Ein Beitrag zur Berechnung des Übertragungsverhaltens von Stoßspannungsteilern

Autor(en): **Zaengl, W. / Feser, K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **55 (1964)**

Heft 25

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916797

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

sprechend gewechselt werden. Der dazu erforderliche Phasenwechsel wird mittels der Trenner erstellt. Bei Betriebswechsel muss die Gruppe abgestelllt werden, und der Motorgenerator darf nur wieder auf das Netz geschaltet werden, wenn die Gegendrehzahl unter 60 U./min gefallen ist, dies um Beschädigungen durch zu grosse Stromaufnahme oder mechanische Überbeanspruchung zu vermeiden.

Die einzelnen Vorgänge des Betriebswechsels, beispielsweise von Pumpen- auf Turbinenbetrieb spielen sich in der nachstehend aufgeführten Reihenfolge ab:

a) Drosselklappe erhält Schliessbefehl,
b) Drosselklappe Schliessvorgang beendet,
c) Gruppenschalter öffnet,
d) Trenner öffnet,
e) Trenner für Gegendrehrichtung schliesst,
f) Drosselklappe erhält Öffnungsbefehl nachdem die Drehzahl auf 60 U./min gefallen ist,
g) Gruppenschalter schaltet ein.

3.6 Düsenschieber

Wenn das Niveau des Ausgleichbeckens infolge reichlichen Wasserzuflusses einen Höchstwert überschreitet, muss das Wasser, um nicht verlorenzugehen, in den Stausee Sufers übergeleitet werden. Diese Funktion wird durch den Düsenschieber versehen, und zwar nur im Turbinenbetrieb.

Die Abführung des überschüssigen Wassers erfolgt in Abhängigkeit des Wasserstandes innerhalb eines Regulierbereiches von 80 cm. Die Öffnung des Düsenschiebers in diesem Bereiche wird in 20 Stufen von je 4 cm Wasserstandunterschied automatisch geregelt, von geschlossener Stellung bei unterer Bereichsgrenze bis Volloffenstellung bei oberer Bereichsgrenze. Einer Stufe entspricht 21 mm Weg des Düsenschieberhubes, der somit insgesamt 420 mm beträgt. Der Regulierbereich selber kann mittels des im Abschnitt 3.4 beschriebenen Zusatzgerätes auf jeweils entsprechende Höhe verschoben werden (Fig. 5, Skala a).

Die Sicherungen, der Automat sowie die Schütze der Steuerspannung für die Düsenschiebereinrichtung sind in einem separaten Steuerkasten untergebracht. Der Düsenschieber wird in der Regel automatisch gesteuert. Durch einen Schalter in der Steuertafel kann er auf Handsteuerung eingestellt werden. Die Handsteuerung erfolgt mittels Druckknöpfen am Steuerkasten.

Schliesslich kann die elektrische Steuerung mit Hilfe eines Handschalters am Düsenschieber selbst abgeschaltet und der Düsenschieber mittels eines Handrades eingestellt werden. Diese Möglichkeit des Eingriffes von Hand an Ort und Stelle wird auf der Steuertafel und am Steuerkasten durch je eine Signallampe angezeigt.

4. Schlussbemerkungen

Die automatische Steuerung der Hauptmaschinengruppen im Turbinenbetrieb wurde anfangs 1962, im Pumpenbetrieb gegen Ende 1963, dem Betrieb übergeben; unmittelbar danach erfolgte auch die Inbetriebsetzung der Fernbedienungsanlage. Die Wahl der Betriebsart sowie das Anfahren und das Abstellen von Sils aus wurden mit Erfolg durchgeführt.

Anfangs 1964 wurde auch die automatische Steuerung der Zubringerpumpen in Betrieb gesetzt, ebenso die Wahl der Betriebsart durch Fernbedienung von Sils aus erfolgreich durchgeführt.

Adresse des Autors:
Peter E. Kisfaludy, «Motor Columbus» AG für elektrische Unternehmungen, 5400 Baden.

Ein Beitrag zur Berechnung des Übertragungsverhaltens von Stoßspannungsteilern

Von *W. Zaengl* und *K. Feser*, München

621.317.727.1.015.33

Jeder Spannungsteiler für hohe Stoßspannungen setzt sich wegen seiner grossen, räumlichen Ausdehnung aus einem komplizierten Netzwerk von Widerständen, Kondensatoren und Induktivitäten zusammen. Die aus einem hinreichend genauen Ersatzschaltbild berechnete Rechteckstossantwort eines allgemeinen Teilertyps ist auf einfache Weise nicht mehr diskutierbar. Daher wurden Zahlenbeispiele mit Hilfe einer elektronischen Rechenmaschine berechnet, die zu einem guten Einblick in das Übertragungsverhalten der Teiler führen. Berücksichtigt wurde dabei insbesondere der Ohmsche Spannungsteiler.

Du fait de son ampleur, un diviseur de tension pour hautes tensions de choc constitue un réseau compliqué de résistances, condensateurs et inductances, de sorte qu'il n'est plus possible d'interpréter simplement la réponse, sous forme de choc à front raide, d'un type général de diviseur de tension, calculée en se basant sur un schéma équivalent suffisamment exact. On a donc calculé des exemples numériques à l'aide d'un calculateur électronique, ce qui donne un bon aperçu du comportement de transmission de ces diviseurs de tension, notamment dans le cas de diviseurs ohmiques.

1. Einleitung

Zur Ermittlung des zeitlichen Verlaufes von Stoßspannungen werden Spannungsteiler verwendet, die die hohen Eingangsspannungen bis zu mehreren Millionen Volt auf eine Ausgangsspannung von einigen Hundert Volt herabsetzen, so dass diese mit den gebräuchlichen Warmstrahl- oder Kalt-Kathodenstrahloszillographen aufgezeichnet werden können. Derartige Stoßspannungsteiler lassen sich unter Verwendung technologisch einwandfreier Baumaterialien und bei guter, hochspannungstechnischer Ausbildung als Ohmsche, kapazitive oder gemischt Ohmisch kapazitive Spannungsteiler ohne weiteres so herstellen, dass der Scheitelwert voller oder im Rücken abgeschnittener Stoßspannungen mit vernachlässigbar kleinen Fehlern wiedergegeben wird. Auch eine Ermittlung der für den Stoßspannungsverlauf charakteristischen Daten (Stirnzeit, Rückenhalbwert-Zeit, Überschlagzeit) bleibt dabei meist innerhalb der nach VDE 0450 zulässigen Fehlergrenzen.

Recht erhebliche Messfehler können jedoch auftreten, wenn in der Stirn abgeschnittene Stoßspannungen erfasst werden müssen (Fig. 1). Derartige Keilwellen sind Hochspannungsimpulse, die bei Überschlagzeiten von weniger als 1...2 µs bedeutende hochfrequente Schwingungsanteile enthalten. Durch eine Zerlegung dieser einmalig verlaufenden, zeitabhängigen Vorgänge mit Hilfe des Fourier-Integrals lässt sich nachweisen, dass aus einer Keilwelle, die z. B. durch das Abschneiden einer VDE-Stoßspannung 1|50 nach 0,5 µs entsteht, noch 10-MHz-Schwingungen enthalten sind, deren Amplituden 5% der Grundwellenamplituden betragen.

Die von einem Spannungsteiler für die Messung abgeschnittener Stoßspannungen zu fordernde Eigenschaft besteht

33'380-392

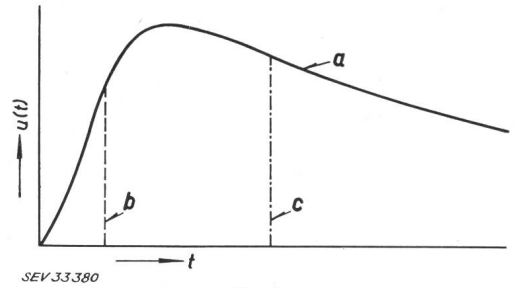

Fig. 1
Zur Definition verschiedener Stoßspannungen
a volle Stoßspannung; *b* in der Stirn abgeschnittene Stoßspannung (Keilwelle); *c* im Rücken abgeschnittene Stoßspannung
t Zeit; *u* Spannung

somit darin, dass dieser die hochfrequenten Schwingungsanteile noch «überträgt» und am Teilerausgang möglichst unverzerrt wiedergibt, also eine ausreichend hohe Bandbreite besitzt. Grundsätzliche Erkenntnisse zur Beurteilung der Stoßspannungsteiler bezüglich dieser breitbandigen Eigenschaften wurden in den letzten Jahren vielfach angegeben [1; 2]. Die Forderungen an das frequenzabhängige Übertragungsverhalten bei der Messung einer gegebenen Impulsform sind damit bekannt. Für den Bau der Stoßspannungsteiler ist es aber wesentlich, die Fehlerursachen aufzudecken und sie so weit wie möglich theoretisch zu ermitteln. In dem vorliegenden Beitrag wurde daher versucht, alle erfassbaren Eigenschaften der Bauelemente eines Teilers einem Ersatzschaltbild zu Grunde zu legen, dessen Übertragungsverhalten berechnet wird. Die nur sehr schwer allgemein diskutierbaren Berechnungsergebnisse werden mit Hilfe einer elektronischen Rechenmaschine an Hand mehrerer Beispiele ausgewertet, so dass sich vielfältige Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Spannungsteiler ziehen lassen. Besonders ausführlich wird hiebei der rein Ohmsche Spannungsteiler behandelt, da dieser heute für Keilwellenmessungen ausschliesslich verwendet wird.

2. Die Stoßspannungs-Messanordnung

Fig. 2 zeigt einen Stoßspannungskreis mit Spannungserzeuger, Prüfobjekt und Messanordnung. Die angegebene Schaltung des Spannungserzeugers stellt lediglich eine übliche Ersatzschaltung dar und ist für den Aufbau des Messkreises nicht von grundlegender Bedeutung. Wesentlich hingegen ist der unmittelbare Anschluss des Spannungsteilers am Prüfobjekt, dessen Spannungsbeanspruchung gemessen werden soll. Jede Übertragung eines sehr rasch veränderlichen Spannungsimpulses über eine längere Verbindungsleitung führt nämlich zu Impulsverzerrungen, die sich aus der Wirksamkeit von Induktivität und Kapazität, bzw. der Laufzeiteigenschaft

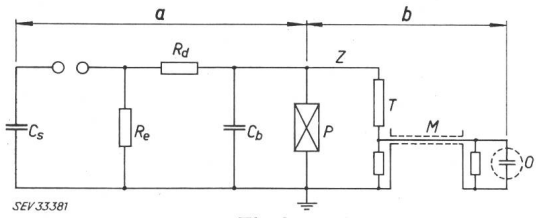

Fig. 2
Aufbau eines Stoßspannungskreises
a Stoßspannungserzeuger
C_s Stosskapazität; R_d Dämpfungswiderstand; R_e Entladewiderstand; C_b Belastungskapazität;
b Messanordnung
Z Zuleitung; *T* Spannungsteiler; *M* Messkabel; *O* Stoßspannungsoszillograph; *P* Prüfling

einer Leitung erklären lassen. In diesem Sinne stellt auch die Zuleitung *Z* zum Spannungsteiler *T* ein Netzwerk dar, das die Übertragungseigenschaften der gesamten Messanordnung erheblich beeinflussen kann. Durch eine geschickte Aufstellung des Teilers (horizontal, hängend) und einem flächenhaften, praktisch induktionslosen Aufbau der erdseitigen Verbindungsleitungen (Metallplatten oder feinmaschiges Netzwerk) lassen sich die Zuleitungslängen aber erheblich verkleinern, so dass ihr Einfluss in erster Annäherung vernachlässigt werden kann.

Die dargestellte Messanordnung verwendet zum Anschluss des Oszillographen *O* an den Spannungsteiler *T* ein Messkabel *M*. Diese übliche Methode des Oszillographenanschlusses besitzt den grossen Vorteil, dass der Oszillograph selbst in einem weitgehend feldfreien und damit ungefährlichen Bereich aufgestellt werden kann. Durch eine zusätzliche Abschirmung des Oszillographen und der Messkabel (doppelte, dreifache Schirmung) können die sehr lästigen hochfrequenten Einstreuungen vermieden werden, die nicht nur den Vorgang selbst, sondern teilweise auch die Zeitablenkung des Oszillographen beeinflussen. Die durch die stets endliche Dämpfung des Messkabels hervorgerufenen Messfehler lassen sich bei Kabellängen bis zu wenigen 10 m auch bei sehr kurzen Keilwellen noch in erträglichen Grenzen halten und auch ausreichend genau berechnen. Die von Stoßspannungsoszillographen verursachten Messfehler können ebenfalls leicht abgeschätzt werden, da dessen Bandbreite meist bekannt ist oder in einfacher Weise ermittelt werden kann.

Der Spannungsteiler verursacht von allen Gliedern der Messanordnung den grössten Messfehler, vor allem, wenn der Teiler wegen der Höhe der zu messenden Stoßspannung sehr gross ist. Seine Bauhöhe beträgt bei der üblichen Aufstellung in freier Atmosphäre ca. 2,5 m pro 1000 kV Stoßspannung. Da die angestellten Berechnungen auch noch für Frequenzbereiche bis zu mehreren 10 MHz gültig sein sollen, liegt die Bauhöhe der Spannungsteiler in der Grössenordnung der Wellenlänge des betrachteten Frequenzbereiches.

Eine Ersatzschaltung des Spannungsteilers nur durch wenige, konzentrierte Bauelemente ist damit unzulässig. Vielmehr müssen alle Eigenschaften der Bauelemente bei diesen hohen Frequenzen grundsätzlich berücksichtigt und der Spannungsteiler selbst durch eine Vielzahl kleiner Bauelemente ersetzt werden.

Eine möglichst genaue, theoretische Untersuchung des Spannungsteilers alleine ist wegen der Komplexheit dieses Gliedes innerhalb der Stoßspannungsmessordnung daher sinnvoll und wird weiterhin durch die bekannt grossen Übertragungsfehler gerechtfertigt.

3. Ersatzschaltung des Spannungsteilers

Der Hochspannungsteil von Stoßspannungsteilern besteht fast ausnahmslos aus kontinuierlich und induktionsarm gewickelten Widerstandsbändern oder aus einer Vielzahl von in Serie geschalteter Kondensatoren, meist in der Form von Ölpapierkondensatoren. Ausgeprägte Einzelbauteile sind daher nicht vorhanden und die Annahme eines homogenen Aufbaues für die Aufstellung des Ersatzschaltbildes ist naheliegend. Damit wird die Forderung erfüllt, jeden Teiler nicht durch konzentrierte, sondern durch viele kleine Bauelemente zu ersetzen. In Fig. 3 ist das allgemeine Ersatzschaltbild wiedergegeben, das sich nur aus Längsimpedanzen Z_l', die von der

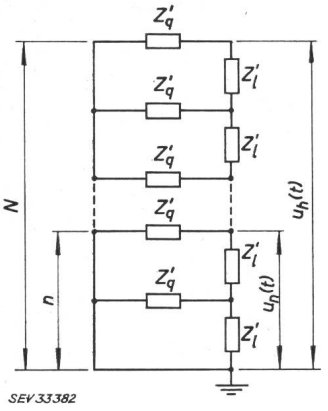

Fig. 3
Allgemeine Ersatzschaltung eines Spannungsteilers
Z_l' Längsimpedanz pro Element; Z_q' Querimpedanz pro Element; $u_h(t)$ Spannungsverlauf am Hochspannungsteil; $u_n(t)$ Spannungsverlauf am Niederspannungsteil; N Anzahl der Teilerelemente; n Anzahl der Teilerelemente am Niederspannungsabgriff; $Z_l = NZ_l'$ gesamte Längsimpedanz; $Z_q = Z_q'/N$ gesamte Querimpedanz

Art des Spannungsteilers bestimmt werden, und zur Erde führende Querimpedanzen Z_q', die durch die wirksamen Erdkapazitäten gebildet werden, zusammensetzt.

Grössere Abweichungen zwischen diesem Ersatzschaltbild und den wirklichen Verhältnissen können nur in folgenden Punkten auftreten:

a) Wird am hochspannungsseitigen Anschluss des Teilers eine grosse Elektrode angebracht, so liegt eine nicht mehr zu vernachlässigende, hochspannungsseitige Verkettung des Teilers vor. Diese Methode wird in der angegebenen [3] oder teilweise abgewandelten Art (abgestufte Steuerkapazitäten [4]) heute fast durchwegs angewandt, um die durch die erdseitigen Verkettungskapazitäten erzwungene nichtlineare Spannungsverteilung längs des Teilers zu verkleinern. In guter Annäherung lässt sich dieser Einfluss der hochspannungsseitigen Verkettung durch eine Verkleinerung der Erdkapazitäten berücksichtigen. Da der Erfolg dieser Steuerungsmethoden heute aber allgemein bekannt ist und daraus Teilerkonstruktionen resultieren, die durch die teilweise recht grossen Schirmelektroden unhandlich und sperrig werden, soll diese Art der Verbesserung der Übertragungseigenschaften nicht besonders berücksichtigt werden.

b) Die vorausgesetzte Homogenität des Teilers wird gelegentlich durch einen nichtlinearen Widerstandsbelag bei Ohmschen Spannungsteilern durchbrochen [5]. Damit werden die Längsimpedanzen Z_l' pro Teilerelement ungleich gross. Damit lässt sich die Ohmsche Spannungsverteilung an die durch die Erdkapazität bedingte kapazitive Spannungsverteilung angleichen, so dass ähnliche Verhältnisse, wie unter a) beschrieben, entstehen. Durch die Annahme kleinerer Erdkapazitäten lässt sich auch dieser Fall gut berücksichtigen.

c) Der Niederspannungsteil des Teilers wird in der Praxis konstruktiv stets anders aufgebaut als der Hochspannungsteil. Neben dem notwendigen Messkabelanschluss wird durch das grosse Übersetzungsverhältnis die Impedanz des Niederspannungsteiles, bezogen auf die lineare Ausdehnung des Teilers, viel kleiner als die entsprechenden Teilimpedanzen des Hochspannungsteiles. So dürfte beispielsweise bei einer Teilerhöhe von 2,5 m und einem Übersetzungsverhältnis von 1000 der Niederspannungsteil nur 2,5 mm der gesamten Teilerhöhe betragen, was aber konstruktiv nur schwer realisierbar ist. Der räumlich zu grosse Aufbau des Niederspannungsteiles wird wohl ausnahmslos die Teilereigenschaften verschlechtern, so dass die angestellten Berechnungen zu günstig sein können.

Ein andersartiger Aufbau von Hoch- und Niederspannungsteil kann bei hohen Frequenzen wegen des hier wirksamen Skin-Effektes die Übertragungseigenschaften beeinflussen. Bei der Verwendung von Drahtwiderständen ist dies unvermeidlich. Bei der Konstruktion sollte daher darauf Rücksicht genommen werden, dass die durch den Skin-Effekt bedingte Widerstandserhöhung in beiden Teilen etwa gleich gross ist.

d) Der Niederspannungsteil wird im Ersatzschaltbild als unbelastet angenommen. Der Anschluss des Messkabels belastet aber vor allem bei Ohmschen Spannungsteilern den Niederspannungsteil sehr stark und verändert damit die resultierende Längsimpedanz dieses Teiles.

Dieser Einfluss ist bei allen Teilerarten besonders sorgfältig zu untersuchen [6], kann aber wegen der Verschiedenheit der Impedanzverhältnisse bei den einzelnen Teilerarten nicht bei allgemeinen Teileruntersuchungen berücksichtigt werden.

Unter Berücksichtigung all dieser Einflüsse, die in speziellen Fällen zu abweichenden Teilereigenschaften führen können, kann nun das Ersatzschaltbild eines kleinen Teilerelementes angegeben werden. Es ist in Fig. 4 dargestellt:

Die Erdkapazität C_e' entsteht durch das unvermeidliche elektrische Feld zwischen jedem Teilerelement und der grossen vorhandenen Erdfläche. Das Verhältnis der Teilerhöhe zum wirksamen Teilerdurchmesser hat nur einen geringen Einfluss auf die Erdkapazität. Man wird mit einem Mittelwert von 15 pF/m Teilerhöhe rechnen können.

Die gesamte Längsimpedanz Z_l' setzt sich im allgemeinsten Fall aus einer Parallelschaltung einer Kapazität C_p' mit der Serienschaltung eines Widerstandes R', einer Kapazität C' und einer Induktivität L' zusammen. Während sich die Grösse von R' und C' ohne weiteres aus den aktiven Teilerelementen ergibt, ist die Induktivität L' als stets unerwünschte, aber auch unvermeidliche Streuinduktivität anzusehen, die letztlich durch die grosse lineare Ausdehnung des Teilers bedingt wird. Ihr Einfluss wurde bisher bei allen Teilerarten praktisch vernachlässigt, obwohl dies bei hochfrequenten Vorgängen keineswegs zulässig ist. Ihre Grösse hängt von den verwendeten Bauteilen ab. Bei Ohmschen Teilern, die aus energetischen Gründen fast ausnahmslos aus induktionsarm gewickelten Drahtwiderständen aufgebaut werden, errechnet sich die Induktivität aus der induktiven Zeitkonstante L/R des verwendeten Widerstandsbandes. Bei mittleren Werten des Widerstandes wird man mit Zeitkonstanten von 10 ns rechnen können, wobei aber bei den gelegentlich gebauten niederohmigen Spannungsteilern auch Werte bis zu 30 ns auftreten dürften [7].

Bei kapazitiven Spannungsteilern ist der Absolutwert der Induktivität zwar nicht gross, aber dennoch von ausschlaggebender Bedeutung für das Übertragungsverhalten, wie später noch gezeigt wird. Die Grösse der Induktivität richtet sich hier nach der Bauart der verwendeten Kondensatoren.

Als unteren Grenzwert wird man günstigenfalls 1 µH/m Teilerlänge annehmen können. Dies entspricht in etwa der Induktivität eines gestreckten Leiters.

Die als induktionslos angenommene Kapazität C_p', die zu den aktiven Teilerelementen parallel liegt, wird als reine Streukapazität aufgefasst und darf somit nicht durch konzentrierte Schaltelemente künstlich vergrössert werden, da damit die vorausgesetzte Induktionslosigkeit bei hohen Frequenzen nicht mehr gültig ist. Dass eine Parallelkapazität C_p von grössenordnungsmässig 0,1...1 pF für den gesamten Spannungsteiler aber wirksam ist, erklärt sich aus Schaltkapazitäten und kann auch experimentell bestätigt werden.

Mit der Berechnung des Übertragungsverhaltens des allgemeinen Teilertyps nach Fig. 4 lässt sich somit der rein Ohmsche ($C' = \infty$) und der rein kapazitive Teiler ($R' \approx 0$) unmittelbar erfassen. Der noch gelegentlich verwendete gemischte Spannungsteiler [8], der durch die Parallelschaltung konzentrierter und keineswegs induktionsloser Kapazitäten und Widerstände entsteht, ist bei hohen Frequenzen als rein kapazitiver Span-

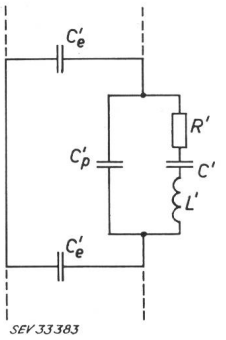

Fig. 4
Ersatzschaltbild eines Teilerelementes
$R = R'N$ gesamter Teilerwiderstand;
$L = L'N$ gesamte Teilerinduktivität;
$C = C'/N$ gesamte Teilerkapazität;
$C_e = C_e'N$ gesamte Teilererdkapazität
$C_p = C_p'/N$ gesamte Teilerparallelkapazität

nungsteiler aufzufassen, da bei den hohen Frequenzen die Impedanz der kapazitiven Säule wesentlich kleiner wird als die mit der Frequenz ansteigende Impedanz des Ohmschen Teiles.

4. Ableitung der Rechteckstossantwort

Zur Kennzeichnung des Übertragungsverhaltens wird die Rechteckstossantwort (Übergangsfunktion) $G(t)$ herangezogen. Die von der Leitungsgleichung ausgehende Berechnung mit Hilfe der Laplace-Transformation ist im Anhang auszugsweise wiedergegeben. Für den Spannungsteiler nach Fig. 4 wird die Rechteckstossantwort am Niederspannungsteil bei einem anliegenden Hochspannungs-Rechteckimpuls der Grösse U_0 und dem Übersetzungsverhältnis des Teilers N/n:

$$G(t) = \frac{u_n(t)}{U_0} \cdot \frac{N}{n} \tag{1}$$

$$G(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C + C_p)} + \\ + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(bt) + \frac{a}{b}\sinh(bt)}{\left(1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2}\right)\left(1 + \frac{C_p k^2\pi^2}{C_e}\right)}$$

mit $$a = \frac{R}{2L}$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{C k^2\pi^2}}{\frac{LC_e}{k^2\pi^2}\left(1 + \frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2\right)}}$$

Die bei der Ableitung dieses Ausdruckes gemachten Voraussetzungen ($C_p \ll C$; $C_e < C$; $n \ll N$) werden bei allen praktischen Teilerarten erfüllt.

Die Rechteckstossantwort gehorcht somit einer recht schwer allgemein diskutierbaren Gleichung. Da das Auftreten des Summengliedes eine einfache numerische Berechnung unmöglich macht, wurden mehrere Beispiele mit Hilfe einer elektronischen Rechenmaschine durchgerechnet.

4.1 *Der Ohmsche Spannungsteiler*

Mit $C \to \infty$ wird die Rechteckstossantwort:

$$G(t) = 1 - 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(bt) + \frac{a}{b}\sinh(bt)}{1 + \frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2} \tag{2}$$

mit $$a = \frac{R}{2L}$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{\frac{LC_e}{k^2\pi^2}\left(1 + \frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2\right)}}$$

Die einfachste Methode, das Übertragungsverhalten Ohmscher Spannungsteiler zu verbessern, besteht in der Verkleinerung des Gesamtwiderstandes R, wie aus Fig. 5 zu entnehmen ist. Als Erdkapazität wurde $C_e = 40$ pF angenommen, womit näherungsweise ein ungesteuerter 1-MV-Stoßspannungsteiler charakterisiert sein dürfte. Die angenommene induktive Zeitkonstante von 10 ns stellt einen Mittelwert dar, die bei dem hochohmigen Teiler von 30 kΩ zu gross, bei dem niederohmigen Teiler von 1 kΩ eher zu klein sein dürfte, sofern nicht eine besonders induktionsarme Konstruktion der Widerstandssäule angewandt wurde (Parallelschalten vieler Widerstandsbänder). Der Einfluss der Induktivität ist aber bei hochohmigen Spannungsteilern — trotz der absolut grossen Induktivität von 100 µH und mehr — sehr gering. Bei den niederohmigen Spannungsteilern begrenzt die Induktivität des Widerstandes aber die Anwendung sehr stark. Der gewünschte, exponentialartige Anstieg der Rechteck-Wiedergabe geht hier in ein starkes Überschwingen über, das schliesslich zu einer ausgeprägten Eigenresonanz führt. In Fig. 6 wurde am Beispiel des 3-kΩ-Spannungsteilers der Einfluss der Induktivität näher untersucht. Daraus ist sehr deutlich zu entnehmen, dass die Reduzierung des Gesamtwiderstandes nur dann sinnvoll ist, wenn gleichzeitig die induktive Zeitkonstante des Teilers mit verkleinert wird. Experimentell wird dieses Ergebnis durch Oszillogramme bestätigt, die der Literatur zu entnehmen sind [9]. Diese Reduzierung des Widerstandes führt zu einem nur in speziellen Fällen anwendbaren Spannungsteiler, da der geringe Gesamtwiderstand sehr stark auf die Spannungsquelle rückwirkt.

Theoretisch kann der schädliche Einfluss der Induktivität leicht aus Gl. 2 abgeleitet werden. Die im Summenglied auf-

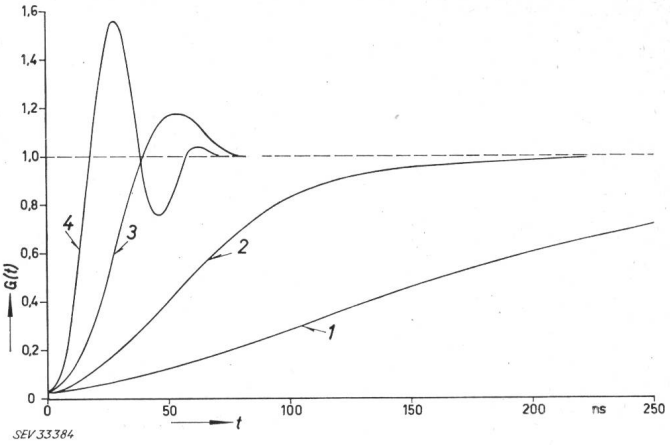

Fig. 5

Rechteckstossantworten des Ohmschen Teilers bei Änderung des Ohmschen Widerstandes R

Konstanten: $C_e = 40$ pF, $C_p = 1$ pF, $L/R = 10$ ns
1 $R = 30$ kΩ; *2* $R = 10$ kΩ; *3* $R = 3$ kΩ; *4* $R = 1$ kΩ

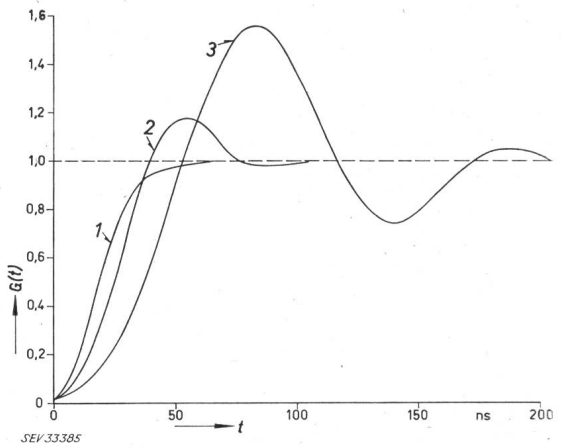

Fig. 6

Wie Fig. 5, aber bei Änderung der Induktivität L

Konstanten: $R = 3$ kΩ, $C_e = 40$ pF, $C_p = 1$ pF
1 $L = 10$ µH, ($L/R = 3{,}3$ ns); *2* $L = 30$ µH, ($L/R = 10$ ns);
3 $L = 90$ µH, ($L/R = 30$ ns)

tretenden Hyperbelfunktionen gehen in trigonometrische Funktionen über, wenn b imaginär wird, d. h.:

$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{k^2\pi^2}{LC_e\left(1+\frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2\right)} \tag{3}$$

Ist bereits das erste Summenglied trigonometrisch ($k = 1$), so liegt mit Sicherheit ein stärkeres Überschwingen der Rechteckstoßantwort vor. Hiefür wird:

$$R \leqq 2\pi\sqrt{\frac{L}{C_e}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+C_p\pi^2/C_e}} \tag{3a}$$

Den günstigen Einfluss verringerter Erdkapazitäten bei gleichem Teilerwiderstand zeigt Fig. 7, womit die heute übliche Technik der kapazitiven Steuerung der Ohmschen Teiler dargestellt wird. Dieser günstige Effekt bei induktionsbehaftetem Widerstand ist aber bei kleinen Erdkapazitäten C_e nur der dämpfenden Wirkung der Parallelkapazitäten C_p zuzuschreiben, wie aus Fig. 8 ersichtlich ist. Ist nämlich die Parallelkapazität sehr klein (Kurve *1* und *2* in Fig. 8), so tritt ein echter Laufzeitcharakter des Übertragungsverhaltens ein, der sich oftmals auch experimentell nachweisen lässt. Das Vorhandensein einer Laufzeit, also kleiner Parallelkapazität, kann demnach auch die Übertragungseigenschaften wesentlich verbessern, ist aber bei kleinen Erdkapazitäten und Gesamtwiderständen mit der Gefahr von Laufzeitschwingungen gekoppelt. Besonders deutlich wird dies wiederum durch eine Betrachtung von Gl. (3a), die mit C_e erweitert werde:

$$RC_e \leqq 2\pi\sqrt{LC_e} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+C_p\,\pi^2/C_e}} \tag{3b}$$

Diese Gleichung kann als Grenzbedingung für ein schwingungsfreies Arbeiten aller heute üblichen, niederohmigen oder gesteuerten Spannungsteiler aufgefasst werden. Verkleinert man nämlich die Erdkapazität durch kapazitive Steuerungsmethoden, so geht die Laufzeit $\sqrt{LC_e}$ nur schwächer zurück als die Zeitkonstante RC_e, womit der Teiler in den schwingenden Bereich gerät. Auch hier kann die Erscheinung nur dann vermieden werden, wenn mit der Verkleinerung der Erdkapazität C_e eine proportionale Verkleinerung der Widerstandsinduktivität L verbunden wird. Da bei gelegentlich veröffentlichten Rechteckstossantworten gut gesteuerter Ohmscher Spannungsteiler derartige Schwingungen häufig anzutreffen sind, liegt die Vermutung nahe, dass diese durch die hier abgeleiteten Zusammenhänge entstehen.

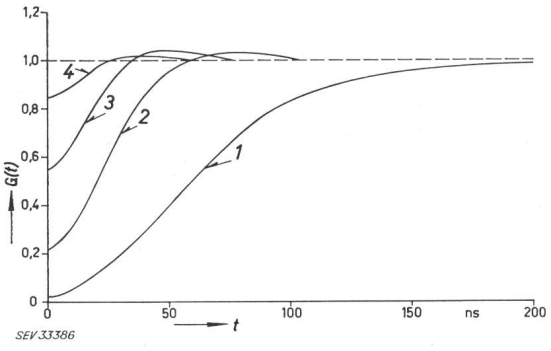

Fig. 7

Wie Fig. 5, aber bei Änderung der Erdkapazität C_e
Konstanten: $C_p = 1$ pF, $R = 10$ kΩ, $L/R = 10$ ns
1 $C_e = 40$ pF; *2* $C_e = 12$ pF; *3* $C_e = 4$ pF; *4* $C_e = 1$ pF

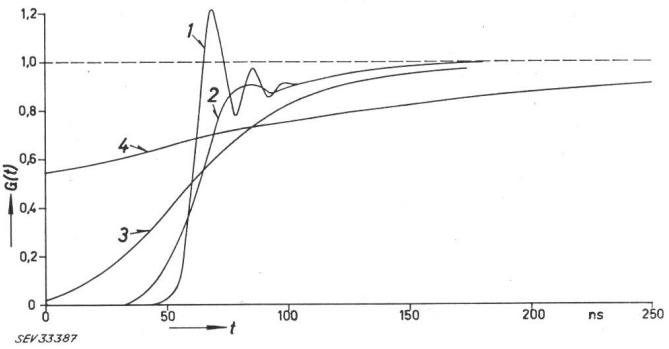

Fig. 8

Wie Fig. 5, aber bei Änderung der Parallelkapazität C_p
Konstanten: $C_e = 40$ pF, $R = 10$ kΩ, $L/R = 10$ ns
1 $C_p = 0{,}01$ pF; *2* $C_p = 0{,}1$ pF; *3* $C_p = 1$ pF; *4* $C_p = 10$ pF

Die Übergangsfunktion eines Ohmschen Spannungsteilers zeigt einen umso ausgeprägteren Spannungssprung zur Zeit $t = 0$, je grösser die Parallelkapazität C_p bei einer vorgegebenen Erdkapazität C_e wird. Praktisch ist dieser Effekt natürlich nicht erzielbar, da im gesamten Messkreis sonstige Dämpfungseinflüsse vorhanden sind, die einen Spannungssprung nicht zulassen. Physikalisch ist der Spannungssprung leicht dadurch erklärbar, dass die angenommene Parallelkapazität einen kapazitiven Spannungsteiler bildet, dessen Übersetzungsverhältnis durch die Erdkapazitäten stark reduziert wird. Im Bereich sehr kleiner Zeiten der Rechteckstossantwort ist aber das Ersatzschaltbild nicht mehr gültig, da die Parallelkapazität C_p induktionslos angenommen wurde.

Das heute übliche Ersatzschaltbild Ohmscher Spannungsteiler berücksichtigt nur die wirksamen Erdkapazitäten und führt vor allem bei kleinen Erdkapazitäten, bzw. kleinen Gesamtwiderständen zu falschen Übertragungsverhältnissen. Ein Vergleich mag diese Behauptung bekräftigen. Vernachlässigt man in Gl. (1) die Induktivität L und die Parallelkapazität C_p, so erhält man die einfachere Rechteckstossantwort:

$$G(t) = 1 + 2\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k \cdot \mathrm{e}^{-\frac{t}{T_k}}$$

mit (4)

$$T_k = \frac{RC_e}{\pi^2 k^2}$$

die das Kettenleiterverhalten des Ohmschen Teilers immer noch berücksichtigt. Das noch verbleibende Summenglied wird für die Aufstellung des sehr einfachen Ersatzschaltbildes durch eine e-Funktion in der Weise ersetzt, dass die Ansprechzeit (Response-Time T_r; $T_r = \int_0^{\infty}[1 - G(t)]\,\mathrm{d}t$) gegenüber Gl. (4) gleich gross bleibt:

$$G(t) = 1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T}} \tag{5}$$

$$T = \frac{RC_e}{6}$$

Das diese Gleichung erfüllende, bekannte Ersatzschaltbild ist in Fig. 9 dargestellt.

In den Fig. 10, 11 und 12 wurden für Spannungsteiler von 30, 10 und 1 kΩ Gesamtwiderstand die Übergangsfunktionen für die Ersatzschaltbilder nach Gl. (2), (4) und (5) gegenübergestellt. Man erkennt, dass die Abweichungen für die üblicher-

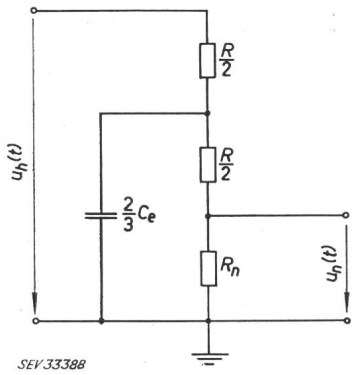

Fig. 9
Ersatzschaltbild des Ohmschen Teilers
C_e gesamte Teilererdkapazität; R gesamter Teilerwiderstand; R_n Widerstand des Niederspannungsteiles
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

weise angenommenen Werte der Störelemente ($C_p = 1$ pF; $C_e = 40$ pF; $L/R = 10$ ns) bei grösseren Widerstandwerten (R > 8 kΩ; aperiodischer Grenzfall) vernachlässigbar sind. Bei kleineren Widerständen gelangt man in den schwingenden Bereich, ebenso bei sehr kleinen Parallelkapazitäten, so dass die Ersatzschaltungen ohne Induktivität völlig unbrauchbar werden.

Zusammenfassend lässt sich für den Ohmschen Teiler feststellen, dass die Vernachlässigung der Eigeninduktivität mit Sicherheit nur bei ungesteuerten, hochohmigen Spannungsteilern mit schlechten frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften zulässig ist.

4.2 Der kapazitive Spannungsteiler

Für die Rechteckstossantwort des kapazitiven Spannungsteilers ist Gl. (1) unmittelbar verwendbar. Die Annahme eines Serienwiderstandes endlicher Grösse ($R \approx 20\ \Omega$) muss bei hohen Frequenzen angenommen werden, da durch den Skineffekt in den Metallbelägen oder auch durch dielektrische Verluste im Kondensatordielektrikum eine kleine Dämpfung vorhanden ist. Ebenso ist eine endliche Induktivität stets vorhanden. Für die Erdkapazität gelten dieselben Bedingungen wie für den Ohmschen Teiler. Sie verursacht beim kapazitiven Teiler ein um den Faktor $C_e/6(C + C_p)$ reduziertes Übersetzungsverhältnis auch im stationären Zustand.

In Fig. 13 wurde eine berechnete Rechteckstossantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit einer sehr günstigen Serienkapazität von 150 pF aufgezeichnet. Man erhält einen recht hochfrequenten Einschwingvorgang, der auf Laufzeiterscheinungen zurückgeführt werden kann. Die Grundfrequenz [k = 1 in Gl. (1)] ist angenähert für $C_p \ll C$ und $C_e \ll \pi^2 C$ zu berechnen aus:

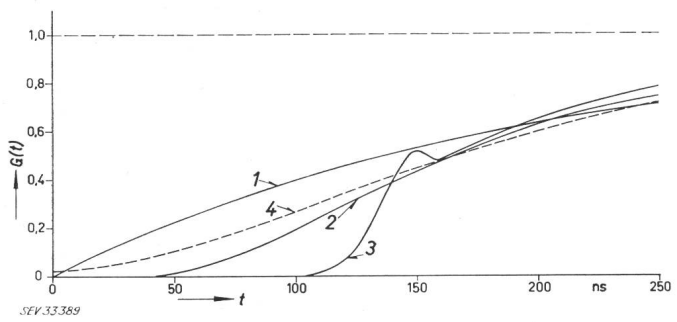

Fig. 10
Vergleich der Ersatzschaltungen des Ohmschen Teilers bei $R = 30$ kΩ
1 Ersatzschaltbild (Fig. 9): $R = 30$ kΩ, $C_e = 40$ pF
2 Kettenleiter ohne L und C_p: $R = 30$ kΩ, $C_e = 40$ pF
3 Kettenleiter mit sehr kleinem C_p: $R = 30$ kΩ, $C_e = 40$ pF, $L/R = 15$ ns, $C_p = 0{,}01$ pF
4 Kettenleiter mit $R = 30$ kΩ, $C_e = 40$ pF, $L/R = 15$ ns, $C_p = 1$ pF

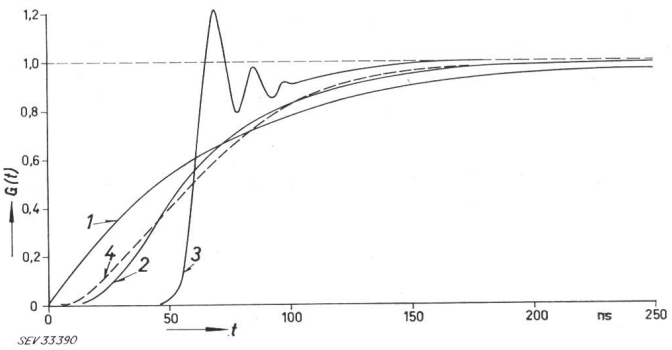

Fig. 11
Vergleich der Ersatzschaltungen des Ohmschen Teilers bei $R = 10$ kΩ
1 Ersatzschaltbild (Fig. 9): $R = 10$ kΩ, $C_e = 40$ pF
2 Kettenleiter ohne L und C_p: $R = 10$ kΩ, $C_e = 40$ pF
3 Kettenleiter mit sehr kleinem C_p: $R = 10$ kΩ, $C_e = 40$ pF, $L/R = 10$ ns, $C_p = 0{,}01$ pF
4 Kettenleiter mit $R = 10$ kΩ, $C_e = 40$ pF, $L/R = 10$ ns, $C_p = 1$ pF

$$b_1 = 2\pi f_1 = \frac{\pi}{\sqrt{L(C_e + C_p\pi^2)}}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\sqrt{L(C_e + C_p\,\pi^2)}} \approx \frac{1}{2\sqrt{LC_e}}$$

Der Ausdruck $\sqrt{LC_e}$ ist aber nichts anderes als die Laufzeit der in den Teiler eindringenden, ungedämpften hochfrequenten Vorgänge. Bei einer Teilerhöhe von 2,5 m (entsprechend etwa einer Stoßspannung von 1 MV) liegen diese hochfrequenten Einschwingvorgänge in der Grössenordnung von 20...50 MHz. Ihr Auftreten wurde wohl erstmals von *Howard* [10] aufgedeckt. Da in einem gut ausgeführten Messkreis diese Schwingungen keineswegs völlig gedämpft werden, ist der rein kapazitive Spannungsteiler in dieser Art für die Messung hochfrequenter Vorgänge vollkommen ungeeignet.

Anhang

Berechnung der Rechteckstossantwort

Die Ersatzschaltung (Fig. 3) ist aus lauter gleichen Gliedern Z_l' und Z_q' aufgebaut und kann daher als Kettenleiter, oder bei unendlich feiner Verteilung als homogene Leitung, die an einem Ende geerdet ist, betrachtet werden.

Die Lösung der Leitungsgleichung für stationäre Wechselgrössen lautet:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh(\gamma x) + \underline{J}_2 \underline{Z} \sinh(\gamma x) \qquad (7)$$

mit der Fortpflanzungskonstante

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z'_l}{Z'_q}} = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{Z_l}{Z_q}}$$

und dem Wellenwiderstand

$$Z = \sqrt{Z'_l Z'_q} = \sqrt{Z_l Z_q}$$

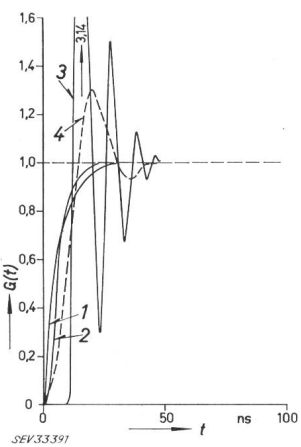

Fig. 12
Vergleich der Ersatzschaltungen des Ohmschen Teilers bei $R = 1$ kΩ
1 Ersatzschaltbild (Fig. 9): $R = 1$ kΩ, $C_e = 40$ pF
2 Kettenleiter ohne L und C_p: $R = 1$ kΩ, $C_e = 40$ pF
3 Kettenleiter mit sehr kleinem C_p: $R = 1$ kΩ, $C_e = 40$ pF, $L/R = 5$ ns, $C_p = 0{,}01$ pF
4 Kettenleiter mit $R = 1$ kΩ, $C_e = 40$ pF, $L/R = 5$ ns, $C_p = 1$ pF

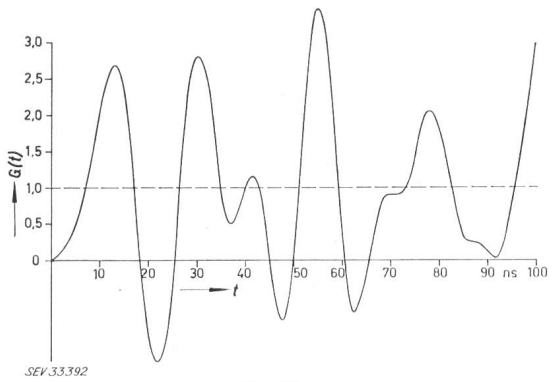

Fig. 13
Rechteckstossantwort eines kapazitiven Teilers
$C = 150$ pF, $C_e = 40$ pF, $C_p = 1$ pF, $R = 20\,\Omega$, $L = 2{,}5\,\mu$H

Mit $U_2 = 0$ (Teiler ist am Fussende geerdet) errechnet sich die Spannung am Niederspannungsabgriff $\left(x = \frac{n}{N} l\right)$ im Verhältnis zur Spannung auf der Hochspannungsseite ($x = l$) zu:

$$\frac{u_n(t)}{u_h(t)} = \frac{\sinh\left(\frac{n}{N}\sqrt{\frac{Z_l}{Z_q}}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{Z_l}{Z_q}}\right)} \tag{8}$$

Mit Hilfe der Laplace-Transformation [11] kann die Antwort dieses Übertragungssystems auf einen Einheitssprung berechnet werden [$u_h(t) = U_0$].

Die Lösung der Ausgangsfunktion im Bildbereich $y(s)$ lässt sich sofort unter Berücksichtigung der Eingangsfunktion $\left[\text{Einheitssprung f}(s) = \frac{1}{s}\right]$ anschreiben:

$$y(s) = \frac{1}{s \cdot p(s)} \tag{9}$$

Der Übertragungsfaktor $1/p(s)$ ist durch Gl.(8) unter Berücksichtigung von Fig. 4 gegeben mit:

$$\frac{1}{p(s)} = \frac{\sinh\left(\frac{n}{N}\sqrt{\frac{(R + sL + 1/sC)\,sC_e}{1 + (R + sL + 1/sC)\,sC_p}}\right)}{\sinh\sqrt{\frac{(R + sL + 1/sC)\,sC_e}{1 + (R + sL + 1/sC)\,sC_p}}} \tag{10a}$$

$$\frac{1}{p(s)} = \frac{\sinh\left(\frac{n}{N}\sqrt{Z(s)}\right)}{\sinh\sqrt{Z(s)}} \tag{10b}$$

mit

$$\sqrt{Z(s)} = \sqrt{\frac{(R + sL + 1/sC)\,sC_e}{1 + (R + sL + 1/sC)\,sC_p}} \tag{10c}$$

Da $p(s)$ lauter verschiedene Nullstellen hat und diese von Null verschieden sind, kann die Lösung von Gl. (9) mit dem Heavisideschen Entwicklungssatz erfolgen. Für die Rechteckstossantwort (Übergangsfunktion) erhält man im Originalbereich den Ausdruck:

$$Y(t) = \frac{1}{p(o)} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{a_k t}}{a_k \cdot p'(a_k)} \tag{11}$$

1. Berechnung von $p(o)$.

Mit der Reihenentwicklung für den sinh und den in der Praxis erlaubten Vernachlässigungen $C_p \ll C$, $C_e < C$ und $\frac{n}{N} \ll 1$, ergibt sich

$$p(o) = \lim_{s \to o} p(s) = \frac{N}{n}\left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C + C_p}\right) \tag{12a}$$

Damit wird:

$$\frac{1}{p(o)} = \frac{n}{N}\left(1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C + C_p}\right) \tag{12b}$$

2. Berechnung von a_k.

a_k sind die Wurzeln von $p(s)$. Da keine identischen Nullstellen von Zähler und Nenner existieren, heisst $p(s) = 0$ auch

$$\sinh\sqrt{Z(s)} = 0 \tag{13}$$

Für die Periodität der Hyperbelfunktion gilt:

$$\sinh\left(\sqrt[n]{Z(s)} + \frac{2k\pi i}{n}\right) = \sinh\sqrt[n]{Z(s)} \tag{14}$$

Der sinh ist Null, falls das Argument Null ist. Damit ist:

$$\sqrt{\frac{(R + sL + 1/sC)\,sC_e}{1 + (R + sL + 1/sC)\,sC_p}} + k\pi i = 0 \tag{15}$$

Als Lösung für die Wurzeln (a_k) erhält man:

$$s = a_k = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2}}{\frac{L\,C_e}{k^2\pi^2}\left(1 + \frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2\right)}} \tag{16a}$$

Damit wird

$$a_k = -a \pm b \tag{16b}$$

3. Berechnung von $p'(a_k)$

$$p'(s) = \frac{\sinh\left(\frac{n}{N}\sqrt{Z(s)}\right)\cosh\sqrt{Z(s)} \cdot \frac{Z'(s)}{2\sqrt{Z(s)}} - \sinh\sqrt{Z(s)} \cdot \cosh\left(\frac{N}{n}\sqrt{Z(s)}\right) \cdot \frac{n\,Z'(s)}{N \cdot 2\sqrt{Z(s)}}}{\left[\sinh\left(\frac{n}{N}\sqrt{Z(s)}\right)\right]^2} \tag{17}$$

Für $\frac{n}{N} \ll 1$ ist:

$$\sinh\left(\frac{n}{N}\sqrt{Z(s)}\right) \approx \frac{n}{N}\sqrt{Z(s)} \tag{18}$$

$$\cosh\left(\frac{n}{N}\sqrt{Z(s)}\right) \approx 1$$

Mit den Beziehungen (18) und $s = a_k$ wird Gl. (17):

$$p'(a_k) = \frac{N}{n} \cdot \frac{Z'(a_k)}{2 \cdot Z(a_k)}\left[\cosh\sqrt{Z(a_k)} - \frac{1}{\sqrt{Z(a_k)}}\sinh\sqrt{Z(a_k)}\right] \tag{19}$$

Nach Einsetzen von Gl. (16) in Gl. (10c) erhält man:

$$\sqrt{Z(a_k)} = -jk\pi \tag{20}$$

Nach Differenzieren von $Z(s)$ und Einsetzen von Gl. (16) ergibt sich:

$$Z'(a_k) = \pm 2Lb\,(C_e + C_p k^2\pi^2)^2/C_e \tag{21}$$

Da

$$\cosh \sqrt{Z(a_k)} = \cosh(-jk\pi) = \cos k\pi = (-1)^k \tag{22}$$

und

$$\sinh \sqrt{Z(a_k)} = \sinh(-jk\pi) = -j \sin k\pi = 0$$

ist, erhält man als Lösung für Gl. (19):

$$p'(a_k) = \frac{N}{n}(-1)^k \cdot \frac{L\,b\,(C_e + C_p k^2\pi^2)^2}{C_e\,(jk\pi)^2} \tag{23}$$

Mit den Beziehungen (12b), (16a), (16b) und (23) ergibt sich die Rechteckstossantwort aus Gl. (11) zu:

$$Y(t) \cdot \frac{N}{n} = \frac{u_n(t)}{U_0} \cdot \frac{N}{n} = G(t)$$

$$G(t) = 1 - \frac{C_e}{6\,(C + C_p)} + \tag{24}$$

$$+ 2\,e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(bt) + \frac{a}{b}\sinh(bt)}{\left(1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2}\right)\left(1 + \frac{C_p k^2\pi^2}{C_e}\right)}$$

mit $a = R/2L$:

$$b = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2}}{\frac{LC_e}{k^2\pi^2}\left(1 + \frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2\right)}}$$

Literatur

[1] *M. Özkaya.* Über Messfehler bei der Stoßspannungsmessung mit Spannungsteiler und Oszillograph. Diss. TH Stuttgart 1958.

[2] *A. Ašner:* Fortschritte auf dem Gebiet der Messung sehr hoher, rasch veränderlicher Stoßspannungen. BBC-Mitteilungen 47(1960), S. 239...267.

[3] *J. H. Hagenguth:* Short-Time Spark-Over of Gaps. El. Engineering 56 (1937), S. 67...76.

[4] *O. Zinke:* Frequenzunabhängige kapazitiv-ohmsche Spannungsteiler für Messzwecke. ETZ 60 (1939), S. 927...930.

[5] *R. F. Goossens; P. G. Provoost:* Fehlerquellen bei der Registrierung hoher Stoßspannungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen. Ein neuer Hochspannungs-Messwiderstand. Bull. SEV 37 (1946), S. 175...184.

[6] *C. L. Dawes; C. H. Thomas; A. B. Drought:* Impulse Measurements by Repeated-Structure Networks. Trans. AIEE 69 (1950), Part I, S. 571...583.

[7] *E. Pirktl:* Bifilar wound resistances. The calculation of the inductance value and discussion of different ways of winding. ASEA (interner Bericht), Reg. 5249/0621 10. 9. 1955.

[8] *R. Elsner:* Die Messung steiler Hochspannungsstösse mittels Spannungsteiler Arch. f. Elektrotechnik 33 (1939), S. 23...40.

[9] *J. Miller* jr.; *J. F. Wittibschlager:* Measurements of Steep-Front Impulse Waves with an Isolated Screen Room Installation. Trans. AIEE 77(1958), Part. I, S. 262...270.

[10] *P. R. Howard:* Errors in Recording Surge Voltages. Proc. IEE 99 (1952), Part II, S. 371...383.

[11] *G. Doetsch:* Anleitung zum praktischen Gebrauch der Laplace-Transformation. München 1961, Oldenbourg.

Adresse der Autoren:

Dr.-Ing. *W. Zaengl*, Konservator, und Dipl. Ing. *K. Feser*, Wiss. Assistent, Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D-8 München (Deutschland).

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des CE 31, Matériel électrique pour atmosphères explosives, und SC 31G, Matériel à sécurité intrinsèque, vom 28. September bis 3. Oktober 1964 in Warschau

Das CE 31 hat als erstes die Bestimmung der Zündtemperatur nach der ASTM-Methode behandelt. Die Prüfungen werden in mehreren Ländern weitergeführt und die Resultate durch das Sekretariat gesammelt. Man will vor der Veröffentlichung der Messwerte ca. 2 Jahre warten, obwohl ausgezeichnete Fachliteratur, wie «Sicherheitskennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe» von *K. Nabert* und *G. Schön*, 2. Auflage (1963), ein beschleunigtes Vorgehen durchaus ermöglicht hätte. Immerhin wurde die deutsche Klassierung der Zündgruppen mehrheitlich angenommen, evtl. mit einer zusätzlichen sechsten Gruppe für Gase mit Entzündungstemperaturen unter 100 °C. Zur Frage des Explosionsschutzes im Zusammenhang mit Staub lehnte das CE 31 eine Übernahme von Dichtheitsstudien ab, da diese Arbeiten in anderen CE, z. B. SC 17B, CE 2, CE 50 usw., behandelt werden. Dagegen erachtet es sich als zuständig für das Studium der Zusammenhänge zwischen Staub und Explosionsursachen. Die britische Delegation hat im Zusammenhang mit der Schutzart «erhöhte Sicherheit» eine Definition der Zonen verschiedener Gefährlichkeit gewünscht, wie dies in England und den USA üblich ist. Es wurde jedoch wiederholt beschlossen, vorerst Apparate-Empfehlungen zu behandeln und nur in der Zukunft auf Installationsfragen und damit zusammenhängende Probleme zurückzukommen.

Anlässlich der geplanten Ausrüstung eines schweizerischen, modernen chemischen Betriebes für die Messung und Steuerung kontinuierlicher Prozesse mit logischen Einheiten wurde das Problem der Eigensicherheit im kleinen Kreise interessierter Schweizer Fachleute besprochen. Man kam zum Schluss, dass die diesbezüglichen deutschen Grundlagen mit der empfindlichen und relativ einfachen Prüfkammer TA 1 die besten Garantien gegen eine Explosion geben.

Ein diesbezügliches Exposé wurde in Warschau verteilt [*31G(Varsovie/Suisse)3*]. Auf Grund des schweizerischen Dokumentes, eines deutschen Vorschlages und englischer Ergänzungsvorschläge wurde die Priorität der Prüfkammer TA 1 gegenüber anderen Prüfeinrichtungen beschlossen. Die Mitglieder des SC 31G wurden aufgefordert, Prüfkammern nach deutschem Muster herzustellen und damit vergleichende Versuche zu beginnen. In ca. 2 Jahren sollten genug Erfahrungen gesammelt werden können, um eine Übernahme der deutschen Prüfkammer und einer Prüfmethode als Empfehlung der CEI zu ermöglichen.

H. Metzler

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Elektronische Platzbuchung für Autofähren der Dänischen Staatsbahnen

656.66.072.1 (489)

[Nach *G. Müller:* Elektronische Platzbuchung für Autofähren der Dänischen Staatsbahnen. Siemens Z. 38(1964)8, S. 653...658]

Im dichtbesiedelten und stark motorisierten Dänemark kommt den Fährverbindungen zwischen der Halbinsel Jütland und den mehreren hundert Inseln eine ganz besondere verkehrstechnische Bedeutung zu. Um bei starkem Andrang lange Wartezeiten auf die Fährschiffe zu vermeiden, von denen das grösste bis zu 400 Autos mitnehmen kann, wurde bereits 1957 von den Dänischen Staatsbahnen ein zentrales automatisches Buchungssystem eingeführt, welches auf elektromechanischer Grundlage arbeitete. Auch wenn die Buchungen auf die 8 wichtigsten innerdänischen,