

# **Gleichspannungsseitiges Störaussendungsverhalten von Photovoltaik Wechselrichtern und -anlagen**

Dipl.-Ing. Jörg, Kirchhof, Fraunhofer IEE, Bereich Anlagentechnik und Verteilungsnetze  
Sabine Kitterer, M. Sc., Fraunhofer IEE, Bereich Anlagentechnik und Verteilungsnetze  
PD Dr.-Ing. habil. René Marklein, Fraunhofer IEE, Bereich Anlagentechnik und Verteilungsnetze  
Jiamei Wang, M. Sc., Fraunhofer IEE, Bereich Anlagentechnik und Verteilungsnetze

## **1 Ausgangssituation**

Im CISPR 11 findet zurzeit die Festlegung von Störspannungsgrenzwerten für Photovoltaik-Wechselrichter statt. Die Ableitung dieser leitungsgebundenen Grenzwerte erfolgte bisher auf Basis eines einfachen Störmodells, bei dem die Gleichtakt-Impedanzen der während der Typprüfung verwendeten AC- und DC-seitigen Netznachbildungen unter der Annahme eines konstanten Störstroms herangezogen wurden. Hierbei gehen allerdings die spezifischen Übertragungsmechanismen in realen PV-Anlagen verloren. Die DC-seitigen und vom PV-Wechselrichter erzeugten Störungen gelangen leitungsgebunden zum Photovoltaik-Generator, der aufgrund seiner Größe als parasitäre Sendeanenne wirkt und im betrachteten Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz zu einer feldgebundenen Abstrahlung der Störungen führen kann. Ein in CISPR 11 diskutierter neuer Ansatz soll den Übergang von leitungsgebundener Störgröße zu feldgebundener Abstrahlung besser beschreiben. Hierbei werden einerseits die Fehlanpassung zwischen Wechselrichter und PV-Generator, andererseits ein sogenannter Kopplungsfaktor zwischen leitungsgebundener Störgröße und Störfeldstärke in einem bestimmten Abstand zur PV-Anlage herangezogen.

Im Rahmen einer von der Bundesnetzagentur in Auftrag gegebenen Studie wurde in einem ersten Arbeitspaket der Koppelfaktor durch Einspeisung eines Hochfrequenz-Signals in die Hauptleitung des PV-Generators bei gleichzeitiger Messung der elektrischen und magnetischen Feldstärke im definierten Abstand zur PV-Anlage bestimmt. In einem zweiten Arbeitspaket wurde ein Messverfahren entwickelt, um die Ausgangsimpedanz der Störquelle im Wechselrichter zu bestimmen, damit Aussagen über die hochfrequente Fehlanpassung zwischen PV-Generator und PV-Wechselrichter während des normalen Betriebs der PV-Anlage getroffen werden können. Der Messablauf wurde für beide Untersuchungsschwerpunkte mit Hilfe von LabVIEW automatisiert

## **2 Grundlagen**

### **2.1 Aspekte der Feldstärkemessung**

Für die Ermittlung des Störpotenzials von Photovoltaik-Anlagen müssen mehrere Faktoren einbezogen werden. Einerseits spielt die von PV-Wechselrichter angebotene verfügbare Störleistung eine wichtige Rolle, andererseits müssen die Anpassbedingungen zwischen PV-Generator und der Störquelle im PV-Wechselrichter einbezogen werden. Schließlich spielt auch der Antennenfaktor bei der Beurteilung der feldgebundenen Störstrahlung einer PV-Anlage eine wichtige Rolle. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass wegen der Fehlanpassungsbedingungen zwischen PV-Generator und PV-Wechselrichter sowie wegen der sehr großen Wellenlänge im Frequenzbereich von

150 kHz (Freiraum-Wellenlänge ca. 2 km) und 30 MHz (Freiraum-Wellenlänge ca. 10 m) die Ermittlung eines klassischen Antennenfaktors aus dem Verhältnis Fernfeld-Feldstärke zu Fußpunktspannung in diesem Anwendungsfall nicht sinnvoll ist. Stattdessen wurde in CISPR B Working Group 1, Maintenance Team „Grid Connected Power Conditioner – GCPC“ ein „Koppelfaktor“ in einem Abstand von 10 m zur Anlage definiert [1], der die Feldstärke in Bezug zur Wurzel der abgestrahlten Leistung repräsentiert. Obwohl im Nahfeld elektrische und magnetische Feldstärke nicht in einem festen Verhältnis zueinander stehen, kann für Vergleichszwecke ein derartiges Verhältnis verwendet werden, um durch Bildung eines elektrischen Ersatzkoppelfaktors die Ergebnisse von magnetischem und elektrischem Koppelfaktor miteinander zu vergleichen und durch Maximumbildung einen einheitlichen Koppelfaktor zu bestimmen [2]. Es kommen daher folgende in den CISPR Dokumenten dargestellten Gleichungen zur Anwendung:

$$\alpha_{i \text{ elec meas}} = \frac{E_{i \text{ meas}}}{\sqrt{P_L}} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$\beta_{i \text{ mag meas}} = \frac{H_{i \text{ meas}}}{\sqrt{P_L}} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit der Festlegung

$$\alpha_{i \text{ mag meas}} = 120\pi \cdot \beta_{i \text{ mag meas}} \quad \text{Gleichung 3}$$

und

$$\alpha_{i \text{ meas}} = \max(\alpha_{i \text{ elec meas}}, \alpha_{i \text{ mag meas}}) \quad \text{Gleichung 4}$$

mit:

$E_{i \text{ meas}}$ :	gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz $i$ und dem Abstand 10 m,
$H_{i \text{ meas}}$ :	gemessene magnetische Feldstärke bei der Frequenz $i$ und dem Abstand 10 m,
$P_L$ :	abgestrahlte Leistung,
$\alpha_{i \text{ elec meas}}$ :	gemessener elektrischer Koppelfaktor,
$\beta_{i \text{ mag meas}}$ :	gemessener magnetischer Koppelfaktor,
$\alpha_{i \text{ mag meas}}$ :	gemessener äquivalenter elektrischer Koppelfaktor,
$\alpha_{i \text{ meas}}$ :	gemessener Koppelfaktor.

Bei der Messung ist zu berücksichtigen, dass bei einem Monopol mit Dachkapazität das Maximum der elektrischen Feldstärke in Höhe der Dachkapazität auftritt, während das Maximum der magnetischen Feldstärke am Fußpunkt der Antenne zu finden ist. Idealerweise sollte daher die Messung mit Hilfe eines Höhenscans der Antennen durchgeführt werden.

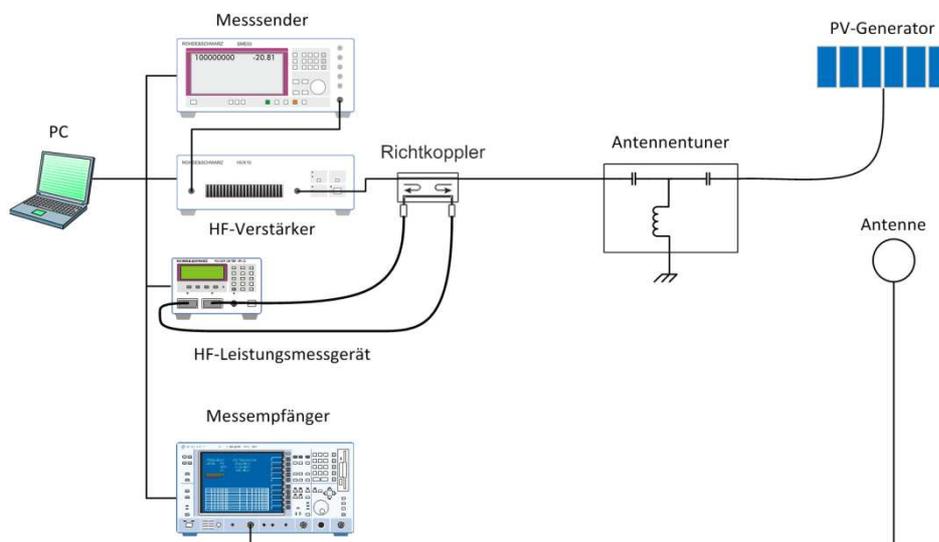
Die Ermittlung der eingespeisten Leistung erfolgt mit Hilfe von Richtkopplern. Da bei Fehlanpassung zwischen Antenne und Signalquelle die Differenz zwischen vorlaufender und reflektierter Leistung am Richtkoppler sehr klein wird, würde hierdurch auch ein großer Messfehler entstehen. Um diesen Fehlereinfluss zu minimieren, ist die Verwendung eines Anpassgeräts zwischen Richtkoppler und dem als Antenne wirkenden PV-Generator empfehlenswert. Um mit kleinen Sendeleistungen arbeiten zu können, wurden zur Messung der Feldstärke Messantennen in Verbindung mit einem EMV-Messempfänger verwendet.

## 2.2 Aspekte der Impedanzmessung

Ein weiteres Ziel der Untersuchung war die Bestimmung von Quellimpedanz des PV-Wechselrichters und Eingangsimpedanz des PV-Generators im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz. Insbesondere sollte die Quellimpedanz des PV-Wechselrichters während des Betriebs bestimmt werden. Da herkömmliche Impedanzanalysatoren durch die betriebsbedingten hoch- und niederfrequenten Ausgangssignale von PV-Wechselrichtern gestört oder sogar zerstört werden können, musste ein alternatives Messverfahren entwickelt und implementiert werden, um die gewünschten Messungen durchführen zu können. Durch Vergleich verschiedener Verfahren bezüglich ihrer spezifischen Vor- und Nachteile wurde ein modifiziertes RF-IV-Verfahren angewendet (siehe Bild 2), bei dem der Messpegel größer als der Störpegel des PV-Wechselrichters eingestellt werden konnte. Zur Kalibrierung der Messvorrichtung wurden die in der Literatur bekannten Verfahren mit Hilfe von Kurzschluss-, Leerlauf- und Lastmessung verwendet [3]. Damit der PV-Wechselrichter während der Impedanzmessung betrieben werden konnte, erfolgte die Messung an den Anschlüssen einer modifizierten DC EMV-Netznachbildung, bei der die internen Widerstände, welche zur Definierung der Gleichaktimpedanz dienen, überbrückt wurden. AC-seitig war der Wechselrichter während der Messung im Labor ebenfalls mit einer normgerechten EMV-Netznachbildung ( $50 \Omega \parallel 5 \Omega + 50 \mu\text{H}$  V-Netznachbildung nach CISPR 16-1-2) verbunden, auch wenn die Netzspannung und die DC-Quelle abgeschaltet waren.

## 3 Messaufbau

### 3.1 Antennenmessung

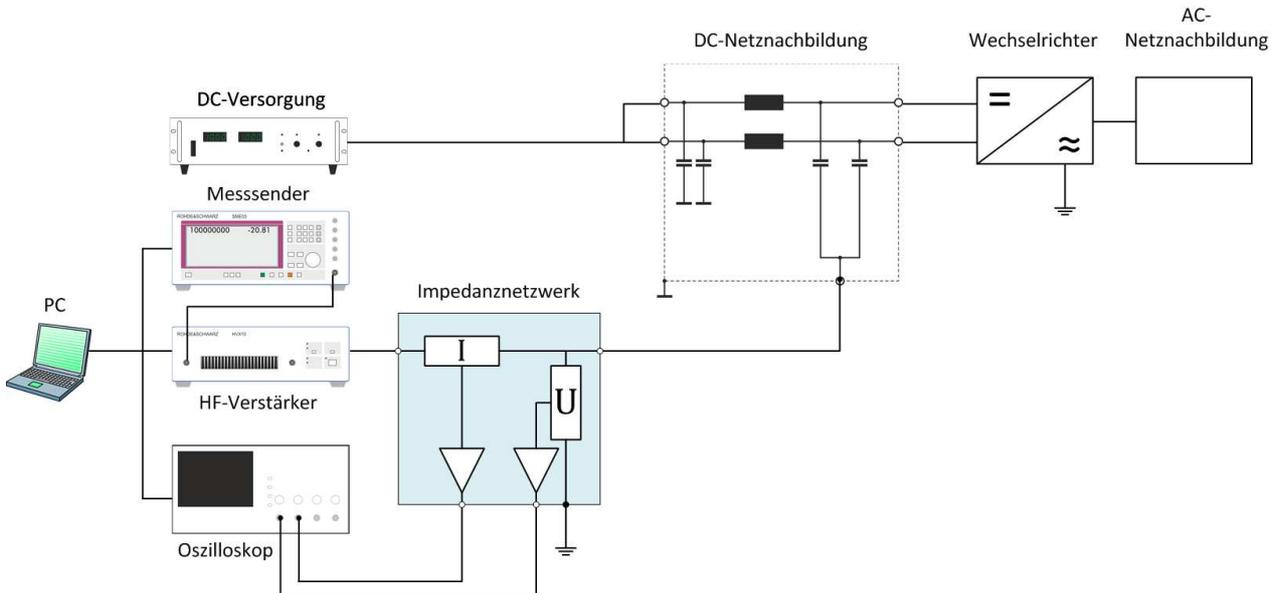


**Bild 1:** Aufbau zur Bestimmung des Koppelfaktors

In Bild 1 ist der Aufbau zur Bestimmung des Koppelfaktors zu sehen. Das vom Messsender generierte Signal wird über einen HF-Verstärker verstärkt und über einen Richtkoppler und einen Antennentuner (Anpassgerät) in die miteinander verbundenen DC-Leitungen des PV-Generators gegen Erde eingespeist. Diese Konfiguration entspricht einer Gleichtakt-Anregung, die für das EMV-Verhalten der PV-Anlage dominierend ist. Die Messung der Feldstärke erfolgt zeitgleich mit einem EMV-Messempfänger unter Be-

rücksichtigung von frequenzabhängigen Kabeldämpfungen und Antennenfaktor. Der komplette Messablauf wurde mit Hilfe von LabVIEW™ automatisiert. Lediglich die Einstellung des Antennentuners und die Höheneinstellung des Antennenmasts mussten für jede Frequenz einzeln erfolgen. Das Programm beinhaltet auch die für die Kalibrierung von Kabeldämpfungen erforderlichen Schritte und liefert ASCII Dateien der Messergebnisse sowie eine Konfigurationsdatei zur Dokumentation aller Messgeräteeinstellungen.

### 3.2 Impedanzmessung



**Bild 2:** Aufbau zur Messung der Gleichtaktimpedanz an PV-Wechselrichtern

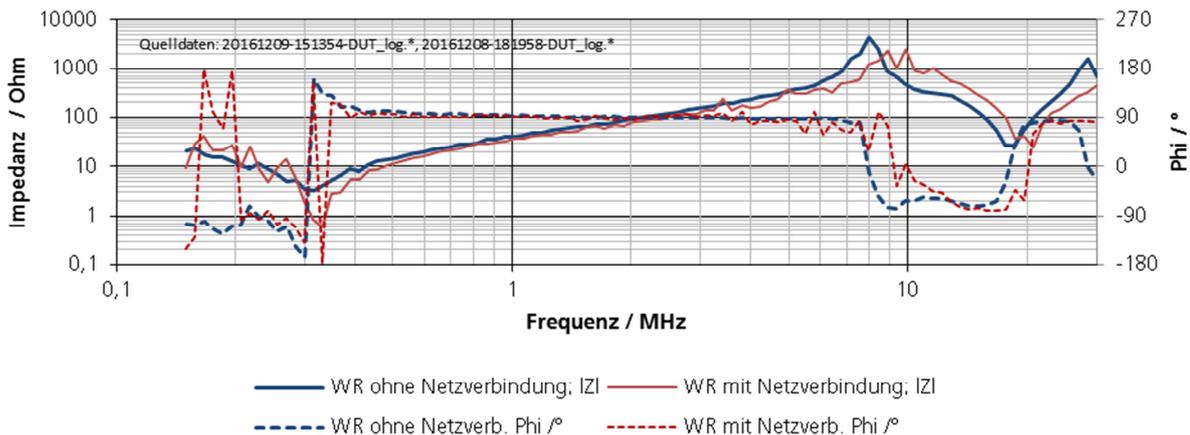
Bild 2 zeigt den Messaufbau zur Bestimmung der Gleichtakt-Impedanz eines PV-Wechselrichters während des Betriebs. Das vom Messender abgegebene Signal wird optional durch einen HF-Verstärker im Pegel angehoben und dann einem Impedanz-Netzwerk zugeführt, wo rückwirkungsarm strom- und spannungsproportionale Signale ausgekoppelt, verstärkt und einem Digitaloszilloskop zugeführt werden. Eine Messung von vorlaufender und rücklaufender Leistung ist hierbei optional. Der Ausgang des Impedanz-Netzwerks ist mit der modifizierten DC-Netznachbildung verbunden, die wie eine Frequenzweiche wirkt und den DC- und Niederfrequenzanteil des Stroms über ein hierdurch entkoppeltes DC-Netzteil bezieht und an den PV-Wechselrichter speist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Impedanz-Messbereich durch die Leitungskapazität des Verbindungskabels zwischen Impedanznetzwerk und DC-Netznachbildung sowie durch die Eigenimpedanz der DC-Netznachbildung eingeschränkt ist. Daher wurden im Projekt nur wenige Impedanzmessungen unter Verwendung der DC-Netznachbildung durchgeführt. Stattdessen erfolgten die Impedanzmessungen vor Ort im abgeschalteten Zustand des PV-Wechselrichters direkt an den kurzgeschlossenen DC-Anschlüssen des Wechselrichters.

Auch dieses Messverfahren wurde mit Hilfe von LabVIEW™ automatisiert und beinhaltet auch die Kalibrierung des Messaufbaus.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Ergebnisse Impedanzmessung

Jeder auf dem Markt erhältliche PV-Wechselrichter verfügt AC- und DC-seitig über EMV-Filter. Diese Filter weisen im betrachteten Frequenzbereich eine Einfügungsdämpfung auf, wodurch die Quellimpedanz der Störquelle im Leistungsteil des Wechselrichters gegenüber der Umgebung entkoppelt wird. Für die Anpassungsbedingungen zwischen PV-Generator und PV-Wechselrichter spielt daher die Ausgangsimpedanz des internen EMV-Filters eine übergeordnete Rolle.

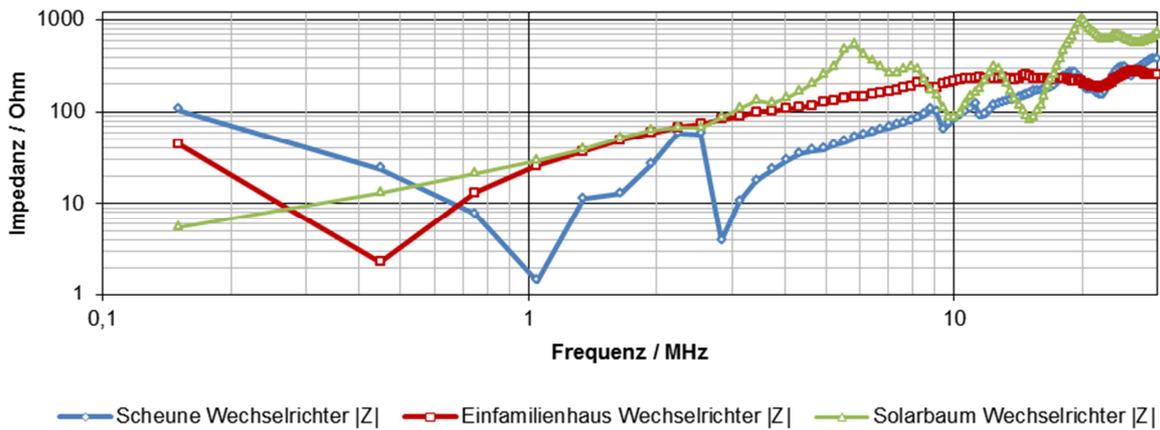


**Bild 3:** Vergleich der Wechselrichter Gleichtaktimpedanz (Betrag) in Betrieb und abgeschaltet

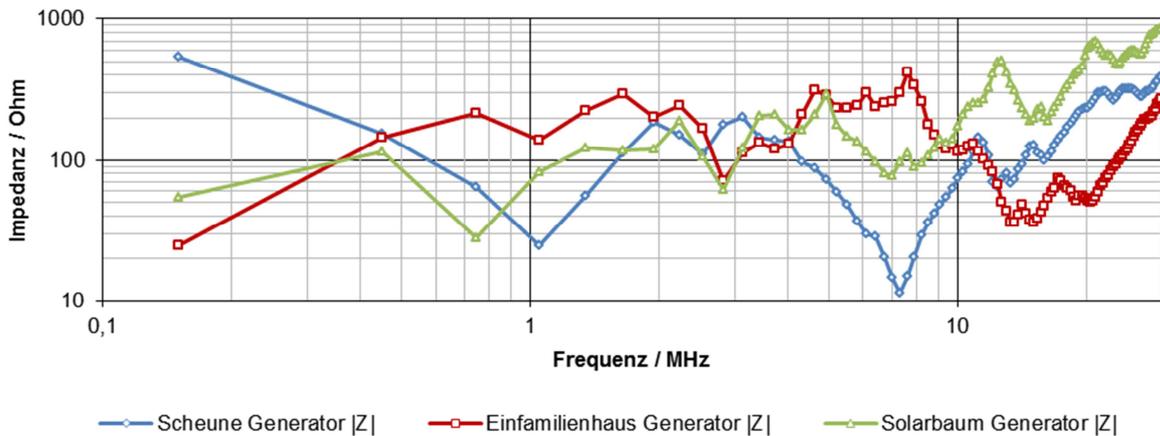
Dies ist auch anhand von Bild 3 erkennbar. Bei dieser Impedanzmessung wurde der Messaufbau gemäß Bild 2 verwendet, wobei der Wechselrichter bei einer Messung in Betrieb war und aus der DC-Quelle Strom über die AC-Netznachbildung in das Niederspannungsnetz eingespeist hat. Bei der zweiten Messung wurde die AC- und DC-Versorgung abgeschaltet. Die beiden Impedanzmessungen weisen den gleichen Verlauf auf. Eine gewisse Verschiebung der Parallelresonanz bei 10 MHz kann dadurch erklärt werden, dass die im Betriebsfall stromdurchflossenen Induktivitäten in den Filtern des Wechselrichters im stromfreien Zustand eine geringfügig größere Induktivität besitzen. Frühere Untersuchungen am aussteuerungsabhängigen Verhalten von EMV-Filtern in PV-Wechselrichtern [4], [5] unterstützen diese Erklärung.

In den untersuchten PV-Anlagen waren die Wechselrichter jeweils in einem technischen Betriebsraum untergebracht. Bei den beiden Anlagen im Einfamilienhaus und beim Solarbaum war dies ein Kellerraum, in der Scheune wurde ein abgetrennter Raum in der Mitte der Scheune verwendet, in dem drei PV-Wechselrichter mit sechs PV-Strings verbunden waren. Da der Besitzer Funkamateur ist, sind alle Leitungen der Strings durch ein zentrales zusätzliches EMV-Filter geführt worden. Die Messungen an dieser Anlage erfolgten daher am Erdungspunkt der parallel geschalteten Filter, welche die kapazitive Kopplung zu den Stringleitungen herstellten. Bei den Vor-Ort-Messungen an diesen drei PV-Anlagen zeigt sich, dass die Gleichtaktimpedanz der PV-Wechselrichter (siehe Bild 4) zumeist durch mehrere Serienresonanzen geprägt sind, die durch Y-Kondensatoren und die für Gleichtaktsignale wirksamen stromkompensierten Drosseln hervorgerufen werden. Bei Frequenzen oberhalb von 10 MHz machen sich einerseits die parasitären Eigenschaften der Verbindungsleitung zwischen PV-Wechselrichter und Impedanznetzwerk bemerkbar, die bei den Vor-Ort-Messungen in der Größe von 1 m waren, anderer-

seits spielt auch die Qualität der Masseverbindung bei der Messung eine Rolle. Vor Ort lagen nicht so definierte Masseflächen vor, wie bei den Labormessungen. Ein weiteres Problem in Verbindung mit den Verbindungsleitungen lag darin, dass am Ende dieser Leitungen weder ein guter Kurzschluss aufgrund des Induktivitätsbelags der Leitungen, noch ein guter Leerlauf aufgrund des Kapazitätsbelags der Leitungen möglich war. Zukünftig sollten Impedanzmessungen mit einem abgesetzten Impedanz-Netzwerk möglichst nah am Anschluss der Prüflinge erfolgen. Die beiden bei der Messung der Gleichtaktimpedanz parallelgeschalteten PV-Wechselrichter des Solarbaums liegt über einen weiten Frequenzbereich induktives Verhalten vor, was typisch für diesen älteren PV-Wechselrichter ist.



**Bild 4:** Gleichtakt-Impedanzen der PV-Wechselrichter



**Bild 5:** Gleichtakt-Impedanzen der PV-Generatoren

Die Beträge der Impedanzverläufe der drei PV-Generatoren sind in Bild 5 dargestellt. Charakteristisch für die Gleichtaktimpedanz eines PV-Generators ist die erste Serienresonanz, die durch die Zuleitungsinduktivität und die Modul-Rahmenkapazität [6] hervorgerufen wird. Dieser Kapazität liegt die Zuleitungskapazität parallel. Bei der Gleichtaktimpedanz des Solarbaums (siehe Bild 6 Mitte) liegt die erste Serienresonanz unterhalb von 150 kHz, da am wechselrichterseitigen Ende der 30 Meter langen unterirdischen Zuleitung gemessen wurde. Beim PV-Generator auf der Scheune lag dagegen eine nahezu geradlinige und damit sehr kurze Verbindung zwischen PV-Generator und Wechselrichteranschluss vor. Außerdem waren die Zuleitungen in Kupferrohren verlegt, die quer durch den hölzernen unisolierten Dachstuhl der Scheune geführt wurden. Hier-

durch hat sich ein kapazitätsarmer Aufbau ergeben, obwohl der PV-Generator eine große Fläche besitzt. Beim Dachgenerator des Einfamilienhauses liegt die erste Serienresonanz kurz unterhalb von 150 kHz. Hier liegt die PV-Zuleitung innerhalb von Kabelschächten der Hausinstallation und das Dach ist komplett ausgebaut, wärmeisoliert und mit einer metallischen Dampfsperre ausgestattet, wodurch sowohl der Generator, als auch die Zuleitung eine hohe Streukapazität besitzen. Weiterhin ist bei den Impedanzen von PV-Generatoren ein mit steigender Frequenz ansteigender induktiver Anteil durch die PV-Zuleitung und eine große Folge von Parallel- und Serienresonanzen charakteristisch. Dies kommt durch die bei höheren Frequenzen auftretenden Eigenresonanzen der PV-Module zustande, da hier die PV-Zellen mäanderförmig in Reihe geschaltet sind und ihrerseits Kapazitäten gegen den geerdeten Modulrahmen aufweisen. Die Verdrahtung zwischen den Modulen fügt zusätzliche Leitungsinduktivitäten in den Aufbau.

## 4.2 Ergebnisse Abstrahlungsversuche

Innerhalb der Studie wurden an drei Photovoltaik-Anlagen Vor-Ort-Untersuchungen mit Unterstützung durch einen Messwagen der Bundesnetzagentur durchgeführt. Die technischen Daten der in Bild 6 abgebildeten drei Anlagen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Mit Hilfe des ausfahrbaren Masts am Fahrzeug konnten Antennenmessungen zwischen 3,3 m und 10 m über dem Boden erfolgen. Es stand eine magnetische Rahmenantenne sowie eine aktive Dipolantenne zur Verfügung, die über eine Masthalterung in verschiedenen Ausrichtungen montiert werden konnte. Zum Wechsel der Ausrichtung musste die Antenne jeweils manuell anders montiert werden.



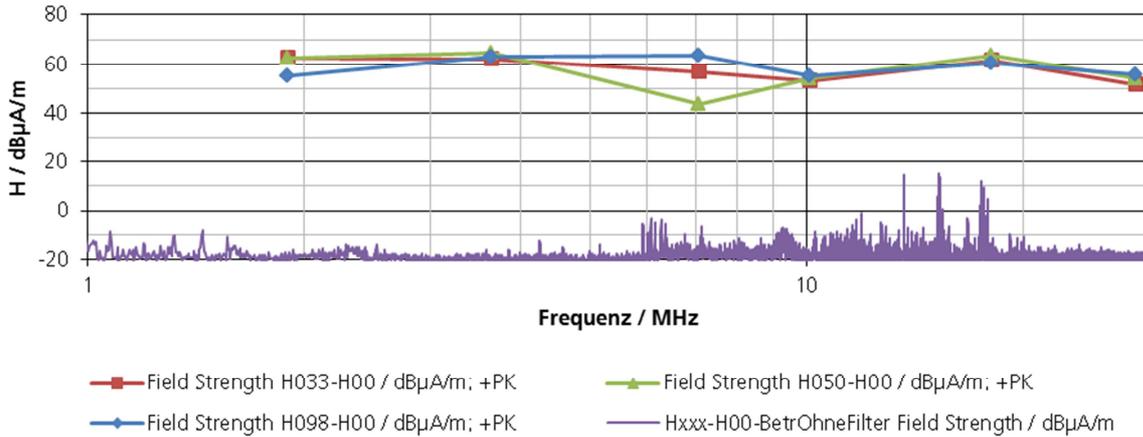
**Bild 6:** Untersuchte PV-Anlagen; Dachanlage auf Scheune, Solarbaum, Aufdachanlage an einem Einfamilienhaus

Anlage	Leistung / kWp	Anzahl Strings	Anzahl Wechselrichter
Scheune	14,62	6	3
Einfamilienhaus	5,04	2	1
Solarbaum	2,2	2	2

**Tabelle 1:** Kenndaten der untersuchten PV-Anlagen

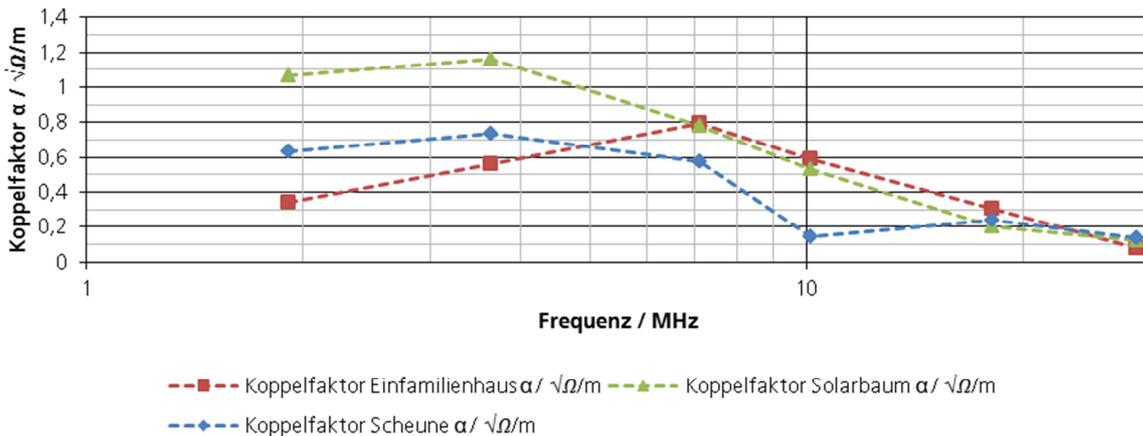
Der Signal-Rauschabstand bei den Sendeversuchen war selbst bei horizontaler Ausrichtung der Rahmenantenne besser als 40 dB (siehe Bild 7), da mit einer Leistung von teilweise über 10 W gesendet wurde. Die dargestellte Messung fand an der PV-Anlage auf der Scheune statt, wobei die Messung des elektromagnetischen Umfelds in diesem Fall

während des Betriebs der PV-Anlage unter Umgehung des sonst installierten zusätzlichen EMV-Filters erfolgte. Die Messungen mit Einspeisung des HF-Signals wurde an sechs Amateurfunkfrequenzen und auf drei unterschiedlichen Antennenhöhen (3,3 m, 5 m und 10 m) durchgeführt, was in der Abbildung durch unterschiedliche Farben und Markierungen dargestellt ist. Vor jeder Messung wurde mit abgeschaltetem Signalgenerator das Spektrum der Umgebungsfeldstärke automatisch erfasst.



**Bild 7:** Vergleich des Umgebungsspektrums mit dem Sendepiegel zur Bestimmung des Koppelfaktors

### 4.3 Ergebnisse Koppelfaktor



**Bild 8:** Koppelfaktoren der drei vermessenen PV-Anlagen

Die ermittelten frequenzabhängigen Koppelfaktoren der drei PV-Anlagen wurden gemäß den oben dargestellten Festlegungen ermittelt und sind in Bild 8 dargestellt. Typisch für diese Koppelfaktoren ist ein Rückgang bei höheren Frequenzen, der dadurch zustande kommt, dass einerseits bei höheren Frequenzen am Antennenort der Übergang zum Fernfeld auftritt und andererseits, dass die Geometrie des PV-Generators mit steigender Frequenz groß gegenüber der Wellenlänge wird.

In CISPR wurden vor Durchführung der Messungen bereits Simulationen typischer PV-Anlagenkonfigurationen diskutiert. Die im Rahmen der Studie vermessenen Anlagen konnten diesen Simulationen zugeordnet und mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Hierbei zeigte sich, dass bei realen Anlagen die Koppelfaktoren etwas geringer ausfallen, als in der jeweiligen Simulation. Dies kann zum einen darauf zurück

zu führen sein, dass Unterschiede zwischen den Geometrien der Simulationsmodelle und den real vermessenen Anlagen bestanden, zum anderen wurde bei den Simulationen das Gebäude mit seinen elektromagnetischen Eigenschaften nicht berücksichtigt. Auch die Zuleitung über Erdkabel (Solarbaum) beeinflusst das Messergebnis durch zusätzliche Leitungsverluste. Da der Antennenmast nur auf eine Höhe von 3,3 m eingefahren werden konnte, wurde das Maximum der magnetischen Feldstärke nicht immer vollständig erfasst, dies könnte jedoch durch nachträgliche Anpassung der Simulation nachgebildet werden. Tendenziell zeigen die Messungen jedoch ein mit den Simulationen vergleichbares Verhalten.

## **5 Schlussfolgerungen und Ausblick**

CISPR hatte einen Aufruf zur Durchführung von Messungen zum Störaussendungsverhalten von Photovoltaik-Wechselrichtern und -anlagen an alle Mitgliedsländer gestellt, um die Arbeiten an der Entwicklung eines Störmodells für diese Objekte zu unterstützen. Die deutsche Bundesnetzagentur war dem Aufruf gefolgt und hatte eine entsprechende Studie in Auftrag gegeben.

Im Rahmen des gegebenen Umfangs der Studie wurden insgesamt drei Anlagen unterschiedlichen Typs untersucht. Die hier präsentierten Messergebnisse haben das CISPR-Modell sowie die bei CISPR durchgeführten Simulationen verifiziert, damit erscheinen auch die vorgeschlagenen leitungsgebundenen Grenzwerte für PV-Anlagen sinnvoll.

Durch die bei der Durchführung der Messungen gewonnene Erfahrung und die erfolgte Umsetzung eines softwaregesteuerten Messablaufs ist die Grundlage für entsprechende zukünftige Messkampagnen unter optimierten Bedingungen geschaffen. Zur Erweiterung der Datengrundlage wären weitere Messungen an verschiedenen Standorten, Anlagenkonfigurationen und Jahreszeiteinflüssen wünschenswert.

## **6 Danksagung**

Wir danken der Bundesnetzagentur, die uns die Durchführung der Studie ermöglicht hat. Weiterhin möchten wir uns bei der Bundesnetzagentur für die Bereitstellung des Messwagens und die fachliche und technische Unterstützung durch das Team der Bundesnetzagentur, Außenstelle Hannover bedanken. Weiterer Dank gilt den Inhabern der drei untersuchten PV-Anlagen, die uns die Möglichkeit gegeben haben, an ihren Anlagen die Messungen durchführen zu können.

## **Literaturangaben**

- [1] CISPR/H/3xy/DC interner Entwurf CISPR Technical Report 16-4-4, 28.11.2016
- [2] T. Kootz: „Calculation of the coupling factors for the Magnetic Field of PV power generating systems and finding final factors for some dedicated installations“ in CISPR H Rundschreiben CIS/H/WG1 TF-GCPC/16-02/INF/
- [3] Keysight Technologies: "Impedance Measurement Handbook," 2015.
- [4] C. Bendel, P. Funtan, T. Glotzbach, J. Kirchhof, G. Klein: „Ergebnisse aus dem Projekt OPTINOS – Defizite und Unsicherheiten bei Prüfprozeduren von Photovoltaik-Stromrichtern“, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008

- [5] J. Kirchhof, D. Geibel: „EMV-Unverträglichkeiten zwischen Elektrizitätszählern und Stromrichtern“, Seminar „Power Quality – Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“, <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-133083.html>, Steinbeis-Transferzentrum an der Hochschule Mannheim, Mannheim, 2011
- [6] C. Bendel, P. Funtan, J. Kirchhof, D. Nestle: „Wechselrichterwechselwirkungen – Testergebnisse aus dem Forschungsprojekt SIDENA“, 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2004