Transiente Kabelerwärmung : ein Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden

Autor(en): **Braun, A.**

Objekttyp: **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): **79 (1988)**

Heft 23

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904116

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Transiente Kabelerwärmung – ein Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden

A. Braun

Zur Berechnung möglicher Überlasten von Kabelsystemen muss deren transientes Erwärmungsverhalten bekannt bzw. berechenbar sein. Im vorliegenden Aufsatz werden drei bislang vorgeschlagene Berechnungsverfahren im Hinblick auf ihre praktische Verwertbarkeit diskutiert.

Pour le calcul des surcharges possibles de systèmes de câbles, il faut connaître ou pouvoir calculer leur comportement transitoire d'echauffement. L'utilisation en pratique de trois procédés de calcul proposés jusqu'ici est examinée.

Der Autor dankt der Felten & Guilleaume Energietechnik AG, Köln, für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Adresse des Autors
Dipl.-Ing. *Axel Braun*, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet «Elektrische Energieübertragung» der Universität-Gesamthochschule Duisburg, Postfach 10 16 29, D-4100 Duisburg 1.

1. Einleitung

Wird ein im Boden verlegtes Kabel zur Energieübertragung herangezogen, so kommt es zu einer Erwärmung des Kabels und der Umgebung. Diese Erwärmung vollzieht sich nicht spontan, sondern bedingt durch die Wärmekapazitäten des Kabels und des Erdreiches mit einem für jedes Kabel anderen zeitlichen Verlauf.

Gestaltet sich die Berechnung der stationären Erwärmung (z.B. nach [1]) noch vergleichsweise einfach, so bereitet die Bestimmung des transienten Temperaturanstieges einige Schwierigkeiten, da auch nichtlineare, zeitabhängige Bodeneffekte (Austrocknung) zu berücksichtigen sind. Die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Kabelerwärmung ist jedoch von entscheidender Bedeutung für die Frage, wie lange ein Kabelsystem mit Überlast betrieben werden kann, ohne die zulässigen Temperaturen in der Isolierung zu überschreiten.

Da zur Berechnung der transienten Erwärmung unterschiedliche Verfahren vorliegen, soll anhand von Beispielen überprüft werden, inwieweit sich die bei einigen Verfahren gemachten Vereinfachungen auf das Rechenergebnis auswirken. Bei den zum Vergleich herangezogenen Verfahren handelt es sich um das Mindestzeitwertverfahren [2], das Verfahren nach IEC-Schriftstück 20A/104 [3], welches auf den Ergebnissen von [9; 10] basiert, sowie ein auf die Berechnung transienter thermischer Felder in Kabelgräben zugeschnittenes Programm basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) [4; 5], wobei letzteres bereits durch Feldmessungen bestätigt worden ist. Weiterhin soll die in [3] angegebene Möglichkeit zur Berechnung einer Überlast mit den Ergebnissen von [4] verglichen werden.

Ein weiteres Verfahren [6], welches die Bodenaustrocknung zwar berücksichtigt, jedoch nicht transient nachführt (persönliche Mitteilung), musste in dem Vergleich unberücksichtigt bleiben, da dieses Verfahren nicht allgemein zugänglich ist.

2. Berechnungsverfahren

Obwohl die im folgenden kurz beschriebenen Berechnungsmethoden stark unterschiedlich sind, kommt es bei der Bestimmung der stationären Temperaturen nur zu geringfügigen Unterschieden, auf die nicht weiter eingegangen werden soll.

2.1 Mindestzeitwertverfahren

Das Mindestzeitwertverfahren [2] leitet den Temperaturanstieg aus einer einfachen Modellvorstellung ab. Es wird vorgeschlagen, die Temperaturerhöhung eines Leiters durch die Beziehung

$$\triangle T(t) = \triangle T_{ges} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \qquad (1)$$

mit

$$\tau = R_{th} \cdot Q$$

$\triangle T(t)$ zeitabhängige Temperaturerhöhung,
$\triangle T_{ges}$ stationäre Temperaturerhöhung nach unendlich langer Belastung,
τ Zeitkonstante,
t Zeit,
R_{th} gesamter Wärmewiderstand von Kabel und Erdboden,
Q gesamte Wärmekapazität des Kabels.

zu berechnen.

Für kurze Lastspiele soll die Zeitkonstante durch den Mindestzeitwert in der Form

$$\tau_K = \frac{\kappa \cdot c \cdot \gamma \cdot \triangle T_n}{1 + \alpha_{20} \cdot \triangle T_n} \cdot \left(\frac{A}{I_n}\right)^2 \qquad (2)$$

mit

κ	spezifische Leitfähigkeit des Leitermaterials,
c	spezifische Wärmekapazität,
γ	Dichte,
$\triangle T_n$	Temperaturerhöhung bei Nennbedingungen,
A	Leiterquerschnitt
I_n	Nennstrom

ersetzt werden.

Die stationäre Übertemperatur, d.h. der gesamte Temperaturhub des Kabels, muss also vorher ermittelt werden. Dies kann nach [1] vorgenommen werden. Eine eventuell auftretende Bodenaustrocknung könnte in erster Näherung durch das Zwei-Schichten-Modell [7] in die Berechnung des Temperaturhubes einfliessen.

2.2 Berechnungsverfahren nach IEC 20A/104

Der transiente Temperaturanstieg nach IEC 20A/104 [3] wird als Summe der Temperaturanstiege von Kabel und Umgebung angesetzt. Das Kabel wird durch ein Ersatzschaltbild gemäss Figur 1 dargestellt. Die Aufbauelemente C_1, C_2, R_{th1}, R_{th2} setzen sich für jeden Kabeltyp anders zusammen.

Unter der Bedingung, dass die Temperaturerhöhung aufgrund der dielektrischen Verluste bereits abgeschlossen ist, ergibt sich der Temperaturanstieg des Leiters gegenüber der äusseren Berandung des Kabels zu

$$\triangle T_1(t) = P'[F_A(1-e^{-a\cdot t}) + F_B(1-e^{-b\cdot t})] \quad (3)$$

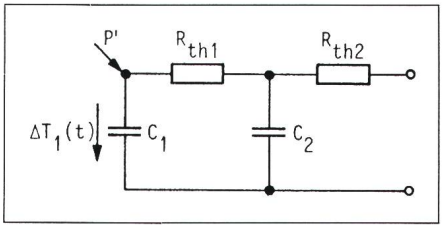
mit

P'	Verlustleistungsbelag des Leiters und
F_A, F_B, a, b	Abkürzungen für längere Ausdrücke aus [3]

Es wird in [3] angenommen, dass sich der Verlustleistungsbelag aus dem Leiterwiderstand bei der für den gegebenen Strom maximal erreichbaren Temperatur bestimmt.

Die Temperaturerhöhung der Umgebung errechnet sich aus einer Summe von Integralexponentialfunktionen. Für die gewählte Verlegeanordnung gilt

$$\triangle T_2(t) = \rho_e \cdot P'_{ges} \cdot \left[-\mathrm{Ei}\left(\frac{-D_k^2}{16\,t\,\delta}\right) + \mathrm{Ei}\left(\frac{-h_k^2}{t\,\delta}\right) + 2\left(-\mathrm{Ei}\left(\frac{-c_k^2}{4\,t\,\delta}\right) + \mathrm{Ei}\left(-\frac{4h_k^2+c_k^2}{4\,t\,\delta}\right)\right)\right] / 4\pi \quad (4)$$



Figur 1 Thermisches Ersatzschaltbild des Kabels

mit

$Ei(x)$	Integralexponentialfunktion,
P'_{ges}	gesamter Verlustleistungsbelag des Kabels, jedoch ohne dielektrische Verluste,
ρ_e	spezifischer thermischer Widerstand des Erdbodens,
δ	Diffusionskonstante,
D_k, h_k, c_k	Geometriegrössen.

Mit Hilfe der Gleichungen (3) und (4) lässt sich die Temperaturerhöhung der heissesten Kabelader bestimmen. Die im vorliegenden Fall gewählte Verlegeanordnung sowie die Bedeutung der verwendeten Geometriegrössen sind aus Figur 2 ersichtlich. Die gesamte Temperaturerhöhung berechnet sich zu:

$$\triangle T_g(t) = \triangle T_1(t) + \alpha(t)\cdot\triangle T_2(t) \quad (5)$$

Der Faktor $\alpha(t)$ berücksichtigt, dass durch die Wärmekapazitäten des Kabels die gesamte Verlustleistung zeitverzögert aus dem Kabel austritt:

$$\alpha(t) = \frac{\triangle T_1(t)}{P'(R_{th1}+R_{th2})} \quad (6)$$

Für Zeiten grösser als 12 h ist $\alpha = 1$, d.h. die Temperaturerhöhung der Umgebung bedingt durch die Stromwärmeverluste geht voll in die Berechnung ein.

Das in Gl. (5) erhaltene Ergebnis muss noch um den Einfluss des sich mit der Temperatur ändernden Leiterwiderstands korrigiert werden:

$$\triangle T_k(t) = \frac{\triangle T_g(t)}{1+\alpha_R(\triangle T(\infty) - \triangle T_g(t))} \quad (7)$$

mit

$$\alpha_R = \frac{\alpha_{20}}{1+\alpha_{20}\cdot(T_S - 20\,°C)}$$

$\triangle T(\infty)$	stationäre Übertemperatur und
T_S	Temperatur zu Beginn der transienten Erwärmung.

Die Temperatur des Leiters erhält man damit zu

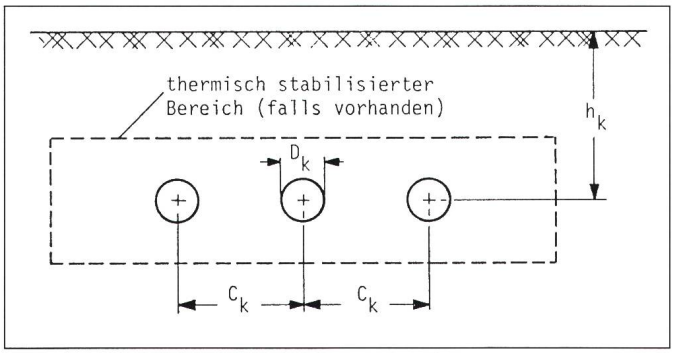
$$T_L(t) = T_U + \triangle T_D + \triangle T_k(t) \quad (8)$$

$T_L(t)$	Temperaturerhöhung des Leiters,
T_U	Umgebungstemperatur,
$\triangle T_D$	Temperaturerhöhung durch dielektrische Verluste und
$\triangle T_K(t)$	Temperaturerhöhung durch stromabhängige Verluste.

Mit dieser Beschreibung des transienten Temperaturanstiegs ist es jedoch unmöglich, nichtlineare Bodenreaktionen (Bodenaustrocknung) zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich der Nachteil, dass nur der Temperaturanstieg eines idealisierten, mit konstanter thermischer Wärmeleitfähigkeit versehenen Bodens errechnet werden kann.

2.3 Finite-Elemente-Verfahren

Mit dem Finite-Elemente-Programm nach [4; 5] ist die Möglichkeit gegeben, den transienten Temperaturanstieg von im Erdboden verlegten Energiekabeln auch bei auftretender Bodenaustrocknung zu bestimmen. Bei dieser Berechnungsmethode wird der betrachtete Feldraum in kleine, mit homogenen Materialeigenschaften versehene Teilbereiche zerlegt. In jedem dieser Teilbereiche wird die Wärmeleitungsgleichung



Figur 2 Verlegeanordnung mit verwendeten Geometriegrössen

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot c} [\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + \dot{q}] \quad (9)$$

mit

$\dot{q}$ Wärmequellendichte,
ρ Dichte,
c spezifische Wärmekapazität und
λ Wärmeleitfähigkeit

gelöst.

Durch die grosse Anzahl der Teilbereiche ergibt sich ein lineares Gleichungssystem von hohem Rang. Nach Lösung dieses Gleichungssystems liegen die Temperaturen zu jedem Zeitschritt in den Eckpunkten der Teilbereiche vor.

Das FEM-Programm ist zwar aufwendig bezüglich Rechenzeit und Speicherplatz, es eignet sich jedoch insbesondere zur Berechnung von Feldern mit inhomogenen Materialeigenschaften. So kann die Bodenaustrocknung auf unterschiedliche Arten berücksichtigt werden, z.B. mit der Annahme, dass die Bodenaustrocknung spontan nach Erreichen einer Grenzübertemperatur eintritt, oder verzögert, erst nachdem eine zur Austrocknung nötige Wärmemenge durch das auszutrocknende Bodenelement geflossen ist.

Darüber hinaus können thermisch stabilisierte Bereiche nachgebildet sowie sämtliche gängigen Verlegeanordnungen, auch mit mehreren verlegten Systemen, in die Betrachtung einbezogen werden.

Durch eine inzwischen vorgenommene Erweiterung des Programms ist es nun auch möglich, das mit dem Temperaturfeld verkoppelte Feuchtefeld zu berechnen [8].

3. Ergebnisse der Vergleichsrechnungen

Die Berechnungen der transienten Temperaturanstiege wurden für ein Kabel mit einer Verlegeanordnung gemäss Tabelle I durchgeführt.

Als Wärmeleitfähigkeit wurde, um einen Vergleich zu ermöglichen, für den gesamten Erdboden die Leitfähigkeit eines bereits ausgetrockneten, thermisch stabilisierten Bodens (1,2 mK/W) angesetzt. Dies wäre eine brauchbare Näherung für einen Kabelgraben mit einer weitreichenden thermischen Stabilisierung.

Der Erwärmungsvorgang des Kabelleiters der heissesten Ader ist für einen Lastsprung von 0 auf 100% in Figur 3 dargestellt. Der Strom (I = 1453 A), bei dem nach unendlich langer Zeit die zulässige Leitertemperatur von 358 K erreicht wird, wurde aus einer Berechnung nach [1] ermittelt und als 100%-Last zugrundegelegt. Die Temperaturen zum Zeitpunkt $t = 0$ unterscheiden sich von der Umgebungstemperatur, da bereits eine Erwärmung durch die dielektrischen Verluste stattgefunden haben soll.

Aus Figur 3 ist ersichtlich, dass die mit dem Mindestzeitwertverfahren berechnete Temperaturerhöhung zu schnell vonstatten geht, so dass darauf basierende Überlastberechnungen zuviel Sicherheit enthalten. Die in IEC vorgeschlagene Methode liefert dagegen eine sehr gute Annäherung an den durch das Finite-Elemente-Verfahren ermittelten Temperaturverlauf. Weitere, für zeitlich und räumlich konstante Bodenparameter durchgeführte Berechnungen bestätigen dieses Ergebnis.

Da der Einfluss sich ändernder Bodeneigenschaften durch [2] und [3] nur bedingt oder gar nicht in die Betrachtung einbezogen werden kann, soll mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms in Figur 4 demonstriert werden, was bei verzögerter Bodenaustrocknung bzw. thermisch stabilisiertem Bereich mit verzögerter Bodenaustrocknung im Vergleich zu konstanter Bodenleitfähigkeit bei Beaufschlagung mit einem Lastsprung entsprechend dem aus Figur 3 geschieht.

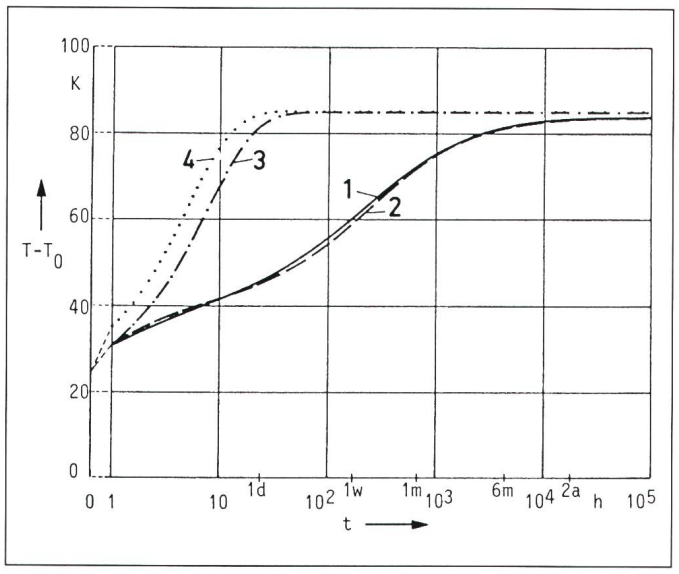
Die Abweichung des Temperaturverlaufs (Fig. 4) mit konstanter thermischer Bodenleitfähigkeit (Kennlinie 3) zur verzögerten Bodenaustrocknung (Kennlinie 2) ist erwartungsgemäss gross, da die höchste zu übertragende Leistung bei konstanter thermischer Bodenleitfähigkeit von 1,2 mK/W oberhalb der Leistung liegt, die bei partieller Bodenaustrocknung maximal übertragen werden kann. Der Temperaturanstieg bei thermisch stabilisiertem Bereich (Kennlinie 1) weicht hingegen nur geringfügig ab.

Figur 5 zeigt den transienten Temperaturanstieg für einen 100%-Lastsprung bei verzögerter Bodenaustrocknung (Kennlinie 1). Die mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms ermittelte Last (I = 1236 A) wird zur Tempera-

Aufbau-element	Grösse	Einheit	natürlich gekühltes Kabel
Kabel	Nennspannung	kV	110
	Hohlkanaldurchmesser	mm	16
	Leitermaterial	-	Kupfer
	Leiterquerschnitt	mm²	2000
	Leiterfüllfaktor	-	0,85
	zul. Leitertemperatur	K	358
	Isolierungswandstärke	mm	10
	Dielektrizitätszahl	-	3,6
	Verlustfaktor der Isolierung	-	0,003
	spez. therm. Widerstand der Isol.	mK/W	5
	Höhe des Mantels	mm	2,7
	Mantelverlustfaktor	-	0,1
	Dicke des Korrosionsschutzes	mm	5
	spez. therm. Wid. Korrosionsschutz	mK/W	6
Verlege-anordnung	Ader-Achsabstand Kabel	mm	400
	Verlegetiefe Kabel	mm	1200
Bodeneigen-schaften	Umgebungstemperatur	K	293
	Austrocknungstemperatur	K	308
	spezifischer therm. Widerstand	mK/W	1,2 [1]
	spez. therm. Wid. feuchter Boden	mK/W	1 [2]
	spez. therm. Wid. trockener Boden	mK/W	2,5 [2]
	therm. Stabilisierung: Breite	m	1,6 [2]
	therm. Stabilisierung: Höhe	m	0,8–1,6 [2]
	spez. therm. Widerstand feucht	mK/W	1 [2]
	spez. therm. Widerstand trocken	mK/W	1,2 [2]
	spez. therm. Wid. feuchter Boden	mK/W	1 [3]
	spez. therm. Wid. trockener Boden	mK/W	2,5 [3]

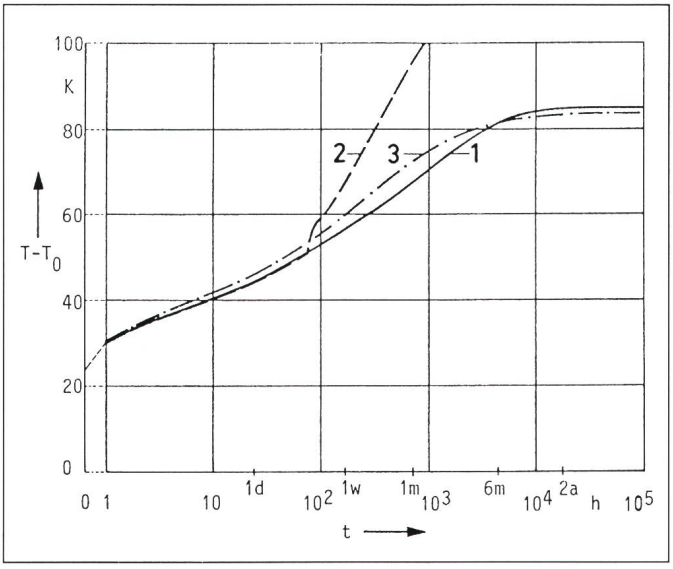
Tabelle I Daten der untersuchten Kabelanlage

[1] zu Figur 3 [2] zu Figur 4 [3] zu Figur 5



Figur 3 Transiente Übertemperatur des Leiters

1 Finite-Elemente-Programm
2 IEC-Schriftstück 20A/104
3 Mindestzeitwertverfahren, volle Zeitkonstante
4 Mindestzeitwertverfahren, kurze Belastungszeit
Erdbodeneigenschaften gemäss Tabelle I



Figur 4 Transiente Übertemperatur

Berechnet mit der FEM, für:
1 thermisch stabilisierten Bereich
2 verzögerte Bodenaustrocknung ohne stabilisierten Bereich
3 konstante, temperaturunabhängige Erdbodenleitfähigkeit, ρ = 1,2 mK/W
Übrige Erdbodeneigenschaften gemäss Tabelle I

turberechnung nach IEC für komplett feuchten Boden und komplett trockenen Boden benutzt.

Der durch die Bodenaustrocknung hervorgerufene starke Anstieg in der Leitertemperatur ($t \approx$ 1 Woche) ist in der Kennlinie 1 deutlich zu erkennen. Die Austrocknungstemperatur von 308 K an der Kabeloberfläche entspricht einer Leitertemperatur von etwa 318 K. Der Temperaturanstieg wird bis zu diesem Zeitpunkt von der Kennlinie 2 gut wiedergegeben. Danach können die realen Verhältnisse durch Kennlinie 2, wie auch durch Kennlinie 3 (trockener Boden) im gesamten Bereich, nicht mehr in befriedigender Näherung beschrieben werden.

4. Überlast

In [3] wird vorgeschlagen, mit Hilfe der transienten Temperaturkennlinie den Überstrom zu berechnen, der eine vorgegebene Zeitspanne anstehen darf, und bei dem am Ende des Zeitintervalls die zulässige Temperatur an der Isolierung erreicht wird. Das Wissen um diese Überlast ist vorteilhaft, wenn z.B. ein Kabelsystem ausgefallen ist und ein parallel betriebenes System für die Dauer der Reparatur mit höherer Last gefahren werden muss.

Soll die Temperatur des Leiters zum Zeitpunkt $t = \tau$ die zulässige Grenze erreichen, so bestimmt sich der Überstrom [3] zu:

$$I_{ü} = I_n \left[\frac{h^2 \cdot R_v}{R_m} + \frac{1 - h^2 \cdot R_v / R_m}{\triangle T_g(\tau) / \triangle T_m} \right]^{0,5} \qquad (10)$$

mit

$$\triangle T_m = T_m - T_U - \triangle T_D,$$
$$h = I_l / I_n$$

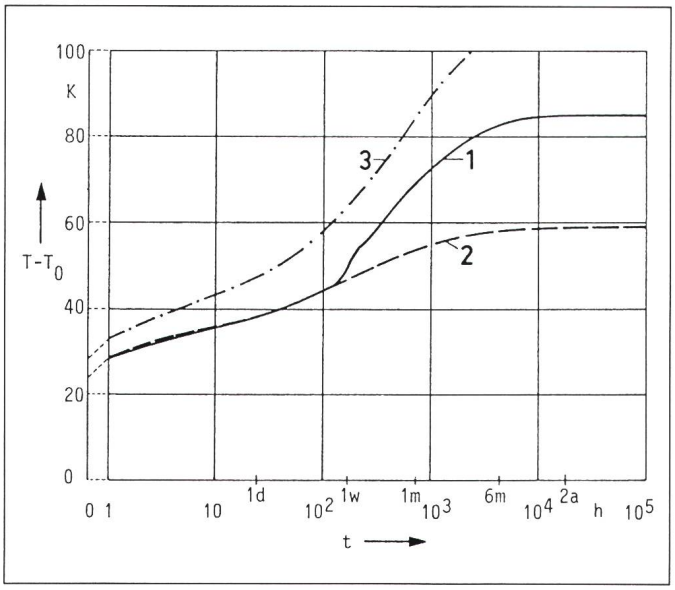
I_n Nennstrom,
I_l Vorbelastungsstrom,
R_v Wechselstromwiderstand des Leiters bei I_l,
R_m Wechselstromwiderstand des Leiters bei I_n und
T_m maximal zulässige Temperatur in der Isolierung.

Für unterschiedliche Vorbelastungen und Zeitintervalle sind die Überströme berechnet und in Tabelle II eingetragen worden. Diese Ströme wurden als Lastsprung in das Finite-Elemente-Programm eingesetzt. Die Zeiten, nach denen die Temperatur in der Isolierung die zulässige Grösse erreicht, sowie die Temperatur zu den vorgegebenen Zeiten sind ebenfalls angegeben. Die zur Ermittlung von $\triangle T_g(\tau)$ benutzten Erdbodenleitfähigkeiten sind in Spalte 1 vermerkt.

Die Grössen für den Fall konstanter Bodenleitfähigkeit sowie für den Fall

Figur 5 Transiente Übertemperatur des Leiters

1 FEM, verzögerte Bodenaustrocknung (Bodeneigenschaften: Tabelle I)
2 IEC, Erdbodenleitfähigkeit ρ = 1,0 mK/W
3 IEC, Erdbodenleitfähigkeit ρ = 2,5 mK/W



der thermischen Stabilisierung bieten ein gewisses Mass an Sicherheit, wie sich anhand der mit Hilfe der FEM ermittelten Werte leicht nachvollziehen lässt. Für ein im Boden verlegtes, natürlich gekühltes Kabel, bei dem Bodenaustrocknung auftreten kann, sind die nach IEC bestimmten Grössen jedoch stark abweichend von den wahren Gegebenheiten. Sie können insbesondere nicht mehr auf der sicheren Seite liegen. Wird die Bodenaustrocknung bei der Berechnung des Nennstromes berücksichtigt, z.B. durch das Zwei-Schichten-Modell, die übrigen Parameter (h, R_v, $\triangle T_g(\tau)$) jedoch wie für feuchten Boden bestimmt, so liegen die berechneten Überlasten wieder deutlich auf der sicheren Seite.

5. Zusammenfassung

Wie die vorangegangenen Ausführungen zeigen, ist das Mindestzeitwertverfahren zwar sehr einfach, aufgrund der gemachten Vereinfachungen jedoch nicht in der Lage, den Temperaturanstieg ausreichend zu beschreiben. Die Temperatur steigt zu schnell, so dass bei einem Lastsprung die Zeit bis zum Erreichen der kritischen Temperatur zu gering bestimmt und damit ein deutliches Mass an Überlast verschenkt wird.

Das Verfahren aus IEC-Schriftstück 20A/104 eröffnet die Möglichkeit, den transienten Temperaturanstieg von im Boden verlegten Hochspannungskabeln mit begrenztem Aufwand zu bestimmen. Die damit erhaltenen Kennlinien geben den Temperaturanstieg bei zeitlich und räumlich konstanten Bodeneigenschaften sehr gut wieder. Bei sich ändernden Bodeneigenschaften werden die Abweichungen jedoch ab einem bestimmten Punkt, bei dem Bodenaustrocknung einsetzt, sehr gross. Der sich einstellende Fehler kann damit auch die Bestimmung einer Überlast verfälschen. Bei einem thermisch stabilisierten Bereich lässt sich aber eine befriedigende bis gute Übereinstimmung erzielen.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die von IEC vorgeschlagene Rechnung auch auf Kleinrechnern zu programmieren ist und zur Not mit Hilfe von Tabellen und Taschenrechner auch von Hand gelöst werden kann, bietet sie einen guten Anhaltspunkt für die überschlägige Berechnung des transienten Temperaturanstiegs von im Boden verlegten Energiekabeln, solange keine Bodenaustrocknung eintritt.

Bodeneigenschaften	Vorgegebene Grössen		Berechnete Grössen		
			Gl. (10)	FEM-Programm	
	Strom	Zeitspanne	Überstrom	Zeit bis 358 K erreicht	Übertemperatur nach t_{vor}
	I_{vor}	t_{vor}	$I_ü$	t(358 K)	(T-273 K)
	A	h	A	h	K
Boden überall nicht thermisch stabilisiert, konstante Bodenleitfähigkeit ρ=1,2 mK/W IEC: ρ=1,2 mK/W	800	6	2360	9,7	80,3
	1000	6	2186	10,1	80,8
	1200	6	1941	11,0	81,8
	800	96	1828	112,0	83,3
	1000	96	1749	117,0	83,3
	1200	96	1643	138,0	82,9
thermisch stabilisierter Bereich ρ_f=1,0 mK/W ρ_t=1,2 mK/W Erdboden ρ_f=1,0 mK/W ρ_t=2,5 mK/W IEC: ρ=1,2 mK/W	800	6	2360	18,0	76,0
	1000	6	2186	15,0	77,8
	1200	6	1941	16,0	79,7
	800	96	1828	190,0	76,8
	1000	96	1749	168,0	79,2
	1200	96	1643	156,0	81,5
Boden nicht thermisch stabilisiert, Bodenaustrocknung ρ_f=1,0 mK/W ρ_t=2,5 mK/W IEC: ρ=1,0 mK/W	800	6	2469	6,5	83,0
	1000	6	2331	2,8*	99,4
	1200	6	2143	0,4*	112,8
	800	96	1931	30,0*	111,8
	1000	96	1871	11,0*	116,8
	1200	96	1791	0,8*	127,2
Wie vor, jedoch Bodenaustrocknung bei Nennstrom berücksichtigt	800	6	1901	33,4	61,0
	1000	6	1795	15,0	76,2
	800	96	1487	208,0	72,6
	1000	96	1440	165,0	79,7

Tabelle II Nach IEC berechnete Überströme sowie mit der FEM ermittelte Werte

* vorgegebene Zeitspanne wird unterschritten

Von den bislang vorgestellten Verfahren ist einzig das Finite-Elemente-Verfahren in der Lage, den Temperaturanstieg auch bei Bodenaustrocknung und für stabilisierte Bereiche sowie verschiedene Verlegeanordnungen zuverlässig zu erfassen. Die Komplexität des Prinzips bedingt jedoch den Einsatz leistungsfähiger Rechner, eine Berechnung «von Hand» ist nicht mehr möglich.

Literatur

[1] Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%). Publication de la CEI 287, deuxième édition, 1982.

[2] *L. Heinhold:* Kabel und Leitungen für Starkstrom. 3. Auflage. Berlin und München, Siemens AG, 1969.

[3] Calcul des capacités de transport des câbles pour les régimes de charge cycliques et de surcharge de secours. Deuxième partie: Régime cyclique pour des câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV et régimes de secours pour des câbles de toutes tensions. Projet de publication de la CEI 853-2. CEI-document 20A (Bureau Central) 104-I et 104-II, décembre 1986.

[4] *U. Beyer:* Berechnung transienter Kabelerwärmungen unter Berücksichtigung möglicher Bodenaustrocknung. Dissertation der Universität GH Duisburg, 1985.

[5] *U. Beyer:* Transiente Kabelerwärmung bei zyklischer Belastung. Bull. SEV/VSE 77(1986)5, S. 251...255.

[6] *F.-J. Kosmann* und *W.-D. Schuppe:* Belastbarkeit von Kabeltrassen. ETZ 103(1982)5, S. 248...253.

[7] *H. Brakelmann:* Belastbarkeiten der Energiekabel. Berechnungsmethoden und Parameteranalysen. Berlin/Offenbach, VDE-Verlag, 1985.

[8] *C. Eberlein:* Berechnung thermischer Felder in Kabelgräben unter Berücksichtigung des Austrocknungsverhaltens im Erdboden. ETZ-Archiv 9(1987)8, S. 251...254.

[9] Capacités de transport des câbles pour les régimes de charge cycliques et de secours d'urgence. Première partie: Capacités de transport cycliques (facteur de charge inférieur à 100%) et réponse à l'applicaton d'un échelon. Electra (1972)24, p. 63...97.

[10] Capacités de transport des câbles pour les régimes de charge cycliques et de secours d'urgence. Deuxième partie: Régimes de secours et réponse de courte durée à l'application d'un échelon unité (pour des durées inférieures à celles considérées dans la première partei et pouvant descendre jusqu'à dix minutes). Electra (1976)44, p. 3...16.