AUF EINEN BLICK

Im folgenden Beitrag wird die Planung und Auslegung des zentralen Erdungspunktes (ZEP) und der Schutzleiter in elektrischen Anlagen besprochen, aus der Sicht eines Elektroingenieurs erläutert und mit Beispielen aus der Praxis vertieft.

ZEP und PE richtig planen

Planung und Auslegung des zentralen Erdungspunkts (ZEP) und der Schutzleiter

Sowohl die derzeit gültigen Bestimmungen der Reihe DIN VDE 0100 für die Errichtung von Niederspannungsanlagen, als auch die der Reihe DIN VDE 0800 für das Errichten von Anlagen der Informationstechnik fordern den Einsatz eines fremdspannungsfreien Potentialausgleichs in den Gebäuden sowie den Aufbau EMV-freundlicher Versorgungsnetze mit TN-S-System und zentralem Erdungspunkt [1][2]. Der Beitrag beweist die Notwendigkeit und liefert planerische Denkansätze.

Die Verbraucherstruktur in Zweckbauten für die Produktion, Verwaltung usw., aber auch im Wohnbaubereich hat sich in den letzten zehn bis 15 Jahren sehr stark verändert. Wo früher einfache Glüh- und Leuchtstofflampen für die Beleuchtung zum Einsatz kamen, setzt man heute Kompaktleuchtstoff- und Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten ein. Hinzu kommt, dass heute fast immer elektronische Dimmer für die Regelung der Beleuchtungsstärke eingesetzt werden. Wo früher z.B. in Produktionsgebäuden oder bei der Gepäckbeförderung auf Flughäfen große Einzelantriebe mit Asynchronmotoren eingesetzt wurden, kommen heute Kleinstmotoren mit Frequenzumrichtern zur Drehzahlregelung in jeder Welle zum Einsatz. Weiterhin nahm der Anteil der Kommunikations-, Steuerungs- und Überwachungs und Medientechnik in Verwaltungsgebäuden stark zu und rückte sehr viel näher an die Starkstromtechnik heran.

Varianten für die Betriebserdung bei zentraler Aufstellung

In der Vergangenheit führte man elektrische Gebäudenetze in Deutschland aus wirtschaftlichen Gründen mit TN-C-S-System aus. Die Verteilungsnetzbetreiber (VNB), damals Energieversorgungsunternehmen (EVU), versorgen ihre Kunden immer noch bis zum Hausanschlusskasten (HAK) mit einem TN-C-System.

Stromkreise als TN-S-System (L1-, L2-, L3-, N-, und PE-Leiter) setze man erst bei Stromkreisen mit Leiterquerschnitten kleiner 10mm² Cu bzw. 16mm² Al ein. Alle anderen Stromkreise waren in der Regel als TN-C-System also mit kombiniertem PEN-Leiter ausgeführt. Bei einem Neubau großer Gebäude – also einem Leistungsbedarf > 250 kVA –, wo die Energieversorgung über eigene Transformatoren stattfindet, realisierte man in den letzten Jahren aufgrund der EMV-Anforderungen häufig ein TN-C-S-System, z.B. wie in **Bild 1** dargestellt.

Die Quellen – d.h. Transformatoren, Generatoren, USV-Anlagen usw. – wurden dabei über ein Vierleitersystem mit L1-, L2-, L3- und PEN-Leiter (also einem TN-C-System) mit der Niederspannungshauptverteilung (NSHV) verbunden. Die Versorgung innerhalb des Gebäudes wurde dann EMV-freundlich als Fünfleitersystem (TN-S), also mit getrennt verlegtem N- und PE-Leiter, aufgebaut.

Der PEN-Leiter war neben der Betriebserdung in der NSHV an weiteren Stellen mit Erde verbunden, z.B. in den Transformatorkammern über die Potentialausgleichschienen (PA) oder die nicht isoliert verlegte PE/PEN-Schiene in den Schaltanlagen.

Wurden sowohl die Quellen (Transformatoren usw.) als auch die NSHV zentral in nebeneinander liegenden Räumen im Untergeschoss – also weit entfernt von empfindlichen Einrichtungen – aufgestellt, traten in der Regel keine störenden Beeinflussungen durch vagabundierende Gebäudeströme auf.

Nur dann, wenn eine der Quellen außer Betrieb genommen wurde, z.B. für Wartungsarbeiten oder bei abgeschalteten Ersatznetzgeneratoren, war mit größeren Gebäudeströmen zu rechnen. Dieser Tatsache wird auch in DIN EN 5031 (DIN VDE 0800 Teil2-310) Tabelle 2 in der Variante 3b [1] Rechnung getragen mit der Beurteilung ***empfohlen*** für TN-C-System im Keller bis zur Haupterdungsklemme und TN-S-System in und zwischen den Stockwerken.

Auch die Beeinflussung durch die magnetischen Felder der Transformatoren, der Niederspannungsschaltanlage

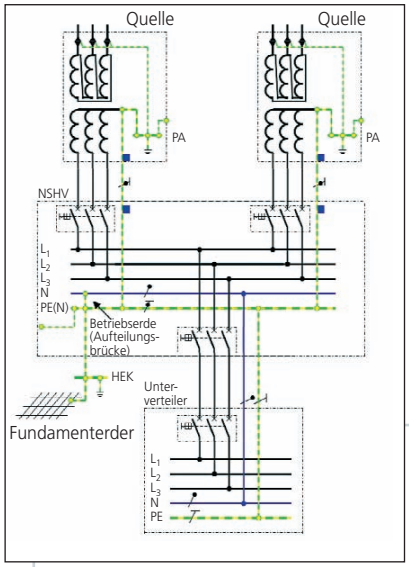

Bild 1: Zentrale Aufstellung mit TN-C-S-System

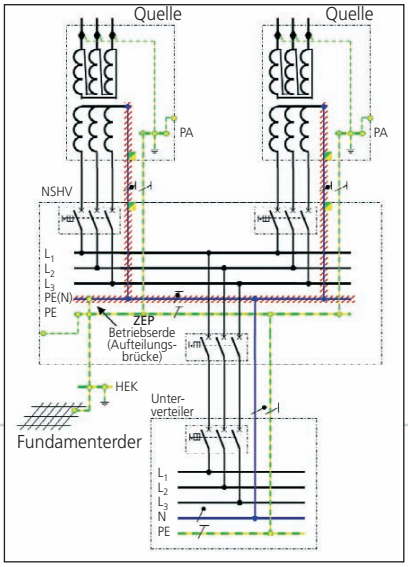

Bild 2: Zentrale Aufstellung mit ZEP und isoliert verlegtem PEN-Leiter

[3] sowie der Kabel- bzw. Schienenverbindungen zwischen den Quellen und der NSHV war als gering einzustufen, wenn man einen ausreichenden Abstand zu empfindlichen Einrichtungen einhielt.

Viele Beiträge in »de« (z. B. [3][4][5]) befassten sich in den letzten Jahren immer wieder mit dem zentralen Erdungspunkt (ZEP) als Lösung für EMV-Probleme. Darunter versteht man bei Netzen mit TN-System und Mehrfacheinspeisung die Erdungsausführung des PEN-Leiters aus EMV-Gründen nur zentral an einer Stelle eines galvanisch verbundenen Netzes (**Bild 2**). Der PEN-Leiter wird an keiner weiteren Stelle mit Erde verbunden und ist bis zum ZEP isoliert zu verlegen (schraffierter Bereich in Bild 2). Dies gilt auch innerhalb der Schaltanlagen.

An die isoliert verlegte PEN-Schiene (zuvor N-Leiter) werden die N-Leiter der abgehenden Stromkreise angeschlossen. Dadurch ist sichergestellt, dass N-Leiterströme von einpoligen Verbrauchern, aber auch die Ströme der dritten Oberschwingung – z. B. von getakteten Netzgeräten oder Kompaktleuchtstofflampen – immer über die isoliert verlegten N- bzw. PEN-Leiter zu ihren Quellen zurückfließen. Die zentrale Erdung an einer Stelle vermeidet Gebäudeströme durch galvanische Kopplung.

In der Literatur findet man häufig die Diskussion darüber, ob der vierte Leiter im Bereich bis zum zentralen Erdungspunkt als N- oder ein PEN-Leiter anzusehen ist. Da über diesen Leiter (in Bild 2 blau mit roter Schraffierung dargestellt) sowohl Neutralleiterströme bei normalem Netzbetrieb (N-Leiter-Funktion) als auch Fehlerströme bei einem Körperschluss (PE-Leiter-Funktion) fließen, übernimmt dieser Leiter eindeutig beide Funktionen und ist damit ein PEN-Leiter. Dies ist umso wichtiger, da man ja in PE- und PEN-Leiter nach DIN VDE 0100 Teil 540 keine Schaltgeräte einbauen darf – ganz im Gegensatz zu N-Leitern.

Auch die farbliche Kennzeichnung des PEN-Leiters stellt ein Problem dar, da in Deutschland die Variante 2 – d. h. blaue Grundisolierung mit gelb-grünen Fähnchen – nicht erlaubt ist. Dies steht übrigens im Gegensatz zu anderen CENELEC-Ländern. Da die farbliche Kennzeichnung nur ein Hilfsmittel gegen die Verwechslungsgefahr bei der Montage darstellt und es zudem keine Mehrleiterkabel mit zwei grüngelben Adern gibt, sollte – aus Sicht der Auto-

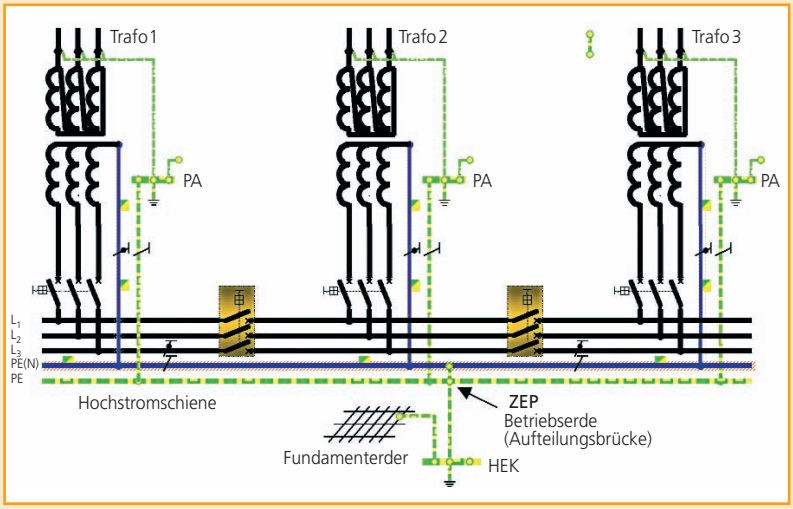

Bild 3: Dezentrale Aufstellung mit ZEP bei einem Transformator

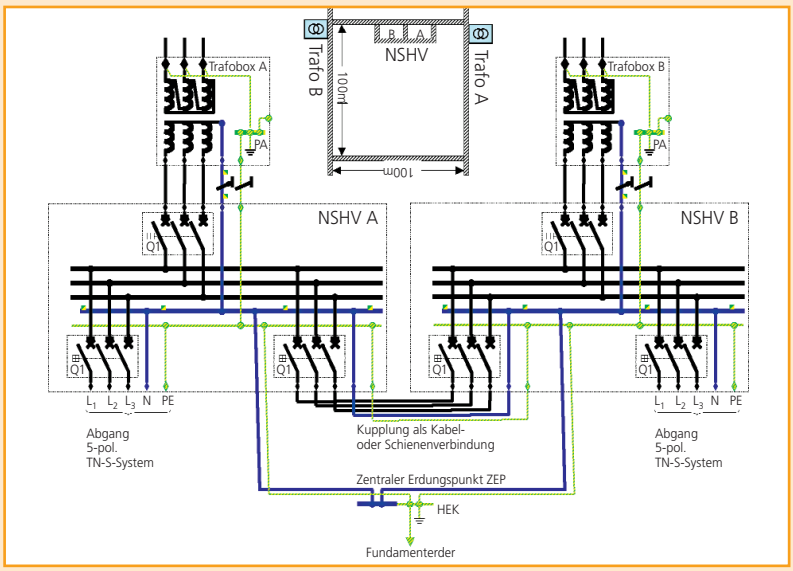

Bild 4: Dezentrale Aufstellung der Transformatoren, zentrale Aufstellung NSHV

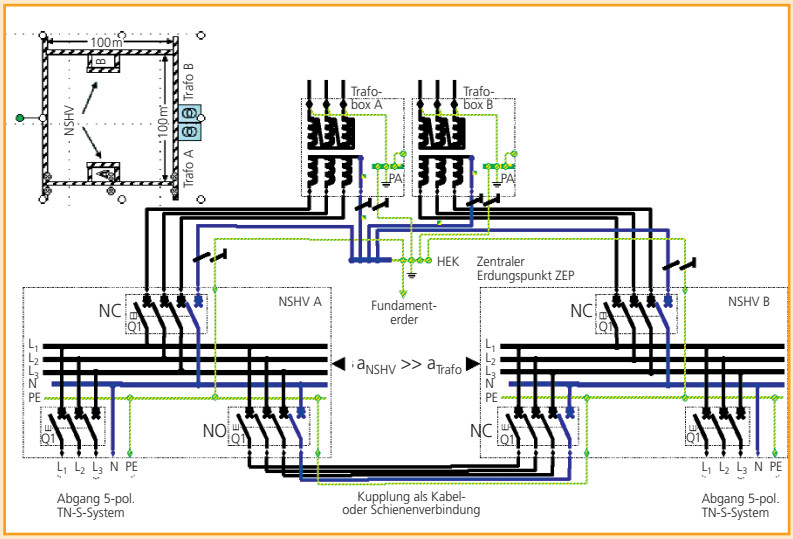

Bild 5: Zentrale Aufstellung der Transformatoren, dezentrale Aufstellung NSHV

ren – der vierte Leiter (isolierter PEN) mit einer blauen Grundisolierung und grün-gelben Fähnchen ausgeführt werden. Damit könnte man sicherstellen, dass die Monteure bei abgehenden Fünfleitersystemen mit N-und PE-Leiter den N-Leiter (blaue Grundisolierung) an den PEN-Leiter (blaue Grundisolierung) und den PE-Leiter an den PE-Leiter mit grüngelber Isolierung anschließen. Kommt es in diesem Bereich zu einer Verwechslung sind unweigerlich wieder mehrere Erdungsstellen im Netz vorhanden.

Dezentrale Aufstellung der Quellen

Stellt man die Quellen dezentral auf, zum Beispiel in der Automobilindustrie im Lastschwerpunkt (**Bild 3**), in Hochhäusern im Erd- und Dachgeschoss oder bei Produktionsgebäuden außerhalb des Gebäudes an zwei unterschiedlichen Seiten, gestaltet sich die Behandlung des zentralen Erdungspunktes schwieriger.

Entfernter zentraler Erdungspunkt

Das Bild 3 zeigt ein Versorgungsnetz der Automobilindustrie mit dezentral aufgestellten Transformatoren (Abstand 50 m bis 100 m), die über ein Hochstromschienensystem parallel geschaltet sind. Der zentrale Erdungspunkt ist am Hochstromschienensystem in der Nähe eines Transformators – im Beispiel der mittlere Transformator 2 – errichtet. Der PEN-Leiter der Transformatoren 1 und 3 ist somit über eine Entfernung von 50 m bis 100 m mit Erde verbunden (entfernte Erdung). Der ZEP ist dabei so zu errichten, dass er sich nicht versehentlich entfernen lässt, wenn noch ein Transformator des Netzes in Betrieb ist.

Einpolige Fehlerströme bei einem Körperfehler haben jedoch bei dieser Variante einen weiteren Weg und damit größere Impedanz zu ihren Quellen zu überwinden. Dies müssen Planer und Errichter bei der Auswahl und Einstellung der Schutzgeräte berücksichtigen. Der Schutz durch automatische Abschaltung nach DIN VDE 0100 Teil 410 Absatz 411 muss auch für diesen längeren Leitungsweg gewährleistet werden. Für die Berechnung werden im obigen Beispiel die Impedanzen für die Leiterschleifen PEN- zu PE-Leiter für das Hochstromschienensystem zwischen den Transformatoreinspeisungen und dem zentralen Erdungspunkt benötigt. Hersteller geben jedoch nur die Nullimpedanzen für die Fehlerschleifen Außenleiter L zu N- bzw. PE-Leiter an.

Näherungsverfahren mit Schätzwerten für obige Impedanzen, wie sie in verschiedenen Veröffentlichungen dargestellt wurden, dienen deshalb nur der Abschätzung während der Projektierung. Nach einer Anlagenerrichtung ist die Einhaltung der Abschaltbedingung für jede Einspeisung durch Messung nachzuweisen.

Wenn die Transformatoren (z. B. wegen magnetischer Felder) außerhalb der Gebäude, die NSHV aber innerhalb des Gebäudes aufgestellt werden, ergeben sich zwei weitere, grundsätzliche Überlegungen für die Errichtung des zentralen Erdungspunkts.

In **Bild 4** versorgen zwei außerhalb des Gebäudes (Grundfläche ca. 100 m x 100 m) aufgestellte Transformatoren zwei nebeneinander innerhalb des Gebäudes aufgestellte NSHV. Den zentralen Erdungspunkt kann man dann in einem separaten Erdungsschrank in der Nähe der NSHV aufbauen.

Die isoliert aufgebaute HEK-Schiene (HEK = Haupterdungsklemme) teilt sich in zwei Abschnitte, den PEN-Teil (blau dargestellt) und den PE-Teil (grün-gelb dargestellt). Die PEN-Schiene einer jeden NSHV wird über eine kurzschlussfeste Verbindung (mit $k^2 \cdot S^2 \geq I_k^2 \cdot t_k$, siehe unten) an den PEN-Teil und die PE-Schienen an den PE-Teil der HEK angeschlossen. Zusätzlich schließt man an den PE-Teil der HEK-Schiene auch den Fundamenterder an sowie alle Potentialausgleichsleiter, die gemäß DIN VDE 0100 Teil 410 mit der Haupterdungsklemme zu verbinden sind. Die Messeinrichtung

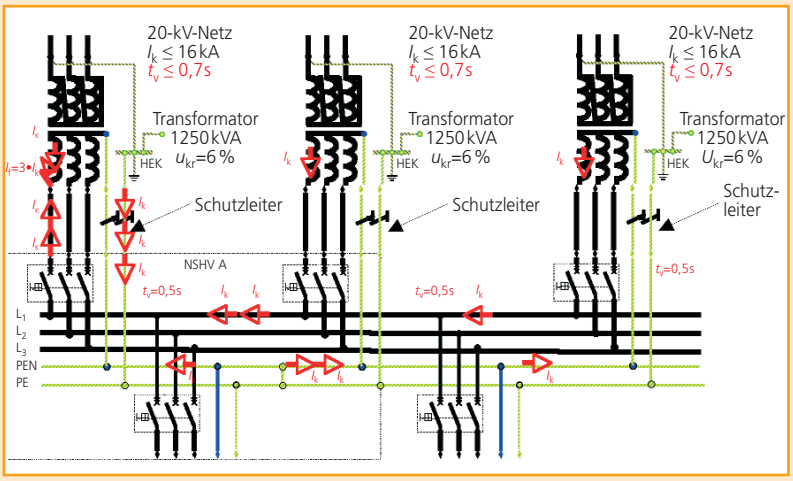

Bild 6: Schutzleiterdimensionierung anhand eines Netzschaltplans mit drei Transformatoren

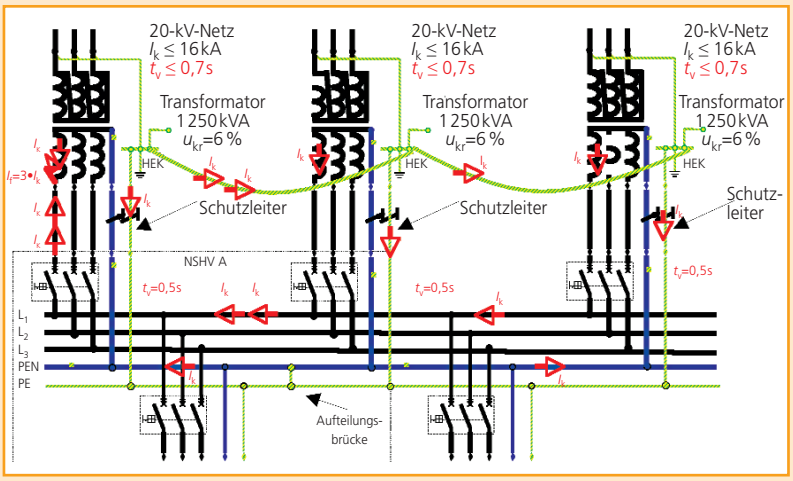

Bild 7: Schutzleiterquerschnitt erheblich reduzierbar, wenn Transformatoren über Potentialausgleichsleiter verbunden werden

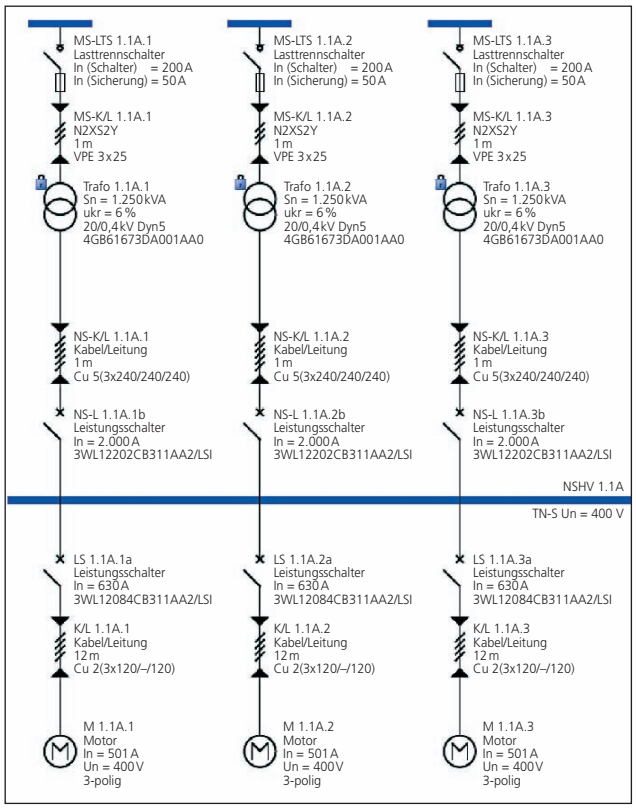

Bild 8: Dimensionierung mit Simaris Design 4.1 basic – Betriebsmittel

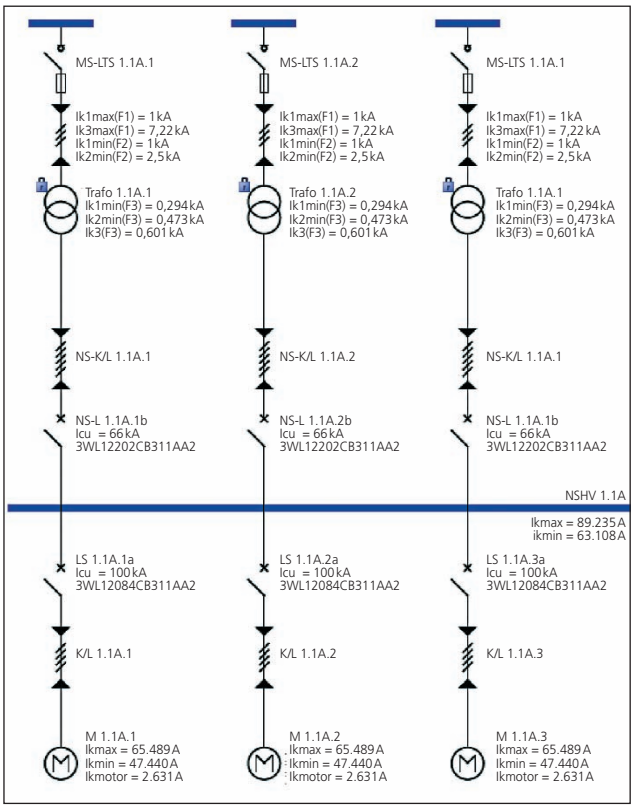

Bild 9: Dimensionierung mit Simaris Design 4.1 basic – Kurzschlussströme

(1…10 A) zum Überwachen der Erdfehlerströme baut man zwischen dem PEN- und dem PE-Teil der HEK-Schiene ein [4].

Bei der Variante entsprechend **Bild 5** mit nebeneinander aufgestellten Transformatoren und dezentral aufgestellten NSHV ist es sinnvoll, den zentralen Erdungspunkt in der Nähe der Transformatoren zu errichten. In diesem Fall sind die PEN-Verbindungen von den Transformatorsternpunkten über die HEK zu den NSHV nicht nur kurzschlussfest, sondern auch für den vollen Transformatornennstrom auszulegen. Sowohl die Transformatorschalter als auch die Schalter in der Verbindung zwischen den beiden NSHV sollten vierpolig ausgeführt werden. Bei Normalbetrieb sollte man einen der beiden Schalter in der Kuppelverbindung ausschalten.

Bei geschlossener Kupplung kommt es bei ungleichmäßiger einpoliger Belastung in den beiden NSHV oder bei ungleichen Kabeltrassen zu Ausgleichsströmen über die N-Leiter zwischen den beiden Transformatoren. Diese vergrößern das elektromagnetische Feld um die Transformatorableitungen und die Kuppelverbindung. Diese induktive Kopplung kann zu einer störenden Beeinflussung von empfindlichen Einrichtungen in der Nähe dieser Kabeltrassen führen.

Wird ein Transformator z.B. durch einen Generator ersetzt, gelten die gleichen Aussagen wie für die o.g. Beispiele mit zwei Transformatoren.

Grundsätzlich ist der zentrale Erdungspunkt nur für ein galvanisch verbundenes Netz erforderlich. Es ist aus Gründen der EMV nicht notwendig, bei mehr als einem Netz einen zentralen Erdungspunkt für das ganze Gebäude zu errichten. Stellt man z.B. die Transformatoren mehrerer Netze bei einem 400 m langen Gebäude rechts und links auf – also mit 400 m Abstand – und baut den zentralen Erdungspunkt für alle Netze an einem Standort auf, so werden im Fehlerfall (Körperschluss) die einpoligen Fehlerströme quer durch das ganze Gebäude und wieder zurück transportiert. Hierbei kann es zu einer erheblichen elektromagnetischen Beeinflussung durch induktive Kopplung von empfindlichen Verbrauchern kommen. Es genügt in der Regel, einen ausreichend dimensionierten Potentialausgleich zwischen den Standorten einzubauen und die Verteiler, welche aus beiden Standorten eingespeist werden, mit vierpoligen Umschalteinspeisungen auszurüsten.

Beispiele aus der Praxis und Berechnung des Schutzleiterquerschnitts

Das **Bild 6** zeigt einen Netzschaltplan mit drei Transformatoren, welche eine Niederspannungs-Hauptverteilung direkt versorgen. Eine derartige Konstellation kann im Niederspannungsnetz reell vorkommen. Wir berechnen zuerst die Kurzschlussströme vereinfacht auf der Hoch- und Niederspannungsseite per Hand. Dann erfolgt die Auswahl der Kabelquerschnitte. Anschließend rechnen wir dieses Beispiel der Siemens-Software »Simaris« nach und vergleichen die Ergebnisse. Die Impedanzkorrekturen und die Kabellängen von Transformatoren bis zur NSHV sind nicht berücksichtigt. Nähere Angaben lassen sich [6] und [7] nachlesen. Die Netzdaten gibt das Bild 6 an.

Die ***Berechnung*** erfolgt zuerst ***für einen Transformator (TR1)***:

• A.1 – Berechnung des maximalen Kurzschlusses I''_{k3} auf der NS-Seite (0,4 kV):

$$I''_{k3} = \frac{100\%}{u_{kr}} \cdot \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100\%}{6\%} \cdot \frac{1250\,\text{kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400\,\text{V}} = \underline{\underline{30\,\text{kA}}}$$

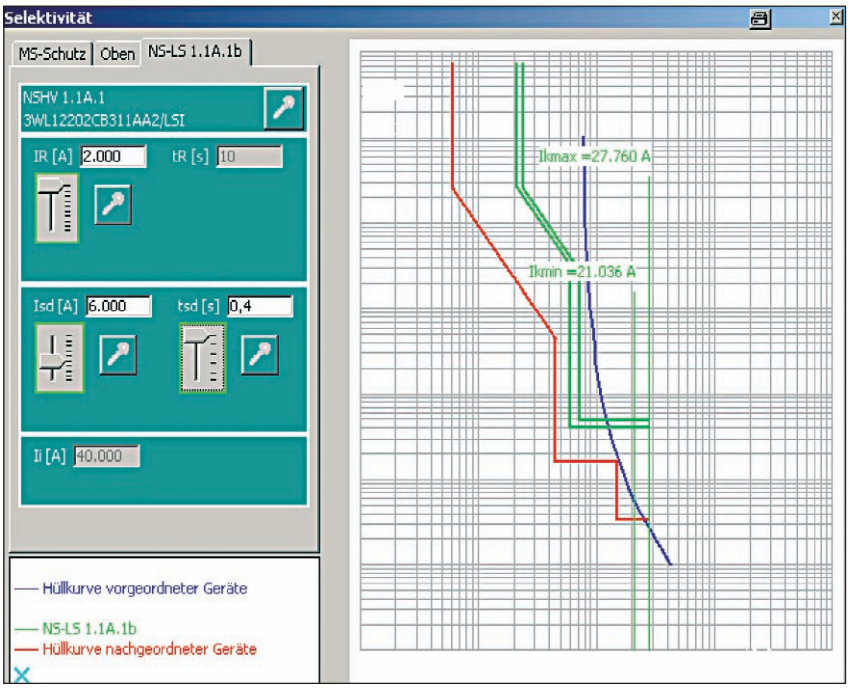

Bild 10: Schutzeinstellung am Transformatorschalter

• A.2 – Berechnung des maximalen Kurzschlusses I''_{k2} auf der MS-Seite (20 kV):

$$I''_{k2} = I''_{k3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 16\text{kA} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 13856\text{A}$$

• B.1.a – Berechnung $S_{PE\text{-erf}}$ mit $I_{k\,0,4\text{kV}}$ Abschaltung mit NS-Schalter (t_v+0,08 s):

$$I_k^2 \cdot t_k = 30\text{kA}^2 \cdot (0,5+0,08)\text{s} = \underline{\underline{522\,000\,000\,\text{A}^2\text{s}}}$$

$$S_{PE} \geq \frac{\sqrt{I_k^2 \cdot t}}{115} \geq \frac{\sqrt{522\,000\,000\,\text{A}^2\text{s}}}{115} \geq \underline{\underline{198,67\text{mm}^2}}$$

Es wird somit ein PE-Leiter mit PVC-Isolierung (z. B. NYY) mit einem PE-Leiter-Querschnitt S_{PE} von ≥ 240 mm² Cu benötigt.

• B.1.b – Berechnung $S_{PE\text{-erf}}$ mit $I_{k\,0,4\text{kV}}$ Abschaltung mit HS-Schalter t_v+0,1 s:

$$I_k^2 \cdot t_k = 30\text{kA}^2 \cdot (0,7+0,1)\text{s} = \underline{\underline{720\,000\,000\,\text{A}^2\text{s}}}$$

$$S_{PE} \geq \frac{\sqrt{I_k^2 \cdot t}}{115} \geq \frac{\sqrt{720\,000\,000\,\text{A}^2\text{s}}}{115} \geq \underline{\underline{233,32\text{mm}^2}}$$

• C.1 – Berechnung $S_{PE\text{-erf}}$ mit $I_{k\,20\text{kV}}$ Abschaltung mit HS-Schalter t_v+0,1 s:

$$I_k^2 \cdot t_k = 13856^2\text{A}^2 \cdot (0,1+0,1)\text{s} = 38\,400\,000\,\text{A}^2\text{s}$$

$$S_{PE} \geq \frac{\sqrt{I_k^2 \cdot t}}{115} \geq \frac{\sqrt{38\,400\,000\,\text{A}^2\text{s}}}{115} \geq \underline{\underline{53,9\text{mm}^2}}$$

Nun die Berechnung für alle drei Transformatoren, zugeschaltet:

• A.1.a – Berechnung $I_{kmax\,0,4\text{kV}}$ bei einem 1250-kVA-Transformator (s. o.):

$$I''_{k3T} = \frac{100\%}{u_{kr}} \cdot \frac{S_{rT}}{U_n\sqrt{3}} = \frac{100\%}{6\%} \cdot \frac{1250\text{kVA}}{400\text{V}\cdot\sqrt{3}} = \underline{\underline{30\text{kA}}}$$

• A.1.b – Berechnung $I_{kmax\,0,4\text{kV}}$ bei drei parallelen 1250-kVA-Transformatoren:

$$I''_{k3T} = \frac{100\%}{u_{kr}} \cdot \frac{3\cdot S_{rT}}{U_n\sqrt{3}} = \frac{100\%}{6\%} \cdot \frac{3\cdot 1250\text{kVA}}{400\text{V}\cdot\sqrt{3}} = \underline{\underline{90,21\text{kA}}}$$

• A.2 – Berechnung $I_{kmax\,0,4\text{kV}}$ mit $I_{k2\,20\text{kV}}$: Der Wert beträgt 13856 kA (analog Punkt A.2).

• B.1.a – Berechnung $S_{PE\text{-erf}}$ mit $I_{k\,0,4\text{kV}}$ Abschaltung mit NS-Schalter t_v+0,08 s

$$I_k^2 \cdot t_k = 90,21\text{kA}^2 \cdot (0,5+0,08)\text{s} = \underline{\underline{4\,719\,949\,578\,\text{A}^2\text{s}}}$$

$$S_{PE} \geq \frac{\sqrt{I_k^2 \cdot t}}{115} \geq \frac{\sqrt{4\,719\,949\,578\,\text{A}^2\text{s}}}{115} \geq \underline{\underline{597,4\text{mm}^2}}$$

• B.1.b – Berechnung $S_{PE\text{-erf}}$ mit $I_{k\,0,4\text{kV}}$ Abschaltung mit HS-Schalter t_v+0,1 s:

$$I_k^2 \cdot t_k = 90,21^2\text{kA}^2 \cdot (0,7+0,1)\text{s} = \underline{\underline{6\,510\,275\,280\,\text{A}^2\text{s}}}$$

$$S_{PE} \geq \frac{\sqrt{I_k^2 \cdot t}}{115} \geq \frac{\sqrt{6\,510\,275\,280\,\text{A}^2\text{s}}}{115} \geq \underline{\underline{701,61\text{mm}^2}}$$

Es wird ein S_{PE} von ≥ 3 x 1 x 240 mm² Cu gewählt.

• C.1 – Berechnung $S_{PE\text{-erf}}$ mit $I_{k\,20\text{kV}}$ Abschaltung mit HS-Schalter t_v+0,1 s: Der Querschnitt beträgt 53,9 mm² wie bei einem Transformator nach C.1 (s. o.).

Der Schutzleiterquerschnitt kann erheblich reduziert werden, wenn man – wie im **Bild 7** dargestellt – die Potentialausgleichsschienen der Transformatoren über Potentialausgleichsleiter miteinander verbindet.

Berechnung mit Simaris

Die **Bilder 8 und 9** zeigen Screenshots aus dem Berechnungsgang des Beispiels anhand der Siemens-Software »Simaris Design 4.1 basic«. Auch Simaris kommt zu der Aussage, dass der PE-Querschnitt 3 x 240 mm² betragen muss, obwohl doch der halbe Außenleiterquerschnitt nur 3 x 120 mm² beträgt (Bild 8).

Wenn aber die PA-Schienen der Transformatoren parallel geschaltet sind, genügt pro Transformatorableitung 1 x 240 mm². Der Summenkurzschlussstrom beträgt gemäß Simaris-Berechnung 89,235 kA, der Teilkurzschlussstrom pro Transformator beträgt 27,760 kA (**Bild 9**).

Das **Bild 10** zeigt die Schutzeinstellungen der Transformatorschalter mit folgenden Parametern:

• L-Auslöser – Überlast 2000 A, t_r = 10 s
• S-Auslöser – zeitverzögerter Kurzschlussauslöser I_{sd} = 6000 A, t_{sd} = 0,4 s
• I-Auslöser – unverzögerter Kurzschlussauslöser I_i = 40000 A, unverzögert (50 ms).

Fazit

In den letzten Jahren wurden umfangreiche Untersuchungen zur EMV und zum zentralen Erdungspunkt durchgeführt und in Vorschriften und Fachartikeln veröffentlicht. In diesem Beitrag wurde die alte und neue Technik verglichen und für die Planung und Auslegung des zentralen Erdungspunktes ZEP und des Schutzleiters Vorschläge unterbreitet. Mit einem Beispiel wurde der Querschnitt des Schutzleiters per Hand und mit Hilfe des Programms Simaris berechnet. Die wichtigsten Merkmale einer fachgerechten Planung lauten:

- PEN-Leiter muss man vermeiden, bei Mehrfacheinspeisung müssen sie von der Quelle bis zum ZEP zumindest isoliert werden
- Ab dem Transformator ist ein Fünfleitersystem erforderlich
- Weder den PEN noch den PE darf man niemals schalten
- PEN-Leiter muss man in ihrem gesamten Verlauf isoliert verlegen
- Bei Umschaltverbindungen muss man vierpolige Schalter einsetzen
- Im gesamten System darf nur eine zentrale Erdverbindungsstelle ZEP vorhanden sein und keine weitere Verbindung zum PE oder zum Potentialausgleichssystem bestehen
- Die Größe des einpoligen Kurzschlussstroms bestimmt den Querschnitt des Schutzleiters.

MEHR INFOS:

Fachbeiträge zum Thema

- Kasikci, I.: Kurzschlussberechnung in Drehstromnetzen, sechsteiliger Fachbeitrag in den »de«-Ausgaben, 4/2003, S. 32 ff., 5/2003, S. 50 ff., 7/2003, S.54 ff., 8/2003, S. 36 ff., 10/2003, S. 46 ff. und 12/2003, S. 49 ff.

Literatur

[1] DIN EN 5031 (VDE 0800 Teil 2-310):2001-09, Anwendung von Maßnahmen für den Potentialausgleich und Erdung in Gebäuden mit Einrichtungen der Informationstechnik

[2] DIN VDE 0100-540 (VDE 0100-540):2007-07, Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Erdungsanlagen, Schutzleiter, Schutzpotentialausgleichsleiter

[3] Kopecky, V.: EMV im Schaltschrank, de 9/2006, S. 26 ff.

[4] Otto, K.-H.: Überprüfung von Anlagen in TN-?-Systemen, de 12/2003, S. 40 ff.

[5] Muhm, H., Hofheinz, W.: Schadensverhütung in modernen Elektroanlagen, de 5/2004, S. 48 ff.

[6] DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07, Kurzschlussströme in Drehstromnetzen

[7] Kasikci, I: Kurzschlussstromberechnung in elektrischen Anlagen, Expert Verlag, 2. Auflage, 2005.

Prof. Dr. Ismail Kasikci, Hochschule Biberach,
Norbert Pantenburg, ehemals Siemens AG