

Kabelbelastbarkeit als Funktion der Tageslastgangkennlinie

Autor(en): **Brakelmann, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 13

PDF erstellt am: **11.07.2024**

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

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Kabelbelastbarkeit als Funktion der Tageslastgangkennlinie

H. Brakelmann

Betrachtet man den Tageslastverlauf eines Kabels als periodische Funktion, so kann die Erwärmung im homogenen Erdboden analytisch bestimmt werden. Ausgehend vom sogenannten EVU-Lastzyklus nach VDE 0298 berichtet der Autor über Untersuchungen über den Einfluss der Kabelwärmekapazität, die Form der Lastganglinie sowie die Temperaturabhängigkeit der Stromwärmeverluste.

En considérant la courbe de charge d'un câble comme fonction périodique, l'échauffement de celui-ci dans un sol homogène peut être déterminé analytiquement. Partant du cycle de charge EVU, selon VDE 0298, l'auteur présente quelques résultats des recherches concernant l'influence de la capacité thermique des câbles, de la forme de la courbe de charge, ainsi que des pertes par effet Joule en fonction de la température.

1. Einleitung

Zur Berechnung der Belastbarkeiten erdverlegter Energiekabel bei vorgegebener Tageslastgangkennlinie empfiehlt es sich, den resultierenden Verlustleistungszyklus in sinusförmige Teilschwingungen (Fourieranalyse) zu zerlegen, da die Erwärmung einer kreiszylinderförmigen Wärmequelle im (homogenen) Erdboden mit sinusförmigem Verlustleistungszyklus noch analytisch bestimmt werden kann [1].

Ein solches Verfahren ist inzwischen bekannt [2; 3]. Eine für diese Aufgabenstellung günstige Art der Fourierzerlegung sowie Konvergenzuntersuchungen sind in [3] angegeben, ebenso wie ein Vergleich der Rechengenergebnisse für den sog. «EVU-Lastzyklus» nach VDE-Bestimmung 0298 [4] und für einen «synthetischen» Lastverlauf. Vernachlässigt wurden hierbei jedoch noch die inneren Wärmekapazitäten der Kabel sowie die Temperaturabhängigkeit der Stromwärmeverluste.

In der vorliegenden Arbeit wird mit Hilfe eines vervollständigten Verfahrens untersucht,

- inwieweit die Kabelwärmekapazitäten, zumindest für bestimmte Spannungsebenen, vernachlässigt werden können (wie dies dem Tabellenwerk in [4] zugrunde liegt),
- inwieweit die Form der Lastganglinie Einfluss auf die Ergebnisse der Belastbarkeitsberechnung nimmt bzw. inwieweit eine vereinfachte Beschreibung der möglichen Lastgangkennlinien entsprechend [4] zulässig ist, und
- inwieweit die Temperaturabhängigkeit der Stromwärmeverluste das Ergebnis der Belastbarkeitsberechnung beeinflusst.

Insbesondere die Fragestellungen a) und b) spielen bei der derzeitigen Diskussion in den internationalen Gremien eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung der VDE-Rechenmetho-

de, die grosse Vorteile hinsichtlich der Praktikabilität aufweist.

2. Rechenverfahren

Bei der Fourierzerlegung eines vorgegebenen Verlustleistungszyklus $p(t)$ (vgl. Fig. 3) in sinusförmige Teilschwingungen

$$p(t) = \operatorname{Re} \left\{ \lim_{n_{\max} \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{n_{\max}} P_n \cdot \exp[j(n\omega_0 t + \varphi_n)] \right\} \quad (1)$$

P_n	Fourieranteil der Ordnungszahl n ,
n_{\max}	höchste, bei der Approximation berücksichtigte Ordnungszahl,
$\omega_0 = 2\pi/t_0$	Grundswingungskreisfrequenz,
t_0	Zyklusdauer ($t_0 = 24$ h für Tageslastspiel),
φ_n	Phasenwinkel und
t	Zeit

können die Wärmewiderstände und Wärmekapazitäten der einzelnen Kabelaufbauelemente sowie des umgebenden Erdbodens für jede betrachtete Teilschwingungsfrequenz in einem äquivalenten Wechselstromnetzwerk dargestellt werden, dessen Einstromungen den Teilschwingungen der unterschiedlichen Verlustleistungen und dessen Knotenspannungen den Teilschwingungen der gesuchten Temperaturerhöhungen entsprechen (Fig. 1).

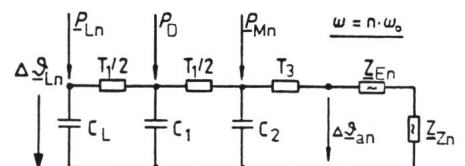


Fig. 1 Wechselstrom-Ersatznetzwerk zur Berechnung der Temperatur-Teilschwingungen der Fourier-Ordnungszahl n

C_L Wärmekapazität des Leiters
 C_1 Wärmekapazität der elektrischen Isolierung
 C_2 Wärmekapazität des Metallmantels und des Korrosionsschutzes
 T_1 Wärmewiderstand der elektrischen Isolierung
 T_3 Wärmewiderstand des Korrosionsschutzes
 Z_{En}, Z_{Zn} Wärmeimpedanzen des Bodens

Adresse des Autors

Privatdozent Dr. Ing. H. Brakelmann, Universität -GH- Duisburg, Fachgebiet Elektrische Energieübertragung, Postfach 101629, D-4100 Duisburg 1.

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

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

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

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

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

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

Die Auflösung des Gleichungssystems (6) liefert für jede Ordnungszahl n die komplexen Teilschwingungen $\Delta\vartheta_n$ 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:

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

Die zeitinvarianten Temperaturerhöhungen $\Delta\vartheta_{j0}$ resultieren aus den dielektrischen Verlusten sowie aus den Gleichanteilen der Stromwärmeverluste. Die Berechnung erfolgt anhand eines Widerstandsnetzwerkes entsprechend Figur 1, wobei die Wärme-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-

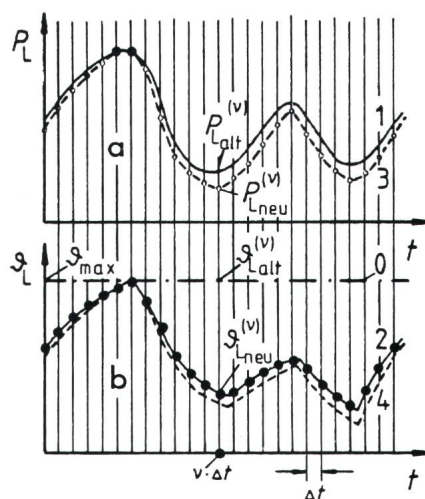


Fig. 2 Prinzipische Skizze zur Korrektur des Leiterverlustzyklus (a) bezüglich seiner Abhängigkeit von der Leitertemperatur (b)
Die Ziffern 0 bis 4 kennzeichnen den Rechenablauf

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

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

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 Äquifluächen 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

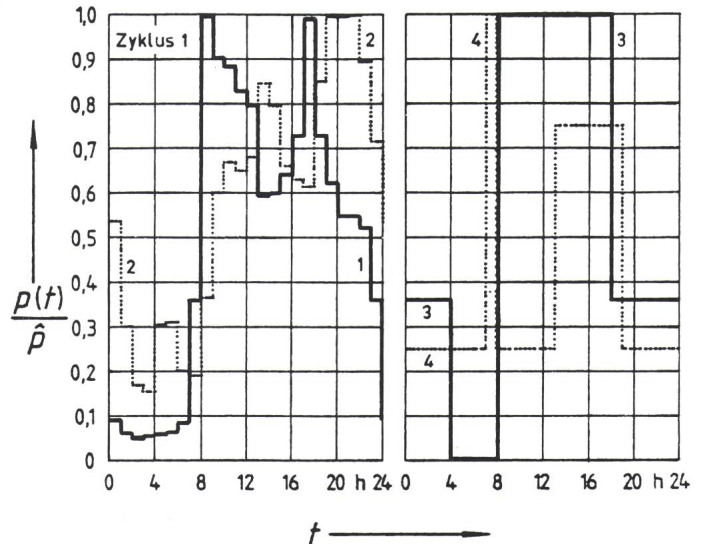
zeitliche Verzögerung einleiten; die Isothermengeometrie bleibt hierbei unverändert, und die Berechnung kann näherungsweise für ein sog. Zweischichtenmodell des Bodens erfolgen [8].

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 Troknenbereich 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 Lastgaskennlinie».

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.

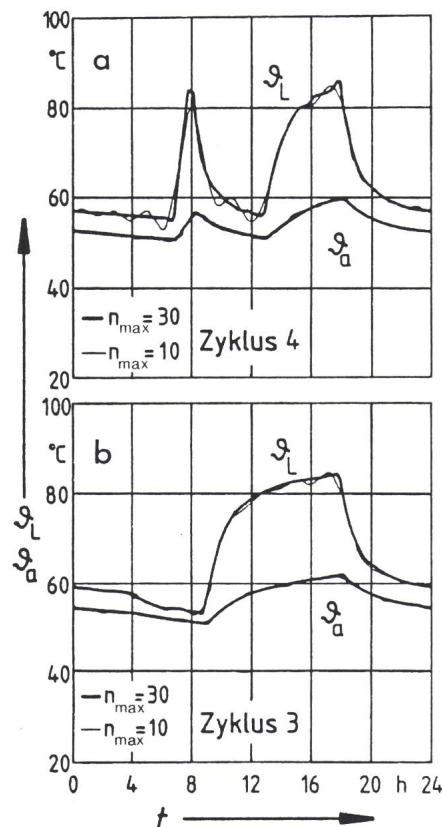


Fig. 4 Zeitlicher Verlauf von Leitertemperatur ϑ_L und Kabeloberflächentemperatur ϑ_a für zwei Verlustleistungszyklen nach Figur 3 und für die maximalen Fourierordnungen $n_{\max} = 10$ und $n_{\max} = 30$

Anhand der kurzzeitigen Lastspitze in Figur 4a wird deutlich, dass eine in [2] vorgeschlagene höchste Ordnungszahl der Fourierreihe 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-

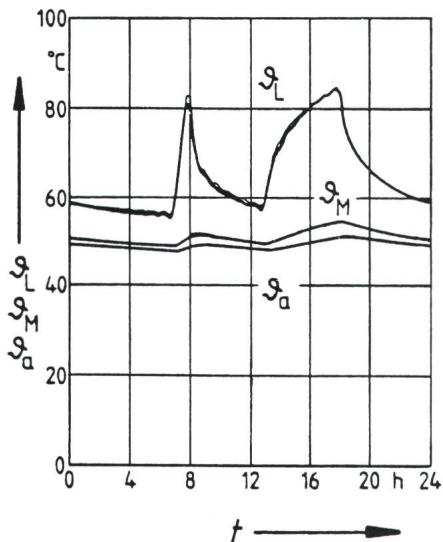


Fig. 5 Zeitlicher Verlauf von Leitertemperatur ϑ_L , Manteltemperatur ϑ_M und Kabeloberflächentemperatur ϑ_a für den Verlustleistungszyklus 4 aus Figur 3

— 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 mm^2

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. austrockneten Bodens betragen $1,0 \text{ K m/W}$ bzw. $2,5 \text{ K m/W}$, 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 Fouriermethode, 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 Fouriermethode ermittelten Belastbarkeiten.

Zu erkennen ist, dass für die Lastzyklen 1 bis 3, für alle Spannungsebenen $U \leq 400 \text{ kV}$ 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 $U \leq 30 \text{ kV}$ [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 $U \leq 220 \text{ kV}$ 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

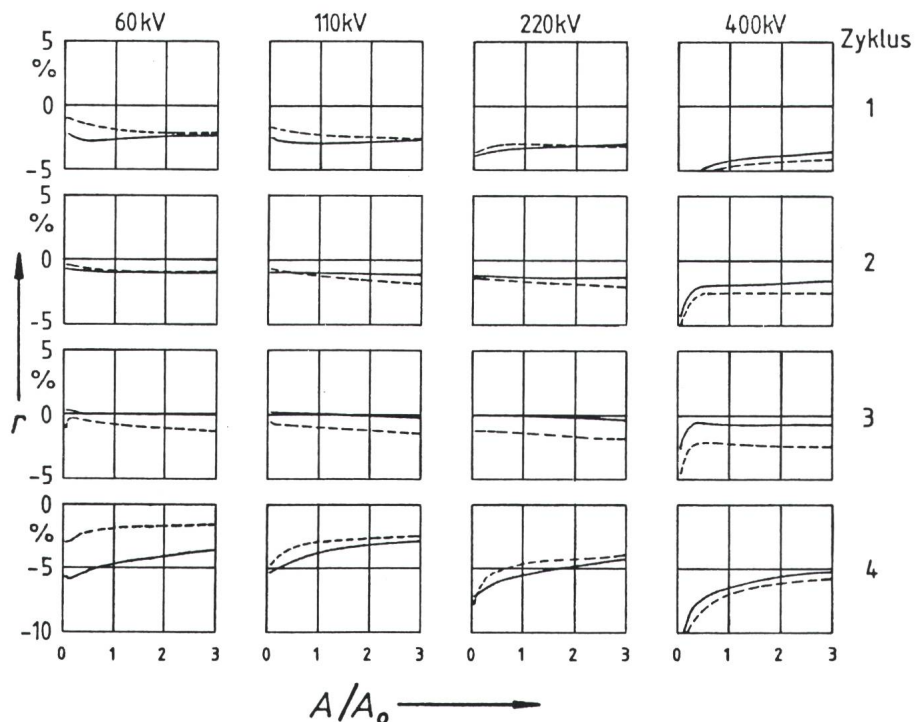


Fig. 6 Relative Abweichungen der Kabelbelastbarkeiten r als Funktion des Kupferleiterquerschnittes ($A_0 = 1000 \text{ mm}^2$)

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

Bezogen wurde auf die Ergebnisse der vollständigen Fouriermethode
 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. *Elektricitstvo* (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 1: 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.