

# Die Entwicklung des Stossspannungsgenerators

## Arnold Rodewald

Für Stossprüfungen mit Blitz- und Schaltstössen wird heute fast ausschliesslich die Vervielfachungsschaltung verwendet, die von Erwin Marx 1923 zum Patent angemeldet wurde [1]. Sie arbeitet nach dem Prinzip, dass Kondensatoren parallel aufgeladen und anschliessend durch Funkenstrecken in Reihe geschaltet werden. Bild 1 zeigt eine der Schaltungsvarianten, die in der Patentschrift von Marx enthalten sind. Marx macht aber in seiner Patentschrift keine Angaben darüber, wie die Funkenstrecken dazu gebracht werden zu zünden. Er schreibt nur lakonisch, dass die Kondensatoren "nach der Zündung der Funkenstrecken selbsttätig in Reihe geschaltet werden".

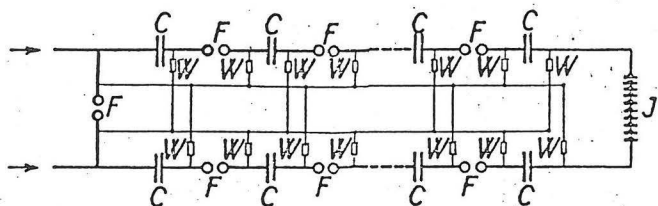


Bild 1:  
Zeichnung aus der Patentschrift  
von E. Marx

Für das Prinzip der parallelen Aufladung und anschliessender Reihenschaltung gab es einen Vorgänger, dessen Arbeiten Marx nach eigenen Aussagen aber nicht bekannt waren: G. Planté hat im Jahr 1877 eine Einrichtung beschrieben [2], in der er etwa 30 Kondensatoren parallel aufgeladen und anschliessend in Reihe geschaltet hat, um damit lange Funken (4 cm) zu erzeugen. Der Wechsel von der Parallel- in die Reihenschaltung erfolgte dabei mit einer mechanisch bewegten Kontaktwalze (Bild 2).

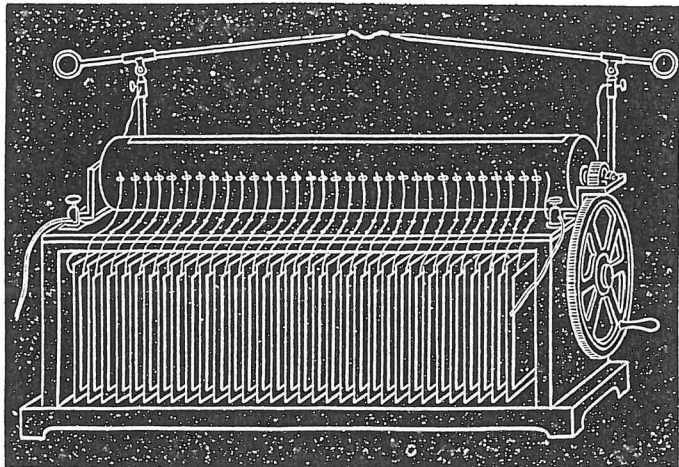


Bild 2:  
"Machine Rhéostatique"  
von G. Planté

Für die Industrieprüffelder und die Hochspannungslabors der Hochschulen hat die Marx'sche Schaltung vor allem in der von Edwards und Scoles angegebenen Anordnung Bedeutung erlangt. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die Widerstände, die die Stirn und den Rücken des Spannungsimpulses bestimmen, auf die einzelnen Stufen des Generators verteilt sind (Bild 3).

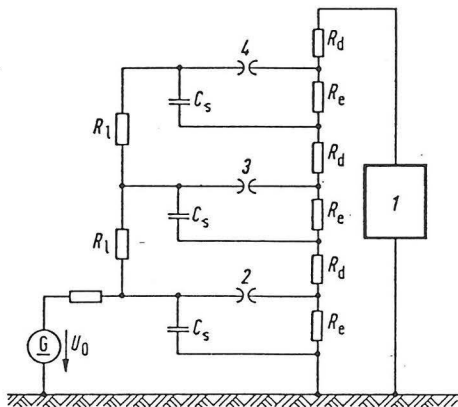


Bild 3:

Schematische Darstellung einer 3stufigen Marxschen Vervielfachungsschaltung. Anordnung der Widerstände nach Edwards und Scoles. Es ist

$C_s$	Stoßkondensator	$R_d$	Dämpfungswiderstand
$R_e$	Entladewiderstand	$U_0$	Ladespannung
$R_l$	Ladewiderstand		
1	Prüfobjekt	2 ... 4	Funkenstrecken

Auf dieser Grundlage haben in den letzten 40 Jahren Entwicklungen in drei Bereichen stattgefunden:

1. Schaltungstechnische Ergänzungen zur Verbesserung der selbsttätigen Reihenschaltung
2. Erzeugung von Schaltspannungen mit der Marx'schen Schaltung
3. Massnahmen zur Reduktion der Prüfkosten durch leichtere Handhabung (Umschalten auf andere Belastungen und Wellenformen), grosse Beweglichkeit innerhalb des Prüffeldes.

# 1. Schaltungstechnische Ergänzungen zur Verbesserung der selbsttätigen Reihenschaltung

Bei den bis etwa 1985 verfügbaren Oszillografen war man darauf angewiesen, zuerst deren Zeitablenkgerät in Gang zu setzen und kurz darauf – im Abstand von einigen hundert Nanosekunden – die Funkenstrecken des Generators zu zünden. Zu diesem Zweck musste die erste Funkenstrecke mit einem Hilfsfunken unterhalb ihrer statischen Durchbruchspannung bei einer vorbestimmten Ladespannung gezündet werden (Bild 4).

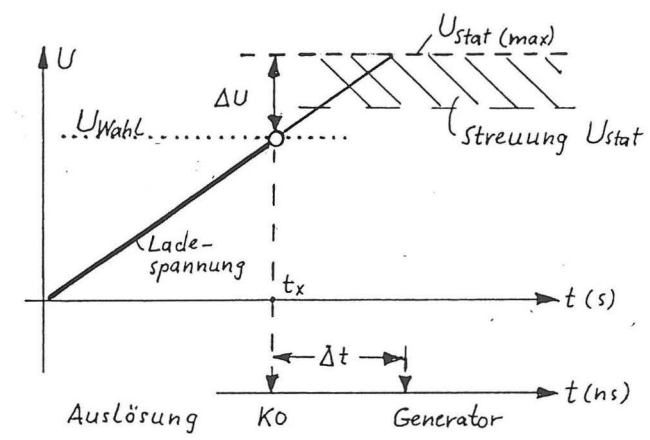


Bild 4:

Anstieg der Ladespannung und Auslösezeitpunkte für Oszillograf und Generator

Die Differenz zwischen statischer Durchbruchspannung und vorgewählter Ladespannung durfte aber nicht zu gross sein (Größenordnung 10 %), weil sich sonst durch das verzögerte Ansprechen der Funkenstrecken die Spannungsform verändert hätte. Dies ist aber besonders für die Prüfung von Transformatoren nicht zulässig, weil die Aussage darüber, ob eine Prüfung bestanden wurde oder nicht, auf einem Vergleich von Strömen beruht, die zuerst bei reduzierter, dann bei voller Prüfspannung registriert werden (Bild 5).

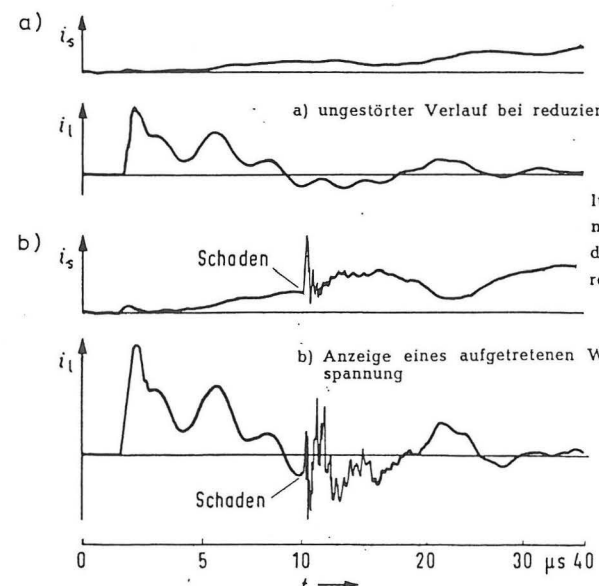


Bild 5:

Verlauf des vom Sternpunkt der gestoßenen Oberspannungswicklung zur Erde fließenden Stoßstromes  $i_s$  und des von der kurzgeschlossenen Unterspannungswicklung zur Erde abfließenden Ladestromes  $i_l$  bei der Stoßprüfung eines 200-kVA-Verteilungstransformators der Spannungsreihe 20 mit Vollwellen.

In den 50er Jahren wurden im Zusammenhang mit der Einführung höherer Spannungsebenen (Uebergang von 220 kV zu 400 kV) und grösserer Transformatorenleistungen Generatoren mit einem Energiespeichervermögen von 10 kWs pro 200 kV Stufenspannung gebaut. Dabei zeigte sich, dass die Funkenstrecken in Generatoren mit hohem Energiespeichervermögen nur in einem relativ kleinen Spannungsbereich unterhalb der statischen Ansprechspannung auslösbar waren, ohne dass sich die Spannungsform veränderte. Man stellte weiterhin fest, dass die Funkenstrecken in staubiger industrieller Umgebung mitunter bis zu 10 % unterhalb der maximalen statischen Ansprechspannung von selbst zündeten. Damit war eine sichere Erzeugung und Registrierung einer Stossspannung mit vorgegebener Amplitude nicht gewährleistet.

Als erste Massnahme zur Verbesserung dieser Situation ging man dazu über, die Funkenstrecken zu kapseln und damit den Streubereich des selbsttätigen Ansprechens zu verringern.

Beim Bemühen, die elektrischen Vorgänge, die die selbsttätige Reihenschaltung bewirken, zu verstehen, um daraus Verbesserungen abzuleiten, stellte man zunächst fest, dass darüber keine Informationen vorlagen. Mit anderen Worten, man hatte von 1923 bis etwa 1960 Generatoren mit der von Marx angegebenen Schaltung in beträchtlicher Anzahl gebaut und betrieben, ohne zu wissen und zu verstehen, warum und wie die folgenden Funkenstrecken zünden, nachdem man die erste zum Durchschlag gebracht hatte.

Die Beschäftigung mit diesen Vorgängen zeigte dann, dass den sogenannten Entladewiderständen, die den Rücken der Stossspannung in der von Edwards und Scoles angegebenen Schaltungsvariante bestimmen, eine entscheidende Bedeutung zukommt [3], [4]. Bild 6 zeigt als Beispiel die Ueberspannungen bei verschiedenen grossen Entladewiderständen in einem Generator mit einer Stufenenergie von 10 kWs bei einer Ladespannung von 200 kV.

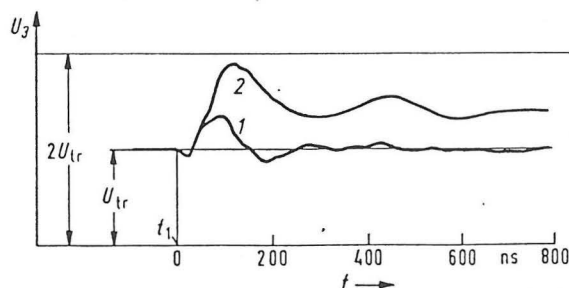


Bild 6:

Die Spannungen  $U_3$  an der zweiten Schaltfunkenstrecke 3 eines 20stufigen Generators nach Bild 1. Funkenstrecke 2 zündet zum Zeitpunkt  $t_1$ ; Funkenstrecke 3 spricht nicht an;  $U_{tr}$  Ladespannung zur Zeit der Auslösung.

1 mit  $R_e = 66 \Omega$ , 2 mit  $R_e = 8 \text{ k}\Omega$ .

Man erkennt, dass die Ueberspannung, die zur Zündung führt, bei hohem Ohm-  
wert des Entladewiderstands höher ist. In Bild 7 ist der Verlauf der Spannung  
an einer zweiten Funkenstrecke unter der Einwirkung der Ueberspannung  
dargestellt.

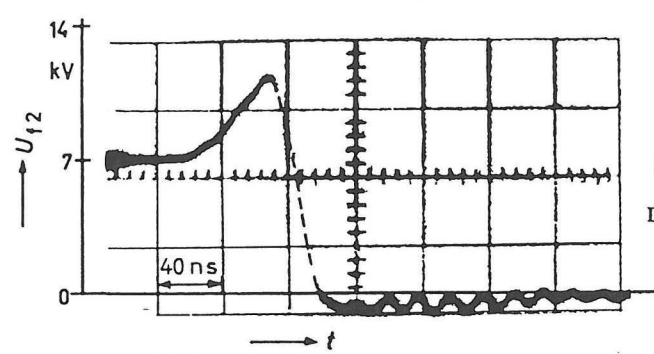


Bild 7:

Die Spannung  $u_{12}$  an der zweiten Schaltfunkenstrecke nach Zündung der  
ersten Schaltfunkenstrecke bei einer Ladespannung von 7 kV  
Die zweite Schaltfunkenstrecke zündet in der Nähe des Scheitels der  
Überspannung

Als Folge dieser Erkenntnis ist dann die in Bild 8 dargestellte Schaltung  
entstanden [ 5 ]. In ihr findet zunächst über hochohmige Entladewiderstände  
mit entsprechend hohen Ueberspannungen eine Zündung der Funkenstrecken statt,  
die die Reihenschaltung der Stufenkondensatoren vornehmen. Danach werden  
mit den jetzt vorhandenen Spannungen an den Entladewiderständen niederohmige  
Entladewiderstände über Funkenstrecken zu den hochohmigen Widerständen  
parallel geschaltet.

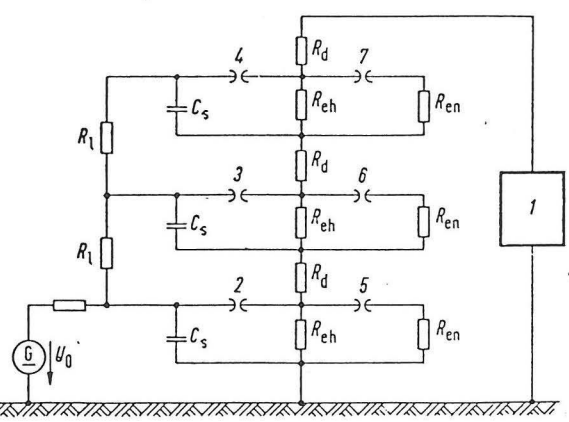


Bild 8:

Marxsche Vervielfachungsschaltung mit Hilfsfunkenstrecken.

$R_{en}$  niederohmiger Entladewiderstand  
 $R_{eh}$  hochohmiger Entladewiderstand  
5 bis 7 Hilfsfunkenstrecken

Eine andere Lösung des Problems wurde in dieser Zeit von M. J. Bishop [6] entwickelt. Sie stützt sich für den Vorgang der Reihenschaltung nicht auf die inneren Uberspannungen, sondern benutzt für jede Stufe einen Schalter in Form einer Mehrfachfunkenstrecke, die von einem Impulsgenerator gezündet wird (Bild 9).

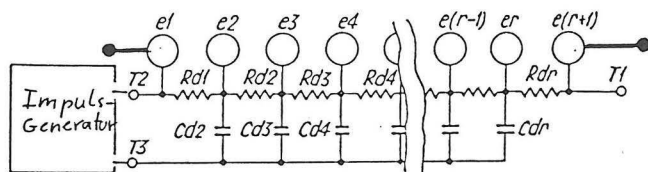


Bild 9:

Mehrfach-Schaltfunkenstrecke  
aus der Patentschrift  
von M. J. Bishop

Obwohl dieses Prinzip auf den ersten Blick genial erscheint, hat es sich gegenüber der Lösung mit einer Zusatzfunkenstrecke pro Stufe gemäss Bild 8 nicht durchgesetzt. Es gab dafür vor allem zwei Gründe: zum einen hat sich der Abbrand an den Mehrfachfunkenstrecken und die daraus resultierende Verschmutzung als ernsthaftes Problem erwiesen. Zum anderen bringt die Vielzahl von Funkenstrecken ein Ausmass von Nichtlinearität in die Schaltung, die meistens für die Zwecke der Transformatorenprüfung nicht tolerierbar ist.

## 2. Schaltspannungen mit der Marx'schen Schaltung

Zu Beginn der 70er Jahre ergab sich dann der Bedarf, hohe Schaltspannungen zu erzeugen. Gegenüber der für kurze Zeit erwogenen Lösung, Prüftransformatoren mit Kondensator-Entladungen auf der Primärseite als Generator zu benutzen, hat sich dann erwiesen, dass die Marx'sche Schaltung auch für diese Anwendung gut geeignet ist.

Es war naheliegend, die hochohmigen Entladewiderstände in der Schaltung nach Bild 8 so zu dimensionieren, dass durch sie der erforderliche Rücken der Schaltspannung geformt wurde. Die Hilfsfunkenstrecken mussten zur Erzeugung der Schaltspannung lediglich so weit geöffnet werden, dass sie nicht ansprachen.

Mit Kapselung des gesamten Generators und entsprechenden Abschirmungen sind dann einige Generatoren nach dem Marx'schen Prinzip für Freiluftprüffelder gebaut worden. Die höchsten erzeugten Spannungen lagen dabei über 3 MV (Bild 10).

### 3. Massnahmen zur Reduktion der Prüfkosten

In diesem Zusammenhang sind vor allem zwei Entwicklungen zu erwähnen:

1. Die Ausrüstung von Generatoren mit Bedienungsplattformen mit dem Ziel, schnelle Wechsel von Widerständen zu ermöglichen (Bild 11).
2. Die Benutzung von Luftkissen unter den Bodenplatten von Generatoren. Damit konnten Generatoren ohne grossen Aufwand optimal im Prüfaufbau positioniert und auch beiseite geräumt werden.

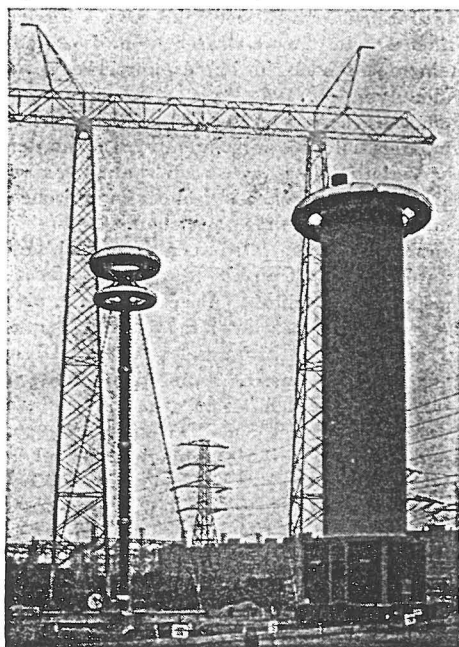


Bild 10:  
Gekapselter Stossgenerator  
für Freiluftbetrieb

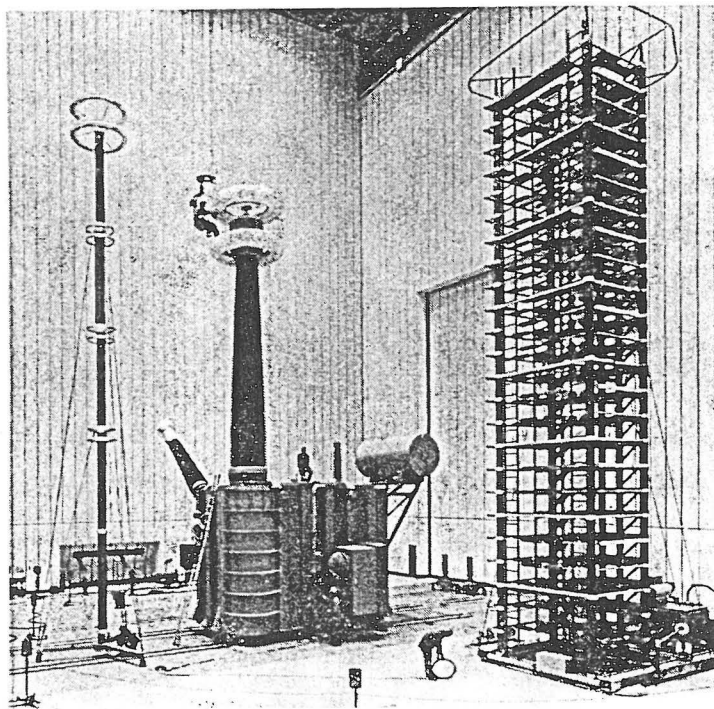


Bild 11:  
Innenraumgenerator mit  
Bedienungsplattformen