Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 20

Artikel: Zur präzisen Auslösung von Stossgeneratoren bei einer vorgewählten Ladespannung

Autor: Rodewald, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916080

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 10.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

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

Zur präzisen Auslösung von Stossgeneratoren bei einer vorgewählten Ladespannung

Von *A. Rodewald*, Basel

621.319.53

Es wird im Artikel die Frage gestellt, wie man verhindern kann, dass Staubpartikel zu Fehlzündungen eines Stoßspannungsgenerators führen. Nach einer Diskussion der grundsätzlichen Lösungsmöglichkeiten dieses Problems wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie man die gestellte Aufgabe mit verhältnismässig einfachen Mitteln sicher lösen kann: Wenn der Generator so konstruiert ist, dass man seine Schaltfunkenstrecken mit einer Auslösevorrichtung weit unterhalb ihrer natürlichen Ansprechspannung zünden kann, genügt es, die Funkenstrecken mit grob entstaubter Luft zu versorgen, um einen breiten, von Fehlzündungen freien Arbeitsbereich zu erhalten.

Au début de cet exposé, on a posé la question sur les manières d'éviter les amorçages intempestifs d'un générateur d'ondes de choc dûs à l'influence de particules de poussière. Après un exposé des solutions fondamentales possibles de ce problème on a montré par un exemple concret comment les résultats désirés pouvaient être obtenus avec certitude avec des moyens relativement simples. Lorsque le générateur est conçu de manière à ce que les éclateurs puissent être amorcés au moyen d'un dispositif de déclenchement bien au-dessous de sa tension disruptive spontanée, il suffit d'alimenter les éclateurs avec un air partiellement dépoussiéré pour obtenir une large zone opérationnelle sans crainte d'amorçages intempestifs.

1. Einleitung

Die Schaltfunkenstrecken sind in der Marxschen Vervielfachungsschaltung die kritischsten Schaltungselemente. Sie müssen einerseits die über die Widerstände R_L, R_e und R_s (Fig. 1) aufgeladenen Stosskondensatoren C_s genau dann in Serie schalten, wenn die Spannung an den Kondensatoren einen bestimmten Wert erreicht hat, denn bei der Stossprüfung von elektrischen Apparaten ist es sehr wichtig, dass der Scheitelwert der am Prüfling wirksamen Spannnung nicht mehr als etwa 1 % vom vorgeschriebenen Wert abweicht. Anderseits sind die Funkenstrecken — meist handelt es sich um Kugelfunkenstrecken — in bezug auf ihre Ansprechspannung keine absolut stabilen Elemente. Ihre Instabilität ist besonders ausgeprägt, wenn sie wie im vorliegenden Fall, mit Gleichspannung beansprucht werden. Die in den Eichtabellen für Messfunkenstrecken angegebenen Ansprechspannungen stellen nur obere Grenzwerte für die Spannungsfestigkeit der jeweiligen Elektrodendistanz dar. In staubhaltiger Luft können die Ansprechspannungen mehr als 30 % nach unten streuen. Der Entladungsmechanismus dieser sog. Tiefdurchschläge ist von *Schröder* [1] [1]) ausführlich untersucht worden.

Wie kann man nun verhindern, dass sich die Streuung der Ansprechspannung der Schaltfunkenstrecken voll auf die Amplitude der vom Generator erzeugten Stoßspannung auswirkt? Im folgenden werden zunächst einige prinzipielle Lösungsmöglichkeiten dieses Problems erörtert und anschliessend wird ein Ausführungsbeispiel beschrieben.

2. Die natürliche Zündung der Funkenstrecken

Es ist für die weiteren Betrachtungen zweckmässig, die in einer früheren Arbeit [2] untersuchten Vorgänge bei der sog. natürlichen Zündung der Schaltfunkenstrecken noch einmal kurz darzustellen und sie dann in Zusammenhang mit der erwähnten Streuung der Ansprechspannung zu diskutie-

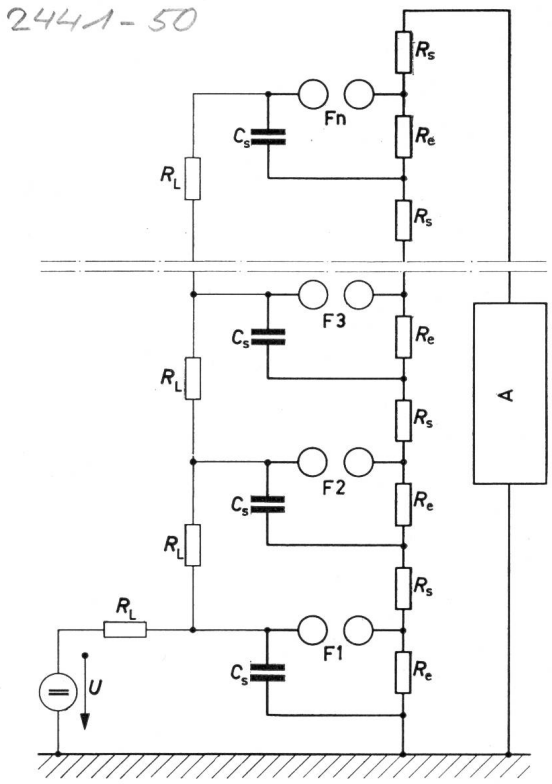

Fig. 1
Schematische Darstellung einer *n*-stufigen Marxschen Vervielfachungsschaltung
Anordnung der Widerstände nach *Edwards* und *Scoles:* $R_L \gg R_e \gg R_s$; C_s Stosskondensator; F Schaltfunkenstrecke; R_e Entladewiderstand; R_L Ladewiderstand; R_s Dämpfungswiderstand; U Ladespannung; A Prüfobjekt

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

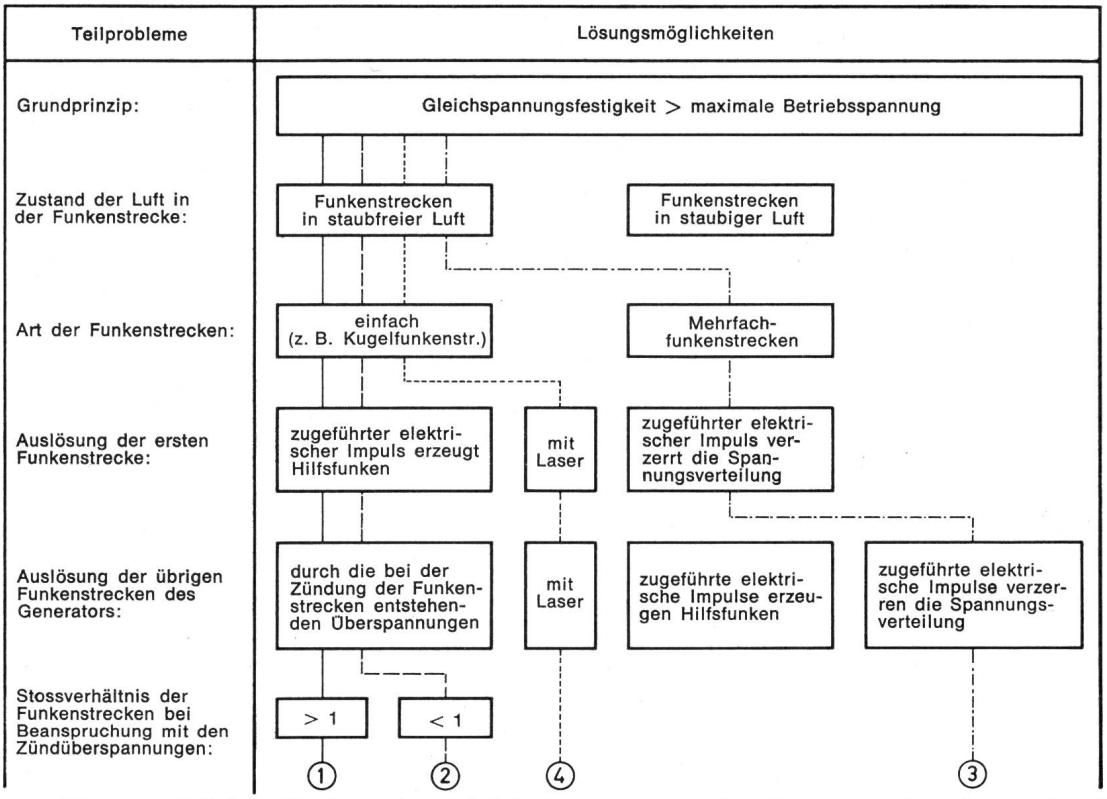

Fig. 2
Übersicht über die Möglichkeiten zur präzisen Auslösung von Stossgeneratoren bei einer vorgewählten Ladespannung
Die eingezeichneten Varianten sind in folgenden Abschnitten näher beschrieben: ① in den Abschnitten 3.1 und 4; ② in Abschnitt 3.2; ③ und ④ in Abschnitt 3.3

ren. Unter natürlicher Zündung der Schaltfunkenstrecken versteht man folgendes: Die Funkenstrecke F1 der ersten Stufe sei so eingestellt, dass ihre statische Ansprechspannung einige Prozent geringer ist als die Zündspannung der Funkenstrecken F2, F3 usw. (Fig. 1). Lässt man die Streuung der Ansprechspannungen vorerst ausser acht, so wird bei einer langsamen Steigerung der Ladespannung F1 ansprechen, sobald ihre statische Spannungsfestigkeit überschritten wird. Der Spannungszusammenbruch an der ersten Funkenstrecke erzeugt derartige Überspannungen an den übrigen Funkenstrecken, dass F2 ebenfalls zündet. Die Zündung von F2 verursacht neue Überspannungen, die zum Ansprechen von F3 führen, usw.

Die Zündung der Schaltfunkenstrecken muss nicht unbedingt mit F1 beginnen, sondern kann von jeder beliebigen Funkenstrecke des Generators eingeleitet werden. Die Amplituden der Überspannungen werden durch die Widerstände R_e, R_L und R_s sowie Streukapazität des Generators gegen Erde und die Streukapazitäten zwischen den Generatorstufen bestimmt. Die nach der Zündung der ersten Funkenstrecke auftretende Überspannung an der nächsten Schaltfunkenstrecke erreicht im allgemeinen 50...80 % der Ladespannung.

3. Möglichkeiten zur präzisen Auslösung

Man hat verschiedene Möglichkeiten, die Streuung der Ansprechspannung unwirksam zu machen. Allen Varianten liegt der Gedanke zugrunde, die Gleichspannungsfestigkeit der Schaltfunkenstrecken — oder allgemeiner: die der Schalter — wesentlich höher zu wählen als ihre maximale Betriebsgleichspannung. Wenn die maximale Betriebsspannung kleiner ist als die untere Grenzspannung der Tiefdurchschläge, so ist die Gefahr von Fehlzündungen durch Staubpartikel gebannt. Die im folgenden beschriebenen Anordnungen unterscheiden sich lediglich durch die Art und Weise, wie die Funkenstrecken trotz hoher Gleichspannungsfestigkeit dazu bewegt werden können, ihre Funktion als Schalter auszuüben. Fig. 2 vermittelt einen Überblick über die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten der gestellten Aufgabe. Aus den vielen sich bietenden Varianten seien die folgenden herausgegriffen:

3.1 Generator mit gekapselten Funkenstrecken und Hilfsfunken in der ersten Stufe

Falls man die erste Funkenstrecke eines Generators mit einem Hilfsfunken unterhalb ihrer Nennansprechspannung zündet, sprechen die übrigen Schaltfunkenstrecken des Generators wegen der hohen Überspannungen ebenfalls an. Diese Art der Auslösung funktioniert im allgemeinen in einem Ladespannungsbereich von 70...100 % der Nennansprechspannung der Funkenstrecken, falls einfache Homogenfeld-Funkenstrecken, also z. B. Kugelfunkenstrecken, verwendet werden. Wenn sich die Schaltfunkenstrecken in einer sehr staubigen Atmosphäre befinden, kann aber, wie einleitend bereits erwähnt, die erste Funkenstrecke durch ein Staubteilchen mitunter schon bei etwa 60 % der Nennansprechspannung zünden. In Fig. 3a sind die Nennansprechspannung, die untere Grenze der Auslösbarkeit des ganzen Generators mittels Hilfsfunken und die untere Grenze der Tiefdurchschläge bei sehr staubiger Atmosphäre in Funktion der Schlagweite der Schaltfunkenstrecken aufgetragen. Die Darstellung macht deutlich, dass im ganzen Auslösebereich des Generators zwischen der Nennansprechspannung (Kurve I) und der unteren Auslösegrenze (II) die Gefahr von Fehlzündungen durch Staubteilchen besteht, da die untere Grenze der Tiefdurchschläge (IIIa) tiefer liegt als die Auslösegrenze. Im Bereich unterhalb der Auslösegrenze bis zur Grenze der Tiefdurchschläge zünden nur einzelne Schaltfunkenstrecken. Die dabei erzeugten Überspannungen reichen aber nicht aus, die restlichen Funkenstrecken im Generator zum Ansprechen zu bringen.

Die nächstliegende Lösung des Problems besteht sicher darin, die Funkenstrecken in einer entstaubten Atmosphäre

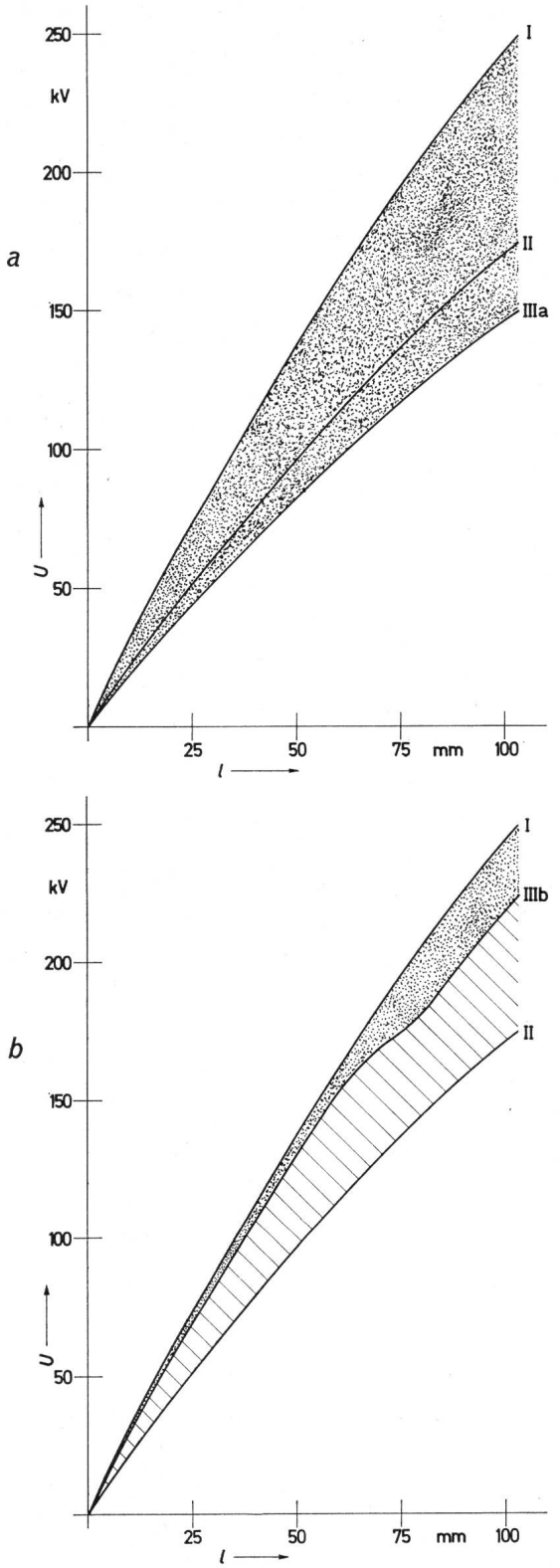

Fig. 3

Nennansprechspannung (Kurve I), Auslösegrenze (Kurve II) und untere Grenze der Tiefdurchschläge (Kurve IIIa bzw. IIIb) eines Stossgenerators mit maximal 200 kV Ladespannung

Die Schaltfunkenstrecken (25 cm Kugelfunkenstrecken) befinden sich:
a in einer sehr staubigen Atmosphäre;
b in einer entstaubten Atmosphäre mit höchstens 2 µm grossen Staubteilchen

l Schlagweite; *U* Ladespannung

zu betreiben. Die Frage ist nur, wie weit man mit der Entstaubung gehen muss. Versuche mit einem technischen Staubfilter, das alle Partikel von mehr als 2 µm Korngrösse ausscheidet, ergaben befriedigende Resultate. In Fig. 3b sind die Messergebnisse an dem in Abschnitt 4 beschriebenen Generator dargestellt. Man erkennt, dass die Staubpartikel von weniger als 2 µm Korngrösse, die das Filter noch passieren, je nach Schlagweite nur noch eine Streuung der Ansprechspannung von 3...10 % verursachen. Die untere Grenze der Tiefdurchschläge (IIIb) liegt daher weit über der Auslösegrenze (II) der Schaltfunkenstrecken und es ergibt sich zwischen den Kurven II und IIIb ein breiter Arbeitsbereich, in dem der Generator ohne Gefahr von Fehlzündungen betrieben werden kann. Wegen des breiten Arbeitsbereiches können die Schlagweiten der Schaltfunkenstrecken leicht mit einer Folgeregelung automatisch eingestellt werden, wobei die Führung der Folgeregelung fest mit der Vorwahl der Ladespannung gekoppelt ist.

3.2 Schaltfunkenstrecken mit niedrigem Stossverhältnis

Die bisher betrachteten einfachen Homogenfeld-Funkenstrecken haben den Nachteil, dass ihr Stossverhältnis grösser als Eins ist (Fig. 4a). Als Stossverhältnis wird im folgenden das Verhältnis der Stoßspannungsfestigkeit zur Nennansprechspannung bei Gleichspannung bezeichnet. Die erhöhte elektrische Festigkeit der einfachen Funkenstrecken wirkt sich ungünstig auf ihr Ansprechverhalten gegenüber den Überspannungen aus, die, wie bereits erwähnt, für das sukzessive Zünden der Schaltfunkenstrecken verantwortlich sind.

Aus dem eben Gesagten kann man folgern, dass sich die Auslösegrenze zu niedrigeren Spannungen hin verschieben und damit der Arbeitsbereich des Generators verbreitern liesse, wenn man statt der einfachen Kugelfunkenstrekken Elektrodenanordnungen mit einem niedrigeren Stossverhältnis verwenden würde. Eine sehr einfache Anordnung mit der gewünschten Eigenschaft ist eine Kugelfunkenstrecke mit isoliert in die Kugeln eingelassenen Stiften (Fig. 4b). Die Stifte sind mit den Kugeln jeweils über einen hochohmigen Widerstand verbunden. Mit derartigen Funkenstrecken hat man schon vor einigen Jahrzehnten in Überspannungsableitern gute Erfolge erzielt [3]. *Broadbent* [4] hat als Erster solche Funkenstrecken als Schaltelemente in je-

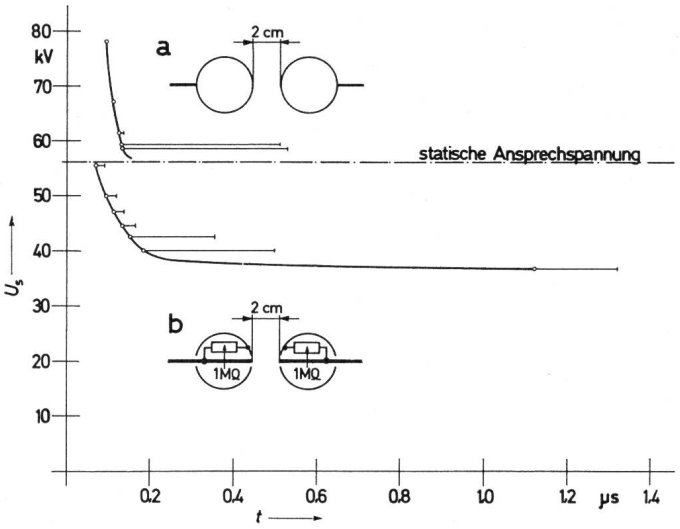

Fig. 4

Aufbauzeitkennlinie und Streuung der Ansprechspannung einer 25-cm-Kugelfunkenstrecke (*a*) und einer Kugelfunkenstrecke mit eingesetzten Stabelektroden (*b*)

Sehr intensive Bestrahlung beider Funkenstrecken mit dem Funkenlicht des Stossgenerators
Form der Stoßspannung: Rechteckwelle mit 60 ns Stirndauer
U_s Stoßspannung; *t* Zeit bis zum Ansprechen der Funkenstrecke

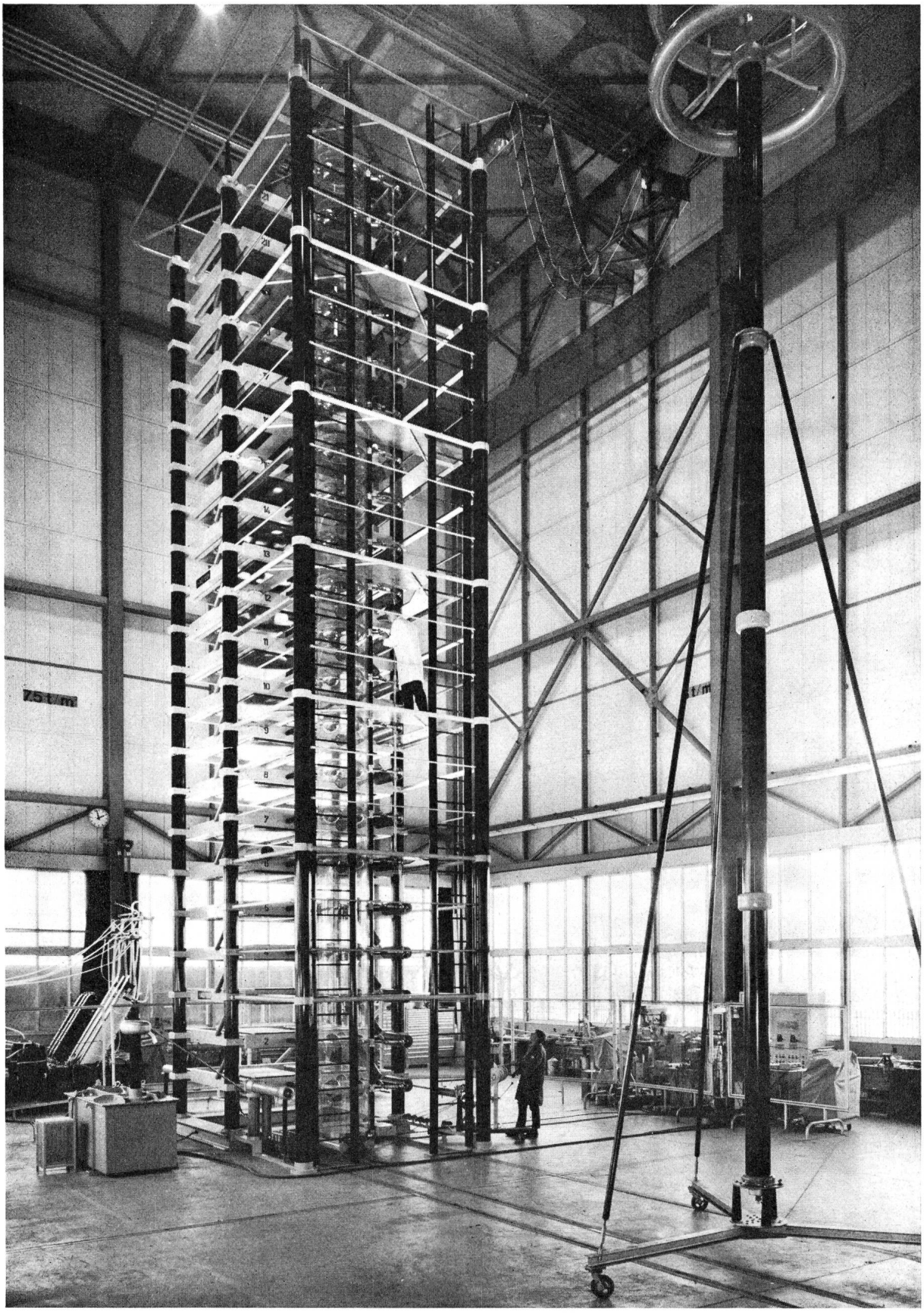

Fig. 5
4,2-MV-Stossgenerator mit einem Arbeitsvermögen von 420 kWs

der Stufe der Marxschen Vervielfachungsschaltung verwendet und damit eine beträchtliche Verbreiterung des Arbeitsbereiches erzielt. Allerdings war der Gedankengang, der *Broadbent* zum Einbau jener Elektroden veranlasste, ein anderer als der oben skizzierte: Jeder der isoliert in die Kugeln eingebauten Stifte wurde über einen Kopplungskondensator mit der darunterliegenden Stufe verbunden. Auf diese Weise sollten Impulse auf die Stifte geleitet werden und die Funkenstrecken mit Hilfsfunken zünden. Bei der Variation der Kopplungskapazität fand *Broadbent*, dass der Arbeits-

bereich des Generators dann am grössten ist, wenn man auf die Kopplungskondensatoren überhaupt verzichtet. Dieser experimentelle Befund ist so zu erklären, dass durch den Einbau der zusätzlichen Kondensatoren nur die Längskapazität des Generators vergrössert und damit die Amplituden der zum Zünden der Funkenstrecken nötigen Überspannungen verkleinert werden. Die Verbreiterung des Arbeitsbereichs ist allein auf den niedrigen Stossfaktor der verwendeten Elektrodenanordnung zurückzuführen.

3.3 Künstliche Auslösung jeder einzelnen Schaltfunkenstrecke

Anstelle des selbständigen Mechanismus der Marxschen Vervielfachungsschaltung kann man auch jede der Schaltfunkenstrecken mit je einer Auslösevorrichtung einzeln zünden. Dies kann z. B. mit elektrischen Impulsen [5] oder mit Laser [6] geschehen. Zur elektrischen Impulsauslösung muss dann in jeder Stufe ein auf Kommando auslösbarer Hochspannungsimpulsgenerator vorhanden sein. Die Laserzündung setzt eine sehr genaue, gegen Erschütterungen unempfindliche Montage der Funkenstrecken voraus und der Aufwand zur Erzeugung von starken getriggerten Laserimpulsen ist zur Zeit noch sehr gross.

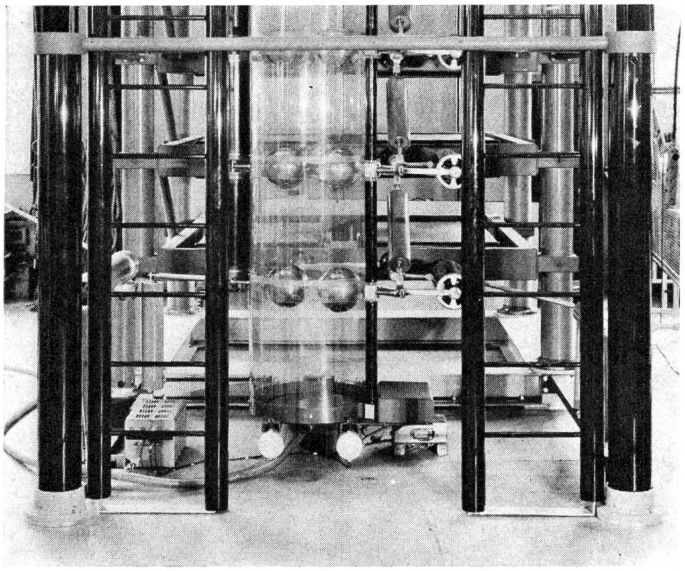

Fig. 6
Teilansicht des in Fig. 5 abgebildeten Generators

4. Ein 4,2-MW-Generator mit gekapselten Schaltfunkenstrecken

Zur Ergänzung der allgemeinen Betrachtungen sollen noch kurz die Ergebnisse einiger Messungen an einem grossen Stossgenerator mitgeteilt werden. Der in Fig. 5 abgebildete Generator hat folgende Daten:

Summenladespannung	4,2 MV
Arbeitsvermögen	420 kWs
Stufenzahl	21
Stosskapazität	47,6 nF
Ladespannung	200 kV

Der Generator ist in jeder dritten Stufe mit je einer Bedienungsplattform ausgerüstet, die fest angebaut ist. Die Plattformen können über ebenfalls fest am Generator montierte Leitern aus Isoliermaterial erreicht werden. Mit Hilfe der Plattformen und Leitern können alle Umschaltarbeiten am Generator, wie Parallelschaltung von Stufen oder Wechsel der Wellenform, einfach und ohne Zuhilfenahme eines Krans ausgeführt werden.

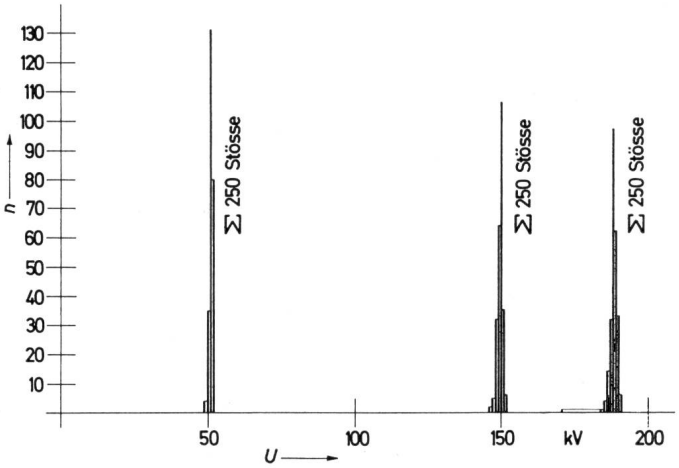

Fig. 7
Natürliche Streuung der Ansprechspannung des in Fig. 5 dargestellten Stossgenerators
Funkenstrecken gekapselt und mit entstaubter Luft versorgt
n Anzahl Zündungen; *U* Ladespannung

Für die Auslösung des Generators wurde die einfache, in Abschnitt 3.1 beschriebene Methode mit nur einem Hilfsfunken in der ersten Generatorstufe gewählt. Die vom Ladegleichrichter erzeugte Spannung wird in einem elektroni-

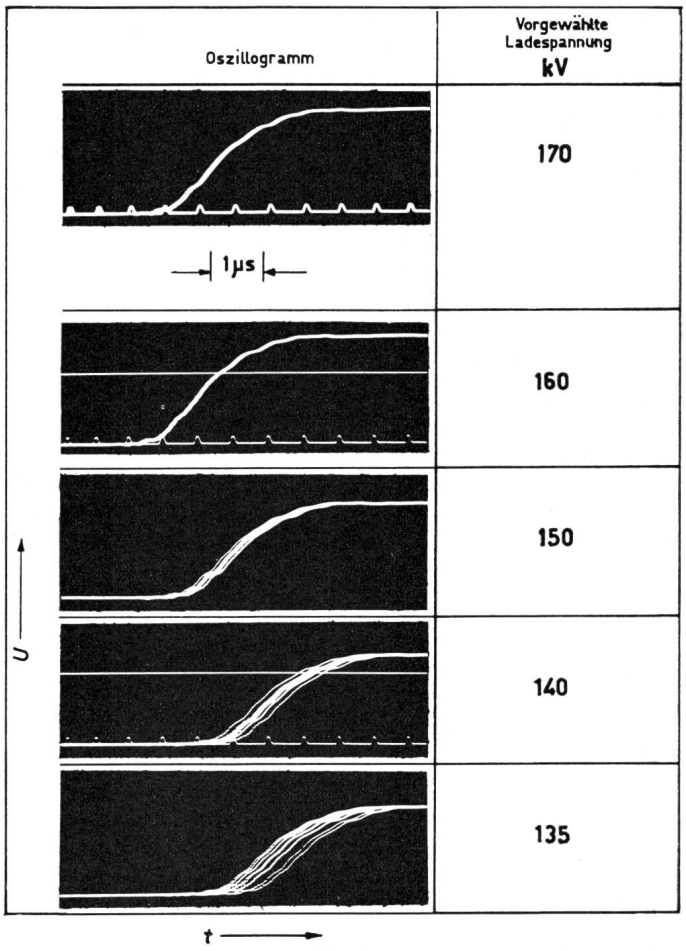

Fig. 8
Oszillogramme zur Messung der zeitlichen Streuung der vom 4,2-MV-Generator abgegebenen Stoßspannung *U* bei Auslösung mit dem Trigatron
Schlagweite der Schaltfunkenstrecken 73 mm entsprechend einer Nennansprechspannung von 191 kV
t Zeit

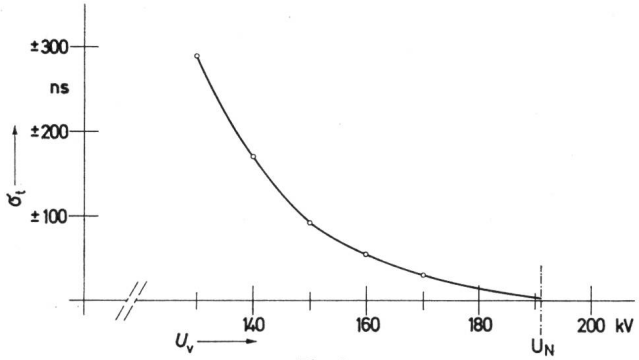

Fig. 9
Die zeitliche Streuung σ_t der vom 4,2-MV-Generator abgegebenen Stoßspannung
Auswertung der Oszillogramme in Fig. 8
U_V vorgewählte Ladespannung; U_N Nennansprechspannung

schen Steuergerät, dem Trigatron, mit einer einstellbaren Referenzspannung verglichen. Mit der Einstellung der Referenzspannung wird die Höhe der Ladespannung vorgewählt. Wenn die gewünschte Ladespannung erreicht ist, gibt das Trigatron Auslöseimpulse an den Stossgenerator und an den Oszillographen ab. Das Trigatron sorgt mit entsprechenden Laufzeitgliedern dafür, dass der zur Registrierung des zeitlichen Spannungsverlaufes dienende Oszillograph kurz vor dem Generator ausgelöst wird, damit auch der Beginn der Stoßspannung einwandfrei aufgezeichnet wird. Die Schaltfunkenstrecken sind in einen Kamin aus durchsichtigem Kunststoff eingebaut, so dass ihr ordnungsgemässes Zünden trotz der Kapselung visuell überwacht werden kann (Fig. 6). Der Kunststoffkamin ist über einen Entfeuchter, einen Staubfilter und ein Druckreduzierventil an das in der Fabrik vorhandene allgemeine Druckluft-Leitungsnetz angeschlossen. Die getrocknete und entstaubte Luft wird am Fuss des Kamins eingelassen, der Luftauslass befindet sich oberhalb der letzten Schaltfunkenstrecke.

Die Streuung der Ansprechspannung des Generators bei natürlicher Zündung aller Schaltfunkenstrecken ist ein Mass für die Wirksamkeit der Kapselung und Luftversorgung. Es wurden deshalb bei verschiedenen Nennansprechspannungen je 250 Stösse erzeugt. Die Verteilung der Zündungen ist in Fig. 7 dargestellt. Beispielsweise liegt bei einer Schlagweite von 73 mm entsprechend einer Nennansprechspannung von 191 kV der niedrigste Tiefdurchschlag bei 171 kV. In Fig. 7 sind nur die Verteilungen für einige ausgewählte Schlagweiten aufgetragen. Die vollständige untere Grenze der Tiefdurchschläge des 4,2-MV-Generators ist die Kurve IIIb in Fig. 3b.

In weiteren Versuchsreihen wurde die untere Grenze der Auslösbarkeit mit einem Hilfsfunken in der ersten Stufe ermittelt. Zu diesem Zweck wurden der Generator und der Oszillograph automatisch von dem oben erwähnten Trigatron ausgelöst, wenn die Ladespannung den vorgewählten Wert erreichte. Die Schlagweite der Schaltfunkenstrecken blieb bei einer Versuchsreihe unverändert, während die Vorwahl der Ladespannung in Stufen nach unten verschoben wurde. So wurden z. B. bei einer Schlagweite von 73 mm, entsprechend einer Nennansprechspannung von 191 kV die Ladespannungen im Bereich von 180...135 kV verändert und bei jeder Spannungsstufe 10 Stösse auf dem gleichen Film registriert (Fig. 8). Die aus den Oszillogrammen ablesbare zeitliche Streuung der Spannungsstösse ist in Fig. 9 in Abhängigkeit der Ladespannung aufgetragen, bei der die automatische Auslösung mit dem Trigatron erfolgte. Der Arbeitsbereich, in dem der Generator ohne Gefahr von Fehlzündungen bei einer Schlagweite der Schaltfunkenstrecken von 73 mm betrieben werden kann, reicht also von 170 kV (Grenze der Tiefdurchschläge) bis 135 kV Ladespannung (Auslösegrenze). Analoge Versuchsreihen bei anderen Schlagweiten führten zu der in Fig. 3b wiedergegebenen unteren Auslösegrenze II, wobei als zulässige zeitliche Streuung der Spannungsstösse ± 300 ns angenommen wurde. Lässt man nur eine Streuung von ± 100 ns zu, so liegt die Auslösegrenze bei etwa 10 % höheren Ladespannungen.

Literatur

[1] *G.-A. Schröder:* Über den Entladungsmechanismus in Raumluft in einem homogenen Feld bei Elektrodenabständen von 2,5 bis 9 cm. Zeitschrift für angewandte Physik 13(1961), S. 367...375.
[2] *A. Rodewald:* Untersuchungen über die Zündung der Schaltfunkenstrekken in der Marxschen Vervielfachungsschaltung. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1966.
[3] *D. Müller-Hillebrand:* Die neuzeitliche Entwicklung von Überspannungsschutzgeräten in Hochspannungsanlagen, ETZ 55(1934), S. 782...784.
[4] *T. E. Broadbent:* New high-voltage multi-stage impulse generator circuit. Journal of scientific instruments 37(1960), S. 231...236.
[5] Impulse under strict control. Electrical Review 182(1968), S. 256.
[6] *A. H. Guenther* and *J. R. Bettis:* Laser-triggered megavolt switching. IEEE Journal of quantum electronics 3(1967), S. 581...588.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *A. Rodewald,* Emil Haefely & Cie. AG, Postfach, 4000 Basel 28.