

Untersuchung der Störgrößenausbreitung und –emission von Leistungswechselrichtern in Höchstspannungssystemen durch Magnetfeldmessungen

Dipl.-Ing. Alexander Küllmer, Dipl.-Ing. Jens Schüür, Prof. Dr. rer. nat. Achim Enders, TU Braunschweig, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit
M.Sc. Kevin Hermanns, TU Darmstadt, Institut für Stromrichtertechnik und Antriebsregelung Fachgebiet Leistungselektronik

1. Einleitung

Die von Bevölkerung und Politik in Deutschland gewünschte Energiewende bedingt ein großes Umdenken in der Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie. Zur Erhöhung der Produktion regenerativ erzeugter elektrischer Energie werden zunehmend Photovoltaik-Anlagen sowie on- und offshore Windkraftanlagen installiert. Photovoltaik-Anlagen sowie onshore Windkraftanlagen speisen ihre erzeugte Energie unmittelbar in das Energieverteilnetz ein. Offshore Windparks hingegen benötigen häufig die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Auf Grund ihrer Entfernung zur Küste ist eine Netzanbindung mit einer Wechselstromübertragungsstrecke nicht wirtschaftlich. Dies führt allerdings zu der Notwendigkeit eines Wechselrichters an Land, welcher aus dem Gleichstrom durch wiederholtes Ein- und Ausschalten seiner leistungselektronischen Bauelemente einen für die Einspeisung benötigten Wechselstrom erzeugt. Diese unumgänglichen Ein- und Ausschaltvorgänge regen durch ihre Schaltflanken je nach verwendeter Art der Halbleiterelemente und Wechselrichtertopologie Frequenzen bis zu mehreren 10 MHz an. Die so erzeugten Frequenzen werden durch Filterkreise und den Step-Up-Transformator bedämpft und gefiltert, ehe sie sich in das angeschlossene Umspannwerk ausbreiten. Inwieweit die angeregten Frequenzen des Magnetfelds nach der Filterung und Dämpfung noch mit Hilfe von Antennen messbar sind, hängt maßgeblich von den Geometrien innerhalb des Umspannwerkes und der an dieses angeschlossenen Leitungen ab.

Eine negative Beeinflussung des Isolationsvermögens elektrischer Betriebsmittel durch hochfrequente spektrale Anteile wurde bereits beispielhaft in [1] – [3] untersucht. Neben einer schädlichen Beeinflussung kann es zum Beispiel durch Sättigungseffekte zu einer Beeinträchtigung der Schutz- und Fernwirktechnik von Energieverteilanlagen kommen. Die Beeinflussung eines elektronischen Elektrizitätszählers im Niederspannungsnetz wurde bereits in [4] beschrieben. Unter der Kenntnis, dass Wechselrichter höherfrequente Störungen emittieren wurde in [5] eine Machbarkeitsstudie zum Design eines hochfrequenztauglichen Transformators mit einer Leistung von 350 kVA präsentiert. Es wurde dort aber auch festgestellt, dass weitere Untersuchungen hinsichtlich der Häufigkeit und des Energieinhalts von transienten Ereignissen sowie der Dauerstabilität der Materialien notwendig sind, bevor dieses Konzept auf höhere Leistungsklassen adaptiert werden kann.

Prinzipiell können die real vorhandenen Störgrößen messtechnisch durch leitungsgebundene oder kontaktlose Verfahren erfasst werden. Üblicherweise werden im Hochspannungsnetz ausschließlich leitungsgebundene Messungen zur Ermittlung des Lastflusses sowie zum Zwecke der Abrechnung der transportierten Energie mithilfe von

Spannungsteilern und Stromwandlern durchgeführt. Diese haben aufgrund des benötigten Isolationsvermögens relativ große geometrische Abmessungen, welche wiederum zu hohen Streukapazitäten und –induktivitäten führen. Aus diesem Grund sind diese Messaufnehmer nur für den Einsatz bis hin zu einigen kHz geeignet und müssten aufgrund der starken Ortsabhängigkeit an jedem Messpunkt erneut kalibriert werden. Desweiteren müsste diese Kalibrierung eine rückführbare und dispersionsfreie Messung der geforderten Größen ermöglichen. Da dies nur mit sehr großem Aufwand möglich ist, sollen in dieser Veröffentlichung die Vor- und Nachteile eines kontaktlosen Messaufbaus zur Bestimmung der durch Wechselrichter verursachten Transienten näher beleuchtet werden. Neben einer theoretischen Abschätzung des von verschiedenen Wechselrichtertopologien verursachten Spektrums werden Messungen an verschiedenen realen Leistungswechselrichtern mit einer Bauleistung zwischen 3 MVA und 400 MVA gezeigt. Abschließend wird ein Vergleich der resultierenden Spektren zu einer bereits etablierten Technologie wie „Powerline Communication“ gezeigt.

2. Wechselrichtertopologien

Bei Wechselrichtern ist prinzipiell zwischen den sogenannten netzgeführten und selbstgeführten Typen zu unterscheiden. Die netzgeführten Wechselrichter beziehen Ihre Kommutierungsenergie aus dem Netz und benötigen zur Funktion eine vorgegebene Wechselspannung, wodurch dieser Typ nicht schwarzstartfähig ist. Im Falle eines Netzausfalls kann also die über ihn sonst eingespeiste Energie nicht zum Netzwiederaufbau genutzt werden. Der selbstgeführte Wechselrichter ist hingegen in der Lage, unabhängig von der Netzfrequenz Leistung einzuspeisen. Durch Veränderung des Phasenwinkels der Einspeisung kann gezielt Blindleistung zur Verfügung gestellt werden und zusätzlich wird der Wechselrichter hierdurch auch schwarzstartfähig. Da das deutsche Energienetz in Zukunft mit möglichst wenigen Gas-, Öl- und Kohle-Kraftwerken auskommen soll, muss die über diese Konverter eingespeiste Energie auch nach einem Netzausfall verfügbar sein, weswegen in Deutschland heutzutage fast ausschließlich selbstgeführte Wechselrichter in höheren Leistungsklassen gebaut werden. Unabhängig davon, um welchen der beiden Typen es sich handelt, basieren alle Wechselrichter auf dem Wirkprinzip einer 2-Punkt-, 3-Punkt- oder der sogenannten Multilevel-Umrichtung. Die sogenannten Hybrid-Wechselrichter stellen im eigentlichen Sinne kein neues Prinzip der Umrichtung dar, da die zuvor genannten Prinzipien hier „beliebig“ kombiniert werden. Da das angeregte Spektrum maßgeblich von dem steilsten Anstieg dominiert wird und die 3-Punkt-Umrichtung eine Erweiterung der 2-Punkt-Umrichtung darstellt, wird anschließend nur ein Vergleich zwischen der Multilevel-Umrichtung und der 2-Punkt-Umrichtung durchgeführt.

Bei der 2-Punkt-Umrichtung wird mittels einer Pulsweitenmodulation zwischen positivem und negativem Gleichspannungspotential umgeschaltet. Hierbei entscheidet die Einschaltdauer über den effektiven Mittelwert, wodurch in Kombination mit dem Glättungsnetzwerk ein sinusförmiger Wechselstrom entsteht. Bei der Multilevelumrichtung wird dagegen in Abhängigkeit der Anzahl der Schaltstufen immer nur eine gewisse Spannungsdifferenz zu- bzw. abgeschaltet. Hieraus ergibt sich pro Schalthandlung lediglich ein Spannungssprung von einer Schaltstufe, was zu einem treppenförmigen Verlauf der Spannung und hierdurch zu einer Reduzierung der resultierenden Stör-Amplitude führt. Da sich nun aber unterschiedliche Schaltfrequenzen pro Spannungsebene ergeben, wird ein deutlich breiteres Spektrum angeregt. In den Abbildungen 1 und 2 ist ein Ver-

gleich zwischen der theoretisch errechneten Ausgangsspannung eines Multilevel-Wechselrichters mit 200 Stufen und eines 2-Punkt-Wechselrichters mit einer Schaltfrequenz von 2 kHz dargestellt. Abbildung 1 zeigt das Zeitbereichssignal, in welchem die unterschiedlich langen Pulsdauern von positivem und negativem Potential in Abhängigkeit von der positiven bzw. negativen Halbwelle zu erkennen sind. Im Vergleich hierzu nähert sich das Ausgangssignal des Multilevel-Wechselrichters bereits ohne zusätzliche Filter einer Sinus-Form gut an. Die in Abbildung 2 dargestellten Spektren zeigen, dass die maximale Amplitude des Multilevel-Wechselrichters gegenüber der des 2-Punkt-Wechselrichters auf niedrigerem Niveau liegt. Gleichzeitig kann besonders gut im Frequenzbereich kleiner 1 kHz bei dem Multilevel-Wechselrichter eine deutlich breitere Verteilung der erzeugten Frequenzen festgestellt werden, was prinzipiell eine Ausbreitung von Störgrößen durch Resonanzanregung begünstigt.

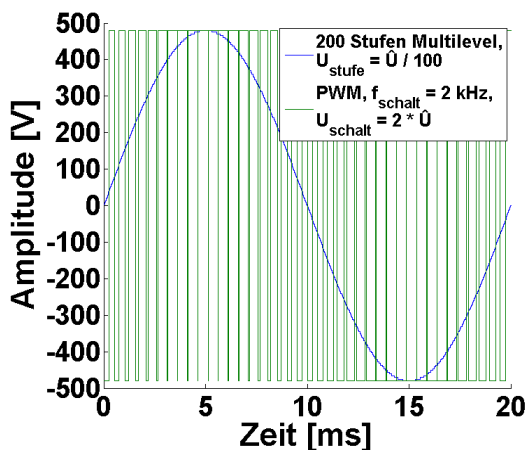


Bild 1: Zeitsignal Multilevel- und 2-Punkt-Wechselrichter

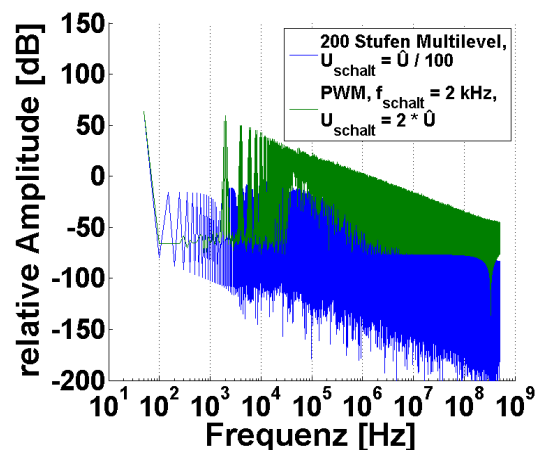


Bild 2: Spektren des Multilevel- und 2-Punkt-Wechselrichters

3. Messaufbau

Betrachtet man die Normen aus der IEC 61000 Familie und die einschlägigen Normen im Bereich der Power Quality wie z.B. die DIN EN 50160, so werden im Frequenzbereich bis 30 MHz ausschließlich leitungsgebundene Messungen durchgeführt. Des Weiteren sind erst ab einer Frequenz von 30 MHz gestrahlte Messungen verpflichtend durchzuführen. Hieraus resultiert eine Lücke zwischen der 50. Harmonischen der Netzfrequenz von 2,5 bzw. 3 kHz und 30 MHz. Innerhalb dieses Bereichs befinden sich aber einige wichtige Funkdienste auf Lang-, Mittel- und Kurzwelle, z.B. militärische Funkdienste zur U-Bootkommunikation sowie der Zeitsynchronisationsdienst DCF77. Die Zeitsynchronisation wird nicht nur von Armband- oder Küchenuhren genutzt, sondern auch zur Synchronisation von Uhren in Steuerungen von automatisierten Produktionsstraßen [6]. In [7] und [8] sind neben der Signalbeschreibung auch typische Empfangsfeldstärkewerte sowie weitere Einsatzgebiete wie zum Beispiel die Übertragung von Warnhinweisen für den Katastrophenschutz dargestellt.

Um eine Beeinflussung des Empfangs von Rundfunkdiensten quantifizieren zu können ist eine Messung der leitungsgebundenen Störgrößen ein erstes Indiz. Entscheidend für die Bewertung ob eine Beeinflussung stattfindet oder nicht ist allerdings nicht das Vorhandensein einer leitungsgebundenen Störgröße, sondern viel mehr wie sich diese Stör-

größe in die Umgebung ausbreitet. Des Weiteren ist zu beachten, dass eine Messung leitungsgebundener Störgrößen immer einen Spannungsteiler benötigt, welcher im Bereich einer 380 kV Hochspannungsleitung nicht bis zu einer Frequenz von 30 MHz kalibriert werden kann. Des Weiteren müsste die Leitung, an welche der Spannungsteiler angeschlossen werden soll, für jeden Auf- und Abbau frei geschaltet werden. Zusätzlich muss aufgrund der veränderten parasitären Elemente eines Spannungsteilers an jedem Aufstellungsort erneut eine Kalibrierung durchgeführt werden. Aus diesen Gründen wurden in dieser Veröffentlichung ausschließlich feldgebundene Messungen unter Verwendung von Rahmenantennen durchgeführt. Abbildung 3 stellt ein Blockschaltbild des verwendeten Messaufbaus dar. Da die Störaussendung von transienten Schaltereignissen analysiert werden soll, wurde anstelle eines Messempefängers oder Spektrumanalysators ein digitales Speicheroszilloskop genutzt. Als Antennen kamen eine aktive sowie eine passive Rahmenantenne zum Einsatz. Um beide Antennen vergleichen zu können, wurden alle Messungen mit beiden Antennen zeitgleich durchgeführt. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes wurde bei Bedarf ein optionaler Antennenvorverstärker in den Signalpfad der passiven Antenne eingeschaltet.

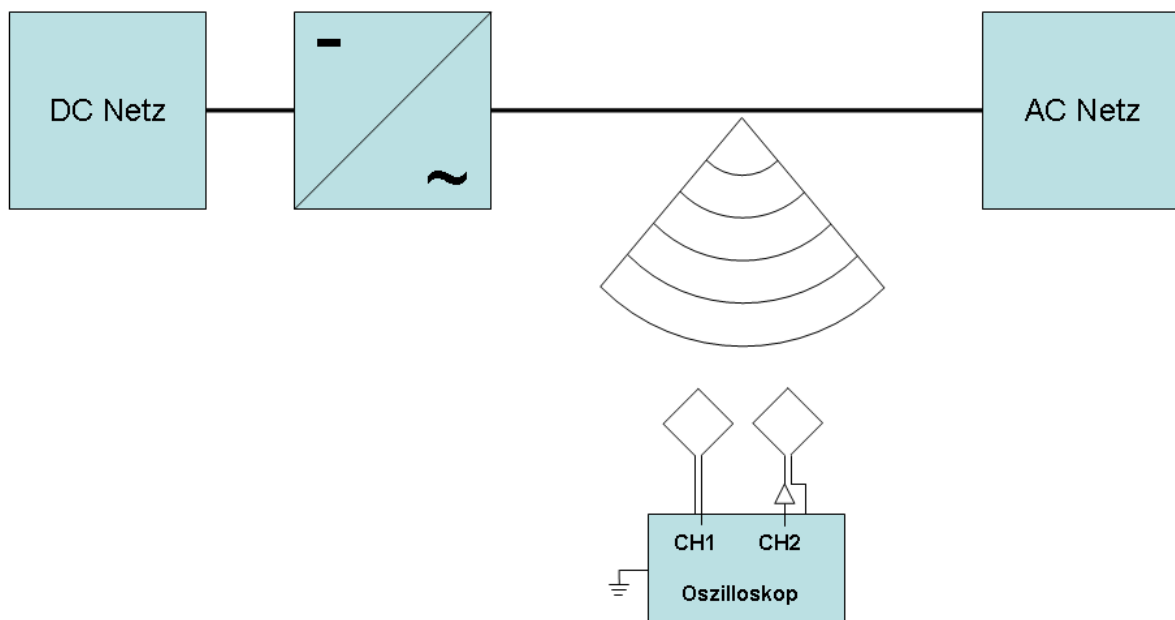


Bild 3: Blockschaltbild des Messaufbaus

[9] gibt einen Messaufbau an zur Qualifizierung der Störaussendung von Hochspannungsleitungen und Umspannwerken in dem interessierenden Frequenzbereich. Dort wird empfohlen, die Empfangsantenne in einem Messabstand von mindestens 80 m Entfernung von der äußersten Phase zu platzieren und dort die Antenne so lange um die eigene Achse zu drehen, bis maximaler Amplitudenausschlag festgestellt werden kann. Ob diese Amplitude von der Hochspannungsleitung selbst oder von einem anderen benachbarten Sender stammt, wird hierbei nicht weiter berücksichtigt. Da man auch bei 80 m Messentfernung in dem untersuchten Frequenzbereich noch nicht von Fernfeldbedingungen ausgehen kann, wurden die später gezeigten Messungen mit einer Messentfernung zwischen 5 und 30 m Abstand zum nächsten Leiterseil durchgeführt.

In [10] wird der Ansatz der Suche des Maximums durch Rotieren der Antenne um die eigene Achse verworfen und zur Qualifizierung eine Messung in 3 zueinander orthogonalen Antennenorientierungen gefordert. Im Anschluss wird der geometrische Mittelwert über alle 3 Antennenorientierungen gebildet und hieraus das effektiv gemessene Feld

bestimmt. Die hier gezeigten Messungen orientieren sich an dem in diesem Standard vorgeschlagenen Verfahren und zeigen den Mittelwert über die gemessenen Antennenorientierungen. Während der Auswertung der Messungen wurden die vom Hersteller gegebenen Antennenfaktoren zur Berechnung der Feldstärkewerte verwendet. Trotz Korrektur mittels Antennenfaktoren konnte immer eine Differenz zwischen beiden Messkurven von mehreren dB festgestellt werden. Aus diesem Grund werden alle Messkurven mit relativen Amplituden anstelle von Absolutwerten dargestellt.

4. Messungen

Aufgrund der geometrischen Abmessungen sowie der notwendigen Isolationsabstände konnten die Messungen an den Hochspannungsleitungen nicht in einer geschirmten Umgebung durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist in Abbildung 4 eine Nullmessung mit dem typischen Umgebungsrauschen dargestellt. Die Peaks im Bereich von 100 kHz bis 250 kHz und 5 MHz bis 20 MHz wie auch der einzelne Peak bei 23 kHz sind auf Funksender zurückzuführen. In Abbildung 5 ist der Unterschied zwischen Messungen eines aktiven und eines ausgeschalteten 400 MVA Wechselrichters an demselben Messort dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass eine generelle Erhöhung der Amplituden stattfindet und der Signal-Rausch-Abstand des relativ starken Senders bei ca. 23 kHz um ca. 30 dB absinkt. Die Signalstärke des Zeitsynchronisationsdienstes DCF77 bei 77,5 kHz ist bei den dargestellten Messungen relativ konstant bei ungefähr -120 dB relativer Amplitude. Der Signal-Rausch-Abstand variiert in den in Abbildung 4 und 5 dargestellten Messungen jedoch um ca. 15 dB. Betrachtet man hingegen die gemessenen Spektren in elektromagnetisch „raueren“ Umgebungen, ist aufgrund der generell höheren Amplituden bereits kein DCF77 Signal mehr sichtbar, wodurch eine Störung der Zeitsynchronisation mit hoher Wahrscheinlichkeit auftritt. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 6 dargestellt. Die dort gezeigten Spektren wurden lediglich mit einem Abstand von ca. 3 bis 5 m von der Antenne zur Transformatordurchführung aufgenommen.

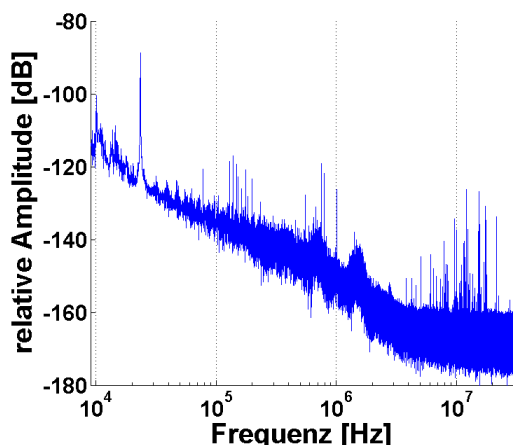


Bild 4: Nullmessung

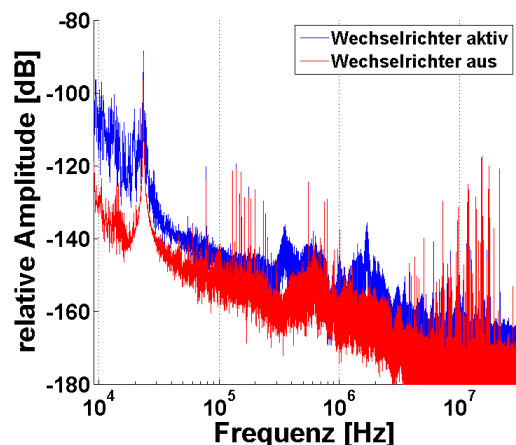


Bild 5: Vergleich Arbeitszustände Konverter

Häufig werden leistungsstarke Wechselrichter mittels eines Step-Up-Transformators mit dem Hoch- bzw. Höchstspannungsnetz verbunden. Dieser Transformator wird aufgrund seiner hohen Induktivität häufig als Sperrinduktivität für hohe Frequenzen angesehen. Dieses vereinfachte Modell besitzt bis ca. 3 kHz auch weitestgehend seine Richtigkeit

bei Betrachtung typischer Frequency-Response-Analysis Fingerprints. Was in diesen Fingerprints aber auch zu erkennen ist, ist die Tatsache, dass ein solcher Transformator ein komplexes Netzwerk darstellt, welches mit steigender Frequenz eine Vielzahl an Resonanzen aufweist. Die Transferimpedanz beschreibt die Filtereigenschaften des Transformators und weist bei einigen Resonanzstellen quasi transparentes Verhalten nach. Dieser Effekt ist in Abbildung 6 messtechnisch erfasst. Dargestellt sind Messungen an einem Transformator, welcher die Spannungen von eingangsseitig 110 kV auf 16 kV umsetzt und einen direkt angeschlossenen 30 MVA Wechselrichter speist. Für weite Frequenzbereiche stimmt die Annäherung als Blockinduktivität relativ gut, während bei 180 kHz sowie 400 kHz keine nennenswerte Dämpfung beobachtet werden kann. Hierdurch wird eine Ausbreitung der Störgrößen durch das Netz und somit unter Umständen sogar über mehrere Spannungsebenen wahrscheinlich.

Des Weiteren wird immer häufiger über die Einführung der sogenannten „Powerline Communication“ im elektrischen Energieversorgungsnetz diskutiert, um die Fernwirktechnik des Netzes ohne einen zusätzlichen Lichtwellenleiter ansteuern zu können. Als Vertreter für diesen Anwendungsfall wurden beispielhaft zwei kommerziell erhältliche Systeme von „Broadband Powerline Communication Devices“ (kurz: BPL) auf ihre Störaussendung in diesem Frequenzbereich hin untersucht. Um eine Verbreitung des BPL Signals im Stromnetz des Labors zu verhindern, wurde ein Testkabelbaum mit einem integrierten Hochfrequenz-Netzfilter aufgebaut. Bei den gezeigten BPL Modems handelt es sich um zwei unterschiedliche Generationen. Das als Typ 1 bezeichnete BPL Modem ist mit einer maximalen Datenübertragungsrate von 200 Mbit/s spezifiziert, während das als Typ 2 bezeichnete System eine maximale Datenübertragungsrate von 500 Mbit/s ermöglicht. Um eine relativ hohe Datenrate zwischen den Modems zu erzielen, wurde auf einem angeschlossenen Computer ein Videostream betrachtet. In Abbildung 7 sind die Spektren eines 400 MVA Wechselrichters zu den zuvor beschriebenen BPL Modems dargestellt. Beim Vergleich der Kurvenverläufe ist festzustellen, dass beide Systeme denselben Frequenzbereich belegen. Ebenso ist festzustellen, dass die dargestellten Spektren sich generell auf unterschiedlichen Amplitudenniveaus befinden. Dies ist mit den verschiedenen Messszenarien zu erklären und lässt deshalb derzeit keinen Rückschluss auf das jeweilige absolute Störpotenzial zu.

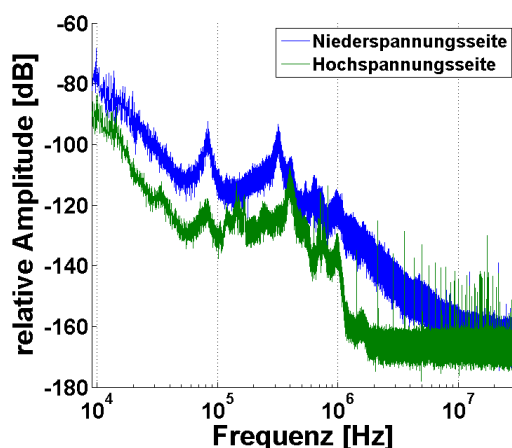


Bild 6: Einfluss Transformator auf Spektrum

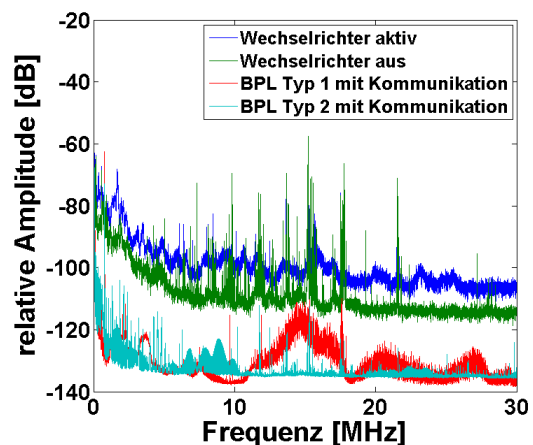


Bild 7: Vergleich der Spektren von Konverter und BPL Modems

Bei den Messungen des Wechselrichters handelt es sich um Vorortmessungen in der Umgebung eines Hochspannungsumspannwerkes, in welchem keine zusätzlichen Schirmmaßnahmen des Messaufbaus ergriffen werden konnten, wohingegen es sich bei den BPL Modems um Messungen innerhalb einer normalen Laborumgebung mit nicht

so leistungsstarken Störquellen wie in einem Umspannwerk handelt. Durch die Doppelbelegung des Spektrums ist generell eine Beeinflussung der Systeme untereinander nicht auszuschließen, selbst wenn diese nicht unmittelbar in derselben Spannungsebene arbeiten.

5. Zusammenfassung

Der in dieser Arbeit vorgestellte Messaufbau ist zur vergleichenden Messung der Störgrößenausbreitung und –emission in Höchstspannungssystemen geeignet. Aufgrund der Untersuchung von räumlich stark ausgedehnten und geometrisch teilweise sehr komplexen Systemen wird immer eine Mischung aus Nah- und Fernfeldern von den Antennen empfangen. Deshalb sollten analog zu dem in [10] beschriebenen Messaufbau immer drei zueinander orthogonale Antennenorientierungen pro Messpunkt durchgeführt und anschließend das geometrische Mittel der Orientierungen berechnet werden, um das einfallende Feld am Messort zu beschreiben. Ohne weitergehende Untersuchung auf dem Gebiet der Antennenkalibrierung kann bereits heute der Betriebszustand eines Leistungskonverters sowie der Einfluss eines Transformators auf das Spektrum messtechnisch erfasst werden. Ebenso wird eine gute Korrelation zwischen den theoretisch ermittelten Spektren und den Frequenzbereichen erhöhter Amplitude bei aktivem Wechselrichter nachgewiesen. Zusätzlich konnte eine mögliche Beeinflussung von sogenannten „Broadband Powerline Communication Devices“ und Wechselrichtern durch das gemeinsam genutzte Frequenzband aufgezeigt werden.

Damit der vorgestellte Messaufbau zu einer Absolutwertmessung genutzt werden kann, sind weitergehende Untersuchungen zur rückführbaren Bestimmung des Antennenfaktors von Magnetfeldantennen notwendig.

6. Literaturverzeichnis

- [1] M. Nagel, P. Otte, T. Leibfried, "Breakdown testing of standard insulation materials with high frequency voltages for an assessment of stresses, generated by repetitive pulses", Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 2008), pp. 466 - 469, 2008, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4570374&isnumber=4570258>
- [2] P. Nussbaumer, A. Mitteregger, T. M. Wolbank, "Online detection of insulation degradation in inverter fed drive systems based on high frequency current sampling", IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp.1954 - 1959, 2011, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6119605&isnumber=6119266>
- [3] M. Khanali, S. Jayaram, J. Cheng, "Effects of voltages with high-frequency contents on the transformer insulation properties", 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp. 235 - 238, 2013, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6554240&isnumber=6554182>
- [4] J. Kirchhof, "Grenzwertlücke – Wechselrichter stört Elektrizitätszähler", EMV 2010 Düsseldorf, VDE-Verlag, pp. 97-104, März 2010

- [5] L. Heinemann, "An actively cooled high power, high frequency transformer with high insulation capability", Seventeenth Annual IEEE Conference and Exposition Applied Power Electronics (APEC 2002), pp. 352 - 357, 2002, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=989270&isnumber=21321>
- [6] Homepage der Siemens AG, <http://www.automation.siemens.com/mcms/topics/en/siplus/timesynchronisation/Pages/default.aspx> zuletzt aufgerufen am 10.10.2013
- [7] A. Bauch, P. Hetzel, D. Piester, „Zeit- und Frequenzverbreitung mit DCF77: 1959 – 2009 und darüber hinaus“, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, PTB-Mitteilungen 119, Heft 3, pp. 217 – 240, 2009, URL: http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/pdf/2009_Bauch_PTBM__DCF77.pdf
- [8] Artikel von A. Bauch in PTBnews 2/2004, Deutsche Ausgabe, August 2004, URL: <http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/news/pdf/deutsch/news042d.pdf>
- [9] IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise From Overhead Power Lines and Substations," ANSI/IEEE Std 430-1986, 1986, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=29119&isnumber=1229>
- [10] IEEE Standard for Power Line Communication Equipment -- Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements --Testing and Measurement Methods, IEEE Std 1775-2010, pp. 1 - 66, Jan. 7, 2011, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5682873&isnumber=5682872>