

DIE VERZERRUNG DER WELLENFORM VON STOßGENERATOREN UNTER DEM EINFLUß DER BELASTUNGSIMPEDANZ

Von

T. HORVÁTH

Institut für Elektrizitätswerke, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 15. November 1958)

Die verschiedenen Vorschriften für Stoßspannungsuntersuchungen setzen die Wellenform der Untersuchungshochspannung fest und geben auch die Grenzwerte der zulässigen Abweichungen an. Die Wellenform von Stoßgeneratoren entspricht in unbelastetem Zustand stets den Vorschriften, unter dem Einfluß der Belastung erfährt jedoch die Wellenkurve eine Verzerrung. Die Belastbarkeit des Stoßgenerators ist durch jene Belastungsimpedanzen bestimmt, unter deren Einfluß die Verzerrung der Wellenform noch innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen bleibt.

Die Belastung ist zumeist eine Kapazität oder Induktivität, in Ausnahmefällen eventuell ein Widerstand. Auf Grund der üblichen Schaltungen

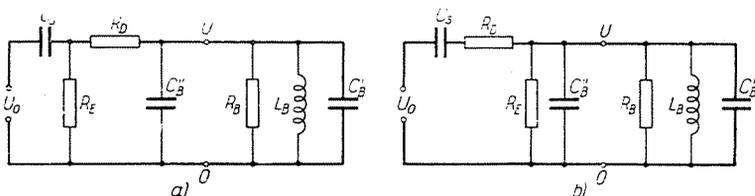


Bild 1

eines Stoßgenerators [1] gibt Bild 1 das Schaltschema des Stoßgenerators und der belastenden Impedanzen. In diesem Schema ist

C_S die Stoßkapazität,

R_D der Dämpfungswiderstand,

R_E der Entladewiderstand,

C_B'' der in den Stoßgenerator eingebaute Teil des Belastungskondensators,

R_B der Belastungswiderstand,

L_B die Belastungsinduktivität,

C_B' die äußere Belastungskapazität,

U_0 die auf der Zündfunkenstrecke des Stoßgenerators vorhandene Spannung vor dem Überschlag,

U die Ausgangsspannung des Stoßgenerators, d. h. die der an den Klemmen der Belastungsimpedanz erscheinenden Spannung.

1. Der Ausdruck für die Wellenform des Stoßgenerators

Für Zwecke der Berechnung können die in Bild 1 angegebenen Schalt-schemen durch Zusammenziehen der parallelgeschalteten Elemente vereinfacht werden. Die beiden Kapazitäten C'_B und C''_B im Bild 1a, lassen sich zu einer einzigen Kapazität C_B zusammenfassen, wobei sich ein Schema gemäß Bild 2 ergibt. Diese Schaltung vertritt den Stoßgenerator in der Schaltung

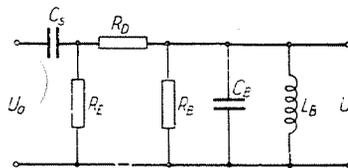


Bild 2'

laut Bild 1a für jeden beliebigen Belastungsfall. Sie ist aber auch zur Vertretung des Stoßgenerators laut Bild 1b geeignet, da der Entladewiderstand R_E des Stoßgenerators als ein Teil des Widerstandes R_B in Bild 2 angesehen werden kann; dieser letztere ist also der Resultante des äußeren Belastungswiderstandes und des mit ihm parallelgeschalteten Entladewiderstandes gleich. Der Wert des Widerstandes R_E gemäß Bild 2 muß in der Schaltung des Stoßgenerators laut Schema 1b als unendlich groß angenommen werden.

Die Gleichung der an der Belastungsimpedanz erscheinenden Stoßspannung kann für die verschiedenen Belastungsfälle mit Hilfe des LAPLACE-schen Operators aufgeschrieben werden [2, 3].

Mit sämtlichen Elementen gemäß Bild 2 ergibt sich für die Spannung des Stoßgenerators laut Schema a) bei beliebiger Belastungsimpedanz der Ausdruck

$$U = U_0 \frac{1}{p^3 + p^2 \left(\frac{1}{C_S R_E} + \frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_B} + \frac{1}{C_B R_D} \right) + p \left(\frac{1}{L_B C_B} + \frac{R_E + R_B + R_D}{C_S C_B R_E R_B R_D} \right) + \frac{R_E + R_D}{L_B C_S C_B R_E R_D}} \quad (1)$$

Betrachtet man noch immer den Stoßgenerator laut Schema a), jedoch mit Vernachlässigung des Belastungswiderstandes, so ist der Widerstand R_B

in Bild 2 als unendlich groß anzusehen. Dementsprechend vereinfacht sich die Formel (1) zu

$$U = U_0 \frac{P \frac{1}{C_B R_D}}{P^3 + P^2 \left(\frac{1}{C_S R_E} + \frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_D} \right) + P \left(\frac{1}{L_B C_B} + \frac{1}{C_S C_B R_E R_D} \right) + \frac{R_E + R_D}{L_B C_S C_B R_E R_D}} \quad (2a)$$

Wird aber der Widerstand R_E in Bild 2 als unendlich groß angenommen, so ergibt sich der Fall des Stoßgenerators laut Schema *b*) unter allgemeinen Belastungsbedingungen. Das so erhaltene Resultat wird auch dann nicht einfacher, wenn man den Belastungswiderstand vernachlässigt, da in diesem Falle R_B den Entladewiderstand bedeuten wird.

$$U = U_0 \frac{P \frac{1}{C_B R_D}}{P^3 + P^2 \left(\frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_B} + \frac{1}{C_B R_D} \right) + P \left(\frac{1}{L_B C_B} + \frac{1}{C_S C_B R_B R_D} \right) + \frac{1}{L_B C_S C_B R_D}} \quad (2b)$$

Wird aus der Reihe der Belastungsimpedanzen die Induktivität eliminiert, vereinfacht sich der Ausdruck für die Spannung wesentlich. Größte Bedeutung hat der Umstand, daß der vorher stets kubische Nenner dadurch quadratisch wird.

Der Ausdruck für die Spannung des Stoßgenerators laut Schema *a*) mit Belastung aus Widerständen und Kapazitäten lautet

$$U = U_0 \frac{P \frac{1}{C_B R_D}}{P^2 + P \left(\frac{1}{C_S R_E} + \frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_B} + \frac{1}{C_B R_D} \right) + \frac{R_E + R_B + R_D}{C_S C_B R_E R_B R_D}} \quad (3)$$

Besteht die Belastung nur aus Kapazität, so vereinfacht sich der Ausdruck für die Spannung des Stoßgenerators laut Schema *a*) im Vergleich zur Formel (3) noch weiter. Den Belastungswiderstand R_B als unendlich groß angenommen, ist

$$U = U_0 \frac{P \frac{1}{C_B R_D}}{P^2 + P \left(\frac{1}{C_S R_E} + \frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_D} \right) + \frac{1}{C_S C_B R_E R_D}} \quad (4a)$$

Setzt man in Bild 2 außer der Induktivität auch den Widerstand R_E als unendlich groß an, so gelangt man zum Fall des Stoßgenerators gemäß Schema *b*). Der Ausdruck für die Spannung bezieht sich in diesem Falle auf Belastungen aus Kapazität und Widerstand, er würde sich aber auch nicht ändern, wenn die Belastung nur aus Kapazität bestünde, bloß müßte R_B mit der Größe des Entladewiderstandes des Stoßgenerators gleichgesetzt werden.

$$U = U_0 \frac{1}{p^2 + p \left(\frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_B} + \frac{1}{C_B R_D} \right) + \frac{1}{C_S C_B R_B R_D}} \quad (4b)$$

Vom Ausdruck für die Spannung läßt sich feststellen, daß der Nenner der Formel zu einem Polynom dritten Grades des Operators p wird, sofern sich unter den Belastungsimpedanzen auch eine Induktivität befindet; ist aber in der Belastung keine Induktivität vorhanden, so wird der Nenner zu einem quadratischen Polynom des Operators p . Die Ausdrücke für die Spannung der Stoßgeneratoren anderer Schaltungen sind ähnlicher Gestalt und das Polynom im Nenner wird selten höher als zu einem kubischen [4, 5, 6, 19].

Unter Anwendung des Entwicklungssatzes der Operatorenrechnung lassen sich die obigen Ausdrücke für die Spannung zu Zeitfunktionen umgestalten. Ist der Nenner ein kubisches Polynom von p , so schreibt sich diese Funktion zu

$$U = \frac{U_0}{C_B R_D} \left[\frac{P_1}{(p_1 - p_2)(p_1 - p_3)} e^{p_1 t} + \frac{P_2}{(p_2 - p_1)(p_2 - p_3)} e^{p_2 t} + \frac{P_3}{(p_3 - p_1)(p_3 - p_2)} e^{p_3 t} \right], \quad (5)$$

wobei $p_1 p_2 p_3$ die Nullstellen des Polynoms dritten Grades im Nenner sind [2, 3].

Ist der Nenner quadratisch, so ist $p_3 = 0$, und der Ausdruck für die Zeitfunktion der Spannung [7-12, 16-21] vereinfacht sich zu

$$U = \frac{U_0}{C_B R_D} \frac{e^{p_2 t} - e^{p_1 t}}{p_2 - p_1}. \quad (6)$$

Im Zusammenhang mit der Zeitfunktion sei noch erwähnt, daß $0 \geq p_3 \geq p_2 \geq p_1$, das heißt sämtliche Wurzeln sind negativ und für die Bezeichnung wurde das System verwendet, die Indizes in Richtung der zunehmenden Wurzeln ansteigen zu lassen.

2. Der Bereich von genormten Wellen

Die Normen für Stoßspannungsuntersuchungen verwenden zur Bestimmung der Form der Stoßwelle die Stirnzeit und die Rückenhalbwertzeit. Die Stirnzeit wäre im Prinzip die zwischen Anfang der Welle und Erreichen der Spitze verstreichende Zeit, doch enthalten die Normen hiervon abweichende Vorschriften, um eine leichtere Messung zu sichern. Zumeist ist demnach unter Stirnzeit das 1,25fache des Unterschiedes zwischen den den Werten

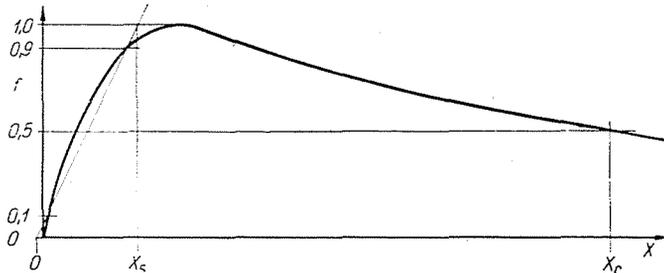


Bild 3

0,1 U_m und 0,9 U_m zugehörigen Zeiten zu verstehen. U_m bedeutet hierbei den Spitzenwert der Spannung. Das gleiche veranschaulicht die in Bild 3 in die Stirn der Welle aufgetragene Gerade. Die Rückenhalbwertzeit beginnt mit dem Beginn der Welle und endet sobald die Spannung im Rücken der Welle auf 0,5 U_m abgesunken ist. Diese beiden Zeiten werden in den internationalen und europäischen staatlichen Normen im allgemeinen mit 1 μ s und 50 μ s angegeben und mit der gebräuchlichen Bezeichnung 1/50 angegeben [1, 13, 14]. Außer dieser Wellenform ist noch die 1,5/40 Welle weit verbreitet [15].

Die Formeln (5) und (6) zeigen, daß die Gestalt der Spannungswelle eine Funktion von $p_1 p_2 p_3$ ist. Die anderen Faktoren bewirken nur eine proportionale Verzögerung, die aber die Größe der Stirnzeit und der Rückenhalbwertzeit nicht beeinflußt. Aus den Kenndaten des Stoßgenerators und der Belastungen lassen sich diese p -Werte rechnerisch ermitteln, wogegen die Stirnzeit und die Rückenhalbwertzeit meist nur konstruiert werden können. Schwieriger gestaltet sich die Lage, wenn zu einer Welle mit gegebener Stirnzeit und Rückenhalbwertzeit die Werte von $p_1 p_2$ und eventuell von p_3 zu bestimmen sind. Diese Aufgabe stellt sich, wenn man ermitteln will, unter welcher Belastung eine an der vorgeschriebenen Verzerrungsgrenze liegende Wellenform zustande kommt. Derartige Aufgaben können nur dann gelöst werden, wenn der Zusammenhang zwischen den genormten Zeitwerten, die die Welle bestimmen, und den p -Werten, die die Welle des Stoßgenerators beschreiben, bekannt ist [16–20].

Hält man sich zuerst die Formel (6) vor Augen, läßt sich feststellen, daß auch das Glied $(p_2 - p_1)$ im Nenner nur eine verhältnismäßige Streckung verursacht und die Zeitverhältnisse nicht beeinflußt, obwohl das Maß der Streckung von der jeweiligen Stirnzeit und Rückenhalbwertzeit abhängt. Schreibt man die Formel (6) in der Form

$$U = \frac{U_0}{C_B R_D} \frac{1}{p_2 - p_1} f, \quad (7)$$

dann enthält die Funktion $f(t)$ die die Wellenform bestimmenden Glieder. Führt man die Bezeichnungen

$$x = p_2 t \quad a = \frac{p_1}{p_2} \quad a x = p_1 t$$

ein, dann schreibt sich mit diesen die die Form der Welle bestimmende Funktion

$$f = e^x - e^{-ax}. \quad (8)$$

Bei gegebenem a ist die Kurve eindeutig bestimmt, und an Hand von Bild 3 kann der der Stirnzeit proportionale Wert x_s und der mit der Rückenhalbwertzeit verhältnismäßige Wert x_r bestimmt werden. Desgleichen ist der Quotient dieser beiden x -Werte, $x_s/x_r = t_s/t_r$ eine eindeutige Funktion von a . Dieser Zusammenhang, der auch im umgekehrten Sinn gültig ist, das Verhältnis der Stirnzeit und der Rückenhalbwertzeit t_s/t_r bestimmt daher eindeutig die Verhältniszahl a und damit den Wert von x_s und x_r .

Mit den Zusammenhängen

$$x_r = p_2 t_r \quad \text{und} \quad p_1 = a p_2$$

kann zu gegebene Stirnzeit t_s und Rückenhalbwertzeit t_r auch p_1 und p_2 bestimmt werden. Diese Konstruktionsmethode findet sich in der Fachliteratur mehrfach in der Form, daß die Werte von t_s/t_r und $p_2 t_r$ als Funktion der Verhältniszahl a aufgetragen sind. Die bekanntesten dieser Kurven stammen von BEWLEY, doch deuten sie die Stirnzeit nicht in normgerechter Weise, sie basieren vielmehr auf der bis zum Eintritt des Spitzenwertes verstrichenen Zeit. Da aber die durch diese zweierlei Definition bestimmten Stirnzeiten voneinander wesentlich abweichen, und da sie auch nicht in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen, ergeben diese Kurven mit den normgemäß gedeuteten Stirnzeiten kein richtiges Ergebnis [16].

Bei der zeichnerischen Darstellung der eben klargelegten funktionellen Zusammenhänge verursacht es auch Schwierigkeiten, daß a innerhalb weiter

Grenzen veränderlich ist. Die in diesen Fällen benützte logarithmische Skala vermindert zwar die Schwierigkeiten, doch erschwert sie das Ablesen und die Interpolation. Es lassen sich aber für Darstellung und Ablesen mit der Einführung des Wertes $p_1 t_s$ auch günstigere Funktionen bestimmen; im Sinne der Gleichheit

$$p_1 t_s = \alpha p_2 t_r \frac{t_s}{t_r}$$

ist $p_1 t_s$ ebenfalls eine Funktion von t_s/t_r , es kann somit zusammen mit dem Wert von $p_2 t_r$ ebenfalls dargestellt werden. Diese Kurven veranschaulicht

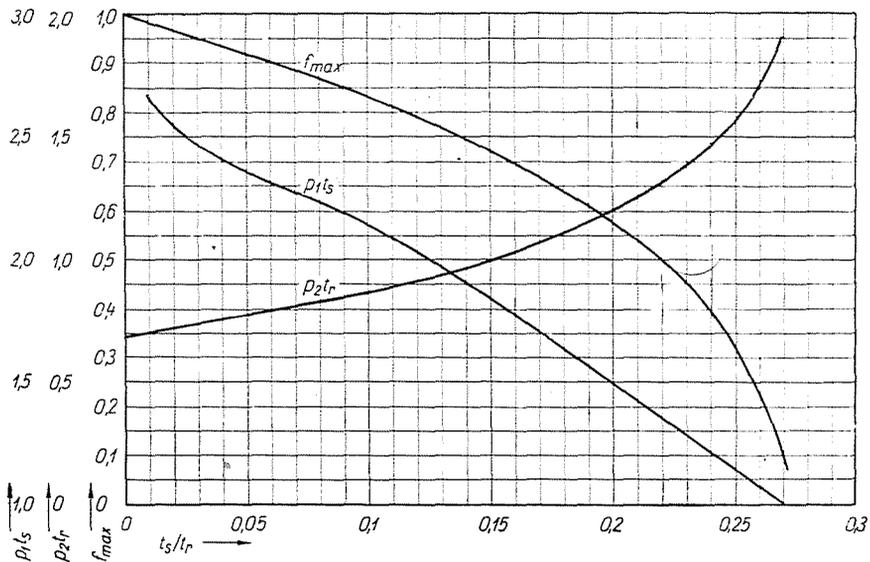


Bild 4. Die Konstanten der Formel der Stoßwelle für $p_3 = 0$. Fall der induktivitätsfreien Belastung

Bild 4, das auch die den Spitzenwert f_{max} darstellende Kurve enthält. Dieser Spitzenwert ist nämlich ebenfalls eine eindeutige Funktion des Koeffizienten α , da der Extremumrechnung gemäß die Stelle des Maximums

$$x_m = \frac{\ln \alpha}{1 - \alpha} \quad (9)$$

ist, was in (8) eingesetzt, f_{max} als Funktion von α ergibt.

Eine günstige Eigenheit von Bild 4 besteht darin, daß es unmittelbar einen Zusammenhang zwischen jenen Veränderlichen herstellt, die gegeben

sind bzw. gesucht werden, daß sich also die Verwendung einer Hilfsveränderlichen erübrigt. Jede der Skalen ist linear; die Kurven bewegen sich nicht in einem weiten Bereich und ihre Schnittpunkte lassen sich leicht ablesen. Sie sind auf die normgemäße Definition der Stirnzeit gegründet.

Enthält die Belastung des Stoßgenerators auch Induktivität, beschreibt die Formel (5) die Zeitfunktion der Spannungswelle. Dieser aus drei Gliedern bestehende Ausdruck ist eine Funktion der Wurzeln von Gleichungen dritten Grades, woraus folgt, daß es diese Wurzeln sind, die die Charakteristiken des Kurvenverlaufes bestimmen. Die für die Stoßspannung geltenden Vorschriften verlangen, daß die Wellenkurve aperiodisch sei, was den Kreis der möglichen Lösungen auf die reellen Wurzeln verengt. Zwei sich deckende reellen Wurzeln bedeuten die Grenze der aperiodischen Welle. Die Form der Stoßwelle wird in diesem Grenzfall durch die Formel (5) nicht richtig beschrieben, weil diese eine mathematisch unbestimmte Form annimmt. Vorausgesetzt, daß der Grenzfall beim Zusammentreffen der Wurzeln p_2 und p_3 eintritt, dann ergibt die bei der Limitation $(p_2 - p_3) \rightarrow 0$ angenommene Form von (5) die Gleichung der Wellenkurve. Diese Wellenkurve schreibt sich somit zu

$$U = \frac{U_0}{C_B R_D} \frac{1}{p_2 - p_1} \left[p_2 t \cdot e^{p_2 t} - \frac{p_1}{p_2 - p_1} (e^{p_2 t} - e^{p_1 t}) \right]. \quad (10)$$

Die Form der Wellenkurve wird — ebenso wie im Falle der Formel (6) — durch zwei Konstanten p_1 und p_2 bestimmt, so daß diese auf Grund zweier Bedingungen, der Stirnzeit und der Rückenhalbwertzeit, eindeutig ausgedrückt werden kann. Mit den soeben schon verwendeten Bezeichnungen $x = p_2 t$ und $a = p_1/p_2$ und mit (7) ist die Funktion, die die Form der Wellenkurve beschreibt,

$$f = x e^x - \frac{a}{1 - a} (e^x - e^{ax}). \quad (11)$$

Bei gegebenem a ist die Kurve eindeutig bestimmt und an Hand von Bild 3 kann der mit der Stirnzeit verhältnismäßige Wert x_s und der der Rückenhalbwertzeit proportionale Wert x_r konstruiert werden. Die Quotienten der beiden x -Werte $x_s/x_r = t_s/t_r$ sind gleichfalls eindeutige Funktionen von a . Dieser Zusammenhang ist auch im umgekehrten Sinn gültig, so daß das Verhältnis t_s/t_r der Stirnzeit und der Rückenhalbwertzeit die Verhältniszahl a und damit den Wert von x_s und x_r eindeutig bestimmt. Mit der schon bekannten Verhältniszahl a , mit der Beziehung $x_r = p_2 t_r$ und mit t_s/t_r läßt sich auch der Wert von $p_1 t_s$ ausdrücken, der ebenfalls eine Funktion des Quotienten der Stirnzeit und der Rückhalbwertzeit ist.

Mit den so errechneten Werten können für den Fall der an der aperiodischen Grenze befindlichen Wellenkurve auch Kurven aufgetragen werden, die denen in Bild 4 ähnlich sind, und mit deren Hilfe sich zu gegebenen Stirnzeiten und Rückenhalbwertzeiten die die Spannungswelle beschreibenden Konstanten der Funktion bestimmen lassen. Diese Kurven sind in Bild 5 zu finden.

In allgemeinen Fällen, in denen in der Formel (5) $p_1 \neq p_2 \neq p_3$ und $p_3 \neq 0$ ist, genügen zwei Bedingungen zur Ermittlung der drei Konstanten

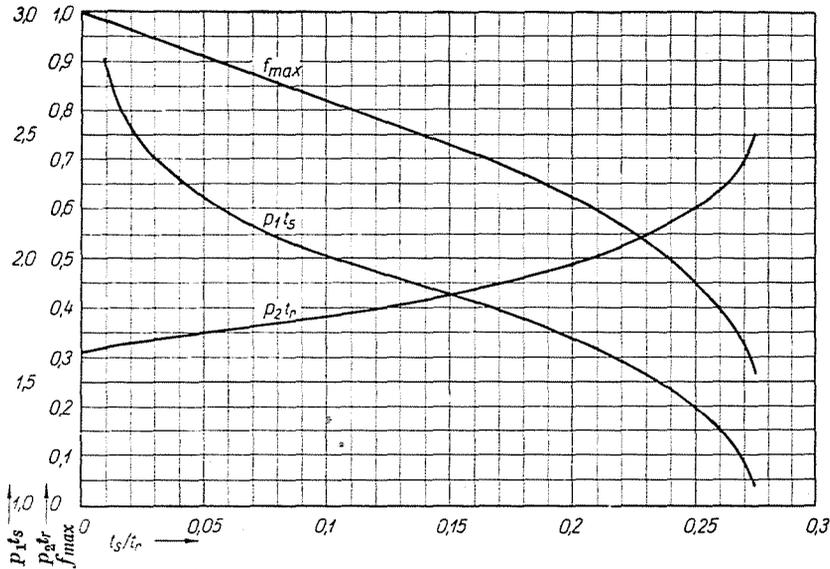


Bild 5. Die Konstanten der Formel der Stoßwelle für $p_2 = p_3$. Fall der Welle an der Grenze der Aperiodizität

nicht. Es wird sich aber im folgenden zeigen, daß in der Praxis diese allgemeine Lösung gar nicht benötigt wird.

Die Untersuchungsvorschriften legen fest, inwieweit die Wellenform der Stoßspannung unter der Einwirkung der Belastung vom normalen Wert abweichen darf, das heißt, innerhalb welcher Grenzen sich die Stirnzeit und die Rückenhalbwertzeit verändern darf.

Die älteren Bestimmungen, die die 1/50 Welle akzeptieren, gestatteten für die Stirnzeit eine Abweichung von $\pm 50\%$, für die Rückenhalbwertzeit eine solche von $\pm 10\%$ [1,14]. Neuerdings bemüht man sich die Toleranzen so zu gestalten, daß die ebenfalls sehr verbreitete 1,5/40 Welle gleichfalls innerhalb der Toleranz bleibe [22]. Mit der Verbreitung der Stoßspannungsuntersuchung an Transformatoren ergab sich die Schwierigkeit, daß einerseits der großen Belastungskapazität wegen die Stirnzeit, andererseits der kleinen Belastungs-

induktivität wegen die Rückenhalbwertzeit nur mit Stoßgeneratoren großer Kapazität innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen gehalten werden kann. Die neueren Vorschriften für die Prüfung von Transformatoren erwähnen denn auch bereits, daß unter besonders schwierigen Verhältnissen die Stirnzeit länger, die Rückenhalbwertzeit auch kürzer sein darf. Die verschiedenen Vorschriften enthalten diesbezüglich entweder nur allgemein gehaltene Bestimmungen, oder es weichen ihre zahlenmäßigen Daten voneinander ab. Wo im folgenden die Berücksichtigung irgend eines Wertes unvermeidlich ist, werden die Daten der eben jetzt in Vorbereitung begriffenen ungarischen Normen verwendet, denen zufolge der zulässige Höchstwert der Stirnzeit $4 \mu\text{s}$, der zulässige Kleinstwert der Rückenhalbwertzeit dagegen $15 \mu\text{s}$ beträgt.

Die hier folgenden Berechnungen beruhen auf der $1/50$ Welle. Die Stirnzeitwerte bei induktivitätsfreier Belastung sind mit $0,5 \mu\text{s}$ und mit $4 \mu\text{s}$ in Rechnung gestellt, doch wird die Berechnung den klassischen Vorschriften gemäß auch mit einem Grenzwert von $1,5 \mu\text{s}$ vorgenommen werden. Die Grenzen der Rückenhalbwertzeit werden bei induktivitätsfreier Belastung mit $15 \mu\text{s}$ und $55 \mu\text{s}$ angesetzt, die Resultate werden aber auch für die klassische Grenze von $45 \mu\text{s}$ angegeben, wenn die Belastung auch Induktivität enthält, liegen der Berechnung der Stirnzeit die äußersten Grenzen von $0,5$ und $4 \mu\text{s}$, derjenigen der Rückenhalbwertzeit hingegen solche von 15 und $55 \mu\text{s}$ zugrunde. Dies alles unter der Voraussetzung, daß die Welle aperiodisch ist, daß also der Wert von p_3 höchstens mit p_2 gleich sein kann, während die Fälle von komplexen Wurzeln ausgeschlossen sind.

An Hand der Bilder 4 und 5 lassen sich bei induktivitätsfreier Belastung stets, bei induktiver Belastung in den durch (6) und (10) charakterisierten Grenzfällen die Konstanten der der normgemäßen Toleranz eben noch entsprechenden Welle bestimmen. Werden diese Grenzpunkte in einem Koordinatensystem dargestellt, auf dessen Achsen p_1 und p_2 aufgetragen sind, so kann man den Bereich umgrenzen, innerhalb dessen jedem Punkt eine innerhalb der normgemäßer Toleranz liegende Stoßwelle zugehört.

Dieses Schaubild ist jedoch für den praktischen Gebrauch wenig zweckmäßig, dagegen läßt sich ein Diagramm auftragen, das nicht nur die möglichen Konstanten-Werte der die Wellenkurve beschreibenden Funktion angibt, sondern sich auch zur unmittelbaren Bestimmung der Belastungsgrenzfälle eignet.

3. Der Bereich der zulässigen Belastungen

Zwischen den Konstanten des Stoßgenerators und der Belastung sowie der Form der Wellenkurve stellen die Wurzeln $p_1 p_2 p_3$ eine direkte Beziehung her, da sie sich einesteils aus den Gleichungen (1)–(4) als Funktion der Stromkreisdaten des Stoßgenerators, anderenteils aus den Diagrammen in Bild 4 und 5 als Funktion der Kennziffern der Wellenform bestimmen lassen. Dieser

Zusammenhang kann aber nicht unmittelbar verwertet werden, denn in den Gleichungen (1)–(4) sind die Wurzeln in Polynome höheren Grades eingeschlossen, die nur durch sehr komplizierte Formeln lösbar sind. Es verursacht aber keine Schwierigkeit, die Koeffizienten der Gleichungen höheren Grades durch Wurzeln auszudrücken. So gelangt man zu Veränderlichen, die sich entweder als Funktion der Wellenkurve oder des Stoßgenerators und der charakteristischen Daten der Belastung unmittelbar bestimmen lassen.

Schreibt man die Nenner der Gleichungen (1) und (2) in der allgemeinen Form

$$p^3 + ap^2 + bp + c = 0 \quad (12)$$

auf, dann ist es klar, daß $p_1 p_2 p_3$ nur dann die Wurzeln dieser Gleichung dritten Grades sein können, wenn folgende Gleichungen erfüllt sind :

$$a = -(p_1 + p_2 + p_3) \quad (13a)$$

$$b = p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_3 p_1 \quad (13b)$$

$$c = -p_1 p_2 p_3. \quad (13c)$$

Aus den Diagrammen der Bilder 4 und 5 lassen sich aber die kennzeichnenden p -Konstanten der an der Grenze der normgemäßen Toleranzen befindlichen Stoßwellen in allgemeinen Fällen nicht ermitteln, sondern nur in jenen Sonderfällen, in denen entweder $p_3 = 0$ oder $p_2 = p_3$.

Der erste Fall bedeutet zugleich, daß die Gleichung (12) zu einer Gleichung zweiten Grades in der Form

$$p^2 + ap + b = 0 \quad (14)$$

wird, deren Koeffizienten somit

$$a = -(p_1 + p_2) \quad (15a)$$

$$b = p_1 p_2 \quad (15b)$$

$$c = 0.$$

Im zweiten Fall sind die Koeffizienten :

$$a = -(p_1 + 2p_2) \quad (16a)$$

$$b = p_2^2 + 2p_1 p_2 \quad (16b)$$

$$c = -p_1 p_2^2 \quad (16c)$$

Die Gleichungen (14) und (15) haben aber darüber hinaus, daß sie den Grenzfall der allgemeinen Gleichung darstellen, auch einen selbständigen Sinn, da sie den Fall der induktivitätsfreien Belastung zum Ausdruck bringen. Zuerst soll deshalb dieser — als der einfachere Fall — näher betrachtet werden.

An Hand von Bild 4 können die Konstanten p_1 und p_2 jener Stoßwellen bestimmt werden, deren Stirnzeit 0,5 und 4 μ s, deren Rückenhalbwertzeit hingegen 15, 20, 30, 40, 45, 50, 55 μ s beträgt, ferner der Stoßwellen mit den Rückenhalbwertzeiten von 15 und 55 μ s, und mit den Stirnzeiten von 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 und 4 μ s. Aus den Formeln (15) werden die ihnen zugehörigen a - und b -Werte errechnet und auf das mit den Konstanten a und b laut Bild 6 gebildete Koordinatensystem aufgetragen. Das durch fast gerade Linien umgrenzte Gebiet umfaßt jene Werte von a und b , denen innerhalb der Toleranz bleibende Stoßwellen zugehören. Die Kurven geben auch eine unmittelbare Handhabe dazu, bei gegebenem Stoßgenerator und gegebener Belastung aus den Gleichungen (3) und (4) die Koeffizienten im Nenner zu errechnen und aus Bild 6 die Stirnzeit und die Rückhalbwertzeit annähernd abzulesen.

Unter den verschiedenen Belastungen soll hier nur die aus Kapazität bestehende Belastung eingehender untersucht werden.

Den operatorischen Ausdruck der Spannungswelle des Stoßgenerators gemäß Schaltung a) gibt für den Fall einer nur aus Kapazität bestehenden Belastung die Formel (4a). In deren Nenner ist

$$a = \frac{1}{C_S R_E} + \frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_D} \text{ und}$$

$$b = \frac{1}{C_S C_B R_E R_D}.$$

Nach Eliminierung des Wertes C_B der Belastungskapazität läßt sich schreiben :

$$b = a \frac{1}{C_S R_E} - \frac{1}{C_S^2 R_E^2 + C_S^2 R_E R_D}. \quad (17 a)$$

Wenn dieselbe Berechnung auf Grund der Formel (4b) für den Stoßgenerator in der Schaltung b) vorgenommen wird, dann ist

$$b = a \frac{1}{C_S (R_B + R_D)} - \frac{1}{C_S^2 R_D^2 + C_S^2 R_B R_D}. \quad (17 b)$$

Beide Funktionen stellen zwischen den Konstanten b und a einen linearen Zusammenhang her, sie ergeben also bei Auftragung in Bild 6 eine Gerade.

Fläche höherer Ordnung jenes Gebiet aus, dessen einzelnen Punkten die in die normgemäßen Toleranzgrenzen fallenden und an der Grenze der Aperiodizität liegenden Stoßwellen zugehören. In dasselbe dreidimensionale Koordinatensystem kann auch jenes Gebiet eingezeichnet werden, das sich auf den Fall $p_3 = 0$ gemäß Bild 6 bezieht und das natürlich in der Ebene $a-b$ liegen wird. Je einen Eckpunkt beider Gebiete bilden die Wellen $0,5/15$, $4/15$, $0,5/55$ bzw. $4/55$. Wenn man die zusammengehörigen Eckpunkte durch Gerade verbindet, läßt sich überprüfen, ob jedem Punkt der Geraden dieselbe Stirnzeit und Rückenhalbwertzeit zugehört wie den Eckpunkten. Wenn man diese Geraden an den Begrenzungslinien der beiden Gebiete entlanggleiten läßt, erhält man die Mantelflächen eines Körpers, in dessen Innerem jedem Punkt eine normgemäße Stoßwelle zugehört. Die Grenzlinien dieses Körpers, in mehreren Bildebenen dargestellt, zeigt Bild 7. Der dargestellte Körper läßt sich mit einem Prisma vergleichen, dessen Grundfläche in der Ebene $a-b$ das aus Bild 6 schon bekannte, annähernd viereckige Gebiet bildet, während seine Seitenkanten annähernd in der Richtung der Achse c , jedoch nicht parallel verlaufen, die windschiefe Fläche des Gebietes der aperiodischen Wellen dagegen das Prisma abschneidet.

Vom Standpunkt der Verwendbarkeit lohnt es sich zu erwähnen, daß nicht nur die Seitenflächen des prismaartigen Körpers durch Bewegung von Geraden beschrieben werden können, vielmehr enthält auch die Querfläche Gerade. Aus den Formeln (16) geht nämlich klar hervor, daß mit $p_2 = \text{konstant}$, den Wert p_1 als Parameter gewählt, alle drei Veränderliche dessen lineare Funktion sind. Eine Funktion dieser Art aber wird im dreidimensionalen Raum durch eine Gerade dargestellt, während die Fläche selbst nicht zu den durch einfache Gleichungen beschreibbaren Flächen gehört, da z. B. die aus der Bedingung $p_1 = \text{konstant}$ resultierenden Kurven bereits Raumkurven dritten Grades sind, und da sich auch Glieder höheren Grades ergeben, wenn man die Gleichung der Fläche entwickelt.

Jeder Punkt des Koordinatensystems a, b, c bestimmt den Gleichungen (1) und (2) gemäß einen gewissen Zusammenhang zwischen den Kenndaten des Stoßgenerators und der Belastungsimpedanz. Wenn man aus der Reihe der Belastungen den Widerstand ausschließt, ergibt sich auf Grund der Spannungsgleichungen (2a) des Stoßgenerators der Schaltung a)

$$a = \frac{1}{C_S R_E} + \frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_D} \quad (18 a)$$

$$b = \frac{1}{C_B L_B} + \frac{1}{C_S C_B R_E R_D} \quad (18 b)$$

$$c = \frac{R_E + R_D}{L_B C_S C_B R_E R_D} \quad (18 c)$$

Wie aus diesen Gleichungen ersichtlich, erhält man, wenn die Kenndaten des Stoßgenerators oder der Belastung als Parameter gewählt werden, für jede der Konstanten von a , b und c eine gleichartige, und zwar reziproke Beziehung. Mit den Quotienten a/b , a/c und b/c wird jeder eine lineare Funktion,

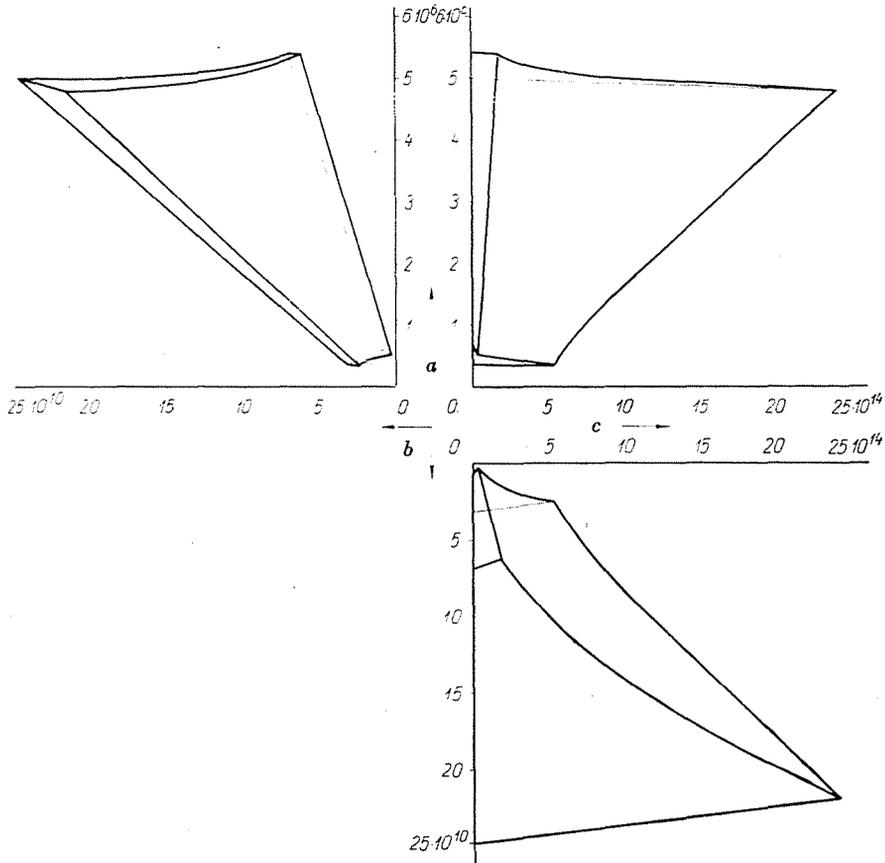


Bild 7. Das Gebiet der normgerechten Stoßwellen im allgemeinen Fall

und bei deren Darstellung in einem Koordinatensystem erhält man auf jedem Bild Gerade. Dies heißt aber, daß die Linie, entlang der sich irgend eine Kennziffer des Stoßgenerators oder der Belastung ändert, immer eine Gerade ist.

Wählt man als Parameter der Variablen a , b und c gleichzeitig zwei Stromkreisangaben, stellt das Bild der Funktionen im allgemeinen eine windschiefe Fläche, in Grenzfällen dagegen eine Ebene dar.

In der Praxis spielen die Belastungskapazität C_B und die Belastungsinduktivität L_B die wichtigste Rolle. Bei einem gegebenen Stoßgenerator sind nämlich die übrigen Daten schon durch die Konstruktion bestimmt und

die Belastung beeinflußt sie nicht. In der Praxis ergibt sich eine Aufgabe dieser Art, wenn man einen Stoßgenerator mit gegebenen Kennziffern $C_S R_E$ und R_D durch Transformatoren belastet, deren Induktivität und Kapazität verschiedene Werte annehmen kann.

Eliminiert man die Werte L_B und C_B aus den Gleichungen (18), so zeigt sich, daß sich bei deren Änderung die zusammengehörigen Werte von a b und c in einer Ebene bewegen. Die Achsenabschnitte dieser Ebene sind:

$$a_0 = \frac{1}{C_S (R_E + R_D)} \quad (19 a)$$

$$b_0 = \frac{1}{C_S^2 S_E^2 + C_S^2 R_E R_D} \quad (19 b)$$

$$c_0 = \frac{1}{C_S^2 R_E^2 R_D} \quad (19 c)$$

Die Gleichung der Spurlinien der Ebene schreibt sich dagegen zu

$$a = - \frac{C_S^2 R_E^2 R_D}{R_E + R_D} c + \frac{1}{C_S (R_E + R_D)} \quad (20 a)$$

$$b = \frac{1}{C_S R_E} a - \frac{1}{C_S^2 R_E^2 + C_S^2 R_E R_D} \quad (20 b)$$

$$b = \frac{C_S R_E R_D}{R_E + R_D} c - \frac{1}{C_S^2 R_E^2 + C_S^2 R_E R_D} \quad (20 c)$$

Auf den Stoßgenerator in der Schaltung *b*) bezogen, lassen sich auf Grund der Formel (2*b*) die Werte der Koeffizienten a b und c ebenfalls durch die Daten des Stoßgenerators und der Belastung ausdrücken.

$$a = \frac{1}{C_S R_D} + \frac{1}{C_B R_B} + \frac{1}{C_B R_D} \quad (21 a)$$

$$b = \frac{1}{L_B C_B} + \frac{1}{C_S C_B R_B R_D} \quad (21 b)$$

$$c = \frac{1}{L_B C_S C_B R_D} \quad (21 c)$$

Werden diese Gleichungen — ebenso wie die Gleichungen (18) — im Koordinatensystem $a b c$ dargestellt, ergeben sie Gerade, sofern irgendeine Kenndate des Stoßgenerators oder der Belastung als Parameter gewählt wird.

Wählt man als Parameter gleichzeitig zwei Variable, u. zw. die belastende Induktivität bzw. Kapazität L_B und C_B , so erhält man in dem Koordinatensystem $a b c$ eine Ebene wie im Falle des Stoßgenerators in der Schaltung b). Die Achsenabschnitte dieser Ebene sind :

$$a_0 = \frac{1}{C_S R_D} \quad (22 a)$$

$$b_0 = - \frac{1}{C_S^2 R_D^2 + C_S^2 R_B R_D} \quad (22 b)$$

$$c_0 = \frac{1}{C_S^3 R_D^3 + C_S^3 R_B R_D^2} \quad (22 c)$$

Dagegen gelten für die Spurlinien der Ebene die Gleichungen

$$a = - (C_S^2 R_D^2 + C_S^2 R_B R_D) c + \frac{1}{C_S R_D} \quad (23 a)$$

$$b = \frac{1}{C_S (R_B + R_D)} a - \frac{1}{C_S^2 R_D^2 + C_S^2 R_B R_D} \quad (23 b)$$

$$b = C_S R_D \cdot c - \frac{1}{C_S^2 R_D^2 + C_S^2 R_B R_D} \quad (23 c)$$

Die Gleichungen (19) und (20) sowie (22) und (23) zeigen, daß die zusammengehörigen Werte $a b$ und c in einer Ebene liegen, wenn sich die Belastungsinduktivität und die Belastungskapazität verändern, die übrigen Daten der Stromkreise des Stoßgenerators dagegen konstant bleiben. Diese Ebene ist bei einem gegebenen Stoßgenerator von der Belastung unabhängig, und ihre Lage wird nur durch die Daten des Stoßgenerators bestimmt. Die für die Belastungsfähigkeit des Stoßgenerators wichtigsten Daten L_B und C_B lassen sich auf dieser Ebene darstellen, und man gelangt dadurch zu einem Instrument, das durch unmittelbares Ablesen die Bestimmung derjenigen Grenzbelastungen ermöglicht, die die Stoßwelle eben bis zu der in den Normen bestimmten, äußersten Grenze verzerren. Diese Ebene kann man die Belastungsebene des Stoßgenerators nennen.

4. Die Belastungsebene des Stoßgenerators im Falle von Induktivität und Kapazität

Die den konstanten Werten L_B bzw. C_B entsprechenden Geraden können in der Belastungsebene des Stoßgenerators dargestellt werden. Die Belastungsebene schneidet aber gleichzeitig das auf Bild 7 dargestellte Bereich, innerhalb

dessen jedem Punkt eine in die normgemäße Toleranz fallende Stoßwelle zugehört. In der Belastungsebene erscheint der Flächenschnitt des Körpers, und dieser Schnitt enthält als planares Bereich bereits diejenigen Stoßwellen, die innerhalb der Toleranz liegen. Dieses Gebiet und die Geraden $L_B = \text{konstant}$ bzw. $C_B = \text{konstant}$ bestimmen die Grenzfälle der zulässigen Belastungen.

Die Ebenen der Stoßgeneratoren von den Schaltungen *a*) und *b*) weichen voneinander nur unwesentlich ab. Sie schneiden den Körper, der das

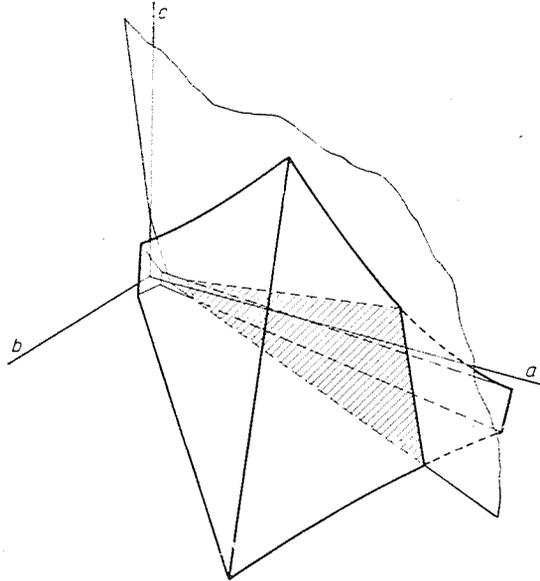


Bild 8. Schnitt des Gebietes der Stoßwellen mit der Belastungsebene

Bereich der normgemäßen Wellen bedeutet, annähernd in der gleichen Weise. Die Lage der Ebene und die des Körpers veranschaulicht Bild 8 für den Fall eines Stoßgenerators, der 1/50 Wellen gibt.

Die Geraden $L_B = \text{konstant}$ kann man unter der Voraussetzung erhalten, daß man beim Stoßgenerator gemäß Schaltung *a*) in den Gleichungen (18), beim Stoßgenerator gemäß Schaltung *b*) in den Gleichungen (21) mit Ausnahme von C_B sämtliche Werte als konstant betrachtet und den Wert C_B aus dem Gleichungssystem eliminiert.

Dieses Verfahren ergibt für den Stoßgenerator in der Schaltung *a*)

$$a = c \cdot L_B \frac{1}{R_E + R_D} + \frac{1}{C_S (R_E + R_D)} \quad (24 a)$$

$$a = b \cdot \frac{L_B C_S R_E}{L_B + C_S R_E R_D} + \frac{1}{C_S (R_E + R_D)} \quad (24 b)$$

Ist L_B konstant, so werden diese Funktionen durch Gerade dargestellt. Die Randfälle stellen $L_B = 0$ und $L_B = \infty$ dar. Unter der ersten Bedingung wird a im Sinne von (24) unabhängig von den Werten b und c , was einer mit der Ebene $b-c$ parallelen Geraden entspricht. Bei Erfüllung der zweiten Bedingung nimmt a keine begrenzten Werte an, es sei denn im Falle $c = 0$, die Gerade liegt daher in der Ebene $a-b$. Auf der Ebene $a-b$ ist gemäß (24b)

$$a = b \cdot C_S R_E + \frac{1}{C_S (R_E + R_D)},$$

was mit der Beziehung (17a) nachweislich identisch ist, wie dem auch nicht anders sein kann, ergab sich doch (17a) gleichfalls aus der Bedingung $L_B = \infty$.

Die durch das Gleichungssystem (24) bestimmten Geraden sind überdies dadurch charakterisiert, daß bei $b = c = 0$, für a beide Gleichungen dasselbe Ergebnis liefern, die Geraden $L_B = \text{konstant}$ schneiden mithin die Achse a sämtlich in demselben Punkt. Dieser Punkt ist identisch mit dem durch (19a) bestimmten Achsenabschnittpunkt der Belastungsebene des Stoßgenerators.

Für den Stoßgenerator in der Schaltung *b*) entsprechen die der Bedingung $L_B = \text{konstant}$ darstellenden Geraden denselben Regeln, nur müssen die Formeln (24) folgendermaßen umgestaltet werden :

$$a = c \cdot L_B \frac{R_B + R_D}{R_B} C_S + \frac{1}{C_S R_D} \quad (25 a)$$

$$a = b \frac{L_B C_S (R_B + R_D)}{L_B + C_S R_B R_D} + \frac{1}{C_S R_D}. \quad (25 b)$$

Die den Randfällen $L_B = 0$ und $L_B = \infty$ zugehörigen Geraden haben dieselben Lage wie die charakteristischen Geraden des Stoßgenerators in der Schaltung *a*), bloß in den quantitativen Daten zeigt sich eine gewisse Abweichung.

Die Geraden $C_B = \text{konstant}$ erhält man unter der Bedingung, daß für den Stoßgenerator in der Schaltung *a*) in den Gleichungen (18), für den Stoßgenerator in der Schaltung *b*) hingegen in den Gleichungen (21) sämtliche Werte mit Ausnahme von L_B als konstant betrachtet und der Wert von L_B aus dem Gleichungssystem eliminiert wird.

Dieses Verfahren ergibt für den Stoßgenerator in der Schaltung *a*):

$$a = \frac{1}{C_S (R_E + R_D)} + \frac{1}{C_B R_D} \quad (26 a)$$

$$b = c \frac{C_S R_E R_D}{R_E + R_D} + \frac{1}{C_S C_B R_E R_D}. \quad (26 b)$$

Ist C_B konstant, so werden diese Funktionen durch eine mit der Ebene $b-c$ parallele Gerade dargestellt, woraus folgt, daß die Geraden mit den auf der Ebene $b-c$ entstehenden Spurlinien der Belastungsebene stets parallel sind. Das wird auch dadurch bestätigt, daß die Richtungstangente in der Formel (26b) mit derjenigen der Spurlinie der Belastungsebene gemäß Formel (20c) übereinstimmt. Die Randwerte der Kapazität stellen $C_B = 0$ und $C_B = \infty$ dar. Unter der ersten Voraussetzung verschiebt sich die Gerade ins Unendliche, kann aber nicht dargestellt werden, bei der zweiten ergibt sich eine Gerade, die durch den gemeinsamen Punkt des auf den Fall $L_B = \text{konstant}$ bezogenen Strahlenbüschels verläuft und mit der Ebene $b-c$ parallel ist. Diese Gerade fällt genau mit derjenigen zusammen, die sich aus der Voraussetzung $L_B = 0$ auf Grund der Formeln (24) ergab.

Im Falle des Stoßgenerators in der Schaltung b) führt die Voraussetzung $C_B = \text{konstant}$ zu Geraden in derselben Lage wie im Falle a), bloß erhalten die Koeffizienten der Formeln (26) eine andere Form :

$$a = \frac{1}{C_S R_D} + \frac{R_B + R_D}{C_B R_B R_D} \quad (27 a)$$

$$b = c \cdot C_S R_D + \frac{1}{C_S C_B R_B R_D} \quad (27 b)$$

Das in der Belastungsebene entstehende Bild könnte auf Grund der Gleichungen (24)–(27) bereits aufgetragen werden, doch müßte entweder das Konstruktionsverfahren der darstellenden Geometrie oder das Berechnungsverfahren der analytischen Geometrie angewendet werden, beides Methoden, die im dreidimensionalen Raum ziemlich schwerfällig sind. In der Praxis ist es viel zweckmäßiger, nicht die Belastungsebene selbst darzustellen, sondern deren Projektion in der Bildebene $a-c$. In dieser Projektion bilden die Geraden für $L_B = \text{konstant}$ ein Strahlenbündel, dessen beide äußere Glieder einen rechten Winkel einschließen und mit einer der Achsen parallel verlaufen. Die Induktivität L_B dagegen ist der Richtungstangente der ihr zugehörigen Geraden proportional. Die Geraden für $C_B = \text{konstant}$ sind mit der Achse c parallel, und ihre Verschiebung ist verhältnismäßig mit dem Kehrwert der Belastungskapazität C_B . Auf dieser Bildebene lassen sich somit beide Geradenscharen leicht darstellen, und es ergibt sich auch vom Standpunkte der Verwendung keinerlei Nachteil. Bild 9 zeigt die Projektion der Belastungsebene eines Stoßgenerators mit einer Stoßkapazität von 25 000 pF. In Bild ist außer den Geraden, die unter der Voraussetzung der Kontinuität von L_B bzw. C_B aufgetragen wurden, auch jenes Gebiet dargestellt, das die Belastungsebene aus dem Gebiet der normgerechten Stoßwellen gemäß Bild 7 ausschneidet. Die möglichen Grenzfälle der aus Induktivität und Kapazität

bestehenden Belastungen können aus den Geraden für L_B und C_B ermittelt werden, die sich an den Grenzlinien des Gebietes schneiden.

Für jeden Stoßgenerator kann ein dem Bild 9 ähnliches Diagramm angefertigt werden, eventuell — sofern zum Stoßgenerator mehrere Widerstand-

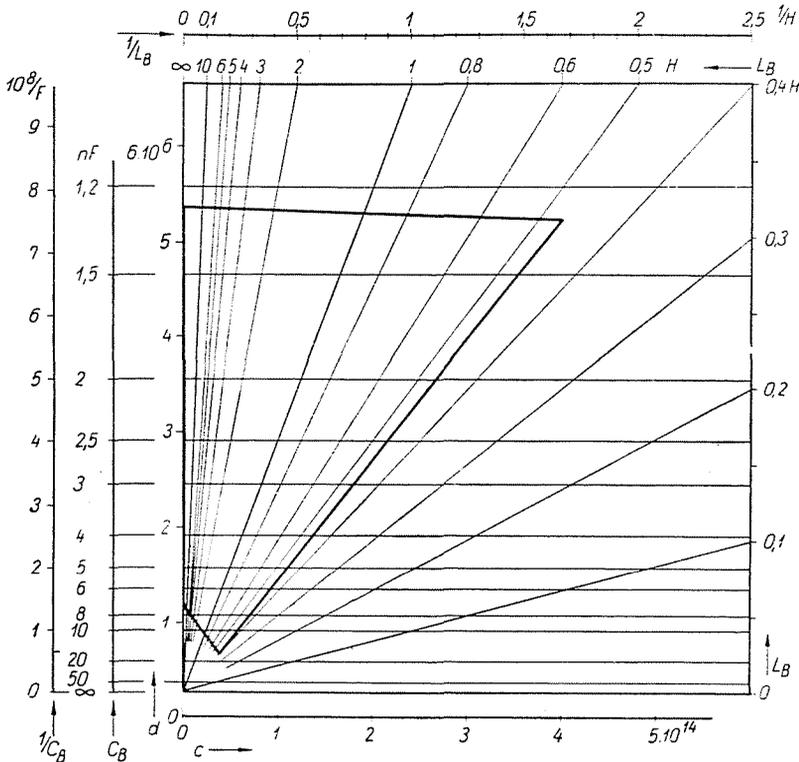


Bild 9. Belastungsdiagramm. Die Konstanten des Stoßgenerators sind

$$C_S = 25 \text{ nF}$$

$$R_B = 2400 \text{ ohm}$$

$$R_D = 160 \text{ ohm}$$

Schaltung b)

serien gehören — in mehreren Varianten; es kann den im Laboratorium Tätigen eine nützliche Hilfe leisten, wenn besonders im Falle von Transformatoren entschieden werden muß, ob der zur Verfügung stehende Stoßgenerator für die gegebene Untersuchung geeignet ist oder nicht [21].

Zusammenfassung

Die Belastungen beeinflussen die Wellenform des Stoßgenerators. Zu großen Kapazitäten wirken im Sinne der Verlängerung der Stirnzeit der Welle, zu kleinen Induktivitäten dagegen verkürzen die Rückenhalbwertzeit. Wenn die Verzerrung die in den Normen angegebenen Werte nicht überschreitet, entspricht die Welle den Normen. Die Belastungen haben

ein gewisses Gebiet, in dem die Verzerrung die vorgeschriebenen Grenzen nicht überschreitet. Die Wellenform ist durch ein quadratisches oder kubisches Polynom festgelegt. Zwischen den Koeffizienten dieses Polynoms und den Verzerrungen läßt sich ein Zusammenhang finden. Dadurch ist es möglich, das Gebiet der Belastungen, bei denen die Welle noch normgerecht bleibt, in einem Diagramm darzustellen. Dieses Diagramm liegt im Falle induktionsfreier Belastungen allgemein in einer Ebene, im Falle induktiver Belastungen dagegen ist sie nur für *einem gewissen Stoßgenerator* ein Diagramm in der Ebene.

Literatur

1. VDE 0450/XI. 39. Leitsätze für die Erzeugung und Verwendung von Stoßspannungen für Prüfzwecke. ETZ. **61**, 870 (1939).
2. WAGNER, K. W.: Operatorenrechnung und Laplacesche Transformation. Leipzig, 1950.
3. KONTOROVITS, M. I.: Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. Leningrad—Moskau. 1949.
4. THOMASON, J. L.: Journ. AIEE. **53**, 169 (1934).
5. LISZKA, Z.: Elektrotechnika, **48**, 161 (1955).
6. HORVÁTH, T.: Elektrotechnika, **51**, 103 (1958).
7. ELSNER, R.: Erzeugung normgerechter Spannungsstöße bei Stoßanlagen für sehr hohe Spannungen. — Fachb. VDI. **8**, 139 (1936).
8. ELSNER, R.: ETZ. **60**, 1368 (1939).
9. ANGELINI, A. M.: CIGRÉ Sess. 1950 Rapp 335.
10. EDWARDS, F. S.—HUSBANDS, A. S.—PERRY, F. R.: The Proc. of IEE. Part I. **98**, 155 (1951).
11. FLEGLER, E.: ETZ **79**, 389 (1958).
12. STRIGEL, R.: Elektrische Stoßfestigkeit. — Berlin, 1955.
13. IEC Publ. 60. — 1938. General specifications for impulse-voltage tests.
14. MNOSZ 4822—51. Lököfeszültségvizsgálat.
15. ASA C 57.12—1956. American Standards for Transformers, Regulators and Reactors.
16. BEWLEY, L. V.: Traveling waves on transmission systems. — New-York, 1951.
17. MARGUERRE, W.: ETZ. **60**, 837 (1939).
18. MARGUERRE, W.: ETZ **59**, 1205 und 1234 (1938).
19. HELLER, B.—VEVERKA, A.: Stoßerscheinungen in elektrischen Maschinen. — Berlin, 1957.
20. HÖFER, R.: ETZ. **73**, 461 (1952).
21. LOTTI, A.: L'Elettrotechnica. **44**, 182 (1957).
22. IEC TC. No. 42. High-Voltage testing techniques. — II. (1958).

T. HORVÁTH, Budapest, XI. Budafoki u. 8. Ungarn