

Fehlermechanismen in vernetzten Verteilanlagen

K. Jungk, Straubenhardt

Zeitgemäße Elektroinstallationen werden immer komplexer und beinhalten inzwischen oft auch vernetzte Multimedia-Systeme. Diese Tatsache macht es zunehmend schwieriger, die dabei notwendige Sicherheit für Menschen, Gebäude, Installationen sowie für Systemfunktionen zu erreichen und dauerhaft zu gewährleisten. Im Beitrag werden einige der auftretenden Probleme erläutert und entsprechende Maßnahmen genannt, die zur Absicherung einer Verteilanlage beitragen.

1 Sicherheit – mehr als nur ein gefühlter Zustand

Wer glaubt, eine Anlage oder ein Verfahren sei sicher, weil über längere Zeit nichts passiert ist, erliegt einer subjektiven Täuschung. Oftmals lauert die Gefahr versteckt im Hintergrund und wartet nur darauf, die subjektiv gefühlte Sicherheit ganz plötzlich und ohne jede Vorwarnung zu beenden. Wenn man Sicherheit in der Theorie als die Abwesenheit jeglichen Risikos definiert, wird auch klar, dass es absolute Sicherheit in der Praxis nicht geben kann. Für den Installationsbereich gibt es dennoch eine Fülle von Normen, Vorschriften, Richtlinien, Bestimmungen, Empfehlungen u. Ä., bei deren Einhaltung mit dem Erreichen eines angemessenen niedrigen Gefahrenpotentials zu rechnen ist.

Errichter und Betreiber von Verteilnetzen sollten schon aus eigenem Interesse, z. B. als Schutz vor Regressforderungen, alle relevanten Vorschriften einhalten. In Empfangsanlagen sind Erdung und Potentialausgleich als klassische Maßnahmen des äußeren und inneren Blitzschutzes heute nach wie vor unverzichtbar, reichen aber bei weitem nicht aus.

Das tatsächliche Problempotential offenbart sich erst im multimedialen, intelligenten Haus. Darin sind durch den gemeinsamen Betrieb unterschiedlichster vernetzter Systeme für Energieversorgung, Unterhaltung, Datentechnik, Kommunikation, Steuerung und Sicherheit völlig neue Probleme entstanden. Deren Lösung ist durch die Anwendung der bestehenden Normen und Vorschriften (noch) nicht restlos möglich.

Autor

Karsten Jungk, Straubenhardt, ist freier Fachjournalist und Mitglied der internationalen Vereinigung für Elektronik-Fachjournalisten UIPRE.

2 Sichere Antennenanlagen

Das Empfangs- und Verteilsystem für hochfrequente Rundfunksignale bietet durch die klassischen Maßnahmen des inneren und äußeren Blitzschutzes ein hohes Maß an Sicherheit für Leib und Leben des Benutzers sowie auch für das Gebäude, in dem er lebt. Dieses Thema ist in der DIN EN 60728-11 (VDE 0855-1)[1] ausführlich behandelt. Die Norm gilt für die Sicherheit von Anlagen und Geräten, angeschlossene Teilnehmer und Endgeräte sowie von daran arbeitendem Personal. Als Stichworte sind diesbezüglich zum Beispiel zu nennen:

- Schutz gegen Umgebungseinflüsse,
- Potentialausgleich und Erdung,
- Stromversorgung der Anlage,
- Schutz gegen Berührung und Annäherung an Starkstromverteilsysteme,
- Schutz gegen atmosphärische Überspannungen sowie
- mechanische Festigkeit von Antennenaufbauten.

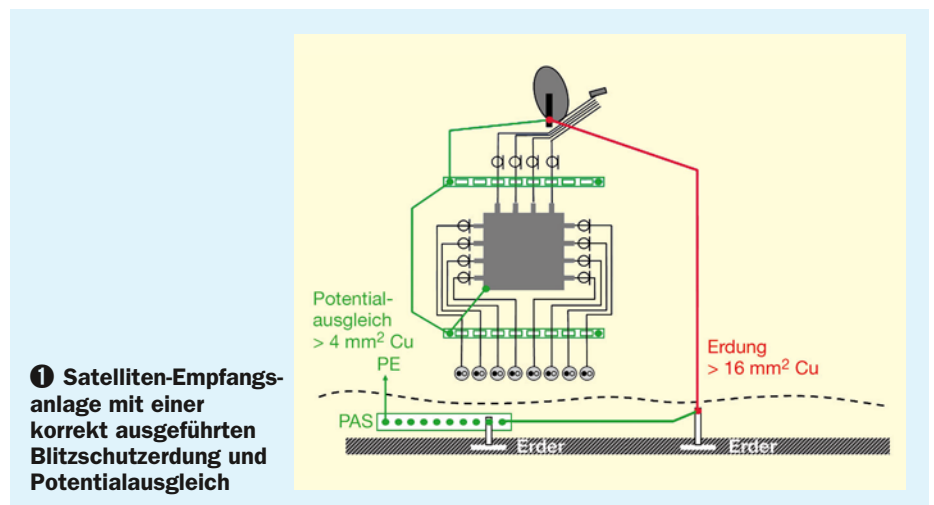
Einen guten Überblick gibt die Internetseite der DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE) [2]. Zur Veranschaulichung des Themas Erdung und Potentialausgleich

eignet sich das modifizierte Beispiel einer Satelliten-Empfangsanlage mit Multischaltverteilung aus [1] (Bild 1). Den Kern dieser Anlage bildet die Potentialausgleichsschiene, die mit der Gebäudeerde und falls vorhanden mit einer separaten Blitzschutzterde verbunden wird. Den Antennenmast schließt man über einen Massivleiter mit einem Mindestdurchmesser von 16 mm² Kupfer oder 25 mm² Eisen auf kürzestem Weg (zweckmäßigerweise außenliegend) an den Fundamenteerde an. Zur Vermeidung von Potentialunterschieden in einer geerdeten Verteilanlage werden die Mäntel aller Koaxialkabel miteinander verbunden (> 4 mm² Cu). Hierzu eignen sich Erdungsblöcke am besten. Erdungsklemmschienen, die einige Hersteller noch im Programm haben, sollten wegen der Mikroreflexionen an den Quetschstellen nicht eingesetzt werden.

3 Probleme und Fehlerursachen

3.1 Ausgleichsströme durch ungeeignete Netzform

Um das Problem richtig darstellen zu können, sind Kenntnisse über die Netzformen nach DIN VDE 0100-300 (VDE 0100-300) [2] sinnvoll. Gemäß dieser Norm werden die verschiedenen Stromversorgungssysteme hinsichtlich der Erdungsverhältnisse von Spannungsquelle und Verbraucher unterschieden und in Form einer Buchstaben-gruppierung gekennzeichnet. Der erste Buchstabe steht für die Erdungsart des Sternpunkts beim Stromnetzbetreiber, in der Regel in der Trafostation des EVU (T = Erde (Terra), I = isoliert). Der zweite Buchstabe beschreibt die Beziehung der berührbaren Teile des Verbrauchers zur Erde (T = Erde (Terra), N = Neutral (mit Betriebs-erde verbunden)). Die dritten und vierten Buchstaben kennzeichnen die Art der Verlegung von Nullleiter (Neutral; Hellblau) und Schutzleiter (PE = Protective Earth; Grün-



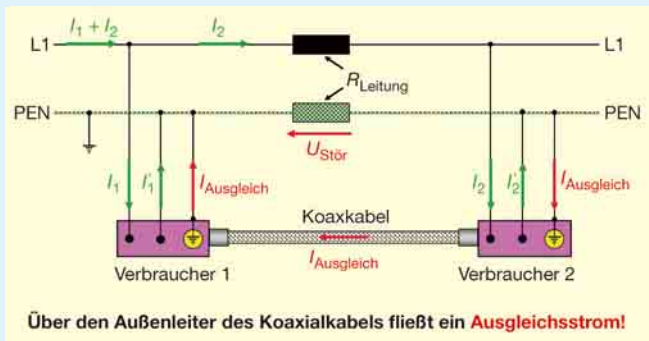
Gelb) in der Anlage des Verbrauchers (S = separat (N und PE sind als separate Leiter ausgeführt), C = combined (N und PE sind in einem Leiter zusammengefasst)).

Das TN-C-System ist veraltet und daher bei Neuinstallationen nicht mehr zulässig. Dennoch ist es noch häufig im Gebäudebestand anzutreffen. Insbesondere im Steigleitungsbereich älterer Gebäude finden sich noch oft TN-C-Strukturen, in renovierten Wohnungen wurde aber die TN-S-Netzform verwendet. Das TN-C-System hat folgenden großen Nachteil: Im Fall einer Unterbrechung des PEN-Leiters und defekter Isolation eines leitenden Gerätegehäuses besteht Lebensgefahr bei dessen Berührung. Zudem rufen reguläre Lastströme im PEN zwischen den über die Schutzleiteranschlüsse geerdeten Verbrauchern Potentialdifferenzen hervor, die zu Störspannungen und zu dadurch hervorgerufenen Ausgleichsströmen führen (Bild 2). Unter der Annahme, dass die beiden Verbraucher PCs mit TV-Empfangskarten sind und das Koaxialkabel eine durchgeschleifte Antennenleitung ist, ergibt sich folgender Ausgleichstrommechanismus. Der Laststrom von Verbraucher 2, der durch den PEN-Leiter fließt, erzeugt an dessen Leitungswiderstand in dem Abschnitt zu Verbraucher 1 eine Störspannung $U_{Stör}$. Diese Störspannung führt dazu, dass ein Ausgleichsstrom $I_{Ausgleich}$ über den Schirm eines Koaxialkabels zwischen den Verbrauchern fließt, was zu Fehlfunktionen beim Empfang führen kann.

Noch viel gravierender wird das Problem, wenn ein starker Verbraucher, wie z. B. eine Waschmaschine, den Spannungsfall zwischen Verbraucher 1 und Verbraucher 2 stark erhöht. Tückisch ist daran, dass der dadurch verursachte Ausgleichsstrom nur zeitweise, also bei laufender Waschmaschine auftritt und damit die Suche nach der Fehlerursache erschwert. Auch wenn die Verbraucher an unterschiedlichen Phasen betrieben werden, kommt es wegen des gemeinsamen Rückleiters (das Wort Neutralleiter wird absichtlich nicht verwendet) zu Ausgleichsströmen (Bild 3). Hier wird zwischen Verbraucher 1 und der Potentialausgleichsschiene ein im Wesentlichen durch Verbraucher 2 hervorgerufener Spannungsfall zum Auslöser für das Fließen eines Ausgleichsstroms über den Schirm des Koaxialkabels. An diesem Beispiel ist deutlich erkennbar, dass ein gemeinsamer Neutral- und Schutzleiter in der Gebäudeverkabelung absolut unzulässig ist.

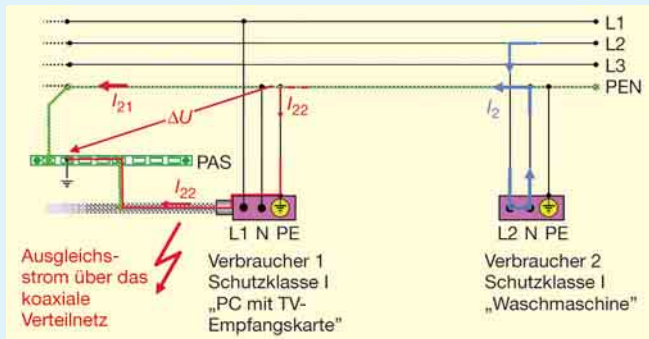
Beim TN-S-System wird im Hausanschluss in Neutralleiter und Schutzleiter aufgetrennt. Im gesamten Verteilsystem darf dann nirgendwo mehr eine Verbindung zwischen Neutral- und Schutzleiter hergestellt werden. Unter diesen Umständen verursacht der Rückstrom von Verbraucher 2 zwar am Leitungswiderstand des Neutralleiter-Abschnitts zu Verbraucher 1 eine Stör-

2 Ausgleichsstrom im TN-C-System bei der Belastung einer Phase



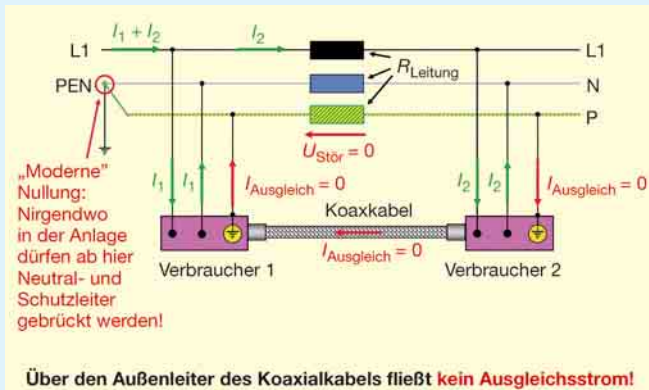
Über den Außenleiter des Koaxialkabels fließt ein Ausgleichsstrom!

3 Ausgleichsstrom im TN-C-System bei unsymmetrischer Belastung



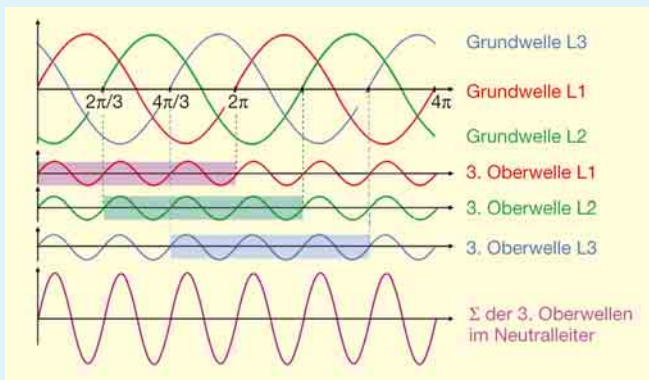
Ausgleichsstrom über das koaxiale Verteilnetz

4 Stromverlauf in einem TN-S-System



Über den Außenleiter des Koaxialkabels fließt kein Ausgleichsstrom!

5 Aufaddieren der Oberschwingungen im Versorgungsnetz



spannung, nicht jedoch im Schutzleiter (Bild 4). Demnach fließt auch kein Ausgleichsstrom über den Schirm eines Koaxialkabels zwischen den Verbrauchern.

3.2 Rückströme mit Oberschwingungen

Bei einem symmetrisch belasteten Drehstromsystem mit sauberen, oberwellen-

freien Sinusströmen neutralisieren sich diese im Idealfall wegen ihrer Phasenverschiebung um 120°, wenn sie über den Neutralleiter zur Quelle zurückfließen – soweit die Theorie [3]. In der Realität ist jedoch zunehmend ein starker Oberwellengehalt in Netzspannungen und -strömen zu verzeichnen, der vom massenhaften Einsatz elektronischer nichtlinearer Verbraucher wie

Phasen- und -abschnittssteuerungen, Schaltnetzteile in Rechnern, Druckern und Monitoren, elektronischen Durchlauferhitzern, elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) usw. herrührt. Die ungeraden Oberwellen – besonders die dritte Oberwelle jeder Phase (150 Hz) – kompensieren sich auch im symmetrischen Belastungsfall nicht im Neutralleiter, sondern addieren sich auf [4] (Bild 5). Dadurch kann es bei entsprechend vielen nichtlinearen Lasten zu einer Überlastung kommen, wenn ein Neutralleiter mit zu geringem Querschnitt installiert worden ist.

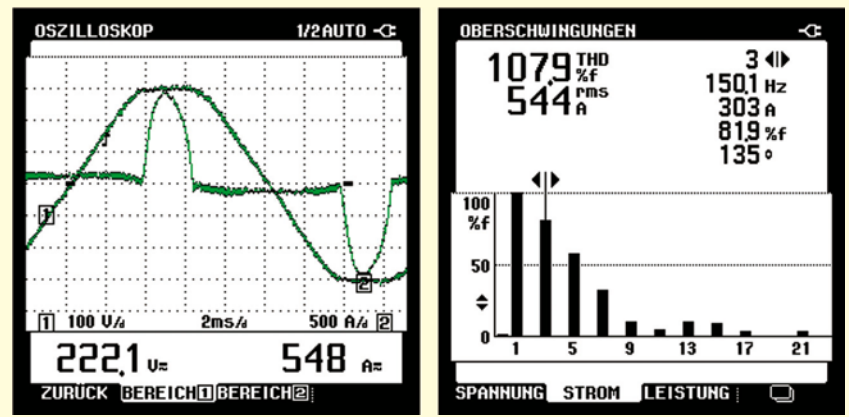
Bild 6 demonstriert anhand eines Oszillogramms (links), wie ein impulsförmiger Strom die Netzspannung abflacht. Diese Rückwirkung produziert Spannungsüberwellen. Noch gravierender ist die Oberwellensituation in diesem Beispiel beim Strom selber (rechts), bei dem die dritte Oberwelle stark ausgeprägt ist.

Im TN-S-System induziert der Neutralleiter die Oberschwingungen im parallel verlaufenden Schutzleiter durch unsymmetrische Lastverteilung und die harmonischen Schutzleiterspannungen, die ohne weiteres zu Ausgleichsströmen in der Größenordnung von 10 bis 20 A führen können.

3.3 Ableitströme von Schaltnetzteilen

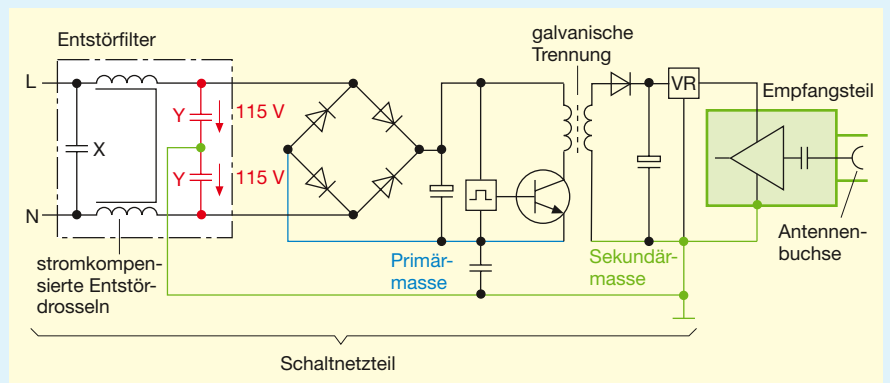
In jedem Haushalt gibt es heutzutage eine Vielzahl von Geräten der Schutzklasse II. Sie sind verstärkt oder doppelt isoliert und haben keinen Anschluss an den Schutzleiter. Diese Schutzmaßnahme wird auch Schutzisolierung genannt. Geräte mit elektrisch leitenden Oberflächen sind durch eine verstärkte Isolierung vor einem Kontakt mit spannungsführenden Teilen geschützt. Typische Vertreter dafür sind TV-Geräte, Receiver, Videorecorder, CD-Player usw. In der weit überwiegenden Zahl der Fälle arbeiten diese Geräte mit Schaltnetzteilen (Bild 7), die wegen ihres funktionsbedingten stark nichtlinearen Lastverhaltens Oberwellen bis in den MHz-Bereich hinein produzieren.

Zur Funkentstörung ist der Mittelpunkt der Entstörkondensatoren Y mit der Sekundärmasse bzw. der Außenhülle des Empfangsgeräts verbunden. Über die Antennenbuchse ist damit auch der Schirm des Koaxialkabels angeschlossen. Zwischen Schirm und Nulleiter bzw. Phase besteht also eine hochohmige Verbindung, an der eine Span-

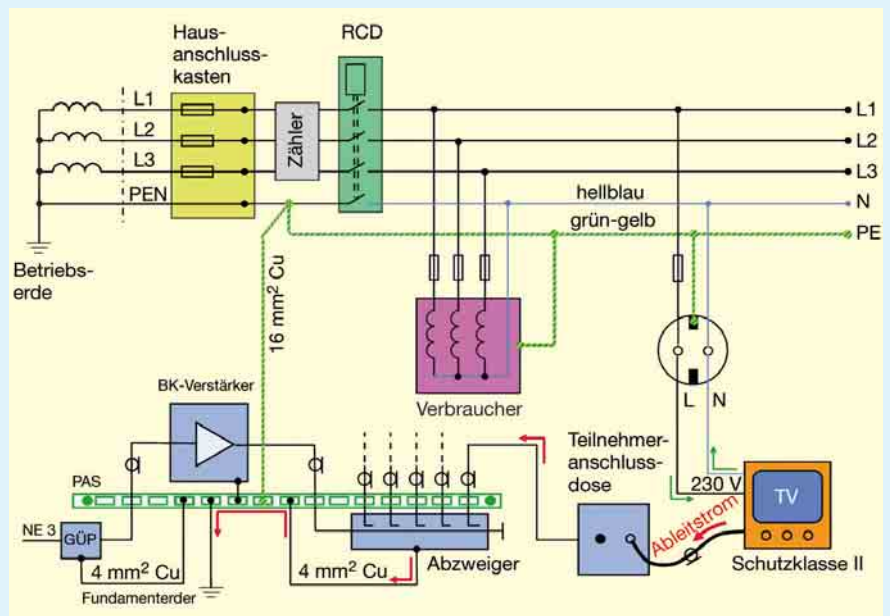


6 Netzspannung und Strom bei nichtlinearer Last

Quelle: Fluke



7 Aufbau eines Empfangsgeräts der Schutzklasse II mit Schaltnetzteil



8 Ableitstrom in einer Breitbandkabel-Verteilung

nung von 115 V anliegt. Die bei einer Berührung durch den Menschen fließenden Ableitströme liegen weit unterhalb der Loslass-Schwelle und sind im ungestörten Betrieb ungefährlich. Nach DIN EN 60065 (VDE 0860) [5] darf der Ableitstrom den

Grenzwert von 0,7 mA nicht überschreiten. Sicherlich hat jeder beim Einstecken des Antennensteckers schon einmal das auf die Y-Kondensatoren zurückzuführende „Kribbeln“ gespürt und die kleinen Funken beobachtet.

Zusammengefasst: Die Y-Kondensatoren überbrücken in Erfüllung ihrer Entstöraufgabe die Betriebsisolierung des Geräts und verursachen damit einen Ableitstrom. Aus Sicherheitsgründen müssen die Kondensatoren selbstheilend sein, dürfen also nicht dauerhaft durchschlagen. Schließlich würden sie dann eine Verbindung zwischen Phase und den berührbaren Teilen des Geräts, z. B. der Antennenbuchse, herstellen.

Bild 8 veranschaulicht, wie der Ableitstrom eines Fernsehgeräts seinen Weg über den Schirm des Empfängeranschlusskabels, die Steckdose und den Schirm der Koaxialverkabelung bis zum geerdeten Abzweiger nimmt, wo er weitgehend abgeleitet wird. An diesem Abzweiger summieren sich die einzelnen Ableitströme. Eine schlechte Erdung kann zu hohen Berührungspotentialen und entsprechend unzulässigen, die Loslass-Schwelle des Menschen überschreitenden Körperströmen führen. Wird aufgrund von Reparaturarbeiten der Kabel-Verstärker ausgetauscht und der Potentialausgleich entfernt, so besteht ohne Fehlerstromschalter die erhebliche Gefahr eines Stromschlags für den Monteur und für alle Breitbandkabel-Teilnehmer.

Ein anderer Effekt ist ebenfalls zu beachten. Der vom TV-Gerät abfließende Betriebsstrom ist um den Ableitstrom verringert, was der Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD) als Fehlerstrom wertet. Der Betrieb mehrerer solcher Geräte kann also zum Auslösen eines RCD führen. Besonders gravierend ist dies, wenn durch einen Fehler im TV-Gerät vom Benutzer berührbare leitfähige Teile (z. B. Antennenbuchse und Scartbuchse) gegen Erde unter Spannung stehen. Ist der Kabelanschluss ordnungsgemäß mit in den

Potentialausgleich einbezogen, dann fließt in diesem Fall ein Fehlerstrom über den Koaxialschirm. Wird der Bemessungsdifferenzstrom von z. B. 30 mA überschritten, löst der Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD) aus und unterbricht somit den Fehlerstromkreis. Ist kein RCD eingebaut, so muss sich ein ebenfalls über den Koaxialmantel fließender Fehlerstrom von beispielsweise 80 A (16 A x 5, B-Charakteristik eines Leitungsschutzschalters) ergeben, damit der Stromkreis unterbrochen wird. Abgesehen von den geschilderten sicherheitsrelevanten Aspekten kann die Summe der Ableitströme zu Funktionsstörungen von HF-Geräten führen. Deren Ursache ist oft schwierig auszumachen, weil es sich meist um vom Verbraucherverhalten abhängige und schwer vorhersehbare Phänomene handelt.

4 Zukünftige Probleme

Wohnungs- und gebäudeweite Installationen werden zunehmend auch Datennetze nach Art einer strukturierten Verkabelung umfassen. Satellitenreceiver, HiFi-Anlagen, Netzwerkspeicher sowie viele andere IP-basierte (Internet Protocol) Geräte mit RJ-45-Ethernet-Buchse stehen jetzt schon in den Regalen der Händler. Wenn diese Geräte massenhaft in der Praxis zum Einsatz kommen, muss mit zusätzlichen Problemen gerechnet werden. Vagabundierende Ausgleichsströme und Überspannungen bedrohen die Funktion solcher vernetzten Systeme und können zur Zerstörung ihrer Schnittstellen führen.

5 Abhilfemaßnahmen

Die beste Abhilfe wäre ein Verzicht auf nicht-lineare Lasten und Y-Kondensatoren. Weil dies gleichbedeutend mit einem Verzicht auf die moderne Elektronik mit ihrem hohen Energieeinsparpotential wäre, wird das wohl niemand ernsthaft wollen. Aber man kann die Stromnetze so aufbauen, dass sie den Belastungen besser gewachsen sind. Dazu gehören großzügig dimensionierte Leiterquerschnitte sowie die Verlegung von fünf Leitern ab der Trafostation des Stromversorgers. Nur hier dürfen Null- und Neutralleiter ein Mal miteinander verbunden werden – dahinter nie mehr! In der heutigen Alltagsrealität kann die Potentialtrennung das letzte Mittel gegen unerwünschte Ausgleichsströme sein. Der Einsatz von Glasfasern als Übertragungsmedium gewährleistet dies ohnehin.

Literatur

- [1] DIN EN 60728-11 (VDE 0855-1):2005-10 Kabelnetze für Fernsehsignale, Tonsignale und interaktive Dienste, Teil 11: Sicherheitsanforderungen.
- [2] <http://www.dke.de/NR/rdonlyres/7FFB6827-8A67-4849-9C3E-DBF6CAAFB2C0/16740/NormenderReiheVDE0855.pdf>
- [3] http://www.lpm.uni-sb.de/beruf/contents/elektro/Curricula_harmonisch/CurriculaHarmonisch2.pdf
- [4] http://www.lpm.uni-sb.de/beruf/contents/elektro/Curricula_harmonisch/CurriculaHarmonisch1.pdf
- [5] DIN EN 60065 (VDE 0860):2006-12 Audio-, Video- und ähnliche elektronische Geräte – Sicherheitsanforderungen.