Sicherheitsaspekte bei Einsatz und Prüfung von transformatorlosen Wechselrichtern – Ergebnisse aus dem Projekt SIDENA

Dr. C. Bendel, P. Funtan, J. Kirchhof, G. Klein,
Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e.V.
Königstor 59, D-34119 Kassel
Tel.: (0561) 7294-254, Fax: (0561) 7294-200
E-Mail: info@sidena.de
Internet: http://www.sidena.de; http://www.iset.uni-kassel.de

1 Einleitung

Transformatorlose Wechselrichter bieten neben dem Vorteil eines geringen Gewichts meist hohe Wirkungsgrade und einen einfachen und daher kostengünstigen Aufbau. Beim Betrieb trafoloser Wechselrichter ist die DC-Seite vieler Geräte mit einer Wechselspannung überlagert, die durch eine „Umpolung“ des Solargenerators beim Wechsel zwischen positiver und negativer Halbwelle der Netzspannung erzeugt wird. Die Wechselspannungsüberlagerung nimmt bei unterschiedlichen Wechselrichterkonzepten unterschiedliche Formen an und kann teilweise stark von der Sinusform der Netzspannung abweichen [1]. Liegt diese an den Solargenerator-Anschlüssen vorliegende Wechselspannung über einer Kapazität an, so sind kapazitive Ableitströme die Folge. Die Größe der Ableitströme ist abhängig von der Größe der Kapazität und vom Oberschwingungsgehalt bzw. dem transienten Verhalten (du/dt) der Spannung. Auftretende Kapazitäten sind dabei z. B. die Y-Kondensatoren im Wechselrichter, die Erdkapazität des Solargenerators (Bild 1) sowie die Berührkapazität, die auftritt, wenn eine Person die isolierte Oberfläche eines Solarmoduls berührt.

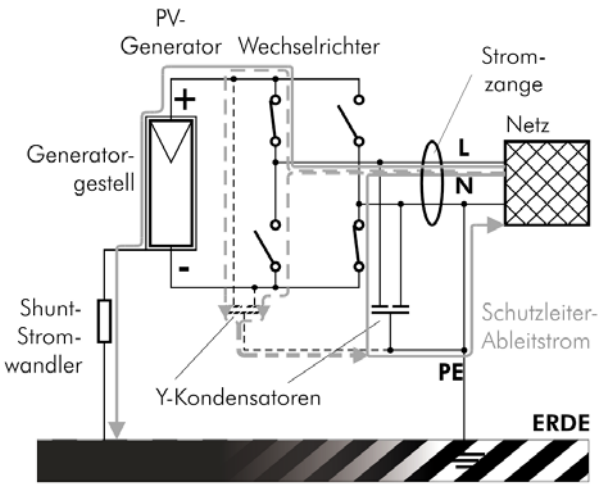

Bild 1: Der Solargenerator verfügt über Erdkapazitäten, die hauptsächlich durch die Modulrahmenkapazität gebildet wird

2 Untersuchungsergebnisse

2.1 Kapazitive Ableitströme am Solargenerator

Jeder Solargenerator verfügt über Kapazitäten gegen Erde. Bei Berührung der Glasoberfläche stellen sich bei allen untersuchten Modulen nur geringe Berührkapazitäten ein. Wird dagegen die Rückseite eines Glas-Folien-Moduls berührt, können Kapazitäten in der Größenordnung bis zu 2 nF wirksam werden. Bei bestimmten Wechselrichtern kann trotz dieser

kleinen Kapazität eine Berührung mit einer schmerzhaften Entladung verbunden sein [2], die unter Umständen zu einer ungewollten und gefährlichen Ausweichreaktion führt. Die Ableitströme bei Berührung der Solargenerator-Oberflächen wurden mit Hilfe einer metallischen Handnachbildung von 10 × 10 cm² Flächeninhalt gemessen. Zur Verfügung standen hierfür jeweils ein Solargenerator mit Glas/Glas-Modulen (AEG/ASE PQ-40) und ein Generator mit Glas/Folie-Modulen (Siemens SM-50). Die Handnachbildung befand sich auf der Rückseite des jeweiligen Moduls, was für Glas/Folie-Module eine „Worst-Case-Messung“ darstellt, denn die Modulrückseite ist bei vielen Anlagen gegen unbeabsichtigte Berührungen geschützt.

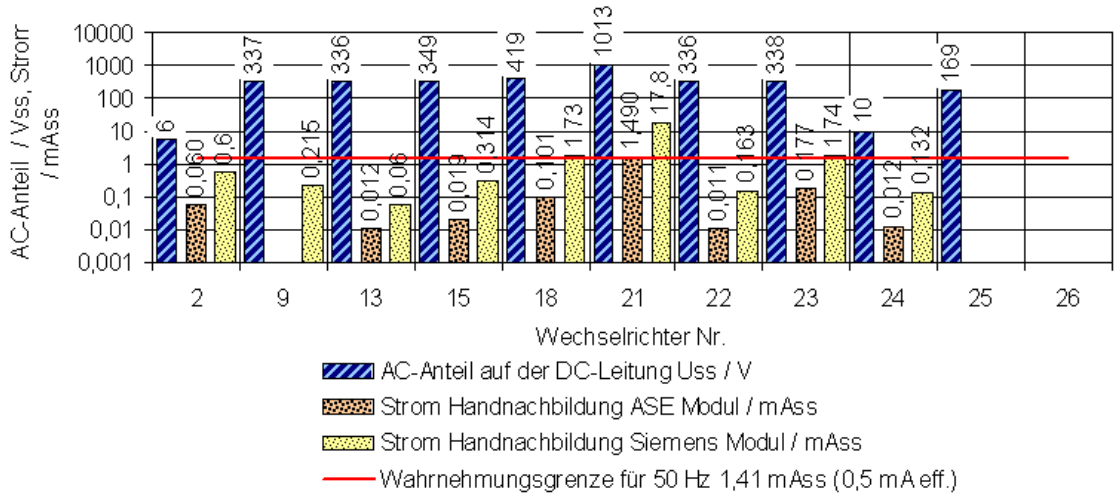

Bild 2: Erdstrom über eine an zwei Solargeneratoren angebrachten Handnachbildung in Abhängigkeit des verwendeten Wechselrichters. Bei einigen Wechselrichtern wird die Wahrnehmungsgrenze zwar überschritten, jedoch besteht keine Grenzwertverletzung

Bild 2 zeigt die auf dem ISET-Testfeld gemessenen kapazitiven Ableitströme, die bei Berührung eines einzelnen Solarmoduls auftreten können. Bei drei trafolosen Wechselrichtern liegt der kapazitive Ableitstrom oberhalb der Wahrnehmungsgrenze. Im Fall des Wechselrichters Nr. 21 war bei Berührung eine schmerzhafte Entladung spürbar, wenn die Rückseite des Moduls mit der Hand berührt wurde.

Neben der Berührkapazität tritt auch eine Rahmenkapazität der Einzelmodule auf. Diese liegt zwischen etwa 100 pF und 3600 pF [2]. Beim Zusammenschalten zu einer Anlage, addieren sich die einzelnen Rahmenkapazitäten, sobald die Rahmen leitfähig miteinander verbunden werden. Ein 5-kW-Generator könnte beispielsweise aus 100 Stck. SM-50 Modulen bestehen, die insgesamt eine Rahmenkapazität von 0,35 µF aufweisen. Liegt über dieser Kapazität eine Wechselspannung mit Netzspannungsamplitude, so kommt allein hierdurch ein Ableitstrom von ca. 25 mA_{eff} zustande. Ist dagegen die angelegte Spannung stark verzerrt, kann der Ableitstrom um Größenordnungen höher sein. Es ist daher der Ableitstrom bei Berührung des Solargenerators, sowie der Fehlerstrom, der über das geerdete Solargeneratorgestell abfließt, genau zu beachten.

Bild 3 zeigt die an einem Solargenerator mit 24 Glas/Folie-Modulen Siemens SM55 (Rahmenkapazität etwa 250 pF) auftretenden Ableit- und Fehlerströme, die in Abhängigkeit

des verwendeten Wechselrichters auftreten. Die Messung erfolgte gemäß Bild 1 und zeigt den Spitze-Spitze-Wert des jeweils gemessenen transienten Ableitstroms an der Gestellerdung sowie des netzseitigen Fehlerstroms an den Netzanschlüssen (L-N-Gleichtaktstrom) des Wechselrichters.

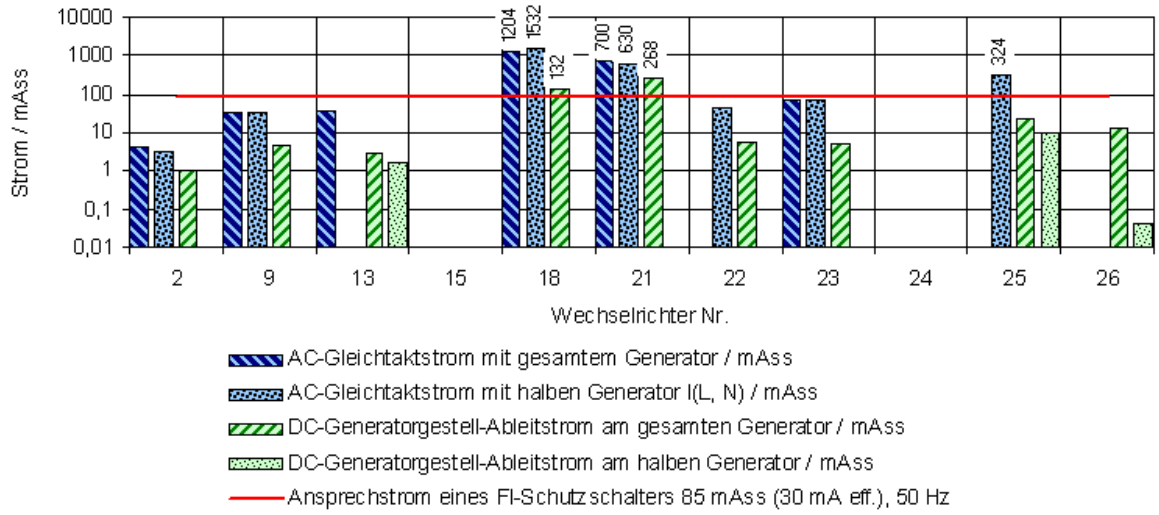

Bild 3: Gestellableitstrom und netzseitiger Fehlerstrom eines Generators in Abhängigkeit des verwendeten Wechselrichters

Die Wechselrichteruntersuchungen im Rahmen des Projekts SIDENA [3] haben gezeigt, dass je nach Wechselrichtertyp der gemessene Ableitstrom am geerdeten Solargenerator zwischen wenigen Milliampere und mehreren hundert Milliampere liegen kann (siehe Bild 3). Bild 4 stellt beispielhaft den kapazitiven Ableitstrom eines Wechselrichters mit Single Phase Chopping dar, der an der Erdung des PV-Generatorgestells gemessen wurde. Es treten Spitzenwerte von über 125 mA bei einem Effektivwert von etwa 10 mA auf. Anzumerken ist hierbei, dass das Gerät inzwischen nicht mehr produziert wird, jedoch sind noch Geräte dieses Typs in Betrieb.

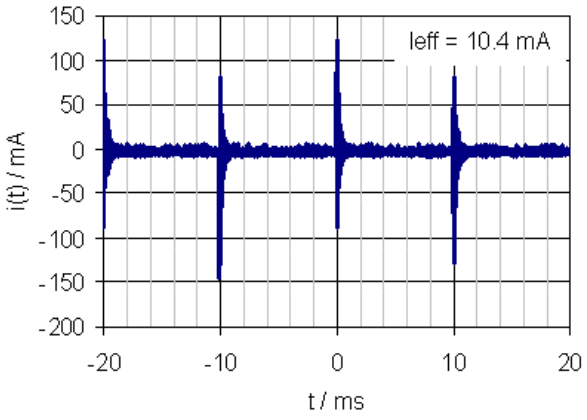

Bild 4: Generatorgestell Ableitstrom bei Wechselrichter Nr. 21

Es ist zu beachten, dass der verwendete Solargenerator mit 1,3 kWp für die meisten untersuchten Wechselrichter stark unterdimensioniert ist. Beim Betrieb an einem korrekt ausgelegten Solargenerator treten daher noch weitaus größere Ableitströme an der Generatorgestell-Erdung auf. Tritt eine Unterbrechung der Generatorerdung ein, so besteht bei einigen Wechselrichtern am Generatorgestell die Gefahr eines elektrischen Schlags. Bei den untersuchten Wechselrichtern wurden auch am Schutz leiteranschluss des Gerätes kapazitive Ableitströme festgestellt, die in

einigen Fällen die zulässigen Grenzwerte für ortsfeste Geräte überschreiten! Bei drei der untersuchten Wechselrichter fließt ein AC-seitiger Fehlerstrom, der oberhalb der Schaltschwelle eines FI-Schutzschalters liegt.

2.2 Kapazitive Ableitströme am Konstanter

Kapazitive Ableitströme finden auch bei Labormessungen statt, wenn der PV-Wechselrichter über einen Konstanter betrieben wird. Messungen an zwei Konstantern unterschiedlicher Topologie ergaben stark voneinander abweichende Erdkapazitäten des DC-Ausgangs.

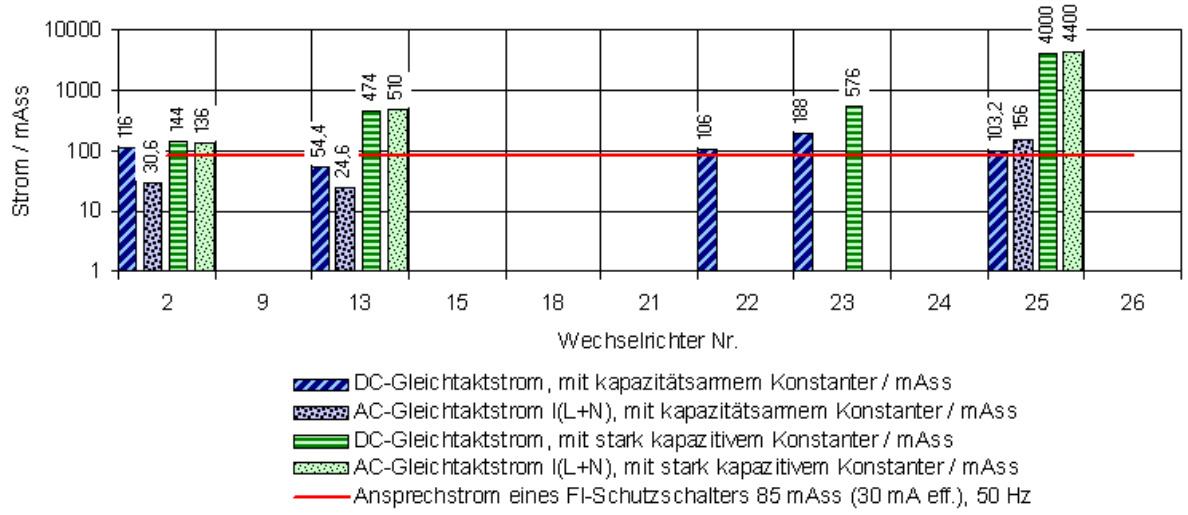

Bild 5: Kapazitive Ableitströme, wenn trafolose Wechselrichter an verschiedenen Konstantertypen betrieben werden

Der Konstanter mit linearer Regelung und Thyristor-Vorregelung verfügt bei einer Ausgangsleistung von 7 kW und einem Spannungsbereich von 0-650 V über eine Erdkapazität von 3,3 nF zwischen den DC-Anschlüssen und PE. Im Gegensatz hierzu hat der untersuchte Konstanter mit primär getaktetem Schaltnetzteil eine Erdkapazität von 1180 nF zwischen DC und PE, obwohl das Gerät nur 1500 W Ausgangsleistung bei einer Ausgangsspannung von 0-300 V zur Verfügung stellt.

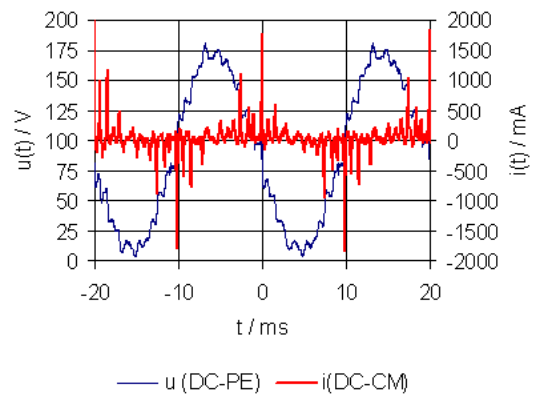

Bild 6: Konstanter-Ableitstrom und AC-Komponente auf der Gleichspannungsseite des Wechselrichters Nr. 25

Die hohe Erdkapazität, die bei dem getakteten Konstanter gemessen wurde macht sich insbesondere dann bemerkbar, wenn an den Gleichspannungsanschlüssen eine Wechselspannungsüberlagerung durch den Wechselrichter stattfindet. In diesem Fall kann ein unter Umständen sehr hoher kapazitiver Erdstrom durch den Konstanter fließen, der eine ungünstige Beeinflussung des vom Konstanter versorgten Wechselrichters hervorrufen kann.

Andererseits stellt der am Konstanter auftre-

tende und über den Schutzleiter abfließende Erdstrom ein Gefahrenpotenzial dar, weil bei Unterbrechung des Schutzleiters und gleichzeitiger Berührung des metallischen Konstantergehäuses, ein lebensgefährlicher Körperstrom durch die berührende Person fließen kann. Bild 5 zeigt die bei verschiedenen trafolosen Wechselrichtern auftretenden kapazitiven Fehlerströme auf der AC- und DC-Seite des Wechselrichters, wenn die Speisung wahlweise durch einen der beiden untersuchten Konstanter erfolgt. Bei fünf der untersuchten Wechselrichter treten Spitzenströme auf, die oberhalb der Ansprechschwelle eines FI-Schutzschalters liegen. Zur Verdeutlichung ist in Bild 6 ein gemessener Fehlerstrom als Zeitfunktion dargestellt. Zusätzlich wurde jeweils auch die an den DC-Anschlüssen des Wechselrichters auftretende Wechselspannung gegenüber Erdpotenzial aufgezeichnet. Wenn der Konstanter eine hohe Erdkapazität aufweist, sollte aus Sicherheitsgründen eine zusätzliche Schutzerdung des Konstanters durch ein Erdkabel großen Querschnitts angebracht werden, sobald hohe kapazitive Ableitströme zu erwarten sind.

2.3 Beeinflussung von EMV-Untersuchungen durch kapazitive Ableitströme

Es wurde eine Reihe von leitungsgebundenen Störemissionsmessungen an mehreren trafolosen PV-Wechselrichtern durchgeführt, wobei zum Vergleich sowohl der Konstanter mit niedriger Erdkapazität, als auch der Konstanter mit hoher Erdkapazität zur Versorgung verwendet wurde. Eine geerdete kapazitätsarme DC-Netznachbildung zwischen Konstanter und Wechselrichter verhinderte, dass der Konstanter durch hochfrequente Einstreuungen die Messergebnisse verfälschte.

Wird der Wechselrichter unter Laborbedingungen an einem Konstanter betrieben, so können, abhängig von der Erdkapazität des Konstanters und den Eigenschaften des Wechselrichters, die auftretenden DC-seitigen Ableitströme zu einer starken Beeinflussung insbesondere von EMV-Messungen führen, da induktive Entstörbauelemente aufgrund des auftretenden Gleichtaktstroms in die magnetische Sättigung geraten können.

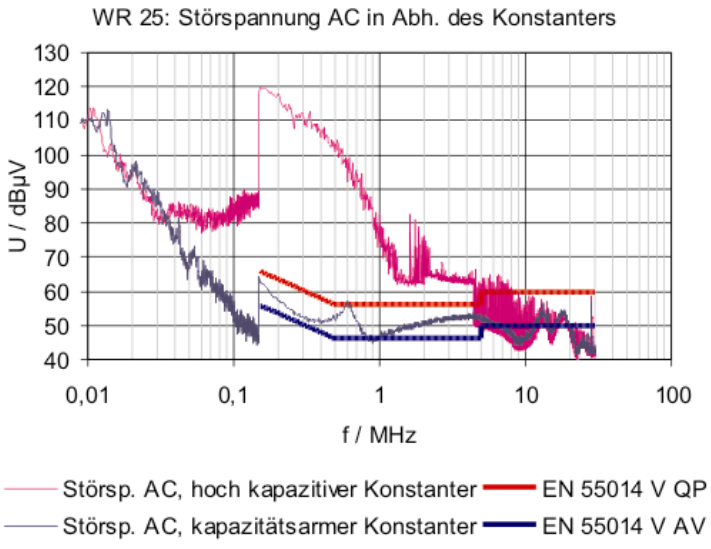

Bild 7: Beeinflussung von EMV-Messergebnissen durch Konstanter-Ableitströme

Bild 7 verdeutlicht dies anhand einer normgerechten Messung der Störspannung auf der Netzseite im akkreditierten EMV-Labor des ISET. Wird der Wechselrichter mit einem kapazitätsarmen Konstanter gespeist, so hält der Wechselrichter die geltenden Grenzwerte ein. Wird stattdessen der Konstanter mit hoher Erdkapazität verwendet, so treten Grenzwertüberschreitungen von mehr als 40 dB auf, obwohl auch diese Messung gemäß der

geltenden Normen erfolgt. Bei weiteren Experimenten wurde das Sättigungsverhalten der verwendeten stromkompensierten Drosseln als Ursache nachgewiesen.

3 Zusammenfassung und Perspektiven

Einige trafolose Wechselrichter verursachen aufgrund ihrer Funktion große kapazitive Ableitströme, die im Fehlerfall (Unterbrechung der Schutzerdung) ein Gefahrenpotenzial darstellen. Bei Verwendung von Glas/Folie-Modulen treten an der Rückseite höhere Ableitströme auf als bei Glas/Glas-Modulen. Selbst bei Berührung der Oberfläche des Solargenerators kann es unter Umständen zu einer spürbaren elektrischen Entladung kommen. Die am Solargeneratorgestell gemessenen Ableitströme liegen, je nach Wechselrichter, zwischen wenigen Milliampere und mehreren hundert Milliampere. Bei Unterbrechung der Generatorerdung besteht hier ein hohes Gefährdungspotenzial.
Der im Laborbetrieb in Verbindung mit einem Konstanter auftretende Ableitstrom kann ebenfalls eine Personengefährdung hervorrufen, wenn die Schutzerdung des verwendeten Konstanters unterbrochen wird. In diesem Fall steht eine gefährliche Wechselspannung am Gehäuse des Konstanters. Neben der möglichen Personengefährdung sind auch unerwünschte Wechselwirkungen bei Messungen im Labor möglich. So wurde z. B. die Beeinflussung der Ergebnisse von EMV-Messungen untersucht.
Die kapazitiven Ableitströme sind um so kleiner, je geringer Amplitude und Oberschwingungsanteil der an den DC-Eingängen des Wechselrichters gegen Erde anliegenden Spannung ist. Die Erarbeitung von Grenzwerten für nichtsinusförmige Ableitströme sowie die Schaffung von Richtlinien für die zulässige Erdkapazität von Solarmodulen und Konstantern stellt eine wichtige Aufgabe für zukünftige Normungsaktivitäten des ISET dar.

4 Literatur:

[1] H. Schmidt, „Gefährdungspotenzial transformatorloser Wechselrichter – Fakten und Gerüchte“, 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 2003

[2] J. Kirchhof et. al. *„Wechselrichterwechselwirkungen – Testergebnisse aus dem Forschungsprojekt SIDENA“*, 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 2004

[3] C. Bendel et. al.: „Sicherheitsaspekte bei dezentralen netzgekoppelten Energieerzeugungsanlagen – SIDENA“ (Förderkennzeichen 0239900C, gefördert durch das BMW), Abschlussbericht, ISET, 2005

Safety Aspects for Use and Testing of Transformerless PV-Inverters – Results of the Project SIDENA

Dr. C. Bendel, Peter Funtan, Jörg Kirchhof, G. Klein,
Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e.V.
Königstor 59, Germany, 34119 Kassel
Phone: (0561) 7294-254, Fax: (0561) 7294-200
E-Mail: info@sidena.de
Internet: http://www.sidena.de; http://www.iset.uni-kassel.de

Abstract

Operators of running photovoltaic systems have occasionally reported about triggering RCBs (Residual Circuit Breaker). In other cases, window cleaners sense a tingling when cleaning PV facades. In this article the causes for the described phenomena are investigated, namely the capacitive leakage currents in photovoltaic systems with transformerless inverters.
First, the paper addresses the causes of capacitive leakage currents and their measurement. Subsequently measurement results from capacitive leakage currents are presented and evaluated. Within the scope of EMC tests, it was determined that capacitive leakage currents also appear when running inverters under laboratory conditions and exhibit a strong dependency upon the direct voltage mains power supply used. It is shown that the leakage currents that appear lead to a partially extreme influence of the EMC measurement results due to saturation effects in the interference suppression components of PV inverters.
The basic investigations were done in the research project SIDENA [3].