

Erweitertes Ortungsverfahren von netzperiodischen Störquellen auf der Grundlage nichtlinearer Signalauswertung als Hilfe bei Kommunikationsstörungen im Smart Grid

Dipl.-Ing. Martin Frey, ARGE Rundfunk-Betriebstechnik, Nürnberg, Sachgebiet EMV

1. Neuer Ansatz zur Ortung von EMV-Störquellen in ungerichteten Netzwerken

Üblicherweise werden bei der Ortung von Störquellen in ungerichteten Leitungsnetzwerken wie z.B. dem Stromnetz im Gegensatz zu Datennetzwerken, markante Merkmale von Störsignalen mit bekannten Mustern von typischen Störquellen verglichen und der vermutete Ort der Störquelle durch Korrelation des Ortes mit der Intensität der Merkmalsausprägung abgeleitet. Vielfach werden bei der Merkmalsgewinnung lineare Verfahren wie z.B. die Fouriertransformation oder solche der beschreibenden Statistik, wie z.B. Mittelwerte oder Varianzanalyse angewandt. Bei Störquellen, die sich im deterministischen Chaos befinden eignen sich nichtlineare Signalauswertungen besser. Bei der minimal-invasiven Methode zur Lokalisierung von Schaltnetzteilen mit schadhaftem Zwischenkreiskondensator in hochverfügbaren Anlagen kam z.B. die Methode der approximierten Entropie zum Einsatz. [1]

Objekt der hier vorgestellten Ortungsmethode sind EMV-Störquellen mit Störsignalmustern gemäß folgender Charakteristik:

- stationäres Verhalten,
- Periodizität und starre Kopplung (Synchronität) mit der Netzfrequenz,
- komplexer Signalverlauf,
- betrachteter Signalfrequenzbereich zwischen 3 und 150 kHz.

Ein solches Verhalten ergibt sich z.B. bei Schaltnetzteilen mit Stromspitzenwertregelung mit defektem Zwischenkreiskondensator. In diesem Fall erzeugt das Schaltnetzteil transiente Ströme um den Spannungsnulldurchgang. Ähnlich verhalten sich auch manche aktiven Filter zur Leistungsfaktor-Korrektur im Leerlauf. Beobachtet wurden aber auch Schaltnetzteile, deren Filter im Spannungsmaximum in Resonanz geraten. Die Resonanzfrequenz liegt weit unterhalb 150 kHz. Daher erfahren diese Störströme im Netz kaum Dämpfung durch Funkentstörfilter der angeschlossenen Geräte.

Die transienten Störströme pathologischer Schaltnetzteile entstehen durch das nichtlineare Zusammenwirken der Bestandteile des Schaltreglers unterhalb des energetischen Fließgleichgewichtes. Dadurch verliert sein Betriebszyklus im Phasenraum den quasi-reversiblen Charakter und gerät auf den Weg ins deterministische Chaos. Die Betriebstrajektorien nehmen immer komplexere Strukturen an, die sich in der Form des abnehmenden Eingangstroms zum Schaltregler niederschlagen. Der Vorgang wiederholt sich wegen des defekten Zwischenkreiskondensators in jeder Netzhalbschwingung mit Variationen, die von den jeweils geltenden Betriebsbedingungen zu Beginn der kriti-

schen Betriebsphase abhängen. Dennoch handelt es sich dabei um einen ergodischen Prozess mit konstanter Spektralverteilung des Störsignals.

In diesem Beitrag wird ein Ortungsverfahren vorgestellt, das auf der Basis der Informationstheorie arbeitet und statistische Zusammenhänge bei der Ausbreitung von Störsignalen in Netzwerken aufdeckt. Nach einer physikalischen Begründung wird der Algorithmus zur Bestimmung der kausalen Beziehung zwischen von der Störquelle beeinflussten Signalen im Netzwerk skizziert. Zur Validierung wurde ein Experimentiernetz mit zwei bekannten Störquellen aufgebaut. Zuletzt wird ein Ausblick auf eine mögliche technische Anwendung bei der Diagnose von Kommunikationsstörungen auf PLC-Strecken in einem Smart Grid gegeben.

2. Thermodynamisches Verständnis von elektromagnetischen Emissionen beim Betrieb elektrischer Geräte

Die Theorie der Thermodynamik liefert ein generelles Erklärungsmodell für derartiges Störverhalten [2]. Jedes in seinem Arbeitspunkt bestimmungsgemäß funktionierende elektrische Gerät befindet sich weit entfernt vom thermischen Gleichgewicht. Die über das Stromnetz zugeführte Energie deckt die thermischen Verluste und die Umwandlung der elektrischen Energie. Zur Aufrechterhaltung der internen Funktionen muss das offene System Energie in Form von Entropie an die Umgebung abgeben. Der elektromagnetische Anteil im radiofrequenten Bereich wird durch EMV-Maßnahmen auf ein zulässiges Maß begrenzt.

Unterschreitet der dem Gerät zugeführte Energiestrom eine durch die interne Regelung vorgegebene untere Grenze, strebt das System einem Betriebszustand zu, der dem thermischen Gleichgewicht zumindest nahekommt. Das Gerät baut überschüssige Energie ab und setzt sie in Form deutlich höherer Entropie in die Umgebung frei. Dadurch lässt sich ein solches Gerät in einem derartigen Zustandsübergang durch die Messung der Entropie in seiner Umgebung detektieren und unter bestimmten Bedingungen auch lokalisieren.

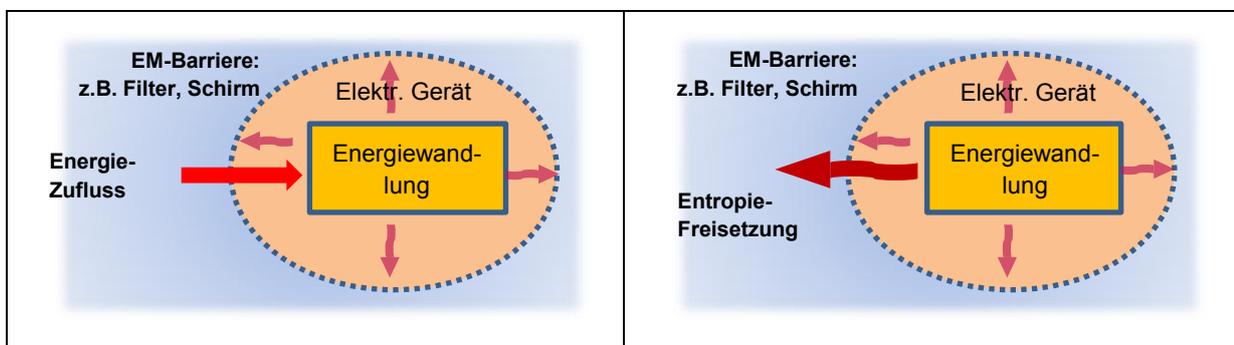


Bild 1: Offenes System im Fließgleichgewicht (links), offenes System auf dem Weg ins thermische Gleichgewicht (rechts): Entropiefluss als Mittel zur Störquellenortung

3. Informationstheoretische Methoden zur Detektion und Ortung von EMV-Störquellen

Im konventionellen EMV-Störmodell steht die physikalische Wirkung der elektromagnetischen Wechselwirkung der Störquelle bzw. der Störsenke mit der Umgebung im Vordergrund. In einem informationstheoretischen Modell spielt die physikalische Realität der von der Störquelle ausgehenden Energie keine Rolle. Die Wechselwirkung der von der Störquelle ausgehenden Energie (Entropie) selbst wird zur Ursache für Informationsflüsse. Daher kann man die Störquelle selbst als Informationsquelle betrachten. Von ihr gehen Informationsflüsse in die Umgebung. Das Aufspüren kausaler Zusammenhänge z.B. in einem Leitungsnetz wie dem elektrischen Stromnetz öffnet einen Weg zur Ortung der Störquelle. [4]

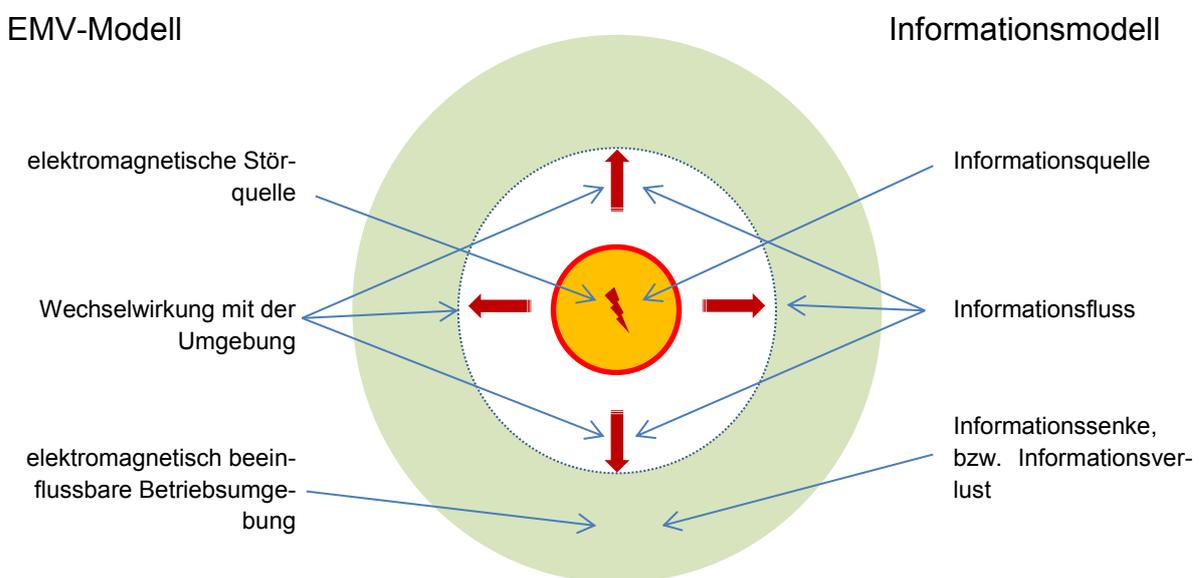


Bild 2: Analogie zwischen EMV- und Informationsmodell

Die als Informationsquellen erscheinenden EMV-Störquellen lassen sich anhand des von ihnen ausgehenden Informationsflusses aufspüren. In einem Netzwerk mit diskreten Signalpfaden, wie z.B. einem Stromnetz weisen alle Flussrichtungen von der Quelle weg und auf eine Senke hin. Netzknoten mit einer Mischung aus ankommenden und abgehenden Flussrichtungen wirken als Transitstellen. Um Stärke und Richtung eines Informationsflusses bestimmen zu können, müssen z.B. in einem Netzwerk zeitlich und örtlich korrelierende Zustandsfolgen an den Netzknotenpunkten bekannt sein.

3.1 Wie wird die Information gewonnen?

Die Information wird durch Abtastung und Digitalisierung mit geeigneten Analog-Digital-Umsetzern aus den statistischen Abhängigkeiten der einzelnen Abtastwerte bzw. Signalsequenzen im selben Signal zueinander oder zwischen zwei Signalen ermittelt. Die Grundlage dazu bildet die Definition des Informationsflusses beim dynamischen Übergang von einer Signalsequenz zur zeitlich darauf folgenden. Diese leitet sich von der

Definition des Informationsgehaltes I_μ eines Symbols μ als Logarithmus über den Kehrwert der Auftretswahrscheinlichkeit p_μ in einer Symbolreihe ab.

$$I_\mu = \log\left(\frac{1}{p_\mu}\right)$$

Für den Informationsfluss wird nicht die Häufigkeit von Abtastwerten eines Signals ausgewertet, sondern die Übergangswahrscheinlichkeit von einer mehrgliedrigen Sequenz zur nächsten. Dies lässt sich in einem Markowmodell für das zu analysierende Signal abbilden. Ein Markowmodell stellt die diskreten Signalzustände (Abtastwerte) und die Übergangswahrscheinlichkeiten basierend ausschließlich aus der unmittelbaren Vergangenheit dar. Die Übergangswahrscheinlichkeit wird durch die relative Häufigkeit angenähert, mit der ein bestimmter Sequenzübergang eintritt. Eine Sequenz gilt als Verbundereignis der einzelnen Signalwerte.

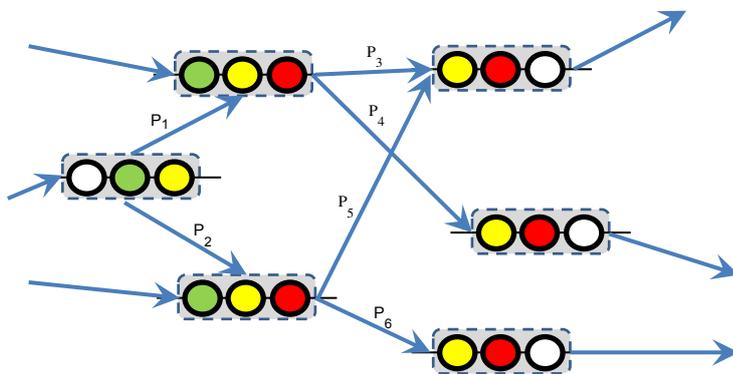


Bild 3: Ausschnitt aus einem Markowmodell mit dreigliedrigen Signalsequenzen

Die relative Häufigkeit eines Verbundereignisses lässt sich durch Abzählen in einem Ereignisraum bestimmen. Die Dimension des Ereignisraumes richtet sich nach Länge der Sequenz und ihrer Vorgeschichte, die als bekannt vorausgesetzt wird. Um den statistischen Einfluss von Messrauschen und Rundungsfehlern zu unterdrücken, wird um den Ort für das zu analysierende Referenzereignis eine Hyperkugel gelegt und alle Verbundereignisse der kompletten Signalreihen x und y gezählt, die in diese Kugel fallen. Als Ergebnis liegen nun ebenso viele Werte an angenäherten Übergangswahrscheinlichkeiten vor, wie jedes analysierte Sensorsignal Abtastwerte besitzt.

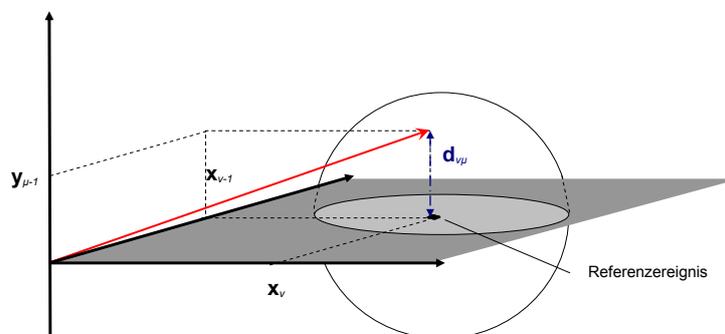


Bild 4: Beispiel für einen dreidimensionalen Ereignisraum mit eingetragener Hyperkugel mit den Signalzuständen \mathbf{x}_v , \mathbf{x}_{v-1} und $\mathbf{y}_{\mu-1}$ mit $\mathbf{d}_{\nu\mu}$ als Abstand zum Referenzereignis

3.2 Kausalität als Grundlage der Störquellenortung

Für die Störquellenortung in einem Netzwerk müssen mehrere Sensorsignale möglichst aus der näheren Umgebung der Störquelle auf Anzeichen für die Existenz einer zu suchenden Störquelle untersucht werden. Anzeichen für die Existenz instabiler leistungselektronischer Geräte sind regelmäßige Muster der freigesetzten Entropie. Die Entropie der instabilen Leistungselektronik schlägt sich in einem hohen Komplexitätsgrad in den Sensorsignalen nieder. Die hohe Komplexität im Signalverlauf bewirkt eine größere „räumliche“ Verteilung der Verbundereignisse im Ereignisraum. Daraus resultiert eine geringe Übergangswahrscheinlichkeit und somit ein hoher Informationsfluss von den als bekannt vorausgesetzten Signalsequenzen zum neuen. Dies bedeutet, dass in den Informationsflussverläufen der Sensorsignale jene Abschnitte mit höheren Werten dem eingangs beschriebenen Störmuster entsprechen. Im Falle des Schaltnetzteils mit defektem Zwischenkreiskondensator können diese Abschnitte den Spannungsnulldurchgängen der 50-Hz-Netzwechselfspannung zugeordnet werden. Bei anderen Störquellen mag dies für die Spannungsmaxima vorliegen, wie in Abschnitt 4 gezeigt wird. Bei der Suche nach solchen Störquellen interessiert nur die statistische Abhängigkeit zwischen Sensorsignalen in den ausgesuchten Zeitabschnitten, die dem Störmuster der Quelle entsprechen.

Da die Ortung auf der Bewertung der statistischen Kausalität der unterschiedlichen Sensorsignale zueinander beruht, muss der kausale Zusammenhang zwischen den Sensorsignalen aus den Informationsflüssen ermittelt werden. Die Kausalität besitzt eine Wirkintensität und eine Wirkrichtung. Diese berechnet sich in Anlehnung an die Definition der Transferentropie nach T. Schreiber aus dem Vergleich der statistischen Abhängigkeit der Informationsflüsse für beide Wirkrichtungen zwischen den beiden untersuchten Signalen [4]. Dabei geht man von der Vermutung eines kausalen Zusammenhangs zwischen zwei Signalen aus, wenn sich der Informationsfluss (IF) für einen Zustandsübergang in einem Signal durch Einbeziehung von Zuständen im zweiten Signal vermindern lässt. Richtung und Stärke der Kausalität ergeben sich aus dem Kehrwert der Differenz beider Informationsflüsse.

$$\text{Kausalität } x \rightarrow y = \frac{1}{\text{IF}_x - \text{IF}_y};$$

$\text{IF}_x = \sum_{n \in K} \log\left(\frac{p(x_n | x_{n-1}, y_{n-1})}{p(x_n | x_{n-1})}\right)$; mit $p(x_n | x_{n-1}, y_{n-1})$ als bedingter Wahrscheinlichkeit für das Ereignis x_n im Signal x , wenn die unmittelbaren Vorgänger x_{n-1} von Signal x und y_{n-1} von Signal y bekannt sind.

$\text{IF}_y = \sum_{n \in K} \log\left(\frac{p(y_n | y_{n-1}, x_{n-1})}{p(y_n | y_{n-1})}\right)$; analog zu IF_x

mit $K \in \text{relevante Abschnitte für Störmuster}$

Aus den Kausalitätswerten für jede Zweierkombination ergibt sich eine quadratische, diagonalsymmetrische Kausalitätsmatrix mit Nullen als Diagonale. Die Symmetrie ergibt sich aus der Identität der Wirkintensität zwischen zwei Signalkombinationen mit inversem Vorzeichen, aus dem die Wirkrichtung hervorgeht.

Signale	S1	S2	...	Sn
S1	0	K12	...	K1n
S2	-K12	0	...	K2n
...
Sn	-K1n	-K2n	...	0

Bild 5: Kausalitätsmatrix mit Kausalitätswerten K_{nm}

Aus der Kausalitätsmatrix lassen sich nun die wechselseitigen Abhängigkeiten der Sensorsignale in einem Netzwerk in Bezug auf die verschiedenen Störsignalmuster ablesen. Zunächst werden nur die Kausalitätsbeziehungen ausgewertet, für die eine galvanische Verbindung im Netzwerk vorliegt. Der Sensor in unmittelbarer Nähe einer Störquelle fällt durch ausschließlich positive Kausalitätswerte für die realen galvanischen Verbindungen im Spaltenvektor der Kausalitätsmatrix auf. Mit der Kenntnis des Sensorstandortes im Netzwerk ist auch das Netzwerksegment markiert, in dem die Störquelle zu suchen ist. Damit ist die gestellte Aufgabe der Störquellenortung erfüllt.

Aus der Matrix lassen sich aber auch die ausgesprochenen Störsignalsenken identifizieren. Sie lässt sich anhand der ausschließlich negativen Kausalitätswerte erkennen. Außerdem ist es möglich, die Reichweite einer Störquelle im Netzwerk darzustellen. Dies erfolgt über die Auswertung aller Kausalitätsbeziehungen, unabhängig von einer unmittelbaren galvanischen Verbindung.

4. Validierung an einem Experimentiernetzwerk

Der zuvor beschriebene Algorithmus wurde an einem Experimentiernetzwerk mit 9 verzweigten Stromkreisen und zwei bekannten Störquellen überprüft. Bei der ersten Störquelle handelt es sich um ein aktives Oberschwingungsfilter, das im Leerlauf in jedem Spannungsnulldurchgang Störpulse erzeugt. Sein Störmuster ähnelt also dem von Schaltnetzteilen mit defektem Zwischenkreiskondensator, was auf einen instabilen Betrieb im Bereich der Spannungsnulldurchgänge hinweist. Die zweite Störquelle stellt ein modernes Labornetzteil mit aktivem Leistungsfaktorkorrektor dar. Dies zeigt im Leerlauf ein von der ersten Störquelle verschiedenes Muster. Es erzeugt in den Spannungsmaxima Störströme, die sich möglicherweise mit einer Filterresonanz bei Leerlauf erklären lassen. Aufbau des einphasigen Niederspannungsnetzwerks und seine Belastung geht aus Bild 6 hervor.

Jeder Netzwerkzweig wurde mit einem Sensor überwacht, wie er auch bei der eingangs erwähnten minimal-invasiven Lokalisierung pathologischer Schaltnetzteile eingesetzt wurde. Der Stromsensor ist mit einem Hochpass versehen, der den Grundschwingungsstrom und seine Harmonischen bis etwa 3 kHz bedämpft. Die Messung der Netzspan-

nung wird zur nachträglichen Signalsynchronisation benötigt. Über eine LAN-Schnittstelle werden die Messwerte an einen Hostrechner zur späteren Weiterverarbeitung übermittelt.

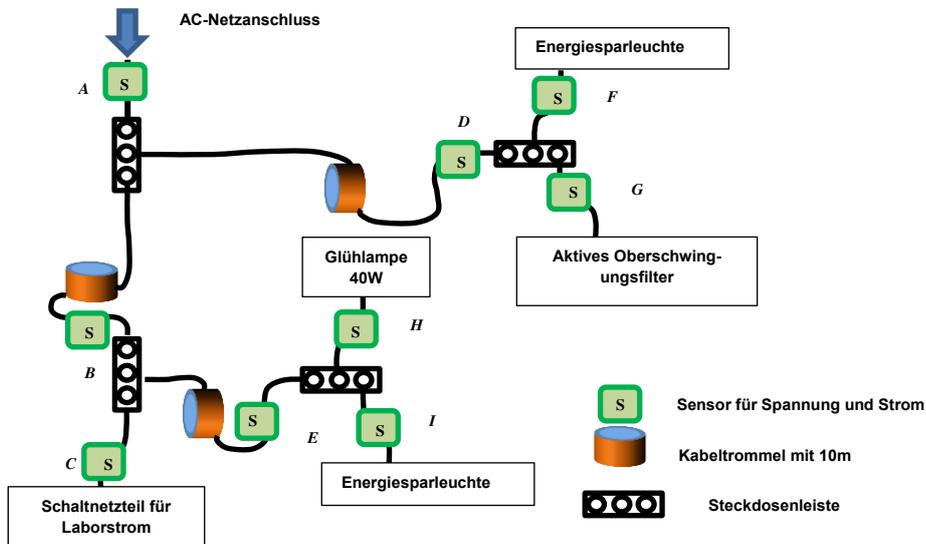


Bild 6: Experimentiernetzwerk

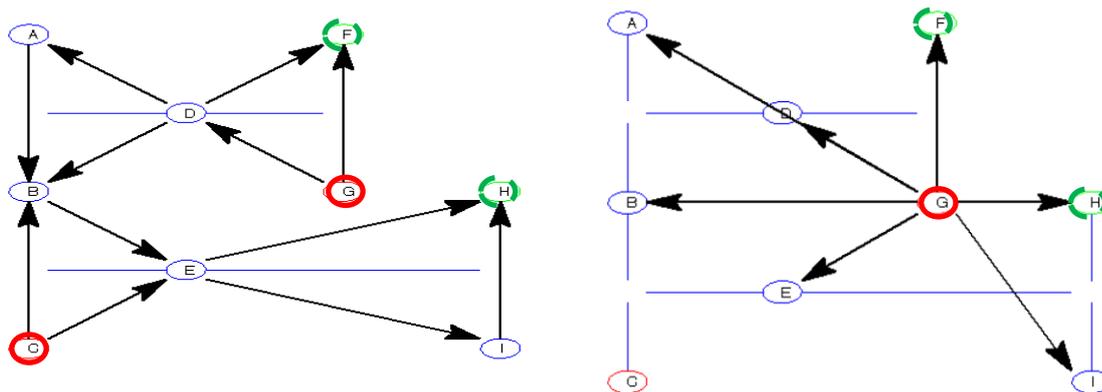


Bild 7: Kausalitätsbeziehungen zwischen den Sensorsignalen im Experimentiernetz

Die beiden Störquellen werden vom in MATLAB programmierten Algorithmus identifiziert und der zugehörige Sensorstandort in der Netzkarte markiert. Die Wirkpfeile gehen von beiden Störquellen aus. Daneben existieren offenbar zwei ebenfalls markierte Störsignalsenken, die mit gestrichelten Kreisen umrandet sind. Die Reichweite der Störwirkung von Störquelle im Stromkreis hinter Sensor G wird im rechten Diagramm dargestellt. Die Wirkung des instabilen aktiven Oberschwingungsfilters ist praktisch im gesamten Netzwerk nachweisbar.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Welchen Vorteil bietet die informationstheoretische Betrachtungsweise eines EMV-Störphänomens?

1. Identifizierung von Störquellen ohne tiefere Kenntnis der physikalischen Parameter des signalerzeugenden Prozesses; (modellunabhängiger Algorithmus)
2. Lokalisierung von Störquellen in einer vorgegebenen Betriebsumgebung ohne tiefere Kenntnis der physikalischen Parameter der Umgebungsstruktur;
3. Diagnose von Anlagen bis auf Geräteebene; [3]

5.2 Entwurf einer Anwendung bei der Diagnose von Kommunikationsstörungen auf PLC-Verbindungen im Smart Grid

Gemäß dem politischen Willen, Kernkraftwerke bis 2022 zu ersetzen und den Anteil von Großkraftwerken mit fossiler Energienutzung zugunsten regenerativer Stromerzeugung aus Sonne, Wind und Biomasse zurückzudrängen, kann dies nur gelingen, wenn das elektrische Energieversorgungsnetz zunehmend über intelligente Kommunikationsstrukturen bis in die letzten Netzausläufer verfügt. Die dafür geeigneten Technologien befinden sich von einigen Pilotprojekten abgesehen noch in der Entwicklung. Wissenschaftlichen Studien zufolge gilt der Datenverkehr über Stromleitungen mit sogenannten PLC-Modems als ernstzunehmende Alternative [5]. Für Managementaufgaben mit relativ geringem Datenverkehr wie z.B. Smart Metering eignet sich Schmalband-PLC im Frequenzbereich zwischen 3 und 148,5 kHz.

Für die meisten elektrischen Geräte existieren in diesem Frequenzbereich keine EMV-Grenzwerte für die Störaussendung. Dies bedeutet, dass die im Abschnitt 2 erwähnte elektromagnetische Barriere erst ab 150 kHz wirkt. Insbesondere leistungselektronische Anlagen mit Strömen von mehr als 100 A je Phase benutzen Taktfrequenzen weit unter 100 kHz und können u.U. die PLC-Kommunikation stören. Daneben kann es bei i.a. unauffälligen Geräten, wie z.B. Schaltnetzteilen oder Leuchten-Vorschaltgeräten u.ä. auch durch Alterungserscheinungen mit teilweisen Bauteilausfällen zu Störungen kommen. In diesen Fällen kann eine schleichende Verschlechterung der Kommunikationsqualität beobachtet werden. Hier stellt das vorgestellte Verfahren eine intelligente Netz-Diagnosefunktion zur Verfügung, mit deren Hilfe die Ursache für die möglicherweise anfangs noch sporadischen Kommunikationsausfälle gefunden und beseitigt werden kann.

6. Literatur

- [1] M.Frey: Minima-invasive Methode zur Lokalisierung von Schaltnetzteilen mit schadhaftem Zwischenkreis-Kondensator in hochverfügbaren Anlagen, VDE Verlag, EMV 2012
- [2] D. Kondepudi, I. Prigogine: Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures, John Wiley & Sons 2007
- [3] M. Bauer, J.W. Cox, M.H. Caveness, J.J. Downs, N.F. Thornhill: Finding the Direction of Disturbance Propagation in a Chemical Process Using Transfer Entropy, IEEE Transactions on Control Systems, Vol. 15, No. 1, Januar 2007
- [4] T. Schreiber: Measuring information transfer, Phys. Rev. Lett., vol. 85, pp. 461-464, 2000
- [5] S. Galli, A. Scaglione, Z. Wang: For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid, arXiv:1010.1973v2 [cs.NI] 12 Jan 2011