

Wirksamkeitsnachweis der automatischen Abschaltung

Relevante Größen mit Diagrammen und Software ermitteln

H.-G. Beese, Berlin

Vorschriftmäßiges Planen, Errichten, Instandhalten und Prüfen elektrischer Anlagen beinhaltet auch einen Nachweis der automatischen Abschaltung der Stromversorgung im Fehlerfall. Um diesen Nachweis zu erbringen und die geforderte elektrische Sicherheit bei relativ geringem Aufwand zu erreichen, bietet sich die Verwendung einer Planungssoftware an, die aussagekräftige und dokumentationsfähige Berechnungsverfahren zur Verfügung stellt.

1 Anforderungen an Schutzmaßnahmen

Die im Juni 2007 erschienene neue Fassung der DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) [1] fordert:

- Schutz gegen direktes Berühren – Basischutz sowie
- Schutz bei indirektem Berühren – Fehlerchutz.

Der Basischutz wird gewährleistet durch eine Basisisolierung der aktiven Teile oder durch Abdeckungen bzw. Umhüllungen. Der Fehlerchutz beinhaltet den Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene sowie die automatische Abschaltung der Stromversorgung im Fehlerfall, also praktisch die automatische Abschaltung der Stromversorgung eines TN-Systems im Fehlerfall.

2 Automatische Abschaltung der Stromversorgung

Die in Deutschland am weitesten verbreitete Netz-Konfiguration ist das TN-C-S-System, das im Bild 1 dargestellt ist. Der in dem Bild eingezeichnete Fehlerstrom (I_F) wird durch eine fehlerhafte Basisisolierung und Berührung eines spannungsführenden Leiters mit dem Gehäuse/Körper (Körperschluss) eines elektrischen Betriebsmittels verursacht. Somit handelt es sich um einen leitungsgebundenen einpoligen generatorfernen Anfangskurzschlusswechselstrom oder Dauerkurzschlussstrom ($I''_{k1} = I_{k1} = I_F$).

Aufgrund des relativ hohen Kurzschlussstroms können in den meisten Fällen Überstrom-Schutzeinrichtungen (Sicherungen, Leitungsschutzschalter und Leistungsschalter) die Aufgabe der automatischen Abschaltung

der Stromversorgung relativ kostengünstig übernehmen. Wenn der Kurzschlussstrom die am Anfang des Stromkreises befindliche Überstrom-Schutzeinrichtung (Sicherung, Leitungsschutzschalter, Leistungsschalter) in der geforderten Abschaltzeit bei Einhaltung der Leitergrenztemperatur zum Abschalten bringen soll, muss er mindestens so groß wie der erforderliche Abschaltstrom I_a der Überstrom-Schutzeinrichtungen sein. Bei den Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) ist I_{k1} sehr viel größer als der Bemessungsdifferenzstrom $I_{\Delta N}$ (meistens ist $I_{\Delta N} \leq 30 \text{ mA}$) und bewirkt in diesem Fall immer eine sichere Abschaltung der Stromversorgung.

Um auf der sicheren Seite zu sein, wird der kleinste einpolige Kurzschlussstrom I_{k1min} nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) [2] berechnet, der für die Auswahl und Ansprechsicherheit von Schutzeinrichtungen beim Schutz durch automatisches Abschalten der Stromversorgung im Fehlerfall zugrunde gelegt werden muss. Die Bedingung für den Nachweis der Abschaltung lautet also:

$$I_{k1min} \geq I_a \quad (1)$$

I_a ist der erforderliche Abschaltstrom der Schutzeinrichtung, der unter Beachtung der in [1] geforderten Abschaltzeiten (0,4 s für Endstromkreise bis 32 A und 5 s für Verteilungsstromkreise bei Niederspannungsnetzen 400/230 V AC) zum fließen kommen muss. Er wird aus den Herstellerangaben für die verwendeten Schutzeinrichtungen ermittelt. Hierbei handelt es sich meistens um Zeit-Strom-Kennlinien (z. B. Bild 2), aus denen dieser Strom abgelesen werden kann. I_{k1min} ist von der Schleifenimpedanz Z_s und der Leitertemperatur abhängig. Je kleiner dieser Wert ist, desto größer ist der zu erwartende einpolige Kurzschlussstrom I_{k1min} und umso sicherer erfolgt die Abschaltung der Schutzeinrichtung. Es gilt folgende Bedingung:

$$Z_s = \frac{U_0}{I_a} \quad (2)$$

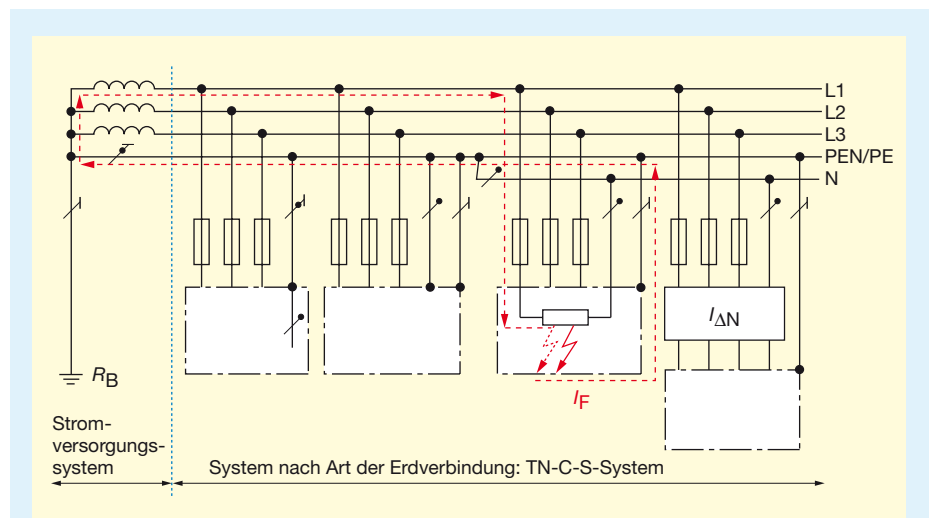
Z_s zulässige Schleifenimpedanz (Summe der Scheinwiderstände) der Fehlerschleife, bestehend aus:

- der Stromquelle
- dem Außenleiter bis zum Fehlerort
- dem Schutzleiter zwischen dem Fehlerort und der Stromquelle

I_a Abschaltstrom, der das automatische Abschalten der Schutzeinrichtung im Fehlerfall bewirkt (siehe oben).

U_0 Nennwechselspannung (Effektivwert) – üblicherweise 230 V.

Bei bereits vorhandenen Anlagen kann der Schleifenwiderstand gemessen und dann mit der nach (2) ermittelten zulässigen Schleifenimpedanz verglichen werden. Die gemessene Schleifenimpedanz muss möglichst kleiner oder zumindest gleich der zulässigen Schleifenimpedanz Z_s sein, um ein sicheres Auslösen/Ansprechen der Schutzeinrichtung zu gewährleisten. Beim Erstellen, Erweitern oder Prüfen der Planungsunterlagen elektrischer Anlagen ist der Nachweis der automatischen Abschaltung der Stromversorgung im Fehler-



1 Beispiel für ein TN-C-S-System, bei dem aufgrund einer fehlerhaften Isolierung ein Fehlerstrom zum fließen kommen kann

Autor

Dipl.-Ing. Hans-Georg Beese, Berlin, hat in der Planung und Projektierung sowie für Driescher Wegberg gearbeitet und ist jetzt selbstständig tätig.

fall durch das Messen der Schleifenwiderstände naturgemäß nicht möglich. Dieser Nachweis muss dann durch Berechnung des zu erwartenden kleinsten einpoligen Kurzschlussstroms I_{k1min} unter Anwendung der Bedingung (1) erfolgen.

3 Kleinster einpoliger Kurzschlussstrom I_{k1min}

Für die Ermittlung oder Berechnung von I_{k1min} bieten sich u. a. folgende Möglichkeiten an:

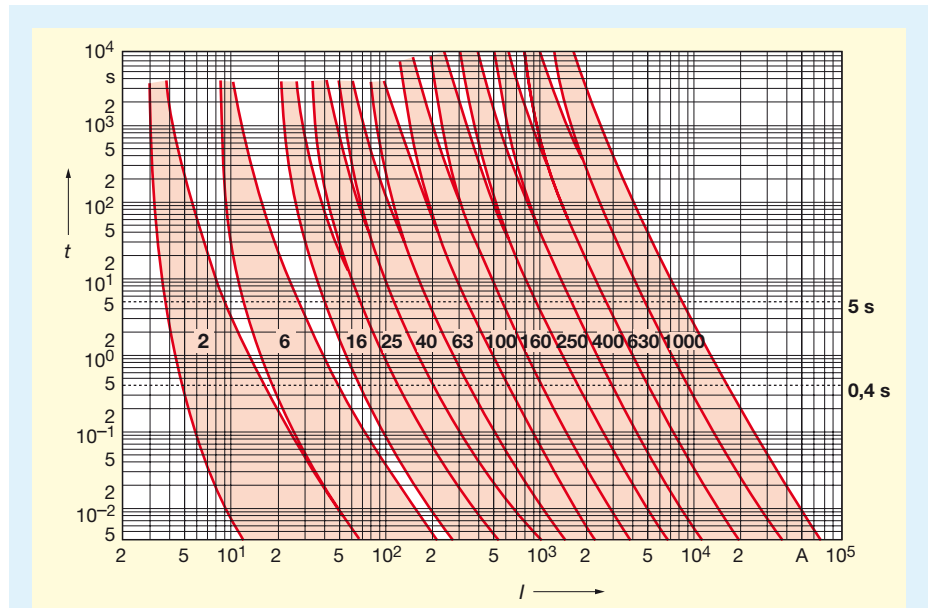
1. Ermittlung von I_{k1min} mit einem Ruck-Zuck-Diagramm für einfache Fälle und wenn es schnell gehen soll.
2. Berechnung von I_{k1min} mit der Ruck-Zuck-Planungssoftware (Excel-Datei), wenn umfangreichere Berechnungsergebnisse und/oder die anlagenspezifische Dokumentation benötigt werden.

3.1 Ermittlung aus Diagramm

Diese Möglichkeit der Ermittlung von I_{k1min} bietet sich in Fällen an, bei denen es nicht auf die Stelle hinter dem Komma ankommt, wenn es schnell gehen muss und es lediglich um die Einhaltung der Bedingung (1) geht, also um einen Vergleich zweier Ströme, der zu Gunsten von I_{k1min} ausfallen muss. Dies ist der Fall, wenn eine gute Abschätzung ausreicht – z. B. beim Planen, Projektieren, Errichten, Erweitern, Instandhalten sowie bei der Kundenberatung und der Überprüfung des ungünstigsten Verbrauchers mit den größten Leitungs-/Kabellängen in Projektunterlagen oder vorhandenen elektrischen Anlagen.

Für diese Möglichkeit der Ermittlung des I_{k1min} wird mit der Planungssoftware das Diagramm für die betreffende elektrische Anlage unter Beachtung der konkreten Randbedingungen erstellt. In diesem Diagramm wird I_{k1min} dann über der Kabel-/Leitungslänge (Entfernung) mit speziell geformten Kennlinien für jeden Querschnitt von 1,5 mm² bis 300 mm² aufgetragen. Hierfür müssen lediglich die Kurzschlusswerte des speisenden MS-Netzes vom Netzbetreiber und die technischen Daten des speisenden Netztrafos eingetragen werden. Konkrete Angaben für die Kabel-/Leitungsstrecken, wie z. B. in Bild 3, sind für eine gute Abschätzung nicht erforderlich. Das erhaltene Diagramm (Bild 4) kann dann ausgedruckt werden, sodass daraus der zu erwartende kleinste einpolige Kurzschlussstrom I_{k1min} an jeder beliebigen Stelle der betreffenden elektrischen Anlage ablesbar ist.

Das einfache Grundprinzip dabei ist, dass die Kabelstrecken in der Anlage Kennlinienabschnitten im Diagramm entsprechen. Das heißt, ausgehend von dem speisenden Transformator muss man lediglich der Reihe nach den Kennlinien der Kabel- bzw. Leitungsquerschnitte folgen. Wenn es im Strahlennetz zur Änderung des Querschnitts kommt, ändert man auch in dem Diagramm in waagerechter Richtung entsprechend den Querschnitt und



2 Beispiel eines Strom-Zeit-Diagramms für gG-Sicherungseinsätze

Je nach geforderter Abschaltzeit (0,4 s oder 5 s) kann der erforderliche Abschaltstrom (I_a) der Sicherung abgelesen werden

folgt dieser Querschnittskennlinie bis zu der Stelle der nächsten Querschnittsänderung bzw. bis zum letzten Verbraucher.

Umgekehrt kann man die zur Einhaltung des Abschaltstromes der Schutzeinrichtung (I_a) erforderlichen Kabel-/Leitungsquerschnitte mit dem Diagramm ebenfalls ermitteln. Mit einer waagerecht gedachten Linie im Diagramm ist es möglich, alle in Frage kommenden Querschnitte abzulesen, die zur Einhaltung dieses Wertes geeignet sind. An den Schnittpunkten mit den Querschnittskennlinien ist sofort ablesbar, welcher bzw. welche Querschnitte zum Einsatz kommen müssen, damit die Schutzeinrichtung im Fehlerfall sicher abschaltet. Jedoch begrenzen die kleinen Querschnitte I_{k1min} , sodass lediglich kurze Kabel-/Leitungslängen vorgesehen werden dürfen. Die Grenzlängen sind bei den größeren Querschnitten wesentlich länger. In Grenzbereichen ist eine genaue Eingabe der Kabel-/Leitungsstrecken erforderlich. Das Programm weist in diesem Fall die genauen Ergebnisse in einer Excel-Tabelle aus und stellt diese ebenfalls in dem Diagramm dar. Daraus ist ablesbar, welche Querschnitte geändert werden müssten, um die Bedingung nach (1) einhalten zu können.

Die wichtigsten Vorzüge der beschriebenen Vorgehensweise sind:

- Nutzbarkeit ohne besondere Einarbeitung
- Schnelligkeit bei ausreichender Genauigkeit und damit große Zeitersparnis
- Unabhängigkeit vom PC, da die Berechnung bereits erfolgt ist
- ortsunabhängige Nutzbarkeit (z. B. auf Baustellen und in Beratungen)
- selbsterklärender Charakter der Ruck-Zuck-Diagramme
- einfache Möglichkeit des Variantenvergleichs

- Verwendbarkeit für beliebig viele andere Abschätzungsfälle
- Übersichtlichkeit, bei der die Abhängigkeit der interessierenden Größen von Einflussparametern sowie Tendenzen auf einen Blick erfasst und besser verfolgt werden können.

3.2 Berechnung mittels Software

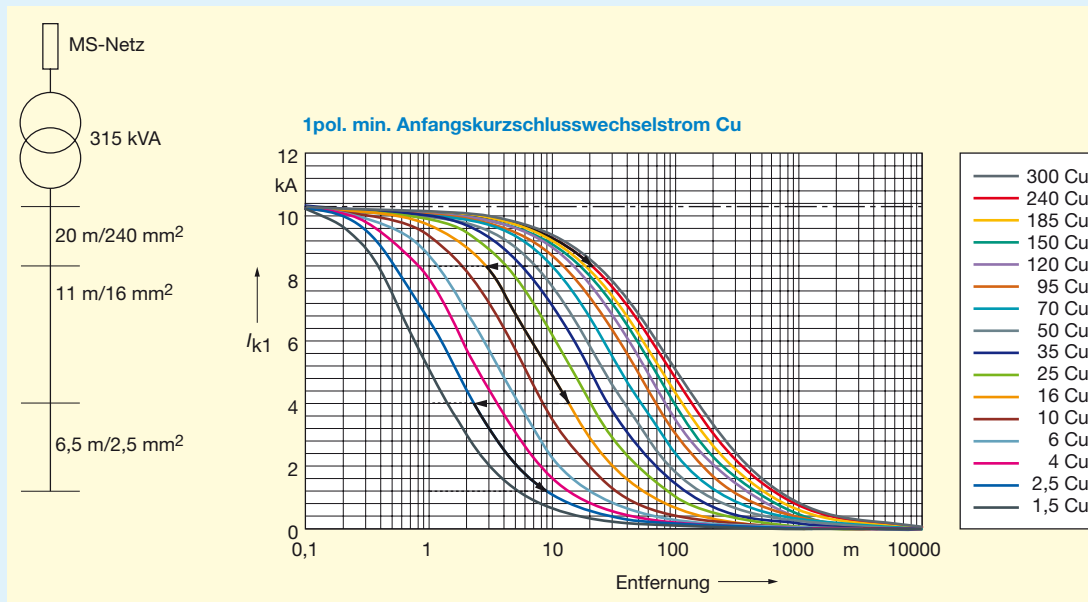
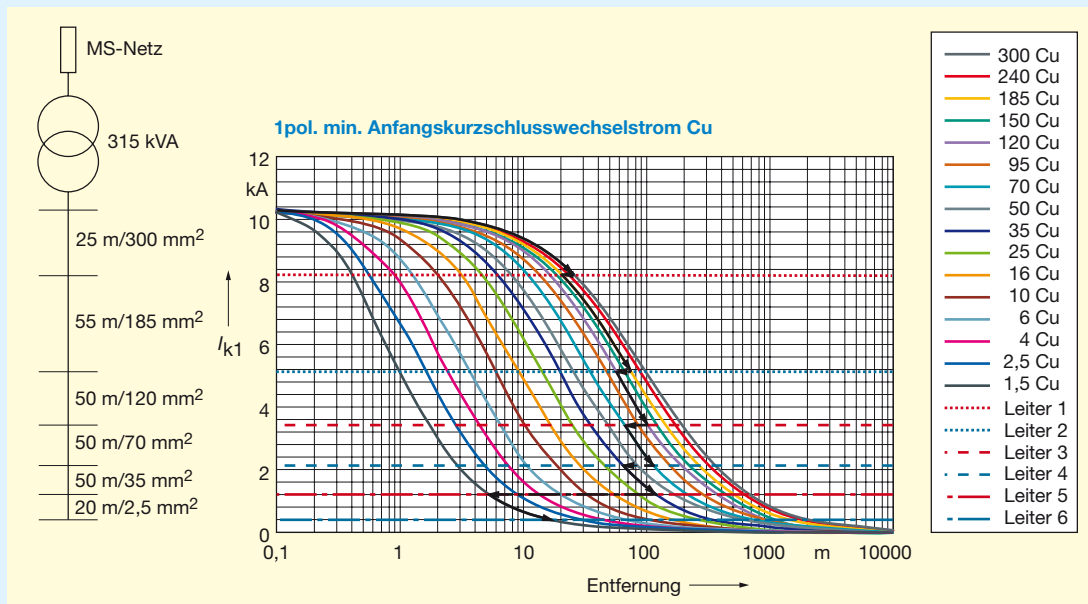
Hat man sich bereits bei den Kabel-/Leitungsquerschnitten festgelegt, weil sie aus anderen Gründen vorgegeben sind, z. B. aufgrund der Strombelastbarkeit, der Einhaltung des Spannungsfalls oder weil sie bereits vorhanden sind, kann mit der Planungssoftware der kleinste einpolige Kurzschlussstrom ebenfalls relativ einfach und schnell ermittelt werden. Die im Abschnitt 3.1 erwähnten Eingaben in der Excel-Datei des speisenden Netzes müssen nunmehr durch die restlichen Eingaben wie Kabel-/Leitungsquerschnitt sowie genaue Verlegungslängen und maximal zulässige Leitertemperatur ergänzt werden. Neben Feldern für diese Eingaben stehen in der Excel-Datei auch Kommentarfelder zum Eintragen von Vorhaben, Bearbeiter, Verteilungs-Bezeichnung, Stromkreis-Bezeichnung, Kabelnummer und weiteren individuellen Bezeichnungen zur Verfügung. Man erhält für jede beliebige Stelle in der elektrischen Anlage den im Fehlerfall auftretenden kleinsten einpoligen Kurzschlussstrom I_{k1min} , der nach (1) wieder größer als der erforderliche Abschaltstrom der Schutzeinrichtung sein muss.

Die Planungssoftware ist so aufgebaut, dass auch gemischte Netze, bestehend aus Kabel und Freileitungen, berechnet werden können. Ebenso lassen sich die verwendeten Impedanzen editieren, d. h. sie können zum Beispiel durch Impedanzen von Sonderkabeln,

3 Diagramm, das u. a. mit Angaben zu den einzelnen Kabel-/Leiterabschnitten ermittelt wurde

Pfeile verdeutlichen den Stromfluss vom speisenden Trafo über Leiter 1, 2, 3, 4, 5 und 6 bis zum Verbraucher

4 Diagramm zur Ermittlung von I_{k1min} , das nur anhand der Daten des Trafos und des MS-Netzes erstellt wurde



wie Kabeln mit Dreieinhalb-Leiter, ausgetauscht werden. Zusätzliche Berechnungsergebnisse sind die maximalen dreipoligen Kurzschlussströme I_{k3max} , der Spannungsfall, Leistungsverlust und Schleifenimpedanz. Die dazugehörigen Diagramme werden entsprechend der Eingaben errechnet und können wieder je nach Bedarf abgerufen bzw. ausgedruckt werden. Soll eine bereits bestehende elektrische Anlage erweitert werden, empfiehlt es sich, die Schleifenimpedanz vor Ort zu messen und mit diesem Messwert in der Planungssoftware weiterzurechnen.

4 Beispiel

Niederspannungsnetze lassen sich in den meisten Fällen in Strahlennetze zerlegen. Die Kurzschlussströme und Netzverluste sind dabei von den in Reihe liegenden Impedanzen der Betriebsmittel (Trafo, Kabel, Leitungen,

Schalter, Sicherungen) abhängig. Zur Überprüfung des ungünstigsten Verbrauchers auf Einhaltung der automatischen Abschaltung der Stromversorgung im Fehlerfall wurde der im Bild 5 dargestellte Netzabschnitt zur besonderen Betrachtung herausgelöst. Nur die im Übersichtsplan enthaltenen Angaben sind der Reihe nach in die gelben Felder der zuvor erwähnten Excel-Datei einzugeben [3].

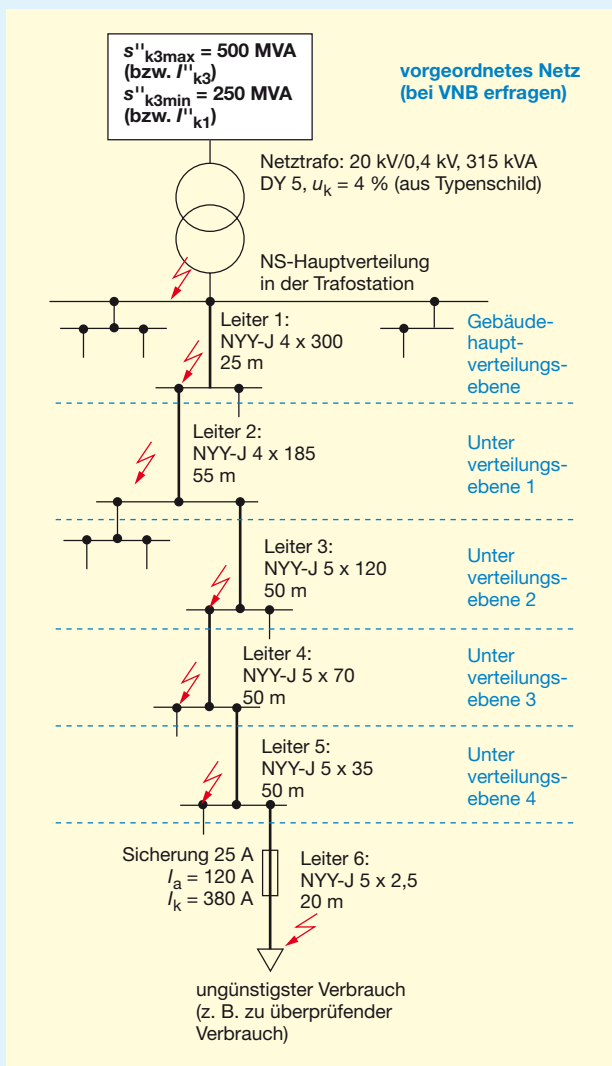
Anschließend können die Tabelle mit den Berechnungsergebnissen sowie das Diagramm (Bild 4) mit den kleinsten einpoligen Kurzschlussströmen (I_{k1min}) ausgedruckt werden. Vorteilhaft ist, dass neben den korrekten Zahlenwerten aus der Tabelle nun auch das Ruck-Zuck-Diagramm zur Verfügung steht. Im Gegensatz zur Excel-Tabelle werden in dem Diagramm die Berechnungsergebnisse sichtbar gemacht. Die kleinen Pfeile verdeutlichen den Stromverlauf wie im Übersichtsplan dargestellt. Die waagerechten Linien für den I_{k1min} an den interessierenden Stellen in der elektrischen Anlage berühren hier alle Quer-

schnitte, sodass relativ einfach ersichtlich wird, welche anderen Querschnitte für die Einhaltung des I_{k1min} eingesetzt werden könnten. Das verschafft Klarheit und einen guten Überblick über die Situation im Netz. Lotet man von den Schnittpunkten mit den Querschnittskennlinien auf die Achse mit der Entfernung (in Meter), erhält man die erforderlichen Grenzlängen.

Es kann Geld gespart werden, wenn erkannt wird, dass manche Querschnitte überdimensioniert sind und durch kostengünstigere Querschnitte ersetzt werden können, falls sie nicht aus anderen Gründen erforderlich sein sollten. Auf der anderen Seite wird aber auch ersichtlich, wenn eventuell Grenzlängen überschritten wurden und das sichere Abschalten der Stromversorgung im Fehlerfall nicht mehr gewährleistet ist. All diese Informationen sind in einer reinen Auflistung der Berechnungsergebnisse in der Excel-Tabelle nicht ersichtlich. Die Tabelle ist jedoch für die Dokumentation der rechnerisch genau ermittelten Kurz-

5 Übersichtsplan eines zu berechnenden Netzabschnitts

Nach Dateneingabe kann aus 14 Diagrammen das entsprechende für I_{k1min} ausgewählt werden



schlussströme und Netzverluste mit drei Stellen hinter dem Komma wichtig. Will man eine relativ genaue Abschätzung durchführen oder Reserven für ein Höchstmaß an Sicherheit und Wirtschaftlichkeit aufspüren, ist das entsprechende Ruck-Zuck-Diagramm mit den speziell geformten Kennlinien erforderlich. Die sich aus dieser Optimierung ergebenden Änderungen an Kabel-/Leitungslängen und/oder -querschnitten können dann in die Tabelle für eine endgültige Dokumentation der genauen Berechnungsergebnisse eingegeben werden.

5 Zusammenfassung

Die am häufigsten angewendete Schutzmaßnahme in elektrischen Anlagen mit Einsatz des TN-Systems ist der Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung im Fehlerfall. Um den rechnerischen Nachweis für die Wirksamkeit dieser Schutzmaßnahme zu erbringen, muss der minimale einpolige Kurzschlussstrom I_{k1min} bekannt sein. Mit Hilfe der vorgestellten Planungssoftware lässt sich dieser Strom relativ einfach und schnell sowohl aus Diagrammen als auch aus einer Tabelle ermitteln. Dieses Planungswerkzeug

hilft dabei, Reserven aufzudecken und die elektrische Sicherheit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren.

Die Ruck-Zuck-Diagramme haben den Vorzug, dass sie am Arbeitsplatz mit der Planungssoftware am Rechner erstellt werden können und dann auch vor Ort, z. B. auf Baustellen oder bei Kundenberatungen, für schnelle Abschätzungen usw. sofort verfügbar sind. In Grenzbereichen bietet sich eine genaue Berechnung mit der dokumentationsfähigen Ruck-Zuck-Planungssoftware an. Damit wird ein rationelles Planen und Dimensionieren vom ersten Abschätzen über den Variantenvergleich bis hin zu einem genauen Ergebnis möglich.

Literatur

- [1] DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag.
- [2] DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07 Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme.
- [3] Beese, H.-G.: Verfahren zum Ermitteln wichtiger Anlagendaten. Elektropraktiker, Berlin 61 (2007) 8; S. 694–696.
- [4] Hörmann, W.; Nienhaus, H.; Schröder, B.: Schnelleinstieg in die neue DIN VDE 410 (VDE 0100-410):2007-06; Berlin, VDE-Verlag 2007.

Berücksichtigt die neue DIN VDE 0701/0702!



- Das Buch vermittelt Ihnen die rechtlichen und technischen Festlegungen beim Prüfen. Sie erfahren welche Vorgaben bei der Umsetzung in der betrieblichen Praxis zu beachten sind.
- Enthalten sind Angaben zum ordnungsgemäßen Vorbereiten sowie normgerechten Durchführen der Prüfungen
- Die CD-ROM enthält u. a. Software-Demoversionen, Mustervorlagen und Produktabbildungen

TIPP: Abonnenten der Fachzeitschrift ELEKTROPRAKTIKER erhalten 10 % Rabatt auf Bücher der ELEKTROPRAKTIKER-BIBLIOTHEK (Bitte bei Bestellung Kunden-Nr. angeben.)

Bödeker, Prüfung ortsfester und ortsveränderlicher Geräte, 6., aktual. Aufl. 2008, ca. 260 S., inkl. CD-ROM, Broschur, Bestell-Nr. 3-341-01546-9, ca. € 29,80 Erscheint September 2008

shop huss HUSS-MEDIEN GmbH
 10400 Berlin
Direkt-Bestell-Service:
 Tel. 030 42151-325 · Fax 030 42151-468
 E-Mail: bestellung@huss-shop.de
 www.huss-shop.de

Jetzt bestellen!

Ich bestelle zur Lieferung gegen Rechnung zzgl. Versandkosten zu den mir bekannten Geschäftsbedingungen beim **huss-shop**, HUSS-MEDIEN GmbH, 10400 Berlin

KUNDEN-NR. Ich bin ep-Abonnent
 (siehe Adressaufkleber oder letzte Warenrechnung)

Expl.	Bestell-Nr.	Titel	€/Stück
	Bitte senden Sie mir sobald erschienen:		
	3-341-01546-9	Bödeker, Prüfung ortsfester und ortsveränderlicher Geräte	ca. 29,80

Firma/Name, Vorname

Branche/Position/z. Hd.

Telefon/Fax

E-Mail

Straße, Nr./Postfach

Land/PLZ/Ort

Datum/Unterschrift ep0807