

# Elektromagnetische Verträglichkeit von Photovoltaik-Anlagen

von Thomas Erge,  
Christian Bendel,  
Georg Bopp und  
Thomas Trümper

## Überblick

Mit der Harmonisierung der gesetzlichen Vorschriften in der Europäischen Union wurden verbindliche Vorschriften zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von elektrischen und elektronischen Geräten in Kraft gesetzt (Störemissionen und Störfestigkeit). Die zur Auswahl stehenden Europäischen EMV Standards sowie die Fragen der CE-Kennzeichnung von Komponenten und Systemen werden diskutiert. Besprochen wird ferner, ob und warum eine PV-Anlage bzw. ihre Komponenten zu Quellen elektromagnetischer Störsignale werden können bzw. durch solche Störungen beeinflusst werden. Es wird gezeigt, daß PV-Anlagen, deren Komponenten in Übereinstimmung mit europäischen Normen gefertigt wurden, in der Mehrzahl keine normverletzenden Störemissionen aufweisen. Per Simulation berechnete bzw. experimentell bei Verwendung störraktiver Wechselrichter gemessene Maxima von Störsignalen bis etwa 5 MHz werden auf schaltungsbedingte Resonanzstellen zurückgeführt. PV spezifische Anforderungen an die EMV und Maßnahmen zu deren Einhaltung werden vorgestellt

The harmonisation of the legislation in the European Union has brought new regulations concerning the Electromagnetic Compatibility (EMC) of electrical and electronic devices, covering emissions as well as Electromagnetic Susceptibility. Relevant European EMC standards applicable for PV systems are discussed, considering also the CE-marking of components and systems. The reason are treated for a PV-plant or its components (especially the solar generator) becoming a source of electromagnetic disturbance signals or being influenced in their operation by such disturbances. It is shown that PV systems with components being manufactured in accordance to European EMC standards in general do not emit irregular disturbances. Maxima of interference signals up till 5 MHz found as a result of simulation calculations or measurements using inverters with high emissions are explained by resonance effects. EMC requirements specific for PV and measures to meet them are presented.

## 1. Einleitung

Störfestigkeit und Störungsarmut sind komplexe Qualitätsmerkmale [1], die bei Nichterfüllung erhebliche sicherheitstechnische und ökonomische Konsequenzen nach sich ziehen können. Seit dem 01.01.1996 ist das „Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten“ (EMVG) [2]

in Deutschland alleingültige Grundlage zur Behandlung rechtlicher Fragen im Zusammenhang mit der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Dieses in allen Staaten des Europäischen Wirtschaftsraumes inhaltlich ähnliche Gesetz bedeutet mehrere Neuregelungen, die insbesondere auch für die Hersteller von Photovoltaik-Komponenten von großer Wichtigkeit sind.

Noch immer herrscht bei vielen Herstellern, Händlern und Käufern Unsicherheit darüber, welche Anforderungen an Baugruppen, Geräte und Anlagen sich aus dem EMVG ergeben, wobei sich insbesondere die Frage nach einer Interpretation des EMVG hinsichtlich Photovoltaik-Anlagen sowie der hierfür anzuwendenden technischen Normen stellt.

Die technische Relevanz des Themas „Elektromagnetische Beeinflussungen“ für die Photovoltaik ergibt sich in erster Linie daraus, daß Wechselrichter in Abhängigkeit von ihrem Schaltungsprinzip auf Grund schneller Schaltvorgänge und steiler Schaltflanken Quelle elektromagnetischer Signalkomponenten in einem breiten Frequenzbereich sind. Diese können, besonders bei Nichtbeachtung bzw. Nichteinhaltung der EMV-Anforderungen an hochfrequente Störströme, über die angeschlossene Gleichstrom- und Wechselstromverkabelung auf den Solargenerator bzw. das öffentliche Netz übertragen werden. Eine PV-Anlage, wie sie in [Abbildung 1](#) dargestellt ist, unterscheidet sich von sonstigen Anlagen besonders durch ihre ausgedehnte Gleichstromverkabelung; hierbei ist ausdrücklich der großflächige Solargenerator hervorzuheben. In gleicher Weise ist es möglich, daß äußere elektromagnetische Störungen (zu denen auch induzierte Stoßspannungen in Zusammenhang mit Blitzeinschlägen zu rechnen sind) in das System der Photovoltaikanlagen eingekoppelt werden können. Praktisch führten solche Effekte in der Vergangenheit verschiedentlich zu Störscheinungen – so berichteten im Rahmen einer sozialwissenschaftlichen Begleituntersuchung zum Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programm [3] 7% aller Anlagenbetreiber über ständige oder zeitweise Störungen im Rundfunk- oder Fernsehempfang. Ebenfalls wurden beim Einsatz von

Dr. Thomas Erge ist Projektleiter, Arbeitsgruppe Leipzig, und Dipl.-Ing. Georg Bopp ist Gruppenleiter in der Abteilung Photovoltaische Systeme und Meßtechnik am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Freiburg.

Dr.-Ing. Christian Bendel ist Leiter der Abteilung Anlagen- und Meßtechnik und Dipl.-Ing. Thomas Trümper ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Kassel.



Abbildung 1: EMV: Relevanz des Themas für Photovoltaik-Anlagen

Solar Home Systemen an netzfernen Standorten erhebliche Rundfunkstörungen festgestellt.

## 2. Vorschriften und Normen

Das EMVG gilt für Geräte, die elektromagnetische Störungen verursachen können oder die gestört werden können (§1, Abs. 1). Laut §2 Abs. 4 sind „Geräte alle elektrischen und elektronischen Apparate, Anlagen und Systeme, die elektrische oder elektronische Bauteile enthalten.“ Somit werden PV-Anlagen als Ganzes wie auch Wechselrichter und Laderegler durch das Gesetz erfaßt.

Aus technischer Sicht stellen die Schutzanforderungen (§4) den Kerninhalt des EMVG dar. Geräte müssen dementsprechend hinsichtlich ihrer Störemission soweit begrenzt sein, daß sie andere Geräte nicht stören, und ebenfalls störfest genug sein, um unter dem Einfluß der Störungen anderer Geräte bestimmungsgemäß funktionieren zu können. Die Forderung nach Einhaltung der Schutzanforderungen trifft ohne Einschränkungen sowohl auf PV-Anlagen als System, als auch auf diejenigen Komponenten zu, die laut EMVG als Gerät bezeichnet werden können. Wechselrichter und Laderegler fallen eindeutig unter den Begriff 'Gerät' des EMVG, da es sich um 'selbständig betreibbare Geräte, Baugruppen und Geräteteile, die allgemein erhältlich sind' handelt. Ob auch Module im Sinne des EMVG als kennzeichnungspflichtig einzustufen sind kann aus dem Gesetzestext nicht eindeutig abgeleitet werden. Ausgehend von elementaren techni-

schon Überlegungen kann in der Regel davon ausgegangen werden, daß jedes Solarmodul die elektromagnetischen Schutzanforderungen laut EMVG einhält. Photovoltaikanlagen als 'Anlagen, die erst am Betriebsort zusammengesetzt werden' bedürfen weder einer CE-Kennzeichnung, noch einer Konformitätserklärung. Dies gilt gleichfalls für 'Geräte, die ausschließlich zur Verwendung in eigenen Räumen hergestellt werden'. Diese Klauseln befreien die Hersteller natürlich nicht von der Notwendigkeit der Erfüllung der allgemeinen Schutzanforderungen!

Das Einhalten der Schutzanforderungen wird nach EMVG vermutet für Geräte, die

- übereinstimmen mit einschlägigen harmonisierten europäischen Normen und/oder
- übereinstimmen mit einschlägigen nationalen, europäisch anerkannten Normen<sup>1</sup>.

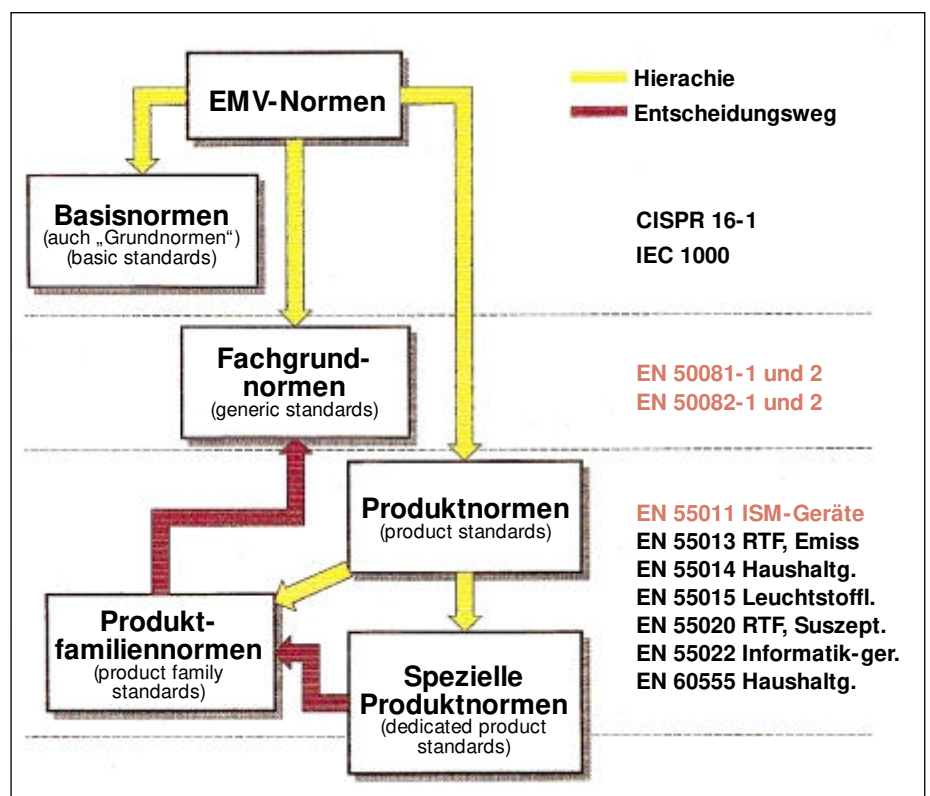
Bei Geräten, für die der Hersteller diese Normen nicht oder nur teilweise angewandt hat bzw. für die keine Normen existieren, ist die Übereinstimmung durch eine zuständige Stelle zu

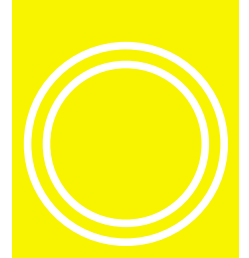
bestätigen. Besteht die Sicherheit, daß ein Gerät den anzuwendenden Normen entspricht, kann der Hersteller selbst auf Grund dieser Annahme eine Konformitätserklärung erstellen, das Gerät mit einer CE-Kennzeichnung versehen und in Verkehr bringen. Es ist wichtig zu beachten, daß das CE-Symbol die Konformität eines Produkts mit allen zutreffenden europäische Richtlinien bestätigt und kein spezielles 'EMV-Kennzeichen' darstellt.

Der allgemeine Weg zur Auswahl einer anwendbaren Norm ist in **Abbildung 2** dargestellt. Da für Photovoltaikkomponenten keine speziellen Produktnormen vorliegen, muß eine Orientierung entweder an Fachgrundnormen oder geeigneten Produktfamiliennormen erfolgen. Für Wechselrichter mit Schaltfrequenzen über 10 kHz kommt die Produktfamiliennorm EN 55011 für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte zur Anwendung. Für alle anderen Geräte wird die Fachgrundnorm Störaussendung EN 50081 herangezogen. Ebenfalls anwendbar ist die Pro-

<sup>1</sup> Für Deutschland nicht relevant, da keine europäisch anerkannte, nationale Norm existiert.

Abbildung 2: Weg zur Auswahl anwendbarer EMV-Normen





duktfamilienorm EN 55014 (Haushaltgeräte), hier sind insbesondere auch Grenzwerte zur Beurteilung der EMV auf den Gleichstromleitungen 50081 werden Grenzwerte für Störströme auch auf den Gleichstromleitungen vorgeschlagen, die sich relativ leicht messen lassen. Für Untersuchungen zur Störfestigkeit können die Fachgrundnorm prEN 50082-1 und 2 sowie die Basisnorm EN 61000-4-x herangezogen werden.

Am Fraunhofer ISE wurde eine aktuelle Auflistung rechtlicher und technischer EMV-Normen geschaffen [4], speziell aufbereitet für das Sachgebiet Photovoltaik.

Für Photovoltaikanlagen ist die Unterscheidungsweise der europäischen EMV-Fachgrundnormen in Einsatzbereiche mit niedrigen Umgebungspegeln für Haushalt und Gewerbe und hohen Umgebungspegeln für die Industrie unzureichend. PV-Generatoren sind meist im Außenbereich angeordnet und damit hohen Umgebungspegeln ausgesetzt, wie z.B. den genannten direkten und indirekten Blitzeinwirkungen. Die Energiewandlung und -nutzung geschieht vorwiegend räumlich getrennt in Umgebungen, in denen niedrige Pegel gefordert sind, um Störungen zu vermeiden. Die topologischen Besonderheiten erfordern demnach sowohl niedrige Pegel für die Störaussendungen einer PV-Anlage als auch eine ausreichende Störfestigkeit gegen hohe Umgebungspegel im Generatorbereich und an Stromrichtereingängen.

### 3. Störquellen, Störpfade

Wie bereits angeführt, kann ein Wechselrichter durch interne Schaltvorgänge unerwünschte Signalspektren erzeugen und ist somit eine potentielle Störquelle. Für die Beschreibung der Ausbreitung der Störungen sowie der Zusammenhänge zwischen Strom und Spannung der Störspektren ist es notwendig, die gesamte Photovoltaikanlage inklusive des Netzes zu berücksichtigen. Je nach Anlagenkonfiguration können sich die auf den Anschlußleitungen des Wechselrichters sowie auf den Gleichstromleitungen ausbreitenden Störsignale qualitativ und quantitativ unterscheiden.

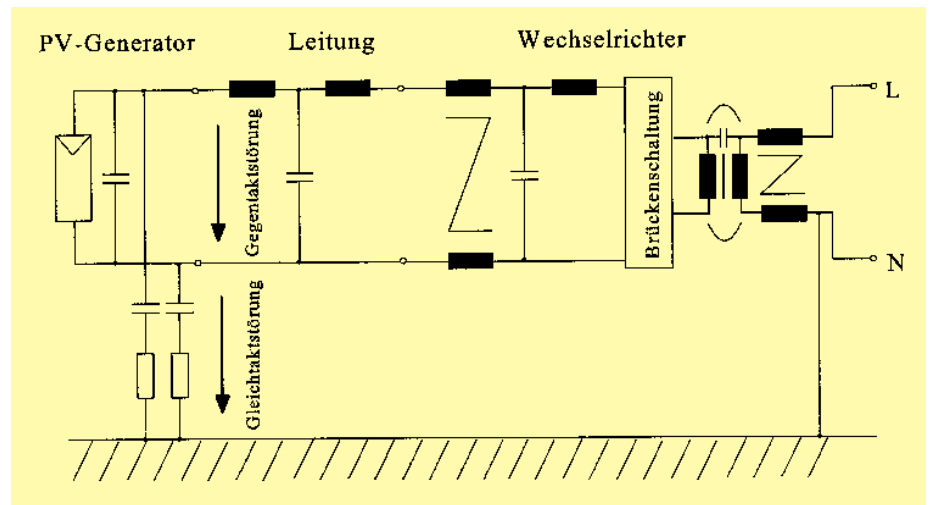


Abbildung 3: Ersatzschaltbild einer PV-Anlage zur Verwendung bei der Simulation mit PSpice

Mit Hilfe eines Simulationsprogrammes können die Zusammenhänge in einem solchen System durch Modellbildung nachvollzogen werden. Zur Simulation des Betriebsverhaltens netzgekoppelter Photovoltaikanlagen wurde das Programm PSpice verwendet, welches ein Standard-Simulationsprogramm für elektrische Schaltungen ist. Allerdings können mit Hilfe dieses Programmes nur Ströme und Spannungen berechnet werden, jedoch keine Feldstärken. Um einen Bezug zu experimentell ermittelten Störfeldstärken herstellen zu können, ist die Entwicklung entsprechender Abstrahlungs- bzw. Antennenmodelle noch in Arbeit.

Zur Simulation wurden die vier Hauptteile des Photovoltaiksystems – Solar-generator, Gleichstromhauptleitung, Wechselrichter und öffentliches Netz – als Modelle dargestellt.

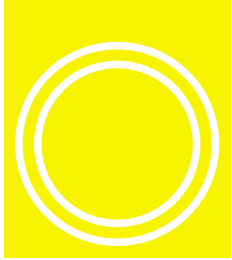
Abbildung 3 zeigt das verwendete Ersatzschaltbild netzgekoppelter Photovoltaik-Anlagen. Dabei werden insbesondere Erdkapazitäten berücksichtigt, die von Größe und Bauart des Solar-generators abhängig sind. Für die Leitung wurde das übliche Ersatzschaltbild mit Längsinduktivitäten und Parallelkapazitäten verwendet, für die Wechselrichter wurden vereinfachte Schaltbilder realer Geräte mit unterschiedlichem Arbeitsprinzip zugrunde gelegt. Dabei wurden teilweise Filterschaltungen einbezogen, um die Wirkung spezieller Entstörmaßnahmen zu simulieren. Das öffentliche Netz wurde dabei ausschließlich als Energieabneh-

mer betrachtet, wobei ein einfaches Modell nach EN 60555 Teil 3 verwendet wurde.

Im Ergebnis der Simulationen wurde festgestellt, daß

- bei Annahme eines netzgeführten Wechselrichters durch die vergleichsweise langsamen Schaltvorgänge der Thyristoren und die geringe Schalthäufigkeit oberhalb von 20 kHz deutlich geringere Spektralanteile erzeugt werden, jedoch durch Resonanzen der Wechselrichterbauelemente mit den Kapazitäten am Solargenerator sowie der Induktivität des Netzes Amplitudenerhöhungen möglich sind,
- bei Annahme eines selbstgeführten Wechselrichters auch bei höheren Frequenzen kräftige Störsignale erzeugt werden, die aber durch gute Filterung erheblich zu dämpfen waren. Mit dem bei diesen Wechselrichtern üblichen Transformator wurde durch die galvanische Trennung zwischen Gleich- und Wechselspannungsseite auch der festgestellte Störpfad von der Wechselrichterbrücke über die Erdkapazität des Solargenerators und den Erdungspunkt des Netzes zurück zur Brücke unterbrochen, was zu einer erheblichen Verringerung von Gleichtakt-Störströmen führte.

Ein Beispiel für den Signalverlauf und das Störspektrum des Gleichtaktstromes bei Simulation eines selbstgeführten Wechselrichters ohne Transformator ist in [Abbildung 4](#) dargestellt.



Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der Einsatz von Entstörgliedern bei den Wechselrichtern notwendig, aber auch meist hinreichend dafür ist, daß keine normverletzenden Störsignale auf die Anschlußleitungen gelangen können. Jedoch kann es durch Resonanzen im photovoltaischen System zu erheblichen Amplituden bei Strömen und Spannungen kommen, wenn Kapazitäten im Bereich des Solargenerators mit verschiedenen Bauelementen des Wechselrichters Schwingkreise bilden [5].

#### 4. Untersuchungen zur EMV an Photovoltaik-Anlagen am ISET

##### 4.1 Stand der Technik

Umfangreiche Erfahrungen bei Messungen und Prüfungen, die im mittlerweile akkreditierten EMV-Prüflaboratorium des ISET an leistungselektronischen Photovoltaikkomponenten, z. B. Wechselrichtern, durchgeführt werden, deuten auf eine weitgehende Nichtbeachtung bzw. Nichtbeherrschung elektromagnetischer Störbeeinflussungen seitens der Hersteller dieser Komponenten hin. EMV-Maßnahmen werden mit wenigen Ausnahmefällen meist nachträglich in funktionell bereits fertigentwickelte Produkte eingefügt [6].

Im „Jahresjournal zum 1000-Dächer Meß- und Auswerteprogramm“ des Fraunhofer Institutes für Solare Energiesysteme [7] erfolgte eine Störfallanalyse von 845 Photovoltaikanlagen. Bei 62 % der betrachteten Anlagen ausfälle handelte es sich um Wechselrichter ausfälle [8], wobei als Hauptursache der Störungen und Ausfälle Überspannungen an Wechselrichtern ermittelt wurden. Dies unterstreicht, daß die Störfestigkeit den einsatzspezifischen Umgebungsbedingungen bislang ungenügend angepaßt ist.

##### 4.2 EMV-Design für Photovoltaikkomponenten und -anlagen

Zukünftig sollten Photovoltaik-Anwendungen bereits in der Entwicklungsphase durch eine komplexe Betrachtung der spezifischen elektromagnetischen Beeinflussungsmöglichkeiten so gestaltet werden, daß Funktionsstörungen vermieden werden können und die EMV über den Rahmen der

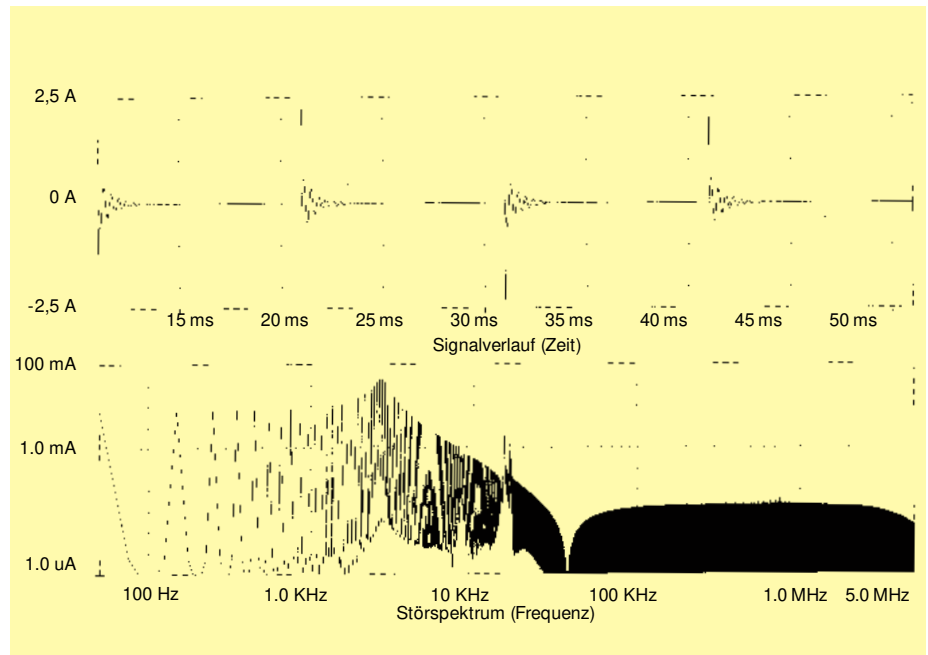


Abbildung 4: Signalverlauf und Störspektrum eines selbstgeführten Wechselrichters ohne Transformator (Simulation)

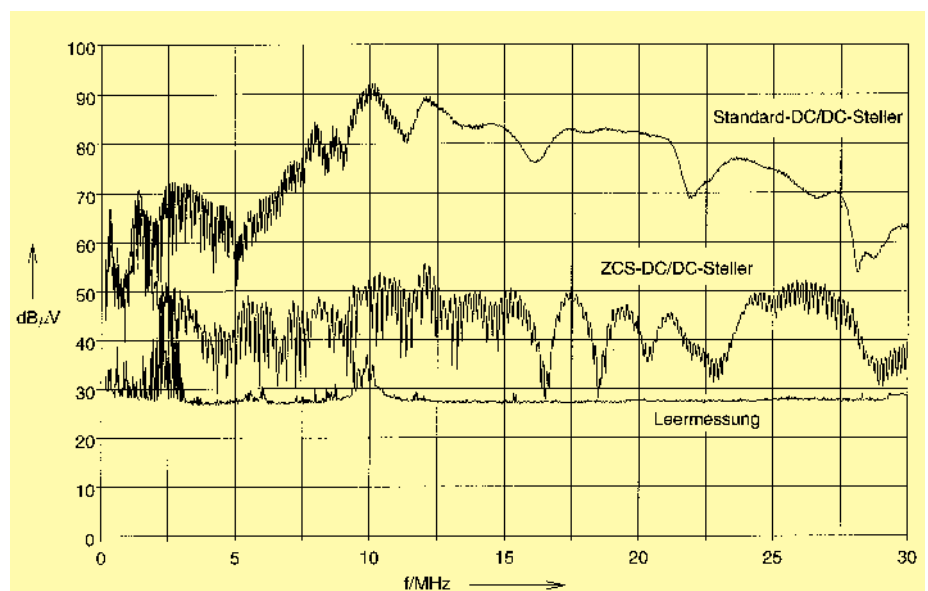
derzeit bestehenden gesetzlichen Anforderungen hinaus sichergestellt wird.

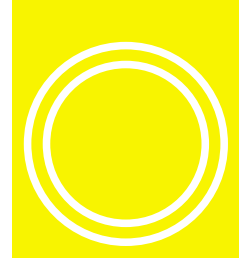
In einer ersten Phase der PV-Systembetrachtung erfolgten unter dem Schwerpunkt „Störquelle – Störpfade – Störsenke“ Untersuchungen, deren Ergebnis die Störungsbeseitigung bereits in der Störquelle favorisierten. Beispielhaft dargestellt: Ein PV-Generator strahlt keine elektromagnetischen Wellen ab, wenn diese ihm nicht vom Wechselrichter bzw. Lade-

regler „angeboten“ werden. Damit wurden die leistungselektronischen Komponenten zum Untersuchungsschwerpunkt.

Neue Stromrichterprinzipien bzw. -topologien ermöglichen das „weiche“ Schalten der Halbleiter (soft-switching). Das Verbesserungspotential zeigt [Abbildung 5](#). Zwei Gleichstromsteller gleicher Leistungsklasse wurden untersucht, wobei der erste in Standardtechnik, d.h. hartschaltend und der zweite weichschaltend (nullstrom-

Abbildung 5: Vergleich der Störspannungen von Gleichstromstellern (hartschaltend und weichschaltend bei ansonsten gleichen Randbedingungen)





schaltend) realisiert wurde. Ergebnis unter EMV-Gesichtspunkten ist eine erhebliche Reduzierung der leitungsgebundenen Störaussendungen um bis zu 20 dB.

Zur Erhöhung der Störfestigkeit wurden bislang vor allem die Störpfade betrachtet mit der Zielstellung, diese zu unterbrechen, spektral einzugrenzen oder so zu gestalten, daß sich Störwirkungen gegenseitig kompensieren.

Maßnahmen zur Erhöhung der Überspannungsfestigkeit von Photovoltaik-Generatoren wurden bereits 1992 im Rahmen eines Begleitprojektes zum „Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programm“ erarbeitet. Nachfolgende Lösungen setzen die Störwirkungen um bis zu einen Faktor von 3 herab:

- Konstruktive Gestaltung des Modulgestells derart, daß sich eine elektrisch leitende Gitterkonstruktion ergibt, die durch Aufteilung des Blitzstromes (Abbildung 6) proportional eine Verringerung der induzierten Spannung zur Folge hat,
- Verschaltung der einzelnen Module derart, daß sich die induzierten Spannungen (Abbildung 7) in den Modulen weitgehend aufheben bzw. sich auf ungefährliche Werte reduzieren,
- Anwendung von Abschirmungen auf der Rückseite von PV-Modulen aus Metallfolie, Metallmaschendraht oder Metallblech in besonders gewittergefährdeten Gebieten (zum Beispiel bei Alpenhütten oder ähnlich).

#### 4.3. EMV-Konformitäts-Prüfungen

Mit dem Aufbau (November '94) und dem Betrieb eines inzwischen akkreditierten EMV-Prüflaboratoriums im ISET bestehen die technischen und organisatorischen Voraussetzungen, unter Normbedingungen zu messen und zu prüfen (Abbildung 8). Im Rahmen von entwicklungsbegleitenden Untersuchungen werden auch technische Beratungen als Dienstleistungen angeboten. Einen Schwerpunkt bilden Geräte und Kleinanlagen aus dem PV-Bereich.

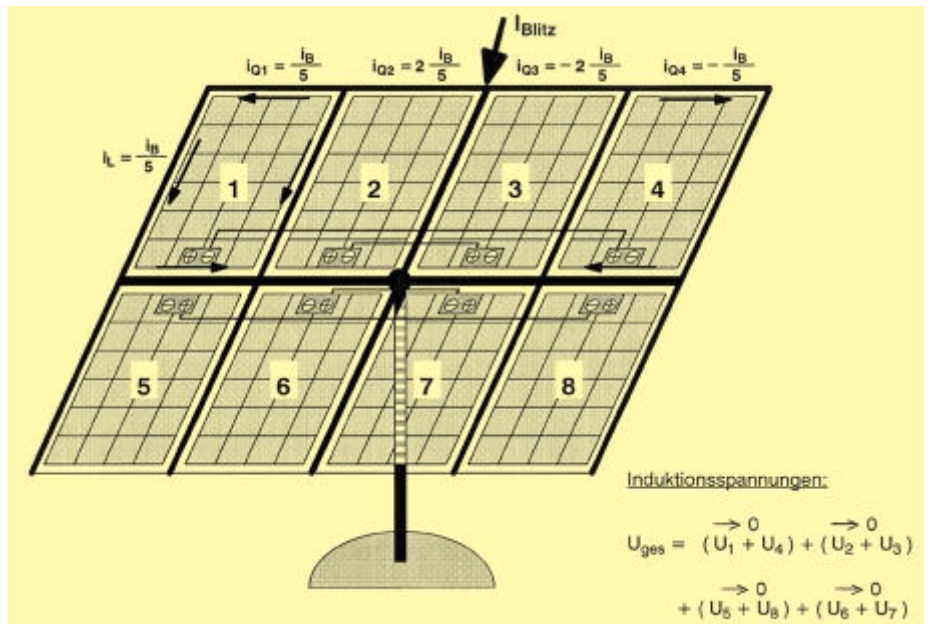
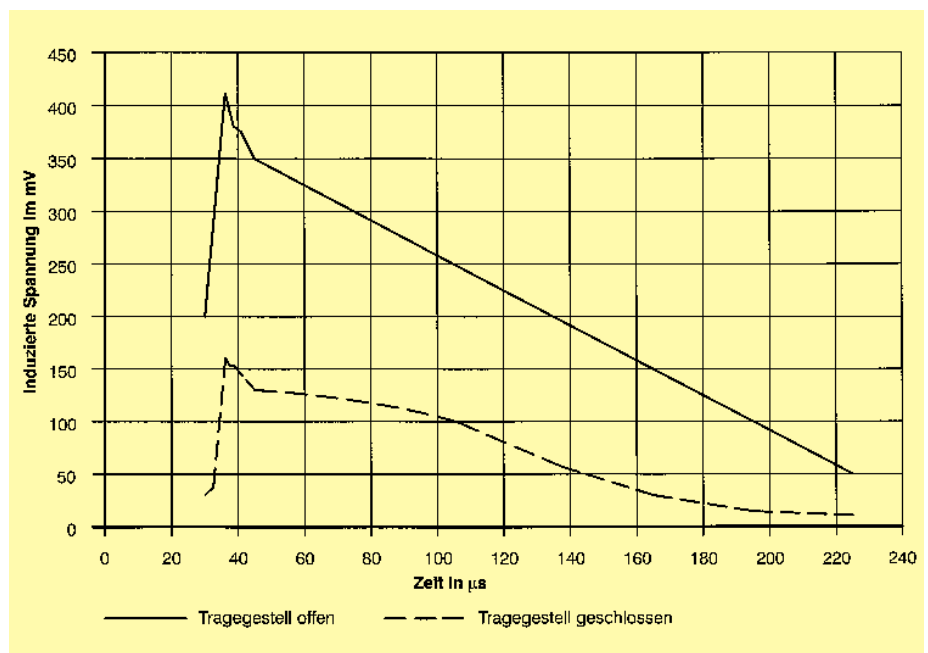


Abbildung 6: Geschlossenes gitterförmiges Modultragegestell mit PV-Modulen „kompensierend“ verschaltet

Abbildung 7: Gemessener Verlauf der Induktionsspannungen mit offenem und geschlossenem Tragegestell



#### 4.4 Know-how-Transfer

Das ISET bietet im Rahmen eines Forschungsprojektes auf Basis von Kooperationsverträgen Forschungsleistungen an, um insbesondere PV-Produktentwickler durch wissenschaftliches Know-how sowie begleitende Messungen bzw. Untersuchungen an ihren Produkten zu unterstützen. Diese wissenschaftliche Dienstleistung ist kostenlos, sie bedarf jedoch als Basis einer echten technischen Neuartigkeit (Innovation).

#### 5. Untersuchungen zur EMV an Photovoltaikanlagen am Fraunhofer ISE

##### 5.1. Labormessungen

Normgerechte Messungen leitungsgebundener und gestrahlter Störgrößen sind nur unter definierten Umgebungsbedingungen zulässig, wobei die verwendeten Meßverfahren, die Ansprüche an die zu verwendete Meßtechnik sowie die durchzuführenden Meßschritte genau in entsprechen-

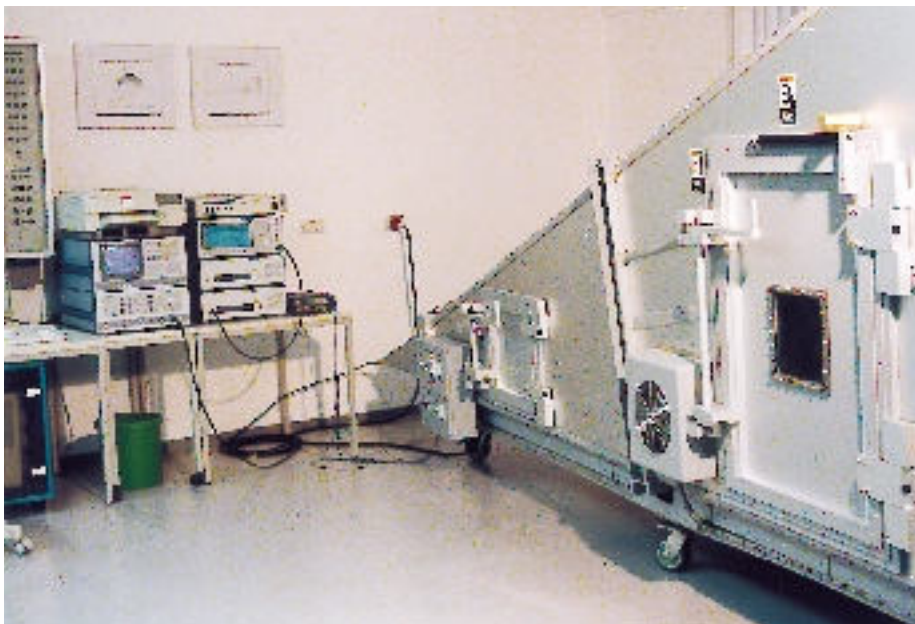


Abbildung 8: ISET-EMV-Prüflabor mit GTEM-Zelle, EMV-Meß- und Prüfgeräten

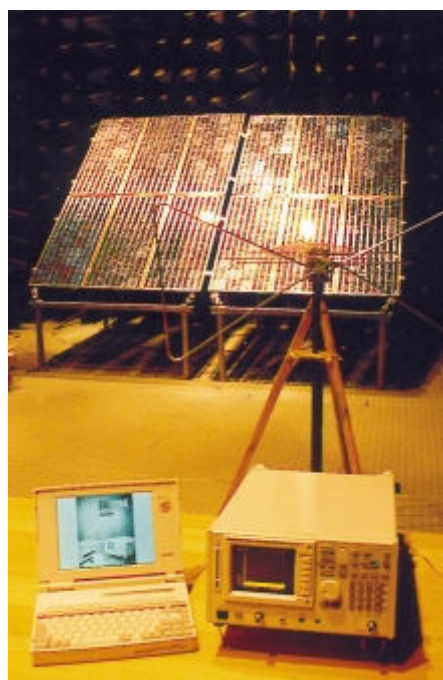
chenden Normenvorschriften definiert sind.

Die elektromagnetische Charakterisierung kompletter Photovoltaikanlagen unter realen Betriebsbedingungen (Freifeldmessungen) ist relativ schwierig, da einerseits äußere Störpegel die Messung beeinflussen und andererseits eine konstante Beleuchtung über den für die Messungen benötigten Zeitraum nicht gewährleistet werden kann. Nach Voruntersuchungen auf dem Testgelände des Fraunhofer ISE in Freiburg wurden Messungen an PV-Komponenten sowie einer kleineren kompletten Anlage in einer geschirmten Absorbermeßhalle des Instituts für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Karlsruhe durchgeführt (Abbildung 9). Das IEH besitzt ein akkreditiertes Prüflabor, zu welchem die Absorberhalle gehört.

Schwerpunkt dieser Messungen war die qualitative und quantitative Charakterisierung der Störemissionen auf der Gleichspannungsseite, da zur Beeinflussung der öffentlichen Stromversorgungsnetze durch Oberwellen und hochfrequente Störsignale von Wechselrichtern in Photovoltaikanlagen bereits verschiedene Untersuchungen vorliegen. Gemessen wurden Störspannungen, Störströme sowie Störfeldstärken im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz (in einzelnen Messungen ab 9 kHz bzw. bis 1 GHz).

Als normative Meßgrundlage wurde für die Tests der Solarmodule sowie für die Untersuchung der DC-seitigen Verkabelung die Fachgrundnorm Störaussendung für den Hausbereich, EN 55081-1 zugrundegelegt. Zur Untersuchung der durch die Wechselrichter verursachten Emissionen wurde die Produktfamiliennorm EN 55011 herangezogen.

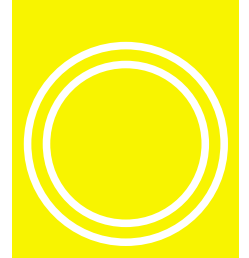
Abbildung 9: EMV-Untersuchungen in einer Absorbermeßhalle (Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Karlsruhe)



Grundsätzliche Erkenntnisse aus den Messungen in der Absorberhalle sind:

- Solarmodule bzw. Verschaltungen von Modulen (ohne Anschluß von Wechselrichter und Netz!) können grundsätzlich elektromagnetische Wellen abstrahlen. Wie aber auch auf Grund der geometrischen Abmessungen des Solargenerators und typischer Längen der Anschlußkabel zu erwarten, liegt der Frequenzbereich für angelegte Schwingungen von Generator und Leitungen sehr hoch – erst oberhalb von etwa 15 MHz setzten nachweisbare Feldemissionen ein. In Experimenten mit Solarzellen unterschiedlicher Herstellungstechnologie (monokristallin, polykristallin, amorph) waren kaum Unterschiede feststellbar. Die Störemissionen sind ebenfalls unabhängig von der Beleuchtung.
- Die von den untersuchten Wechselrichtern verursachten leitungsgebundenen Störungen sowohl auf der Wechselstrom- als auch auf der Gleichstromseite liegen in verschiedenen Fällen oberhalb gültiger Grenzwerte. Betroffen waren insbesondere Wechselrichter ohne spezielle Entstörglieder. Damit werden die in [9] veröffentlichten Untersuchungsergebnisse zu dieser Problematik bestätigt.
- Der Frequenzbereich der von Wechselrichtern erzeugten Störsignale reicht in der Regel nur bis zu wenigen MHz. Bei hohen Frequenzen waren stark abnehmende Störampplituden zu verzeichnen. Weiterhin waren Unterschiede bei Wechselrichtern mit verschiedenem Grundprinzip (selbstgeführt, netzgeführt) feststellbar.
- Bei Verwendung von Modulen mit geschlossenem Metallrahmen waren deutlich geringere Störemissionen feststellbar. Gleichzeitig waren in Abhängigkeit von Erdwiderstand und -kapazität in bestimmten Frequenzbereichen Resonanzeffekte nachweisbar, die zu erheblichen Störfeldstärken führten.
- Bei niedrigen Frequenzen überwiegen Gegentakt-Störsignal (mittlerer kHz-Bereich), während bei höheren Frequenzen zunehmend Gleichtakt-Störsignale wesentlich werden (bis zu mehreren MHz).

Insgesamt lassen diese Messungen



den Schluß zu, daß bei gut entstörten Wechselrichtern lediglich bei niedrigeren Frequenzen Störpegel auftreten, die aber – sieht man von Resonanzeffekten ab – kaum zu erheblichen Störungen führen dürften. Der scheinbare Widerspruch zwischen dieser Erkenntnis und den bekannten Störmeldungen ist überwiegend auf den Einsatz nicht normgerecht entstörter Wechselrichter zurückzuführen.

## 5.2. Vor-Ort-Messungen

Die Durchführung normgerechter Messungen an bestehenden Photovoltaikanlagen ist in der Regel schwierig. Für die zu untersuchenden Anlagen kommen nur solche Standorte in Frage, die durch einen geringen allgemeinen „Störnebel“ charakterisiert sind, da andernfalls eine Identifikation der von der Photovoltaikanlage erzeugten

Störsignale nicht mehr möglich ist. Das EMV – Meßequipment des Fraunhofer ISE ist portabel und läßt somit relativ einfach Vor-Ort-Messungen zu.

Anliegen der bereits durchgeführten und noch geplanten Untersuchungen ist es, für charakteristische Anlagenkonfigurationen eine erste Einschätzung des Emissionspotentials zu gewinnen und gleichzeitig den Ursachen von gemeldeten Störungen nachzugehen (Abbildung 10).

Abbildung 10: EMV Vor-Ort-Messungen: Untersuchungen am Energieautarken Solarhaus Freiburg

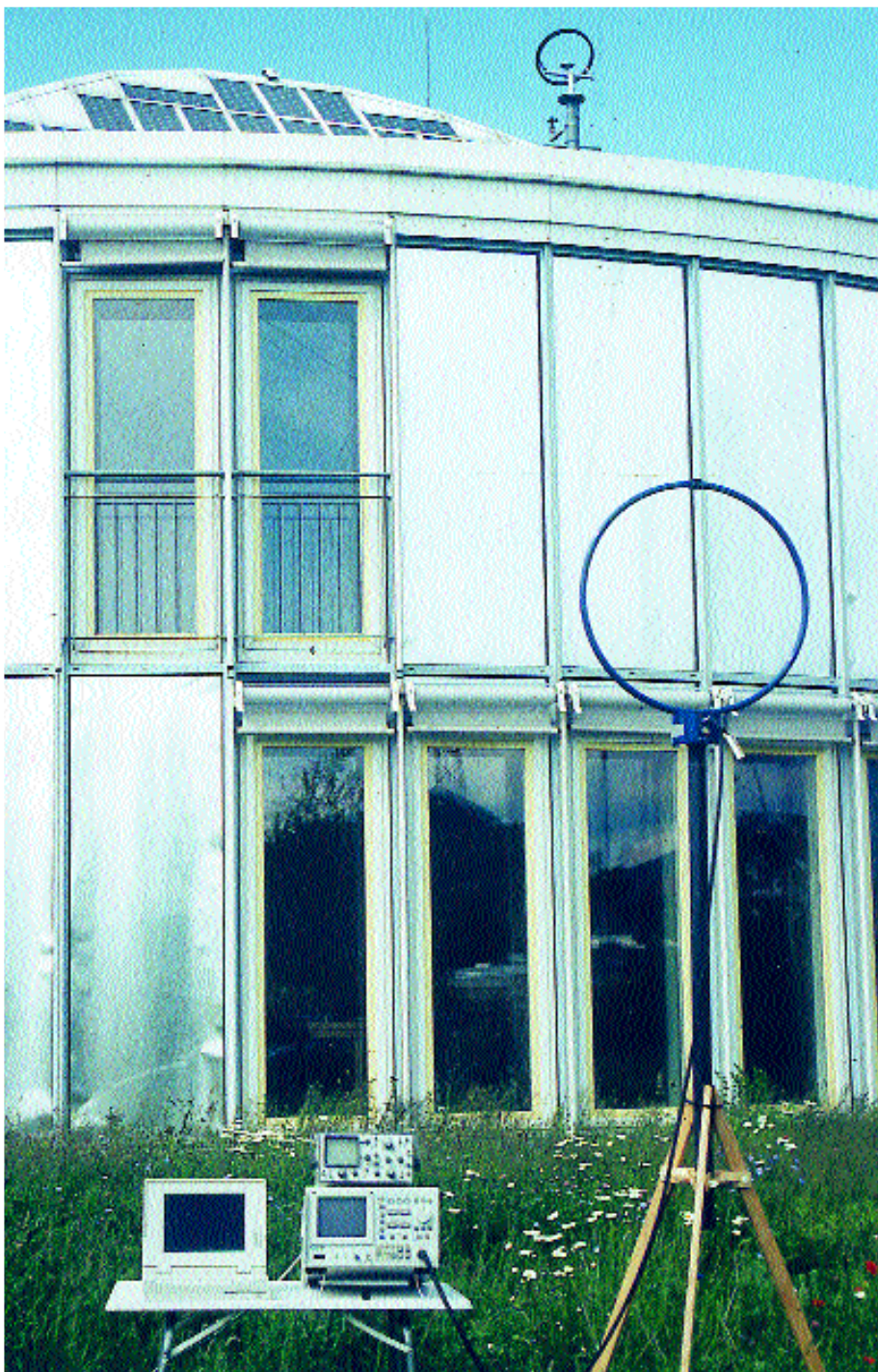


Abbildung 11 zeigt für einen Wechselrichter mit bekannt schlechter Entstörung die Frequenzabhängigkeit der an einer realen Anlage auf den DC-Leitungen gemessene Störspannung. Deutlich sichtbare Störkomponenten sind im Frequenzbereich unterhalb von 10 MHz feststellbar, wobei sowohl Frequenzabhängigkeit als auch Amplitudenverteilung grundsätzlich mit Messungen in der Absorberhalle und Simulationen für den gleichen Wechselrichtertyp übereinstimmen.

Noch nicht völlig geklärt ist die Frage, wie diese Abstrahlungen durch die Geometrie des Solargenerators sowie die Art und Weise der Verlegung der Zuleitungen beeinflusst werden kann. Zur Klärung dieser Frage wird zur Zeit ein mathematisches Antennenmodell entwickelt.

## 5.3 Know-How-Transfer

Das Fraunhofer ISE bietet im Rahmen seiner Forschungsprojekte Beratungs-, Meß- und Entwicklungsleistungen an mit Schwerpunkt bei der Auswahl zutreffender Normen und der Durchführung von Vor-Ort-Messungen.

## 6. Ausblick

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Elektromagnetischen Verträglichkeit von Photovoltaikanlagen führen zu dem Schluß, daß bei Beachtung anerkannter technischer Normenvorschriften bei Konstruktion und Aufbau der Komponenten von Photovoltaikanlagen die emittierten Störpegel gering sind und eine störende Beeinflussung der Umgebung von Photovoltaikanlagen nahezu ausgeschlossen ist. Wechselrichter und Laderegler bedürfen somit einer CE-Kennzeich-

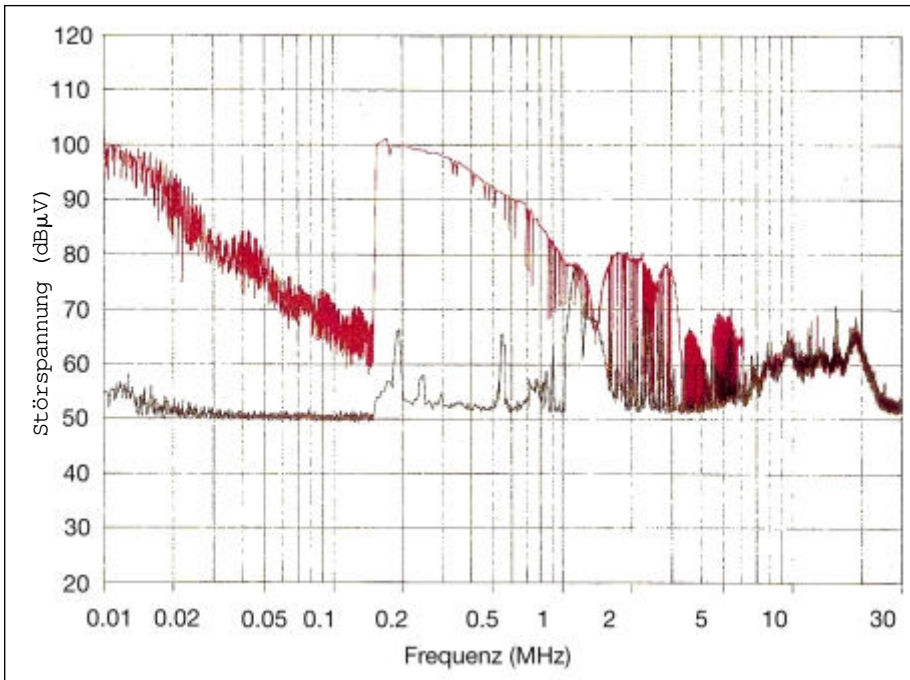


Abbildung 11: EMV Vor-Ort-Messungen: Frequenzabhängigkeit der Störspannung auf den DC-Leitungen eines Wechselrichters (der Sprung bei 150 kHz ist bedingt durch eine Bandbreitenumschaltung)

nung. Bei unzureichenden Entstörmaßnahmen sowie in einzelnen Fällen beim Auftreten von schaltungsbedingten Resonanzerscheinungen können Störungen erzeugt werden. Eine Abschätzung des grundsätzlichen Störpotentials kann durch Simulationsrechnungen für geeignete Modelldarstellungen oder Labormessungen der verwendeten Anlagenkomponenten gewonnen werden, so daß in der Regel nicht am Standort jeder Photovoltaikanlage Messungen notwendig sein werden. In welchem Umfang die gewonnenen Erkenntnisse auch auf grundsätzlich andere Anlagenkonfiguration übertragbar sind (z. B. Inselanlagen mit Laderegler, Großanlagen, Anlagen mit verteilten Kleinwechselrichtern) muß für die jeweiligen Fälle noch geprüft werden.

## 7. Dank

Folgenden Mitarbeitern des Fraunhofer ISE sei für ihre wertvollen Beiträge gedankt: Jürgen Bohnenstengel, Heiner Dornburg, Ralf Reimelt, Eberhard Rösler, Reiner Schätzle, Ingo Wittek. Für seine Unterstützung bei den Messungen in der Absorberhalle gilt Herrn Jürgen Bernauer, IEH Karlsruhe, der Dank. Für die Erarbeitung des Manuskriptes seitens des ISET sei Herrn Günter Keller gedankt.

Die Forschungsarbeiten werden am Fraunhofer ISE vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unterstützt, am ISET ebenfalls vom BMBF sowie vom Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst.

## Literatur

- [1] E. Habiger  
„Handbuch elektromagnetische Verträglichkeit: Grundlagen, Maßnahmen, Systemgestaltung“, 2. Auflage, Verlag Technik Berlin, München (1992)
- [2] „Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG)“, Bundesgesetzblatt, Teil 1 (1995)
- [3] „Sozialwissenschaftliche Begleituntersuchungen zum Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programm“, Abschlußbericht, Umweltinstitut Leipzig und Fraunhofer ISE Leipzig (1996)
- [4] H. Dornburg  
„Untersuchungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit von Solargeneratoren netzgekoppelter Photovoltaikanlagen“, Diplomarbeit, Universität Leipzig (1995)
- [5] J. Bohnenstengel  
„Elektromagnetische Beeinflussung von Photovoltaik-Wechselrichtern auf der Gleichstromleitung“, Diplomarbeit, Universität Erlangen (1996)
- [6] H. Häberlein  
„Hochfrequenzwirkungen bei Photovoltaikanlagen“, Protokoll eines Expertentreffen, Fraunhofer ISE, Freiburg (1996)
- [7] „1000-Dächer-Meß- und Auswerteprogramm, Jahresjournal 1995“, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg (1996)
- [8] V. Hoffmann  
„Fünf Jahre 1000-Dächer-Programm – Eine Zwischenbilanz“, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Leipzig (1996)
- [9] H. Häberlein, F. Käser, Ch. Liebi, Ch. Beutler  
„Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests an Wechselrichtern für Netzverbundanlagen“, 11. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz / Staffelstein (1996), 89-94