

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
<b>Band:</b>	60 (1969)
<b>Heft:</b>	18
<b>Artikel:</b>	Die Zündwahrscheinlichkeit der Schaltfunkenstrecken in der Marxschen Vervielfachungsschaltung
<b>Autor:</b>	Rodewald, A.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-916175">https://doi.org/10.5169/seals-916175</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## Die Zündwahrscheinlichkeit der Schaltfunkenstrecken in der Marxschen Vervielfachungsschaltung

Von *A. Rodewald*, Basel

319 - 328

621.319.53

### 1. Einleitung

Die Zündung der Schaltfunkenstrecken in einer Marxschen Vervielfachungsschaltung (Fig. 1) wird im allgemeinen durch das Ansprechen oder mit der Triggerung einer einzelnen Funkenstrecke eingeleitet. Die Erfahrung zeigt, dass daraufhin die restlichen Funkenstrecken der Schaltung ebenfalls — gewissermassen selbsttätig — zünden. Diese Erscheinung wurde in einer früheren Arbeit [1]<sup>1)</sup> mit Hilfe eines Ersatzbildes erklärt. Es wurden seineszeit aber nur die Ausgleichsvorgänge, die von der Zündung der ersten Schaltfunkenstrecke ausgehen, experimentell und theoretisch untersucht und es wurde gezeigt, dass diese transiente Vorgänge zur Zündung der nächsten Funkenstrecke führen. Im folgenden sollen einige Versuchsergebnisse mitgeteilt werden, die einen Einblick in den Zündmechanismus sämtlicher Funkenstrecken einer Marxschen Schaltung gewähren und zwar vom Ansprechen der ersten bis zur Zündung der letzten Funkenstrecke.

### 2. Messmethode

Aufgrund der früheren Untersuchungen steht fest, dass die Schaltfunkenstrecken unter der Einwirkung von Überspannungen zünden. Mit Ausnahme der Spannungen an zwei Funkenstrecken, nämlich an der ersten, die z. B. wegen Überschreitens der statischen Ansprechspannung anspricht, und an der benachbarten zweiten, deren Spannung in [1] berechnet und gemessen wurde, ist aber sowohl die Höhe als auch die Dauer der Überspannung an jeder der übrigen Schaltfunkenstrecken unbekannt. Die Messung des zeitlichen Verlaufs dieser Spannungen würde zwar einen direkten Einblick in die transiente Vorgänge bieten, setzte aber eine umfangreiche Messapparatur voraus. Um den Aufwand an Messgeräten gering zu halten, wurde deshalb eine indirekte Messmethode gewählt, die trotz ihrer Einfachheit einen guten Überblick über das Verhalten der Schaltung gewährt. Dem Messverfahren liegt folgender Gedankengang zugrunde:

Wenn im Zusammenhang mit der Zündung der Schaltfunkenstrecken von Überspannungen die Rede ist, so sind damit Spannungen gemeint, die über die Ladespannung  $U_0$  hinausgehen. Dieser Ladespannung entspricht eine Schlagweite  $s_{\text{stat}}$  der Funkenstrecke, die man z. B. den einschlägigen Eichtabellen für Messfunkenstrecken entnehmen kann. Wenn der Spannung  $U_0$  eine bestimmte Überspannung überlagert ist, so zündet die Funkenstrecke auch dann noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, wenn ihre Schlagweite grösser als  $s_{\text{stat}}$  ist, denn: beansprucht man eine gleichmässig mit UV-Licht bestrahlte Funkenstrecke wiederholt mit Spannungsimpulsen gleichbleibender Form und Amplitude, und variiert dabei die Schlagweite, so ist die Zündwahrscheinlichkeit je nach Elektrodendistanz mehr oder weniger gross. Die Zündwahrscheinlichkeit ist bei grossen Schlagweiten gleich Null, durchläuft dann bei Verringerung der Elektrodendistanz Werte zwischen 0 und 1 und bleibt schliesslich unterhalb einer gewissen Schlagweite  $s_x$  praktisch gleich 1, d. h. die Funkenstrecke zündet unterhalb  $s_x$  sicher. Die Schlagweite  $s_x$  sei im folgenden als kritische Schlagweite bezeichnet. Die Differenz  $s_x - s_{\text{stat}}$  ist ein Mass für die an der betrachteten Funkenstrecke wirksame Überspannung. Allerdings handelt es sich nur um ein integrales Mass, das die Höhe und die Dauer der Überspannung gemeinsam erfasst. Man kann mit Hilfe der Differenz  $s_x - s_{\text{stat}}$  allein nicht entscheiden, ob die Funkenstrecke z. B. durch eine hohe Überspannung kurzer Dauer oder eine solche geringer Höhe und langer Dauer gezündet wird. Trotz dieser wesentlichen Einschränkung kann man aber doch nur durch die Ermittlung und die Analyse der Differenzen  $s_x - s_{\text{stat}}$  der einzelnen Funkenstrecken Einblicke in das Verhalten der Schaltung gewinnen.

Im einzelnen werden die kritischen Schlagweiten  $s_x$  wie folgt ermittelt: Die Funkenstrecke  $f_1$  der ersten Stufe (Fig. 1) wird auf irgendeine Schlagweite  $s_1$  eingestellt. Die Schlagweiten der übrigen Schaltfunkenstrecken sind viel grösser

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

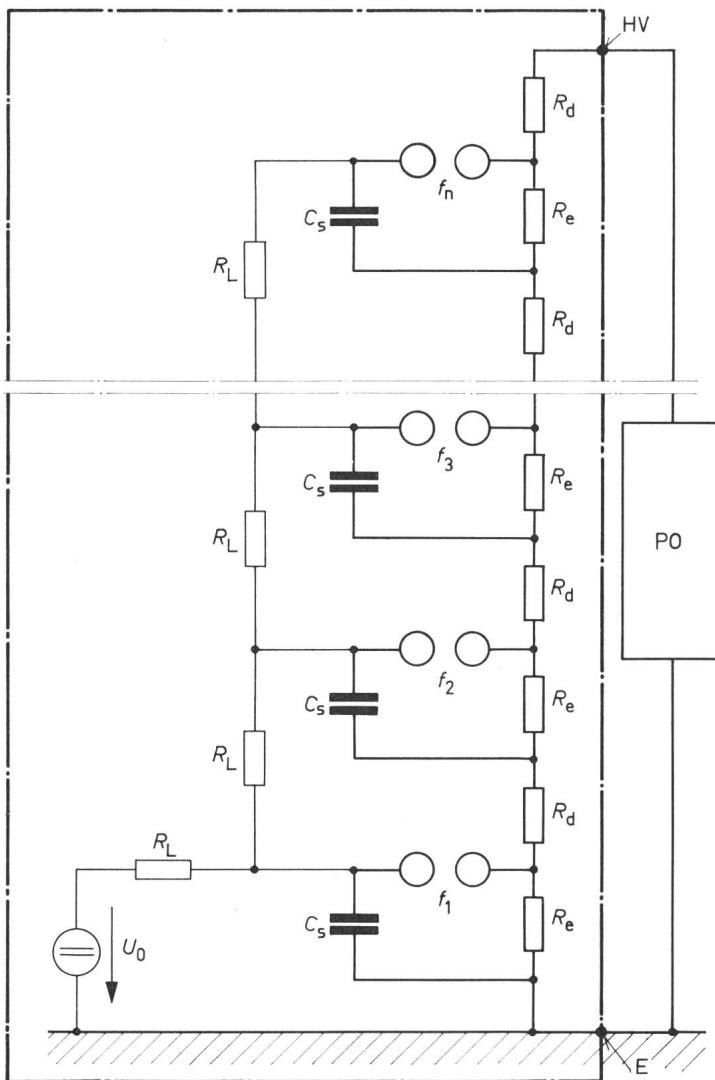


Fig. 1

Schematische Darstellung einer  $n$ -stufigen Marxchen Vervielfachungsschaltung

$f_1, f_2 \dots f_n$  Schaltfunkentstrecke;  $C_s$  Stosskondensator;  $E$  Erdklemme des Stossgenerators;  $HV$  Hochspannungsklemme;  $PO$  Prüfobjekt;  $R_d$  Dämpfungswiderstand;  $R_e$  Entladewiderstand;  $R_L$  Ladewiderstand;  $U_0$  Ladespannung

als  $s_1$ , so dass zunächst nur  $f_1$  zündet. Dann wird die Ansprechwahrscheinlichkeit der zweiten Funkentstrecke  $f_2$  in Funktion der Schlagweite bestimmt. Aus der graphischen Darstellung dieser Abhängigkeit auf Wahrscheinlichkeitspapier kann man diejenige Schlagweite bestimmen, bei der  $f_2$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,98 % anspricht. Die zweite Funkentstrecke wird nun auf eine etwas geringere Schlagweite eingestellt als der aus der graphischen Darstellung ermittelten 99,98 %-Wahrscheinlichkeit entspricht. So mit spricht nach jeder Zündung der ersten Funkentstrecke die zweite mit Sicherheit an. Dann wird die Zündwahrscheinlichkeit der dritten Funkentstrecke  $f_3$  bestimmt, wobei  $f_1$  und  $f_2$  immer zünden. Aus dem Verlauf der Zündwahrscheinlichkeit lässt sich diejenige Schlagweite bestimmen, bei der  $f_3$  sicher anspricht und so fort. Zur Messung der Zündwahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Schlagweite wurden jeweils 50 Zündversuche durchgeführt.

Der grösste Teil der im folgenden beschriebenen Messungen wurde an einem kleinen, speziell für diese Untersu-

chungen gebauten 6-stufigen Generator mit einer maximalen Summenladespannung von 72 kV und einem Arbeitsvermögen von 17 Ws durchgeführt. Wie in [1] wurden die Versuche an diesem Generator ohne Dämpfungswiderstände  $R_d$  ausgeführt, um die Anzahl der zu betrachtenden Parameter einzuschränken. Zur Ergänzung der mit dem relativ kleinen Generator gewonnenen Ergebnisse mögen noch einige Resultate dienen, die von Messungen an einem sehr grossen 20-stufigen Generator mit einer Summenladespannung von 4 MV und einem Arbeitsvermögen von 300 kWs stammen.

### 3. Einfluss der Belastung

#### 3.1 Kurzschluss und kapazitive Belastung

In Fig. 2 sind die Ansprechwahrscheinlichkeiten der Funkentstrecken des kurzgeschlossenen 72-kV-Generators in Funktion der Schlagweiten dargestellt. Die Funkentstrecke  $f_1$  ist bei der Aufnahme dieser Kennlinien auf 2,0 mm eingestellt und spricht bei einer Ladespannung von  $(8,10 \pm 0,03)$  kV an. Man erkennt aus Fig. 2, dass die Funkentstrecke  $f_2$  bei einer Schlagweite von  $s_2 = 2,85$  mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 % anspricht. Bei einer Verringerung der Schlagweite um nur 0,1 mm zündet  $f_2$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 %. Man entnimmt weiterhin der Fig. 2, dass die Funkentstrecke  $f_2$  mit Sicherheit anspricht, wenn sie auf eine Distanz von 2,65 mm eingestellt wird. Das ist die gesuchte kritische Schlagweite  $s_{x,2}$ .

Auch bei den Funkentstrecken  $f_3 \dots f_6$  genügen Schlagweitenänderungen von etwa 0,2...0,3 mm, um die Zündwahrscheinlichkeit von 0 auf 100 % anwachsen zu lassen. Die kritische Schlagweite  $s_{x,k}$  nimmt jedoch mit wachsender Stufenummer  $k$  zu. In Fig. 3a sind die kritischen Schlagweiten des kurzgeschlossenen Generators über der Stufenummer aufgetragen. Daneben sind die kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$  bei anderen Belastungsarten eingetragen. Die zu einer Belastung gehörenden Punkte sind durch einen geknickten Linienzug miteinander verbunden, um die Zusammengehörigkeit der Messpunkte deutlich zu machen.

Die Abhängigkeit der kritischen Schlagweiten der Schaltfunkentstrecken von der Stufenummer, wie sie in Fig. 3a dargestellt ist, lässt sich für den kurzgeschlossenen Generator mit Hilfe der in [1] definierten «Endwerte» der Überspannungen wie folgt erklären:

In [1] war für die transiente Vorgänge nach der Zündung der ersten Schaltfunkentstrecke ein Ersatzbild abgeleitet worden, das im wesentlichen aus einer Widerstandskette bestand, die mit Längs- und Querkapazitäten behaftet war. Die in Figur 4 dargestellte Kettenschaltung wird nach der Zündung der ersten Funkentstrecke nur vom geladenen Stosskondensator der ersten Stufe gespeist. Nach der Zündung weiterer Funkentstrecken wirken dann mehrere Stosskondensatoren als Spannungsquellen für den Rest der Kettenschaltung, die den noch nicht geziündeten Generatorteil darstellt. Dabei ist zu beachten, dass sich die Kondensatoren  $C_s$  im allgemeinen mit Zeitkonstanten von einigen  $10^{-5}$  s über die Widerstände  $R_e$  entladen. Man kann also die Spannungen an den Kondensatoren  $C_s$ , verglichen mit den Zündvorgängen, die sich in den Zeiten  $< 10^{-6}$  s abspielen, als zeitlich konstant ansehen. In der früheren Arbeit [1] wurden deshalb zwei Komponenten der Überspannungen voneinander unterschieden:

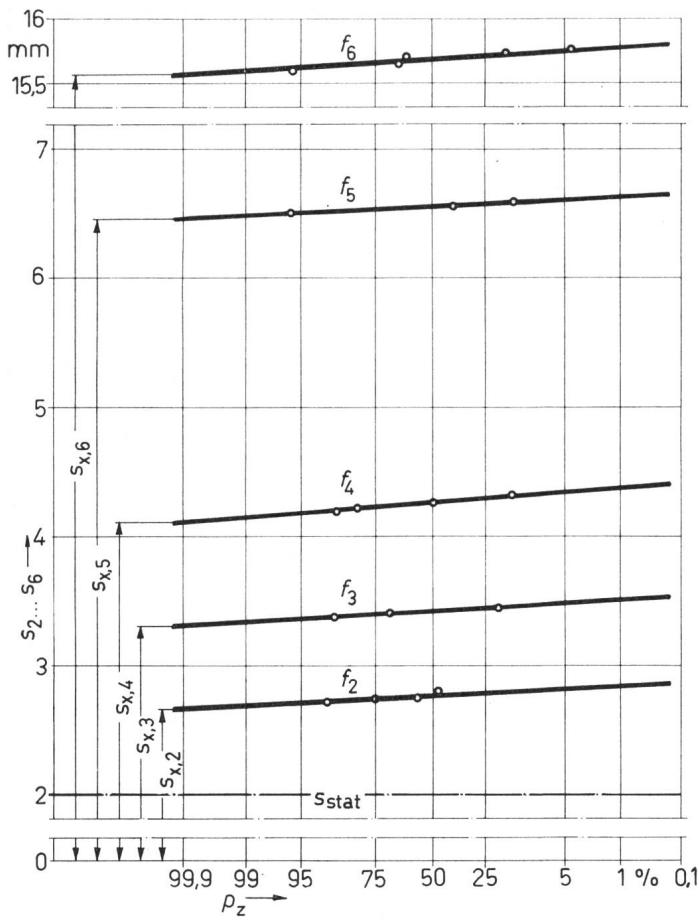


Fig. 2

Die Zündwahrscheinlichkeit der Funkenstrecken  $f_2 \dots f_6$  eines kurzgeschlossenen 6stufigen Stoßgenerators als Funktion der Schlagweiten  
 $s_k$  ( $k = 1, 2, 3 \dots 6$ ) Schlagweite der  $k$ -ten Funkenstrecke;  $s_{x,k}$  «kritische Schlagweite» der  $k$ -ten Funkenstrecke;  $s_{\text{stat}}$  statische Ansprechspannung der ersten Funkenstrecke;  $p_z$  Zündwahrscheinlichkeit

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

a) Ein rascher in etwa  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  s abklingender Anteil, der auf die Ausgleichsvorgänge in den Streukapazitäten  $C$  und  $K$  (Fig. 4) zurückzuführen ist;

b) Ein langsamer mit einigen  $10^{-5}$  s abklingender Anteil, der durch den Spannungsabfall längs der Entladewiderstände  $R_e$  bei der Entladung der Stoßkondensatoren entsteht.

Die ersten  $10^{-6}$  s des zweiten Anteils wurden früher als die «Endwerte» der Überspannung bezeichnet, weil sie im Zeitmaßstab der rasch veränderlichen Anteile innerhalb einiger  $10^{-7}$  s als zeitlich konstant erscheinen. Man kann sich also z. B. während etwa  $10^{-6}$  s die Kondensatoren  $C_s$  durch Batterien ohne Innenwiderstand mit einer entsprechenden Spannung ersetzt denken (Fig. 5), denn die im Verhältnis zu den Streukapazitäten grossen Kapazitäten  $C_s$  stellen für die schnellen Vorgänge keine nennenswerte Impedanz dar. Wirksam ist lediglich ihre Ladung und ihre Induktivität. Dieser induktive Innenwiderstand wird jedoch für die folgenden Betrachtungen vernachlässigt. In den Beispiel in Fig. 5 streben nach der Zündung von  $f_1$  die normierten, d. h. die auf die Höhe der Ladespannung  $U_0$  bezogenen Überspannungen an den übrigen Funkenstrecken dem Wert  $1/5$  zu. Hat auch  $f_2$  gezündet, so ist der Endwert der Überspannungen an den noch nicht gezündeten Funkenstrecken  $2/4$  usw. Allgemein ist in einem  $n$ -stufigen kurzgeschlossenen Generator, bei dem  $m$  Stufen schon gezündet haben, der Endwert

$U_{\text{end}}$  der Überspannungen an den noch nicht gezündeten Funkenstrecken:

$$U_{\text{end}} = \frac{m}{n-m} \quad (1)$$

Damit sind wenigstens die Endwerte der Überspannungen näherungsweise der Berechnung zugänglich. Es zeigt sich nun, dass man schon allein mit Hilfe der einfachen Formel (1) den in Fig. 3 dargestellten Verlauf der Schlagweiten in Abhängigkeit von der Stufenummer für den kurzgeschlossenen Generator befriedigend erklären kann:

Wenn man annimmt, dass allein die Endwerte  $U_{\text{end}}$  für das Zünden der Schaltfunkenstrecken verantwortlich sind, so kann man die kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$ , bei denen die Funkenstrecken noch zünden, berechnen. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist beispielsweise für den 6-stufigen 72-kV-Generator in Tabelle I wiedergegeben, wobei für die Abhängigkeit der Ansprechspannung (Spalte 4) von der

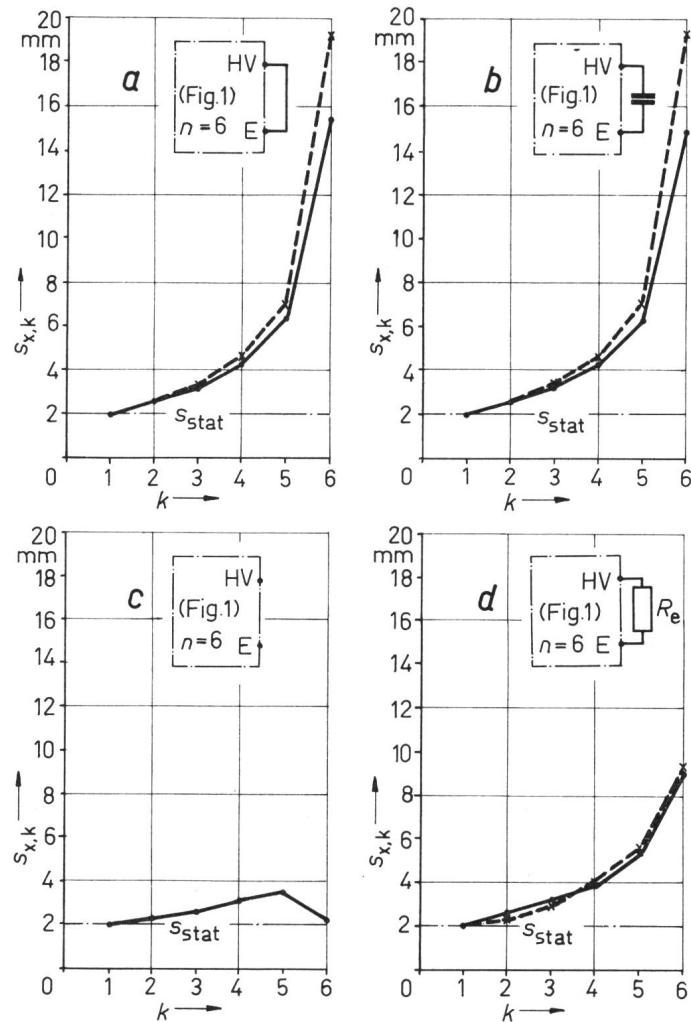


Fig. 3

Kritische Schlagweiten  $s_{x,k}$  eines 6stufigen Stoßgenerators bei verschiedenen Belastungsverhältnissen

a Kurzschluss

b kapazitive Belastung

c Leerlauf

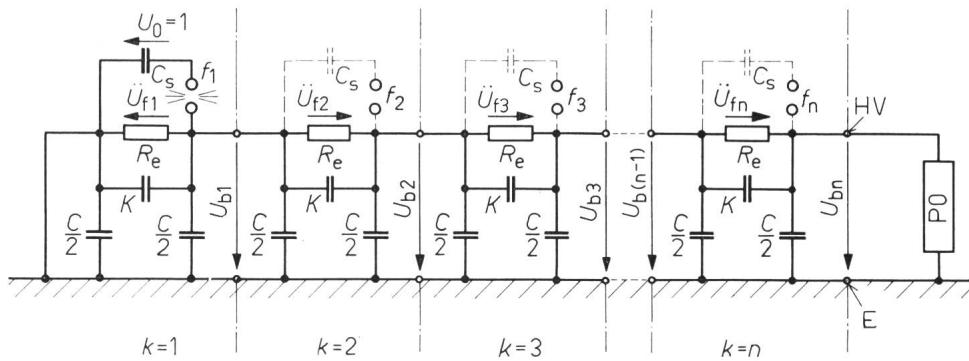
d Widerstandsbelastung  
 $k$  Stufenummer  
 $n$  Anzahl Stufen

Die Punkte HV und E entsprechen den Klemmen der Schaltung in Fig. 1

— gemessene  $s_{x,k}$   
 - - - nach Gl. (1) berechnete  $s_{x,k}$

Fig. 4

Ersatzbild der Marxschen Vervielfachungsschaltung zur Beschreibung der transientes Vorgänge nach Zündung der ersten Schaltfunkentstrecke



$f_1, f_2 \dots f_n$  Schaltfunkentstrecke;  $U_b$  Spannung der Entladewiderstandskette gegen Erde;  $U_f$  Überspannung an der Funkentstrecke;  $C$  Streukapazität gegen Erde;  $C_s$  Stoßkondensator;  $E$  Erdklemme des Stoßgenerators;  $HV$  Hochspannungsklemme;  $K$  Streukapazität zwischen den Generatorenstufen;  $PO$  Prüfobjekt;  $R_e$  Entladewiderstand;  $U_0$  Ladespannung;  $k$  Stufenummer;  $n$  Anzahl Stufen

Schlagweite (Spalte 5) die bekannte Eichtabelle einer Kugelfunkentstrecke mit Kugeln von 2 cm, bei symmetrischer Spannungsbeanspruchung zugrunde gelegt wurde. Der Grad der Übereinstimmung von Rechnung (Spalte 5) und Messung (Spalte 6) kann als befriedigend bezeichnet werden, angesichts der wirklich sehr groben Näherung beim Ansatz der

nennenswerten Widerstand (Fig. 3b). Die ausführliche Untersuchung der Zündwahrscheinlichkeiten des im Hinblick auf eine Stoßspannungserzeugung sinnlosen Kurzschlussfalles hat also wegen der engen Verwandtschaft zwischen Kurzschluss und kapazitiver Belastung bei den Zündvorgängen der Schaltfunkentstrecken durchaus eine praktische Bedeutung.

### 3.2 Leerlauf

Wie schon die früheren Untersuchungen [1] gezeigt haben, streben die Überspannungen beim leerlaufenden Generator gegen den Endwert Null. Aus diesem Grunde sind nur für kurze Zeit günstige Bedingungen für eine Zündung vorhanden. Es ist also von der Theorie her zu erwarten, dass die  $s_{x,k}$  im Leerlauf kleiner sind als im Kurzschluss.

Wie Fig. 3c zeigt, sind die kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$ , bei denen der leerlaufende Generator gerade noch zündet, tatsächlich geringer als beim kurzgeschlossenen Generator. Bei der Funkentstrecke  $f_2$  ist der Unterschied zwischen Leer-

Beispiel für die Berechnung von kritischen Schlagweiten

Tabelle 1

1	2	3	4	5	6
Gezündete Funkentstrecken	$U_{end}$ der noch nicht gezündeten Funkentstrecken	$1 + U_{end}$	$(1 + U_{end}) U_L$ ( $U_L = 8,1$ kV)	$s_{x,k}$ berechnet aus Spalte 4	$s_{x,k}$ gemessen
$f_1$	$\frac{1}{5}$	1,2	9,72	$s_{x,2} = 2,5$	2,65
$f_1 + f_2$	$\frac{2}{4}$	1,5	12,16	$s_{x,3} = 3,3$	3,20
$f_1 + f_2 + f_3$	$\frac{3}{3}$	2,0	16,20	$s_{x,4} = 4,6$	4,00
$f_1 + f_2 + f_3 + f_4$	$\frac{4}{2}$	3,0	24,30	$s_{x,5} = 7,1$	6,40
$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$	$\frac{5}{1}$	6,0	48,60	$s_{x,6} = 19,4$	15,50

Rechnung und der einfachen Anwendung der Funkentstrecken-Eichtabellen, ohne Berücksichtigung irgendwelcher Stoßfaktoren.

Es ist jedoch von vornherein zu erwarten, dass die Näherungsrechnung nach Gl. (1) für grosse Werte von  $m$ , d. h. wenn erst wenige Funkentstrecken gezündet haben, zu niedrige Schlagweiten  $s_{x,k}$  ergibt, denn in den unteren Generatorstufen überwiegt noch der rasch veränderliche Anteil der Überspannungen gegenüber den Endwerten  $U_{end}$  und die gemessenen  $s_{x,k}$  sind daher grösser als die berechneten. Anderseits werden bei kleinen  $m$ , d. h. wenn schon fast alle Funkentstrecken des Generators angesprochen haben, die theoretischen  $s_{x,k}$ -Werte eher über den Messwerten liegen, weil die nun schon recht zahlreichen Spannungsquellen in Form von geladenen Stoßkondensatoren ihre Energie wohl doch nicht so widerstandslos an die Kettenschaltung der Entladewiderstände abgeben, wie dies beim Ansatz der Rechnung angenommen wurde. Ganz deutlich treten diese Unterschiede zwischen Messung und Rechnung bei dem bereits eingangs erwähnten 20-stufigen 4-MV-Generator hervor (Fig. 6).

Die Messergebnisse am kapazitiv belasteten Generator — also mit der im Prüffeldbetrieb weitaus häufigsten Belastungsart — unterscheiden sich nur unwesentlich von denen des kurzgeschlossenen Generators, denn schon die Kapazität von ca. 100 pF am Ausgang des Generators bietet den Vorgängen, die sich innerhalb einiger  $10^{-7}$  s abspielen, keinen

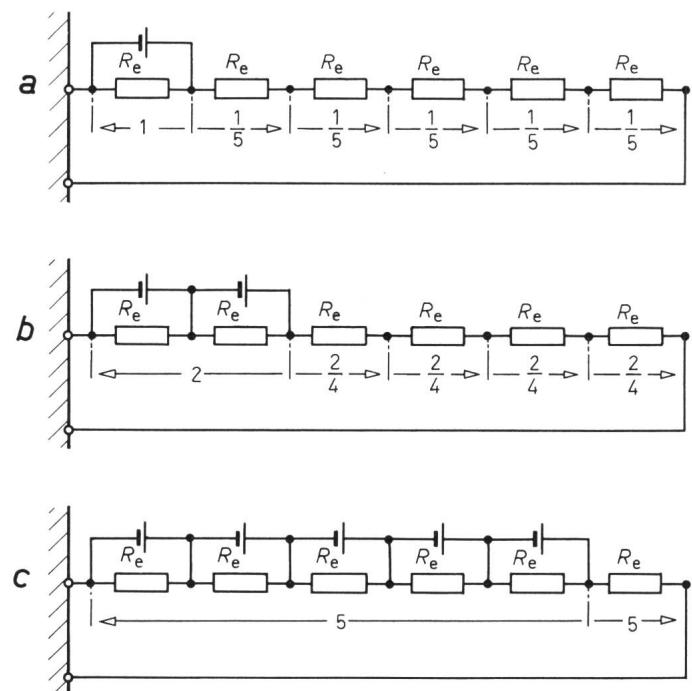


Fig. 5  
Berechnung der «Endwerte» der Überspannungen an einem 6stufigen kurzgeschlossenen Generator

a Zustand nach der Zündung der ersten Funkentstrecke;

b Zustand nach der Zündung der ersten und der zweiten Funkentstrecke;

c Zustand nach der Zündung der ersten bis fünften Funkentstrecke

$R_e$  Entladewiderstand

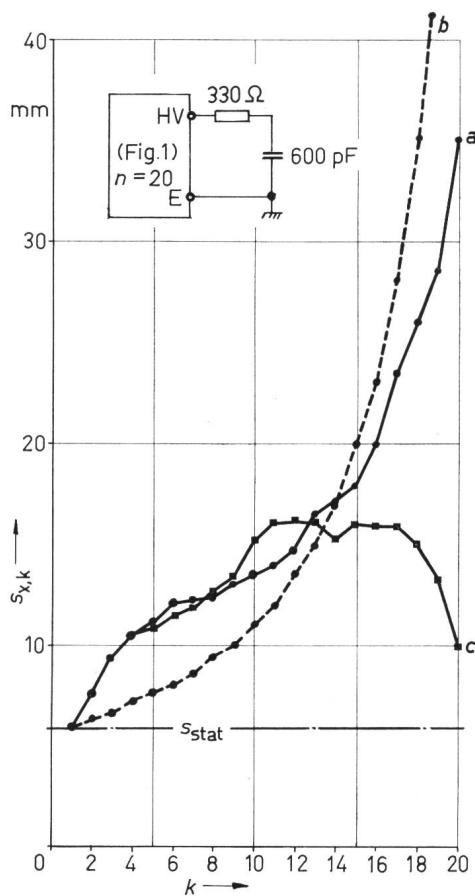


Fig. 6

**Kritische Schlagweiten  $s_{x,k}$  eines 20stufigen, 4-MV-, 300-kWs-Generators bei verschiedenen Belastungsverhältnissen**

- a gemessene kritische Schlagweiten bei Belastung des Generators durch eine Serieschaltung von  $R_{de} = 330 \Omega$  und  $C_b = 600 \text{ pF}$ ;
- b für die Widerstandsbelastung von  $330 \Omega$  berechnete kritische Schlagweiten;
- c gemessene kritische Schlagweite des leerlaufenden Generators;
- k Stufenummer;  $s_{stat}$  statische Ansprechspannung der ersten Funkenstrecke

lauf und Kurzschluss noch nicht sehr gross, mit zunehmender Stufenummer wird er jedoch erheblich. Es fällt besonders auf, dass die Schlagweite  $s_{x,k}$  der letzten Schaltfunkenstrecke wesentlich geringer ist als die der vorletzten. Die Erscheinung hat vermutlich folgende Ursache: An der letzten Schaltfunkenstrecke des leerlaufenden Generators tritt nur so lange eine Überspannung auf, bis die Erdkapazität der mit dem Entladewiderstand verbundenen Kugel über diesen Widerstand aufgeladen worden ist. Die Erdkapazität dieser Kugel ist sehr klein und daher ist auch die Überspannung von kurzer Dauer. Wenn die an der letzten Kugel wirksame Erdkapazität nur um wenige pF vergrössert wird, nimmt die maximal mögliche Schlagweite der letzten Funkenstrecke zu.

### 3.3 Widerstandsbelastung

Der Ausgang des kleinen 72-kV-Generators wurde für diesen Versuch mit der Erdelektrode über einen Ohmschen Widerstand verbunden. Der Ohmwert dieses Widerstandes wurde gleich dem eines Entladewiderstandes gewählt. Nach der Zündung von  $f_1$  streben die normierten Überspannungen an den übrigen Funkenstrecken dem Wert  $1/2$  zu. Hat auch  $f_2$  gezündet, dann ist der Endwert der Überspannungen an den noch nicht gezündeten Funkenstrecken  $2/4$  usw. Analog zur

Berechnung beim Kurzschlussversuch lassen sich aus den Endwerten die kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$  berechnen. Die Übereinstimmung der berechneten Staffelung der Funkenstrecken-Distanz mit den gemessenen Werten ist, wie Fig. 3d zeigt, befriedigend.

### 4. Der Einfluss einiger Schaltungselemente

Man kann nun mit der gleichen Messmethode den Einfluss aller möglichen Parameter auf die Zündwahrscheinlichkeit der Schaltfunkenstrecken studieren und daraus entsprechende Folgerungen für den Entwurf und den Betrieb von Stoßgeneratoren ziehen. Es seien hier nur noch zwei besonders wichtige Einflussgrößen erwähnt: Fig. 7 bestätigt die schon in [1] gemessene und berechnete starke Abhängigkeit der Überspannungen vom Widerstand der Entladewiderstände  $R_e$  und Fig. 8 macht deutlich, wie die Streukapazitäten  $C$  und  $K$  die Spannungsverteilung im Generator und damit die Überspannungen beeinflussen.

### 5. Zündwahrscheinlichkeit der zweiten Schaltfunkenstrecke bei verschiedenen Bestrahlungsverhältnissen

Mit der in Fig. 9 skizzierten Versuchsanordnung wurde der Einfluss verschiedener Bestrahlungsverhältnisse auf die Zündwahrscheinlichkeit der Schaltfunkenstrecken des kurzgeschlossenen 72-kV-Generators untersucht. Die direkte Bestrahlung der Funkenstrecken war durch schwarze, nicht glänzende Pappschirme 1 behindert. Das Funkenlicht schon gezündeter Funkenstrecken konnte also nur durch diffuse

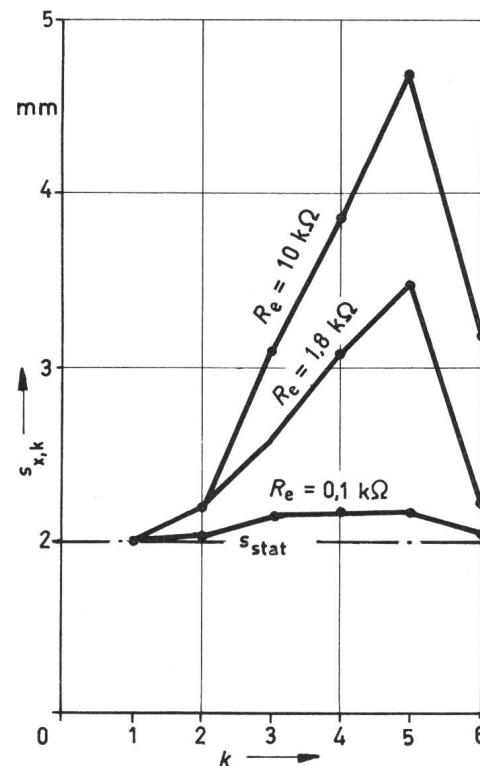


Fig. 7

**Die kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$  eines 6stufigen Generators bei verschiedenen Entladewiderständen  $R_e$**   
k Stufenummer;  $s_{stat}$  statische Ansprechspannung der ersten Funkenstrecke

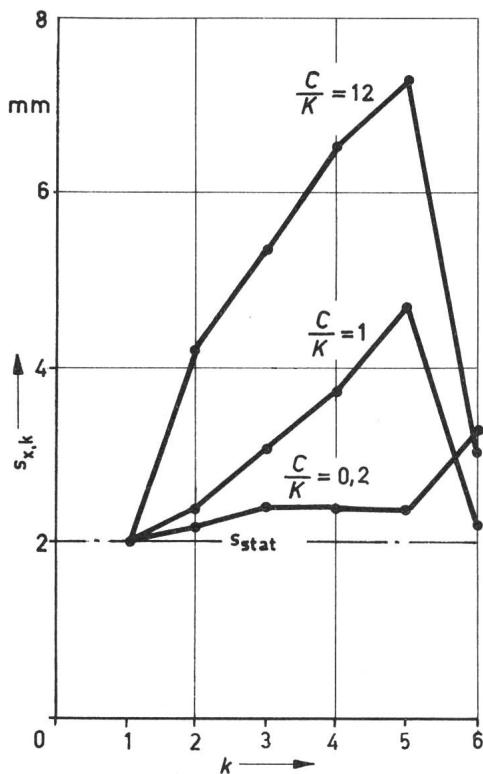


Fig. 8

Die kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$  bei Variation der Streukapazitätsverhältnisse in einem 6stufigen Generator

$k$  Stufenummer;  $s_{stat}$  statische Ansprechspannung der ersten Funkenstrecke;  $C$  Streukapazität gegen Erde  
 $k$  Streukapazität zwischen den Generatorstufen

Reflexion an dem weissen Pappschirm 2 zu den restlichen Schaltfunkenstrecken gelangen. Die Intensität der Bestrahlung liess sich leicht durch Verschieben des Reflexionsschirms verändern. Die Intensitätsabnahme des Lichtes auf dem Weg von den Funken zum Schirm und von dort zurück zu den noch nicht geziündeten Funkenstrecken hat zwei Ursachen:

- Die Intensität des Lichtes nimmt mit dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle ab.
- Ein Teil des Lichtes wird durch die Luft absorbiert. Dies trifft besonders für die ultravioletten Anteile des Funkenlichtes zu.

Um zu erkennen, wie stark das Funkenlicht abgeschwächt werden kann, ohne die einwandfreie Zündung der Schaltfunkenstrecken in Frage zu stellen, genügt es, den Einfluss des Funkenlichtes der ersten Funkenstrecke  $f_1$  auf die Zündwahrscheinlichkeit von  $f_2$  zu untersuchen. Nach der Triggerung oder dem statischen Ansprechen von  $f_1$  hat  $f_2$  — jedenfalls im praktisch wichtigen kapazitiv belasteten oder kurzgeschlossenen Generator — von den übrigen Schaltfunkenstrecken die schwierigsten Zündbedingungen, denn  $s_{x2}$  ist kleiner als die entsprechenden kritischen Schlagweiten aller anderen Funkenstrecken (Fig. 3a). Falls also  $f_2$  nicht sicher zum Zünden zu bringen ist, zünden die übrigen Funkenstrecken erst recht nicht.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Fig. 10 dargestellt. Die Schlagweite der Funkenstrecke  $f_1$  beträgt 2 mm. Die Kurve  $a$  gibt den Verlauf der Zündwahrscheinlichkeit bei direkter Bestrahlung wieder. Wird die direkte Bestrahlung durch einen schwarzen Schirm  $f_1$  und  $f_2$  behindert und

ist der Reflexionsschirm 20 cm von den Funkenstrecken entfernt, so verläuft die Ansprechwahrscheinlichkeit der zweiten Funkenstrecke gemäss Kurve  $b$ . Bei einem Abstand von 70 cm zwischen Reflexionsschirm und Funkenstrecken ergibt sich die Kurve  $c$ .

Den allgemeinen Verlauf der Wahrscheinlichkeitskurven in Fig. 10 kann man folgendermassen erklären: Die Funkenstrecke  $f_2$  wird bei den Zündversuchen mit einer Spannung bestimmter Form und Höhe beansprucht, während die Schlagweite  $s_2$  verändert wird. Würde man stattdessen eine Versuchsreihe mit der gleichen Spannungsform, aber fester Schlagweite  $s_2$  und variabler Spannungshöhe durchführen, so käme man zur bekannten Darstellung der Stosskennlinie, d. h. der Abhängigkeit der Überschlagsstoßspannung von der Überschlagszeit. Man erhielte dann als untere Begrenzung eines Streubandes die Aufbauzeitkennlinie und als obere Begrenzung die Streuzeitkennlinie [2]. Die Streuzeitkennlinie trägt die Zufälligkeiten des Entladungsaufbaues Rechnung. Sie wird also besonders durch die Bestrahlung der Funkenstrecke beeinflusst. Dagegen ist die Aufbauzeitkennlinie fest, so lange die Spannungsform und die Schlagweite nicht verändert werden. Die Aufbauzeitkennlinie ist durch die Zündwahrscheinlichkeit Null, die Streuzeitkennlinie durch die Zündwahrscheinlichkeit 100 % gekennzeichnet. Analog zu den üblichen Stosskennlinien ergeben sich die in Fig. 10 dargestellten Zündwahrscheinlichkeiten in Funktion der Schlagweite. Man erkennt, dass sich die drei Kurven  $a$ ,  $b$  und  $c$  mit abnehmender Zündwahrscheinlichkeit einander immer mehr nähern und für sehr kleine Wahrscheinlichkeiten ( $< 0,1\%$ ) asymptotisch einer bestimmten Schlagweite (etwa

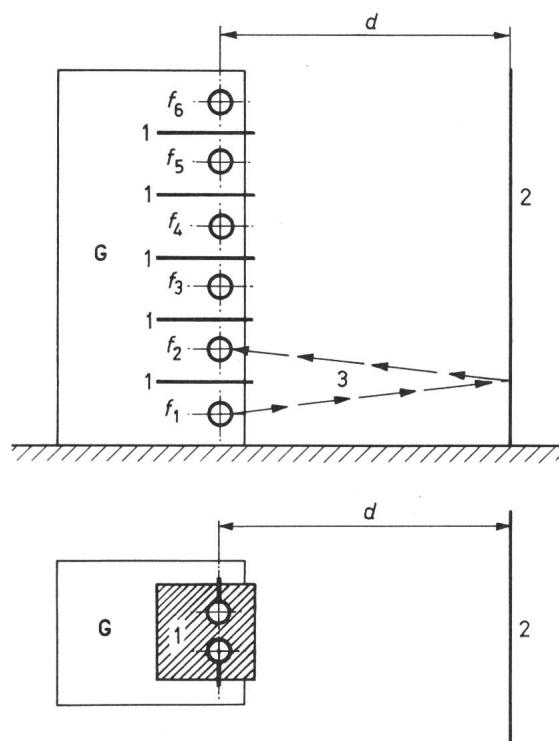


Fig. 9  
 Versuchsaufbau zur Messung des Bestrahlungseinflusses der ersten Funkenstrecke auf die Zündwahrscheinlichkeit der zweiten Funkenstrecke

$d$  variierte Distanz zwischen Funkenstrecke und Reflexionsschirm;  $f_1, f_2, f_6$  Schaltfunkenstrecken;  $G$  Stossgenerator; 1 schwarzer Pappschirm zur Behinderung der direkten gegenseitigen Bestrahlung der Funkenstrecken; 2 weisser Reflexionsschirm; 3 indirekter Lichtweg von der ersten zur zweiten Funkenstrecke durch Reflexion am Schirm

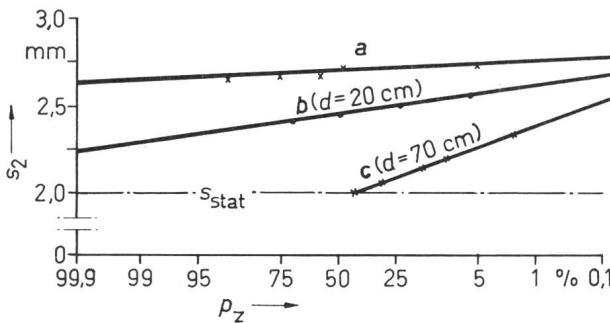


Fig. 10

**Die Zündwahrscheinlichkeit  $p_z$  der zweiten Schaltfunkenstrecke in Abhängigkeit der Schlagweiten bei Variation der Bestrahlungsverhältnisse**

- a direkte Bestrahlung von der ersten zur zweiten Funkenstrecke;
- b indirekte Bestrahlung über Reflexionsschirm (siehe Fig. 9); Abstand des Reflexionsschirmes  $d = 20 \text{ cm}$ ;
- c indirekte Bestrahlung; Abstand des Reflexionsschirmes  $d = 70 \text{ cm}$ ;

$s_{\text{stat}}$  statische Ansprechspannung der ersten Funkenstrecke

2,8 mm) zustreben. Würde man den Spannungsverlauf an der zündenden Funkenstrecke bei dieser Schlagweite oszillographieren und die Spannungshöhe und die Überschlagszeit in das Stosskennlinien-Diagramm eintragen, so erhielte man einen Punkt der Aufbauzeitkennlinie.

Im Gegensatz zur gemeinsamen Asymptote bei kleinen Zündwahrscheinlichkeiten hängen die Schlagweiten, bei denen eine hohe Zündwahrscheinlichkeit ( $>99,9\%$ ) erreicht wird, sehr stark von der Intensität der Bestrahlung ab. Das entspricht der Abhängigkeit der Streuzeitkennlinie von der Bestrahlung. Für die vorliegende Untersuchung besonders wichtig ist die Tatsache, dass die Kurve c (sehr schwache Bestrahlung) bei einer Schlagweite von  $s_2 = 2 \text{ mm}$  nur eine Zündwahrscheinlichkeit von etwa 40 % erreicht. Da die Schlagweite der Schaltfunkenstrecke der ersten Stufe ebenfalls 2 mm beträgt, hat es keinen Sinn, für die Funkenstrecke der zweiten Stufe eine kleinere Distanz als 2 mm zu wählen. Die Zündwahrscheinlichkeit von 40 % bedeutet, dass die geladenen Stosskondensatoren  $C_s$  infolge der schwachen Bestrahlung der zweiten Funkenstrecke nicht mehr sicher in Serie geschaltet werden.

## 6. Versuche an einem 4-MV-Generator

Die in Fig. 6 dargestellten Resultate der Messungen an einem 20stufigen Generator mit einem Arbeitsvermögen von 300 kW bestätigen im wesentlichen die am kleinen 6stufigen Generator gewonnenen Erkenntnisse. Zur Berechnung der Schlagweiten in dem mit einem äusseren Dämpfungswider-

stand  $R_{\text{de}}$  von  $330 \Omega$  und einer Kapazität von  $600 \text{ pF}$  belasteten Generator wurde  $C_b$  als Kurzschluss angesehen, d. h. es wurde so gerechnet, als ob der Generator nur mit dem Widerstand  $R_{\text{de}}$  belastet wäre. Die Endwerte der Überspannungen ergeben sich dann analog zu den in Abschnitt 3.3 geschilderten Verhältnissen durch die Spannungsverteilung an den 20 Entladungswiderständen  $R_e$  von je  $250 \Omega$  und an dem Widerstand  $R_{\text{de}}$ . Die Gründe für die Abweichung zwischen Messung und Rechnung bei den kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$  des belasteten Generators sind bereits in Abschnitt 3.1 diskutiert worden.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich die kritischen Schlagweiten  $s_{x,k}$  des belasteten und des leerlaufenden Generators etwa bis zur 10. Stufe nur geringfügig voneinander unterscheiden. Erst in der oberen Hälfte des Generators spielen die Endwerte der Überspannungen eine entscheidende Rolle, d. h. erst nach der Zündung von  $f_{10}$  «merkt» der Generator, wie er an der letzten Stufe belastet ist. Vorher reichen sowohl die kapazitiven Kopplungen längs dieses 20stufigen Generators als auch die geringen Amplituden der Endwerte  $U_{\text{end}}$  offensichtlich nicht dazu aus, den ersten Stufen einen deutlichen Hinweis über den Zustand am Ende der Schaltung zu geben. Sonst müssten sich die kritischen Schlagweiten auch in der ersten Hälfte des Generators je nach Belastung stärker voneinander unterscheiden.

## 7. Zusammenfassung

Durch die Messung der Zündwahrscheinlichkeit in Funktion der Schlagweite an den Schaltfunkenstrecken einiger Marxschen Vervielfachungsschaltungen gelingt es, Einblicke in den selbsttägigen Zündmechanismus der Schaltfunkenstrecken zu gewinnen. Mit einem verhältnismässig einfachen Messverfahren, das lediglich in einer Distanzmessung und in einem Abzählen der erfolgten oder nicht erfolgten Zündungen in einer Versuchsreihe besteht, werden die Einflüsse wichtiger Parameter wie Belastung, Streukapazitäten, Entladewiderstände und Bestrahlung, auf die Zündung der Funkenstrecken untersucht.

## Literatur

- [1] A. Rodewald: Ausgleichsvorgänge in der Marxschen Vervielfachungsschaltung nach der Zündung der ersten Schaltfunkenstrecke. Bull. SEV 60(1969)2, S. 37...44.
- [2] R. Strigel: Neuere Entwicklung der Stoßspannungstechnik. ETZ 69(1948)4, S. 110...116.

## Adresse des Autors:

Dr.-Ing. A. Rodewald, Emil Haefely & Cie. AG, Postfach, 4000 Basel 28.