

# Untersuchungen des Niederspannungsnetzes im Frequenzbereich bis 500 kHz im Hinblick auf die Datenübertragung mittels Powerline Communication

Dipl.-Ing. Mike Trautmann, Universität Duisburg-Essen (Fachgebiet Energietransport und –speicherung), Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg, Deutschland

Dipl.-Ing. (FH) Sascha Grigo, Universität Duisburg-Essen (Fachgebiet Energietransport und –speicherung), Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg, Deutschland

Margarethe Malek, M. Sc., Universität Duisburg-Essen (Fachgebiet Energietransport und –speicherung), Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch, Universität Duisburg-Essen (Fachgebiet Energietransport und –speicherung), Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg, Deutschland

## 1 Einleitung

Das klassische Energieverteilnetz war aufgrund der klaren Leistungs-Flussrichtung von der Hochspannungs- über die Mittelspannungs- bis hin zum Endkunden in der Niederspannungsebene geplant. Das Planungsleitbild des Stromverteilnetzes wird insbesondere durch die wachsende Anzahl von dezentralen Erzeugern verändert. Zudem bedingt die steigende Komplexität des Netzes eine Verbindung der Energieversorgung und der Kommunikations- und Informationstechnik. Die extremen Leistungsschwankungen zeigen, dass ein höherer Aufwand betrieben werden muss, um moderne Netze planen und kontrollieren zu können. Folge dieser starken Schwankungen ist die Gefahr, dass bei Lastumkehr die Spannung außerhalb der zulässigen Toleranzschwellen liegen kann. Die Anzahl von kritischen Betriebszuständen und Überlastungen nimmt stetig zu, da die klassisch geplanten Netze dafür nicht bemessen wurden. Mit der zunehmenden Einspeisung regenerativer Energieformen und der zunehmenden Nutzung effizienter leistungselektronischer Schaltungen in den einzelnen Verbrauchern (z.B. Schaltnetzteile) und somit auch der Zunahme von Oberschwingungen im Netz, nimmt der Bedarf zu, den genauen Systemzustand des Niederspannungsnetzes zu kennen, um Maßnahmen zur Erhaltung der Spannungsqualität zielgerichtet ergreifen zu können. Bedingt durch den bislang unidirektionalen Leistungsfluss in der Niederspannungsebene sind in der Vergangenheit keine oder kaum Messstellen in den unteren Spannungsebenen aufgebaut worden. Mangels Messstellen bestand auch nicht der Bedarf an einer informationstechnischen Anbindung auf dieser Ebene. Die Verbrauchszähler in den Haushalten sind bis auf wenige Ausnahmen elektromechanische Zählwerke, die zusätzliche Messgrößen, wie Strom und Spannung prinzipbedingt nicht erfassen können. Daher ist die Installation neuer Technik zur Messung und Übertragung von Zustandsgrößen des Niederspannungsnetzes notwendig. Während die Störaussendung von elektrischen Einrichtungen oberhalb 150 kHz normativ geregelt ist, handelt es sich unterhalb von 150kHz um einen Bereich, der nur von wenigen Produktgruppen berücksichtigt wird. Speziell treten regelmäßig Störungen von Systemen zur Zählerfernauslesung und durch leistungselektronischen Baugruppen auf, deren Beseitigung inzwischen auf europäischer Ebene als ein wesentlicher Meilenstein zur Umsetzung eines „Smart Grid“ angesehen werden [1]. Zur Erfassung der hochfrequenten Störsignale im Netz werden Untersuchungen im Frequenzbereich bis 500 kHz durchgeführt, wobei auch der Frequenz-

bereich unterhalb 150 kHz betrachtet wird. Basierend auf den gemessenen Störsignalen werden Spezifikationen für die Auslegung der G3-PLC-Technik erarbeitet, um im Sinne einer geeigneten EMV-Koordinierung eine sichere Datenübertragung in diesem Frequenzbereich umsetzen zu können.

## 2 Messsystem zur Bewertung der Datenübertragung mittels PLC im Niederspannungsnetz

Zur Beurteilung der Übertragung von Messdaten, die über den Zustand des Niederspannungsnetzes Anschluss geben sollen, werden Messungen zur Aufnahme des Grundstörepfels, der Übertragungsfunktion und der Impedanz durchgeführt.

### 2.1 Aufbau zur Messung der Übertragungsfunktion

Um die Übertragungseigenschaften im Hinblick auf die PLC-Technologie zu prüfen, wurde ein Messsystem entwickelt, welches die Übertragung von Daten im Frequenzbereich von 9 kHz bis 2 MHz untersucht (siehe Bild 1). Dazu wird ein Signalgenerator über eine Koppelbox an das Niederspannungsnetz angeschlossen und über eine Software, die an der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurde, gesteuert.

An einer anderen Messstelle werden die Sinussignale bei der entsprechenden Frequenz über eine Koppelbox mittels Messempfänger aufgenommen. Die Koppelboxen übertragen das Signal im entsprechenden Frequenzbereich mit einem Verhältnis von nahezu 1:1. Der exakte Übertragungsfaktor wurde in der Kalibrierung aufgenommen und ist in Bild 1 dargestellt. Zudem sind die Koppelboxen mit Sicherungen ausgestattet, die den Eingang des Messempfängers vor Überströmen schützt. Um die Richtlinien der Störaussendung im Niederspannungsnetz einzuhalten, wird ein Einspeisepiegel von maximal 120 dB $\mu$ V gewählt (siehe Bild 2).

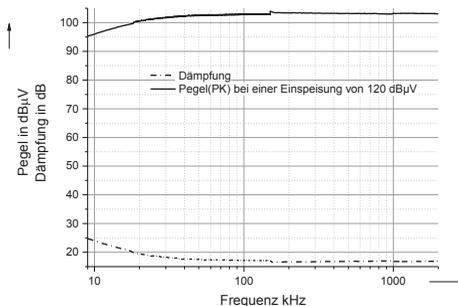
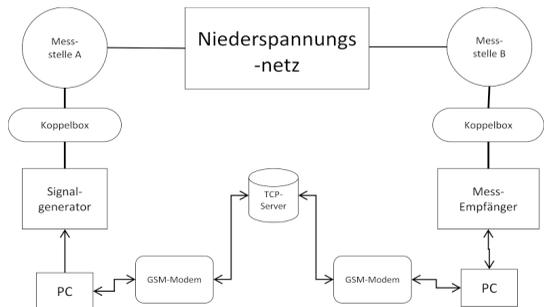
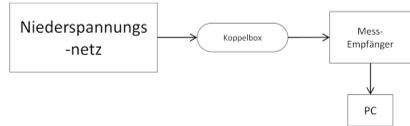


Bild 2: Dämpfungseigenschaften der Ankoppelboxen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 2 MHz

Synchronisiert werden der Signalgenerator und der Messempfänger über einen TCP-Server. Dadurch kann die Übertragungsfunktion der gewählten Netzstrecken bestimmt werden.

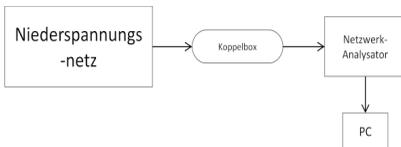
## 2.2 Aufbau zur Messung des Grundstörpegel

Eine wichtige Messung zur Beurteilung der PLC-Kommunikation im Niederspannungsnetz ist die Aufnahme des Grundstörpegels. Das Bild 3 zeigt den prinzipiellen Messaufbau. Zur Bestimmung der Grenzwerte und des Messverfahren wurde die Norm DIN EN 55022 [2] sowie die Norm DIN EN 55016-1-1 [3] als normative Grundlage verwendet. Dabei wurde im unteren Frequenzbereich von 9 kHz bis 150 kHz eine Schrittweite von 100 Hz und eine Bandbreite von 200 Hz und im relevanten Frequenzbereich oberhalb von 150 kHz eine Schrittweite von 5 kHz und eine Bandbreite von 10 kHz verwendet. Es wurde eine Koppelbox verwendet, die im Kapitel 2.1 beschrieben wurde.



**Bild 3: Schematische Darstellung des Systems zur Messung des Grundstörpegel**

## 2.3 Aufbau zur Messung der Netz-Impedanzen

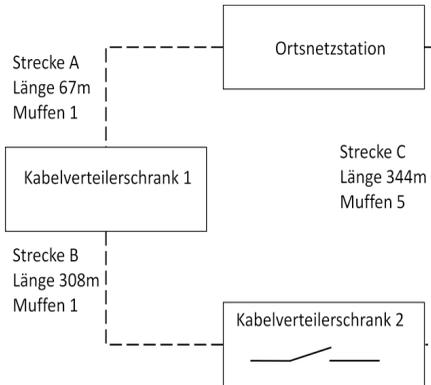


**Bild 4: Schematische Darstellung des Systems zur Messung der Impedanzen im Niederspannungsnetz**

Die Messung der Impedanzen im Niederspannungsnetz wurde über einen Netzwerkanalysator, der über die Koppelbox angeschlossen wird, realisiert. Dabei wurde der Frequenzbereich von 100 kHz bis 2 MHz untersucht. Zur Messung der Impedanz wird ebenfalls eine Koppelbox verwendet, die im Kapitel 2.1 beschrieben wurde. Die Impedanzen der Koppelbox und der Anschlussleitungen wurde mittels zugehöriger Software einkalibriert.

## 2.4 Beschreibung des Messortes

Die Messungen wurden an einem Werktag im August im Zeitraum von 9 bis 15 Uhr in einer dörflichen Region durchgeführt. Die Außenbedingungen während den Messungen waren konstant mit Bedeckungsgrad von 0/8 und einer Außentemperatur von ca. 30°C. Das untersuchte Versorgungsgebiet bestand aus einer Ortsnetzstation (ONS) und zwei Kabelverteilschranke (KVS) siehe Bild 5. Das Netz wurde als offener Ring betrieben, da



**Bild 5: Schematische Darstellung des Untersuchungsgebietes**

im KVS zwei die Verbindung zwischen den Sammelschienen offen war. Es hat sich eine Leitungsstrecke von 375 m für die Strecke A-B und 344 m für die Strecke C ergeben. Somit sind beide Strecken im Bezug auf die Kabellängen miteinander vergleichbar. Insgesamt sind 37 Haushaltskunden mit einer Gesamtarbeit von 229 MWh sowie sechs Photovoltaikanlagen mit einer Peakleistung von 216 kWp angeschlossen. Die Erfassung des Grundstörepiegels sowie der Impedanz wurden an der ONS (siehe Bild 6) als auch an den beiden KVS durchgeführt. Bei dem KVS (siehe Bild 7) sind jeweils zwei Messungen

durchgeführt worden: eine an der Sammelschiene der Strecke B und eine an der Sammelschiene zur Strecke C. Zur Erfassung der Übertragungsfunktion ist als Einspeiseort die ONS gewählt worden. Es wurde nacheinander zwischen den Phasen und PEN ein-



**Bild 6: ONS mit Messempfangern**



**Bild 7: KVS 2 mit Messempfangern**

gespeist und das Signal mit dem Messempfangern an den beiden KVS aufgezeichnet.

### 3 Ergebnisse der Messungen

#### 3.1 Grundstörpegel

Im Folgenden ist der Grundstörpegel an der ONS und der KVS 2 an der Sammelschiene zur Strecke A, B und C dargestellt. Bei der Darstellung des Störpegels der ONS (Bild 6) sind im Frequenzbereich unter 100 kHz erhöhte Störpegel mit einem Abstand von 8 kHz zu erkennen.

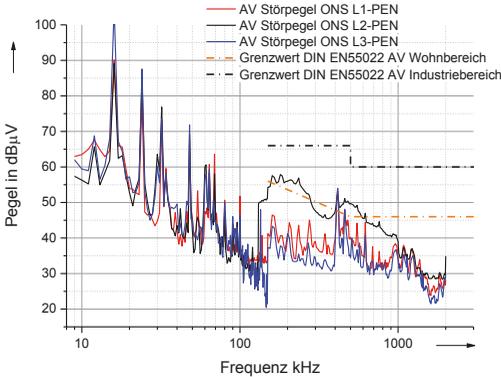


Bild 6 Störpegel an der ONS

auf eine Störquelle hin, die während der Messung zugeschaltet wurde. Aufgrund der Messdauer von 15 min pro Phase ist ein Zu- sowie Abschalten der Störquelle während der Messung sehr wahrscheinlich.

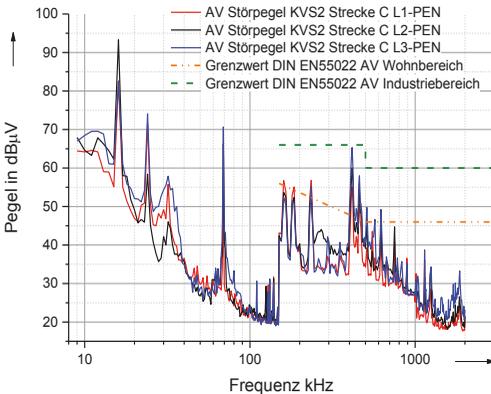


Bild 7 Störpegel an der KVS2 Sammelschiene Strecke C

Grenzwerte der En55022 (Störspannung) für den Industriebereich werden bei allen Messungen eingehalten, wo hingegen die Grenzwerte für den Wohnbereich überschritten werden. Des Weiteren ist auffällig, dass sich ein unterschiedlicher Verlauf zwischen den beiden Messungen am KVS2

zu erkennen. Dieses Kamm-spektrum wird mit großer Wahrscheinlichkeit durch Leistungselektroniken hervorgerufen, die mit 8 kHz-Taktfrequenz arbeiten. Hierunter fallen zum Beispiel PV-Umrichter, die im zunehmenden Maße im Niederspannungsnetz installiert werden. Des Weiteren ist bei der Messung an Phase 2 (L2) ab 130kHz ein Anstieg des Störpegels im Vergleich zu den anderen Phasen zu erkennen. Der Anstieg an lediglich einer Phase während der Messung deutet

In den Abbildungen Bild 7 und Bild 8 sind die Störpegel am KVS 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Störungen auf den Phasen eines Kabels ähnlich verhalten. Diese kann daher rühren, dass die Störer auf alle Phasen einspeisen oder dass ein Übertragen der Störungen auf Grund von kapazitiver und induktiver Kopplung zwischen den Phasen stattfindet. In allen drei Darstellungen ist zu erkennen, dass mit zunehmender Frequenz eine Abnahme des Störpegels sichtbar ist. Die

zeigt. Die in Bild 6 und Bild 7 zu erkennenden Störaussendungen im unteren Frequenzbereich sind im Bild 8 nicht so ausgeprägt erkennbar.

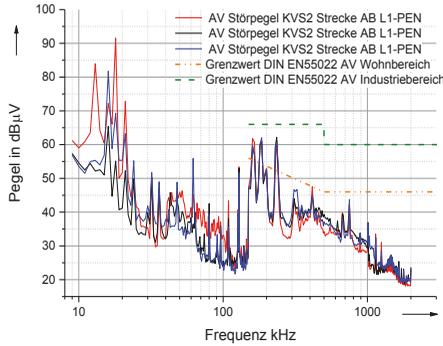


Bild 8 Störpegel am KVS2 Sammelschiene Strecke A B

### 3.2 Übertragungsfunktionen im Ortsnetz

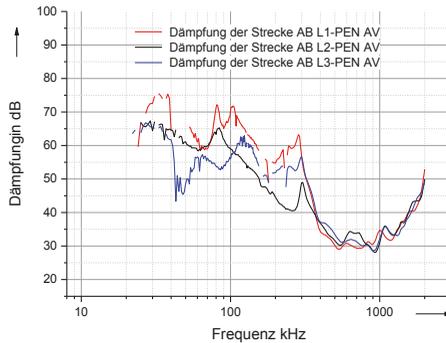


Bild 9: Dämpfung der Strecke AB

Die Messung der Übertragungsfunktion wurde nach dem in 2.1 beschriebenen Verfahren durchgeführt. Die Dämpfung der Strecke wurde berechnet indem von dem Einspeisepiegel die Dämpfung des Koppelsystems sowie die empfangenen Pegel subtrahiert wurden. Da der Grundstörpegel bei verschiedenen Frequenzen in der Höhe wie die Signalpegel gekommen sind, beziehungsweise diese überschritten haben, wurde ein Plausibilitätstest durchgeführt. Es wurden für die Darstellung der Streckendämpfung nur Messwerte verwendet, welche mindestens 2 dB über dem Rauschpegel lagen. Dieses hat zur Folge, dass in den Darstellungen Lücken auftreten, da hier aufgrund des zu geringen Signal-Rausch Verhältnisses keine Aussage getroffen werden konnte.

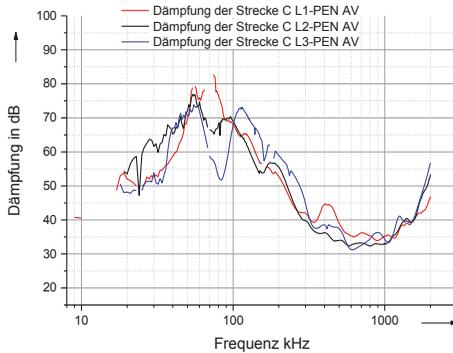


Bild 10: Dämpfung der Strecke C

Es ist in dem Bild 9 und Bild 10 deutlich zu erkennen, dass die Streckendämpfung zwischen 300 kHz und 1 MHz deutlich abnimmt. Diese geringere Dämpfung wirkt sich positiv auf die Übertragung mittels G3-PLC-Technik im Frequenzbereich zwischen 150 kHz und 500 kHz aus.

### 3.3 Impedanzmessung

An den Messstellen wurden Impedanzmessungen wie in Kapitel 2.3 beschrieben, durchgeführt. Die Messergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

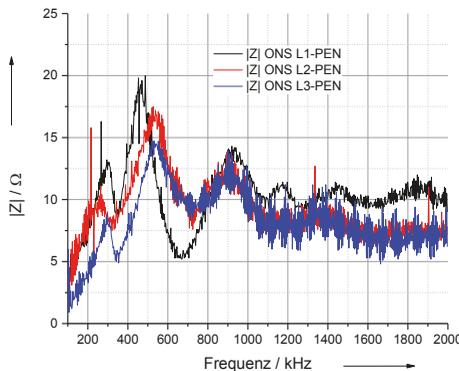


Bild 11: Gemessene Netz-Impedanz an der ONS

An den Messungen der Netz-Impedanzen in Bild 11 und Bild 12 ist das induktive Verhalten des Niederspannungsnetzes zu erkennen, da bis zu einer Frequenz von etwa 500kHz die Impedanz aller Phasen recht linear ansteigt. In diesem Frequenzbereich arbeiten G3 PLC Modems, die an ihrem Ausgang eine stark variierende Impedanz sehen.

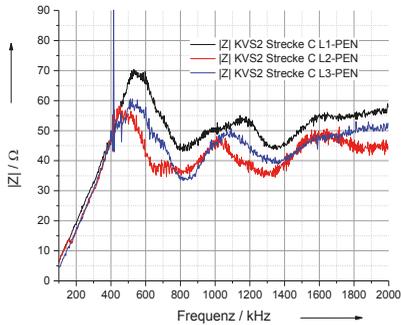


Bild 12: Gemessene Netz-Impedanz an der KVS2 Sammelschiene Strecke C

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es ist davon auszugehen, dass sich der Frequenzbereich von 150 kHz bis 500 kHz für die PLC Kommunikation aus Gesichtspunkten der Streckeneigenschaften eignet. In diesem Bereich sinkt sowohl die Dämpfung als auch die Störpegel auf der Strecke im Vergleich zum Frequenzbereich unter 150 kHz. Die Herausforderung für die PLC Modems liegt in der stark variierenden Netzimpedanz im Sendefrequenzbereich. Diese steigt an KVS2 von 5  $\Omega$  bei 150 kHz bis 60  $\Omega$  bei 500 kHz. In folgender Tabelle ist eine kleine Gegenüberstellung der Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR) bei einem fest angenommenen Übertragungspegel von 130 dB $\mu$ V bei einigen Frequenzen zusammengestellt, die eine Tendenz der Übertragungseigenschaften für die Kommunikation mittels PLC im Niederspannungsnetz anhand der durchgeführten Messungen zeigen soll.

	Frequenz (kHz)	Dämpfung (dB)	Signalpegel (dB $\mu$ V)	Störpegel (dB $\mu$ V)	SNR (dB)
Cenelec Band A	69	63,51	66,50	55,42	<b>11,07</b>
	95	63,87	66,14	38,15	<b>27,99</b>
G3-PLC Bereich (150-500kHz)	150	56,95	73,05	44,28	<b>28,77</b>
	415	37,39	92,62	53,22	<b>39,40</b>

Die erfassten Messergebnisse stellen nur einen kurzen Ausschnitt der Eigenschaften des Niederspannungsnetzabschnittes im untersuchten Frequenzbereich dar. Es sind weitere Messungen erforderlich, um die Eigenschaften des Niederspannungsnetzes umfassender beschreiben zu können.

### Literaturangaben

- [1] SC205A/Sec0339/R; Study report on electromagnetic interference between electrical equipment / systems in the frequency range below 150 kHz ed.2, April 2013
- [2] DIN EN 55022; Einrichtungen der Informationstechnik – Funkstöreigenschaften – Grenzwerte und Messverfahren
- [3] DIN EN 55016-1-1; Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit - Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Messgeräte