

Software zur Auswahl von Niederspannungskabeln

Niederspannungskabel haben einen hohen Anteil an den Gesamtkosten der elektrischen Energieversorgung. Damit unnötige Kosten durch Überdimensionierungen der Querschnitte oder durch später erforderliche Parallelkabel vermieden werden, müssen neben den zu beachtenden Normen (Auswahlkriterien) die Versorgungsaufgabe (Abnehmerart), die Schutzeinrichtung (Schaltgeräte, Auslöser) und Selektivitätsanforderungen in die Kabelauswahl einbezogen werden. Vorgestellt wird eine Software, die diese Aufgaben leistet.

Auswahlkriterien und Einflussgrößen

Die Kabelauswahl muss nach folgenden Kriterien erfolgen:

- Strombelastbarkeit [1, 2, 3]
- Überlastschutz [4, 5, 6]
- Abschaltbedingung [7, 8]
- Thermische Kurzschlussfestigkeit [4, 5, 6]
- Spannungsfall im Dauerbetrieb
- Spannungsfall bei Motoranlauf. Hauptsächlich im Zusammenhang mit den Kriterien Abschaltbedingung und Spannungsfall sind die **Versorgungsaufgabe**

- Speisung eines Motors
- Speisung eines nichtmotorischen Abnehmers
- Speisung einer Unterverteilung (UV) oder Blackbox (BB), die **Art der Schutzeinrichtung**

- NH-Sicherung, Betriebsklasse gG/gL
- NH-Sicherung, Betriebsklasse aM
- Leistungsschalter (Nullpunktlöscher) mit ausgewähltem Auslöser
- strombegrenzender Leistungsschalter (SB) mit ausgewähltem Auslöser

und der vorgesehene **Anschlusspunkt** des Kabels an Haupt- oder Unterverteilung für die Kabelauswahl bestimmend.

Die Forderung, Selektivität zwischen den Abgangsschaltgeräten in Unterverteilungen oder Blackboxen und einem vorgeordneten Leistungsschalter (Nullpunktlöscher) zu gewährleisten, ergibt, dass für die Kabelauswahl Einstellströme und Verzögerungszeiten der Kurzschlussauslöser vorgegeben werden müssen.

Bei Kabeln zu Unterverteilungen oder Blackboxen kann der Überlastschutz entfallen, wenn

- alle Abgänge in einer Unterverteilung oder Blackbox überlastgeschützt sind und
- das Kabel für die Summe der

Nennströme der Schutzeinrichtungen in den Abgängen bemessen ist [4, 5].

Da die Bemessungsströme von NH-Sicherungen der Betriebsklasse gG/gL in Motorabzweigen von den Anlaufströmen bestimmt werden, verzichtet man auf den Überlastschutz durch NH-Sicherungen und setzt externe Überlastrelais ein.

Bleibt der Überlastschutz unberücksichtigt, so wirkt sich das i. A. querschnittsmindernd aus.

Kabelsoftware

Übersicht. Der Software liegt die Netzstruktur in Bild 1 zugrunde. Es kann jeweils ein Kabel zu einem der angegebenen Abnehmer entweder ausgehend von einer Hauptverteilung (HV) oder von einer Unterverteilung (UV) ausgewählt werden. Als Schutz-einrichtungen sind dabei die eingangs genannten Arten möglich.

Sind Kabel an einer Unterverteilung angeschlossen, wird zuvor das Kabel zwischen Haupt- und Unterverteilung bestimmt.

Für Kabel zwischen Transformator und Hauptverteilung genügt meist eine Bemessung nach der Strombelastbarkeit. Eine vollständige Auswahl dieser Kabel kann ebenfalls mit der Software vorgenommen werden, wenn man die Hauptverteilung an die Transformator-klemmen verlegt und das Kabel zu einer Unterverteilung auswählt.

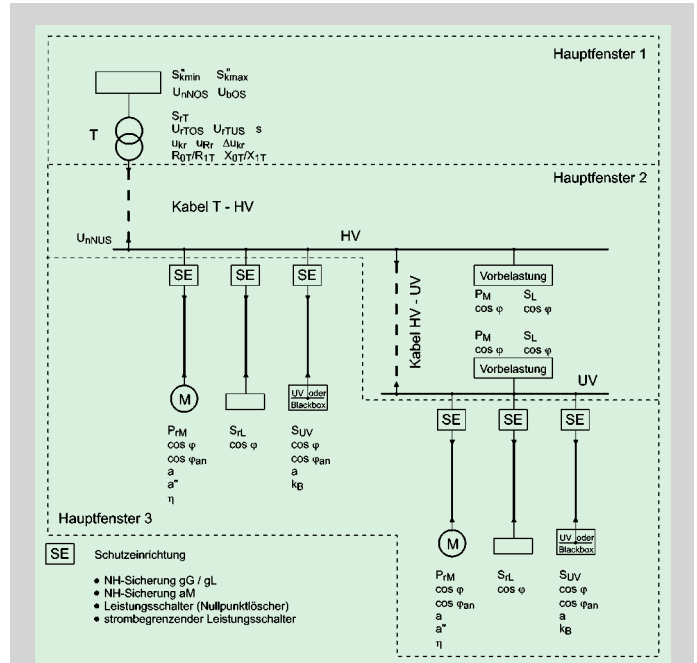
Eingabedaten. Die Daten werden in drei Hauptfenstern eingegeben:

Hauptfenster 1: Netz- und Transformator-daten (Bilder 1 und 2)

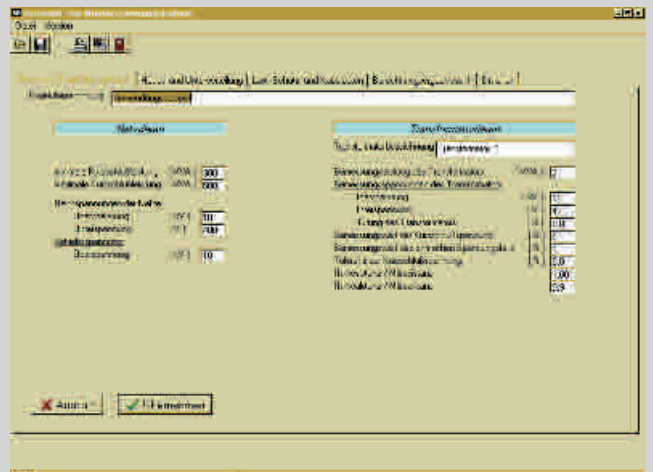
Hauptfenster 2: Haupt und Unterverteilung (Bilder 1 und 3)

Es sind die Daten der Kabelverbindungen zwischen

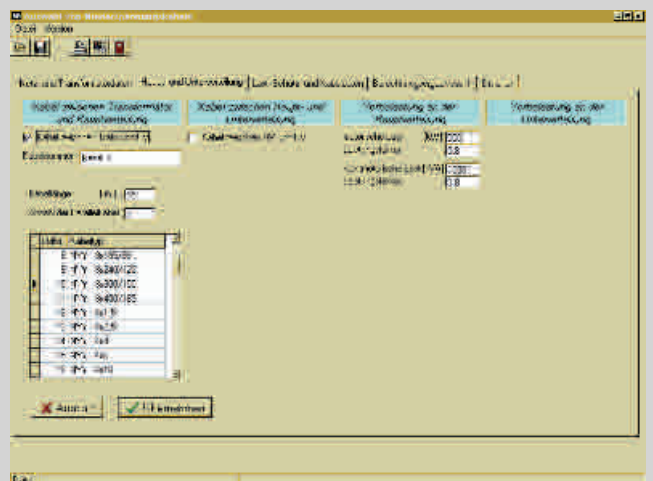
- Transformator und Hauptverteilung



1 Netzstruktur



2 Netz- und Transformator-daten



3 Haupt- und Unterverteilung

- Hauptverteilung und Unterverteilung

sowie die Vorbelastungen anzugeben. Wenn keine Unterverteilung vorhanden ist, verlangt die Software die betreffenden Daten nicht.

Wird keine Vorbelastung vorgegeben, dann ist die Ausgangsspannung der Spannungsberechnung gleich der sich durch das eingestellte Übersetzungsverhältnis ergebenden Spannung auf der Unterspannungsseite.

Hauptfenster 3 mit Last-, Schutz- und Kabeldaten (Bilder 1 und 4)

Nach der Wahl des Abnehmers und der Schutzeinrichtung werden die dazu benötigten Eingabedaten angezeigt.

Zu den aus Bild 1 ersichtlichen **Abnehmerdaten** ist Folgendes zu beachten:

- Bei Unterverteilungen oder Blackboxen ist der Anlaufstromfaktor a der Motoren auf die Gesamtleistung S_{UV} zu beziehen.
- Der subtransiente Anlaufstromfaktor a'' wird von der Software nur angefordert, wenn ein strombegrenzender Leistungsschalter vorhanden ist, weil der Auslöser bei subtransienten Anlaufströmen nicht angeregt werden darf.
- Bei Unterverteilungen ist der Strombegrenzungsfaktor k_B zur Ermittlung des Lichtbogenkurzschlussstromes [9] einzugeben, da dieser in Unterverteilungen kleiner als der minimale einpolige Kurzschlussstrom werden kann.

Unter **Schutzeinrichtungen** wird zuerst abgefragt, ob die betrachtete Schutzeinrichtung den Überlastschutz übernehmen soll. Wird

die Frage mit Nein beantwortet, darf der Bemessungsstrom einer NH-Sicherung der Betriebsklasse gG/gL oder der Einstellstrom des Überlastauslösers größer als der Betriebsstrom sein. NH-Sicherungen der Betriebsklasse aM sind ohnehin nicht für den Überlastschutz geeignet.

Sollen NH-Sicherungen zum Einsatz kommen, wird eine Auswahlliste angezeigt, in welcher die gewünschte NH-Sicherung zu markieren ist.

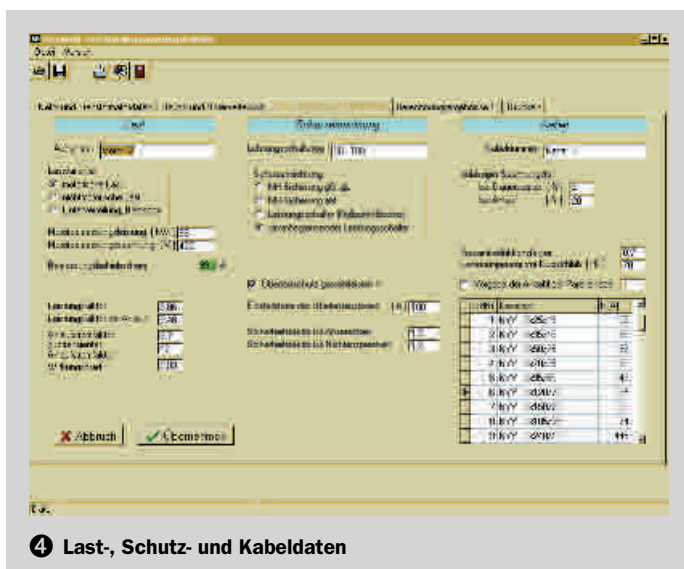
Die Eingabedaten für Leistungsschalter sind aus Bild 4 ersichtlich:

- Bei Nullpunktlöschern muss zusätzlich die Gesamtschaltzeit eingegeben werden.
- Der Einstellstrom des Überlastauslösers wird nur angefordert, wenn Überlastschutz vorgesehen ist.
- Der Sicherheitsfaktor für das Nichtansprechen des Kurzschlussauslösers ist erforderlich, wenn motorische Abnehmer vorhanden sind.

Für **Kabel** müssen folgende Eingaben gemacht werden:

- Markierung des zu untersuchenden Kabeltyps in der Kabeldatei
- zulässiger Spannungsfall bei Dauerbetrieb und Anlauf
- Gesamtreduktionsfaktor. Er ist das Produkt der Umrechnungsfaktoren für abweichende Betriebsbedingungen (z. B. abweichende Umgebungstemperatur, Häufung)
- Leitertemperatur vor Kurzschlussbeginn.

Die Kabeldatei enthält auch die Impedanzen von Spezialkabeln. Das sind Mehrleiterkabelsysteme aus Einleiterkabeln, die ein beliebiges Mehrfachdrehstromsystem mit einer unterschiedlichen An-



zahl von Neutralleitern bilden [10].

Die Anzahl der Parallelkabel wird entweder durch das Programm ermittelt, oder sie kann vorgegeben werden.

Berechnungsablauf und -ergebnisse

Bei Leistungsschaltern und strombegrenzenden Leistungsschaltern werden die von der Software aus den Motordaten berechneten Einstellströme des Kurzschlussauslösers in einem Fenster solange eingblendet, bis der Programm-benutzer den am Auslöser einstellbaren Strom eingeben hat. Weiterhin wird der von strombegrenzenden Leistungsschaltern auszuschaltende maximale dreipolige Kurzschlussstrom (Netz- und Motoranteil) in einem Fenster angezeigt und es wird die Eingabe des zugehörigen Ausschaltintegrals (gemäß Herstellerangabe) verlangt.

Die Ermittlung der Spannungsfälle beginnt mit der Berechnung der Ersatzspannung und den Spannungen an den Netzknotenpunkten bei Vorbelastung sowie unter Berücksichtigung der Stufung des Einspeisetransformators (eingestelltes Übersetzungsverhältnis). Nach Einfügen des auszuwählenden Kabels mit dem daran angeschlossenen Abnehmer werden die Spannungen bei Dauerbetrieb (und Anlauf, falls der Abnehmer ein Motor ist) berechnet. Die Kabellänge wird schrittweise erhöht, bis sich der vorgegebene zulässige Spannungsfall ergibt. Das Ergebnis ist die zulässige Kabellänge bei Dauerbetrieb (und zusätzlich bei Motoren die zulässige Kabellänge bei Anlauf).

Wenn eine positive Stufung des Transformatorübersetzungsverhältnisses erlaubt ist, vergrößern sich die zulässigen Kabellängen, d. h., es kann meist eine Querschnittsreduzierung erfolgen.

Die Kabelauswahl wird mit der Angabe der Kabelgrenzlänge beendet (Bild 5). Das ist die kleinste zulässige Kabellänge der drei Kriterien Abschaltbedingung, Spannungsfall bei Dauerbetrieb, Spannungsfall bei Anlauf.

In Bild 5 (Berechnungsergebnisse 1) werden die interessierenden Ergebnisse der fünf Auswahlkriterien übersichtlich dargestellt. Anschließend kann man eine zusätzliche Berechnung für eine gewählte Kabellänge veranlassen, um beispielsweise dafür den Spannungsfall zu erhalten. Die Ergeb-

nisse werden in einem weiteren Fenster (Berechnungsergebnisse 2, Bild 6) angezeigt. Es ist ersichtlich, dass eine komplette Kurzschlussstromberechnung erfolgt. Es wird auch der thermisch wirksame Kurzschlussstrom (berechnet aus Netz- und Motoranteil) angegeben, mit dem Abgangsleistungsschalter von Haupt- oder Unterverteilungen beansprucht werden.

Eingabedaten und Berechnungsergebnisse lassen sich vollständig oder auszugsweise ausdrucken. Das Programm ist so aufgebaut, dass Planer ohne spezielle Kenntnisse der Kabelauswahl in einem verständlichen Dialog in kurzer Zeit viele Varianten berechnen können, weil sich ein Wechsel der Eingabefenster und Verändern einer oder mehrerer Parameter unmittelbar vornehmen lässt. So ist es möglich, auf einfache und übersichtliche Weise die Wirkung der einzelnen Parameter schnell zu erfassen.

Anwendungsbeispiel

An eine 400-V-Hauptverteilung in Bild 7 sollen Motoren mit drei Bemessungsleistungen jeweils über NH-Sicherungen und strombegrenzende Leistungsschalter angeschlossen werden. Die eingesetzten Schaltgeräte und die Einstellströme der Auslöser an den strombegrenzenden Leistungsschaltern sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Die Eingabedaten enthalten die Bilder 2, 3 und 4, wobei in Bild 4 das Beispiel mit $P_{RM} = 55$ kW, SB 100 und NYY 3x120/70 gezeigt ist.

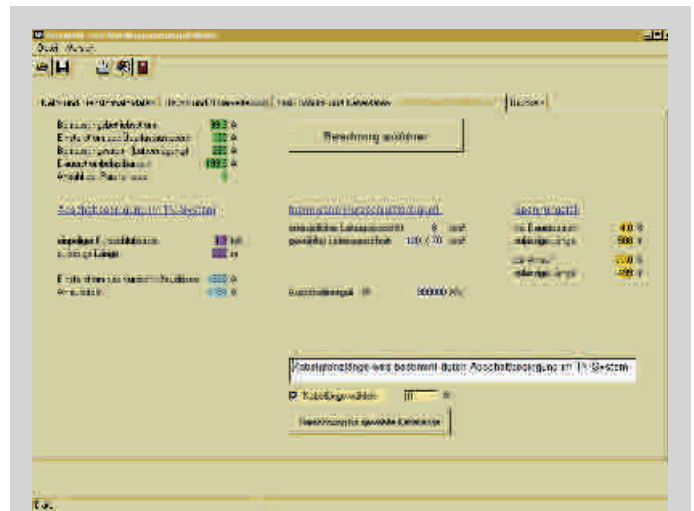
In Tafel 2 sind die Kabelgrenzlängen für mehrere Kabelquerschnitte gegenübergestellt. Die Längen gelten für das Kriterium

Abschaltbedingung. Für Spannungsfälle von $\Delta U = 4\%$ (Dauerbetrieb) und $\Delta U = 20\%$ (Anlauf) erhält man deutlich größere Kabellängen.

Aus Tafel 2 lassen sich folgende Aussagen entnehmen:

- Die Kabelgrenzlängen sind für NH-Sicherungen größer als für strombegrenzende Leistungsschalter, weil die 5-s-Abschaltströme der NH-Sicherungen i. A. kleiner als die Einstellströme der Kurzschlussauslöser sind.

- Bei kleinen Kabelquerschnitten (in der jeweiligen Belastungskategorie) können NH-Sicherungen keinen Überlastschutz übernehmen, da wegen der Motoranlaufströme die Bemessungsströme der NH-Sicherungen (Betriebsklasse gG) relativ groß gewählt werden müssen. NH-Sicherungen der Betriebsklasse aM gewährleisten ohnehin keinen Überlastschutz. In beiden Fällen sind wie üblich zusätzlich Überlastrelais einzusetzen.



5 Berechnungsergebnisse 1

Tafel 1 Eingesetzte Schaltgeräte und Einstellströme der Auslöser

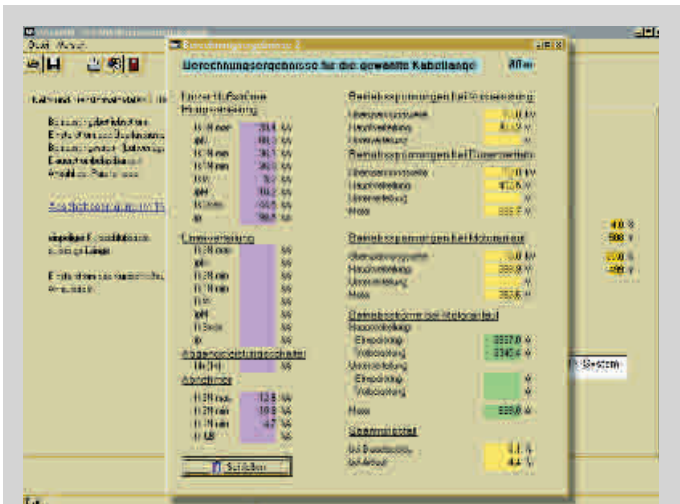
P_{RM} [kW]	I_{RM} [A]	Strombegrenzende Leistungsschalter		NH-Sicherung	
		Bezeichnung	$I_{EÜ}$ [A]		I_{EK} [A]
30	55	SB 63	63	800	NH 100 gG
55	99	SB 100	100	1500	NH 200 gG
110	196	SB 200 ¹⁾	200	2400	NH 315 gG/ NH 224 aM

$I_{EÜ}$ Einstellstrom des Überlastauslösers
 I_{EK} Einstellstrom des Kurzschlussauslösers
¹⁾ Strombegrenzender Leistungsschalter mit geringer Zeitverzögerung

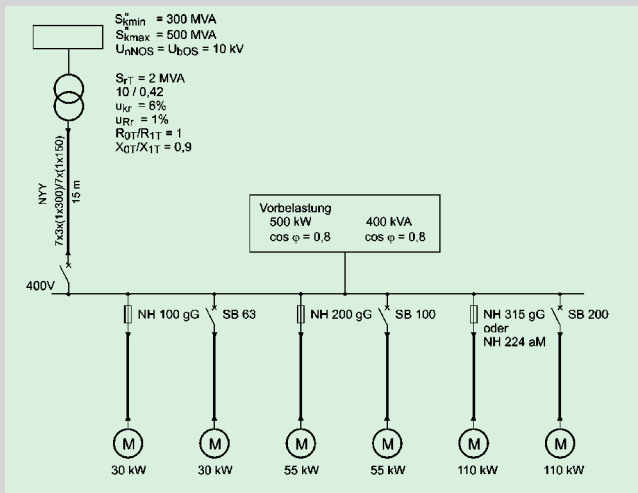
Tafel 2 Kabelgrenzlängen für Kabel zu Motoren nach Bild 7

Kabeltyp	Motorbemessungsleistung P_{RM} [kW]						
	30		55		110		
	NH 100 gG	SB 63	NH 200 gG	SB 100	NH 315 gG	NH 224 aM	SB 200
NYY 3x25/16	161 ¹⁾	93	–	–	–	–	–
NYY 3x35/16	181 ¹⁾	103	–	–	–	–	–
NYY 3x 50/25	269	154	2) ²⁾	81	–	–	–
NYY 3x70/35	373	214	171 ¹⁾	113	–	–	–
NYY 3x95/50	500	286	228 ¹⁾	151	–	–	–
NYY 3x120/70	671	384	306 ¹⁾	202	178 ¹⁾	219 ¹⁾	124
NYY 3x150/70	730	418	333	219	194 ¹⁾	238 ¹⁾	134
NYY 3x185/95	–	–	–	–	247 ¹⁾	305 ¹⁾	171

¹⁾ kein Überlastschutz von Motor und Kabel durch NH-Sicherung
²⁾ keine thermische Kurzschlussfestigkeit



6 Berechnungsergebnisse 2



7 Übersichtsschaltbild für Anwendungsbeispiel

Muss das eingesetzte Schaltgerät auch den Überlastschutz übernehmen, ergeben sich bei Einsatz von NH-Sicherungen gegenüber Leistungsschaltern meistens größere Leiterquerschnitte (wegen der besseren Anpassungsmöglichkeit der Überlastauslöser-Einstellströme an die Betriebsströme). Größere Leiterquerschnitte führen jedoch zu größeren zulässigen Kabellängen.

Entscheidende Ausgangsgröße für die Projektierung ist die benötigte Kabellänge. Damit wird eine Vorauswahl des Kabeltyps und der Schaltgeräteausrüstung der Starterkombination getroffen (z. B. an Hand von Tafel 2). Letztendlich entscheiden jedoch die Gesamtkosten, wobei die Kosten für Kabel, Starterkombination, Einbauplatz in der Schaltanlage, Montage und Wartung zu berücksichtigen sind. Beispiele für die Auswahl von Kabeln zwischen Haupt- und Unterverteilungen sind in [11] behandelt.

Werden Abnehmer von einer Unterverteilung, die als Zwischenverteilung errichtet wird, gespeist, so können Kabelkosten gegenüber der direkten, von der Hauptverteilung ausgehenden Einspeisung gespart werden. Ein Beispiel dazu ist in [12] beschrieben.

Zusammenfassung

Eine kostengünstige Kabelauswahl ist nur möglich, wenn zusätzlich zu den bekannten Auswahlkriterien die Parameter der Abnehmer, der Schaltgeräte mit ihren Schutzeinrichtungen und des Selektivschutzes einbezogen werden. Wegen der bestehenden Zusammenhänge zwischen Kabelauswahl und Abnehmern, Schutzeinrichtungen, Selektivschutz sowie auch Versorgungsstruktur [13] wird empfohlen, die Grundsatzplanung und Projektvorbereitung in eine Hand zu legen. Alle diesbezüglichen Parameter und Ein-

flussgrößen können mit der vorgestellten leistungsfähigen Software auf einfache und übersichtliche Weise berücksichtigt werden, weil im Dialog sehr schnell Variantenrechnungen möglich sind. Der Software, die bereits in mehreren Projekten erprobt worden ist, liegt eine Netzstruktur mit Haupt- und Unterverteilungen zugrunde. Es werden die Ein- und Ausgabedaten angegeben und einige Besonderheiten erläutert. Ein Anwendungsbeispiel verdeutlicht die Wirkung der Parameter auf die Kabelauswahl.

Literatur

- [1] *Heinhold, L.; Stubbe, R.*: Kabel und Leitungen für Starkstrom. Publicis 5. Auflage. Erlangen: MCD Verlag 1999.
- [2] DIN VDE 0276-603 / VDE 0276 Teil 603:1995-11 „Starkstromkabel; Energieverteilungskabel mit Nennspannungen U_0/U 0,6/1 kV“.
- [3] DIN VDE 0298-4 / VDE 0298 Teil 4:1998-11 „Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen; Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in Gebäuden und von flexiblen Leitungen“.
- [4] DIN VDE 0100-430 / VDE 0100 Teil 430:1991-11 „Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V; Schutzmaßnahmen; Schutz von Kabeln und Leitungen bei Überstrom“.
- [5] *Nienhaus, H.; Vogt, D.*: Schutz bei Überlast und Kurzschluß in elektrischen Anlagen. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag 1999.
- [6] *Kiefer, G.*: VDE 0100 und die Praxis. 7. Auflage. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag 1996.
- [7] DIN VDE 0100-410 / VDE 0100 Teil 410:1997-01 „Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V. Teil 4: Schutzmaßnahmen, Schutz gegen elektrischen Schlag“.
- [8] *Hörmann, W.; Nienhaus, H.; Schröder, B.*: Schnelleinstieg in die neue VDE 0100-410 „Schutz gegen elektrischen Schlag“. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag 1997.
- [9] *Stade, D.; Schau, H.*: Spezielle Kurzschlußverhältnisse in Drehstrom-Niederspannungsanlagen. ELEKTRIE 40(1986)10, S. 392-395.
- [10] *Pfeiffer, G.*: Impedanzen von Kabelmehrsystemen in Niederspannungsnetzen. ELEKTRIE 55 (2001), 10 - 12, S.488-491.
- [11] *Pfeiffer, G.; Pfeiffer, K.; Leucke, O.*: Auswahl von Niederspannungskabeln. Elektrizitätswirtschaft 101(2002)9, S. 58-65.
- [12] *Weiland, H.; Pfeiffer, G.*: Einsparpotentiale beim Eigenbedarf. Aufbau, Konzept und Erfahrungen beim Übergang von der Redundanz zur Einsträngigkeit. VGB-Konferenz „Leit-, Informations- und Elektrotechnik im Kraftwerk 2001“. Tagungsband 129.
- [13] *Pfeiffer, G.; Pfeiffer, K.*: Grundlegende Zusammenhänge zwischen Selektivschutztechnik, Anlagen-gestaltung, Störlichtbogenfestigkeit, Versorgungsstruktur und Abnehmerleistungen. VDE-Fachtagung für Niederspannungs-Schaltanlagen- und -Gerätetechnik. Mai 1998, Mannheim.

K. Pfeiffer