

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Zeitschrift:</b> | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses |
| <b>Herausgeber:</b> | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen  |
| <b>Band:</b>        | 79 (1988)   |
| <b>Heft:</b>        | 23  |
| <b>Artikel:</b>     | Transiente Kabelerwärmung : ein Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden   |
| <b>Autor:</b>       | Braun, A.   |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-904116">https://doi.org/10.5169/seals-904116</a>   |

### 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:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://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 berück-

sichtigt, 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

$$\Delta T(t) = \Delta T_{\text{ges}} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

mit

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

$\Delta T(t)$  zeitabhängige Temperaturerhöhung,  
 $\Delta T_{\text{ges}}$  stationäre Temperaturerhöhung nach unendlich langer Belastung,  
 $\tau$  Zeitkonstante,  
 $t$  Zeit,  
 $R_{\text{th}}$  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

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

mit

|              |  |
|--------------|--|
| $\kappa$     | spezifische Leitfähigkeit des Leitermaterials, |
| $c$          | spezifische Wärmekapazität, Dichte,            |
| $\Delta T_n$ | 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 Be- randung des Kabels zu

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

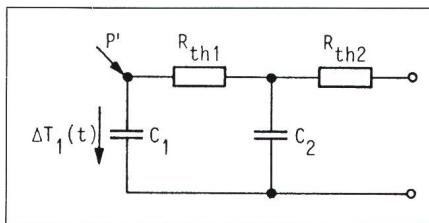
mit

|                  |   |
|------------------|---|
| $P'$             | 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

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



Figur 1 Thermisches Ersatzschaltbild des Kabels

mit

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

Mit Hilfe der Gleichungen (3) und (4) lässt sich die Temperaturerhöhung der heissten 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:

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

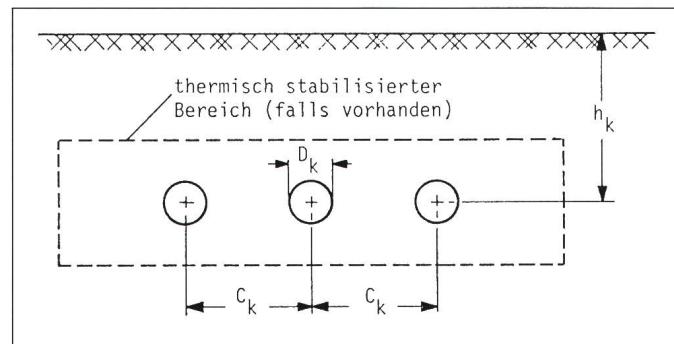
Der Faktor  $\alpha(t)$  berücksichtigt, dass durch die Wärmekapazitäten des Kabels die gesamte Verlustleistung zeitverzögert aus dem Kabel austritt:

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

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

Figur 2  
Verlegeanordnung  
mit verwendeten  
Geometriegrössen



mit der Temperatur ändernden Leiterwiderstands korrigiert werden:

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

mit

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

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

Die Temperatur des Leiters erhält man damit zu

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

$T_L(t)$  Temperaturerhöhung des Leiters,  $T_U$  Umgebungstemperatur,  $\Delta T_D$  Temperaturerhöhung durch dielektrische Verluste und  $\Delta T_k(t)$  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

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

mit

$\dot{q}$  Wärmequellendichte,  
 $\rho$  Dichte,  
 $c$  spezifische Wärmekapazität und  
 $\lambda$  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 ( $1,2 \text{ mK/W}$ ) 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 Fi-

gur 3 dargestellt. Der Strom ( $I = 1453 \text{ A}$ ), bei dem nach unendlich langer Zeit die zulässige LeiterTemperatur von  $358 \text{ K}$  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 zu viel 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 verzögter Bodenaustrocknung bzw. thermisch stabilisiertem Bereich mit verzögter 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  $1,2 \text{ mK/W}$  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 verzögter Bodenaustrocknung (Kennlinie 1). Die mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms ermittelte Last ( $I = 1236 \text{ A}$ ) wird zur Tempera-

| Aufbau-element      | Grösse                             | Einheit         | natürlich gekühltes Kabel |
|---------------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Kabel               | Nennspannung                       | kV              | 110                       |
|                     | Hohlkanaldurchmesser               | mm              | 16                        |
|                     | Leitermaterial                     | -               | Kupfer                    |
|                     | Leiterquerschnitt                  | mm <sup>2</sup> | 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

<sup>1</sup> zu Figur 3

<sup>2</sup> zu Figur 4

<sup>3</sup> zu Figur 5

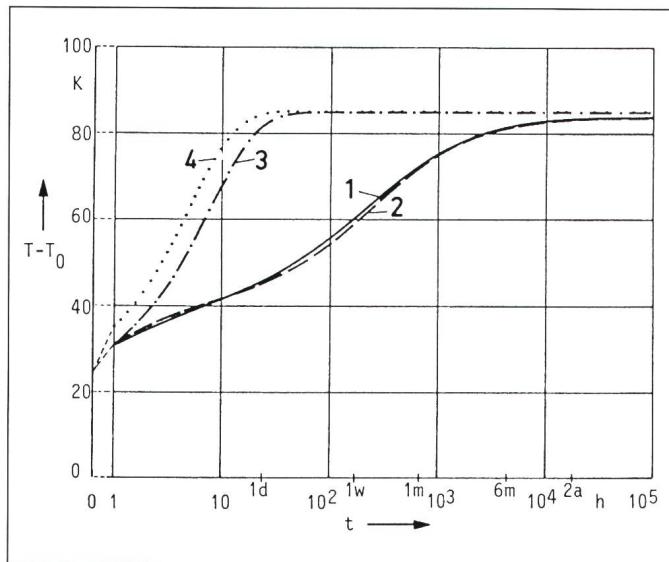


Figure 3 Transiente Übertemperatur des Leiters

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

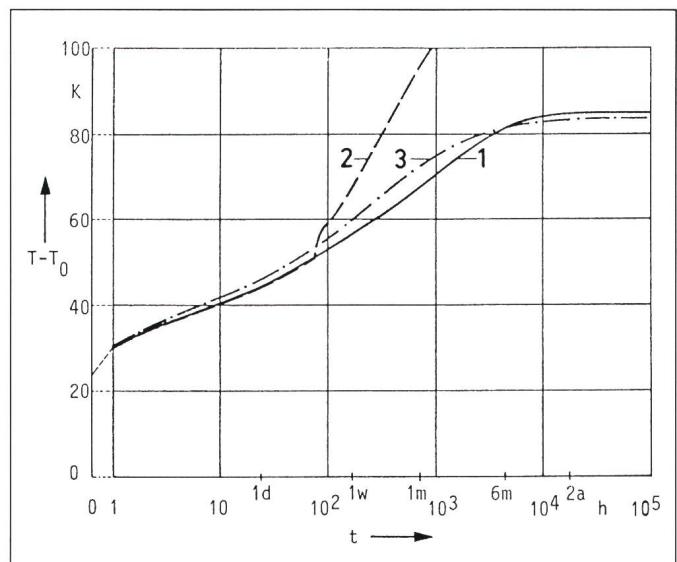


Figure 4 Transiente Übertemperatur

- Berechnet mit der FEM, für:
- 1 thermisch stabilisierten Bereich
  - 2 verzögerte Bodenaustrocknung ohne stabilisierten Bereich
  - 3 konstante, temperaturunabhängige Erdbodenleitfähigkeit,  $\rho = 1,2 \text{ mK/W}$
- 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 transienden 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:

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

mit

$$\Delta T_m = T_m - T_U - \Delta T_D,$$

$$h = I_1 / I_n$$

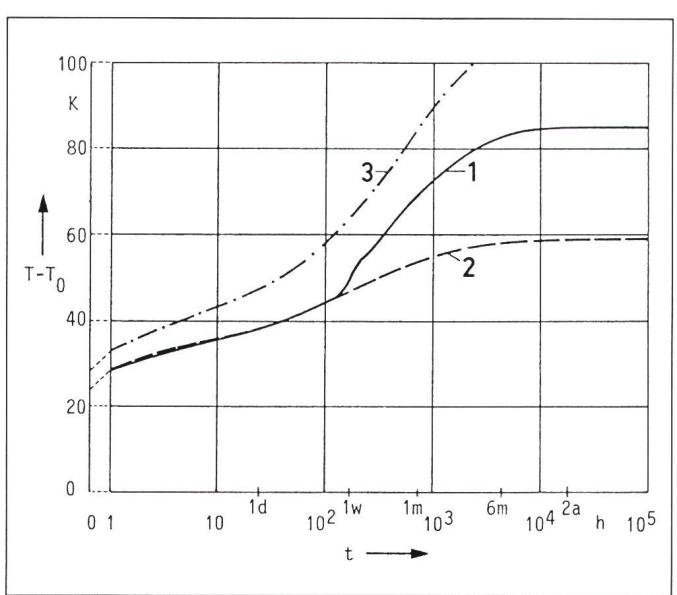
- $I_n$  Nennstrom,  
 $I_1$  Vorbelastungsstrom,  
 $R_v$  Wechselstromwiderstand des Leiters bei  $I_1$ ,  
 $R_m$  Wechselstromwiderstand des Leiters bei  $I_n$  und  
 $T_m$  maximal zulässige Temperatur in der Isolierung.

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  $\Delta T_g(\tau)$  benutzten Erdbodenleitfähigkeiten sind in Spalte 1 vermerkt.

Die Grössen für den Fall konstanter Bodenleitfähigkeit sowie für den Fall

Figure 5  
Transiente  
Übertemperatur  
des Leiters

- 1 FEM, verzögerte Bodenaustrocknung (Boden-eigenschaften: Tabelle I)
- 2 IEC, Erdbodenleitfähigkeit  $\rho = 1,0 \text{ mK/W}$
- 3 IEC, Erdbodenleitfähigkeit  $\rho = 2,5 \text{ mK/W}$



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

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. Brakermann: 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'application 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 partie et pouvant descendre jusqu'à dix minutes). Electra (1976)44, p. 3...16.

## 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. Heinholt: 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