

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 13

Artikel: Kabelbelastbarkeit als Funktion der Tageslastgangkennlinie

Autor: Brakelmann, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904223>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Impedanz Z_{En} in Figur 1 repräsentiert die Erwärmung des betrachteten Kabels durch seine eigene Verlustleistungs-Teilschwingung der Ordnungszahl n . Es gilt [5; 3]

$$Z_{En} = - \frac{\varrho}{2\pi x_{kn}} \cdot \frac{\ker x_{kn} + j \operatorname{kei} x_{kn}}{\ker' x_{kn} + j \operatorname{kei}' x_{kn}} \quad (2)$$

$$\text{mit } x_{kn} = r_k \sqrt{n\omega_0/\alpha} \quad (3)$$

ϱ spezifischer thermischer Erdbodenwiderstand,
 r Abstand von der Linienquelle,
 r_k Kabelradius,
 α Temperaturleitzahl des Erdbodens und
 \ker, kei Kelvin-Funktionen ([6], Ableitungen: $\ker', \operatorname{kei}'$).

Die Impedanz Z_{zn} in Figur 1 erfasst die Erwärmung des betrachteten Kabels durch die Verlustleistungs-Teilschwingungen benachbarter Kabel. Für L benachbarte Kabel folgt

$$Z_{zn} = - \frac{\varrho}{2\pi x_{vn}} \cdot \sum_{v=1}^L \frac{\ker x_{vn} + j \operatorname{kei} x_{vn}}{\ker' x_{vn} + j \operatorname{kei}' x_{vn}} \quad (4)$$

$$\text{mit } x_{vn} = a_v \sqrt{n\omega_0/\alpha} \quad (5)$$

und a_v Achsabstand zwischen dem betrachteten Kabel und dem benachbarten Kabel v .

Eine Analyse des Netzersatzbildes nach Figur 1 erfolgt zweckmässigerweise matriziell mit Hilfe des Knotenpunkt-Admittanzverfahrens. Das resultierende Gleichungssystem lautet

$$(\underline{P}_n) = [\underline{Y}_n] \cdot (\underline{\Delta g}_n) \quad (6)$$

(\underline{P}_n) Vektor der Verlustleistungseinstromungen,
 $[\underline{Y}_n]$ Matrix der Ersatzadmittanzen für die Frequenz $n\omega_0$
 $(\underline{\Delta g}_n)$ Vektor der komplexen Teilschwingungen der Temperaturerhöhungen.

Die Auflösung des Gleichungssystems (6) liefert für jede Ordnungszahl n die komplexen Teilschwingungen Δg_n der gesuchten Temperaturerhöhungen, woraus durch Rücktransformation bei Überlagerung der Gleichanteile schliesslich die nicht-sinusförmigen Zyklen der Temperaturerhöhungen für jeden Netzknoten j der Figur 1 folgen:

$$\Delta g_j(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{n_{\max}} \Delta g_{jn} \cdot e^{j\omega t} \right\} + \Delta g_{j0} \quad (7)$$

Die zeitinvarianten Temperaturerhöhungen Δg_{j0} resultieren aus den dielektrischen Verlusten sowie aus den Gleichanteilen der Stromwärmeverluste. Die Berechnung erfolgt anhand eines Widerstandsnetzwerkes entsprechend Figur 1, wobei die Widerstände des Erdbodens nach den bekannten Methoden [7; 8; 13] bestimmt werden. Das hieraus resultierende Temperaturfeld weist zur Kabelachse leicht exzentrische Isothermen auf. Allerdings sind diese Exzentrizitäten im Bereich der sog. «Charakteristischen Durchmesser», innerhalb derer die zyklischen Wärmewellen nahezu vollständig abklingen [3; 12; 13], nur gering und betragen normalerweise schon für die Grundschiwingung weniger als 10% des Kabeldurchmessers [3]. Eine Überlagerung des thermischen Wechselfeldes mit dem thermischen Gleichfeld kann daher in guter Näherung vorgenommen werden.

2.1 Temperaturabhängigkeit der Stromwärmeverluste

Die in Figur 1 dargestellten Stromwärmeverluste der einzelnen Kabelaufbauelemente hängen von deren Temperaturen ab, die jedoch zu Beginn der Rechnung noch unbekannt sind. Aus diesem Grunde sind zur Erfassung dieser Abhängigkeiten Nachiterationen erforderlich, wie sie in der Figur 2 für das Beispiel eines Leiterverlustzyklus prinzipiell skizziert sind:

Die Berechnung startet unter der Annahme, dass die Leitertemperatur während des gesamten Zyklus konstant, beispielsweise gleich der höchst-

zulässigen Leitertemperatur ist (Fig. 2b). Die Ergebnisse dieses ersten Rechenschrittes sind für den Verlustleistungszyklus (1) und den Erwärmungszyklus (2) als durchgezogene Kennlinien dargestellt. Im nächsten Schritt werden die im Zeitraster der vorgenommenen Fourieranalyse abgespeicherten Verlustleistungen dem Temperaturzyklus entsprechend mit

$$P_{L_{\text{neu}}}^{(v)} = P_{L_{\text{alt}}}^{(v)} \frac{1 + \alpha_T (g_{L_{\text{neu}}}^{(v)} - 20 \text{ K})}{1 + \alpha_T (g_{L_{\text{alt}}}^{(v)} - 20 \text{ K})} \quad (8)$$

mit α_T Temperaturkoeffizient des Leiterwiderstandes

korrigiert und einer erneuten Fourieranalyse zugeführt. Dieser Iterationsschritt wird so oft wiederholt, bis die sich noch ergebenden Änderungen des Temperaturzyklus vernachlässigbar gering bleiben.

2.2 Berücksichtigung der Bodenaustrocknung

In der Umgebung erdverlegter Kabel findet, verbunden mit dem Verlustwärmetransport, auch ein Wasser- bzw. Wasserdampftransport statt. Bei Unterschreiten eines kritischen Feuchtegehaltes kann der Boden austrocknen, verbunden mit einer Verringerung seiner Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 3 bis 6. Ausgehend von den physikalischen Grundvorstellungen kann gezeigt werden [8], dass bei niedrigem Feuchtegehalt des Bodens die Äquifluheflächen mit den Isothermen geometrisch übereinstimmen. Dem kritischen Feuchtegehalt kann dann eine «Grenzerwärmung für Bodenaustrocknung» [4] zugeordnet werden.

Quantifizierende Aussagen zur zeitlichen Entwicklung der Bodenaustrocknung bei zyklischen Temperaturspielen können bisher noch nicht getroffen werden. Untersuchungsergebnisse [10] weisen allerdings darauf hin, dass eine Rückfeuchtung eines einmal ausgetrockneten Bodens nur sehr langsam abläuft oder bei Weiterbestehen eines (wenn auch nur geringen) Temperaturgradienten ganz unterbleiben kann.

Aus diesem Grunde empfiehlt es sich zur Erzielung von Belastbarkeiten für einen sicheren Kabelbetrieb, von einer spontanen und irreversiblen Bodenaustrocknung [10] auszugehen. Unter diesen Voraussetzungen würden die höchsten auftretenden Temperaturen den Austrocknungsvorgang ohne

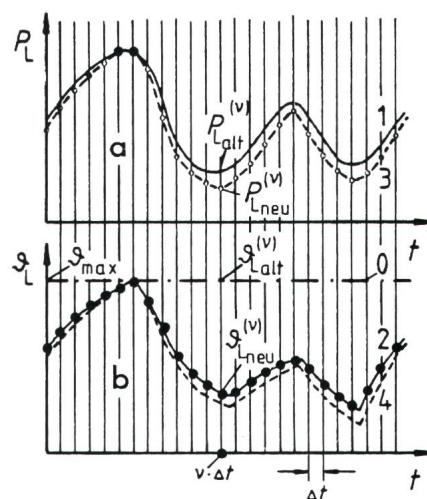


Fig. 2 Prinzipskizze zur Korrektur des Leiterverlustzyklus (a) bezüglich seiner Abhängigkeit von der Leitertemperatur (b)
 Die Ziffern 0 bis 4 kennzeichnen den Rechenaufbau

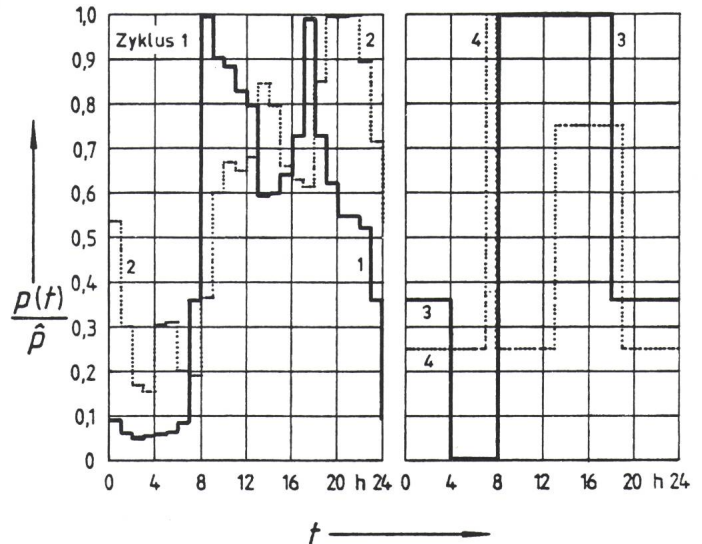
zeitliche Verzögerung einleiten; die Isothermengeometrie bleibt hierbei unverändert, und die Berechnung kann näherungsweise für ein sog. Zweischichtenmodell des Bodens erfolgen [8].

Für ein einzelnes Kabel gelingt die Berechnung des Zweischichtenmodells bei zyklischer Last, wie in [3] vorgeschlagen und in [10] für sinusförmige Lastzyklen gezeigt, noch analytisch. Im Falle mehrerer Kabel sind nur noch Näherungslösungen möglich, wenn nicht zu aufwendigen Rechenverfahren (z.B. Finite-Elemente-Verfahren) übergegangen wird, die nur noch auf Grossrechnern handhabbar sind [14; 15]. Für solche Näherungslösungen hat sich die in [12] entwickelte Vorstellung des «charakteristischen Durchmessers» als nützlich erwiesen; dieser Durchmesser stellt zwar formal nur eine Rechengrösse dar, er umschreibt jedoch den das betrachtete Kabel umgebenden Bodenbereich, innerhalb dessen die zyklische Verlustleistungswelle bereits sehr stark gedämpft bzw. nahezu abgeklungen ist. Dieser Durchmesser ist bei ausgetrocknetem Boden für die Verlustleistungsgrundwelle nicht grösser als 250 mm [3] und nimmt für Wellen höherer Frequenz weiter ab. Für nicht allzu hohe «Grenzerwärmungen» wird der Trockenbereich daher weiter ausgedehnt sein als bis zu einem Abstand von 125 mm von der Kabelachse, so dass zumindest der überwiegende Teil der Verlustleistungsgrundwelle, mit sehr guter Näherung aber die Wellen höherer Ordnung im Trockenbereich abklingen werden. Diese Wellen verlaufen daher praktisch nur im Trokkenbereich des Bodens, d.h. die Wärmeausbreitung kann näherungsweise für homogenen Boden berechnet werden. Da eine entsprechende Abschätzung meist leicht vorgenommen werden kann, kann in vielen Fällen auf aufwendigere Lösungsverfahren verzichtet werden.

3. Ergebnisse

Den im folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden vier Lastzyklen nach Figur 3 zugrunde gelegt, die auch Basis der derzeitigen Diskussion in der CIGRE-Working Group 21-02 sind: Zyklus 1 als sog. «IEC-Zyklus» [16], Zyklus 2 als typisches Tageslastspiel eines niederländischen EVU, Zyklus 3 die sog. «EVU-Last» nach VDE-Bestimmung 0298 [4] und Zy-

Fig. 3
Auf ihren Höchstwert bezogene Zyklen 1 bis 4 der Stromwärmeverluste



klus 4 als extreme «synthetische Lastgelenkennlinie».

3.1 Konvergenz

Für die Lastzyklen 3 und 4 wird in Figur 4 der Einfluss der maximalen Ordnungszahl der Fourierreihe verdeutlicht. Dargestellt sind hierzu die zeitlichen Temperaturverläufe an Kabelleiter und -oberfläche.

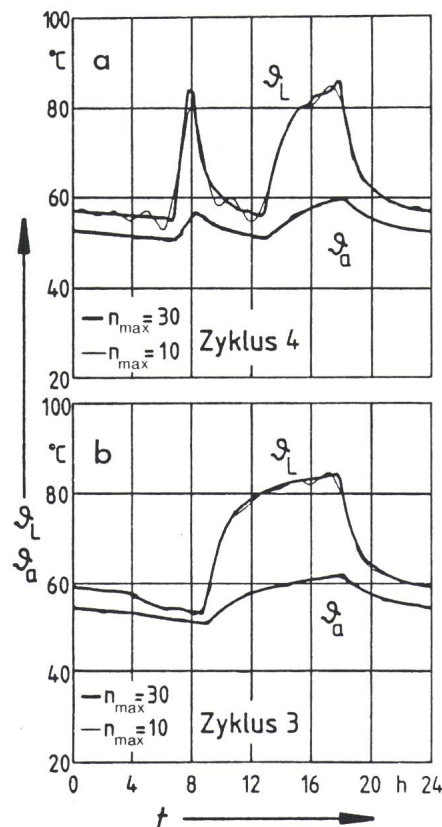


Fig. 4 Zeitlicher Verlauf von Leitertemperatur θ_L und Kabeloberflächentemperatur θ_a für zwei Verlustleistungszyklen nach Figur 3 und für die maximalen Fourierordnungszahlen $n_{\max} = 10$ und $n_{\max} = 30$

Anhand der kurzzeitigen Lastspitze in Figur 4a wird deutlich, dass eine in [2] vorgeschlagene höchste Ordnungszahl der Fourierzerlegung von $n_{\max} = 10$ noch zu erheblichen Fehlern führen kann. Bei Vergrößerung der höchsten Ordnungszahl auf $n_{\max} = 30$ war für die beschriebenen Lastzyklen noch eine relative Veränderung der Leitertemperaturen bis zu 2% festzustellen. Bei weiterer Vergrößerung über $n_{\max} = 30$ hinaus treten keine wesentlichen Änderungen mehr auf [3].

3.2 Temperaturabhängigkeit

Der Einfluss einer iterativen Nachverbesserung des Verlustleistungszyklus bezüglich seiner Temperaturabhängigkeit, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, wird anhand eines weiteren Beispiels unter Zugrundelegung des Lastzyklus 4 in der Figur 5 verdeutlicht. Dieses auch für die übrigen vorgenommenen Untersuchungen typische Ergebnis weist aus, dass eine erste Nachiteration zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit noch relative Abweichungen bis zu 3% bei der Berechnung des Temperaturzyklus bewirken kann. Weitere Nachiterationen erbringen nur noch unwesentliche Veränderungen der Temperaturverläufe, so dass für Belastbarkeitsberechnungen eine einzige Nachiteration bezüglich der Temperaturabhängigkeit der Stromwärmeverluste ausreicht.

3.3 Einfluss der Kabelwärmekapazitäten

Untersuchungen zum Einfluss der Kabelwärmekapazitäten auf die Belastbarkeit zyklisch belasteter Energie-

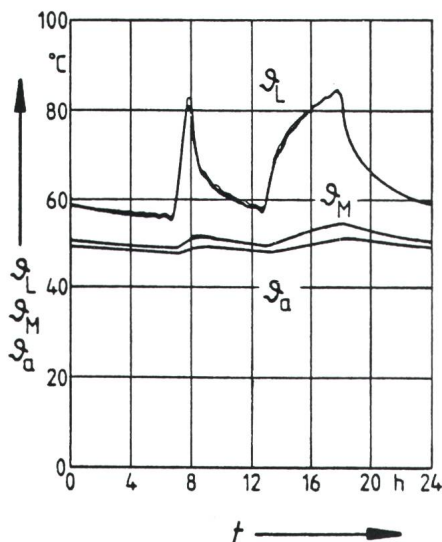


Fig. 5 Zeitlicher Verlauf von Leitertemperatur θ_L , Manteltemperatur θ_M und Kabeloberflächen-temperatur θ_a für den Verlustleistungszyklus 4 aus Figur 3

— keine Temperaturkorrektur
 - - - Anzahl der Temperatur-Nachiterationen ≥ 1

kabel wurden anhand der vier in Figur 3 dargestellten Lastzyklen

- für vier Spannungsebenen sowie
- bei Variation des Kupferleiterquerschnittes bis zu 3000 mm²

vorgenommen. Zugrunde gelegt wurden Einleiterölkabel üblichen Aufbaus, die in einer Verlegetiefe von 1,2 m bei einem Achsabstand von 0,3 m verlegt sind. Die Isolierungsdicken dieser Kabel wurden, je nach Leiterquerschnitt, aus einer höchstzulässigen Stossfeldstärke am Leiter von 90 kV/mm bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeiten des feuchten bzw. ausgetrockneten Bodens betragen 1,0 K m/W bzw. 2,5 K m/W, die Grenzwärmung wurde zu 15 K gewählt.

In Figur 6 sind einige Rechenergebnisse wiedergegeben. Dargestellt sind für die vier Lastzyklen die relativen Belastbarkeitsabweichungen bei Berechnung entsprechend VDE-Bestimmung 0298 [4] (durchgezogene Kennlinien) und nach der oben beschriebenen Fourierrmethode, aber bei Vernachlässigung der Kabelwärmekapazitäten (gestrichelte Kennlinien), als Funktion des Kupferleiterquerschnittes flachverlegter Einleiterölkabel unterschiedlicher Spannungsebenen; diese relativen Abweichungen beziehen sich auf die mit Hilfe der vollständigen Fourierrmethode ermittelten Belastbarkeiten.

Zu erkennen ist, dass für die Lastzyklen 1 bis 3, für alle Spannungsebenen $U \leq 400$ kV und für alle in Be-

tracht kommenden Leiterquerschnitte eine Vernachlässigung der Kabelwärmekapazitäten zu relativen Fehlern führt, die nicht mehr als 5% betragen. Für Mittelspannungskabel mit $U \leq 30$ kV [4] dürfte der durch diese Vernachlässigung hervorgerufene relative Fehler geringer als 3% bleiben.

Für den praxisfernen «synthetischen» Lastzyklus 4 sind die Abweichungen insgesamt grösser, sie betragen jedoch für Spannungen $U \leq 220$ kV ebenfalls nicht mehr als 5%, wenn nicht unrealistisch geringe Leiterquerschnitte (und damit extrem grosse Isolierungsdicken) zugrundegelegt werden.

3.4 Einfluss des Lastzyklus

Die den Belastbarkeitstabellen in [4] zugrunde liegende Berechnung nach der sog. «VDE-Methode» stellt eine Kombination zweier Verfahren dar, die von Cox/Coates [11] für das Zweischichtenmodell des Bodens und von Neher/McGrath [12] zur Erfassung zyklischer Lasten durch einen «charakteristischen Durchmesser» vorgeschlagen wurden. Eine Kombination dieser beiden Verfahren wurde von Mainka

[17] entwickelt, wobei der «charakteristische Durchmesser» sich aus dem Belastungsgrad der Lastgangkennlinie ergibt [8; 13]. Insofern bezieht sich [4] allein auf «EVU-Last»-typische Lastgangkennlinien (Fig. 3, Zyklus 3), die insbesondere eine lang andauernde Lastspitze aufweisen, und beschränkt sich auf Belastungsgrade [4] von $m \geq 0,5$.

Diese in [4; 13] getroffenen Vereinfachungen, d.h. die Nichtberücksichtigung einer speziellen Form der jeweiligen Lastgangkennlinie, wirkt sich nach Figur 6 offensichtlich nur geringfügig aus; so ergeben sich hierfür nach Figur 6 relative Fehler, die kaum über diejenigen hinausgehen, die aus der Vernachlässigung der Kabelwärmekapazitäten resultieren.

4. Schlussfolgerungen

Das verwendete verfeinerte Rechenverfahren ergibt somit anhand unterschiedlicher Lastzyklen, dass die in [4] vorgenommene Vernachlässigung der Kabelwärmekapazitäten für die Gültigkeit der VDE-Bestimmung 0298, d.h. für Spannungen bis zu 30

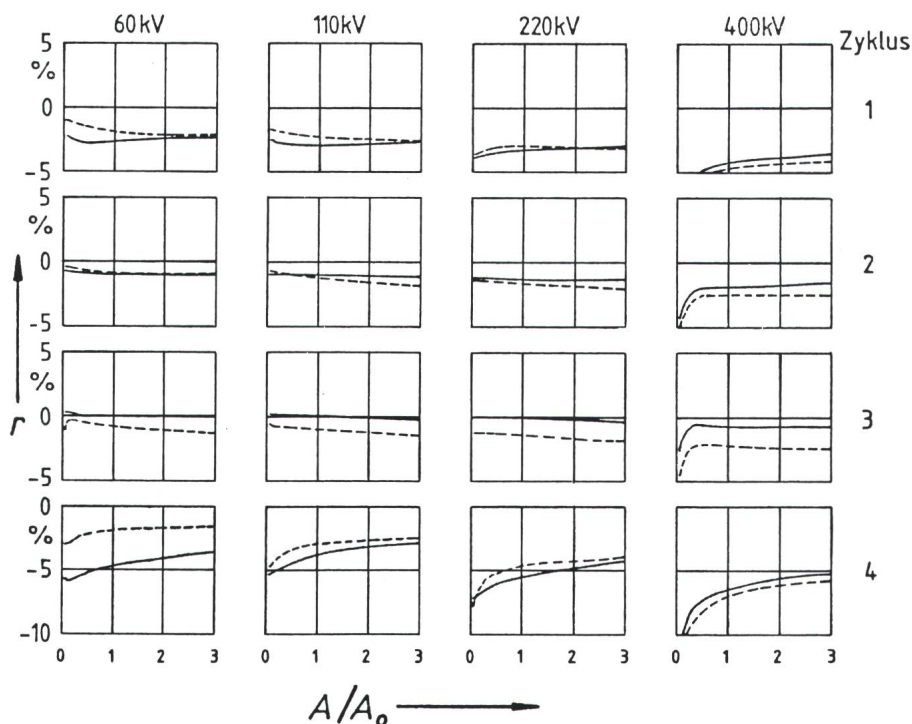


Fig. 6 Relative Abweichungen der Kabelbelastbarkeiten r als Funktion des Kupferleiterquerschnittes ($A_0 = 1000$ mm²)

— bei Vernachlässigung der Kabelwärmekapazitäten (vereinfachte Fourierrmethode)
 - - - bei Berechnung nach [4; 14]

Bezogen wurde auf die Ergebnisse der vollständigen Fourierrmethode
 Parameter: Spannungsebene; Lastzyklen nach Figur 3.

kV, gerechtfertigt ist und dass durch diese Näherungen auch für wesentlich höhere Spannungen nur geringe Fehler bewirkt werden.

Auch die vereinfachte Berechnung des zyklischen Erwärmungsverhaltens des Bodens über einen «charakteristischen Durchmesser» [4], wobei die einzige Information über den Verlauf des jeweiligen Lastzyklus aus dessen Belastungsgrad gewonnen wird, erlaubt für normale Betriebsbedingungen die Einhaltung einer relativen Fehlerschranke von weniger als 5%. Bei dem zugrunde gelegten, stark vereinfachten Modell des zeitlichen Austrocknungsverhaltens der Kabelgräben bei zyklischer Last und dem normalerweise geringen Informationsstand über die thermisch/hydrologischen Eigenschaften der (gesamten!) jeweiligen Kabeltrasse erscheint eine solche vereinfachte Berechnung nach [4] für den normalen Entwurfsablauf zweckmässig.

Literatur

- [1] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger: Conduction of heat in solids. Oxford, Clarendon Press, 1959.
- [2] S.D. Kholodnyi and V.V. Galan: Calculation of the thermal regimes of cables laid in soil under periodically varying loads. Elektrotechnik (1983)5, S. 45...46 (= russisch).
- [3] H. Brakelmann: Erwärmung zyklisch belasteter Energiekabel. ETZ Archiv 6(1984)9, S. 317...324.
- [4] Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen. VDE-Bestimmung 0298.
- [5] S.D. Holodnyi: Erwärmung und Abkühlung eines in der Erde verlegten Kabels. Elektricestvo (1964)6, p. 35...40 (= russisch).
- [6] M. Abramowitz and I.A. Stegun: Handbook of mathematical functions; with formulas, graphs, and mathematical tables. Edition 8. New York, Dover Publications, 1970.
- [7] Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%). Deuxième édition. Publication de la CEI 287, 1982.
- [8] H. Brakelmann: Belastbarkeiten der Energiekabel. Berechnungsmethoden und Parameteranalyse. Berlin, VDE-Verlag, 1985.
- [9] D. Highgate: A mechanism of liquid-phase moisture migration due to thermal gradients in sand. ERA-Report 84-0025. Leatherhead, Electrical Research Association, 1984.
- [10] H. Brakelmann: Kabelbelastbarkeiten und -temperaturen bei irreversibler Bodenaustrocknung. Elektrizitätswirtschaft 84(1985)11, S. 444...447.
- [11] H.N. Cox and R. Coates: Thermal analysis of power cables in soils of temperature-responsive thermal resistivity. Proc. IEE 112(1965)12, p. 2275...2283.
- [12] J.H. Neher and M.H. McGrath: The calculation of the temperature rise and load of cable systems. Trans. AIEE Part III: Power Apparatus and Systems 76(1957)October, p. 752...772.
- [13] F. Winkler: Strombelastbarkeit von Starkstromkabeln in Erde bei Berücksichtigung der Bodenaustrocknung und eines Tageslastspieles. ETZ Report 13(1978).
- [14] U. Beyer: Berechnung transienter Kabelerwärmungen unter Berücksichtigung möglicher Bodenaustrocknung. Dissertation der Universität Duisburg, 1985.
- [15] U. Beyer: Transiente Kabelerwärmung bei zyklischer Belastung. Bull. SEV/VSE 77(1986)5, S. 251...255.
- [16] Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables. Part I: Cyclic rating factor for cables up to and including 17/30 (36) kV. IEC-draft 20A (CO)93, 1983.
- [17] G. Mainka: Dosierte Bodenaustrocknung bei erdverlegten Energiekabeln. ETZ-A 95(1974)5, S. 279...282.