Kabeldimensionierung

1. Einleitung

Kabel und Zubehöre müssen die Typenprüfungen und Langzeitprüfungen nach den nationalen und internationalen Normen vor der Vermarktung erfolgreich bestanden haben:

– Niederspannungsnetzkabel nach HD 603 S1, Part 7, Section E, und Part 8, Section B

– Mittelspannungsnetzkabel nach HD 620 S2, Parts 10, 11, Section N

Brugg Cables besitzt langjährige Erfahrungen in der Materialtechnik, den elektrischen und mechanischen Prüfungen bei Produkteentwicklung, Produktion, Verlegung, Montage und Inbetriebsetzung. Die Qualitätssicherung gemäss ISO 9001 und 14001 garantiert zudem zuverlässige Entwicklungs- und Produktionsverfahren. Dies alles bietet Gewähr, dass die Kabelsysteme während ihrer Lebensdauer von 30 bis 40 Jahren einwandfrei elektrische Leistung von der Erzeugung zu den Stromkunden hin übertragen.

Brugg Cables stellt Kabel und Zubehöre von 1 kV bis 500 kV her; in diesem Katalogteil für Nieder- und Mittelspannung wird nur auf Spannungen bis 30 kV eingetreten. Für ausserordentliche Fälle stehen unsere Ingenieure mit ihren zugeschnittenen Berechnungsprogrammen zur Verfügung. Bei Vorgabe der Verlegeart, Übertragungsleistung, Spannung, Kurzschlussstrom, Schirmbehandlung und Art der Installation lassen sich die Strombelastungen, Spannungsabfälle, Verluste u. a. m. in genügender Genauigkeit berechnen.

1.1 Lebensdauer und Zuverlässigkeit

Unter der Lebensdauer einer Kabelanlage wird deren Betriebsdauer verstanden. Die Komponenten sind auf die gesamte Betriebsdauer ausgelegt. Die Lebensdauer kann von negativen Faktoren beeinflusst werden, wie transienten Überspannungen, Kurzschlüssen, Übertemperaturen, mechanischen Belastungen wie Bodensenkungen, Wasser und Feuchte, chemischen Einflüssen und auch Nagetieren. Die Sicherheit einer Kabelanlage wird durch das Einhalten der zulässigen thermischen Belastbarkeit, der Kurzzeit- und der Kurzschlussströme sowie der Betriebsspannung gewährleistet.

1.2 Verluste und Wirtschaftlichkeit

Die Verluste und die Wirtschaftlichkeit einer Kabelanlage sind eng miteinander verknüpft und lassen sich kaum voneinander trennen. Kabel dürfen durchaus an ihren Leistungsgrenzen betrieben werden, dazu sind sie entwickelt und produziert worden. Die PEN-Leiter der Niederspannungsnetzkabel werden beidseitig geerdet, einerseits zur Erhöhung der Sicherheit und andererseits zur Gewährleistung der Nullung in genullten Netzen. Die Schirme von verseilten Mittelspannungskabeln bis 240 mm² oder Einleiter-MS-Kabeln des gleichen Querschnittbereichs werden in gebündelter Form, mit Bezug auf die Berührungssicherheit, bevorzugt beidseitig geerdet. Einleiterkabel mit Abstand zwischen den Phasen und alle Kabel mit Querschnitten ab 300 mm² werden zur Reduktion der Schirmverluste mit Vorteil einseitig geerdet und am offenen Ende mit Mantelüberspannungsableitern geschützt. Damit lassen sich positive ökonomische und ökologische Gesichtspunkte erzielen. Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sollen ganz allgemein nicht nur die Kabel-, sondern auch die gesamten Anlagekosten mit dem Trasseebau einbezogen werden.

2. Dimensionierung von Nieder- und Mittelspannungsanlagen

Die Strombelastungsberechnungen werden für beide Spannungsebenen nach IEC 60287 für die verschiedenen Verlegungsarten ausgeführt. Für die Dimensionierung werden die nachstehenden Vorgaben benötigt:

– Nenn- und max. Betriebsspannung
– Stossspannungshöhe
– Übertragungsleistung oder Nennstrom
– Kurzschlussleistung oder Kurzschlussstrom mit Dauerangabe
– Betriebsart: Dauerbetrieb oder Teillastbetrieb
– Verlegeart
– Umgebungstemperaturen
– Spez. thermischer Widerstand des Bodens

2.1 Leiterwiderstände, Kapazitäten, Induktivitäten

Die Formeln und Tabellenwerte können den Produktdatenblättern entnommen werden. Die Berechnungsformeln sind in Ziffer 4 und den “Formeln” aufgeführt.

2.2 Verluste in Kabeln

In Nieder- und Mittelspannungskabeln fallen praktisch nur die ohmschen Leiterverluste und die Schirmverluste ins Gewicht. Die dielektrischen Verluste sind im Verhältnis zu den ohmschen Verlusten sehr klein. Die ohmschen Leiterverluste sind material- und temperaturabhängig. Für die Berechnung von $P = I^2 \cdot R$ muss der für 20 °C angegebene Leiterwiderstand auf die Betriebstemperatur T des Kabels umgerechnet werden:

$R_T = R_{20} \cdot \{1 + \alpha\,(T - 20\,°C)\}$
α = 0.00393 für Kupfer
= 0.00403 für Aluminium

2.3 Feldstärkenverlauf und Ladestrom

Die Isolation der Kabel kann als homogener Zylinderkondensator betrachtet werden. Das Dielektrikum eines Kabels hat einen Feldstärkenverlauf gemäss Bild 1 und gehorcht der Formel:

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

$$E_x = \frac{U_0}{r_x \cdot ln\,(r_a/r_i)} \quad [kV/mm]$$

U_0 = angelegte Phasenspannung [kV]
r_x = Radius an der Stelle x [mm]
r_a = Aussenradius über der Isolation [mm]
r_i = Radius über der inneren Feldbegrenzung [mm]

Der Spannungsgradient (elektrische Feldstärke) ist über dem inneren Halbleiter ($r_x = r_i$) am grössten, über der Isolation (unter dem äusseren Halbleiter, $r_x = r_a$) am kleinsten.

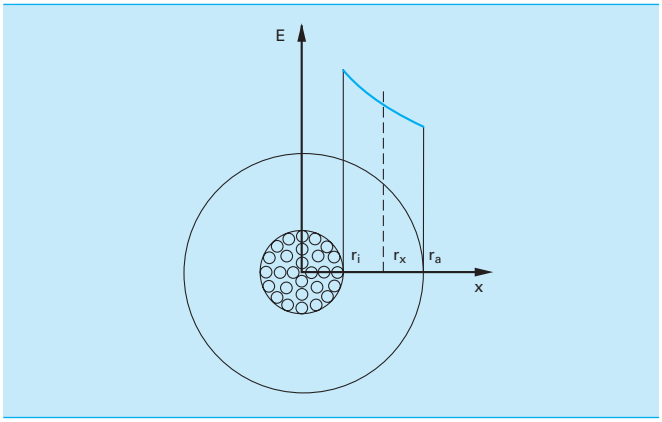


Bild 1: Radialer Feldstärkeverlauf.

2.4 Niederspannungsnetzkabel

Niederspannungsnetzkabel werden in zwei Netzsystemen eingesetzt:

– NS-Netze mit Schutzerdung
– NS-Netze mit Nullung

In jedem System werden bevorzugt unterschiedliche Kabeltypen verwendet:
– In Schutzerdungsnetzen: Vierleiterkabel Typ 3LPE mit leichter bis starker Armierung. Der isolierte PE-Leiter dient als Nullleiter, die Armierung dient als Schutzleiter, zusammen mit einem elektrisch durchverbundenen Wasserleitungssystem.
– In genullten Netzen: Vierleiterkabel Typ 3L mit konzentrischem Aussenleiter, Typ Ceander. Der Aussenleiter dient als PEN-Leiter zwischen den Gebäudeerdern.
– Die Schutzerdung wird wegen der elektrischen Unterbrechungsstellen des Wasserleitungssystems in vermehrtem Masse durch die Nullung abgelöst.
– Armierte Vierleiterkabel lassen sich in genullten Netzen durch Verbinden des Nullleiters mit der Armierung problemlos einsetzen.
– Anders verhält es sich mit den kostengünstigen Ceanderkabeln im schutzgeerdeten System: Der konzentrische Aussenleiter darf nur als PEN-Leiter verwendet werden.

2.5 Mittelspannungsnetzkabel

Mittelspannungsnetzkabel sind mit einem metallischen Schirm versehen, der geerdet sein muss. Im Betrieb entstehen Schirmverluste durch:

– Magnetisierungsströme
– Wirbelströme
– Schirmausgleichsströme infolge induzierter Schirmlängsspannungen

Die Schirme der Mittelspannungsnetzkabel werden im Normalfall beidseitig geerdet. Durch die induzierte Schirmlängsspannung U_{iS} fliesst bei der beidseitigen Schirmerdung der Schirmstrom I_S, der die Schirmzusatzverluste erzeugt. Der Schirmstrom berechnet sich mit:

$$I_S = \frac{U_{iS}}{Z_S}$$

Z_S ist die Schirmimpedanz, die sich gemäss der folgenden Gleichung berechnen lässt:

$$Z_S = \sqrt{R_S^2 + X_S^2}$$

Der Schirmwiderstand kann aus der Geometrie und der Leitfähigkeit des Schirmmaterials errechnet werden. Die Schirmreaktanz X_S für im Dreieck verlegte Kabel lautet:

$$X_S = 1.26 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot ln\,(\frac{2s}{d_S}) \quad [\Omega/km]$$

f = Frequenz
s = Achsabstand [mm]
d_S = mittlerer Durchmesser des Schirms [mm]

Die Schirmspannung lautet:

$$U_S = Z_S \cdot I \cdot L \quad [V]$$

I = Leiterstrom [A]
L = Kabellänge [km]

Die Schirmverluste errechnen sich aus der Formel:

$$P_S = I_S^2 \cdot R_S$$

Eine Übersicht über die Betriebsverluste geben die folgenden Kapitel.

2.6 Verseilte Dreileiter- oder gebündelte Einleiterkabel mit Kupferdrahtschirmen

Diese Kabel haben bei einseitiger Erdung bis zu einem Leiterquerschnitt von 240 mm² nur unwesentliche Schirmverluste, bezogen auf die Gesamtverluste. Ab 300 mm²

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

finden praktisch nur noch Einleiterkabel Verwendung, welche im Dreieck gebündelt oder in Ebene berührend verlegt werden sollen. Bei der beidseitigen Schirmerdung übersteigen die Schirmverluste dieser grossquerschnittigen Kabel die 5 %-Grenze, bezogen auf die Gesamtverluste. Für diese Kabel empfiehlt es sich, eine einseitige Schirmerdung vorzusehen, um die Schirmverluste zu senken. Von einer distanzierten Verlegung der Einleiterkabel und gleichzeitiger, beidseitiger Schirmerdung ist abzuraten, da in diesem Fall die Schirmverluste 20–40 % der Gesamtverluste betragen können. Metallschirme, Muffen oder freie Kabelenden sind bei der einseitigen Schirmerdung entsprechend zu isolieren und am freien Ende mit Mantelüberspannungsableitern vor unzulässig hohen Schalt- bzw. atmosphärischen Überspannungen zu schützen. Nachteilig bei der einseitigen Schirmerdung ist der Anstieg der Nullimpedanz, die mit einem zusätzlichen Erdband tief gehalten werden kann.

3. Berechnungsgrundlagen

3.1 Betriebsarten der Kabel

Dauerlast
Bei Dauerlast wird die Last über den ganzen Tag und das ganze Jahr auf einem konstanten Wert gehalten und somit fliesst ein konstanter Strom durch das Kabel. Diese Lastart ist in Mittel- und Niederspannungsnetzen selten anzutreffen. Meistens ist dies nur in Energieerzeugungsanlagen und Unterwerken der Fall.

Industrielast
In Verteilnetzen ist die Belastung meistens zeitabhängig. Für die Auslegung einer Kabelanlage ist es von Vorteil, die Belastungskurve über 24 h zu kennen. Daraus lässt sich der Belastungsgrad (Engl.: load factor, Franz.: facteur de charge) als Verhältniszahl zur Spitzenlast bestimmen. Bei konstanter Netzspannung variiert der Strom. Der Belastungsgrad lässt sich mit einer linearen Integralrechnung bestimmen:

$$BG = \frac{1}{24h \cdot I_{max}} \cdot \int_0^{24h} I(t) \cdot dt$$

Für die Belastungsberechnungen von im Boden verlegten Kabeln ist der Verlustleistungsfaktor von Bedeutung. Dieser Faktor berücksichtigt die Trägheit der Wärmeableitung im Boden. Er lässt sich aus dem quadratischen Integral berechnen (Engl.: loss factor, Franz.: facteur d'utilisation).

$$LF = \frac{1}{24h \cdot I_{max}} \cdot \int_0^{24h} I^2(t) \cdot dt$$

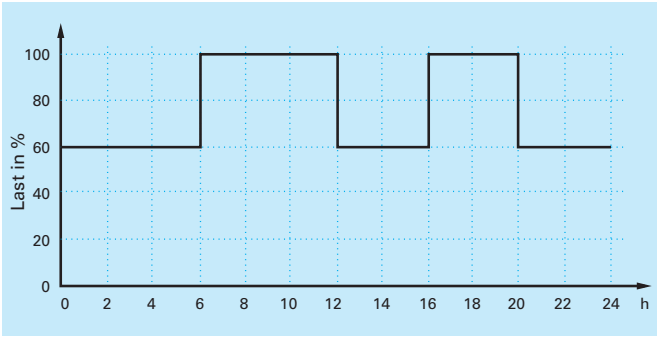


Bild 2: Tageslastkurve für Industrielast, d. h. 10 h 100 % und 14 h 60 % Nennstrom.

3.2 Grenztemperaturen
Die maximal zulässigen Leitertemperaturen sind von den verwendeten Isoliermaterialien und der verlangten Lebensdauer abhängig.

Niederspannungskabel und Mittelspannungskabel	Zulässige Leitertemperaturen		
	Dauerbetrieb °C *	Notbetrieb °C **	Kurzschlussfall °C ***
Vernetztes Polyethylen XLPE und vernetztes EPR (Ethylen-Propylen-Rubber)	90	110	250

* Dauer-Übergangstemperatur zum Erdboden (Kabeloberfläche, Rohr, Rohrblock): 50 °C
** Notbetrieb während 6–8 Stunden pro Tag und maximal 100 Stunden pro Jahr
*** Grenztemperatur nach IEC 60986 und HD 620 S2: bis 5 sec.

3.3 Bestimmung der zulässigen Kurzschlussströme
Die Kurzschlussdauer setzt sich aus der Eigenzeit des Schutzschalters und der Relaiszeit zusammen. Der Kurzschlussstrom wird aus folgenden Netzgrössen abgeleitet:

$$I_{KS} = \frac{S_{KS}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

I_{KS} = Kurzschlussstrom
S_{KS} = Kurzschlussleistung
U_n = verkettete Nennspannung

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

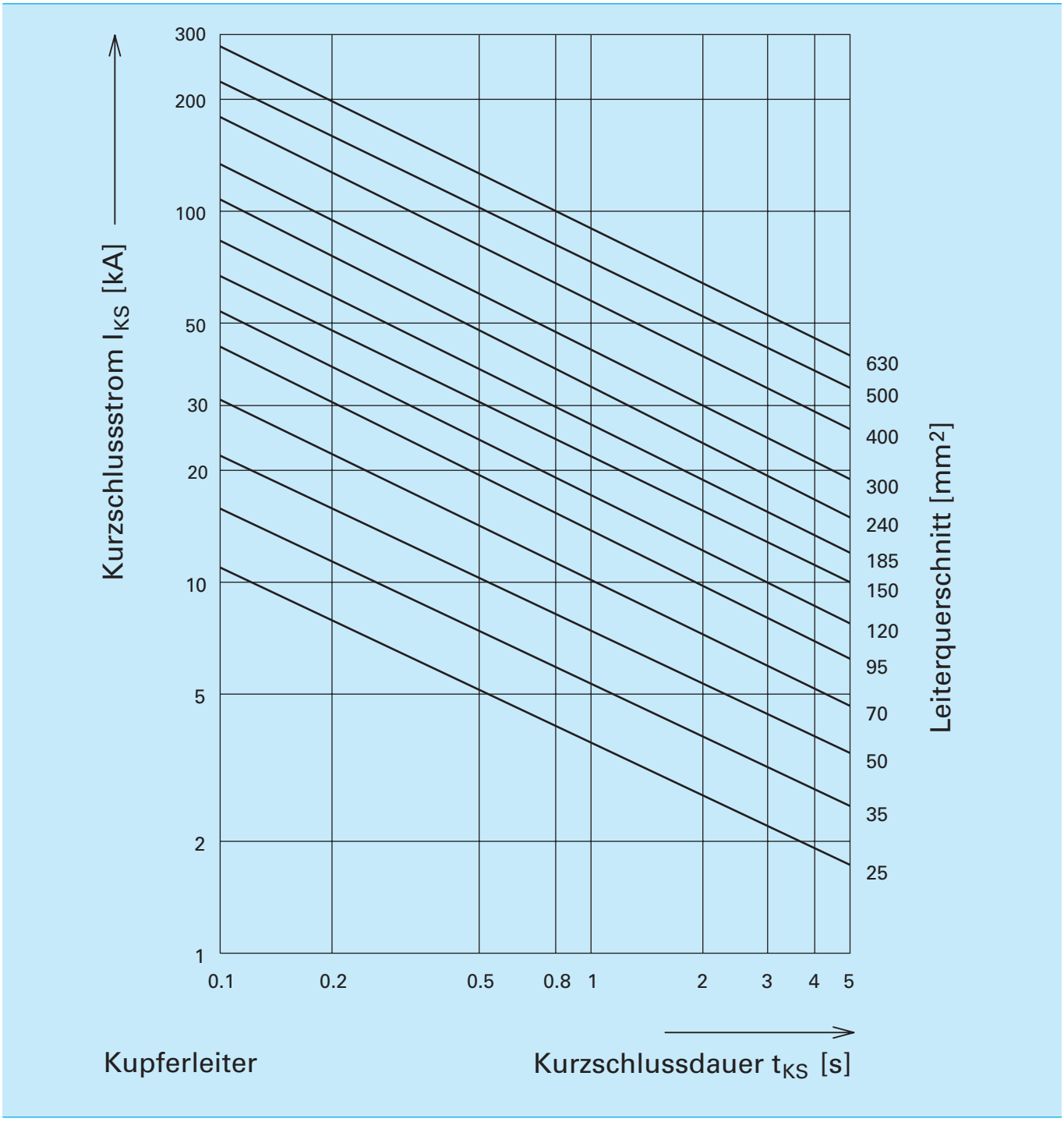


Bild 3: Bestimmung der zulässigen Kurzschlussströme der Kupferleiter.

Dauertemperatur des Leiters bei Beginn des Kurzschlusses: 90 °C
Zulässige Temperatur bei Kurzschlussende: 250 °C

Bei Kurzschlussströmen > 40 kA ist die Grenze der dynamischen Beanspruchung erreicht. Für höhere Kurzschlussströme sind Befestigungsbriden und Kabelgurte gemäss Berechnungsvorgaben einzusetzen.

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

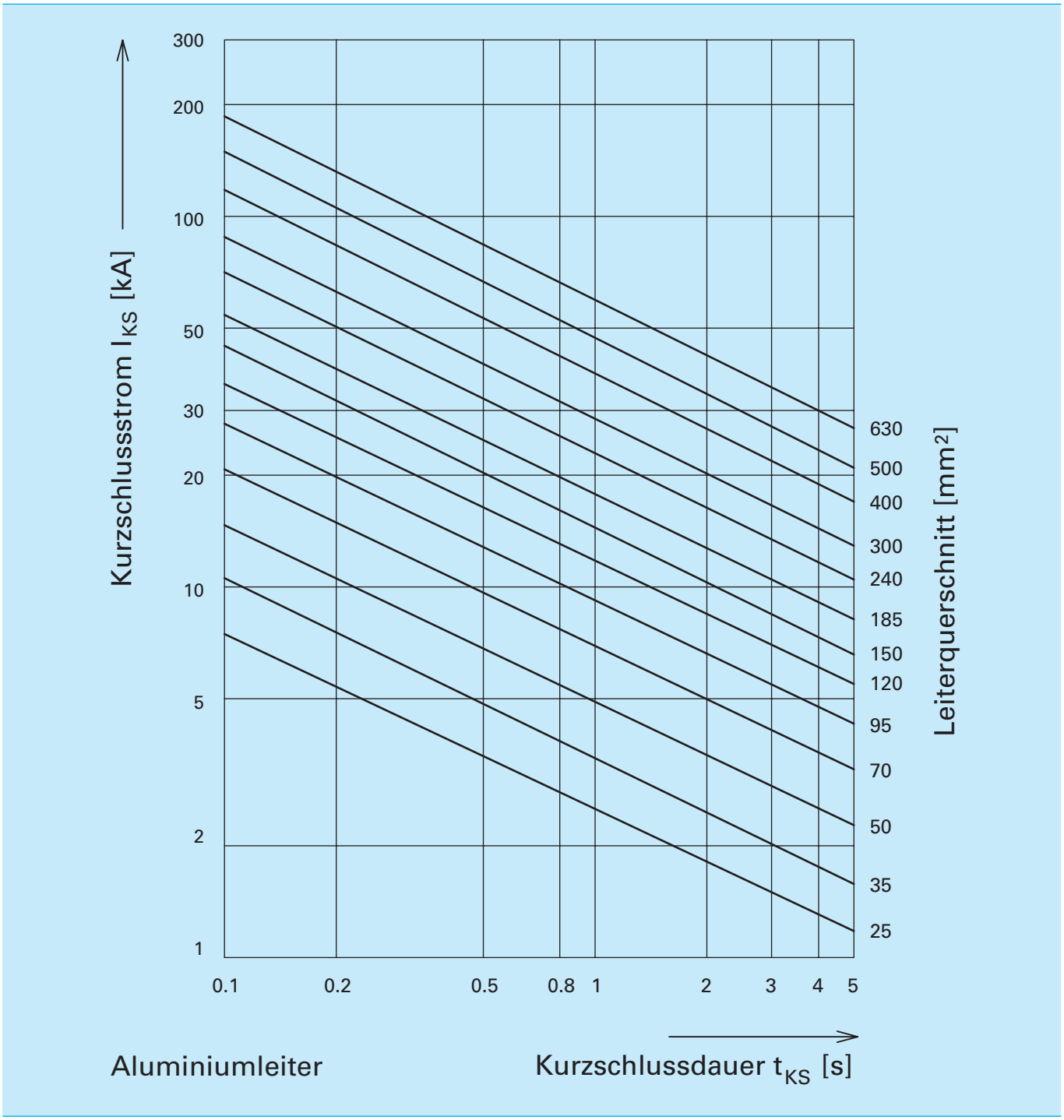


Bild 4: Bestimmung der zulässigen Kurzschlussströme der Aluminiumleiter.

Dauertemperatur des Leiters bei Beginn des Kurzschlusses: 90 °C
Zulässige Temperatur bei Kurzschlussende: 250 °C

Bei Kurzschlussströmen > 40 kA ist die Grenze der dynamischen Beanspruchung erreicht. Für höhere Kurzschlussströme sind Befestigungsbriden und Kabelgurte gemäss Berechnungsvorgaben einzusetzen.

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES
Well connected.
TERNA GROUP

BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

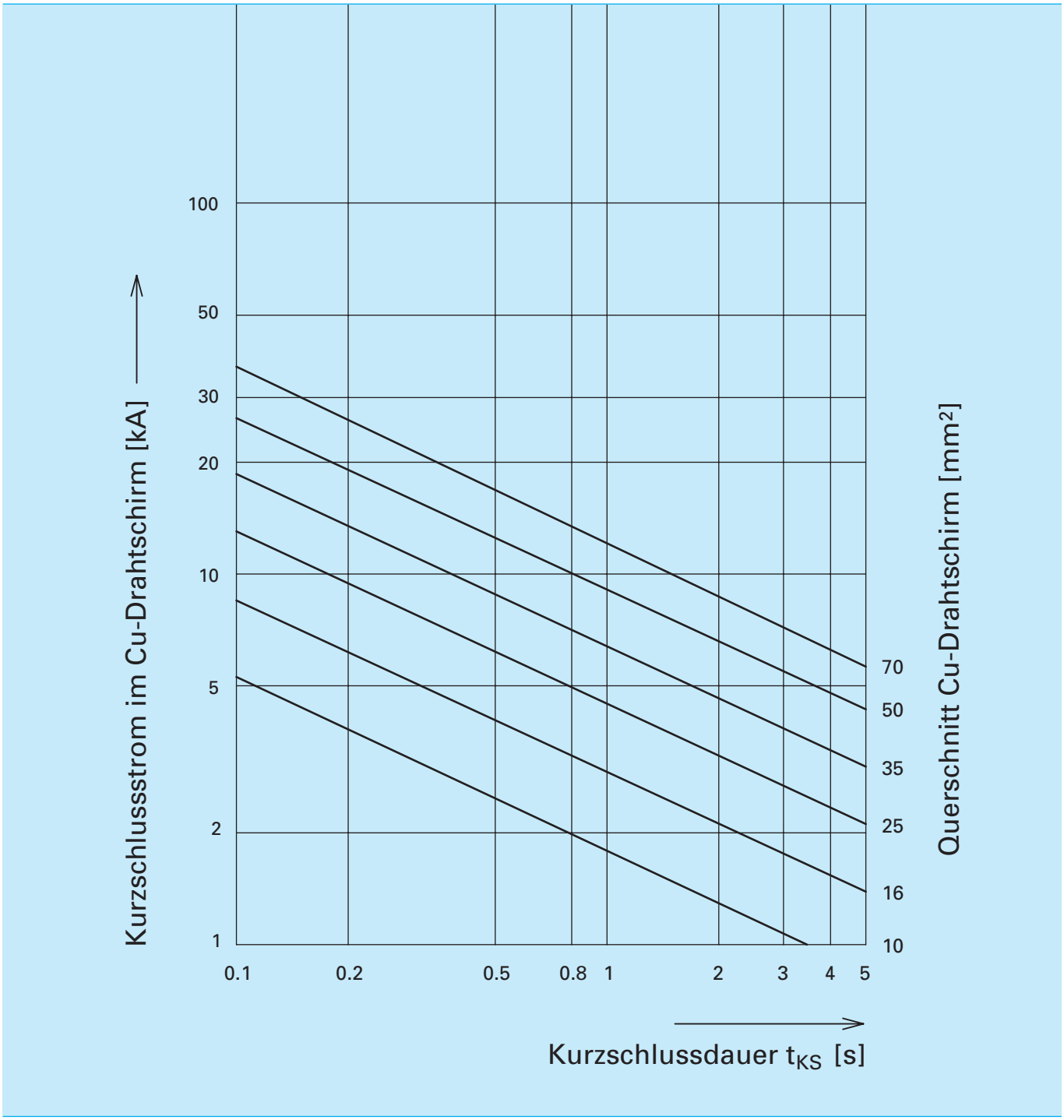


Bild 5: Zulässige Kurzschlussströme im Rundkupferdrahtschirm.

Dauertemperatur des Leiters bei Beginn des Kurzschlusses: 50 °C
Zulässige Temperatur bei Kurzschlussende: 250 °C

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

3.4 Dynamische Beanspruchung der Kabel

Die dynamische Beanspruchung der Kabel lässt sich aus dem Stosskurzschlussstrom ableiten.

$$I_S = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{KS}$$

I_S = Stosskurzschlussstrom [A]
k = Stossfaktor (allg. mit 1.8 angenommen)
I_{KS} = Kurzschlussstrom [A]

Die dynamische Kraft, die ein umschlingendes Band aufzunehmen hat, ist:

$$F_B' = \beta \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_S^2}{2\pi \cdot s} \quad [N/m]$$

F_B' = radiale Bandbeanspruchung [N/m]
β = Anordnungsfaktor
für ebene Verlegung $\beta = 0.404$
für Verlegung im Dreieck $\beta = 0.5$
μ_0 = Induktionskonstante = $4\pi \cdot 10^{-7}$ [N/A²]
s = Distanz zwischen den Leiterachsen [m]

oder vereinfacht mit k = 1.8:

$$F_B' = 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\beta \cdot I_{KS}^2}{s} \quad [N/m]$$

Bei Kurzschlussströmen über 40 kA ist die Grenze der dynamischen Beanspruchung erreicht. Verseilte Mehrleiterkabel überstehen die Kurzschlusskräfte im Wesentlichen unbeschädigt. Einleiterkabel und die aufgeteilten Enden der Mehrleiterkabel müssen in kurzen Abständen mit Kabelbriden oder Kabelgurten befestigt werden. Brugg Cables verfügt über die entsprechenden Berechnungsprogramme.

3.5 Verlegung der Kabel im Boden

Ein Kabel, das im Boden verlegt ist, kann seine Verlustwärme nur an das umgebende Erdreich abgeben. Für die Wärmeableitung hat der spezifische thermische Widerstand des Erdbodens ρ_E einen massgebenden Einfluss. Die Dichte und der Feuchtigkeitsgehalt des umgebenden Materials bestimmen diesen ρ_E-Wert. Der spezifische thermische Widerstand eines Materials schwankt stark mit dem Feuchtigkeitsgehalt. Im trockenen Zustand sind die Werte etwa doppelt so gross wie im feuchten. Mit höherer Materialdichte sinken die Wärmewiderstände.

Im nicht gestörten Zustand weisen die meisten Materialien einen spezifischen thermischen Widerstand von 0.6–0.8 K·m/W auf. In Anbetracht der Abhängigkeit zwischen Temperatur und Feuchtigkeit ist der für die Berechnungen angenommene Grenzwert ρ_E = 1 K·m/W richtig gewählt. Dieser Wert entspricht IEC 60287.

Beton hat einen tiefen spezifischen thermischen Widerstand und ist relativ wenig feuchtigkeitsabhängig. Zudem wird die Berührungsfläche zum Erdreich durch einen Betonrohrblock vergrössert, was die Wämeableitung begünstigt.

3.6 Bedingungen für die Berechnung der Belastbarkeiten

Verlegung im Boden, direkt in Erde oder in Rohren

Berechnung für ein Kabelsystem

– Dauerlastbetrieb	24 h 100 %
Belastungsgrad	BG = 1
Verlustleistungsfaktor	LF = 1
– Industrielastbetrieb	10 h 100 %, 14 h 60 %
Belastungsgrad	BG = 0.767
Verlustleistungsfaktor	LF = 0.627
– Leitertemperatur	60 °C, 90 °C
– Verlegetiefe	1 m
– Temperatur im Boden	20 °C
– Spezifischer thermischer Widerstand des Bodens	1 K·m/W

Verlegung in Luft

Berechnung für ein Kabelsystem

– Dauerbetrieb	24 h 100 %
Verlustleistungsfaktor	LF = 1
– Leitertemperatur	60 °C, 90 °C
– Temperatur der Luft	30 °C

3.7 Bestimmung des Querschnitts

Der Leiterquerschnitt kann wie folgt bestimmt werden:

1. Berechnen des Betriebsstroms aus der Übertragungsleistung:

$$I_B = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

I_B = Betriebsstrom [A]
S = Übertragungsleistung [kVA]
U = verkettete Netzspannung [kV]

2. Art der Verlegung ermitteln (im Boden, in Rohren oder direkt in Erde, in Luft).
3. Schirmerdungsart ermitteln.
4. Bei Abweichungen von Normalbedingungen: Korrekturfaktoren gemäss Kapitel 4 mit einbeziehen.
5. Leiterquerschnitt aus Strombelastbarkeitstabellen bestimmen.
6. Mittelspannungskabel: Kurzschlussfestigkeit des ausgewählten Leiterquerschnitts und der metallischen Abschirmung überprüfen. Eventuell ist der Querschnitt wegen der Kurzschlussfestigkeit zu erhöhen.

Berechnung des Kurzschlussstroms aus der Kurzschlussleistung:

$$I_{KS} = \frac{S_{KS}}{\sqrt{3} \cdot U}$$

I_{KS} = Kurzschlussstrom [kA]
S_{KS} = Kurzschlusswechselstromleistung [MVA]
U = verkettete Netzspannung [kV]

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

7. Niederspannungskabel: Der Spannungsabfall ist für einen ausgewählten Querschnitt zu berechnen und mit den Vorgaben zu vergleichen. Je nach Ergebnis ist der Querschnitt höher auszuwählen.
8. Bestimmung des wirtschaftlichen Leiterquerschnitts gemäss Kapitel 5.

4. Tabellen und Korrekturfaktoren

4.1 Maximale Gleichstrom-Leiterwiderstände nach IEC 60228 bei 20 °C Leitertemperatur

Leiterquerschnitt mm²	Kupfer Ω/km	Aluminium Ω/km
1.5	12.10	—
2.5	7.41	—
4	4.61	—
6	3.08	—
10	1.83	3.08
16	1.15	1.91
25	0.727	1.20
35	0.524	0.868
50	0.387	0.641
70	0.268	0.443
95	0.193	0.320
120	0.153	0.253
150	0.124	0.206
185	0.0991	0.164
240	0.0754	0.125
300	0.0601	0.100
400	0.0470	0.0778
500	0.0366	0.0605
630	0.0283	0.0469
800	0.0221	0.0367

4.2 Umrechnungsfaktoren für den Gleichstrom-Leiterwiderstand bei von 20 °C abweichenden Temperaturen

Leitertemperatur °C	Faktor $1 + (\alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta)$	
	Kupfer	Aluminium
20	1.000	1.000
25	1.020	1.020
30	1.039	1.040
35	1.059	1.060
40	1.079	1.081
45	1.098	1.101
50	1.118	1.121
55	1.138	1.141
60	1.157	1.161
65	1.177	1.182
70	1.196	1.204
75	1.216	1.225
80	1.236	1.245
85	1.255	1.265
90	1.275	1.285
95	1.293	1.305
100	1.314	1.325

4.3 Umrechnungsfaktoren der Strombelastbarkeit bei abweichender Umgebungstemperatur

Verlegung der Kabel in Kunststoffrohren in Erde

Leitertemperatur °C	Bodentemperatur °C			
	10	20	30	40
60	1.10	1.00	0.91	0.87
75	1.08	1.00	0.92	0.86
90	1.07	1.00	0.93	0.85

Verlegung der Kabel in Luft

Leitertemperatur °C	Lufttemperatur °C				
	10	20	30	40	50
60	1.35	1.18	1.00	0.79	0.52
75	1.24	1.12	1.00	0.86	0.71
90	1.18	1.09	1.00	0.90	0.79

Bei parallel verlegten Kabeln in Luft (ungehinderte Luftzirkulation), mit Abstand zwischen den Kabeln > 0.75 x Kabeldurchmesser, ist keine Reduktion zu berücksichtigen.

4.4 Umrechnungsfaktoren der Strombelastbarkeit für Parallelverlegung

Dreileiter-Mittelspannungskabel in Kunststoffrohren parallel verlegt, Achsabstand 25 cm

XKDT-YT 3x1x...	Querschnitt 25–70 mm²	Querschnitt 95–240 mm²
	0.90	0.85
	0.78	0.75
	0.72	0.70

4.5 Umrechnungsfaktoren der Strombelastbarkeit bei abweichendem, spezifischem thermischem Bodenwiderstand

Verlegung der Kabel in Kunststoffrohren in Erde

Querschnitt	Spezifischer thermischer Bodenwiderstand (K·m/W)						
mm²	0.7	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0
25 bis 95	1.13	1.00	0.94	0.84	0.75	0.68	0.63
120 bis 630	1.14	1.00	0.93	0.84	0.73	0.66	0.61

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

5. Bestimmung des wirtschaftlichen Querschnittes

In den Strombelastungstabellen sind die maximal zulässigen, thermischen Betriebsströme aufgeführt. Die wirtschaftliche Strombelastbarkeit liegt in der Regel wesentlich tiefer als der thermische Grenzstrom. Deshalb ist es in vielen Fällen angezeigt, einen höheren Leiterquerschnitt mit Bezug auf die Wirtschaftlichkeit zu überprüfen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Mehrkosten für den nächstgrösseren Leiterquerschnitt durch die geringeren ohmschen Verluste in wenigen Jahren amortisiert werden.

Der wirtschaftliche Leiterquerschnitt steigt mit:

- dem höheren Einkaufspreis der Elektrizität,
- steigender Benutzungsdauer,
- längerer Abschreibungsdauer,
- fallendem Zinssatz,
- fallendem Preisunterschied des Kabels mit dem nächstgrösseren Leiterquerschnitt.

Der wirtschaftliche Leiterquerschnitt kann aus der Differenz der Kabelpreise und den eingesparten und kapitalisierten ohmschen Verlusten berechnet werden. Die speziellen Berechnungen lassen sich mit den Berechnungsprogrammen von Brugg Cables auf Anfrage durchführen.

6. Spannungsabfall

Der Spannungsabfall ist vor allem bei Niederspannungsnetzen mitbestimmend für die Wahl eines Kabelquerschnittes. Bei Kabellängen über ca. 250 m wirkt der Spannungsabfall belastungsmindernd. Schematisch lässt er sich wie folgt darstellen:

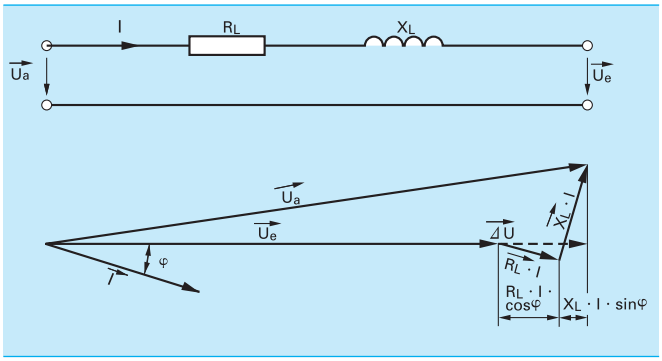


Bild 6: Schematische Darstellung des Spannungsabfalls

In einem gut ausgelegten Versorgungsnetz sollte der Spannungsabfall zwischen dem sekundärseitigen Abgang des Quartiertransformators und dem Hausanschlusskasten maximal 3 % betragen, da der problemlose Betrieb spannungsempfindlicher Geräte wie von Radios, Fernsehern, speicherprogrammierbaren Geräten, Leuchten usw. stark von einer konstanten Spannung, d. h. voller Spannungshöhe ohne Schwankungen, abhängt. Nur in Ausnahmefällen, bei denen ein hoher Aufwand für den Anschluss nicht mehr wirtschaftlich ist, z. B. bei abseits gelegenen Abnehmern, ist ein Unterschied von 5–7 % vertretbar. Der zusätzliche Spannungsverlust in der Hausinstallation wird meist mit 2 % angesetzt und ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Der Spannungsunterschied ΔU wird in Prozenten der Betriebsspannung U angegeben. Er beträgt für eine bekannte Übertragungsleitung P:

$$\Delta U = \frac{P \cdot L \cdot 100 \cdot (R_w \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)}{U_v^2 \cdot \cos\varphi}$$

oder bei einem bekannten Strom I:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot 100 \cdot (R_w \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)}{U_v \cdot \cos\varphi}$$

P = Übertragungsleistung [W]
L = Trasseelänge [km]
R_w = Wirkwiderstand der Leitung [Ω/km]
X_L = induktiver Widerstand der Leitung [Ω/km]
U_v = verkettete Netzspannung [V]
ΔU = Spannungsunterschied [%]
I = Strom [A]
φ = Phasenwinkel der Last

Näherungsformel für die Abschätzung des Spannungsabfalls:

$$\Delta U = \frac{Z_{60} \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot 100}{U_v}$$

Z_{60} = Impedanz bei 60°C und 50 Hz
Werte siehe unter den Kabeldatenblättern.

Der Spannungsunterschied ist dem Lastmoment P·L direkt proportional. Zum Bestimmen des Leiterquerschnittes kann für die Betriebsspannung U/U_0 = 400/230 V Bild 7 benutzt werden.

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

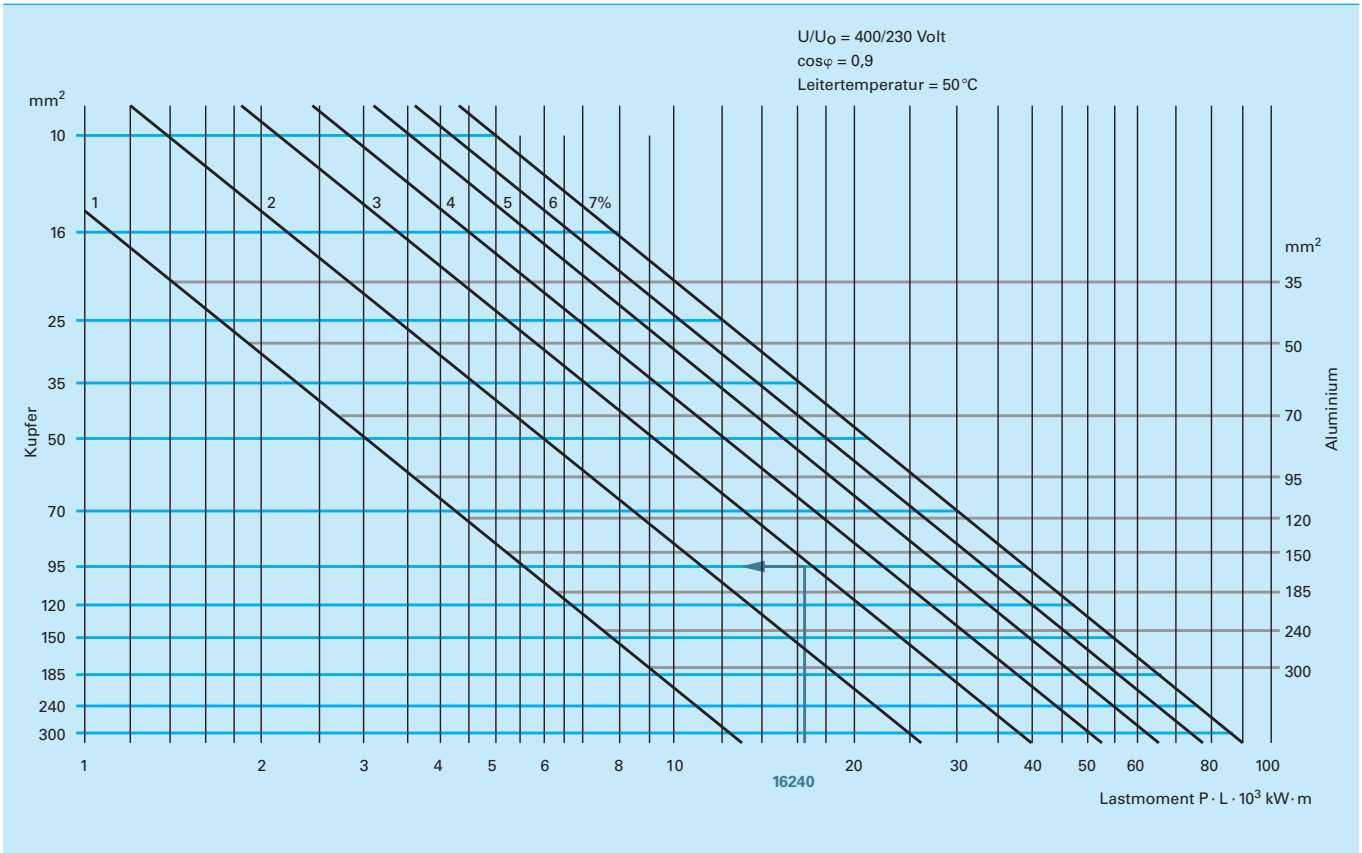


Bild 7: Kabelquerschnitt unter Mitberücksichtigung des Spannungsabfalls.

Beispiel: Gegeben ist der folgende Fall mit Trafostation:

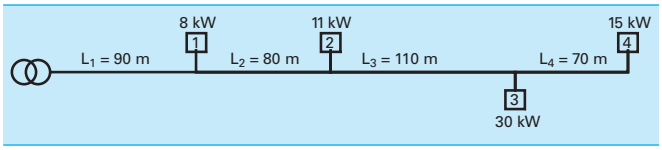


Bild 8: Niederspannungsstrang.

Gesucht: Kabelquerschnitt in Cu für $\Delta U = 3\,\%$

Lösung:

1. Lastmomente errechnen

$P_1 \cdot L_1$	= 8 kW · 90 m =	720 kW · m
$P_2 \cdot (L_1 + L_2)$	= 11 kW · 170 m =	1 870 kW · m
$P_3 \cdot (L_1 + L_2 + L_3)$	= 30 kW · 280 m =	8 400 kW · m
$P_4 \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)$	= 15 kW · 350 m =	5 250 kW · m
		16 240 kW · m

2. Aus dem Diagramm können die Querschnitte und effektiven Spannungsabfälle direkt abgelesen werden. In diesem Fall:

   Beim Lastmoment 16240 kW · m und max. 3% Spannungsabfall ergibt sich der minimale Leiterquerschnitt Cu = 95 mm²

7. Erdung der Kabelabschirmungen

Wird der Kabelschirm einseitig an Erde gelegt, entsteht in der Abschirmung eine vom Leiterstrom induzierte Längsspannung. Aus Sicherheitsgründen werden die Kabelschirme von Mittelspannungskabeln normalerweise beidseitig starr geerdet. Es fliesst deshalb in den Abschirmungen ein Strom, der von der induzierten Mantellängsspannung hervorgerufen wird. Der Betrag des Schirmstroms ist proportional zum Leiterstrom. Bei distanzierter Verlegung und Kabelquerschnitten über 240 mm² wird wegen der hohen Schirmverluste oder bei Gefahr vor Potenzialverschleppung die einseitige Schirmerdung empfohlen. Um die Sicherheit trotzdem zu gewährleisten, muss das offene Ende jeder Phase mit einem Überspannungsableiter geschützt und der gesamte Aufbau mit einer Vorsichtstafel versehen werden. Das Prinzip der einseitigen Schirmerdung ist aus Bild 9 ersichtlich.
Kabelschirme und Kabelendverschlüsse sind als unter Spannung stehend zu betrachten. Die Auslegung der Überspannungsableiter hängt vom Kurzschlussstrom und von der Verlegeanordnung ab.

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

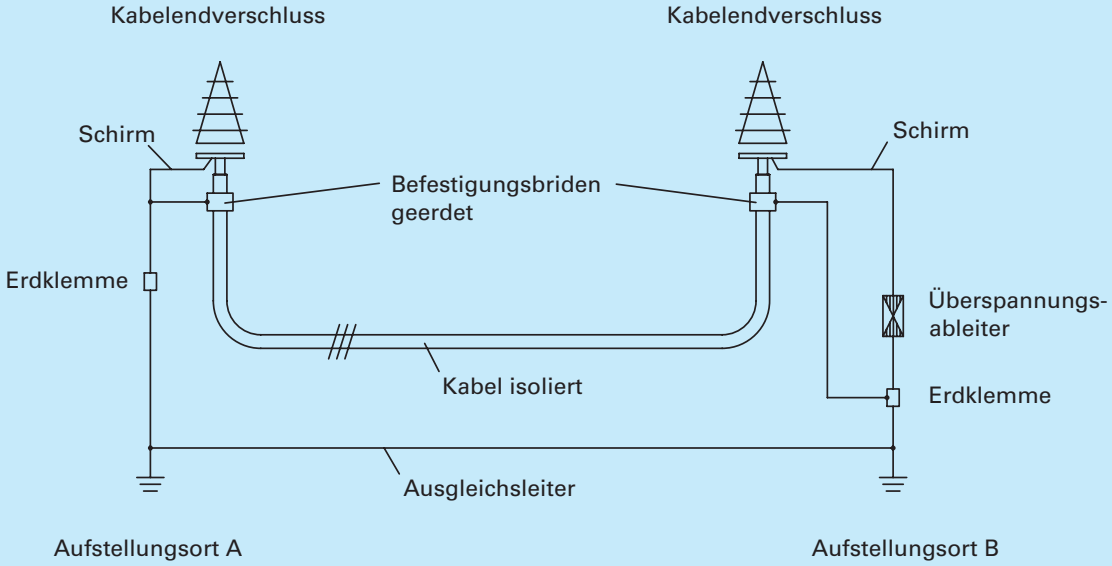


Bild 9: Prinzip der einseitigen Schirmerdung.

8. Mehrere parallel geschaltete Kabel pro Phase. Stromaufteilung im Dreiphasen-System

Die Parallelschaltung von Kabeln drängt sich vor allem in der Niederspannung auf, wenn hohe Ströme zu übertragen sind. Dies gilt natürlich gleichwohl für die Mittelspannung, wenn hohe Ströme auftreten. Die nachstehende Beschreibung bezieht sich auf Niederspannungs-Dreileitersysteme mit Nullleiter.

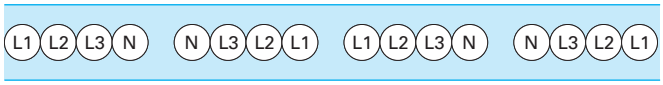
Ein Drei- oder Vierleiterkabel mit regelmässiger Verseilung stellt ein perfektes, symmetrisches System mit ausgeglichenen Phasenreaktanzen dar. Durch die Wahl gleicher Querschnitte und Verlegelängen wird eine sehr gute Stromverteilung erreicht.

Werden nicht verseilte Einleiterkabel eingesetzt, ist vordringlich darauf zu achten, dass die Induktivitäten der Parallelleiter jeder Phase gleich gross sind. Dies lässt sich mit symmetrischen Phasenanordnungen bezüglich eines Punktes oder einer Achse erreichen. Jeder Leiter ist in diesem Fall der gleichen Rückwirkung (Gegeninduktivität) aller anderen Leiter ausgesetzt.

Mit zwei oder vier Parallelsystemen (-strängen) kann normalerweise eine sehr gute Symmetrie und Stromaufteilung erreicht werden. Für ein System mit drei Parallelleitern ist eine Dreieckanordnung zu empfehlen. Enorm wichtig ist, dass die Teilstränge eines Parallelleitersystems in Einzelsträngen von L1, L2, L3, N angeordnet werden, die mit Vorteil berührend verlegt werden.

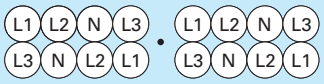
Anordnung von Einleiterkabeln mit 2 resp. 4 Parallelkabelsystemen

in gleicher Ebene



Achsensymmetrie

im Viereck (oder Dreieck)



Punktsymmetrie

Bild 10: Anordnung Einleiterkabel.

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP
BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com

9. NISV und elektromagnetische Verträglichkeit

NISV heisst: nichtionisierende Strahlungsverordnung. Unter die nichtionisierenden Strahlungen fallen die elektromagnetischen Strahlen.

Niederspannungs- und Mittelspannungsnetzkabel haben beide eine Abschirmung, sowohl als Ein-, Drei- wie auch als Vierleiterkabel. Diese Abschirmung ist mindestens einseitig, sicherheitsmässig besser zweiseitig an Erde zu legen. Durch diese Erdung wird das elektrische Potenzial auf Null gelegt. Innerhalb der Abschirmung weist das Kabel eine elektrische Feldstärke entsprechend seiner Betriebsspannung auf, ausserhalb beträgt die elektrische Strahlung Null. Ungeschirmte Kabel haben diesen Vorteil nicht; man trifft diese Kabel in der Niederspannung an und dort muss die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) sehr speziell beurteilt werden.

Niederspannungs-Drei- und -Vierleiterkabel sowie Einleiter-Niederspannungs- und Mittelspannungs-Netzkabel, die im gleichen Rohr in Erde verlegt sind, bedürfen keines NISV-Nachweises. Den Hintergrund bilden die kleinen Abstände zwischen den drei Phasenleitern, die nur niedrige elektromagnetische Felder (EMF) verursachen, die als unkritisch beurteilt werden.

Magnetische Strahlung

Die magnetischen Strahlungen von Mittelspannungskabeln sind in den Verteilnetzen extrem selten kritisch hoch, d. h. über 1 µT (1 Mikrotesla). In den Niederspannungsabgängen von Transformatoren mit hohen Strömen oder bei Sammelschienenabgängen können hohe magnetische Feldstärken entstehen. In diesen Fällen ist es wichtig, die geometrische Anordnung von Einleiterkabeln physikalisch richtig und handwerklich optimal auszulegen. Es ist extrem wichtig, die einfachen Regeln für die Verlegung und die Führung der Kabel gemäss dem vorausgegangenen Unterkapitel «Stromaufteilung im Dreiphasensystem» in der Praxis anzuwenden. Die Erfahrung hat auch gezeigt, dass vier Einleiterkabel L1, L2, L3 und N, zu einem symmetrischen Vierleiterkabel verseilt, die geringsten Abweichungen in Bezug auf die Stromaufteilung von parallel geschalteten Phasenleitern ergeben.

Technische Änderungen jederzeit vorbehalten.

BRUGG CABLES Well connected. TERNA GROUP

BRUGG KABEL AG
Telefon +41 56 201 37 77 • info@bruggcables.com