

Dieser Beitrag betrachtet zwei Ausführungsvarianten der Verbindung zum Energietransport zwischen den Transformatoren und der NSHV bei zentraler Mehrfacheinspeisung, wenn mehrere Transformatoren parallel betrieben werden und ins Sammelschienensystem der NSHV einspeisen. Dieses betrachtete Sammelschienensystem ist nicht durch Längskupplungen unterteilt.

# Verbindungen von Transformatoren zur NSHV

## Mögliche Kurzschlüsse in der Transformatorzelle berücksichtigen

Im nachfolgenden Beispiel aus der Praxis werden zwei Ausführungsvarianten im fehlerfreien Betrieb, bei Kurzschlüssen im Verbrauchernetz sowie bei Kurzschlüssen in der Transformatorzelle auf der Unterspannungsseite des Transformators analysiert. Der Analyseschwerpunkt liegt hier sowohl auf der EMV als auch der Auslegung bzw. Berechnung.

Bei den beiden hier untersuchten Ausführungsvarianten wird der Transformatorsternpunkt bzw. der davon abgehende Leiter (PEN-Leiter) in der Transformatorbox weder mit dem Transformator kern noch mit der Erdungsschiene verbunden. Er wird isoliert gegen Erde zur NSHV geführt und dort an der isolierten PEN-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV angeschlossen.

### Grundsätzliche Anlagenkonfiguration

Diese PEN-Schiene wird mit der PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV an einer Stelle (ZEP) verbunden. Die Verbindung der PE-Schiene erfolgt mit der Erdungsschiene. Somit existiert nur eine zentrale Verbindungsstelle des PEN-Leiters mit dem geerdeten PE-Leiter. Die Ausführungsvariante 1 ist im Bild 1 und die Ausführungsvariante 2 im Bild 2 dargestellt. Diese und alle weiteren Bilder enthalten folgende Abkürzungen für die entsprechenden elektrischen Betriebsmittel:

- **A** – Verbindung zwischen der Erdungsschiene und der PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV
- **B, C, D** – Verbindung zwischen dem Kern des jeweiligen Transformators und der Erdungsschiene (nur in der Variante 1 gemäß Bild 1)
- **K1, K2, K3** – Kabelanlage zwischen dem jeweiligen Transformator und der NSHV
- **K** – Kabelanlage des NSHV-Abgangs
- **MSLS1, MSLS2, MSLS3** – MS-Leistungsschalter mit dem UMZ-Schutz des jeweiligen Transformators
- **LS1, LS2, LS3** – NS-Leistungsschalter mit dem Überstromauslöser (LSI-

Schutzfunktionen) des jeweiligen Transformators

- **ZEP** – zentraler Erdungspunkt einer elektrischen Anlage.

Der Leiter zwischen dem Transformatorsternpunkt und der NSHV ist bei beiden Ausführungsvarianten als PEN-Leiter bezeichnet, weil er sowohl 50-Hz-Unsymmetrieströme als auch Betriebsströme (leider im überschwingungsbehafteten Netz auch noch Stromüberschwingungen, deren Ordnungszahl durch drei teilbar ist) als auch einpolige Fehlerströme zum Transformatorsternpunkt zurückführt.

### Allgemeine Betrachtung der Variante 1

Bild 1 zeigt den Betriebsstrom im Normalfall bei Variante 1, ohne Störung. Unter der Voraussetzung, dass der N-Leiter im Verbrauchernetz nicht mehr zusätzlich geerdet bzw. nicht mehr mit dem PE-Leiter verbunden wird, sind abgesehen von den Ableitströmen keine Betriebs- bzw. vagabundierenden Ströme in PE-, PA-Leitern, Datenleitungen bzw. in Metallteilen des Gebäudes zu erwarten. Der PE-Leiter wird weiter im Verbrauchernetz geerdet, damit im Fehlerfall sein Potential vom Erdpotential so wenig wie möglich abweicht. Die Variante 1 kann somit als EMV-freundlich angesehen werden.

Bild 3 zeigt die Teilkurzschlussströme bei einem einpoligen Fehler im Verbrauchernetz. In diesem Bild ist der Teilkurzschlussstrom nicht dargestellt, der zur PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV über die Erdungsschiene und die Verbindung A fließt – ankommend von der Fehlerstelle über das Erdungs- bzw. PA-System. Aufgrund der Impe-

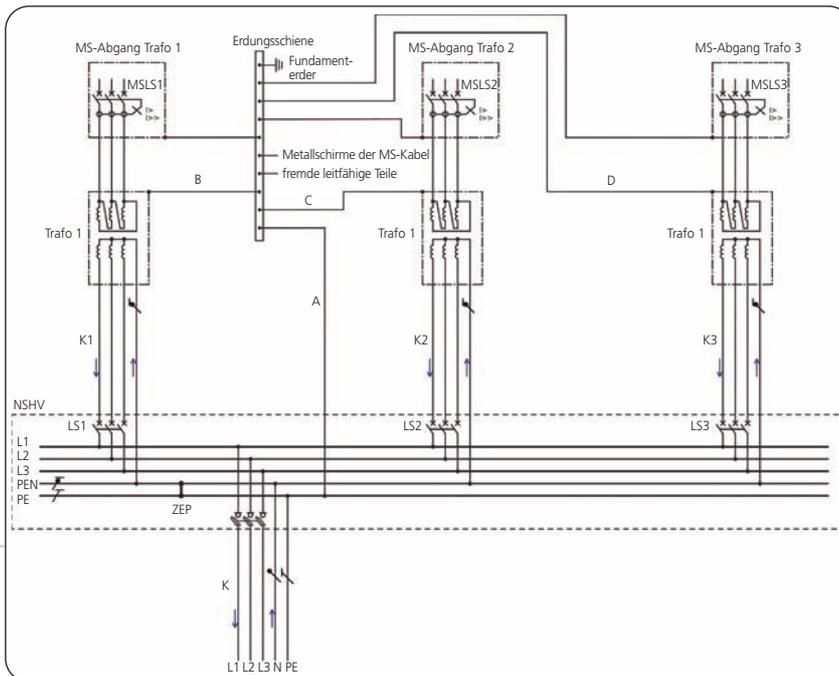
danzverhältnisse ist dieser Teilkurzschlussstrom wesentlich kleiner als die Hauptteilkurzschlussströme.

Die Hauptteilkurzschlussströme (im weiteren Text Teilkurzschlussströme genannt) vom Transformator 1, 2 und 3 fließen in ihren zugehörigen Übertragungssystemen. Alle zusammen belasten bzw. durchfließen die Verbindung ZEP. Dies ist bei der ZEP-Auslegung zu berücksichtigen. Hierfür werden ein- und dreipolige Kurzschlüsse am Sammelschienensystem der NSHV berechnet und betrachtet. Nur diese liefern die Information zur Dimensionierung der Verbindung ZEP. Aufgrund der üblichen Dyn5-Transformatorschaltung, großer Leiterquerschnitte und kleiner Nullimpedanzen bis zur NSHV ist oft der einpolige Kurzschlussstrom an der NSHV größer als der dreipolige.

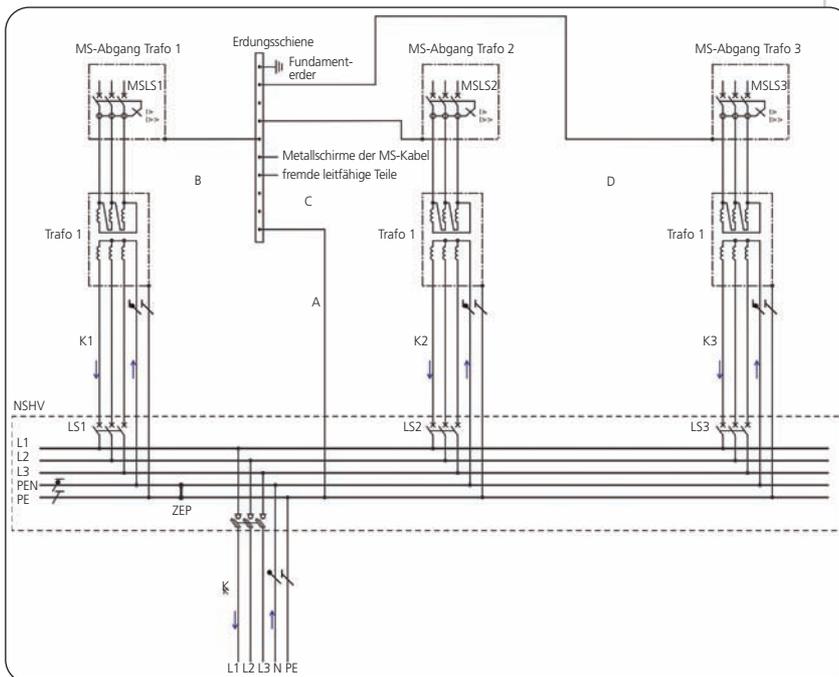
Im Bild 4 sind die Teilkurzschlussströme bei einem einpoligen Fehler (zwischen Außenleiter L1 und Transformator kern) auf der US-Seite des Transformators 1 dargestellt. Solche Kurzschlüsse sind eher unwahrscheinlich, jedoch nicht ausgeschlossen. Sie sollten daher berücksichtigt werden. Hier speisen alle drei Transformatoren auf die Fehlerstelle.

### Analyse der zu erwartenden Teilkurzschlussströme

Der Teilkurzschlussstrom vom Transformator 1 fließt vom Transformator kern über die Verbindung B zur Erdungsschiene, über die Verbindung A von der Erdungsschiene zur PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV, über ZEP zur PEN-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV und von dort über den PEN-Leiter der Kabelanlage K1



**Bild 1: Ungestörter Betrieb, Variante 1 (blaue Pfeile symbolisieren die fließenden Betriebsströme)**



**Bild 2: Ungestörter Betrieb, Variante 2 (blaue Pfeile symbolisieren die fließenden Betriebsströme)**

zum Sternpunkt des Transformators 1 zurück.

Der Teilkurzschlussstrom vom Transformator 2 fließt über den Außenleiter L1 der Kabelanlage K2 zur L1-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV, über den Außenleiter L1 der Kabelanlage K1 von der NSHV zur Fehlerstelle, über die Verbindung B zur Erdungsschiene, über die Verbindung A von der

Erdungsschiene zur PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV, über ZEP zur PEN-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV und dann über den PEN-Leiter der Kabelanlage K2 von der NSHV zum Sternpunkt des Transformators 2 zurück.

Der Teilkurzschlussstrom vom Transformator 3 fließt über den Außenleiter L1 der Kabelanlage K3 zur L1-Schiene

des Sammelschienensystems der NSHV, über den Außenleiter L1 der Kabelanlage K1 von der NSHV zur Fehlerstelle, über die Verbindung B zur Erdungsschiene, über die Verbindung A von der Erdungsschiene zur PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV und über den PEN-Leiter der Kabelanlage K3 von der NSHV zum Sternpunkt des Transformators 3 zurück.

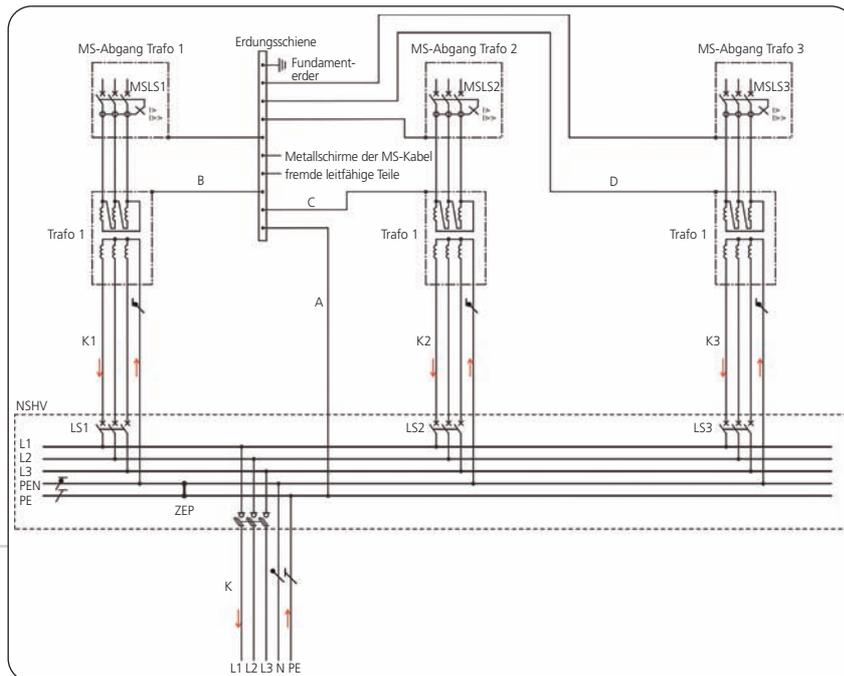
Mit den größten Kurzschlussbeanspruchungen werden somit die Verbindungen ZEP, A und B belastet, denn sie sind von allen drei Teilkurzschlussströmen beaufschlagt. Die Querschnitte der Verbindungen ZEP, A und B müssen so bemessen sein, dass die Bedingungen für den Schutz gegen elektrischen Schlag durch die automatische Abschaltung der Stromversorgung erfüllt werden. Daher müssen diese Querschnitte auch so ausgelegt sein, dass sie den maximalen Gesamtkurzschlussstrom als vektorielle Summe der drei Teilkurzschlussströme führen können.

Den Teilkurzschlussstrom vom Transformator 1 erfasst der UMZ-Schutz des Transformators 1, nicht aber der NS-Leistungsschalter LS1. Den Teilkurzschlussstrom vom Transformator 2 erfassen sowohl der UMZ-Schutz des Transformators 2 als auch der LS2 und der LS1. Den Teilkurzschlussstrom vom Transformator 3 erfassen sowohl der UMZ-Schutz des Transformators 3 als auch der LS3 und der LS1.

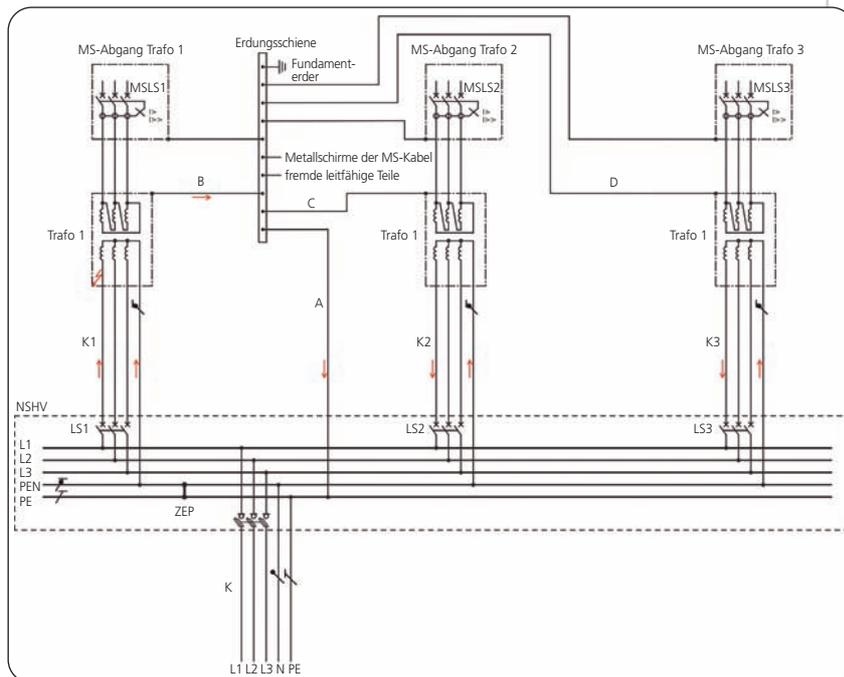
### Berechnung der auftretenden Teilkurzschlussströme

Alle drei Teilkurzschlussströme lassen sich nicht nach der DIN VDE 0102 (mit der Einführung der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle und der Verwendung der symmetrischen Komponenten für das Mit-, Gegen- und Nullsystem) ermitteln. Da aber die NS-Berechnungsprogramme nach der DIN VDE 0102 ausgelegt sind, können sie zur Ermittlung nicht genutzt werden. Der Planer muss also die Kurzschlussleistung im Mitsystem nach dem Schleifenimpedanzverfahren von Hand berechnen.

Hierfür sind die Resistanz- und die induktiven Reaktanzbeläge der Schleifenkomponenten erforderlich. Für die Verbindungen A und B sind die induktiven Resistanzbeläge nicht definiert. Das Beiblatt 4 der DIN VDE 0102 ent-



**Bild 3: Kurzschluss im Verbrauchernetz, Variante 1 (rote Pfeile symbolisieren die fließenden Fehlerströme)**

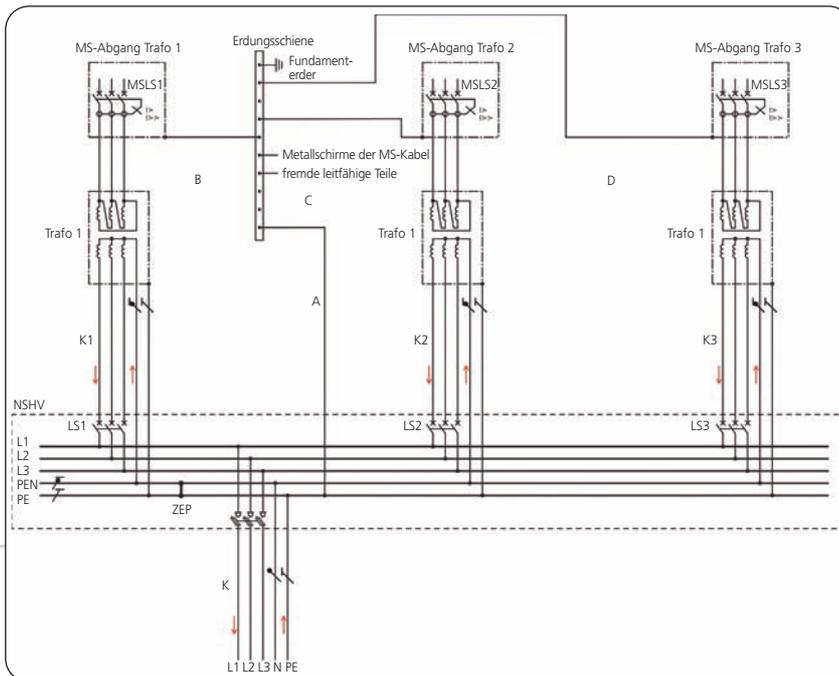


**Bild 4: Kurzschluss in der Transformatorzelle, Variante 1 (rote Pfeile symbolisieren die fließenden Fehlerströme)**

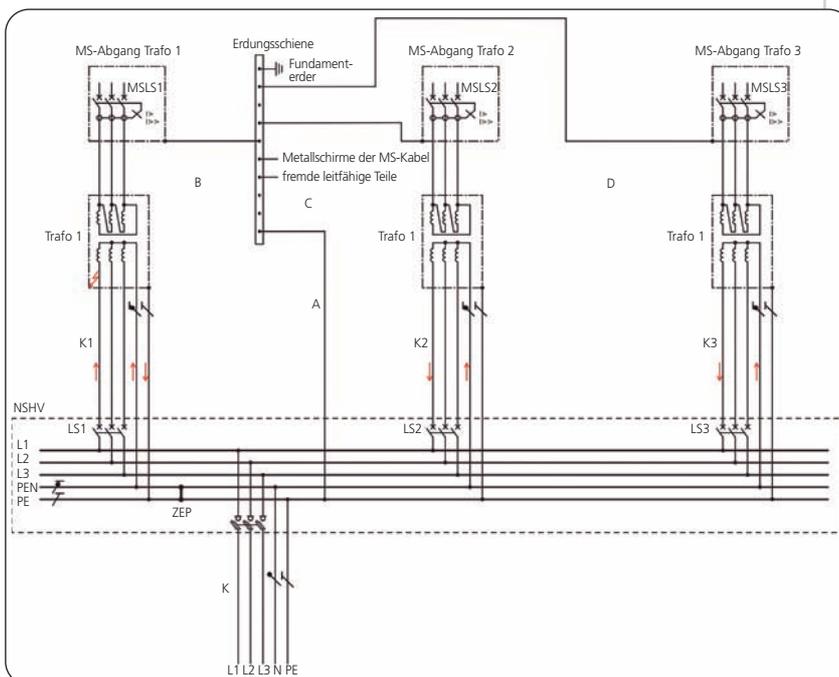
hält nämlich die Impedanzbeläge der Mehraderkabel und die Quotienten der Resistenzen und Reaktanzen im Null- und Mitsystem. Für Hochstromschienensysteme werden die Impedanzbeläge von den Herstellern angegeben.

Die induktiven Reaktanzen der Verbindungen A und B sind nicht nur von ihren Querschnitten, sondern auch von ihren Induktivitäten bzw. von

dem Verlegungsverlauf und der metallischen Umgebung abhängig. Die Impedanzen der Verbindungen A und B können nur messtechnisch ermittelt werden. Die Messwerte (Mitimpedanz mit Betrag und Impedanzwinkel), die allerdings dem momentanen Schaltungszustand entsprechen, werden dann in die Berechnung von Hand eingesetzt.



**Bild 5: Kurzschluss im Verbrauchernetz, Variante 2 (rote Pfeile symbolisieren die fließenden Fehlerströme)**



**Bild 6: Kurzschluss in der Transformatorzelle, Variante 2 (rote Pfeile symbolisieren die fließenden Fehlerströme)**

### Betrachtung der Kurzschlussstromabschaltung

Unter der Voraussetzung, dass zwei Transformatoren in der Lage sind, die Gesamtlast zu versorgen, ist es sinnvoll, dass die Kurzschlussstromabschaltung selektiv erfolgt. Das bedeutet, dass der Teilkurzschlussstrom vom Transformator 2 nicht vom MSL2 bzw. dem LS2,

sondern vom LS1 abgeschaltet wird. Genauso soll der Teilkurzschlussstrom vom Transformator 3 nicht vom MSL3 bzw. dem LS3, sondern vom LS1 abgeschaltet werden. Hierfür muss aber der LS1 zusätzlich mit einem Richtungschutz ausgestattet werden, der die Teilkurzschlussströme vom Transformator 2 und 3 richtungsgemäß erkennt und in Schnellzeit abschaltet. Der Teil-

kurzschlussstrom vom Transformator 1 muss daher vom MSL1 abgeschaltet werden.

### Allgemeine Betrachtung der Variante 2

Bei der Variante 2 werden die Kerne der Transformatoren nicht mit der Erdungsschiene verbunden. Sie werden hier über den PE-Leiter der jeweiligen Kabelanlage (K1, K2, K3) mit der PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV verbunden.

Ähnliche Verhältnisse herrschen auch bei der Variante 2 im ungestörten Betrieb (Bild 2) und bei einem einpoligen Kurzschluss im Verbrauchernetz (Bild 5). Die Variante 2 kann ebenso als emv-freundlich angesehen werden.

Der gravierende Unterschied zwischen der Variante 1 und der Variante 2 ist bei einem einpoligen Kurzschluss in der Transformatorzelle aufgrund der anderen Schließung der Fehlerschleifen der Teilkurzschlussströme vom Transformator 1, 2 und 3 festzustellen.

Die Teilkurzschlussströme vom Transformator 1, 2 und 3 bei einem einpoligen Kurzschluss in der Transformatorzelle auf der US-Transformatorseite zwischen dem Außenleiter L1 und dem Kern des Transformators 1 sind im Bild 6 dargestellt. Alle drei Teilkurzschlussströme bilden Fehlerschleifen, die Komponenten der bestehenden Kabelanlagen K1, K2 und K3 beinhalten. Das bedeutet, dass die zur Ermittlung der Teilkurzschlussströme erforderlichen Impedanzbeläge definiert bzw. erhältlich sind.

Gemäß Bild 6 fließen die drei Teilkurzschlussströme (vom Transformator 1, 2 und 3) in ihren zugehörigen Übertragungssystemen. Die Verbindung ZEP und der PE-Leiter der Kabelanlage K1 sind von allen drei Teilkurzschlussströmen beaufschlagt, so dass ihre Querschnitte für die größte vektorielle Summe der drei Teilkurzschlussströme bemessen werden müssen.

### Auswirkung in der Praxis

An dieser Stelle seien zwei Projekte aus der Praxis des Autors erwähnt, deren Aufbau der Variante 1 entspricht. Bei dem ersten Projekt speisen drei Transformatoren mit je 1600kVA, 10%, in die NSHV ohne Längskupplungen ein. Aus der NSHV werden zwei rotierende USV je 2500kVA, 6,7%, über entsprechende Drosseln versorgt. Die beiden



## MEHR INFOS

### Bücher zum Thema

- Kasikci, I.: Projektierung von Niederspannungsanlagen, 3. Auflage, 2010, 818 S., 49,00 €, ISBN 978-3-8101-0274-4, Hüthig & Pflaum Verlag, [www.de-online.info/shop](http://www.de-online.info/shop)
- Balzer, G.; Nelles, D.; Tuttas, C.: Kurzschlussstromberechnung nach IEC und DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07, VDE-Schriftenreihe Band 77, 2. Auflage, 2009, ISBN 978-3-8007-3144-2, VDE Verlag
- Hörmann, Schröder: Schutz gegen elektrischen Schlag in Niederspannungsanlagen, VDE-Schriftenreihe Band 140, 4. Auflage, 2010, ISBN 978-3-8007-3190-9, VDE Verlag
- Pistora, G.: Berechnung von Kurzschlussströmen und Spannungsfällen, VDE-Schriftenreihe Band 118, 2. Auflage, 2009, ISBN 978-3-8007-3136-7, VDE Verlag

### Fachbeiträge zum Thema

- Hörmann, W.: Umrüsten eines TN-C in ein TN-S-System, »de« 18/2004, S. 30 ff.

- Uhlig, H.-P.; Hörmann, W.: Erdung von Stromversorgungsanlagen in Gebäuden, »de« 1-2/2005, S. 47 ff.
- Hörmann, W.: Umwandeln eines TN-C-Systems in ein TN-S-System durch Hinzuverlegen eines Neutralleiters – Zusatzanfrage, »de« 8/2006, S. 15 f.

### Normen zum Thema

- DIN VDE 0100-410:2007-06, Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag
- DIN VDE 0100-430:2010-10, Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 4-43: Schutzmaßnahmen – Schutz bei Überstrom
- DIN VDE 0100-540:2007-06, Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 5-54: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Erdungsanlagen, Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter
- DIN VDE 0102:2002-07, Kurzschlussströme in Drehstromnetzen
- DIN VDE 0103:1994-11, Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung

USV sind de facto mit dem Netz parallelgeschaltet. Hierbei sind die Verbindungen A und B (sowie der ZEP) bei dem beschriebenen Fehler in der Transformatorzelle sowohl mit den Teilkurzschlussströmen vom Transformator 1, 2 und 3 als auch den mit dem »verdrosselten« Teilkurzschlussstrom von der ersten USV und dem »verdrosselten« Teilkurzschlussstrom von der zweiten USV beaufschlagt. Der Hersteller hat seine Transformatoren mit einem Kernanschluss von maximal 50 mm<sup>2</sup> ausgestattet.

Bei einem zweiten Projekt existieren zwei Transformatoren. Die Anbindung zwischen dem Transformator und der PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV ist hierbei nicht über kurze Verbindungen A und B realisiert, sondern besteht aus einer Reihenschaltung mehrerer Komponenten. Hier kamen z.B. dünne und dicke Bandeisen, Kupferschienen oder Einzeladerkabel mit einer Gesamtlänge von 200 m zum Einsatz. Die Kabelanlage zwischen dem jeweiligen Transformator und der NSHV K1 und K2 weist dabei eine Länge von 60 m bzw. 65 m auf.

### Fazit

Es empfiehlt sich, das Entstehen des beschriebenen Kurzschlusses in der Transformatorbox planerisch nicht auszu-

schließen. Vielmehr sollte auch hier das Einhalten des Schutzes gegen elektrischen Schlag durch die automatische Abschaltung der Stromversorgung (Ansprechbarkeit der Schutztechnik) sowie der Gewährleistung der Kurzschlussfestigkeiten entsprechender Anlagenteile berücksichtigt werden. In Hinblick auf die Komponentenauswahl gestaltet sich diese Berücksichtigung aufgrund definierter Impedanzbeläge der Fehlerschleifen bei der Ausführungsvariante 2 wesentlich leichter als bei der Variante 1.

Die zwei genannten Projekte aus der Praxis zeigen, wie kritisch Dimensionierung und Auswahl der Verbindungen A und B bezüglich der Kurzschlussfestigkeiten sein können, wenn man sich für die Variante 1 entscheidet. Beim ersten Projekt traf dies wegen der großen Kurzschlussleistung und der Ansprechbarkeit der Schutztechnik und beim zweiten Projekt wegen der großen Schleifenimpedanz zu.

Dragan Sofic,  
EAB Rhein-Main GmbH, Neu-Isenburg