Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 6

Artikel: Ein Programm zur Berechnung der Elemente des Stosskreises für beliebige Stoss- und Schaltspannungen

Autor: Robra, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915675

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: 13.07.2025

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

Ein Programm zur Berechnung der Elemente des Stosskreises für beliebige Stoss- und Schaltspannungen

Von *J. Robra,* Darmstadt

621.316.5.06

1. Allgemeines

Überspannungen in Hochspannungsanlagen, die die Isolation von Geräten zerstören oder zum Überschlag von Isolatoren führen können, werden durch Blitzeinschlag in Freiluftanlagen (Blitzüberspannungen) oder durch Wanderwellen, die durch das Schalten von Leitungsteilen entstehen, hervorgerufen. In beiden Fällen steigt die Spannung in einer Polarität sehr schnell auf ein Vielfaches der Nennspannung an und nimmt danach exponentiell oder nach einer abklingenden Schwingung wieder ab. Für Prüfzwecke werden diese Überspannungen durch Stoßspannungen bzw. Schaltspannungen simuliert: Durch Entladung von einem oder mehreren Kondensatoren auf eine *RC*-Schaltung, Fig. 1 (Stosskreis), wird ein Spannungsimpuls nach Fig. 2 erzeugt; dabei sind neben der Höhe des Impulses (Scheitelwert) die Steilheit des ansteigenden Teiles (Stirn) sowie die Dauer des abfallenden Teiles (Rücken) für die Isolationsbeanspruchung von wesentlicher Bedeutung. Da sich Stoss- und Schaltspannungen nur im Zeitbereich unterscheiden, wird im folgenden nur noch von Stoßspannungen gesprochen.

Aus der Differentialgleichung der Stosskreise nach Fig. 1 (vergleiche VDE 0433, Teil 3) ergibt sich unter Vernachlässigung von Induktivitäten ein Spannungsverlauf, der durch die Gleichung

$$U = k\,(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \tag{1}$$

beschrieben wird. Darin ist T_2 im wesentlichen die Zeitkonstante der Stirn, T_1 die des Rückens. Aus dem Oszillogramm einer Stoßspannung lassen sich diese Zeitkonstanten jedoch nicht entnehmen; in den verschiedenen Normen über Stoßspannungen (CEI Publ. 60, VDE 0433, Teil 3 u. a.) werden daher die Zeitkennwerte einer Stoßspannung wie folgt definiert (vergleiche Fig. 2): Stirnzeit T_s ist das 1,67fache derjenigen Zeit, in der die Stoßspannung in der Stirn von 30 % auf 90 % ihres Scheitelwertes ansteigt. Der Schnittpunkt der Verbindungsgeraden dieser beiden Punkte (Stirngerade) mit der Zeitachse ist der Nennbeginn der Stoßspannung.

Rückenhalbwertzeit T_r ist die Zeit vom Nennbeginn bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Stoßspannung auf dem Rücken auf die Hälfte ihres Scheitelwertes abgesunken ist.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Der Zusammenhang zwischen diesen Zeitkennwerten T_s und T_r einerseits und den Zeitkonstanten T_1 und T_2 andererseits ist formelmässig nicht darstellbar. Daher ist auch eine Berechung von T_s und T_r aus den Stosskreiselementen und erst recht umgekehrt nicht geschlossen möglich.

Zur Lösung dieses Problems wurden in bisherigen Arbeiten [2; 3; 4][1]) Diagramme zur graphischen Ermittlung von Hilfsgrössen berechnet, die die Umrechnung von T_s und T_r in T_1 und T_2 ermöglichen. Für einen Anwender, dem – wie heute fast allgemein üblich – ein programmierbarer Tischrechner oder Zugriff zu einer Rechenanlage zur Verfügung steht, ist dieses Verfahren unhandlich.

Im folgenden sei ein Programm beschrieben, das aus den Eingabewerten T_s, T_r, C_s und C_B unmittelbar die Widerstandwerte R_E und R_D für eine der drei Schaltungen nach Fig. 1 berechnet.

2. Das Rechenverfahren

2.1 Berechnung der Zeitkonstanten T_1 und T_2

Bestimmend für T_s und T_r sind die Zeiten t_1, t_2 und t_3 nach Fig. 2. Diese können aus Gl. (1) bei gegebenem T_1 und T_2 nach Berechnung des Scheitelwertes numerisch ermittelt werden. Es ist dann:

$$T_s = 5\,(t_2 - t_1)\,/\,3 \tag{2}$$

und

$$T_r = t_3 - t_1 + 0{,}3\,T_s \tag{3}$$

Geht man von günstig gewählten Anfangswerten für T_1 und T_2 aus und ändert diese schrittweise, so können die geforderten Werte für T_s und T_r angenähert werden. Um Rechenzeit und Speicherbedarf zu optimieren, werden einige Normierungen eingeführt. Da alle Stosskreiselemente zeitunabhängig sind, gilt

$$T_1/T_2 = \text{const. für } T_s/T_r = \text{const.} \tag{4}$$

Mit

$$U/k = u; \quad t/T_1 = \tau; \quad T_1/T_2 = c \tag{5}$$

vereinfacht sich Gl. (1) zu:

$$u = e^{-\tau} - e^{-c\tau} \tag{6}$$

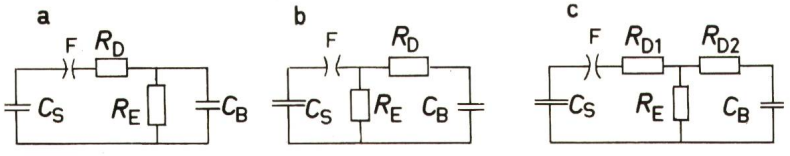

Fig. 1
Schaltungen zur Erzeugung von Stoßspannungen
a Schaltung a
b Schaltung b
c gemischte Schaltung
C_s Stosskapazität; C_B Belastungskapazität; R_D Dämpfungswiderstand; R_E Entladewiderstand; F Schaltfunkenstrecke

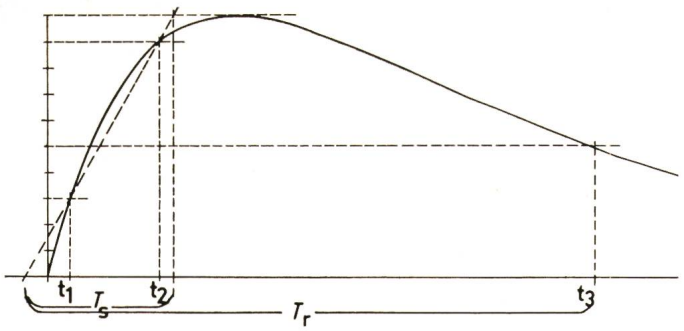

Fig. 2
Zeitlicher Verlauf und Zeitkennwerte der Stoßspannung
T_s Stirnzeit; T_r Rückenhalbwertszeit; t Zeit

Diese Gleichung wird häufig benötigt und daher im folgenden mit

$$u = \mathrm{EF}(\tau) \tag{6}$$

abgekürzt.

Aus $$\mathrm{d}u/\mathrm{d}\tau = ce^{-c\tau} - e^{-\tau} \tag{7}$$

folgt für den Scheitelwert

$$\tau_m = \ln c/(c-1) \tag{8}$$

$$u_m = \mathrm{EF}(\tau_m) \tag{9}$$

Die normierten Zeiten τ_1, τ_2 und τ_3 ergeben sich durch numerische Lösung der Gleichungen

$$\mathrm{EF}(\tau) = 0{,}3\, u_m \text{ mit } \tau < \tau_m \tag{10}$$

$$\mathrm{EF}(\tau) = 0{,}9\, u_m \text{ mit } \tau < \tau_m \tag{11}$$

$$\mathrm{EF}(\tau) = 0{,}5\, u_m \text{ mit } \tau > \tau_m \tag{12}$$

Daraus können nach Gl. (2) und (3) die normierten Stirn- und Rückenhalbwertzeiten τ_s und τ_r berechnet werden. Durch schrittweise Änderung von c wird schliesslich mit einer vorgegebenen Fehlerschranke

$$\tau_s/\tau_r \approx T_s/T_r \tag{13}$$

wobei T_s und T_r die geforderten Werte sind.

Jetzt müssen die Normierungen rückgängig gemacht werden. Aus Gl. (5) folgt hierfür:

$$T_1 = T_s/\tau_s \tag{14}$$

und

$$T_2 = T_1/c \tag{15}$$

Damit wird die geforderte Stirnzeit exakt eingehalten; die Rückenhalbwertzeit weicht infolge der Fehler der numerischen Rechnungen vom geforderten Wert ab. Zur Kontrolle kann die ermittelte Rückenhalbwertzeit T_r' nach

$$T_r' = T_1\, \tau_r \tag{16}$$

berechnet und ausgegeben werden.

2.1.2 Numerische Lösungsverfahren

Im bisher betrachteten Rechengang treten vier Iterationsschleifen auf: die Lösung von Gl. (13) durch Variation von c und innerhalb jedes Iterationsschrittes die Lösung der Gl. [10...12] durch Variation von τ. Alle Iterationen wurden nach demselben einfachen Verfahren programmiert:

Gesucht sei die Lösung der Gleichung:

$$\mathrm{f}(x) = 0$$

Mit einem Anfangswert x_0 und einer Anfangsschrittweite dx_0 wird dann berechnet

$$y_n = \mathrm{f}(x_0 + n \cdot \mathrm{d}x_0) \quad n = 0, 1, 2, \ldots$$

bis y_n das Vorzeichen wechselt, d.h. bis:

$$y_n\, y_{n-1} < 0$$

Danach wird die Rechnung mit geänderter Schrittweite $\mathrm{d}x_1 = -\mathrm{d}x_0/10$ weitergeführt bis zum nächsten Vorzeichenwechsel von y_n und so weiter, bis entweder $y_n = 0$ oder $(\mathrm{d}x_m/x) < \varepsilon$ erreicht ist. Um die Handhabung des Programmes zu erleichtern, wurden für alle Iterationen als günstig ermittelte Werte für Angangswert und Anfangsschrittweite fest eingegeben.

2.2 Berechnung der Stosskreiselemente für Schaltung a und b

Die Gleichungen zur Ermittlung der Stosskreiselemente aus den Zeitkonstanten sind bekannt [2; 3]. Bei gegebenem C_s und C_B und mit der Abkürzung $C_s + C_B = C$ ergibt sich für Schaltung a:

$$R_E = (T_1 + T_2)/2C + \sqrt{[(T_1 + T_2)/2C]^2 - T_1T_2/CC_B} \tag{17}$$

und für Schaltung b:

$$R_E = (T_1 + T_2)/2C + \sqrt{[(T_1 + T_2)/2C)^2 - T_1T_2/CC_s} \tag{18}$$

Für beide Schaltungen gemeinsam gilt dann:

$$R_D = T_1\, T_2 / C_B\, C_s\, R_E \tag{19}$$

Wie man sieht, unterscheiden sich die Gl. (17) und (18) nur durch Vertauschung von C_B mit C_s. Für beide Schaltungen kann also dasselbe Rechenverfahren angewandt werden, wenn einfach die Reihenfolge von C_B und C_s bei der Eingabe vertauscht wird.

2.3 Berechnung des Ausnutzungsgrades für die Schaltungen a und b

Eine wesentliche Kenngrösse eines Stosskreises ist der Ausnutzungsgrad η, das Verhältnis vom Scheitelwert der Stossspannung U_s zur Ladespannung U_L. Die in [3] angegebenen Formeln zur Berechnung von η wurden hier nicht benutzt, da sich η aus einigen Kenngrössen, die im Laufe der bisherigen Rechnung gewonnen wurden, wesentlich leichter ermitteln lässt:

Die Ableitung von Gl. (1) zur Zeit $t = 0$ ergibt:

$$(\mathrm{d}U/\mathrm{d}t)_{t=0} = k(T_1 - T_2)/T_1\, T_2 \tag{20}$$

Eine Betrachtung der Schaltungen a und b liefert für $t = 0$

$$i_{CB} = U_L/R_D = C_B\, \mathrm{d}U/\mathrm{d}t$$

und damit

$$(\mathrm{d}U/\mathrm{d}t)_{t=0} = U_L/R_D\, C_B \tag{21}$$

Ein Vergleich der Gl. (20) und (21) ergibt:

$$k = U_L\, T_1\, T_2 / R_D\, C_B (T_1 - T_2) \tag{22}$$

Anderseits ist das normierte u_m aus Gl. (9):

$$u_m = U_s/k \tag{23}$$

Aus Gl. (19) folgt:

$$T_1\, T_2 / R_D\, C_B = C_s\, R_E \tag{24}$$

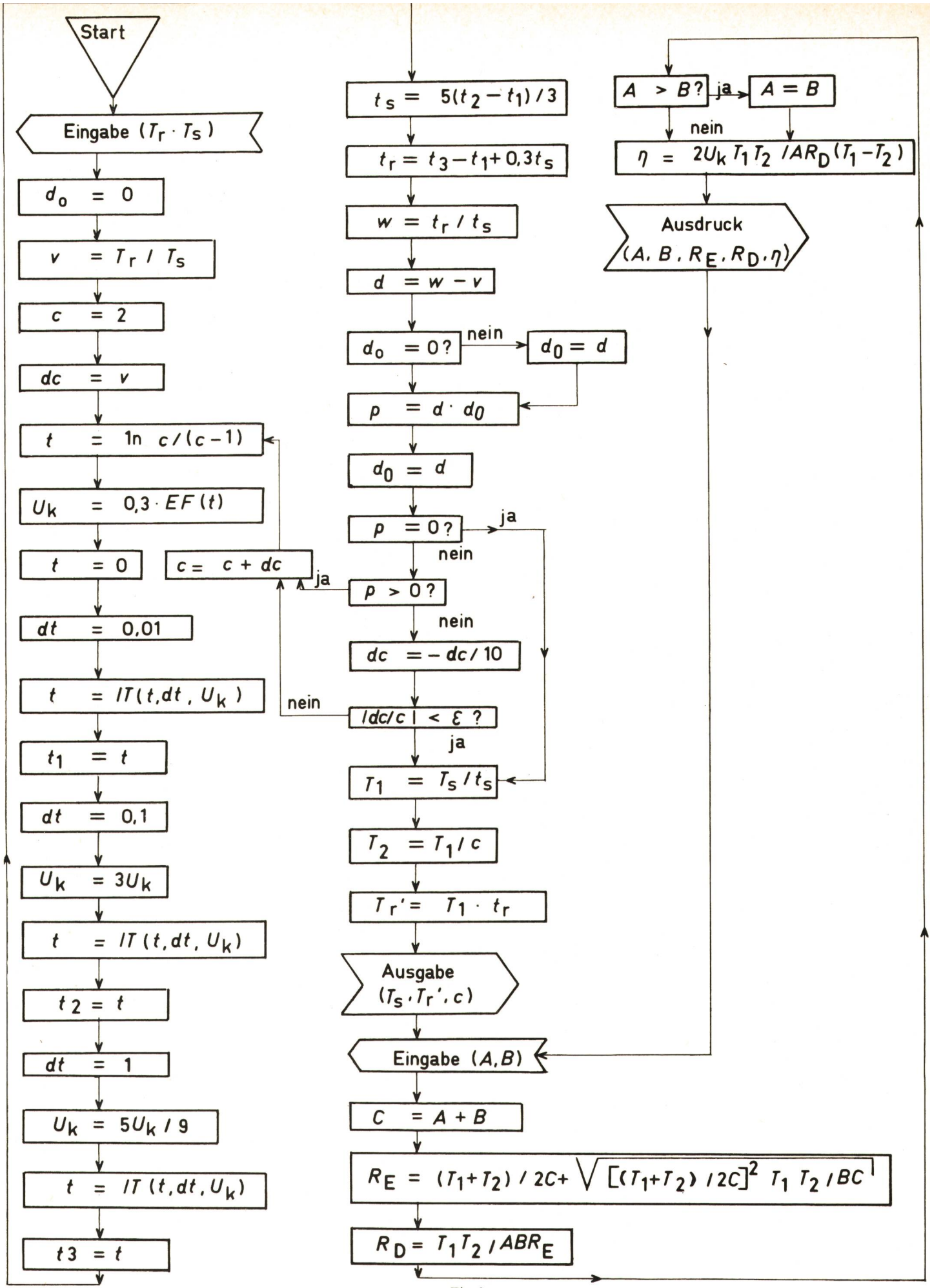

Fig. 3

Flussdiagramm zur Berechnung der Elemente des Stosskreises

UP EF (t) Lösung von Gl. (6); *UP IT*(t, dt, U_k) numerische Lösung der Gl. EF(t) = U_k nach 2.1.2

Das Einsetzen ergibt:

$$\eta = u_m C_s R_E / (T_1 - T_2) \tag{25}$$

Wurde, wie oben beschrieben, die Auswahl zwischen den Schaltungen *a* und *b* durch Vertauschen von C_B und C_s getroffen, so muss C_s zur Berechnung von η als der grössere der beiden Kapazitätswerte ausgewählt werden.

2.4 Berechnung der Stosskreiselemente und des Ausnutzungsgrades für die gemischte Schaltung

Bei der gemischten Schaltung nach Fig. 1, ist die Errechnung von R_E, R_{D1}, R_{D2} und η wesentlich aufwendiger als bei den Schaltungen *a* und *b*. Selbstverständlich ist die Berechnung nach den Gl. in [3] ohne weiteres möglich, sie erfordert jedoch einen völlig neuen Programmteil. Da es das Ziel dieser Arbeit war, ein möglichst einfaches und universell anwendbares Programm für den Anwender anzubieten, wurde auf den allgemeinen Fall der gemischten Schaltung ($R_{D2} = x\, R_{D1}$) verzichtet und nur der Sonderfall

$$R_{D1} = R_{D2} = R_D$$

näher betrachtet. In diesem Fall ist:

$$R_E = \sqrt{[(T_1 + T_2)/C]^2 - T_1 T_2 / C_B C_s} \tag{26}$$

und

$$R_D = (T_1 + T_2)/C - R_E \tag{27}$$

Für η gilt Gl. (25) unverändert.

Die für diesen Sonderfall erforderlichen Programmänderungen sind geringfügig; sie können durch Abfragen einer Booleschen Variablen, die zusammen mit C_B und C_s eingegeben wird, aufgerufen werden.

2.6 Flussdiagramm und Programmbeispiel

Fig. 3 zeigt das ausführliche Flussdiagramm eines Programmes, das die oben beschriebenen Rechnungen selbsttätig ausführt; der Übersichtlichkeit halber wurde der Fall der gemischten Schaltung nicht eingetragen. Die Zuordnung von C_B und C_s zu den Eingabegrössen *A* und *B* bestimmt die Auswahl von Schaltung a oder b.

Für einen Tischrechner mit Drucker konnte dieses Flussdiagramm in einem einzigen Programm mit 308 Programmschritten und 12 Speicherplätzen realisiert werden. Nach Eingabe der Magnetkarte und der Werte T_s und T_r beginnt das Iterationsverfahren zur Berechnung von T_1 und T_2. Die Rechenzeit hierfür beträgt ca. 6 min, danach werden T_s, T_r' und *c* ausgedruckt. Anschliessend können beliebig oft Werte für C_B und C_s eingegeben werden; die eingegebenen Kapazitätswerte und die errechneten Werte für R_E, R_D und η für die gewählte Schaltungart werden sofort ausgedruckt. Eine nicht realisierbare Schaltung [Argument der Wurzel in Gl. (17), (18) oder (26) negativ] wird durch Aufleuchten der «Illegal Operation»-Lampe angezeigt. Damit wurde ein hoher Bedienungskomfort erreicht, der das Hantieren mit Diagrammen und langen Berechnungen überflüssig macht.

Für den Benutzer einer anderen Rechenanlage mit mindestens gleicher Kapazität dürfte das Übertragen des ausführlichen Flussdiagrammes in die jeweilige Programmsprache kein Problem bedeuten.

3. Zusammenfassung

Die Ermittlung der Stosskreiselemente aus den Zeitkennwerten T_s und T_r erfordert die numerische Lösung mehrerer transzendenter Gleichungen. Durch einige Normungen lassen sich Rechenzeit und Speicherbedarf so weit verringern, dass diese Berechnungen in einem Arbeitsgang an einem Tischrechner durchgeführt werden können. Ein ausführliches Flussdiagramm ermöglicht die Übertragung des Programmes auf ähnliche Rechenanlagen.

Literatur

[1] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil 3: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Stoßspannungen und Stoßströmen für Prüfzwecke. VDE-Vorschrift 0433 Teil 3/4.66.

[2] *A. Vondenbusch:* Beitrag zur Berechnung von Stoßschaltungen mit zwei Energiespeichern. ETZ-A 80(1959)18, S. 617...622.

[3] *O. Etzel* und *G. Helmchen:* Berechnung der Elemente des Stoßspannungskreises für die Stoßspannungen 1,2/50, 12,5/5 und 1,2/200. ETZ-A 85(1964)18, S. 578...582.

[4] *F. W. Rutloh* und *H. J. Marlheinecke:* Allgemeine Berechnung von Stoßschaltungen mit zwei Energiespeichern. ETZ-A 88(1967)10, S. 237...241.

Adresse des Autors:
Dipl.-Ing. *J. Robra,* Fachbereich Elektrische Energietechnik der TH-Darmstadt, D-61 Darmstadt.