Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 9

Artikel: Zur Anpassung der Induktivität von Schwingkristallen in Filterschaltungen

Autor: Herzog, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915818

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: 10.07.2025

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

Zur Anpassung der Induktivität von Schwingkristallen in Filterschaltungen [1])

Von *W. Herzog*, Mainz

621.372.54:621.373.5

Es wird gezeigt, dass die Brückenanordnung eine weit grössere Erhöhung der Kristallinduktivität ermöglicht als die bekannte Anordnung von Watanabe. Letztere lässt sich durch Vereinfachung aus der Brückenanordnung gewinnen. Die Anwendungsmöglichkeiten werden eingeschränkt durch die Verringerung des Abstandes von Parallel- und Serienresonanzfrequenz. Ein Zahlenbeispiel erläutert das Verfahren.

On démontre que le montage en pont permet une augmentation sensiblement plus forte de l'inductance cristalline que la disposition connue de Watanabe. Cette dernière peut être réalisée par des simplifications du montage en pont. Les facultés d'application sont limitées par la diminution de l'écart des fréquences de résonance en parallèle et en série. Un exemple numérique illustre le procédé.

1. Zum Problem

Bei der Berechnung von Filterschaltungen werden häufig zwei Anforderungen an die Induktivität der Schwingkristalle gestellt:

a) Die Induktivität soll möglichst niedrig sein;
b) Die Induktivität soll bei einer Frequenz in einem grossen Bereich herstellbar sein.

Die erste Anforderung ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Einige Möglichkeiten lassen sich der Literatur entnehmen [1; 2; 3][2]).

Die zweite Anforderung findet sich u.a. bei steilen Tief- und Hochpässen mit dicht an der Grenzfrequenz liegenden Polstellen und bei Bandfiltern mit steiler Flanke und unsymmetrisch verteilter Polstellenanzahl. Ein Induktivitätsverhältnis von 1 : 27 — das im allgemeinen mit Schwingquarzen nicht herstellbar ist — kann man durch Einführung komplexer Pole auf einen herstellbaren Wert verringern [4], doch wird hierbei der Dämpfungsverlauf ungünstiger.

Die Erfüllung der zweiten Anforderung gelingt mit der Anordnung von *Watanabe* [5] (Fig. 4a), die eine Erhöhung der Kristallinduktivität gestattet. Dieser Schaltung sind jedoch dadurch Grenzen gesetzt, dass die erforderliche Kapazität C_2 (Fig. 4a) oft zu kleine Werte benötigt. Einen grösseren Bereich ermöglicht der Einbau eines Schwingkristalls in die Brücke einer Brückenanordnung [6; 7] (Fig. 3a). Man kann dieses bereits daran erkennen, dass eine Vereinfachung der Brückenanordnung (z.B. $X_1 = \infty$) in die Schaltung von *Watanabe* überführt.

Im folgenden sei die Brückenanordnung berechnet.

2. Die Brückenanordnung mit Schwingkristall

Wie man der Fig. 1 leicht entnehmen kann, gilt für den Scheinwiderstand $\bar{X}$ der Brücke [6]:

$$\bar{X} = \frac{\dfrac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} + X}{1 + \dfrac{4}{X_1 + X_2} X} \tag{1}$$

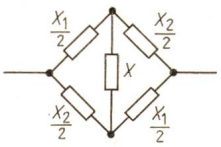

Fig. 1
Scheinwiderstand X in einer Reaktanzbrücke

Setzt man in dieser Anordnung

$$X_1 = \infty \tag{2}$$

so wird aus Gl. (1):

$$\bar{X}' = X_2 + X \tag{3}$$

welche in Fig. 2 wiedergegeben ist.

Eine Erweiterung der Brücke auf drei oder vier verschiedene Zweige erhöht die Möglichkeiten, doch dürfte die in Fig. 1 angegebene Brücke ausreichen, so dass die vorliegende Darstellung genügt.

Setzt man für X die Ersatzschaltung eines Schwingkristalls und für X_1 und X_2 Kapazitäten ein:

$$X = -\frac{1}{\omega C'} \cdot \frac{\dfrac{\omega R}{\mathrm{j} L} + \omega^2 - \dfrac{1}{L C}}{\dfrac{\omega R}{\mathrm{j} L} + \omega^2 - \dfrac{1}{L C}\left(1 + \dfrac{C}{C'}\right)} = -\frac{1}{\omega C'} \cdot \frac{\dfrac{\omega R}{\mathrm{j} L} + \omega^2 - \omega_s^2}{\dfrac{\omega R}{\mathrm{j} L} + \omega^2 - \omega_p^2} \tag{4}$$

$$X_1 = -\frac{1}{\omega C_1} \qquad X_2 = -\frac{1}{\omega C_2} \tag{5}$$

so wird aus Fig. 2 die Anordnung nach *Watanabe* (Fig. 4a) und aus Fig. 1 die zu untersuchende Anordnung Fig. 3a.

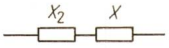

Fig. 2
Scheinwiderstand X in Reihe mit einer Reaktanz

Bekanntlich lässt sich Fig. 4a in Fig. 4b überführen, also wieder in das Ersatzbild eines Schwingkristalls. Hierbei ändern sich alle Grössen in der zuerst von *Watanabe* festgestellten Weise.

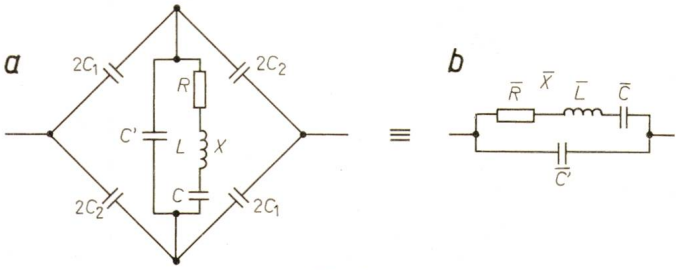

Fig. 3
Brücke mit Schwingkristall und Ersatzbild
C, C', C_1, C_2 Kapazitäten L Induktivität; R Verlustwiderstand; X Scheinwiderstand

[1]) Mitteilung des Instituts für Elektrotechnik der Universität Mainz.
[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Vereinfacht man die Anordnung Fig. 1, indem man X_1 gegen unendlich gehen lässt — oder in Fig. 3a C_1 gegen null, so entsteht Fig. 2 bzw. 4a. Die Anordnung von *Watanabe* ist also ein Spezialfall der Anordnung in Fig. 3a (s. Abschnitt 3).

Auch die Anordnung in Fig. 3a lässt sich in das Ersatzbild X eines Schwingkristalls überführen, wie im folgenden gezeigt werden soll.

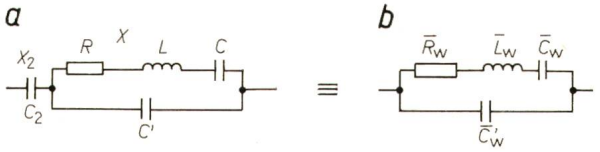

Fig. 4
Schwingkristall mit Reihenkapazität und Ersatzbild
C_w', C_2 Kapazitäten; L_w Induktivität; R_w Verlustwiderstand; X_2 Scheinwiderstand der Schaltung

Setzt man die Gln. (4) und (5) in Gl. (1) ein, so erhält man nach einfacher Rechnung die Formel

$$\bar{X} = -\frac{1}{\omega \cdot \dfrac{(C_1 + C_2)\,C' + 4\,C_1\,C_2}{C' + C_1 + C_2}} \cdot \frac{\dfrac{\omega R}{\mathrm{j} L} + \omega^2 - \dfrac{1}{L\,C} \cdot \dfrac{C' + C + C_1 + C_2}{C' + C_1 + C_2}}{\dfrac{\omega R}{\mathrm{j} L} + \omega^2 - \dfrac{1}{L\,C} \cdot \dfrac{(C' + C)(C_1 + C_2) + 4\,C_1\,C_2}{C'(C_1 + C_2) + 4\,C_1\,C_2}} \tag{6}$$

die formal der Beziehung (4) entspricht und durch Fig. 3b dargestellt werden kann. Die Formel für die Anordnung Fig. 3b lautet entsprechend Gl. (4):

$$\bar{X} = -\frac{1}{\omega\,\bar{C}'} \cdot \frac{\dfrac{\omega \bar{R}}{\mathrm{j} \bar{L}} + \omega^2 - \dfrac{1}{\bar{L}\,\bar{C}}}{\dfrac{\omega \bar{R}}{\mathrm{j} \bar{L}} + \omega^2 - \dfrac{1}{\bar{L}\,\bar{C}}\left(1 + \dfrac{\bar{C}}{\bar{C}'}\right)} = -\frac{1}{\omega\,\bar{C}'} \cdot \frac{\dfrac{\omega \bar{R}}{\mathrm{j} \bar{L}} + \omega^2 - \bar{\omega}_s^2}{\dfrac{\omega \bar{R}}{\mathrm{j} \bar{L}} + \omega^2 - \bar{\omega}_p^2} \tag{7}$$

Der Vergleich der Formeln (6) und (7) ergibt:

$$\bar{C}' = \frac{(C_1 + C_2)\,C' + 4\,C_1\,C_2}{C' + C_1 + C_2} \tag{8}$$

$$\bar{C} = C\,\frac{(C_1 - C_2)^2}{(C' + C + C_1 + C_2)(C' + C_1 + C_2)} \tag{9}$$

$$\bar{L} = L\,\frac{(C' + C_1 + C_2)^2}{(C_1 - C_2)^2} \tag{10}$$

$$\bar{R} = R\,\frac{(C' + C_1 + C_2)^2}{(C_1 - C_2)^2} \tag{11}$$

Der Vergleich der Gl. (10) und (11) zeigt, dass für die Güte gilt:

$$\frac{\omega \bar{L}}{\bar{R}} = \frac{\omega L}{R} \tag{12}$$

Sie bleibt erwartungsgemäss bei der Transformation erhalten. Für die Resonanzfrequenzen folgt aus den Gl. (7)...(10):

$$\bar{\omega}_s^2 = \frac{1}{\bar{L}\,\bar{C}} = \frac{1}{L\,C}\left(1 + \frac{C}{C' + C_1 + C_2}\right) = \omega_s^2\left(1 + \frac{C}{C' + C_1 + C_2}\right) \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_p^2 &= \frac{1}{\bar{L}\,\bar{C}}\left(1 + \frac{\bar{C}}{\bar{C}'}\right) = \frac{1}{L\,C} \cdot \frac{(C' + C)(C_1 + C_2) + 4\,C_1\,C_2}{C'(C_1 + C_2) + 4\,C_1\,C_2} = \frac{1}{L\,C}\left(1 + \frac{C(C_1 + C_2)}{C'(C_1 + C_2) + 4\,C_1\,C_2}\right) = \\ &= \omega_s^2\left(1 + \frac{C(C_1 + C_2)}{C'(C_1 + C_2) + 4\,C_1\,C_2}\right) = \omega_p^2\left(1 - C\,\frac{4\,C_1\,C_2}{(C' + C)[C'(C_1 + C_2) + 4\,C_1\,C_2]}\right) \end{aligned} \tag{14}$$

$$\frac{\bar{\omega}_p^2 - \bar{\omega}_s^2}{\bar{\omega}_s^2} = \frac{\bar{C}}{\bar{C}'} = \frac{C\,(C_1 - C_2)^2}{(C' + C + C_1 + C_2[(C_1 + C_2)\,C' + 4\,C_1\,C_2]} \tag{15}$$

Vor der Untersuchung der erhaltenen Formeln sollen die Formeln von *Watanabe* abgeleitet werden.

3. Die Formeln von Watanabe

In einfacher Weise liefern die Formeln (8) bis (10) und (13) bis (15) für

$$C_1 = 0 \tag{16}$$

die bekannten Formeln:

$$\bar{C}'_w = \frac{C_2\,C'}{C_2 + C'} \tag{17}$$

$$\bar{C}_w = \frac{C}{\left(1 + \dfrac{C' + C}{C_2}\right)\left(1 + \dfrac{C'}{C_2}\right)} \tag{18}$$

$$\bar{L}_w = L\left(1 + \frac{C'}{C_2}\right)^2 \tag{19}$$

$$\bar{\omega}_{s_w}^2 = \omega_s^2\left(1 + \frac{C}{C' + C_2}\right) \tag{20}$$

$$\bar{\omega}_{p_w}^2 = \omega_s^2\left(1 + \frac{C}{C'}\right) = \omega_p^2 \tag{21}$$

$$\frac{\bar{\omega}_{p_w}^2 - \bar{\omega}_{s_w}^2}{\bar{\omega}_{s_w}^2} = \frac{C}{C'} \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{C' + C}{C_2}} \tag{22}$$

Bei der Anordnung von *Watanabe* bleibt die Parallelresonanz erhalten, was sich auch leicht durch die Addition des Blindwiderstandes X_2 in Fig. 4a zu X zeigen lässt. Da die Beziehungen von *Watanabe* aus den Formlen für die Brücke leicht zu entnehmen sind, ist es nicht erforderlich, auf dieselben einzugehen. Bei kleinen C_1-Werten empfiehlt sich die Überlegung, ob die einfachere Schaltung Fig. 4a vorzuziehen ist.

4. Die Anwendung der Brückenformeln

Zunächst soll die mögliche Induktivitätsheraufsetzung betrachtet werden. Aus Gl. (10) entnimmt man:

$$\bar{L} = L\left(1 + \frac{C'}{C_2}\right)^2 \cdot \frac{\left(1 + \dfrac{C_1}{C' + C_2}\right)^2}{\left(1 - \dfrac{C_1}{C_2}\right)^2} = \bar{L}_w\left(\frac{1 + \dfrac{C_1}{C' + C_2}}{1 - \dfrac{C_1}{C_2}}\right)^2 = \bar{L}_w\,F \tag{23}$$

Gl. (23) zeigt, dass die Grösse C_1 eine wesentliche Induktivitätserhöhung gegenüber der Erhöhung auf $\bar{L}_w$ nach *Watanabe* bieten kann. Die Abkürzung F kann allerdings auch kleiner als eins gemacht werden:

$$F \gtreqless 1 \text{ für } C_1 \gtreqless \frac{2\,C_2\,(C' + C_2)}{C'} \tag{24}$$

Dabei ist zu beachten, dass C_2 nicht beliebig klein gemacht werden kann, und zwar einmal aus Herstellungs- und Einstellungsgründen und zum anderen, weil der kapazitive Widerstand X_2 viel zu gross wird und praktisch die Schaltung auftrennt.

Nach den Gln. (13) und (14) ändern sich die beiden Resonanzfrequenzen derart, dass $\bar{\omega}_s$ gegenüber ω_s zunimmt, während $\bar{\omega}_p$ gegenüber ω_p abnimmt. Bei *Watanabe* [s. Gln. (20) und (21)] nimmt ω_{s_w} ebenfalls zu, während sich ω_p nicht ändert.

Bei dem Aufbau von Filtern kommt es auf die Differenz $\omega_p - \omega_s$ bzw. $\bar{\omega}_p - \bar{\omega}_s$ an. Es seien daher die Ausdrücke (22) und (15) untersucht.

Aus der Beziehung (15) lassen sich die folgenden Formeln entwickeln:

$$\frac{\bar{\omega}_p^2 - \bar{\omega}_s^2}{\bar{\omega}_s^2} = \frac{\omega_p^2 - \omega_s^2}{\omega_s^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{C_1}{C_2}\right)^2}{\left(1 + \frac{C' + C + C_1}{C_2}\right)\left[1 + \frac{C_1\,(C' + 4\,C_2)}{C_2\,C'}\right]} \tag{25}$$

$$\frac{\bar{\omega}_{p_w}^2 - \bar{\omega}_{s_w}^2}{\bar{\omega}_{s_w}^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{C_1}{C_2}\right)^2}{\left(1 + \frac{C_1}{C_2 + C' + C}\right)\left[1 + \frac{C_1\,(C' + 4\,C_2)}{C_2\,C'}\right]} \tag{26}$$

Mit der erlaubten Vernachlässigung von C ($C \ll C' + C_2$) wird aus Gl. (26):

$$\frac{\bar{\omega}_p^2 - \bar{\omega}_s^2}{\bar{\omega}_s^2} = \frac{\bar{\omega}_{p_w}^2 - \bar{\omega}_{s_w}^2}{\bar{\omega}_{s_w}^2} \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{1 + \frac{C_1}{C_2 + C'}}{1 + \frac{C_1\,(C' + 4\,C_2)}{C_2\,C'}} = \frac{\bar{\omega}_{p_w}^2 - \bar{\omega}_{s_w}^2}{\bar{\omega}_{s_w}^2} \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_1\,(C' + 2\,C_2)^2}{C_2\,C'\,(C_2 + C' + C_1)}} \tag{27}$$

Im gleichen Masse wie die Induktivität erhöht wird, verringert sich der die Frequenzdifferenz enthaltende Ausdruck (27), wobei noch ein weiterer verringernder Faktor hinzukommt. Bei der Auswahl der Grösse C_1 ist also zunächst die Gl. (27) zu überprüfen, ob die Differenz $\bar{\omega}_p - \bar{\omega}_s$ noch ausreichend gross ist. Für schmale Bandfilter und viele andere Filterschaltungen ist das Verfahren durchaus geeignet.

5. Zahlenbeispiel

Um das Beispiel allgemein zu halten, seien folgende Grössen angenommen:

$$C' = 4 \text{ pF} \qquad C_2 = 2 \text{ pF} \qquad C = 1 \cdot 10^{-2} \text{ pF} \tag{28}$$

Hierbei soll der Wert von $C_2 = 2$ pF als noch zulässig betrachtet werden. Man prüft zunächst Gl. (19) und erhält als Vergrösserungsfaktor:

$$\left(1 + \frac{C'}{C_2}\right)^2 = 9 \tag{29}$$

Hierbei ist der Verkleinerungsfaktor nach Gl. (22):

$$\frac{1}{1 + \frac{C' + C}{C_2}} = \frac{1}{3} \tag{30}$$

Erwünscht sei eine Induktivitätserhöhung mit dem Faktor 25. Nach Gl. (29) wird damit:

$$1 + \frac{C'}{C_2} = 5 \qquad C_2 = 1 \text{ pF} \tag{31}$$

Lehnt man $C_2 = 1$ pF als unzulässig ab, so muss man die Brückenformeln heranziehen. Nach Gl. (10) ist:

$$\frac{C' + C_1 + C_2}{C_1 - C_2} = \pm 5 \tag{32}$$

mit den beiden Lösungen:

$$C_{11} = 4 \text{ pF} \qquad C_{12} = 2/3 \text{ pF} \tag{33}$$

Da in der Brücke die Ankopplung des Kristalls durch X_2 *und* X_1 erfolgt, wäre in dieser Hinsicht auch der Wert $C_{12} = 2/3$ pF tragbar, doch ist er für eine brauchbare Einstellung zu klein. Gewählt wird daher $C_1 = 4$ pF.

Die Überprüfung mit einer der Gln. (25) bis (27) ergibt:

$$\frac{\bar{\omega}_p^2 - \bar{\omega}_s^2}{\bar{\omega}_s^2} = \frac{\omega_p^2 - \omega_s^2}{\omega_s^2} \cdot \frac{1}{35} \tag{34}$$

Nach Gl. (8) folgt für die Parallelkapazität

$$\bar{C}' = 5{,}6 \text{ pF} \tag{35}$$

welcher Wert die gegebene Grösse $C' = 4$ pF nicht zu stark anhebt, so dass es im wesentlichen darauf ankommt, ob die Änderung gemäss Gl. (34) tragbar ist.

Mit der Näherungsbeziehung

$$\frac{\omega_p - \omega_s}{\omega_s} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{C'} = \frac{f_p - f_s}{f_s} \tag{36}$$

und einer gegebenen Frequenz

$$f_s = 10 \text{ MHz} = 10^7 \text{ Hz} \tag{37}$$

liefern die Werte der Gl. (28):

$$f_p - f_s = 12{,}5 \cdot 10^3 \text{ Hz} \tag{38}$$

Teilt man diesen Wert nach Gl. (34) durch 35, so folgt:

$$\bar{f}_p - \bar{f}_s = 357 \text{ Hz} \tag{39}$$

Bei einem Bandfilter mit zwei Kristallen würde der doppelte Abstand von 714 Hz die Bandbreite ergeben.

Literatur

[1] *W. P. Mason* and *R. A. Sykes:* Electrical wave filters employing crystals with normal and divided electrodes. Bell. Syst. Techn. J. 19(1940)2, p. 221...248.

[2] *W. Herzog:* Die unsymmetrische Differentialbrücke. Telegraphen-, Fernsprech-, Funk- und eFrnsehtechnik 33(1944)7/8, S. 149...151.
[3] *W. Herzog:* Siebschaltungen mit Schwingkristallen. 2. Auflage. Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1962.
[4] *W. Herzog:* Ein Quarztiefpass mit komplexen Stellen unendlich hoher Dämpfung. Telegraphen-, Fernsprech-, Funk- und Fernsehtechnik 32(1943)9, S. 181...185.
[5] *Y. Watanabe:* Der piezoelektrische Resonator in Hochfrequenzschwingungskreisen. Elektr. Nachrichten-Technik 5(1928)2, S. 45...64.
[6] *W. Herzog:* Die Brücke als Filterelement. Bull. SEV 59(1968)12, Seite 517...524.
[7] *W. Herzog:* Zum Filteraufbau mit Zweigen aus Brücken. Bull. SEV 59(1968)24, S. 1109...1118.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. phil., Dr.-Ing. *W. Herzog,* Direktor des Instituts für Elektrotechnik der Universität Mainz, Joh.-Joachim-Becher-Weg 21, D-6500 Mainz.

Berechnung der Belastbarkeit von Starkstromkabeln

Die Publikation Nr. 287 der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) brachte im Jahre 1969 unter dem Titel: Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100 %) eine wertvolle Normung der Berechnungsmethoden zum Ermitteln der thermischen Belastbarkeit elektrischer Kabel. Die Unterlagen zu diesem Dokument stammen von Arbeiten einer Gruppe des CIGRE-Comité No. 2 (CIGRE-Rapport No. 233/1964)[1]. Es ist geplant, die Methoden auch für den Fall kurzzeitiger Belastung zu erweitern und insbesondere auch die Normung von Referenzwerten für Umgebungstemperatur, Bodentemperatur, Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens und zulässige Leitertemperaturen anzustreben.

Die Kalkulationsmethoden werden grundsätzlich von allen im Kabelgebiet tätigen Nationen gutgeheissen. Bezüglich der vorerwähnten Referenzwerte bestehen jedoch noch grosse Abweichungen.

Das Fachkollegium 20 des CES[2]) hat sich bei den zur Diskussion stehenden Referenzwerten für folgende Zahlen entschieden:

1. Maximale Leitertemperatur

a) Für Kabel mit Isolation aus imprägniertem Papier (einschliesslich Haftmasse), Polyvinylchlorid, Polyäthylen oder Elastomeren bis Nennspannung 6 kV (max. Betriebsspannung 7,2 kV): 60 °C, darüber: 50 °C.

b) Für Öldruck-, Gasaussen- und Gasinnendruckkabel (einschliesslich Rohrkabel): 80 °C.

2. Maximaltemperatur der Kabeloberfläche

An der Kontaktfläche mit Erdboden: 50 °C.

Diese Temperaturbegrenzung berücksichtigt die Tatsache, dass bei höheren Temperaturen ein Austrocknen und damit eine Wärmewiderstandserhöhung des Erdbodens in Kabelnähe auftritt.

3. Maximale Bleimanteltemperatur

Grenzwert: 65 °C.

Bei höheren Bleimanteltemperaturen kann eine Gefügeänderung des Bleis zu einer unzulässigen Erniedrigung der Festigkeit des Mantels führen.

4. Charakteristische Werte des Erdbodens

Wärmewiderstand (Normwert): $100 \frac{°C \cdot cm}{W}$

in felsigem oder sehr trockenem Boden: $150 \frac{°C}{W}$ cm

Erdbodentemperatur (Normwert): 25 °C

Tiefstwerte: — 10 °C in normalen Lagen
— 15 °C im Gebirge

5. Lufttemperatur

Normwert: 25 °C
Extremwerte: + 35 bzw. — 25 °C

6. Verlegetiefe der Kabel

Normwerte bis 60 kV Nennspannung
(max. Betriebsspannung 72,5 kV): 70 cm
für höhere Spannungen: 100 cm

In verschiedenen Regeln des SEV, z.B. 3037.1963: Regeln für Hochspannungskabel mit masseimprägnierter Papierisolation und Metallmantel bis 60 kV, 3062.1967: Regeln für Niederspannungsnetzkabel, sind Belastungstabellen enthalten. Die Zahlwerte entsprechen jenen, die in den VDE-Vorschriften 0255/1934 und 0255/1943 enthalten sind. Zwei wesentliche Änderungen der Betriebsbedingungen wurden jedoch vorgenommen. Die Umgebungstemperatur wurde auf 25 °C erhöht und die Gültigkeit auf eine sog. Industriebelastung (10 h täglich Maximalbelastung und restliche 14 Stunden 70 % der Maximalbelastung) beschränkt. In den VDE-Vorschriften ist seinerzeit Industriebelastung nirgends erwähnt worden, erst in letzten Arbeiten des VDE, z.B. VDE 0255/68 wurde der Begriff eingeführt.

Die heute in den schweizerischen Regeln enthaltenen Tabellen weisen leider einige prinzipielle Fehler auf.

a) Sie geben Werte an, die für Verlegung in Luft zu niedrig sind; dies immer vorausgesetzt, dass die Kabel gegen direkte Sonnenbestrahlung geschützt sind.

b) Der unterschiedlichen Wärmefähigkeit des Erdbodens wird nicht Rechnung getragen.

c) Die vorgesehenen Reduktionsfaktoren berücksichtigen die Anhäufung parallel verlaufender Kabel teilweise unrichtig.

d) Das Verhältnis zwischen Industriebelastung und Dauerlast ändert mit der Verlegungsart, und kann nicht generell durch einen konstanten Faktor erfasst werden.

e) Der Einfluss der Bewehrung und des Korrosionsschutzes ist besonders beim Niederspannungskabel nicht zu vernachlässigen.

Um die Schwierigkeiten bei Übernahme der CEI-Berechnungsmethoden zu umgehen, sind zwei Wege eingeschlagen worden. Bei der USA-Methode wurden für praktisch alle möglichen Varianten die genauen Rechnungen durchgeführt und in einem mehrere 100 Seiten fassenden Zahlenkatalog zusammengefasst. Die Arbeit mit Computer erlaubt ein solches Vorgehen mit vernünftigem Zeitaufwand. Doch scheint das Ergebnis nicht geeignet, einfache und rasche Beurteilung zu ermöglichen, insbesondere ist es schwer, verschiedene Einflussgrössen gegeneinander abzuwägen. Eine direkte Übernahme des amerikanischen Tabellenwertes scheidet wegen der unterschiedlichen Leiterquerschnitte, der abweichenden Konstruktionen und Referenzwerte aus.

Die kontinentale Praxis, bei der einfache Tabellen für gewisse grundlegende Ausführungen durchgerechnet und die besonderen Situationen durch Korrekturfaktoren erfasst werden, findet man in verschiedenen Varianten. Natürlich sind mehr Korrekturfaktoren zu berücksichtigen, als in unseren bestehenden Regeln, und die erreichbare Genauigkeit des Ergebnisses muss kleiner sein als bei Durchrechnung des Belastungsfalles nach CEI-287.

Solche Verfahren sind unter anderem in England und Frankreich zur Anwendung gelangt; in Deutschland hat der Arbeitskreis Belastbarkeit im VDE-Ausschuss 0250-1 eine grosse diesbezügliche Arbeit kürzlich zum Abschluss gebracht (0255/68 und 0271a/69).

Die Übernahme der CEI-Berechnungsmethoden wird zweifellos das FK 20 des CES veranlassen, die Tabellenwerte der zulässigen Belastungen und die verschiedenen Korrekturgrössen sorgfältig zu überprüfen und der Wirklichkeit besser anzupassen. Die Verwendung von Tabellen erleichtert die rasche Beurteilung von Erwärmungsfragen. In Grenzfällen kann allerdings auf die zeitraubende Rechnung nach den CEI-Richtlinien wohl nicht verzichtet werden.

Der Frage nach der aus Erwärmungsrücksichten zugelassenen Belastbarkeit von Starkstromkabeln wird nicht selten eine zu grosse Bedeutung zugewiesen. Bei der Wahl eines bestimmten Querschnittes und des Kabeltyps sind für eine Neuanlage Verlegekosten, Übertragungsverluste, Kurzschlussverhalten, Spannungsabfälle in das Kalkül einzubeziehen. Die Erwärmungsrechnung hat vor allem dann grosse Bedeutung, wenn abzuklären ist, welche Leistung durch eine bestehende Kabelanlage ohne Schädigung übertragen werden kann. Das Instrument zu dieser Beurteilung gibt die CEI-Publ. 287.

[1]) CIGRE = Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques.

[2]) CES = Comité Electrotechnique Suisse.

Adresse des Autors:
P. Müller, Dipl. Ing. ETH, 1249 Aire-la-Ville.