

# Kurzschluss-Schutz in Niederspannungsanlagen

K.-H. Kny, Magdeburg

**Neben dem grundsätzlichen Vorgehen beim Nachweis der Kurzschlussfestigkeit und der Selektivität wird im Beitrag auf diesbezügliche Besonderheiten bei sehr hohen und geringen Kurzschlussströmen bzw. sehr kurzen (Millisekundenbereich) und relativ langen Ausschaltzeiten eingegangen.**

## 1 Ermittlung der notwendigen Kurzschlussströme

Durch das Auftreten von Kurzschlussströmen treten hohe mechanische und thermische Beanspruchungen der elektrischen Betriebsmittel und Anlagen auf. Die möglichen Schäden sind dabei sowohl von der Höhe als auch von der zeitlichen Dauer des Kurzschlussstroms abhängig.

Eine entsprechend dimensionierte elektrische Anlage und eine darauf abgestimmte, schnelle Erfassung und sichere, selektive Ausschaltung des Kurzschlussstroms durch Schutzeinrichtungen ist die Aufgabe des Kurzschluss-Schutzes. Dazu ist die Kenntnis der größten und kleinsten Kurzschlussströme in der zu überprüfenden Anlage bzw. des Netzes erforderlich.

Zum Nachweis der Gewährleistung der Kurzschlussfestigkeit und Selektivität ist die Kenntnis der Kurzschlussgrößen:

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom  $I''_k$ ,
- Stoß-Kurzschlussstrom  $i_p$ ,
- Ausschaltwechselstrom  $I''_a$ ,
- Dauer-Kurzschlussstrom  $I_{k3}$ , und
- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom  $I_{th}$

erforderlich. Zu beachten ist, dass die Kurzschlussgrößen als Effektivwerte charakterisiert werden, mit Ausnahme des Stoß-Kurzschlussstroms, der den maximalen Spitzenwert nach dem Eintritt des Kurzschlusses darstellt (Bild 1).

Die Kurzschlussströme (a bis d) werden nach den Berechnungsvorschriften der Normen DIN VDE 0102 [1] und (e) nach DIN VDE 0103 [2] ermittelt und sind formelmäßig in Tafel 1 zusammengefasst.

Die Berechnung der Kurzschlussströme in Niederspannungsanlagen einschließlich eventueller Motor-Kurzschlussanteile ist in [3] ausführlich dargestellt.

Autor

Dozent Dipl.-Ing. Karl-Heinz Kny, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH).

Bisher wurden die Kurzschlussfälle nach DIN VDE 0102 [1] in generatorfern und generatornah unterschieden.

Bei generatornahen Kurzschlussströmen werden die sich durch Ausgleichsvorgänge im Generator oder Motor bedingten zusätzlichen Wechselstromanteile bei der Höhe des Kurzschlussstroms berücksichtigt. Der exponentiell abklingende Gleichstromteil (-glied) wird immer als möglicher Höchstwert einbezogen. Es bestimmt insbesondere die Höhe des Stoß-Kurzschlussstroms und beeinflusst den thermisch gleichwertigen Kurzschlussstrom.

In Niederspannungsnetzen wird bei abschließlicher Netzeinspeisung (generatorferner Kurzschluss) die Berechnung ohne zusätzliche Wechselstromanteile vorgenommen. Damit vereinfacht sich die Ermittlung der Kurzschlussströme, weil dadurch gilt:

$$I''_k = I_k = I_a \quad (1)$$

Diese Gleichsetzung kann ohne weitere Prüfung mit dem thermisch gleichwertigen Kurzschlussstrom erweitert werden, wenn die Ausschaltzeit  $T_a > 1$  s und/oder der Stoßfaktor  $\kappa < 1,4$  beträgt.

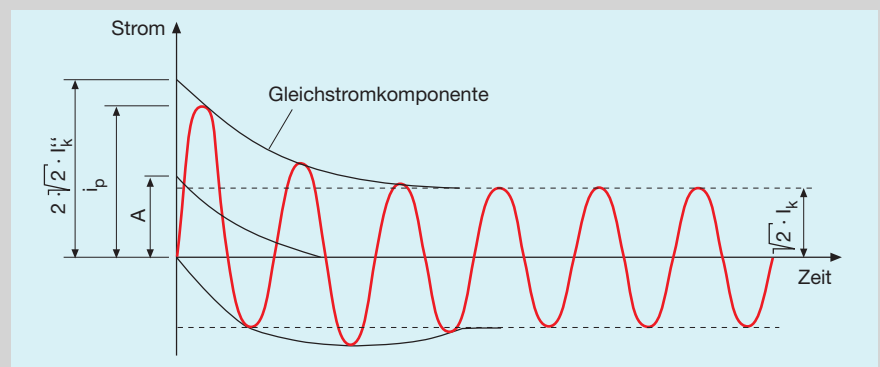
Dass für den Nachweis der Kurzschlussfestigkeit die maximal zu erwartenden Kurzschlussströme benötigt werden, gilt als selbstverständlich, aber für den Nachweis der thermischen Kurzschlussfestigkeit von Kabeln und Leitungen ist auch der kleinste zu erwartende Anfangs-Kurzschlussstrom von Bedeutung. Er bestimmt die Kurzdauer und damit auch die Erwärmung von Kabeln und Leitungen, die begrenzt ist beim Erreichen der Kurzschlussendtemperatur oder bei maximal fünf Sekunden.

Für die Untersuchungen zum Nachweis der Selektivität ist die Kenntnis sowohl der kleinsten als auch der größten Kurzschlussströme bei angenommenen Fehlern an den Einbaustellen der Kurzschlusseinrichtungen nötig.

Bei der Berechnung der Kurzschlussströme sind die Besonderheiten für die kleinsten und größten Werte zu beachten. Insbesondere die Berechnung kleinster Kurzschlussströme mit der Berücksichtigung des Schaltzustands des Netzes bzw. der elektrischen Anlage und erhöhter Leitertemperaturen sowie eventueller Zusatzimpedanzen erfordert einen höheren Aufwand.

Tafel 1 Formeln zur Berechnung der Kurzschlussströme

	dreipolig	Kurzschlussstrom zweipolig	einpolig
Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$	$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3}$	$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{2 \cdot Z_k + Z_{k(0)}}$
Stoß-Kurzschlussstrom	$i_{p3} = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k3}$	–	$i_{p1} = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_{k1}$
Ausschaltwechselstrom	$I''_{a3} = \mu \cdot I''_{k3}$	–	$I''_{a1} = \mu \cdot I''_{k1}$
Dauer-Kurzschlussstrom	$I_{k3} = \lambda \cdot I_{rG}$	–	Herstellerangabe (z. B. $I_{k1} > 3 \cdot I_{rG}$ )
Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom	$I_{th3} = I''_{k3} \cdot \sqrt{m+n}$	–	$I_{th1} = I''_{k1} \cdot \sqrt{m+n}$



1 Verlauf des Kurzschlussstroms

## 2 Nachweis der Kurzschlussfestigkeit

### 2.1 Mechanische Kurzschlussfestigkeit

Die größte Kraftwirkung in elektrischen Anlagen tritt beim ersten Spitzenwert des Kurzschlussstroms nach dem Eintritt des Fehlers auf. Dabei wird der ungünstigste Fall des zeitlichen Kurzschlusseintritts – der Spannungsnulldurchgang – angenommen. Dann erfolgt die maximale Anhebung des Kurzschlussstroms durch die sogenannte Gleichstromkomponente. Neben der geometrischen Anordnung der Leitungsanordnung geht dabei der Kurzschlussstrom quadratisch in die zu erwartende Kraftwirkung ein. Für Stromschieneanordnungen können solche Kraftwirkungen berechnet und die mechanische Kurzschlussfestigkeit der Leiterschienen und deren Befestigungselemente überprüft werden [2].

Allgemein wird aber durch die Hersteller von Betriebsmitteln und Anlagen die Bemessungs-Stoßstromfestigkeit  $I_{pr}$  angegeben. Dieser Festigkeitswert darf vom zu erwartenden Stoß-Kurzschlussstrom  $i_p$  nicht überschritten werden:  $I_{pr} \geq i_p$ .

Der Stoß-Kurzschlussstrom wird bei der Ausschaltung durch strombegrenzende Schutzrichtungen (Schmelzsicherungen, strombegrenzende Leistungsschalter) nicht erreicht. Vor dem Spitzenwert, beim sogenannten Durchlassstrom, wird der Kurzschlussstrom unterbrochen und die mechanische Beanspruchung dadurch geringer – bei hohem Kurzschlussstrom sogar erheblich (Bild 2).

Den Durchlassstrom  $i_d$  einer Schmelzsicherung erhält man aus dem Strombegrenzungsdiagramm [3], Bild 4.5.

Der Nachweis erfolgt mit der Bedingung:  $I_{pr} \geq i_d$ .

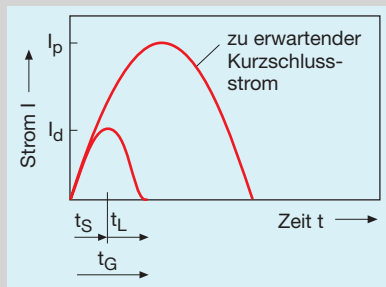
### 2.2 Thermische Kurzschlussfestigkeit

Als Ausgangsgröße beim Nachweis der thermischen Kurzschlussfestigkeit wird der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom herangezogen, der als Effektivwert gekennzeichnet ist. Die Vorgehensweise muss bezüglich der Höhe des Kurzschlussstroms unterschieden werden.

Bei großen Kurzschlussströmen und dadurch bedingten sehr kurzen Ausschaltzeiten ist der sinusförmige Charakter nicht mehr gegeben, wenn der Strom schon vor dem Erreichen des ersten Scheitelwerts oder vor dem ersten Halbwellenende unterbrochen wird. Die Beschreibung einer Wechselgröße als Effektivwert für Ausschaltzeiten kleiner 0,01 s wäre falsch.

#### 2.2.1 Kurzschlussdauer $\geq 0,01$ s

Nachweis mittels des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms  $I_{th}$ : Unter dem Einfluss der Abklingvorgänge nach dem Kurzschlusseintritt wird der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom nach



2 Strombegrenzender Ausschaltvorgang  $t_s$  Schmelzzeit;  $t_l$  Löschzeit (Lichtbogendauer);  $t_g$  Gesamtausschaltzeit;  $i_d$  Durchlassstrom;  $i_p$  Stoß-Kurzschlussstrom

DIN VDE 0103 mit dem Anfangs-Kurzschlusswechselstrom  $I_k^n$  und den Faktoren  $m$  und  $n$  [2], Bild 2a/b, nach Formel (2) ermittelt, die die zusätzliche Wärmewirkung durch die Gleich- und Wechselstromkomponenten berücksichtigen.

$$I_{th} = I_k^n \cdot \sqrt{m+n} \quad (2)$$

Der von den Herstellern angegebenen Bemessungs-Kurzzeitstrom  $I_{thr}$ , mit der dazugehörigen Bemessungskurzzeit (meist 1 s) wird auf die tatsächliche Kurzschlussdauer  $T_k$  umgerechnet und muss dann nach (3) immer gleich/größer als der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom  $I_{th}$  sein.

$$I_{thr} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \geq I_{th} \quad (3)$$

#### 2.2.2 Kurzschlussdauer $< 0,01$ s

Nachweis mittels Stromwärmewert  $I^2T$ :

Thermische Kurzschlussfestigkeit ist gegeben, wenn der vom Hersteller für das Betriebsmittel angegebene zulässige Stromwärmewert  $(I^2T)_{Herst.}$ , z. B. [3], Tafel 5.6, gleich/größer dem maximalen Durchlasswert der Schutzrichtung  $(I^2T)_{Schutz}$  ist.

$$(I^2T)_{Herst.} \geq (I^2T)_{Schutz}$$

Stromwärme-Durchlasswerte werden von den Herstellern der Kurzschluss-Schutzrichtungen als Bild oder in Tabellenform zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 3). Diese Methode der Überprüfung ist auch für höhere Ausschaltzeiten als 0,01 s anwendbar.

### 2.3 Mindestkurzschlussstrom/max. zulässige Leitungslänge

Bei relativ kleinen Kurzschlussströmen kann die Ausschaltung durch eine falsch ausgewählte oder eingestellte Schutzrichtung nach dem Erreichen der Kurzschlussendtemperatur oder erst nach 5 s erfolgen. Beides ist nicht zulässig. Deshalb muss auch Kurzschlussfestigkeit durch das Fließen eines Mindestkurzschlussstroms gesichert sein. Insbesondere bei großen Leitungs- und Kabellängen sowie geringen Leiterquerschnitten wird der Kurzschlussstrom erheblich verringert.

Um den Nachweis zu vereinfachen, ist in DIN VDE 0100 Beiblatt 5 [4] die maximal

zulässige Leitungslänge in Abhängigkeit vom Kabel-/Leitungstyp und -querschnitt, der Kurzschluss-Schutzeinrichtung und deren Nennstrom sowie der ihr vorgelagerten Schleifenimpedanz angegeben.

Rechnerisch kann mit Formel (4) die maximal zulässige Leitungslänge mit der Nennspannung  $U_n$ , der Schleifenimpedanz vor der Schutzrichtung  $Z_V$ , dem Impedanzbelag  $Z_L'$  [3], Tafeln 3.5, 3.6, und des von der eingesetzten Schutzrichtung abhängige erforderliche Mindestkurzschlussstrom  $I_{kerf}$  [3], Tafeln 5.10 bis 5.15, mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden:

$$I_{max} = \frac{0,95 \cdot U_n \cdot Z_V}{\sqrt{3} \cdot I_{kerf} \cdot 2 \cdot Z_L'} \quad (4)$$

### 2.4 Ausreichendes Schaltvermögen von Kurzschluss-Schutzeinrichtungen

Kurzschluss-Schutzeinrichtungen (Schmelzsicherungen, LS-Schalter, Leistungsschalter, Motorschutzschalter) müssen den Kurzschlussstrom ausschalten, ohne dabei selbst Schaden zu nehmen. Von den Herstellern wird ein Bemessungs-Ausschaltvermögen als Stromgröße  $I_{ar}$  angegeben, das vom Ausschaltwechselstrom  $I_a$  nicht überschritten werden darf:  $I_a \leq I_{ar}$ .

Die Berechnungsformel für den Ausschaltwechselstrom  $I_a$  mit dem Abklingfaktor  $\mu$  ist in Tafel 1 angegeben. Der vergleichsweise zum Netzkurzschluss geringere Ausschaltwechselstrom von Asynchronmotoren wird zusätzlich mit dem Faktor  $q$  [1], Bild 25, berechnet:

$$I_a = \mu \cdot q \cdot I_k^n \quad (5)$$

In Niederspannungsnetzen ohne unmittelbare Generatoreinspeisung und angeschlossenen Asynchronmotoren kann der Ausschaltwechselstrom dem Anfangs-Kurzschlusswechselstrom bzw. Dauer-Kurzschlussstrom gleichgesetzt werden (1).

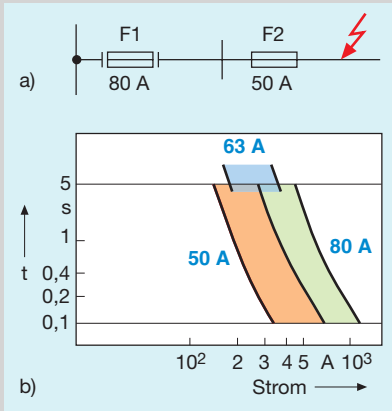
Für Schmelzsicherungen muss das Mindest-Bemessungsausschaltvermögen 50 kA betragen.

LS-Schalter werden mit den relativ geringen Werten von 3, 4,5, 6 und 10 kA und sogenannte selektive Hauptleitungs-Schutzschalter (SLS) oder Hauptsicherungs-Automaten bis 25 kA angeboten.

Für höhere erforderliche Ausschaltleistungen kommt bei Nutzung der Vorteile von Schaltern gegenüber Schmelzsicherungen nur der Einsatz von Leistungsschaltern in Frage.

## 3 Nachweis der Selektivität

Ziel der selektiven Ausschaltung in elektrischen Netzen und Anlagen ist es, nur die der Fehlerstelle nachgeordneten Netzteile und Abnehmer vom speisenden Netz zu trennen.



3 Selektivität zwischen Leitungsschutzsicherungen  
a) Schaltbild; b) Zeit-Strom-Diagramm

Die Kurzschluss-Schutzeinrichtungen müssen zur Sicherstellung von Selektivität entsprechend ausgewählt, ausgelegt und die Auslöseströme eingestellt werden. Dazu sind Überlegungen erforderlich, wie bei den verschiedenen Kombinationen von hintereinander geschalteten Schutzeinrichtungen die unterschiedlichen Überlast- und Kurzschlussströme zur Ausschaltung führen. Neben den zu erwartenden kleinsten und größten Kurzschlussströmen ist das Ausschaltverhalten der einzelnen Schutzeinrichtungen von Interesse. Der Nachweis von Selektivität muss bei kleinen und großen Kurzschlussströmen erfolgen.

Ist die Kurzschluss- bzw. die Ausschaltzeit größer als 0,1 s, dann werden die Zeit-Strom-Kennlinien herangezogen. Der Vergleich der Kennlinien im Diagramm darf keine Überschneidung der Toleranzbänder im in Frage kommenden Kurzschlussstrom-Bereich ergeben (Bild 3).

Bei Kurzschlusszeiten kleiner als 0,1 s ist der Kurzschlussstromverlauf durch die Überlagerung von Wechsel- und Gleichstromanteilen nicht symmetrisch zur Zeitachse. Deshalb muss die Überprüfung durch den Vergleich von Stromwärmewerten, die von den Herstellern der Schutzeinrichtungen angegeben werden, durchgeführt werden.

Für Schmelzsicherungen sind die minimalen Schmelz- und maximalen Ausschaltwärmewerte in Tafel 2 aufgelistet.

Sind Schmelzsicherungen in Reihe angeordnet, dann muss der Schmelzwärmewert  $I^2T_{min}$  der vorgeordneten größer sein als der Ausschaltwärmewert  $I^2T_{max}$  der nachfolgenden:

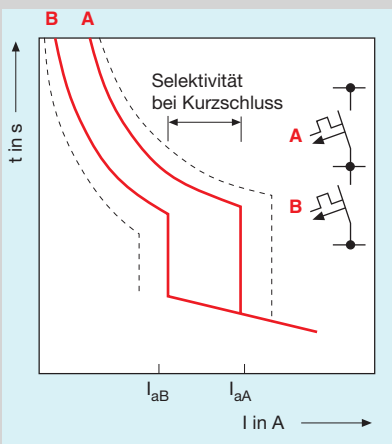
$$I^2T_{min} > I^2T_{max}$$

Dann ist garantiert, dass der Faden der vorgeordneten Sicherung die Schmelztemperatur nicht erreicht und seine Schmelzcharakteristik unverändert bleibt.

Nach DIN VDE 0636 [5] ist für baugleiche Schmelzsicherungen Selektivität in jedem Fall gewährleistet, wenn sich die Bemessungsstromstärken maximal um den Faktor 1,6 unterscheiden.

Sind LS-Schalter und Leistungsschalter mit den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten hintereinander angeordnet, muss bei Stromselektivität der größte Kurzschlussstrom an der Einbaustelle des nachgeordneten Schalters kleiner sein als der Ansprechstrom des vorgeordneten Schalters (Bild 4).

Bei hohen Kurzschlussströmen, wo im Zeit-Strom-Diagramm beide Kennlinien im Bereich des Kurzschlussauslösers liegen, ist der Nachweis von Selektivität mittels der Durchlassströme möglich. Für LS-Schalter gelten die Werte nach Tafel 3 und für Leistungsschalter werden von

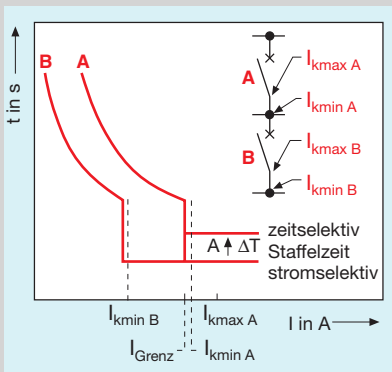


4 Selektivität zwischen LS-Schaltern

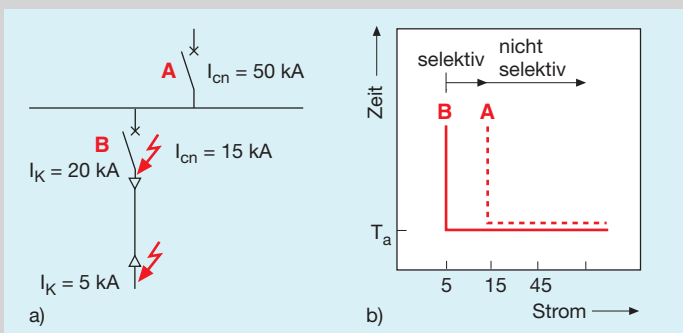
Tafel 2 Schmelz- und Ausschalt- $I^2T$ -Werte für gG- und gM-Sicherungseinsätze [5]

$I_n$ si A	$I^2T_{min}$ <sup>1)</sup> A <sup>2</sup> s	$I^2T_{max}$ <sup>2)</sup> A <sup>2</sup> s
2	0,67	16,4
4	4,9	67,6
6	16,4	193,6
8	40,0	390
10	67,6	640
12	130	820
16	291	1 210
20	640	2 500
25	1 210	4 000
32	2 500	5 750
40	4 000	9 000
50	5 750	13 700
63	9 000	21 200
80	13 700	36 000
100	21 200	64 000
125	36 000	104 000
160	64 000	185 000
200	104 000	302 000
250	185 000	557 000
315	302 000	900 000
400	557 000	1 600 000
500	900 000	2 700 000
630	1 600 000	5 470 000
800	2 700 000	10 000 000
1000	5 470 000	17 400 000
1250	10 000 000	33 100 000

1) Schmelzwert; 2) Ausschaltwert



5 Selektivität zwischen Leistungsschaltern



6 Back-up-Schutz und Selektivität  
a) Schaltbild; b) Zeit/Strom-Diagramm

Tafel 3 Zulässige Durchlass- $I^2T$ -Werte für LS-Schalter bis 16 A [6]

Bemessungs-schaltvermögen in A	Energiebegrenzungsklasse			
	2		3	
	$(I^2T)_{max}$ in A <sup>2</sup> s			
	Charakteristik B	Charakteristik C	Charakteristik B	Charakteristik C
3 000	31 000	37 000	15 000	18 000
4 500	60 000	75 000	25 000	30 000
6 000	100 000	120 000	35 000	42 000
10 000	240 000	290 000	70 000	84 000

Herstellern entsprechende Kurven angeben.

Mit Leistungsschaltern ist die sogenannte Zeitspektivität möglich und sinnvoll, bei der die Einstellung der Ausschaltzeiten (Staffelung) so erfolgt, dass der vorgeordnete Schalter eine größere Verzögerungszeit hat als der nachgeordnete (Bild 6).

#### 4 Back-up-Schutz

Beherrscht eine Schutzeinrichtung den an der Einbaustelle auftretenden Kurzschlussstrom beim Ausschalten nicht, so kann eine vorgeschaltete Schutzeinrichtung den kurzschlussfesten Ausschaltvorgang übernehmen. Dazu sind zwei hintereinander geschaltete Überstrom-Schutzeinrichtungen so aufeinander abzustimmen, dass die vorgeschaltete Schutzeinrichtung A den Kurzschluss-Schutz übernimmt, bevor das Schaltvermögen der nachgeordneten Schutzeinrichtung B überschritten wird.

Im Bild 6 sind zwei unverzögerte Leistungsschalter in Reihe angeordnet. Der Leistungsschalter B wird auf einen Ansprechwert von 5 kA (minimaler Kurzschlussstrom) eingestellt. Bei einem Kurzschluss an der Einbaustelle tritt ein Kurz-

schlussstrom von 20 kA auf. Da der Leistungsschalter B nur ein Ausschaltvermögen  $I_{cn} = 15$  kA besitzt, beherrscht der Leistungsschalter B mögliche Kurzschlussströme zwischen 15 und 20 kA nicht mehr. Der vorgeordnete Leistungsschalter A muss deshalb auf einen Ansprechstrom von 15 kA eingestellt sein, damit er den Ausschaltvorgang übernimmt, auch wenn der Fehler nicht in seinem Schutzbereich liegt. Beide Schutzeinrichtungen lösen gleichzeitig und damit unselektiv aus.

Die Möglichkeiten und Grenzen des Back-up-Schutzes sind oft nur mit den Angaben der Hersteller zu realisieren bzw. auszu-schöpfen.

Durch das hohe Ausschaltvermögen von Schmelzsicherungen von mindestens 50 kA bieten sie sich als Vorsicherung von Leistungsschutzschaltern an, die ja nur ein geringes Ausschaltvermögen bis 10 kA haben.

#### 5 Abschließender Hinweis

Dieser Beitrag soll und kann nur einen Überblick geben über die zu beachtenden und durchzuführenden Maßnahmen bei der Planung, Errichtung und Prüfung des

Kurzschlusschutzes in Niederspannungsanlagen. Eine ausführliche Darlegung mit vielen praktischen Beispielen sowie ausdrückbaren Arbeitsblättern und Tafeln bietet [3].

#### Literatur

- [1] DIN VDE 0102 Berechnung von Kurzschlussströmen in Drehstromnetzen.
- [2] DIN VDE 0103 Kurzschlussströme; Berechnung der Wirkung; Teil 1: Begriffe und Berechnungsverfahren.
- [3] Kny, K.-H.: Kurzschluss-Schutz in Gebäuden. Berlin: Verlag Technik.
- [4] DIN VDE 0100 Beiblatt 5 Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannung bis 1000V; Zulässige Längen von Kabeln und Leitungen unter Berücksichtigung des Schutzes bei Kurzschluss und des Spannungsfalls.
- [5] DIN VDE 0636 Niederspannungssicherungen.
- [6] EN 60898 DIN VDE 0641 Teil 11 Leitungsschutzschalter für den Haushalt und ähnliche Anwendungen.

#### Hinweis

Ein einfaches Berechnungsprogramm mit Excel, zum Beispiel 3.14 in [3], wird auf Wunsch als E-Mail zugesandt. Adresse: [www.Karl-Heinz.Kny@elektrotechnik.hs-magdeburg.de](mailto:www.Karl-Heinz.Kny@elektrotechnik.hs-magdeburg.de)