

Wavelet-Ströme lassen Rechner abstürzen

Das PE/PIN-1-Problem

B. Steinkühler, H.-G. Hergesell

Seit ca. 15 Jahren lassen sich verstärkt Störungen und Schäden an installierten elektrischen und elektronischen Geräten feststellen, die trotz aller Bemühungen hinsichtlich der Störfestigkeit und Qualitätsverbesserung der Produkte nicht behoben wurden.

Die Anwender oder das Servicepersonal versuchen durch den Austausch/Einsatz neuer Geräte oder durch Softwareupdates die zum Teil nicht nachvollziehbaren, plötzlichen Funktionsstörungen der Systeme in den Griff zu bekommen. Dabei stellen die Beteiligten häufig fest, dass die ausgetauschten Geräte in der Werkstatt oder im Systemlabor funktionieren, aber in bestimmten Umgebungen

- ausfallen,
- Daten langsamer übertragen werden,
- Festplatten undefinierte Fehler aufweisen,
- Farbbildschirme flackern oder
- temporäre Fehler auftreten.

An derartigen Installationsorten finden sich außerdem häufig folgende Fehler:

- defekte Rechnernetzteile,
- überhitze und abgebrannte Rückleiter (N-Leiter),
- häufige Ausfälle von EDV-Schnittstellen nach Stromunterbrechungen,
- das Auftreten von Stehwellen auf PE-Leitern in Rechenzentren,
- Korrosion an Rohrleitungssystemen sowie Erdern und Blitzschutzsystemen.

Alarmanlagen und LAN-Netze, die sorgfältig geplant, installiert und auch abgenommen sind, zeigen Leitungs- und Übertragungsfehler. Schon bei geringsten Unterbrechungen der elektrischen Stromversorgung kommt es zu Zerstörungen von Datenübertragungsschnittstellen. Mancher Betreiber beginnt gar an Gespenster (Spooky Networks) zu glauben oder hat bestimmte Nutzer in Verdacht, Sabotage zu betreiben, da scheinbar nur die von bestimmten Perso-

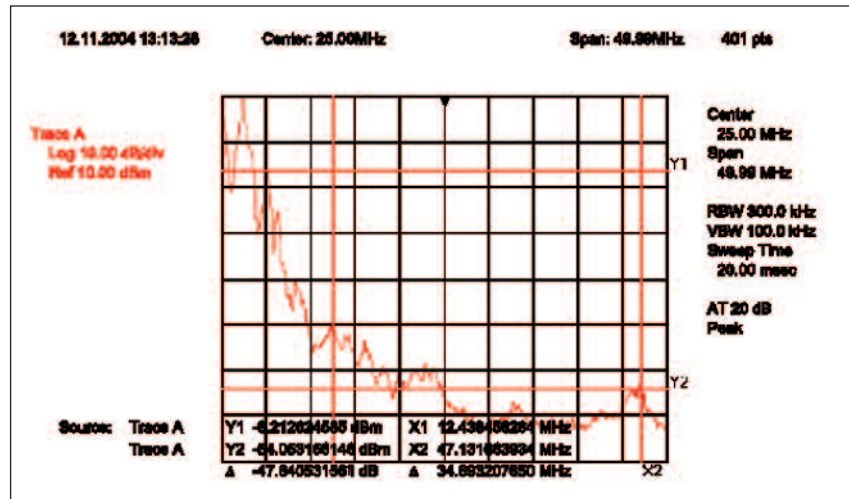


Bild 1: Spektrum auf der PE-Leitung in einem Rechenzentrum

nen genutzten Komponenten gestört werden.

Suche nach Ursachen

Mitunter streiten Mieter mit ihrem Vermieter, da aufgrund einer nicht EDV-gerechten Elektroinstallation die Nutzung von EDV-Anlagen in den angemieteten Räumen nicht bestimmungsgemäß möglich ist.

Um den Funktionsstörungen Herr zu werden, wird vielfach nachträglich

- ab der Unterverteilung ein TN-S-System aufgebaut,
- eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) installiert,
- Überspannungsschutzgeräte und Netzfilter eingesetzt,
- Transmitter wie z.B. Mobiltelefone aus den betroffenen Räumen verbannt,
- Störschutzzonen definiert und errichtet,
- PE-Kabel nachgezogen usw.

Mittels hochwertiger Messtechnik (Digital-Speicheroszilloskop, EMI-Receiver, Spektrum- und Netzwerk-Analyser) sowie der systematischen Untersuchung und Analyse von Schadensereignissen gelangten die Autoren zu Erkenntnissen hinsichtlich der Phänomene, die zu den o.g. Störungen und negativen Beeinflussungen führen. Die gewonnenen Messergebnisse und Erkenntnisse analysierten sie mit mathematischen Methoden und leiteten daraus spezielle Theorien ab. Diese erlauben es, die »unerklärlichen Phänomene« mathematisch und

elektrotechnisch zu beschreiben und anschließend gezielt Lösungen zur Abhilfe der Probleme zu entwickeln.

Fehler nicht immer wiederholen

Planer und Errichter der Elektroinstallationstechnik unterliegen bis heute häufig einem folgenschweren Gedankenfehler, der aus der historischen Entwicklung der Elektroinstallationstechnik herrührt.

Die ständig zunehmenden elektronischen Lasten – z.B. Frequenzrichter, PCs, Server usw. – belasten das Netzsystem, vor allem aber den Rück- (N) und Schutzleiter (PE), zusätzlich durch Ableit- und Oberschwingungsströme. Das relativ große Frequenzspektrum dieser Oberschwingungsströme liegt in Bereichen von 100 Hz bis etwa 50 MHz (Bild 1).

Der geschlossene elektrische Stromkreis, wie ihn die Elektrotechnik vorgibt, wird außer Acht gelassen und die ungünstigste, aber scheinbar kostengünstigste Variante der Elektroinstallationstechnik zur Maxime erhoben: Die Normen der Reihe VDE 0100 lassen die gemeinsame Führung von PE und N als PEN-Leiter schließlich zu.

Vor mehr als 50 Jahren waren die Dreiphasennetze symmetrisch belastet, so dass sich unter dieser Bedingung der Rückleiterstrom (N-Leiterstrom) sowohl mathematisch als auch praktisch aufhob. Daraus resultierte der Begriff Nullleiter, also ein Leiter, in dem kein Strom fließt.

Dipl. Ing. Bernd Steinkühler, Hans-Günter Hergesell, beide Correct Power Institute Ltd., NL Deutschland, Herford

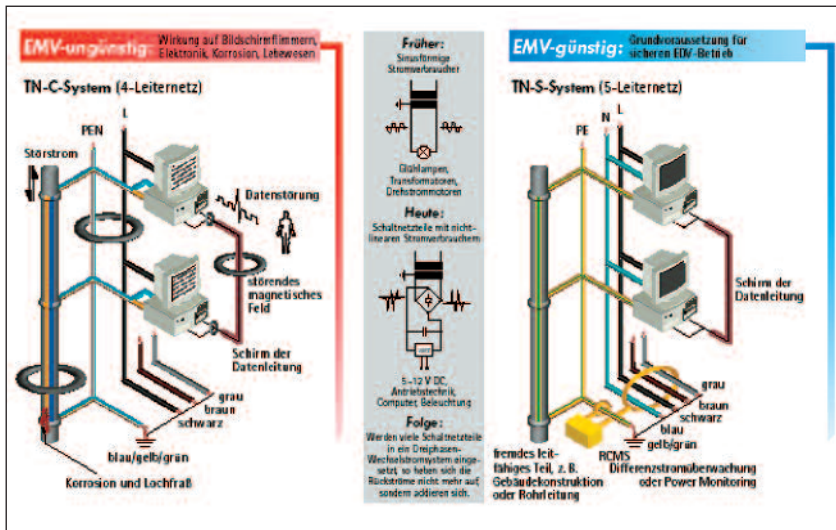


Bild 2: Vergleich TN-C- und TN-S-System

TN-S-System konsequent anwenden

Im Folgenden soll konsequent der Begriff Rückleiter verwendet werden, um hervorzuheben, dass auf diesem Leiter sehr wohl ein Strom fließt. Die Schadensforschung zeigt leider, dass die Verwendung der normgerechten Begriffe PEN-Leiter im TN-S-System zum totalen Installationsdesaster führten. Nicht jeder Planer oder Errichter versteht eben die Semantik der Normen und wendet sie auch richtig an.

Wie bereit eingangs erwähnt, werden die heutigen Netze – bedingt durch die elektronischen Lasten – unsymmetrisch betrieben. Der Rückleiter (N) ist häufig mehrfach (z.B. in jedem Stockwerksverteiler) mit dem PE/PA-System verbunden. Daher kann sich ein Teil des Rückleiterstroms über alle Erdungssysteme und Potentialausgleichsleitungen verteilen.

Physikalisch bedeutet dies, dass in derartigen TN-C-Systemen Potentialdifferenzen entstehen, die zu vagabundierenden, hohen Ausgleichsströmen führen. Diese fließen dann im gesamten Gebäude über alle metallenen Leitungen (z.B. Wasserleitungen, Heizungssysteme und auch Elektroleitungen) und führen in der Folge zu hohen elektromagnetischen Feldern.

Außerdem tritt Korrosion, z.B. an Sprinklerleitungen, durch Rückleiterströme auf (Rusty Bolt Effect).

Aber sind es nun die 50-Hz-Ströme (einschließlich der harmonischen (100 Hz, 150 Hz, 200 Hz etc.)), die Rechner abstürzen lassen? Diese Frage lässt sich eindeutig mit »Nein« beantworten (Bild 2).

Im Rahmen der Sachverständigentätigkeit der Autoren liegen langjährige Erfahrungen mit einer Vielzahl von Schadensfällen vor. Hierbei wurden defekte elektronische Geräte unterschiedlicher Herstellern untersucht. Dabei stellten die Autoren fest, dass falsch aufgelegte Erdungsleitungen und das Zulassen von Arbeitsströmen auf dem Schutzleiter als die überwiegende Ursache der Störungen und Zerstörungen an modernsten und komplexen elektronischen Einrichtungen anzusehen sind.

Theorie und Praxis

Vor 30 Jahren stellte die gemeinsame Führung von N und PE in einem Leiter – dem PEN – kein Problem dar, weil die Netze symmetrisch betrieben wurden, die Anzahl der elektronischen Geräte gering und der Rückleiter (N) kaum belastet wurde. Somit flossen auch im PE nur sehr geringe Ströme. Mit dieser Lösung sparte man definitiv Kupfer und senkte somit Kosten. Leider gab es sogar noch Ende der neunziger Jahre Groß-

unternehmen, die sich aus diesem Grund für ein TN-C-System entschieden – mit fatalen Folgen. Die vorhandenen VDE-Bestimmungen und EN-Normen helfen dem Betreiber wegen der langen Entscheidungszeiten für Investitionen nicht weiter. Diese Normen beschreiben eher den Stand der Technik für ältere Systeme und Geräte.

Die Hardwarehersteller vertrauen allerdings auf eine ordnungsgemäße Elektroinstallation, an der ein IT- oder MSR-System sicher betrieben werden kann. In deren Entwicklungslabors geht man davon aus, dass sowohl der Schirm als auch der PE stromlose Leiter sind. Der PE führt für sie nur im Fehlerfall Strom. Von diesen Fakten gehen auch die Normen aus. Dies lässt sich mit Hilfe geeigneter Messzangen sofort als Irrtum nachweisen.

Der fremdspannungsarme Potentialausgleich ist bei Anlagen der Informationstechnik und deren Geräte, die über geschirmte Signalleitungen miteinander verbunden sind, unerlässlich. Er dient der Vermeidung störender Ausgleichsströme – also unsymmetrischer Ströme. Zuvor genannte Geräte können z.B. solche der Schutzklasse I nach DIN VDE 0140 Teil 1 »Schutz gegen elektrischen Schlag – Klassifizierung von elektrischen und elektronischen Betriebsmittel« sein. Diese Ansicht hat sich mittlerweile in den Normungsgremien etabliert und gilt demzufolge auch als Stand der Technik.

Die geschirmten Signalleitungen sind in TN-C-S-Systemen dem PEN-Leiter parallelgeschaltet. Sie bilden große Koppelschleifen. Wenn der PEN-Leiter von einem Betriebsstrom durchflossen wird, fließen Teilströme über die Schirme/PE-Leitungen der verschiedenen Leitungssysteme. Die Schirmströme rufen in den Signalleitungen einen Spannungsfall hervor. Somit tritt gegen Erde

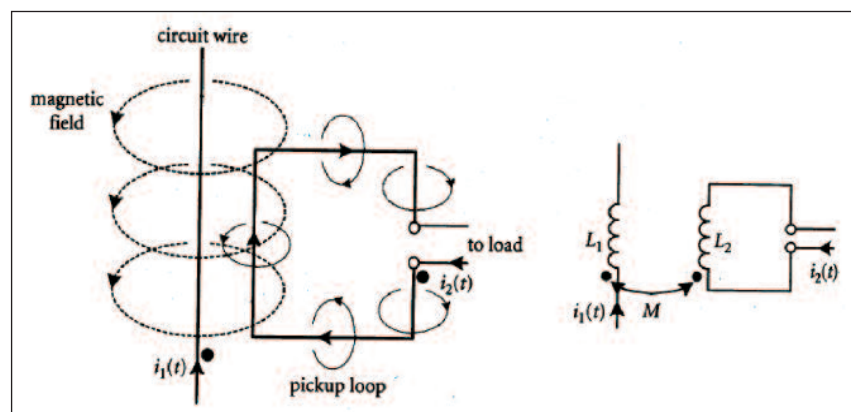


Bild 3: Faraday-Gesetz (Prinzip)

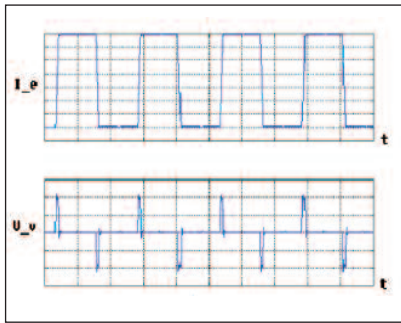


Bild 4: Beispiel Strom auf Emitter und induzierte Spannung auf dem Victim-Schaltkreis

– z. B. Potentialausgleichsschiene – eine Spannung auf. Diese Spannung hängt ab von der Größe der verschiedenen Teilströme und den Widerständen der Stromschleifen. Obwohl die dabei auftretenden Spannungen sehr gering sind, rufen sie Ströme hervor, die zu Störungen in angeschlossenen Anlagen führen.

Theoretische Hintergründe

Besonders kritisch sind die unsymmetrischen Ströme auf den PE-Leitungen und den Schirmen von Datenleitungen, die herrühren aus elektronische Lasten und Einkopplungen. Zu Letzteren zählen induktive und kapazitive und Strahlungseinkopplungen, z. B. durch elektronische Vorschaltgeräte (EVGs), was Techniker im internationalen Sprachgebrauch als Surface Current Induced Noise (SCIN) bezeichnen. Da SCIN auch hörbar bei Audiosystemen auftritt, bezeichnete man dies in der Vergangenheit als PIN-1-Problem (auf dem PIN 1 liegt die Masse). Erreichen die unsymmetrischen Ströme eine gewisse Größe, kann es in Rechner- und Kommunikationssystemen zu Störungen kommen. Die Störungen lassen sich an Hand des Faraday'schen Gesetzes erklären.

Das Faraday-Gesetz sagt aus, dass zeitabhängige Magnetfelder (time varying magnetic fields) eine Spannung in einem geschlossenen Schaltkreis (dem so genannten »Victim-Schaltkreis«) induzieren. Anhand dieses Prinzips lässt sich die parasitäre Hardwareeinkopplung in IT- und Kommunikationssysteme erklären.

Das Magnetfeld des PE/Schirm-Stromes mit seinen Frequenzanteilen (time-varying magnetic field) induziert im Victim-Schaltkreis der Systeme eine Spannung, die zu Störungen (Ausfall von Netzteilen, Absturz von Systemen etc.) führen kann.

Die Höhe der induzierten Spannung im Victim-Schaltkreis verhält sich direkt proportional zur Frequenz der vagabundierenden Ströme (Bild 3).

Die im Victim-Schaltkreis induzierte Spannung emf lässt sich mathematisch wie folgt beschreiben:

$$emf = - \frac{d}{dt} \iint_4 \bar{B}(\bar{r}, t) \cdot d\bar{S}$$

Um das Prinzip des Faraday-Gesetzes darzustellen, führten die Autoren folgendes Experiment durch: Auf dem Emitter-Stromkreis fließt ein Strom I_e , der auf dem Victim-Schaltkreis eine Spannung U_v induziert. Im Bild 4 sind die induzierten Spannungsspitzen im Victim-Schaltkreis deutlich sichtbar. In der Praxis ließ sich die Wirkung des Faraday-Prinzips auch beim Ausfall von elektronischen Geräten messtechnisch nachweisen. Das Bild 5 lässt im Kanal 2 den differentiellen Anteil, abgeleitet aus dem Faraday-Gesetz, im Victim-Schaltkreis erkennen.

Durch statistische Vergleichsmessungen von baugleichen Systemen in unterschiedlichen Umgebungen konnte messtechnisch dokumentiert werden, dass der Frequenzanteil der PE-Leiterströme eine entscheidende Rolle spielt. Je höher die gemessenen Frequenzen auf dem PE in der jeweiligen Umgebung waren, desto häufiger stürzte das System ab. In diesem Fall lief das untersuchte System mit Frequenzen bis 6 MHz auf dem PE stabil. Traten höhere Frequenzen auf, stürzte das System sporadisch ab bzw. es kam zu Fehlfunktionen. Dabei war die Höhe des unsymmetrischen Stroms unerheblich.

Um dieses Phänomen weiter aufschlüsseln zu können, sind mathematische Ansätze nötig. Die Autoren untersuchten nun detailliert die Eigenschaften des Victim-Schaltkreises, der ja durch die induzierten unsymmetrischen Ströme gestört wird. Hierbei griffen sie auf die Theorie des Crosstalks zurück:

- Crosstalk ist die Überlagerung (Superposition) von induktiver und kapazitiver Kopplung
- Kleine Impedanz – induktive Kopplung
- Große Impedanz – kapazitive Kopplung
- Crosstalk hängt direkt von der Frequenz ab, d. h. der Anstieg beträgt 20 dB/Dekade.

Anhand der detaillierten Untersuchungen ließ sich sowohl die Frequenzabhängigkeit als auch der Anstiegsfaktor von 20 dB/Dekade gemäß der Crosstalktheorie eindeutig nachweisen. Die im Victim-Schaltkreis eingekoppelten Spannungsimpulse haben ein breites Frequenzspektrum. Daher ist die Störung auch direkt eine Funktion der Frequenz.

Abschließend galt es noch die Frage zu klären, warum die Systeme nur sporadisch abstürzen. Die unsymmetrischen periodischen Ströme (50Hz und deren Oberschwingungen) fließen schließlich permanent in einem Stromkreis.

Wavelets tauchen kurzfristig auf

Anhand weiterer Messungen stellten die Autoren fest, dass sich auf dem PE-Leiter auch Wellen ausbreiten – bedingt durch die hohen Frequenzen. Diese Wellen rühren u. a. von den Ableitströmen mit hohen Frequenzanteilen sowie von induktiv, kapazitiv und strahlungsgebundenen Einkopplungen her. Ebenso führen Schalthandlungen zu sprunghaftigen Stromänderungen im Netz, die bei galvanisch verbundenen PE- und N-Leitern zu Auswirkungen und damit zu Kopplungen auf den PE-Leiter führen.

Wellen können konstruktive stochastische Interferenzen bilden. Die Ursache sind hohe Impedanzen bei bestimmten Frequenzen in langen PE-Leitungen, die PA-Schienen miteinander verbinden. Die Kombination der geschilderten Effekte liefert die Erklärung der Störungen.

Wie lassen sich diese Zusammenhänge nun mathematisch beschreiben? In der Elektrotechnik spricht man international seit ca. zehn Jahren von so genannten Wavelets. Wavelets sind oszillierende Wellenformen, die nur für ein paar Zyklen existieren. Mit dem Begriff *Wavelet* bezeichnet man die einer konti-

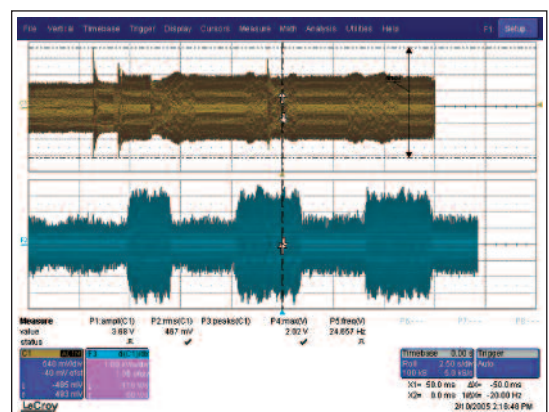
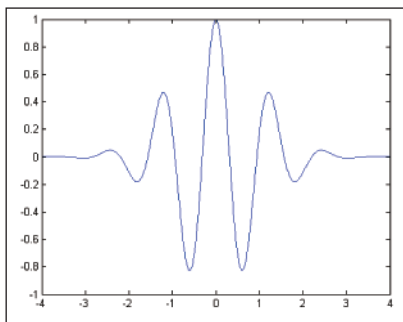


Bild 5: Messung mit dem Messgerät LeCroy 6050A: Kanal Schirmstrom, Kanal 2 di/dt



**Bild 6: Beispiel eines Wavelets:
Morlet Wavelet**

nuierlichen oder diskreten Wavelet-Transformation zugrunde liegenden Funktionen. Das Wort ist eine Wort-Neuschöpfung aus dem Französischen »ondelette« (kleine Welle) und dem englischen Wort »wave« (Welle).

An dieser Stelle kommt nun eine kleine theoretische Ausführung: Im Gegensatz zu den Sinus- und Kosinus-Funktionen der Fourier-Transformation besitzen Wavelets nicht nur Lokalität im Frequenzspektrum, sondern auch im Zeitbereich. Dabei ist »Lokalität« sinngemäß als geringe Streuung zu verste-

hen und die Wahrscheinlichkeitsdichte ist das normierte Betragsquadrat der betrachteten Funktion bzw. von deren Fourier-transformierter. Dabei ist das Produkt beider Varianzen immer größer als eine Konstante, analog zur Heisenbergschen Unschärferelation (Bild 6).

Mit der Theorie der Wavelet-Ströme lassen sich die Messungen der Autoren auf dem PE und den Schirmen von Datenleitungen beschreiben. Sie sind damit für den Absturz von IT-Systemen verantwortlich. Wavelet-Ströme führen jedoch nur wegen baulicher Schwächen der Systeme zu einer derartigen Störwirkung. Vielfach sind die Systeme nicht EMV-gerecht aufgebaut. Die Schirm- und PE-Leitungen werden in diesen Fällen meistens EMV-ungünstig in die Gehäuse und konstruktiv direkt im Bereich der Signalschaltkreise eingeführt, sodass die Wavelet-Ströme leicht Störungen und Abstürze verursachen können. Hier hilft schon ein verbessertes Systemdesign, bei dem die PE-Leitungen bei Systemeintritt sofort mit dem Gehäuse (möglichst außen) verbunden werden.

Dämpfung

Pegel	Leistungsverhältnis P
-10dB	0,1
0dB	1
3dB	2
10dB	10
20dB	100
30dB	1000
40dB	10 000
50dB	100 000

Umrechnung von dB in das Leistungsverhältnis P

Stringentes TN-S-System

Wie lässt sich das Problem nun am besten beseitigen? *Abhilfe lässt sich erreichen, wenn man die gesamte elektrische Anlage ab Transformator als TN-S-System aufbaut.* Dies bezeichnet man als *stringentes TN-S-System*. Der erste und Erfolg versprechende Schritt besteht im gezielten »Säubern« vorhan-



Bild 7: Messaufbau der Einfügedämpfungsmessung

dener elektrischer Installationen, d.h. dem Umbau in ein stringentes TN-S-System. Zusätzlich sollte eine automatische Überwachung über ein PowerMonitoring/Residual Current Monitoring System (RCMS) erfolgen.

Durch den konsequent getrennt geführten Rückleiter, der die betriebsbedingte Stromrückführung zum Transformator (N-Anschluss/Sternpunkt) übernimmt, fließen im Schutzleiter sowohl des Stromversorgungs- als auch des Informationssystems keine betriebsbedingten Ströme mehr. Genau das muss messtechnisch überwacht werden. Damit

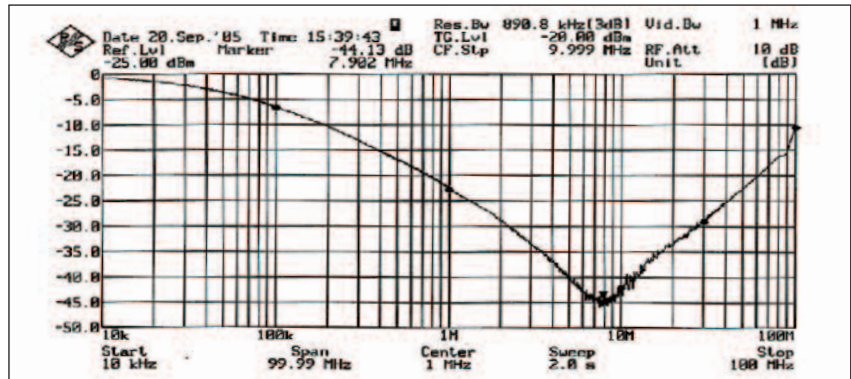


Bild 8: Einfügedämpfung der beschalteten Spezialferrite

lassen sich die Störpegel und die Wavlet-Ströme der angeschlossenen Systeme soweit heruntersetzen, dass ein Ausfall von elektronischen Geräten praktisch nicht mehr auftritt.

Hierbei ermittelten die Autoren einen empirischen Grenzwert für den maximalen Strom auf dem zentralen Erdungspunkt (ZEP) im TN-S System von 0,5 % des maximalen einzelnen Außenleiterstroms. Dieser Wert wurde mit messtechnischen und statistischen Methoden ermittelt.

RCMS-Monitoringsysteme mit festen Grenzwerteinstellungen eignen sich deshalb für diese Messungen grundsätzlich nicht. Die Autoren konnten bei ihren Messungen vielfach beobachten, dass der Fehler sich bei fest eingestellten Grenzwerten selbst maskierte und damit nicht sichtbar wurde. Deshalb sollten nur Messsysteme eingesetzt werden, die diesen Wert permanent überwachen, jeweils den aktuellen Grenzwert in Abhängigkeit der Außenleiterströme in Echtzeit errechnen, dann entsprechend

einen Alarm auslösen und diesen auch zeitlich protokollieren (man will ja wissen, wann das Ereignis auftrat). Wenn möglich, sollten diese Systeme darauf den Anwender via E-Mail benachrichtigen, damit der Fehler sich umgehend beseitigen lässt.

Ferrite als Störstrom-Blocker

Da nicht überall ein stringentes TN-S-System errichtet werden kann, verwenden die Autoren in TN-S-Systemen, die ab der Hauseinspeisung bestehen, oder in TN-C-S-Systemen (nur im Fünf-Leiter-Bereich) Spezialferrite. Sie fungieren als Stromfrequenzfilter und blockieren Ströme (Bild 7). Diese Spezialferrite verfügen durch ihre Beschaltung über eine Einfügedämpfung von ca. 23 dB bei 1 MHz bzw. 44 dB bei 10 MHz. Sie decken den Frequenzbereich von einigen kHz bis hundert MHz ab. Über 60 MHz spielen die leitungsgebundenen Störungen verursacht durch die Wavelet-Ströme keine Rolle mehr (Tabelle).

Dies berührt nicht das Abschaltverhalten bei 50 Hz, die Stromfrequenzfilter

unterdrücken die Wavelet-Ströme effektiv. Somit reduzieren diese Spezialferrite den Störpegel der betroffenen Victim-Schaltkreise (Bild 8). Mittels dieser Ferrite lassen sich z.B. auch die oben beschriebenen SCIN in Audiosystemen unterdrücken.

Fazit

Eine Garantie auf 100-%-Funktionalität des Netzsystems kann dennoch nicht gegeben werden. Mit Spezialferriten bekämpft man leider nur die Auswirkungen, nicht die Ursache. Messungen, wissenschaftliche und theoretische Untersuchungen und viel Erfahrung helfen im konkreten Fall weiter, das Problem des Surface Current Induced Noise (SCIN) und der Wavelet-Ströme zu beherrschen.

Aufgrund der Kenntnisse und Erfahrungen im Umgang mit Ferriten warnen die Autoren davor, diese ohne genaue Analyse der Anforderungen einzusetzen, da nur wenige Spezialferrite das Pin-1-bzw. Wavelet-Strom-Problem wirklich bekämpfen.

Die im Beitrag beschriebenen Grundlagen entsprechen nach Auffassung der Autoren dem Stand der Technik und sollten daher in der Praxis konsequent umgesetzt werden.

Literatur

- 2005 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility: EMC 2005 Proceedings Volume 1 bis Volume 3
- Paul, Clayton R.: Introduction to Electromagnetic Compatibility, Wiley Series 1992
- DIN EN 50174-2, Informationstechnik - Installation der Kommunikationsverkabelung Teil 2: Installationsplanung und Praktiken in Gebäuden
- DIN VDE 0839 Teil 2-4, Elektromagnetische Verträglichkeit
- Kaiser, Kenneth: Electromagnetic Compatibility Handbook, CRC Press, 2005
- Keiser, Bernhard: Principles of the Electromagnetic Compatibility, Artech House, 1987
- C.W. Gellings, M. Samotyj, B. Howe: The Future's Smart Delivery System: Meeting the demands for high security, quality, reliability and availability, IEEE Power Energy Magazine, September/October 2004

www.cp-institute.de