

Power Line Communications: Sensorlose Netz- / Anlagenüberwachung

Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch, Prof. Dr.-Ing. Stephan Pfletschinger, Jens Lottermoser M.Sc., Nafiseh Shahbazi Ph.D.

Im Projekt MOBCOM wird ein neues Verfahren zur Zustandsüberwachung von elektrischen Betriebsmitteln in Niederspannungsnetzen und Anlagen entwickelt. Mittels PLC (power line communication) Technologie werden hochfrequente transiente Vorgänge auf dem Stromkanal und dessen Übertragungseigenschaften erfasst und bewertet. Durch Ableiten bestimmter Parameter soll zustandsbedingte Wartung vorhergesagt und so der Ausfall von Betriebsmittel vermieden werden.

In the MOBCOM project, a new procedure for condition monitoring of electrical equipment in low-voltage networks is being developed. PLC (power line communication) technology is used to record and evaluate high-frequency transient processes and its transmission characteristics. By deriving certain condition parameters, maintenance services are to be predicted and therefore the failure of equipment is to be avoided.

Monitoring von Energieversorgungsnetzen und Anlagen

Eine wichtige Grundvoraussetzung von effizienten Netzen ist die Betriebssicherheit der Netze sowie der angeschlossenen Verbraucher und Anlagen. Im Gegensatz zu Hoch- und Mittelspannungsnetzen findet in der Regel in Niederspannungsnetzen keine Überwachung von Überlast und transienten Ausgleichsvorgängen statt [1]. Ein Grund hierfür ist die örtliche Ausdehnung (Größe) der Netze, der dadurch anfallenden großen Anzahl an Messgeräten und Daten. Bisher war eine Überwachung auch nicht notwendig, da man Betriebsmittel entsprechend großzügig auslegte. Seit einigen Jahren verändern sich das klassische Planungsleitbild und die Techniken der elektrischen Energieversorgung. Dabei spielen die Anforderungen an effizientere Netze eine genau so große Rolle wie die stetig ansteigende Einspeiseleistung aus erneuerbaren Energien. Hierbei entstehen immer wieder kritische Betriebszustände und Überlastungen. Aus diesen Erfahrungen erwuchs die Forderung nach intelligenten Stromnetzen (Smartgrids).

Andauernde Überlasten und transiente Ausgleichsvorgänge führen zu vorzeitigem Altern und auch zum Versagen von Betriebsmitteln. Wiederkehrende Entladungsimpulse und repetierende Stoßspannungen führen zu diesen Effekten. Das Auftreten von Teilentladungen (TE) ist dabei ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung der Isolationsqualität der Betriebsmittel [2]. TE-Messungen erlauben eine Diversifizierung von Schwachstellen in der Isolation, dabei ver-

ursachen unterschiedliche Fehler unterschiedliche Teilentladungsmuster [2]. Durch die Analyse dieser Muster können Rückschlüsse auf Art, Ort, Intensität und Ursache des Fehlers getroffen werden.

Analyse von Teilentladungen

Die Entwicklung hochleistungsfähiger elektrischer Komponenten und Geräte sowie der vermehrte Einsatz von Halbleitertechnologien bringen die Isolationssysteme der Betriebsmittel aufgrund erhöhter elektrischer Beanspruchung an ihre Grenzen [3]. Teilentladungen treten aufgrund von lokalen Feldstärkeüberhöhungen auf. Sie sind örtlich beschränkte elektrische Entladungen, die nur einen Teil der Isolationsstrecke überbrücken und nicht unmittelbar zum Durchschlag (Spannungszusammenbruch) führen [IEC60270]. TE finden in allen Arten von Isolationssystemen statt. Diese beeinträchtigen die elektrische Festigkeit im Normalbetrieb jedoch meist nicht. Dennoch kommt es aufgrund von TE zur Erosion des Isolationsmaterials, was bei übermäßiger Einwirkung zu einem Lawineneffekt und letztendlich zum Durchschlag und damit zum Defekt des Bauteils führt [2].

TE lässt sich nicht direkt am Entstehungsort im Betriebsmittel selbst messen, sondern nur an den äußeren Anschlussklemmen. Dadurch ist die an den Anschlussklemmen gemessene „scheinbare Ladung“ nicht gleich der „wirklichen Ladungsmenge“, die lokal am Standort der Entladung stattfindet. Die gemessenen Impulse erfahren entsprechend der Umgebungsbedingung

eine charakteristische Dämpfung. Deshalb ist für die Fehlerdiagnose die gemessene Intensität von TE nur bedingt aufschlussreich [2]. Aussagefähige Kenngrößen für die Beurteilung von TE sind Phasenlage der Teilentladungen, Polaritätseffekte, Impuls-Häufigkeit und -Regelmäßigkeit, Veränderungen der Intensität mit der Spannung sowie das Verhältnis von Einsatz- zu Aussatzspannung (Hysterese) [2].

Eigenschaften von Powerline-Kanälen

Im Projekt ist die Kenntnis der Kanalübertragungseigenschaften für den Entwurf von Kommunikationssystemen und der Analyse von TE eine notwendige Voraussetzung. Charakteristische Kanalparameter sind die komplexe Netzzugangsimpedanz, die Übertragungsdämpfung, der Phasengang und das Störzenario [4]. Durch die Belastung des Netzes mit angeschlossenen Verbrauchern kann die Netzimpedanz am Mess- oder Einspeisepunkt zudem stark schwanken. Dies führt bei sehr kleinen Impedanzen dazu, dass die Signalenergie von Impulsen oder PLC-Signalen über die Last „kurzgeschlossen“ wird und somit eine starke Dämpfung erfährt. Die Netzzugangsimpedanz bedingt die Einspeiseleistung. Die im Niederspannungsnetz verwendeten Kabel weisen verschiedene Wellenwiderstände auf. An deren Übergängen werden Störungen durch Reflexionen verursacht. Hochfrequente Signalanteile werden durch die kapazitive Kopplung in andere Phasen und Erd-/Neutralleiter übertragen. Diese Eigenschaften begünstigen Mehrwegausbreitungen mit stationärem und/oder frequenzselektivem Fading. Dies überlagert zusätzlich die Tiefpasscharakteristik der Verkabelung [4].

Für die Untersuchung vorhandener Impulsstörer wurde im Labor mit einem Hochpassfilter und Oszilloskop die Netzspannung gemessen. Das Hochpassfilter dämpft die niederen Frequenzen bis ca. 1,5 kHz. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die gefilterte Spannung zwischen L1 und N für zwei 50 Hz Netzperioden.

Für einen Phasenbezug der Impulse wurde zusätzlich die 50 Hz Netzperiode dargestellt. Es fällt auf, dass sich die hochpassgefilterten Frequenzen periodisch mit der 50 Hz-Schwingung wiederholen. Wie in Abbildung 2 dargestellt, wird durch die Fourier-Analyse sichtbar, dass im hochfrequenten Signalgemisch verstärkt Signalanteile von 50 Hz Oberschwingungen enthalten sind (vgl. THD-Analyse). Diese können negative Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz, als auch auf die angeschlossenen Verbraucher,

haben. Hierbei erhöhen aperiodische Impulsstörer den Rauschpegel über das ganze Frequenzspektrum und periodische Impulsstörer treten als Peak bei deren Wiederholfrequenz auf.

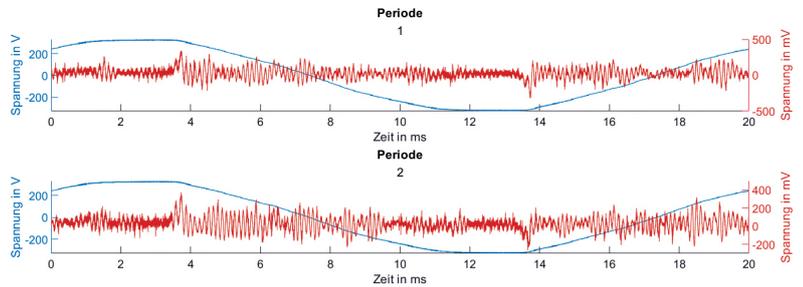


Abb. 1: Hochpassgefilterte Netzspannung (orange) wurde phasenbezogen zur 50 Hz Netzspannung (blau) aufgetragen

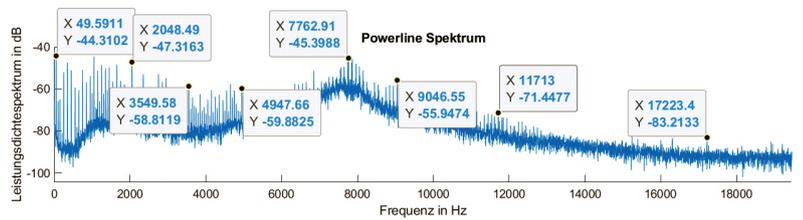


Abb. 2: Hochpassgefiltertes Frequenzspektrum der Netzspannung

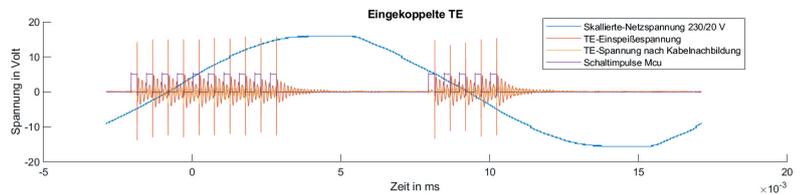


Abb. 3: Mit TE-Generator eingekoppelte TE in Primärseite Trafowicklung (rot), nach Kabelnachbildung gemessene gedämpfte TE-Impulse (gelb), skalierte Netzspannung (blau), Impulsansteuerung Mikrocontroller (violett)

Emulation und Messung von TE-Muster (Labor-Demonstrator)

Zur Verifikation theoretischer Modelle und der Betriebsüberwachung mittels PLC-Systemen, wurde eine Verteilnetznachbildung des Niederspannungsnetzes im Labor aufgebaut. Aus Sicherheits- und Kostengründen ist die Leistung, die im Demonstrator umgesetzt werden kann, im Vergleich zur Leistung im realen Niederspannungsnetz auf ein niedrigeres Niveau skaliert.

Im Labor wurde eine Konfiguration bestehend aus einer Ring- und einer Stickleitung mit den typischen elektrischen Betriebsmitteln wie Umspannwerk (Transformator und Schaltanlage), Stromkabel (hintereinander geschaltete Kabelnachbildung als PI-Schaltung) und Verbraucher aufgebaut. Die Ringleitung wurde durch eine dreiphasige PI-Schaltung mit konzentrierten Bauteilen nachgebildet. Als Vorlage für die Parametergröße der Bauteile wurde ein typisches Niederspannungskabel mit einer Länge von 3 km gewählt. Als Verbraucher kommen Baugruppen mit fest einstellbaren Parametern und eine programmierbare Lasteinheit zum Einsatz. Um reales Fehlerverhalten zu analysieren, kann die eingesetzte Lasteinheit besondere Fehlerfälle wie Lastsprünge und Spannungseinbrüche in den Lastzyklus einsteuern. Somit lassen sich reale Lastverhalten von Haushalten oder Unternehmen nachbilden.

Es wurde ein programmierbarer Teilentladungsgenerator entwickelt, um verschiedene TE-Muster emulieren zu können. Mittels des TE-Generators lassen sich zu definierten Zeitpunkten Teilentladungsimpulse in die verschiedenen Betriebsmittel einkoppeln. Der TE-Generator basiert auf einer Abwandlung einer Hochsetzstellerschaltung. Die Abbildung 3 zeigt ein emuliertes und mit dem Oszilloskop aufgezeichnetes typisches TE-Muster für Kontaktrauschen. Einkoppelt wurden die TE-Impulse auf der Primärseite des Verteilnetztransformators. Der gelbe Spannungsverlauf zeigt die Messung nach der 3 km Leitungsnachbildung. Es ist eine deutliche Phasenverschiebung und Dämpfung der Amplitude zu erkennen. Die messtechnische Erfassung von Strömen und Spannungen der jeweiligen Phasen erfolgt mit dem Smartmeter PAC4200 von Siemens.

Powerline Communication (PLC)

Breitbandige Datenübertragung über die Stromleitung arbeitet mit dem ebenfalls im Mobilfunk und digitalem Rundfunk angewandten

orthogonalen Mehrträgermodulationsverfahren OFDM (orthogonal frequency division multiplex). Dieses Verfahren zeichnet sich durch seine hohe Flexibilität bzgl. der Sendefrequenzen und einer hohen Robustheit gegenüber Mehrwegeausbreitung aus, welche in Energienetzen durch Reflexionen an Leitungsenden und fehlangepasste Lasten entsteht.

Im PLC-Sender werden, wie in Abbildung 4 gezeigt, die Datenbits zunächst codiert, um eine zuverlässige Übertragung zu gewährleisten. Die codierten Bits werden zusammen mit Steuerinformationen wie Pilotsymbolen und einer Paketnummer in eine Rahmenstruktur eingebettet und anschließend mit einer inversen diskreten Fouriertransformation (iFFT) auf die Unterträger eines vordefinierten Frequenzbands moduliert. Der IEEE-Standard für breitbandiges PLC [5] gibt folgende zwei Frequenzbänder vor:

- Frequenzband 0: 1,95 MHz bis 11,96 MHz, Unterträger 80, ... 490.
- Frequenzband 1: 2,44 MHz bis 5,62 MHz, Unterträger 100, ... 230.

Nach der Modulation wird ein Schutzintervall in Form eines zyklischen Präfixes eingefügt, welches das Signal unempfindlich gegen durch Mehrwegeausbreitung verursachte Eigeninterferenzen macht. Dieses Signal wird vollständig in Matlab erzeugt und über Gigabit-Ethernet an ein Software-Defined-Radio-Modul übertragen.

Dieses Modul setzt das digitale Signal mit einer Abtastfrequenz von 25 MHz in das analoge Sendesignal um, das mit einer Einkoppelschaltung in das Stromnetz eingespeist werden kann. Der Empfänger verarbeitet das Empfangssignal im Wesentlichen in der umgekehrten Reihenfolge: Das analoge Signal wird von einem weiteren SDR-Modul abgetastet und über Ethernet an einen weiteren Rechner übertragen, wo zunächst ein zusammenhängendes Signal mit einer Dauer von mehreren Sekunden abgespeichert wird. Bei der Decodierung des Empfangssignals muss

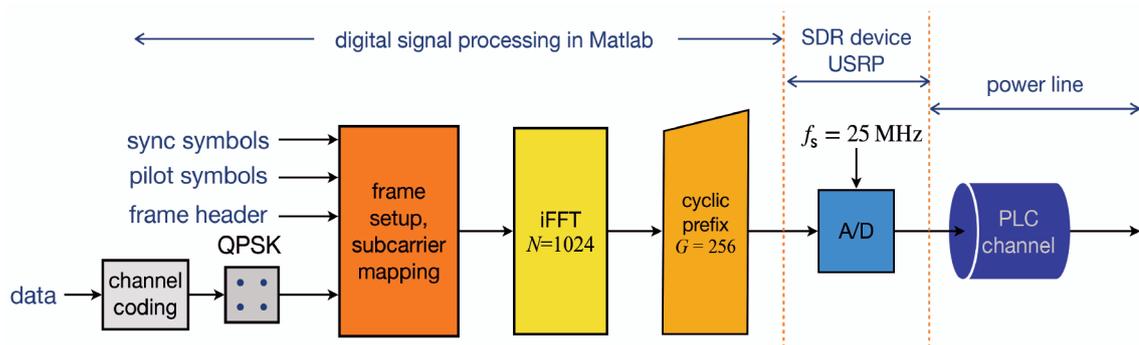


Abb. 4: Blockschaltbild des PLC-Senders

sich der Empfänger zunächst auf die Rahmenstruktur synchronisieren und dann den anfangs unbekanntem Kanal mit den eingebetteten Pilot-symbolen schätzen. Durch dieses Verfahren kann die Kanalübertragungsfunktion im Empfänger mit hoher Genauigkeit und zeitlicher Auflösung bestimmt werden, was wiederum Rückschlüsse auf die Netztopologie und den Zustand des Netzes zulässt (siehe Abbildung 5).

Neben der Bestimmung der Übertragungsfunktion soll das Empfangssignal auch für die Analyse von Störungen durch Teilentladungen und anderen Ursachen analysiert werden. Das PLC-Empfangssignal bietet dafür hervorragende Voraussetzungen, da es durch die hohe Abtastfrequenz von 25 MHz eine hohe zeitliche Auflösung bietet und auch ohne ein PLC-Sendesignal ständig zur Verfügung steht.

Zusammenfassung und Ausblick

Bisher konnte gezeigt werden, wie mittels PLC-Technologie zusätzlich zur Kommunikation auch die Detektion von TE möglich ist. Künftig soll durch weitergehende Untersuchungen der Impuls- und Dämpfungscharakteristika Ort, Art und Intensität der Fehlstelle ermittelt werden. Hierfür werden verschiedene TE-Muster emuliert und mit Modellen und KI ausgewertet. Durch kontinuierliche Datenanalysen sind Prädiktionen zu Zustandsbewertungen von Betriebsmitteln möglich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jede Messung eine ortsabhängige Information des Netzes und der Betriebsmittel liefert und so zusammen mit historischen Aufzeichnungen Bewertungen zu deren Zustand ermöglichen.

Referenzen/References:

- [1] K. Heuck, K.-D. Dettman, D. Schulz: „Elektrische Energieversorgung“, 9. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2013
- [2] A. Küchler: „Hochspannungstechnik“, 4. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017
- [3] R. Winter: „Measurement and diagnosis of partial discharges in low voltage applications ≤ 1000 volts“, ZVEI - German Electrical and Electronic Manufacturers' Association Electrical Winding & Insulation Systems Division, 2017
- [4] Bausch, J, Characteristics of Indoor Power Line Channels in the Frequency Range 50-500 kHz, Proceedings of the 10th International Symposium on Power-Line and its Applications, Orlando, USA, 2006
- [5] IEEE 1901.1-2018: IEEE standard for medium frequency (less than 12 MHz) power line communications for smart grid applications. Mai 2018

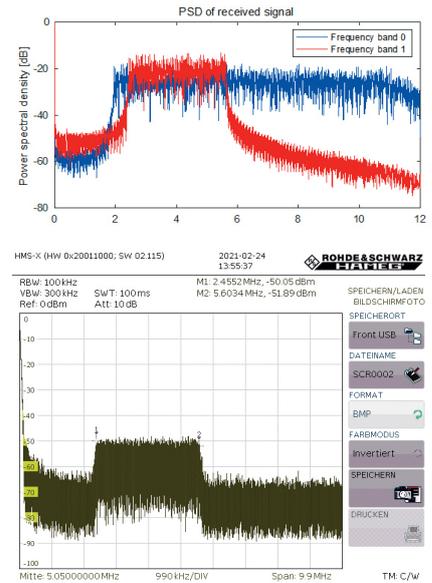


Abb. 5:

Leistungsdichtespektren des empfangenen Signals, in Matlab für beide Frequenzbänder (links oben) und Signal an der Eingangsbuchse des SDR-Moduls, mit externem Spektrumanalysator gemessen (links unten)

AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch
Studiendekan RED, Fakultät M+V,
Mitglied INES, Forschung - Model Based
Condition Monitoring, Lehre: Elektrotechnik,
elektrische Maschinen und Anlagen
joerg.bausch@hs-offenburg.de



Prof. Dr.-Ing. Stephan Pfletschinger
Studiendekan CME, Forschung - Model Based
Condition Monitoring, Lehrgebiete: Kommuni-
kationstechnik und Nachrichtensysteme
stephan.pfletschinger@hs-offenburg.de



Jens Lottermoser M.Sc.
Akad. MA, Mitglied INES
Forschungsgruppe: MOBCOM - Model
Based Condition Monitoring
jens.lottermoser@hs-offenburg.de



Nafiseh Shahbazi Ph.D.
Akad. MA., Forschungsgruppe: MOBCOM -
Model Based Condition Monitoring nafi-
seh.shahbazi@hs-offenburg.de