

Grenzwertlücke - Wechselrichter stört Elektrizitätszähler

Jörg Kirchof, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IWES, Bereich Anlagentechnik und Netzintegration, Kassel, Germany

1 Einführung

Photovoltaik-Wechselrichter und elektronische Elektrizitätszähler werden normgerecht bezüglich Störaussendung und Störfestigkeit geprüft und werden erst dann in Verkehr gebracht, wenn die für das jeweilige Produkt geltenden Normen eingehalten werden. Dennoch hat es beim Betrieb von elektronischen Elektrizitätszählern in Verbindung mit einigen PV-Wechselrichtern Funktionsstörungen bei der Erfassung des eingespeisten Netzstroms gegeben. Ein Zähler erfasste weniger als 82 % der tatsächlich vom Wechselrichter ins Netz eingespeisten Energie [1], [2]. Der betreffende Zähler wurde in der Zählerprüfstelle überprüft und zeigte dabei keinerlei Mängel. Untersuchungen des IWES haben ergeben, dass die beobachtete Funktionsstörung dann auftritt, wenn der angeschlossene Wechselrichter einen relativ hohen taktfrequenten Ripplestrom über den Zähler in das Niederspannungsnetz einspeist. Der taktfrequente Ripplestrom liegt bei den meisten Wechselrichtern im normativ nicht regulierten Frequenzbereich zwischen 3 kHz und 150 kHz [3] [4] [5]. Auch für Elektrizitätszähler liegen in diesem Frequenzbereich keine Störfestigkeits-Anforderungen vor. IWES hat ein spezielles Störfestigkeits-Prüfverfahren für Elektrizitätszähler entwickelt, welches die Nachbildung realistischer Gegentakt-Störströme ermöglicht. Untersuchungen am normgerechten Störaussendungs-Messplatz für leitungsgebundene Störungen haben ergeben, dass die verwendete AC-Netznachbildung im Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 150 kHz eine sehr hohe Gegentakt-Impedanz im Bereich von 10 Ohm bis 100 Ohm aufweist. Im IWES wurde eine Modifikation für die Netznachbildung vorgeschlagen, um niedrige Netzimpedanzen zu simulieren.

2 Beeinflussung von Zählern durch Wechselrichter

Bei einigen Photovoltaik-(PV)-Anlagen wurden widersprüchliche Messergebnisse bei Elektrizitätszählern und dem in der PV-Anlage aufgezeichneten Energie-Monitoring Daten festgestellt. Diese fragwürdigen Messergebnisse traten bei Anlagen mit bestimmten elektronischen Elektrizitätszählern auf. Die betroffenen Elektrizitätszähler waren durch die PTB für Abrechnungszwecke und als Einspeisezähler zugelassen und kalibriert. IWES führte an betroffenen Anlagen Vorort-Untersuchungen durch, wobei eine Anlage über eine Woche hindurch vermessen wurde. Ein Vergleich zwischen dem Zählergebnis des Elektrizitätszählers und der IWES-Messung zeigte,

dass der Elektrizitätszähler nur etwa 82 % der tatsächlich eingespeisten Energie erfasst hatte. Zusätzliche EMV-Messungen zeigten starke hochfrequente Störsignale auf den AC-Leitungen des Wechselrichters mit einer hohen Störstrom-Amplitude im Frequenzbereich der Taktfrequenz des Wechselrichters (siehe Abbildung 1, links).

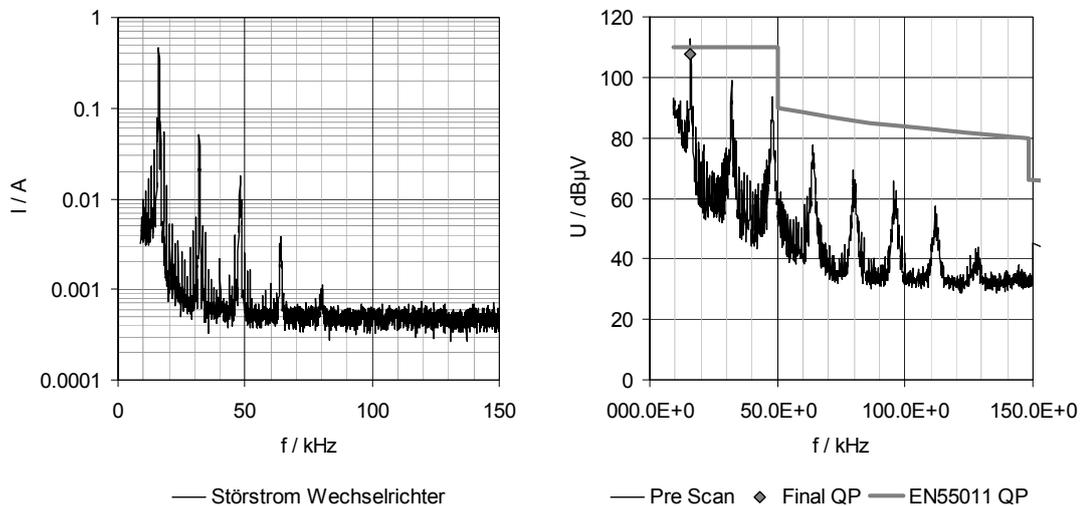


Abbildung 1 Links: Vorortmessung an einer PV-Anlage mit gestörtem Elektrizitätszähler. Es ist der Störstrom auf einer AC-Leitung des Wechselrichters dargestellt. Rechts: Normgerecht gemäß EN55011 gemessene EMV-Störspannung des betroffenen Wechselrichters. Max.-Peak Vormessung mit nachfolgender Quasipeak Nachmessung

Weiterführende Untersuchungen wurden im EMV-Labor des IWES durchgeführt. Hier wurde ein Wechselrichter und ein Elektrizitätszähler vom gleichen Typ wie bei der betroffenen Anlage verwendet. Bei einer normgerechten Messung der Störspannung des Wechselrichters nach EN 55011 zeigte sich, dass der Wechselrichter die Grenzwerte der Störspannung für Induktionskochfelder zwischen 9 kHz und 150 kHz einhält. Die Störspannungen oberhalb von 150 kHz bis 30 MHz lagen ebenfalls unter den gültigen Grenzwerten. Bei einem weiteren Experiment wurden Wechselrichter und Elektrizitätszähler an einem sehr niederohmigen synthetischen Netz (Spitzenberger + Spies 15 kVA Anlage mit Parallelkapazität) betrieben. Bei dieser Untersuchung zeigte der Zähler nach Abschluss des Tests nur eine Energiemenge von 500 Wh an, während ein ebenfalls angeschlossener Referenzzähler (KOCOS METES) sowie ein Leistungsanalysator (Norma 5000) jeweils eine Energiemenge von 1230 Wh ermittelten. Die Messung des auftretenden Störstroms zeigte, dass der Wechselrichter neben dem 50-Hz-Strom einen Störstrom von etwa 1 A bei seiner Taktfrequenz von etwa 16 kHz über den Zähler in das synthetische Netz einspeiste.

3 Defizite der Normung

Der sichere und ungestörte Betrieb von Funkdiensten und elektrischen Betriebsmitteln ist das Hauptziel der EMV-Normung. Dies wird erreicht durch Begrenzung der Störaussendung und Störfestigkeitsanforderungen, die gegenüber den zu erwartenden Störpegeln einen Sicherheitsabstand aufweisen.

Bei PV-Wechselrichtern werden bisher die Fachgrundnormen für Wohnbereich und Industriebereich angewendet, da es keine EMV-Produktnorm für diese Produktfamilie gibt. Seitens der Produktkomitees bestand bisher kein Bedarf an einer eigenen EMV-Norm, da die Fachgrundnormen bisher im vollen Umfang auf die PV-Wechselrichter angewendet werden konnten. In den Fachgrundnormen sind AC-Störaussendungsgrenzwerte für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 2 kHz definiert. Die hochfrequenten Störaussendungen werden im Bereich zwischen 150 kHz und 30 MHz normativ begrenzt. Jedoch wurde das EMV-Verhalten in der Frequenzlücke zwischen 3 kHz und 150 kHz in den Fachgrundnormen und den meisten Produktfamilien-Normen bisher nicht geregelt.

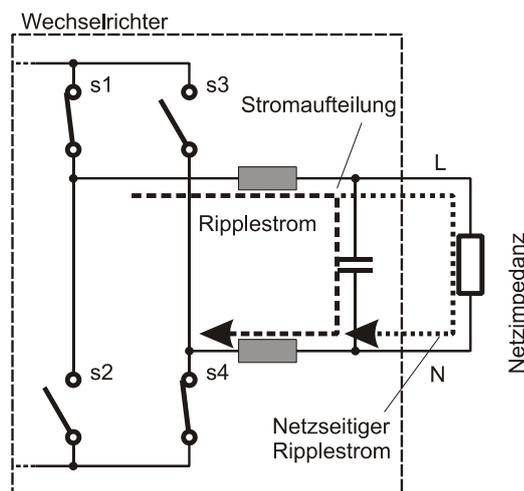


Abbildung 2 Störstrom-Aufteilung zwischen Netzimpedanz und X-Kondensator eines Wechselrichters

Als Folge dieser Grenzwertlücke erzeugen viele Wechselrichter hohe Störpegel innerhalb dieses normativ nicht geregelten Frequenzbereichs. Hauptverursacher der Störungen ist die Taktfrequenz der Wechselrichterbrücke und deren Harmonische, die meist genau in den Bereich der Grenzwertlücke fallen (siehe Abbildung 1, rechts). Für spezielle Produktgruppen, wie z. B. Induktionskochfelder (EN55011) oder Geräte mit Powerline-Kommunikation (EN50065) gibt es zwar auch innerhalb dieses Frequenzbereichs Störaussendungsgrenzwerte, aber diese werden nicht auf PV-Wechselrichter bzw. primär getaktete Leistungselektronik angewendet.

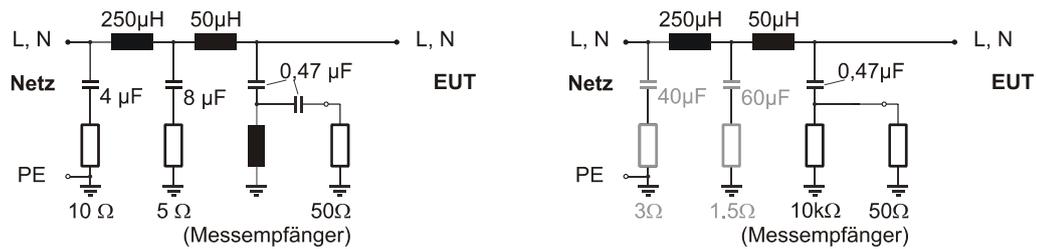


Abbildung 3 Links: Netznachbildung für Messungen gemäß EN 55011. Rechts: EN 50065 Netznachbildung für Frequenzen zwischen 3 kHz und 9 kHz

3.1 Ungenügende Störaussendungs-Norm

Viele PV-Wechselrichter wenden für ihre getaktete Leistungselektronik Schaltfrequenzen zwischen 3 kHz (meist bei großen Zentralwechselrichtern mit IGBT-Schaltern) und einigen 10 kHz [6] an. Diese Schaltfrequenz und deren Oberschwingungen können unerwünschte leitungsgebundene Störpegel im elektrischen Niederspannungsnetz hervorrufen. Die Fachgrundnorm EN 61000-6-3 (Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe) deckt den Frequenzbereich dieser Störungen nicht ab. Dennoch beschrieben andere EMV-Normen EMV-Tests innerhalb des Frequenzbereichs zwischen 3 kHz bzw. 9 kHz und 150 kHz. In CISPR 11 / EN 55011 existieren Anforderungen für Induktionskochfelder, welche ebenso wie PV-Wechselrichter mit getakteter Leistungselektronik betrieben werden. Die klassische CISPR Netznachbildung mit einer Impedanz von $50\ \Omega$ parallel zu $5\ \Omega + 50\ \mu\text{H}$ (Abbildung 3) wird für diese Prüfungen angewendet. Eine andere Norm (EN 50065) schreibt Messungen im Bereich zwischen 3 kHz und 150 kHz in Verbindung mit modifizierten CISPR-Netznachbildungen vor. Zwei verschiedene Modifikationen werden dort vorgeschlagen. Die erste Modifikation beinhaltet große Erdkapazitäten und eine Impedanz von $50\ \Omega$ parallel zu $1,5\ \Omega + 50\ \mu\text{H}$ um die Frequenzerweiterung zwischen 3 kHz und 9 kHz abzudecken (siehe Abbildung 3, rechts). Eine alternative Modifikation verwendet ein Zusatz-Netzwerk, welches parallel zur klassischen AC-Netznachbildung angeschlossen wird (Abbildung 4, links). Dieses Netzwerk erzeugt ein realistischeres niederohmiges Verhalten im Vergleich zu typischen Netz-Impedanzen und besteht aus einer R-L-C-Reihenschaltung von $33\ \mu\text{F}$, $80\ \mu\text{H}$ und $1\ \Omega$, aber dieses Netzwerk ist nicht für normative Prüfungen vorgesehen.

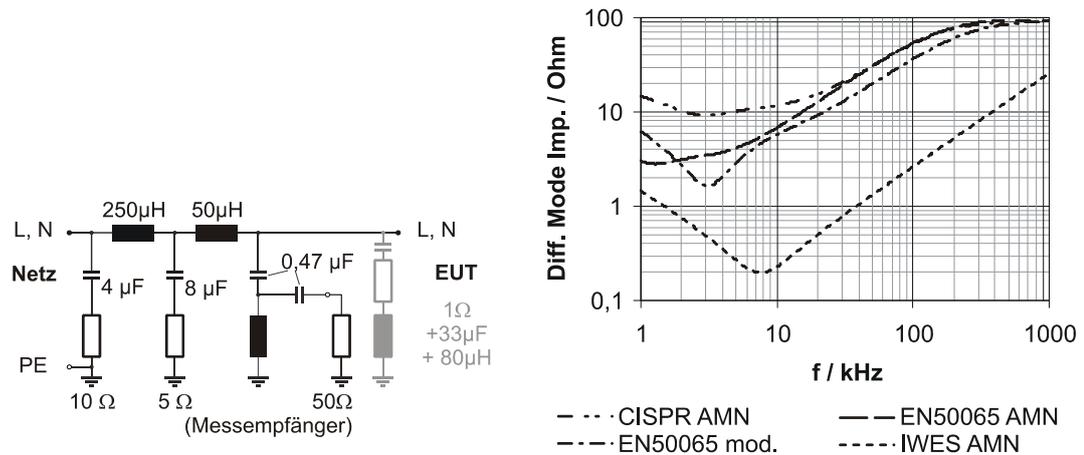


Abbildung 4 Links: Modifizierte CISPR Netznachbildung gemäß EN 50065 mit realistischem Impedanzverlauf (informativ). Rechts: Gegentakt-Impedanzen verschiedener Netznachbildungen (simuliert)

Zwischen 3 kHz und 150 kHz erzeugen die meisten Wechselrichter Gegentakt-Störströme, welche wegen der Spannungsquellen-Charakteristik der internen Störquelle in Verbindung mit dem großen X-Kondensator im Wechselrichter (Abbildung 2) oft nur in niederohmigen Netzen in Erscheinung treten. Die klassische CISPR Netznachbildung besitzt jedoch eine sehr hohe Gegentakt-Impedanz, welche im betrachteten Frequenzbereich zwischen 10 Ω und 100 Ω liegt (siehe Abbildung 4, rechts). Als Folge der Spannungsquellen-Charakteristik der Wechselrichter-internen Störquelle kann der Wechselrichter durchaus die Spannungs-Grenzwerte für Induktionskochfelder einhalten. Dennoch kann der gleiche Wechselrichter an niederohmigen Netzen (in der Nähe des Mittelspannungstransformators oder in Netzen mit verteilten kapazitiven Lasten / Schaltnetzteilen) hohe Gegentakt-Störströme in das Netz einspeisen, da es im Wechselrichter zu einer Stromteilung zwischen internem X-Kondensator und niederohmiger Netzimpedanz kommt. Viele Wechselrichter werden an niederohmigen Netzen betrieben und PV-Anlagen, welche die Leistungsgrenzen für Niederspannungs-Netzanschlüsse von 5 kW pro Phase überschreiten, werden über eigene Mittelspannungs-Transformatoren angeschlossen. In all diesen Fällen ist die Netzimpedanz wesentlich niederohmiger als die Gegentakt-Impedanz der klassischen CISPR-Netznachbildung und die beschriebenen hohen Störströme können unter diesen Bedingungen tatsächlich auftreten.

3.2 Defizite der Störfestigkeits-Normung

Die Störfestigkeitsanforderungen für Elektrizitätszähler gemäß EN 50470 und EN 62052.11 schreiben bisher keine Prüfungen im Frequenzbereich unterhalb von 150 kHz vor. Einige Grundnormen (EN 61000-4-16) beinhalten Prüfaufbauten für diesen Frequenzbereich, jedoch wird dort nur ein Prüfpegel von maximal 200 mA bei maximal 30 V Leerlaufspannung gefordert, was gegenüber realistischen Störströmen

bis 1 A viel zu niedrig ist (siehe Abbildung 1, links). Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass diese Prüfvorschriften nur Gleichtakt-Prüfpegel einkoppeln. Gleichtakt-Störungen in Leitungen werden meist durch elektromagnetische Felder in der Leitung induziert. Leitungsgebundene Gegentakt-Störquellen werden bei dieser Betrachtung völlig vernachlässigt. Gleichtakt-Störungen haben insbesondere bei niedrigen Frequenzen oft nur geringe Wirkung auf Geräte, welche selbst keinen PE- oder Erd-Anschluss aufweisen, da nur die Erd-Impedanz anderer Geräteanschlüsse (über 150-Ohm-Netzwerke mit Erde verbunden) und die Streukapazität des Gerätes zu einem HF-Strom in das Gerät führen, der dann Fehlfunktionen verursachen kann. Im Gegensatz zu den üblichen EMV-Normen erzeugen die oben beschriebenen Wechselrichter erdsymmetrische Störströme. In diesem Fall fließt der Störstrom durch den elektronischen Elektrizitätszähler, wodurch eine starke Störbeeinflussung des Strom-Messzweigs des Elektrizitätszählers auftreten kann. Wenn zusätzlich eine Gegentakt-Spannung am Elektrizitätszähler auftreten kann, können zusätzlich die Spannungs-Messschaltkreise beeinflusst werden.

4 Neuer Ansatz für den Störaussendungstest

Die bisherigen EMV Störaussendungstests berücksichtigen im Frequenzbereich zwischen 3 kHz und 150 kHz bisher nicht ausreichend die speziellen Störaussendungseigenschaften der PV-Wechselrichter. Die klassische CISPR Netznachbildung weist zu hohe Gegentakt-Impedanzen auf und führt aufgrund des Spannungsquellen-Verhaltens der internen Störquellen in Wechselrichtern dazu, dass manche Geräte die EMV-Prüfung bestehen und dennoch im niederohmigen Netz hohe Störströme produzieren können. Eine Messung von Störspannungen oder Störströmen an niederohmigen Netznachbildungen ist erforderlich, wenn eine Beeinflussung von elektronischen Elektrizitätszählern künftig vermieden werden soll. Die EN 50065 zeigt eine Möglichkeit, wie die Gegentakt-Impedanz durch Hinzufügung eines Parallel-Netzwerks reduziert werden kann (siehe Abbildung 4). Simulationen der Impedanz zeigen, dass die gemeinsame Gegentakt-Impedanz von Netznachbildung und Modifizierungs-Netzwerk gemäß EN 50065 im Bereich 9 kHz – 150 kHz immer noch hoch ist und nicht zu realistischen Gegentakt-Strömen führen wird.

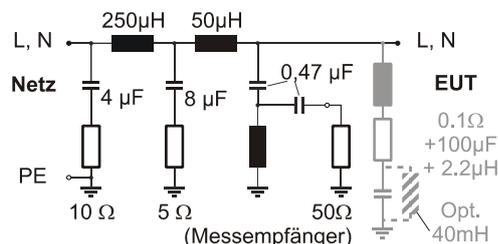


Abbildung 5 IWES Vorschlag für eine modifizierte CISPR Netznachbildung

IWES hat ein alternatives Modifizierungs-Netzwerk simuliert, welches eine bessere Näherung an niederohmige Netze darstellt. Es liefert eine Impedanz, welche beginnend mit 0,2 Ohm bei 9 kHz einen induktiven Verlauf aufweist. In dieser angenäherten Kurzschluß-Situation kann die Störquelle des Wechselrichters ihren Kurzschluß-Strom liefern, welcher mit Hilfe einer Stromzange auf jeder einzelnen Leitung des Wechselrichters geprüft werden kann. Alternativ ist die Messung des Spannungsabfalls an der Impedanz der Netznachbildung mit angepassten Grenzwerten möglich. Das Netzwerk weist auch für die 50-Hz-Netzspannung eine relativ niedrige Impedanz auf, daher kann durch Einfügung einer Kompensations-Induktivität (40 mH + 1 Ohm) parallel zum 100 µF Kondensator des Netzwerkes ein auf 55 Hz abgestimmter Sperrkreis realisiert werden um die kapazitive Belastung des Netzes bei 50 Hz und 60 Hz zu verringern. Hierdurch kann der kapazitive Netzstrom von 20A auf 5A reduziert werden. Die hohen Schwingkreis-Ströme sind bei der Auslegung der Bauelemente zu berücksichtigen.

Für dieses Netzwerk müssen neue Grenzwerte festgelegt werden, um die Störströme auf Werte zu begrenzen, die verträglich mit den vom Störstrom durchflossenen elektronischen Elektrizitätszählern sind. Eine Anpassung des ohmschen Anteils dieses Netzwerkes ist möglich, um sowohl das Störverhalten von hochohmigen Quellen als auch das Störverhalten von niederohmigen Quellen ausreichend zu erfassen. Unglücklicherweise verändert das Modifizierungsnetzwerk das Verhalten der klassischen Netznachbildung derart, dass die CISPR-Impedanz erst oberhalb von 4 MHz wieder erreicht wird. Aus diesem Grund kann das Modifizierungsnetzwerk nicht bei normgerechten Prüfungen oberhalb von 150 kHz angewendet werden. Bei Bedarf muss daher das Modifizierungsnetzwerk abschaltbar ausgeführt sein, wenn die modifizierte Netznachbildung auch für herkömmliche EMV-Tests oberhalb 150 kHz weiterverwendet werden soll. IWES wird Labormuster der beschriebenen Modifikationsnetzwerke aufbauen und das Verhalten verschiedener Wechselrichter an dieser Netznachbildung erproben. Neue Grenzwerte werden zukünftig erarbeitet und die Untersuchungsergebnisse sollen veröffentlicht werden.

5 Neuer Störfestigkeitstest für elektronische Elektrizitätszähler

Im IWES wurde ein neuer Störfestigkeits-Prüfaufbau entwickelt, der Gegentakt-Störströme im Frequenzbereich von 9 kHz bis 1 MHz erzeugen kann (siehe Abbildung 6). Der Prüfaufbau besteht aus einem HF-Breitband-Verstärker, einem speziellen Koppel-Netzwerk mit einem HF-Leistungs-Anpassungsübertrager sowie einem HF-Signalgenerator. Die Signalquelle speist einen synthetischen Störstrom in die Leitungen des Energiezählers. Gleichzeitig wird ein Leistungsanalysator oder in Prüfzähler als Referenz für die Energiemessung verwendet. Die Messzweige von Energiezähler und Referenzinstrument werden mit einer AC-Quelle verbunden und erfassen die Wirkenergie, welche an die ebenfalls angeschlossene AC-Last abgegeben wird. AC-Quelle und AC-Last sind für den hochfrequenten Störstrom kapazitiv überbrückt um für das synthetische Störsignal einen niederohmigen Störpfad bereit-

zustellen. Die Prüfung wird über eine Software gesteuert und realisiert einen Frequenz-Sweep über den gesamten Frequenzbereich des Prüfaufbaus. Eine optionale Modulation des Prüfstroms ist bei Bedarf möglich. Die vor dem Test durchgeführte Signal-Kalibrierung sorgt für einen reproduzierbaren Prüfpegel. Wechselrichter erzeugen ein Störspektrum, welches mit steigender Frequenz sinkt. Dies wird im Prüfprogramm durch frequenzabhängige Umschaltung auf verschiedene Prüfpegel berücksichtigt. Die Messung des Elektrizitätszählers kann wahlweise durch Auswertung der S0-Schnittstelle oder durch optische Überwachung der Anzeige-LED erfolgen. Die hieraus gewonnenen Impulse werden über einen digitalen Ereigniszähler ausgewertet. Es ist auch möglich, die Pulsfrequenz oder die Puls-Periodendauer zu erfassen.

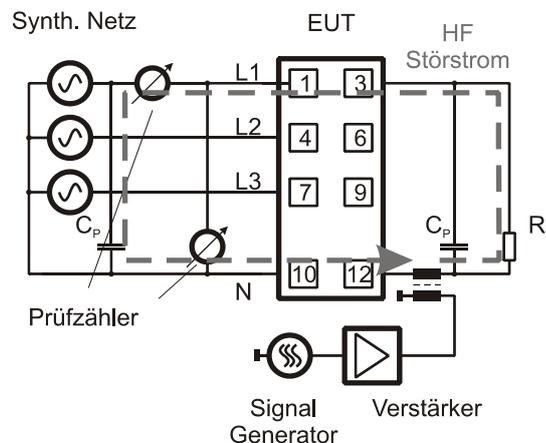


Abbildung 6 IWES Störfestigkeits-Test für Elektrizitätszähler

6 Zusammenfassung und Perspektiven

Die Untersuchungen des IWES haben ergeben, dass PV-Wechselrichter unter bestimmten Bedingungen elektronische Elektrizitätszähler beeinflussen können. Hochfrequente Rippleströme können bei einzelnen elektronischen Elektrizitätszählern zu deutlich fehlerhaften Abrechnungsergebnissen führen. Dies wurde an existierenden PV-Anlagen wie auch durch Laboruntersuchungen bestätigt. Die Ursache für diesen Störfall ist das gleichzeitige Fehlen von Störfestigkeitsanforderungen und Störaussendungsgrenzwerten in einem Frequenzbereich, in dem starke Störungen entstehen können. Diese Störbeeinflussung kann zukünftig nur dann verhindert werden, wenn die EMV-Grenzwertlücke geschlossen wird. IWES arbeitet an dieser Fragestellung und speist aktuelle Untersuchungsergebnisse in nationale und internationale Gremien ein. Es besteht derzeit Kontakt zum BDEW und zur PTB. Die Untersuchungen fanden innerhalb des Forschungsprojekts OPTINOS (Untersuchungen und Optimierung von Prüf- sowie Testprozeduren zur Qualitätssicherung und Normenharmonisierung an Photovoltaik-Stromrichtern) statt. Das Projekt wird gefördert durch das BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) und

EMV 2010, Düsseldorf, 09.-11.03.2010

durch beteiligte Industriepartner. Förderkennzeichen 0327576. Der Autor ist verantwortlich für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

7 Literatur

- [1] Kirchhof, Klein: „EMV - Grenzwertlücke – Wechselrichter stört Zähler“, 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2009
- [2] Kirchhof, Klein: “Results of the OPTINOS project – Deficits and uncertainties in photovoltaic inverter test procedures”, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2009
- [3] Kirchhof et. al.: “Ergebnisse aus dem Projekt OPTINOS – Defizite und Unsicherheiten bei Prüfprozeduren von Photovoltaik-Stromrichtern”, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008
- [4] Degner et. al.: “EMC and Safety Design for Photovoltaic Systems - ESDEPS - Publishable Final Report”, ISET, 2002
- [5] Kirchhof: “EMV-Grenzwerte, -Messverfahren und -Messergebnisse für PV“, EMV und Blitz- und Brandschutz für Solaranlagen, Fachseminar Technologie-Kolleg OTTI, 04.-05.12.2007
- [6] Schmidt, Burger: “EMV – gerechtes Geräte- und Anlagendesign“, EMV und Blitz- und Brandschutz für Solaranlagen, Fachseminar Technologie-Kolleg OTTI, 05.-06.11.2008