlin und R. Fischer

Berner 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 durch [1, 2]. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal von Wechselrichtern und anderen leistungselektronischen Komponenten (z.B. Laderegler oder Lampen-Vorschaltgeräten) in PV-Anlagen ist dabei die Vermeidung unzulässig hoher hochfrequenter Störungen auf den Anschlussleitungen, welche andere elektrische oder elektronische Geräte in der Umgebung stören könnten. Dies wurde in allen Publikationen über die durchgeführten Wechselrichtertests immer wieder betont. Wegen der internen Schaltfrequenzen im Bereich von einigen 10kHz sind dabei die Emissionen im Bereich 150kHz – 30MHz speziell relevant. Bei Wechselrichtern für Netzverbundanlagen ist die Situation auf der Netzseite analog wie bei andern elektrischen Geräten. Die Messbedingungen und die einzuhaltenden Grenzwerte sind deshalb auf Grund der einschlägigen Normen (z.B. EN50081, EN55014, EN55011 usw.) klar definiert.

Auf der Gleichstromseite von Photovoltaik-Anlagen ist die Situation dagegen wesentlich anders. Der Solargenerator und die Gleichstromverkabelung stellen ein oft recht grosses strahlungsfähiges Gebilde dar, welches die von den leistungselektronischen Komponenten der PV-Anlage erzeugten leitungsgebundenen HF-Störungen abstrahlen kann. In ungünstigen Fällen können sogar  $\lambda/4$ -Resonanzen oder  $\lambda/2$ -Resonanzen auf Frequenzen auftreten, wo nennenswerte Störemissionen vorhanden sind, was zu speziell starken Abstrahlungen führt.

Nur in wenigen Normen sind Grenzwerte für leitungsgebundene Störungen für andere Leitungen als Netzanschlussleitungen festgelegt. In der EN55014 werden Grenzwerte für HF-Störspannungen festgelegt, welche mit einer 1500 $\Omega$ -Sonde zu messen sind und vor allem für kurze Leitungen von höchstens einigen Metern sinnvoll sind. In der EN50081 wird im informativen (nicht normativen) Anhang vorgeschlagen, die HF-Störströme an einem Abschlusswiderstand von 150 $\Omega$  zu messen. Zudem werden auch Grenzwerte für diese Ströme vorgeschlagen.

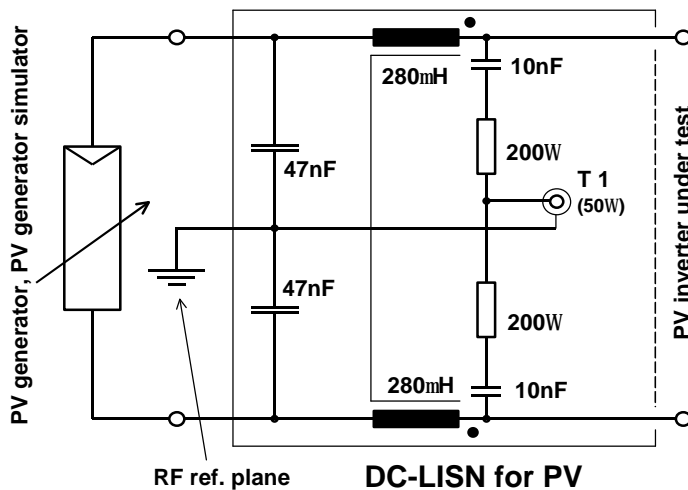
Will man die von Wechselrichtern auf der Gleichstromseite produzierten leitungsgebundenen Störungen reproduzierbar messen, sollte der Prüfling möglichst die gleichen Betriebsbedingungen vorfinden wie im praktischen Betrieb, d.h. er sollte von einem Solargenerator oder einem Solargenerator-Simulator gespeist werden. Diese Geräte haben aber einen HF-mässig undefinierten Impedanzverlauf in Funktion der Frequenz und können selbst auch Störungen empfangen oder produzieren. In den ersten Jahren wurden am PV-Labor der HTA Burgdorf die von den DC-Quellen stammenden externen asymmetrischen Störungen mit grossen Rohrdrosseln unterdrückt. Dadurch entsteht aber noch kein definierter Impedanzverlauf. Auf Grund der EN50081 liegt der Gedanke nahe, analog wie auf der Netzseite eine Netznachbildung von 150 $\Omega$  zu verwenden [3]. Allerdings ist die praktische Realisierung nicht so einfach. Eine derartige Netznachbildung muss nicht nur definierte HF-Eigenschaften über einen weiten Frequenzbereich (150kHz – 30MHz) aufweisen, sondern auch noch die von heutigen Wechselrichtern verwendeten hohen Spannungen und Ströme führen können. Zudem ist auch eine Dämpfung der von der speisenden Quelle stammenden Störungen erwünscht.

## 2. Realisierung einer Netznachbildung mit $Z_{CM} = 150W$ (150kHz – 30MHz)

Im Jahre 1997 wurde an unserem Labor versucht, eine derartige Netznachbildung für grössere Spannungen (bis etwa 600V und Ströme (bis etwa 50A) zu bauen. Die HF-Eigenschaften dieses Netzwerks waren aber im oberen Frequenzbereich noch nicht befriedigend. Am ISET wurde in dieser Zeit versucht, kommerzielle Koppelnetzwerke der Firma Schaffner AG als Netznachbildungen einzusetzen [4]. Die bei diesen Netzwerken noch zulässigen Ströme und Spannungen sind aber für viele heute gebräuchliche Wechselrichter zu klein.

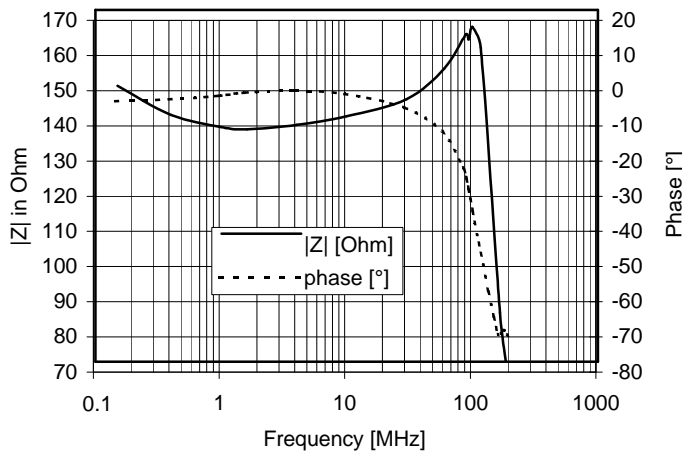
Zu Beginn des Jahres 1998 zeichnete sich ab, dass das Photovoltaiklabor der HTA Burgdorf zusammen mit den den Partnern FhG/ISE und KEMA ein EU-Projekt (PV-EMI, JOR3 CT98 0217) durchführen kann. In diesem Projekt sollte gezielt die ganze EMV-Problematik bei Photovoltaikanlagen untersucht werden [5]. In Hinblick auf dieses Projekt wurde im Rahmen einer Semesterarbeit in Zusammenarbeit mit der Firma Schaffner AG ein leistungsfähiges Koppel-/Entkoppelnetzwerk nach EN61000-4-6 für 1000V und 100A entwickelt, das bei Abschluss mit 50 $\Omega$  am Messausgang T1

hochfrequenzmässig eine Common-Mode Impedanz von  $Z_{CM} = 150\Omega$  gegen Erde darstellt. Bild 1 zeigt das verwendete Schema, Bild 2 den bei dieser Netznachbildung gemessenen Impedanzverlauf.



**Bild 1:**

Schema der realisierten DC-Netznachbildung gemäss EN61000-4-6. Wenn der Signaleingang mit einem  $50\Omega$  Widerstand abgeschlossen ist, beträgt die HF-Impedanz der beiden (parallelen) Wechselrichter-Anschlussklemmen  $Z_{CM} = 150\Omega$  gegen Erde (asymmetrische Impedanz). Die auftretenden HF-Störspannungen können entweder mit der  $1500\Omega$  Sonde oder am  $50\Omega$  Anschluss (Dämpfung ca. 9.5dB) gemessen werden. Die symmetrische Impedanz  $Z_{DM}$  ist dabei ziemlich klein wegen des Symmetrieeffektes der grossen stromkompensierten Drossel, die nur für asymmetrische Ströme wirksam ist.



**Bild 2:**

Asymmetrische Impedanz  $Z_{CM}$  gegen Erde der DC-Netznachbildung für  $1000V_{=}$  und  $100A$  nach Bild 2.

### 3. Neue Impedanzen und Grenzwerte gemäss Ergebnissen des EU-Projektes

Im Rahmen des bereits erwähnten EU-Projektes PV-EMI wurden von der HTA Burgdorf und dem FhG/ISE ausgedehnte Messungen der von acht verschiedenen PV-Anlagen abgestrahlten elektromagnetischen Felder im Bereich  $150kHz - 30MHz$  und der dabei in den Speiseleitungen auftretenden hochfrequenten Ströme durchgeführt. Bei einigen der bei diesen Test verwendeten Wechselrichter erfolgten im Labor an der HTA Burgdorf zusätzlich auch Messungen der an einer DC-Netznachbildung von  $150\Omega$  gemäss Bild 1 und Bild 2 auftretenden HF-Störspannungen. Parallel dazu wurden von KEMA der Frequenzgang des Antennenfaktors und der Impedanz des Solargenerators ihrer Versuchsanlage bestimmt. Am FhG/ISE wurden ergänzend dazu mit Hilfe von Simulationsprogrammen für einige Anlagenkonfigurationen der Frequenzgang des Antennenfaktors und der Impedanz des Solargenerators bestimmt [6]. Ein anderes EU-Projekt, das sich auch mit dem Thema EMV von PV-Anlagen befasst (ESDEPS, JOR 3 CT98 0246) wird vom ISET koordiniert [7].

Auf Grund dieser Messungen und der am Projektende vorliegenden Erkenntnisse schlägt die Projektgruppe FhG/ISE, HTA Burgdorf und KEMA folgende Impedanzen und Grenzwerte für eine universelle DC-Netznachbildung für PV-Anlagen vor:

Impedanz	Frequenzbereich [MHz]	Wert [W]	Bemerkungen
Symmetrische Impedanz $Z_{DM}$	0,15 - 30	100	+/- 6dB oder +100%, -50%
Asymmetrische Impedanz $Z_{CM}$	0,15 - 30	250	+/- 6dB oder +100%, -50%

**Tabelle 1:** Von EU-Projektgruppe vorgeschlagene Impedanzwerte für eine neue DC-Netznachbildung

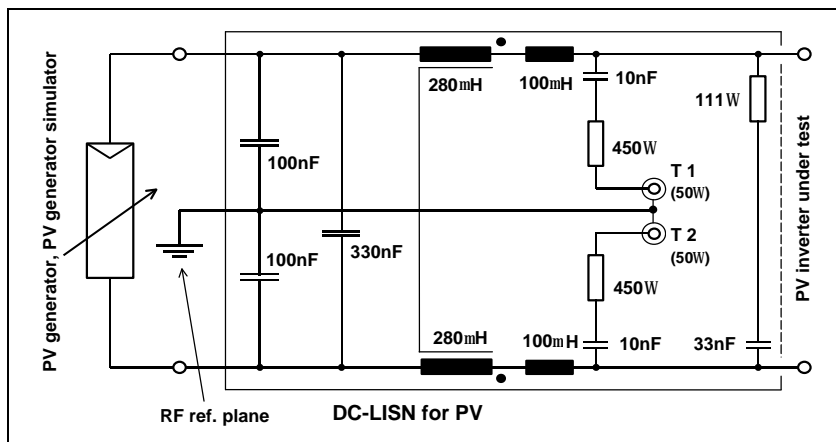
Grenzwerte		
Frequenzbereich [MHz]	Wert [dBmV]	Bemerkungen
0,15 – 0,5	80	Quasi peak (beide Leitungen)
	70	Average (beide Leitungen)
0,5 - 30	64	Quasi peak (beide Leitungen)
	54	Average (beide Leitungen)

**Tabelle 2:** Von EU-Projektgruppe vorgeschlagene neue Grenzwerte für HF-Störspannungen an einer DC-Netznachbildung mit  $Z_{CM} = 250\Omega$  und  $Z_{DM} = 100\Omega$ . Für Frequenzen  $> 500kHz$  sind die Grenzwerte um 10 dBmV tiefer als in EN55014.

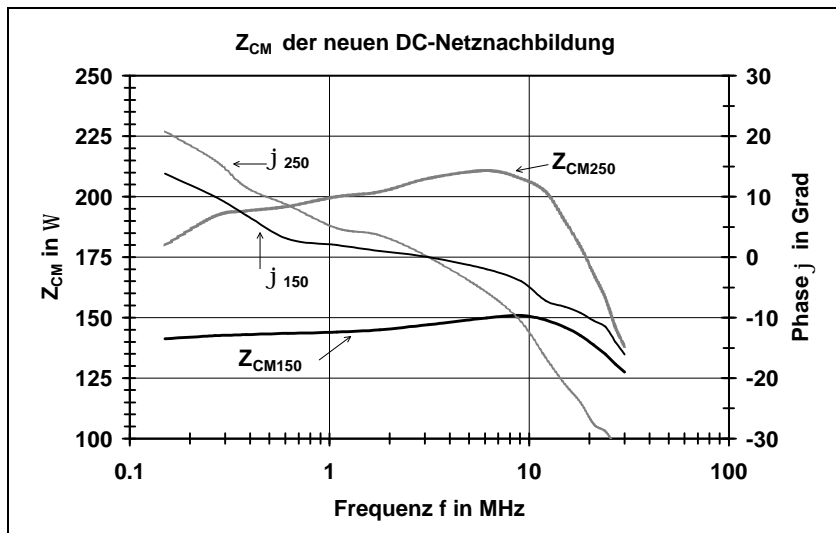
### 4. Realisierung einer DC-Netznachbildung mit den neuen Impedanzen

Für die praktische Realisierung dieser Impedanzwerte musste natürlich die Schaltung der vorhandenen DC-Netznachbildung wesentlich verändert werden. Nach langwierigen Versuchen konnte mit der Schaltung nach Bild 3 eine derartige DC-Netznachbildung für 1000V und 75A realisiert werden.

**Bild 3:** Prinzipschema der neuen DC-Netznachbildung (DC-NN) mit  $Z_{CM} = 250\Omega$ ,  $Z_{DM} = 100\Omega$ . T1 und T2 müssen mit  $50\Omega$  abgeschlossen werden. An T1 und T2 sind 20 dB gedämpfte Messsignale vorhanden, welche mit angeschlossenen Messgeräten (Spektrum-Analysatoren oder Messempfängern) gemessen werden können.



**Bild 4:** Gemessene asymmetrische Impedanz  $Z_{CM}$  gegen Erde (+ und - kurzgeschlossen) bei der neuen DC-Netznachbildung für 1000V= und 75A nach Bild 3. Sowohl für  $Z_{CM}$  als auch für die Phase  $\phi$  sind jeweils die Kurven für eine Auslegungsimpedanz von 250 $\Omega$  und 150 $\Omega$  angegeben.

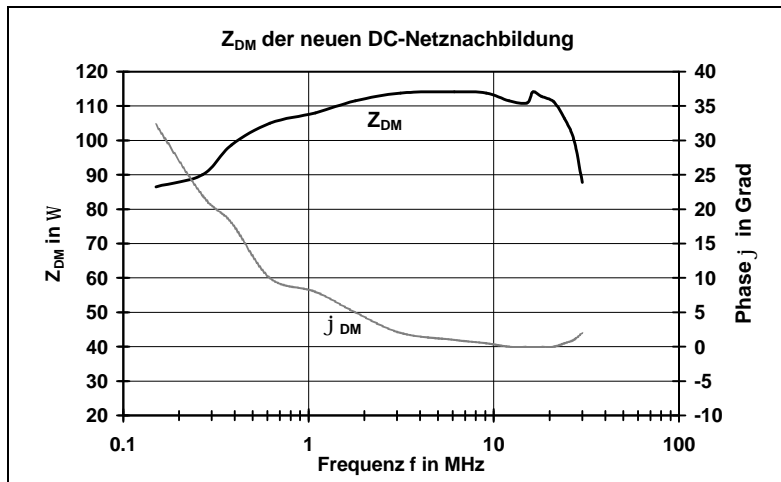


Die geforderte hohe asymmetrische Impedanz von 250 $\Omega$  war in der Praxis bei noch vernünftigen äusseren Abmessungen nicht ganz zu erreichen. Die grossen Ströme, welche von manchen heute gebauten Wechselrichtern auf der DC-Seite aufgenommen werden, machen relativ grosse Drosseln erforderlich, die eine nicht zu vernachlässigende Kapazität gegen Erde aufweisen, was die Impedanz bei hohen Frequenzen reduziert. Deshalb wurde der Prototyp so realisiert, dass  $Z_{CM}$  zwischen 250 $\Omega$  und dem praktisch leichter zu realisierenden Wert von 150 $\Omega$  umgeschaltet werden kann. Man erkennt in Bild 4, dass der in Tabelle 1 angegebenen Bereich für einen  $Z_{CM}$ -Nennwert von 250 $\Omega$  dank der relativ grossen Toleranz zwar über den ganzen Frequenzbereich erreicht werden kann. Es wäre aber zweckmässiger, die Kurve  $Z_{CM250}$  mit einem Nenn-Impedanzwert von  $Z_{CM} = 200\Omega$  zu spezifizieren. Wie die Kurve  $Z_{CM150}$  zeigt, ist der Impedanzverlauf aber bei einem Aufbau für die Nenn-Impedanz  $Z_{CM} = 150\Omega$  viel gleichmässiger, was im Interesse einer guten Reproduzierbarkeit der Messungen eindeutig vorzuziehen wäre. Auch die Kurve  $Z_{CM150}$  liegt gerade noch innerhalb des Toleranzbereichs von

Tabelle 1. Die Realisierung der in Tabelle 1 geforderten symmetrischen Impedanz von  $Z_{DM} = 100\Omega$  war dagegen kein Problem. Wie Bild 5 zeigt, liegen die gemessenen Impedanzwerte  $Z_{DM}$  im ganzen Frequenzbereich von 150kHz bis 30MHz im Bereich  $85\Omega$  bis  $115\Omega$ .

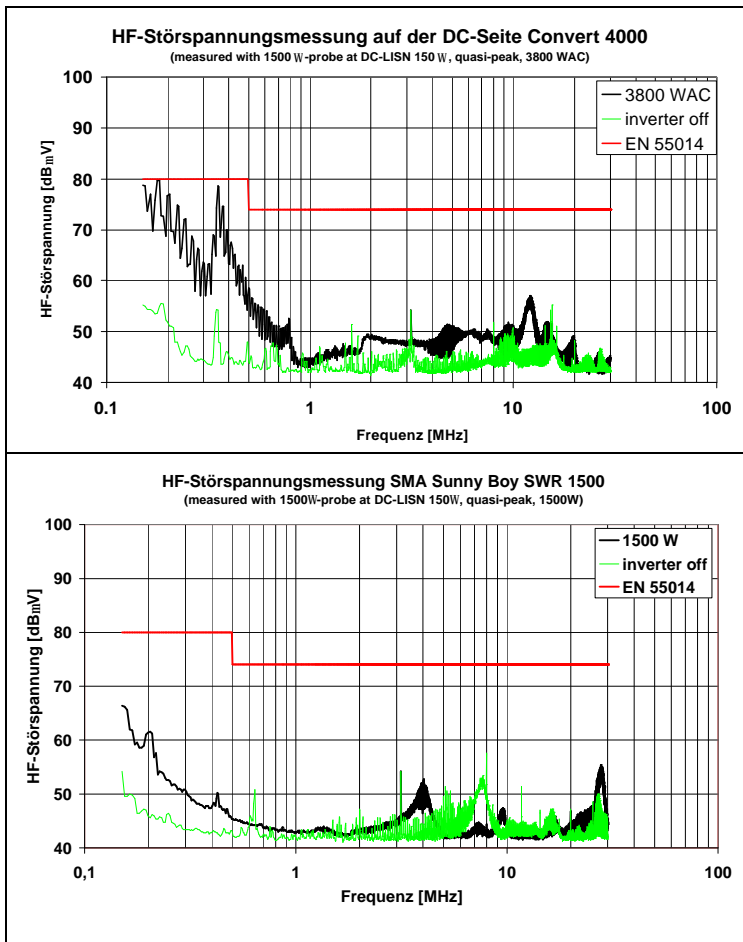
**Bild 5:**

Gemessene symmetrische Impedanz  $Z_{DM}$  zwischen den Anschlüssen + und - bei der neuen DC-Netznachbildung für 1000V= und 75A nach Bild 3. Die Kurven sind für beide Auslegungsimpedanzen von  $250\Omega$  und  $150\Omega$  praktisch identisch.



**5. Zumutbarkeit und Realisierbarkeit der neuen Grenzwerte**

Neue Grenzwerte und Messmethoden werden dann leicht akzeptiert, wenn sie von erfahrenen Herstellern ohne allzu grossen Aufwand realisiert werden können. Deshalb wurde durch Messungen an der DC-Netznachbildung nach Bild 1 untersucht, ob neue Produkte erfahrener Hersteller die neuen Grenzwerte für die DC-Seite bereits einhalten. Dies ist tatsächlich bei vielen modernen Netzwechsellrichtern bereits der Fall.



**Bild 6:**

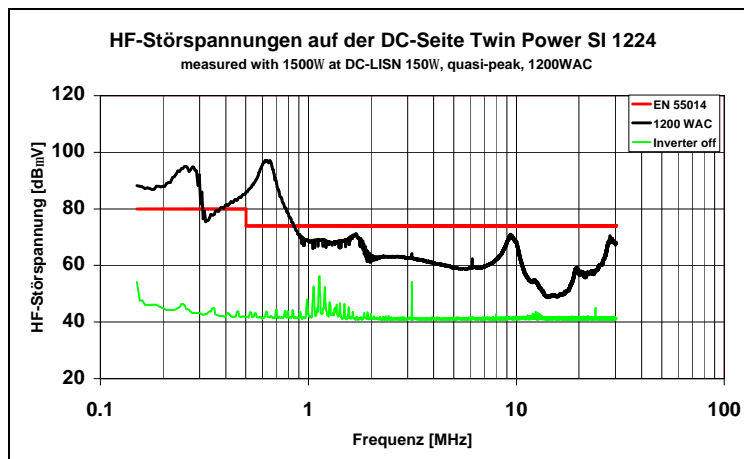
HF-Störspannungen, welche ein Convert 4000 auf der DC-Seite produziert (an einer DC-Netznachbildung gemäss Bild 1). Zusätzlich sind auch die Grenzwerte nach EN 55014 angegeben.

Für Frequenzen > 500kHz liegen die HF-Störspannungen unter  $58\text{dB}\mu\text{V}$ , d.h. dieses Gerät hält die vorgeschlagenen neuen Grenzwerte für die DC-Seite problemlos ein!

**Bild 7:**

HF-Störspannungen, welche ein SWR 1500 auf der DC-Seite produziert (an einer DC-Netznachbildung gemäss Bild 1). Zusätzlich sind auch die Grenzwerte nach EN 55014 angegeben. Für Frequenzen > 500kHz liegen die HF-Störspannungen unter  $56\text{dB}\mu\text{V}$ , d.h. dieses Gerät hält die vorgeschlagenen neuen Grenzwerte für die DC-Seite problemlos ein!

Es gibt allerdings noch manche Geräte mit deutlich zu hohen HF-Emissionen. Bei einigen kürzlich getesteten Inselwechsellrichtern zeigten sich sowohl auf der AC- als auch auf der DC-Seite noch Schwächen bezüglich des EMV-Verhaltens. Die Situation ist hier ähnlich wie vor einigen Jahren bei den Netzwechsellrichtern, als sich einige Hersteller der EMV-Problematik noch nicht bewusst waren.

**Bild 8:**

HF-Störspannungen, die ein Inselwechselrichter Twin Power SI1224 auf der DC-Seite produziert (an einer DC-Netznachbildung gemäss Bild 1). Zusätzlich sind auch die Grenzwerte nach EN 55014 angegeben. Im Bereich unterhalb von 1 MHz werden die Grenzwerte von EN 55014 deutlich überschritten. Die vorgeschlagenen neuen Grenzwerte werden auch bei einigen Frequenzen > 1MHz leicht überschritten.

## 6. Schlussbemerkungen

Am 5.1.2001 lagen gerade die ersten Messungen mit der neuen DC-Netznachbildung vor. Zwischen den Messungen mit einer Auslegungsimpedanz von 150Ω und 250Ω bestehen wie erwartet nur ganz geringe Unterschiede, so dass der Wert von  $Z_{CM} = 150\Omega$  in der Praxis eindeutig vorzuziehen wäre. Dank des internen Spannungsteilers (-20dB) können mit der neuen Netznachbildung auch empfindlichere Messungen als mit der alten Nachbildung und der 1500Ω-Sonde vorgenommen werden.

Mit der vorgestellten neuen DC-Netznachbildung ist es möglich, auch auf der Gleichstromseite von PV-Anlagen die leitungsgebundenen Störungen reproduzierbar im Labor zu messen. Werden neben den schon lange bekannten Grenzwerten auf der AC-Seite auch die vorgeschlagenen neuen Grenzwerte für die DC-Seite eingehalten, sollten in der Praxis normalerweise keine EMV-Probleme bei PV-Anlagen durch von der Gleichstromseite abgestrahlte Störungen auftreten.

## Verdankungen

Die meisten der in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden im Rahmen des EU-Projektes JOR3 CT 98 0217 [6] (Partner: FhG/ISE, HTA Burgdorf, KEMA) durchgeführt und vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW) finanziert. Die Firma Schaffner AG unterstützte die Entwicklung der ersten Netznachbildung mit Material und Know-How. Wir danken diesen Institutionen für ihre wertvollen Beiträge. Die Aktivitäten der HTA Burgdorf auf dem Gebiet der Photovoltaik wurden auch von den IBB Burgdorf 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". 11. Symp. PV-Sonnenenergie, Staffelstein, 1996.
- [2] H. Häberlin: "Vergleichsmessungen an Photovoltaik-Wechselrichtern". 9. Symp. PV-Sonnenenergie, Staffelstein, 1994.
- [3] H. Häberlin: "Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen". Elektroniker 6 + 7, 1992.
- [4] T. Trümper: "Messverfahren zur vergleichbaren Bewertung leitungsgebundener EMV-Störungen von leistungselektronischen PV-Komponenten". 13. Symp. PV-Sonnenenergie, Staffelstein, 1998.
- [5] S. Schattner, G. Bopp, T. Erge, H. Häberlin, B. Verhoeven: "Die elektromagnetische Verträglichkeit von PV-Anlagen und ihren Komponenten – neue technische und rechtliche Aspekte". 14. Symp. PV-Sonnenenergie, Staffelstein, 1999.
- [6] T. Erge: "Development of Standard Test Procedures for Electromagnetic Interference (EMI) Tests and Evaluations on Photovoltaic Components and Plants (PV-EMI-Project, JOR 3 CT 98 0217) – FINAL REPORT" (in Schlussredaktion, sollte bis März 2001 publiziert sein).
- [7] T. Degner, W. Enders, A. Schülbe, H. Daub et al.: "EMC and Safety Design for Photovoltaic Systems (ESDEPS)". 16<sup>th</sup> EU Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 2000.

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