Gedanken zur Stoßspannungserzeugung und Prüftechnik für die Entwicklung von UHV-Systemen

Autor(en): **Feser, K.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 15

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915579

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Gedanken zur Stoßspannungserzeugung und Prüftechnik für die Entwicklung von UHV-Systemen

Von *K. Feser*

621.3.015.33:621.315

Die Prüfung von elektrischen Betriebsmitteln für zukünftige UHV-Übertragungssysteme erfordert Stoßspannungsanlagen von einigen Millionen Volt. In dem Beitrag werden einige Gesichtspunkte für die Auswahl einer geeigneten Prüfspannung diskutiert. Die Hauptanforderungen an ein Stosserzeugungssystem werden erwähnt und anhand eines Beispieles, eines 4,8-MV-Stoßspannungsgenerators mit einer Energie von 480 kWs im vollgeladenen Zustand, wird eine mögliche Konzeption mit ihren hauptsächlichsten Eigenschaften diskutiert. Es zeigt sich, dass die heute genormten Prüfspannungen innerhalb der bestehenden Toleranzen auch im UHV-Bereich erzeugt werden können.

L'essai de l'appareillage électrique pour des futures lignes de transmission à très hautes tensions exige des équipements de choc de quelques millions de volts. Cet article traite quelques aspects sur la détermination du choc d'une tension d'essai convenable. La caractéristique principale requise pour la production de tensions de choc est mentionnée à l'aide d'un exemple d'un générateur de choc à 4,8 MV avec une énergie de 480 kJ à la charge maximum, on discutera d'une conception possible avec les principales caractéristiques. On voit que les tensions d'essai normalisées actuellement, à l'intérieur des tolérances existantes, peuvent aussi être produites à très hautes tensions.

1. Allgemeines

Die Entwicklung der Energieübertragung wird von der seit den dreissiger Jahren zu beobachtenden Verdoppelung des Bedarfs an elektrischer Energie innerhalb von 10 Jahren in allen Industrieländern der Welt geprägt. Alle möglichen Verbindungsglieder zwischen dem Erzeugungsort der elektrischen Energie und dem Verbraucherschwerpunkt können den erforderlichen Leistungstransport wirtschaftlich nur über eine Erhöhung der Übertragungsspannung ermöglichen.

Die Zunahme der Übertragungsspannung in den letzten 30 Jahren (Fig. 1) zeigt deutlich, dass in den nächsten 10 bis 15 Jahren mit einer Übertragungsspannung zwischen 1000 und 1500 kV zu rechnen sein wird. Um dieser Entwicklung gerecht zu werden, müssen Prüfanlagen zur Verfügung stehen, mit denen die Prüfung von elektrischen Betriebsmitteln bis zur Reihenspannung von etwa 1500 kV möglich sein wird.

Im folgenden wird anhand eines Beispiels über einige Gesichtspunkte berichtet, die bei der Erzeugung von unipolaren Impulsen von einigen Millionen Volt zu beachten sind.

2. Gedanken zur Prüftechnik

Sinn jeglicher Prüfung ist der Nachweis der elektrischen Festigkeit des zu prüfenden Objektes bis zu einem bestimmten Pegelwert gegenüber allen im Betrieb auftretenden Spannungsbeanspruchungen. In den internationalen Empfehlungen [1][1]) ist eine unipolare Spannungsbeanspruchung, mit der der Nachweis der elektrischen Festigkeit eines elektrischen Betriebsmittels zu führen ist, genormt. Neben dieser Blitzstossspannung 1,2|50, zur Nachbildung von durch Blitzeinschlägen verursachten Überspannungen wird in Zukunft noch die Schaltstoßspannung 250|2500 treten, die die Nachbildung von durch Schalthandlungen entstehenden Überspannungen simulieren soll. Es ist dabei sicherlich von Vorteil, falls beide Prüfspannungen mit der gleichen Prüfanlage durch möglichst einfache Umschaltung erzeugt werden können.

Inwieweit diese bisher genormten Prüfspannungen für die Prüfung von 1500-kV-Material bestehen bleiben, ist völlig ungewiss, da in diesem Spannungsbereich neue physikalische Erscheinungen auftreten, die selbstverständlich in die Prüfung miteingeschlossen werden müssen.

Mit den steigenden Übertragungsspannungen und den abnehmenden Faktoren für die Überspannungen, mit denen elektrische Geräte zu prüfen sind, wird der Einfluss der Vorbeanspruchung durch die Betriebsspannung für bestimmte Isolieranordnungen [2; 3; 12] nicht mehr vernachlässigbar. Damit kann die im Betrieb auftretende Spannungsbeanspruchung nicht mehr durch eine reine Überspannungsbeanspruchung simuliert werden. In diesen Fällen ist zu überlegen, inwieweit eine Prüfung mit der Nennspannung, der eine unipolare Überspannung überlagert wird, zu einer Aussage für den erfolgreichen Ablauf einer Prüfung führt, die den tatsächlichen Beanspruchungen mehr entspricht. Von der Luftisolation ist ausserdem bekannt [4; 16], dass das Minimum der Durchschlagspannung mit steigenden Abständen sich zu längeren Stirnzeiten verschiebt. Ein Anstieg einer positiven Keilwelle mit etwa 2,08 kV/µs scheint im Falle einer Anordnung mit inhomogener Feldverteilung für die Durchschlagfestigkeit der Luftisolation besonders kritisch. Um bei einer Prüfung die schärfste Beanspruchung zu simulieren, sollte demnach die Prüfung nicht mit einer konstanten Spannungsform (z. B. 250|2500 µs) erfolgen, sondern mit einer Keilwelle mit einem Spannungsanstieg von 2,08 kV/µs. Diese Keilwelle müsste bei Erreichen der Prüfspannung mittels einer geeigneten Abschneideeinrichtung vom Prüfling abgetrennt werden, wodurch zugleich in einem Prüfvorgang die Prüfung mit einem abgeschnittenen Spannungsimpuls und die Prüfung mit dem kritischen Spannungsanstieg erfasst werden könnte.

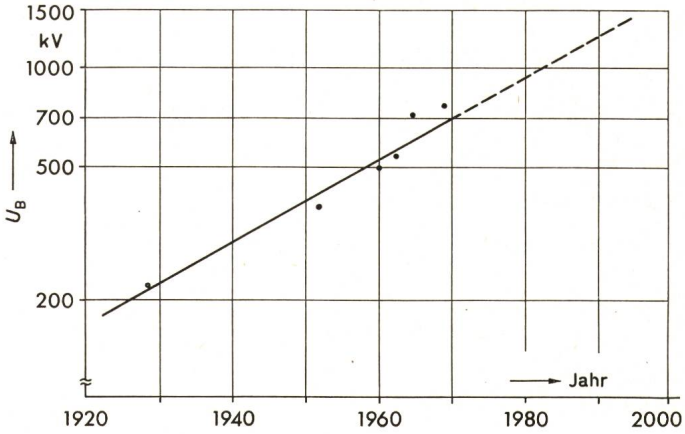


Fig. 1
Entwicklung der Übertragungsspannungen U_B

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die Einführung einer neuen Prüfspannung und eines neuen Prüfvorgangs sollte aber nicht nur auf Grund von physikalischen Untersuchungen über die kritischste Beanspruchungsart erfolgen. Für diese Entscheidung muss unbedingt das zweite Kriterium für die Auswahl eines Prüfvorgangs, nämlich die Aussage, welche Überspannungen können im Betrieb überhaupt und insbesondere mit welcher Häufigkeit auftreten, herangezogen werden. Mit dieser Untersuchung kann dann eine wirtschaftlich vertretbare Prüfspannung, sowohl in der Spannungshöhe wie in der Spannungsform, die mit einer bestimmten statistischen Sicherheit vom Prüfling gehalten werden muss, für den Prüfvorgang ausgewählt werden. Zu berücksichtigen ist dabei sicherlich auch die Einfachheit des Prüfvorganges, so dass es eventuell wirtschaftlich sinnvoll erscheint, eine höhere Prüfspannung mit einer anderen Spannungsform der kritischsten Beanspruchungsart vorzuziehen. In diesem Fall muss aber die physikalische Sicherheit bestehen, dass der Prüfvorgang mit der ausgewählten Prüfspannung für den gewählten Prüfling zu vergleichbaren Ergebnissen führt.

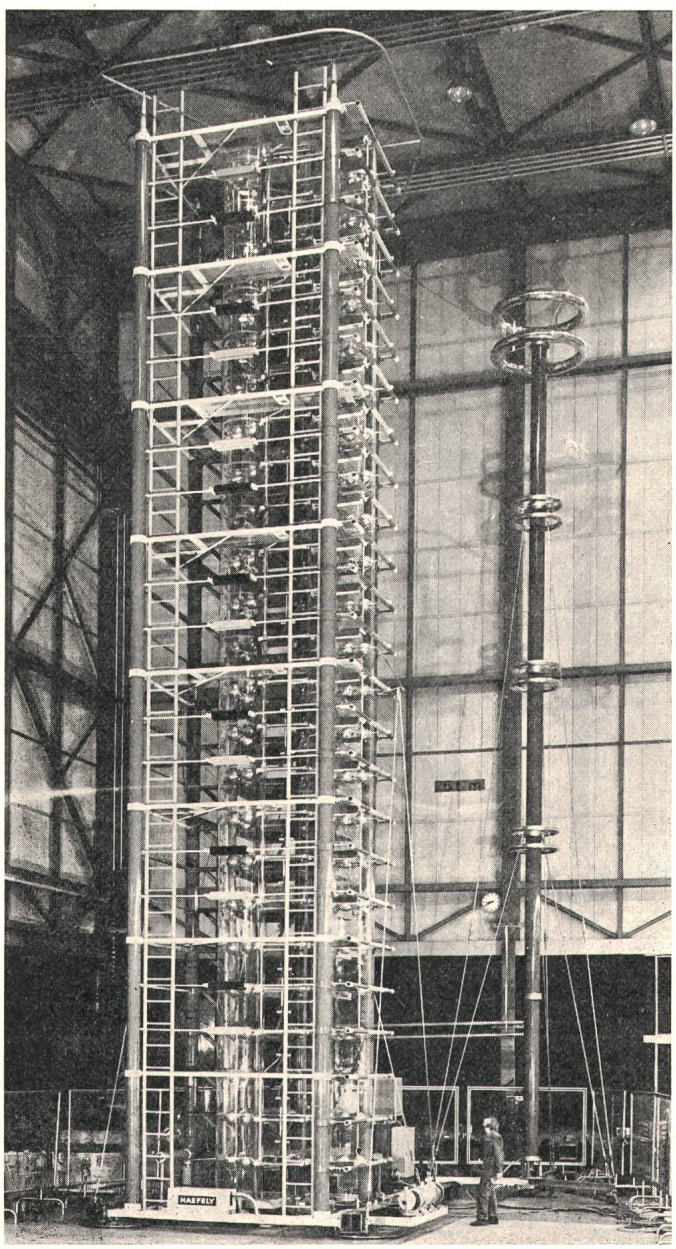


Fig. 2
24-stufiger Stossgenerator für 4,8 MV, 480 kJ

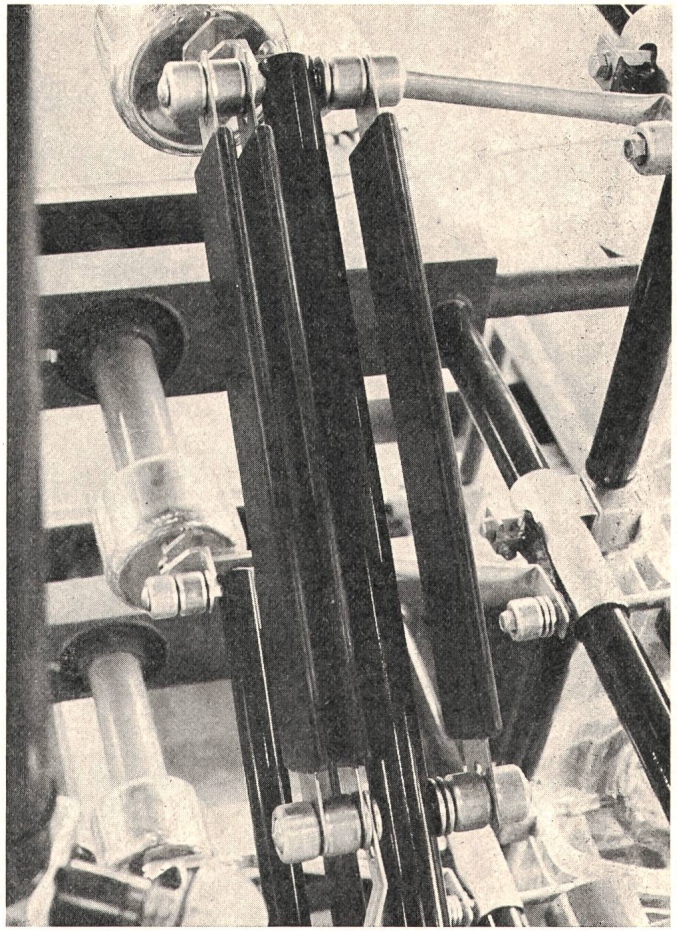


Fig. 3
Anordnung der Seriewiderstände im Stossgenerator

3. Anforderungen an einen Stossgenerator für einige Millionen Volt

Die Erzeugung hoher unipolarer Impulse erfolgt heutzutage fast ausschliesslich in der Marxschen Vervielfachungsschaltung [5]. Sowohl die Erzeugung von hohen Impulsspannungen mit Transformatoren [6] wie auch mit explodierenden Drähten [7] sind nur in Spezialfällen anwendbar. Insbesondere ist in beiden Schaltungen die Veränderung der Impulsform von z. B. 1,2 bis 1000 µs am Prüfling nur in beschränktem Masse durchführbar.

Ein Stossgenerator für einige Millionen Volt sollte, um sowohl dem Prüfbetrieb als auch den anfallenden Entwicklungsaufgaben gerecht werden zu können, u. a. folgende Grundanforderungen erfüllen:

a) Eine zur Ladespannung proportionale Ausgangsspannung, um insbesondere bei der Prüfung von Transformatoren den 50-%- und 100-%-Stoss leicht einstellen zu können.

b) Eine von der Ladespannung unabhängige Form der Ausgangsspannung, um denselben Spannungsverlauf bei veränderlicher Ladespannung zu erhalten.

c) Einen möglichst grossen Ausnutzungsgrad.

d) Eine einwandfrei reproduzierbare Zündung der Schaltfunkenstrecken mit möglichst geringer Streuung der Ausgangsspannung.

e) Einen möglichst gedrängten Aufbau des gesamten Stosskreises, um die Induktivität möglichst klein halten zu können.

f) Die Möglichkeit der Parallel-/Serieschaltung von Stufen, um die Stosskapazität den Belastungsverhältnissen anpassen zu können.

g) Die Möglichkeit der einfachen Veränderung der Impulsform bei verschiedenen Belastungen, wobei insbesondere alle international genormten unipolaren Prüfspannungen erzeugt werden müssen.

k) Möglichst einfache und robuste Konstruktion, um Fehlschaltungen und Fehlspannungen an dem teuren Prüfobjekt zu vermeiden.

j) Lange Lebensdauer aller Elemente ohne Wartung.
k) Leichte Verfahrbarkeit der gesamten Anlage.
l) Entsprechender Bedienungskomfort, sowohl für die Bedienung der Anlage, wie auch für die Umschaltung auf verschiedene Schaltungen.
m) Die Möglichkeit der späteren Erweiterung der Stossanlage sowohl in der Spannungshöhe als auch in der Stufenenergie.
n) Einwandfreies Funktionieren der Stossanlage auch in staubiger Atmosphäre.
o) Möglichst geringe Lärmentwicklung.

Um allen Anforderungen gerecht werden zu können, ist sicherlich in manchen Punkten ein optimaler Kompromiss zu suchen. Im folgenden wird an einem ausgeführten Beispiel eines 4,8-MV-Stossgenerators mit einer Energie von 480 kJ im vollgeladenen Zustand eine mögliche Konzeption diskutiert.

4. Konzeption eines Stossgenerators für einige Millionen Volt

4.1 *Wahl der Spannungshöhe und Wahl der Energie*

Sowohl die Wahl der Spannungshöhe als auch die Wahl der Energie hängt vom Einsatz des Generators ab. Für die Höhe der Summenladespannung ist in erster Linie die maximale Betriebsspannung der zu prüfenden Objekte massgebend. In Tabelle I ist die für die jeweilige Betriebsspannung geschätzte Prüfspannung angegeben [8].

Aus der Prüfspannung wurde unter Annahme eines Wirkungsgrades von etwa 85 % und eines Sicherheitszuschlages von 10 % für die Prüfung von Prototypen die Summenladespannung errechnet. Man erkennt, dass für die Prüfung von 1500-kV-Material Stossgeneratoren mit einer Summenladespannung von etwa 4,6 MV notwendig werden. Sollen noch Entwicklungsaufgaben in diesem Spannungsbereich gelöst werden, so müsste die Spannung um etwa 25 % höher angesetzt werden [9], so dass sich dann Summenladespannungen von etwa 6 MV ergeben.

Die Wahl der Energie, d. h. der Stosskapazität, hängt von der Art der Prüflinge ab. Rechnet man mit einer maximalen Prüflingskapazität von etwa 10 nF, die bei Transformatoren und Kabeln durchaus realisiert werden, so sollte die Stosskapazität mindestens 5mal grösser als die Belastungskapazität sein, um einen guten Ausnutzungsgrad zu erhalten. Damit errechnet sich eine Stosskapazität von 50 nF, was bei einer Summenladespannung von z. B. 4 MV einer Energie von 400 kJ entsprechen würde. Dieser grosse Energieinhalt ist bei induktiven Belastungen (Transformatoren, Drosselspulen) auch notwendig, um die genormte Rückenzeit von 50 ± 10 µs erzeugen zu können. Ebenso wird dieser grosse Energieinhalt für die Untersuchungen an Luftfunkenstrecken benötigt, da die Vorentladungen an Funkenstrecken von einigen Metern einen Ladungsbedarf von einigen 100 µC/m [3] erreichen können. Diese Ladung muss dem verwachsenden Kanal zur Verfügung gestellt werden, da sich sonst die Prüfspannung ändert. Zu beachten ist dabei, dass bei der Erzeugung einer Blitzstossspannung 1,2 | 50 der Innenwiderstand der Stoßspannungsquelle in der Grössenordnung des Wellenwiderstandes der Freileitungen liegt, so dass nicht unbedingt eine eigene Belastungskapazität für die Ladungsnachlieferung notwendig wird. Bei den Schaltstoßspannungen ist aber infolge des hohen Seriewiderstandes die Impedanz des Stossgenerators wesentlich grösser, so dass dann eine zusätzliche Belastungskapazität von etwa 2 nF bei hohen Spannungen für die sofortige Ladungsnachlieferung bei der Ausbildung von Vorentladungen notwendig wird. Es ist von grossem praktischem Vorteil, wenn in diese Belastungskapazität ein Dämpfungswiderstand eingebaut wird, der die Schwingungen im Prüfkreis dämpfen kann [11].

Prüfspannungen

Tabelle I

Maximale Betriebsspannung kV (Effektivwert)	525	765	1100	1500
Blitzstoßspannung 1,2 | 50 µs	1800	2300	2800	3500
Schaltstoßspannung 250 | 2500 µs	1100	1350	1800	2200
Summenladespannung der Stossanlage	2400	3000	3600	4600

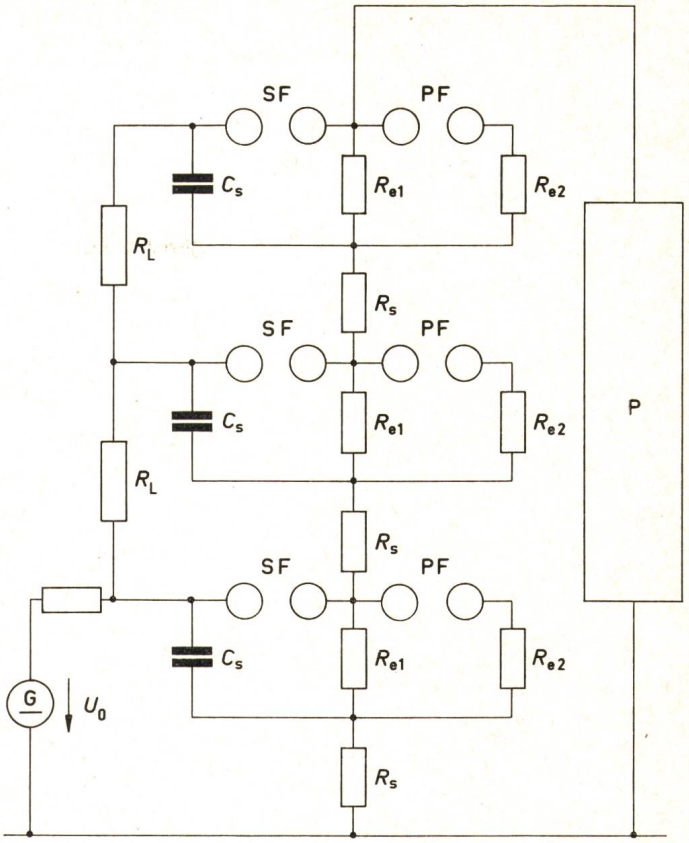


Fig. 4
Elektrisches Schaltblid eines 3stufigen Generators

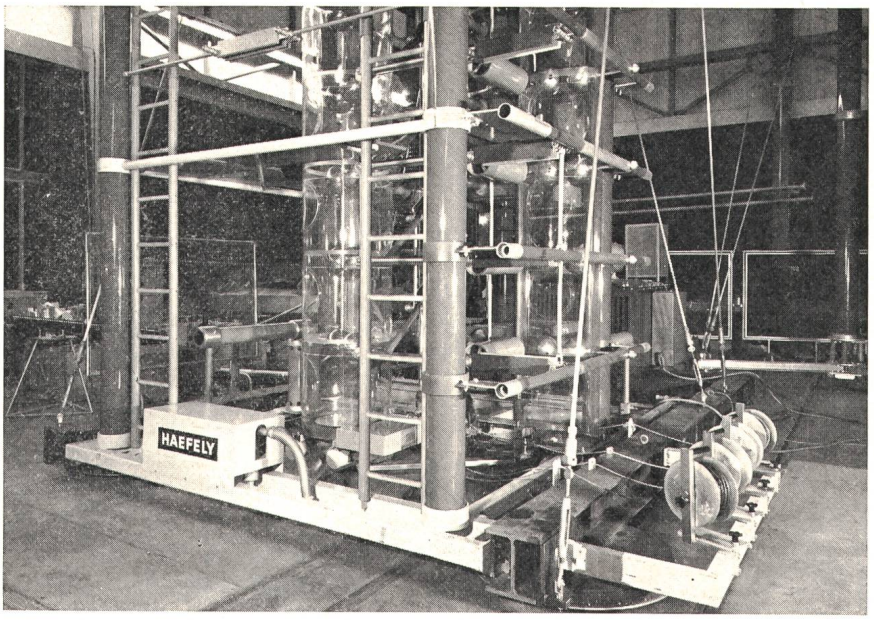
R_L Ladewiderstand
R_s Seriedämpfungswiderstand
R_{e1} hochohmiger Entladewiderstand (für eine Rückenzeit von 2500 µs)
R_{e2} niederohmiger Entladewiderstand (für eine Rückenzeit von 50 µs)
SF Schaltfunkenstrecke
PF Parallelfunkenstrecke
P Prüfobjekt

4.2 *Konstruktive Merkmale eines Generators für einige Millionen Volt, am Beispiel eines Generators für 4,8 MV, 480 kJ*

Um allen Entwicklungs- und Prüfaufgaben gerecht werden zu können, müssen die Stossgeneratoren für einige Millionen Volt eine hohe Flexibilität und einen hohen Bedienungskomfort aufweisen. Im folgenden sei ein 24-stufiger Stossgenerator für 4,8 Mill. Volt und mit einer Energie von 480 kJ im vollgeladenen Zustand, der in der bekannten Marxschen Vervielfachungsschaltung aufgebaut ist, beschrieben (Fig. 2).

Um beliebige Stufen parallel und in Serie schalten zu können und um durch das Baukastenprinzip eine wirtschaftliche Fertigung zu erreichen, sind alle Stufen übereinander angeordnet (Fig. 2). Damit konnte zusätzlich eine übersichtliche

Fig. 5
Erdungseinrichtung des 4,8-MV-Stossgenerators



Schaltungsanordnung erreicht werden, die eine rasche Kontrolle der Schaltung ermöglicht und damit Fehlschaltungen praktisch ausschliesst. Dem eigentlichen Generator ist ein sog. Vorbau mit Bedienungsplattformen in jeder 3. Stufe angehängt, von denen aus alle Umschaltarbeiten, z. B. für die Änderung der Seriewiderstände oder für eine Schaltungsänderung (z. B. Parallelschaltung) ausgeführt werden. Alle in der jeweiligen Schaltung nicht benötigten Elemente (Widerstände und Kurzschlussverbindungen) werden auf den Bedienungsplattformen in eigenen Halterungen gelagert und ermöglichen so eine schnelle Umschaltung.

Alle Widerstände für die Einstellung von bestimmten Impulsformen sind im Generator auf die einzelnen Stufen verteilt untergebracht, wobei maximal 12 Seriewiderstandselemente pro Stufe im Generator gelagert werden können. Bei einer Schaltung lassen sich maximal 4 Steckelemente pro Stufe als Seriewiderstand einbauen. Alle Widerstände sind induktivitätsarm gewickelte eingegossene Drahtwiderstände. Fig. 3 zeigt die Anordnung der Seriewiderstände, die als steckbare Flachwiderstände ausgeführt sind.

Die elektrische Schaltung des vielstufigen Marxschen Stossgenerators am Beispiel eines dreistufigen Generators zeigt Fig. 4. Die zusätzliche Parallelfunkenstrecke pro Stufe ist notwendig, um bei Blitzstoßspannungen einen ausreichend grossen Triggerbereich zu erhalten [10]. Der Ladewiderstand R_L und der fest eingebaute Parallelwiderstand R_{e1} bestimmen den Rücken der Schaltstoßspannung, während der Widerstand R_{e2} für den Rücken der Blitzstoßspannung dimensioniert ist. Die Umschaltung von einer Rückenzeit von 50 µs auf eine Rückenzeit von 2500 µs erfolgt durch das Auseinanderfahren der Parallelfunkenstrecke PF [10]. Die Auslösung des Stossgenerators erfolgt durch die sog. Quertriggerung der ersten Stufe mit einem kapazitiv übertragenen Impuls von etwa 12 kV auf die hochspannungsseitige Kugel. Die übrigen Schaltfunkenstrecken zünden durch die natürlichen Überspannungen, die vom Durchzünden der vorhergehenden Stufen entstehen [13; 14]. Die Schalt- und die Parallelfunkenstrecken sind je in einem Plexiglaskamin eingebaut. Dies hat einmal den Vorteil, dass der Lärm vom Durchzünden des Generators sehr gering ist und zweitens im Falle der Schaltfunkenstrecke den weiteren Vorteil,

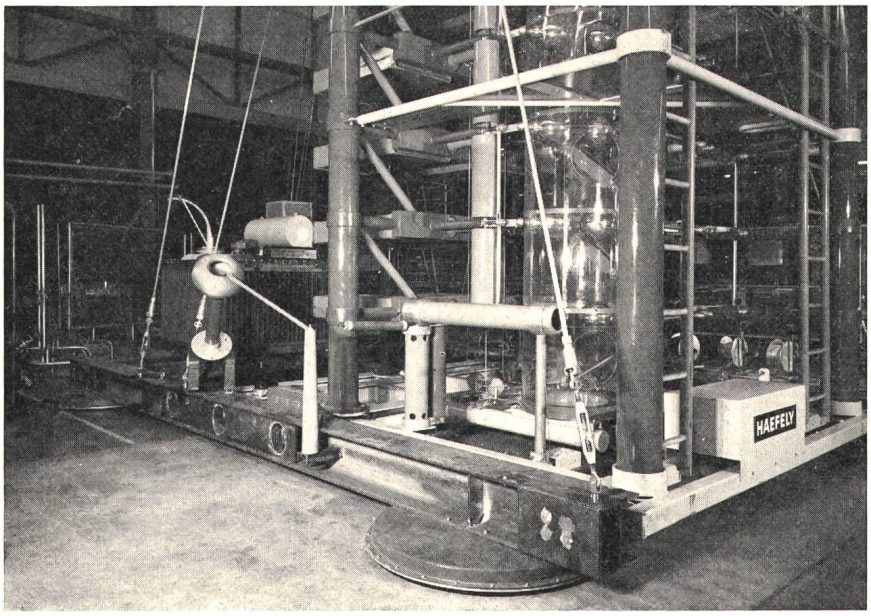


Fig. 6
Luftkissenfahrgestell des 4,8-MV-Stossgenerators

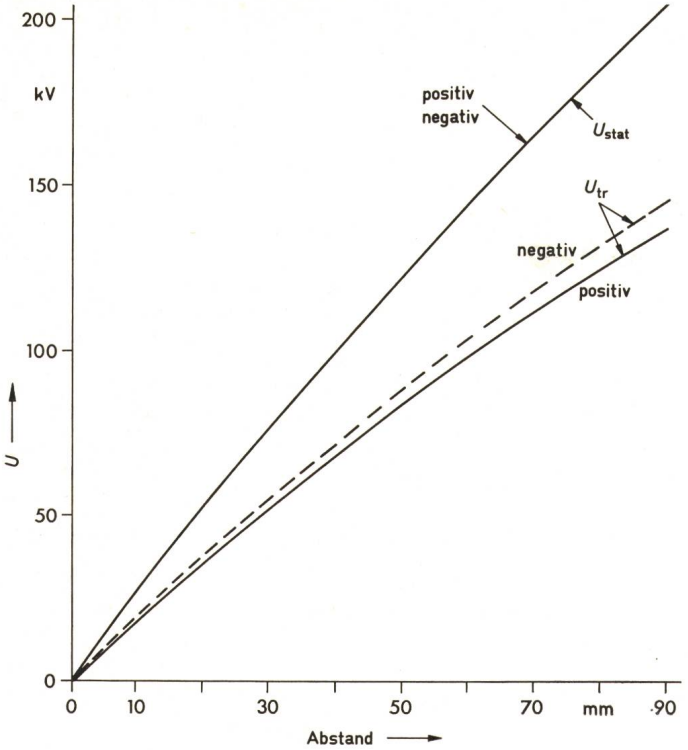


Fig. 7
Triggerbereich des 4,8-MV-Stossgenerators mit Parallelfunkenstrecke bei beiden Polaritäten der Blitzstoßspannung 1,2 | 50

U Stufenspannung
U_{stat} statische Ansprechspannung
U_{tr} untere Grenze der triggerbaren Auslösespannung

dass Fehlzündungen infolge Staubpartikelchen praktisch ausgeschlossen sind [15]. Der Plexiglaskamin wird mit gefilterter Luft versorgt. Während der Umschaltarbeiten am Generator können die Kondensatoren über eine eigene Erdungseinrichtung kurzgeschlossen werden (Fig. 5).

Der Bedienungskomfort dieses Generators wird durch sein Luftkissenfahrgestell unterstrichen, wodurch der 4,8-MV-Stossgenerator zusammen mit der Ladeeinrichtung für 200 kV mit einem Gesamtgewicht von etwa 26 t von 2 Personen bewegt werden kann (Fig. 6).

4.3 *Messergebnisse am Stossgenerator 4,8 MV, 480 kJ*

Alle folgenden Messergebnisse wurden mit dem 4,8-MV-Stossgenerator zusammen mit einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler [17] für 4,5 MV erhalten (Fig. 2).

In Fig. 7 ist der Triggerbereich des Stossgenerators mit Parallel-Funkenstrecke im Falle einer Erzeugung einer Blitzstossspannung 1,2 | 50 in der totalen Serieschaltung aller Stufen wiedergegeben. Man erkennt im gesamten Spannungsbereich bei beiden Polaritäten einen Triggerbereich von etwa 28 %, so dass eine automatische Einstellung der Schaltfunkenstrecke von der vorgewählten Ladespannung realisiert werden kann. In Fig. 8 ist der Triggerbereich und die Streuung der Triggerung bei einer statischen Ansprechspannung von 150 kV mit und ohne Parallelfunkenstrecke gegenübergestellt. Man erkennt, dass nur mit Parallelfunkenstrecke ein ausreichender Triggerbereich von etwa 28 % gewährleistet ist und damit eine sichere Zündung aller Funkenstrecken möglich ist. Ohne Parallelfunkenstrecke wäre der Triggerbereich bei der Erzeugung von Blitzstoßspannungen in der vorliegenden Schaltung nur 13 %. Die Oszillogramme (10 Spannungsbeanspruchungen übereinander) bei einer Auslösespannung von 140 kV, 130 kV und 120 kV zeigen ausserdem, dass eine gute Reproduzierbarkeit der Spannungsoszillogramme möglich ist. Dies deutet

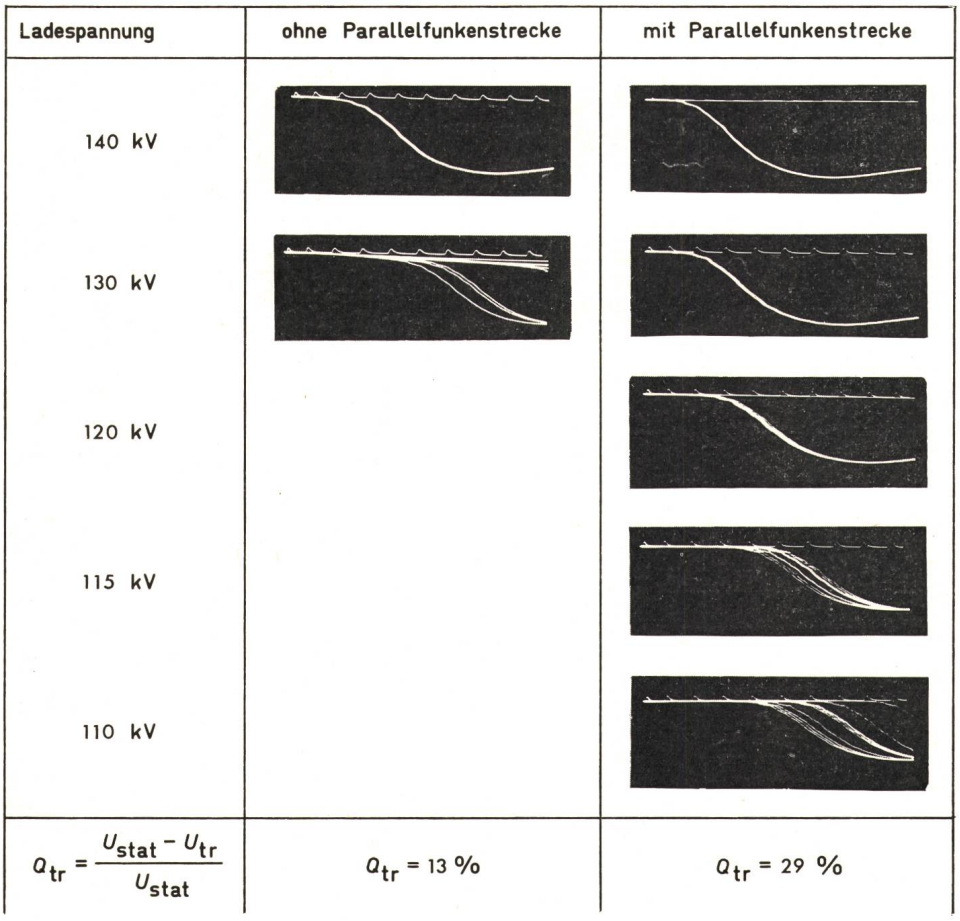


Fig. 8
Vergleich des Triggerbereiches des 4,8-MV-Stossgenerators mit und ohne Parallelfunkenstrecke

Die statische Ansprechspannung
U_{stat} = 150 kV
Negative Blitzstoßspannung
Zeitablenkung: 0,25 µs/E
R_{e1} = 6 k Ω, R_{e2} = 80,2 Ω,
R_s = 14,6 Ω, C_s = 1 µF
Q_{tr} Triggerbereich
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 7

darauf hin, dass das ausgewählte Triggersystem in einem Triggerbereich von 20 % praktisch ohne Streuung arbeitet. Erst nahe der unteren Triggergrenze streuen die Durchzündzeiten, vor allem der ersten und zweiten Funkenstrecke, was mit der gewählten Quertriggerung verständlich ist. Auch in der Parallelschaltung (z. B. 12 Stufen parallel, 2 in Serie) konnte etwa der gleiche Triggerbereich erzielt werden.

In Fig. 9a ist das Oszillogramm einer genormten Blitzstoßspannung 1,2|50 an einer totalen Last von etwa 1000 pF gezeigt. Der schwingungsfreie Anstieg ist durch den optimalen Prüfaufbau (gedämpft kapazitiver Spannungsteiler mit $R \approx 200\ \Omega$) erreicht worden. Fig. 9b zeigt die kürzest erreichbare Anstiegszeit von 0,55 µs an einer Last von 1000 pF mit den vorhandenen Widerständen ($R_{s/Stufe} = 6{,}5\ \Omega$). Das Überschwingen von etwa 28 % (Definition siehe [1]) ist zwar ausserhalb den zulässigen Werten, das Oszillogramm zeigt aber trotzdem, dass selbst bei Stossgeneratoren von einigen Millionen Volt eine so geringe totale Kreisinduktivität erreicht wird, dass die genormten Blitzstoßspannungen innerhalb der Toleranzen erzeugt werden können. In Fig. 9c ist eine Schaltstoßspannung 130|2400 µs wiedergegeben. Dieser Generator ist in den Widerstandswerten so dimensioniert, dass nur mit einem Prüfling von mindestens 2 nF eine normgerechte Schaltstoßspannung erzielt werden kann.

Der Bedienungskomfort wird durch die Zeit unterstrichen, die benötigt wird, um diesen 24stufigen Generator von Blitzstoßspannungen auf Schaltstoßspannungen umzuschalten. Von der letzten Blitzstoßspannung bis zur ersten Schaltstoßspannung an einem Prüfobjekt benötigen 2 Mann für die Umschaltung der Impulsform nur 7 min einschliesslich der Erdung und Enterdung des gesamten Generators mit der Erdungseinrichtung (Fig. 5). Diese Zeit ist vor allem für die Prüftechnik interessant, falls Blitzstoßspannungen und Schaltstoßspannungen am gleichen Prüfobjekt nacheinander realisiert werden sollen.

Der Generator ist in der Stufenhöhe so dimensioniert, dass die innere Festigkeit des Generators auch bei Schaltstoßspannungen bis zur vollen Ladespannung (200 kV) gewährleistet ist. Um die dann erreichbare Schaltstoßspannung ohne Vorentladungen an der Kopfabschirmung des Stossgenerators zum Prüfling führen zu können, müsste der Generator eine entsprechend der Schaltstoßspannungsamplitude dimensionierte Kopfelektrode erhalten [4].

Für den vielseitigen Einsatz eines Generators sind die Spannungsoszillogramme in der Parallelschaltung ebenfalls bedeutungsvoll. Für eine Schaltung 12 Stufen parallel, 2 Stufen in Serie, zeigt Fig. 9d ein Oszillogramm einer normgerechten Blitzstoßspannung ebenfalls an einer Last von 1000 pF.

Besonders wichtig und aufschlussreich ist die Kontrolle der Linearität der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Ladespannung. Diese Messung gibt Aufschluss über die Linearität und Reproduzierbarkeit der verwendeten Schaltungselemente in Abhängigkeit von der Spannung und ist vor allem für die Prüfung von Transformatoren wichtig. Diese Linearitätskontrolle, die wegen dem begrenzten Raum während dieser

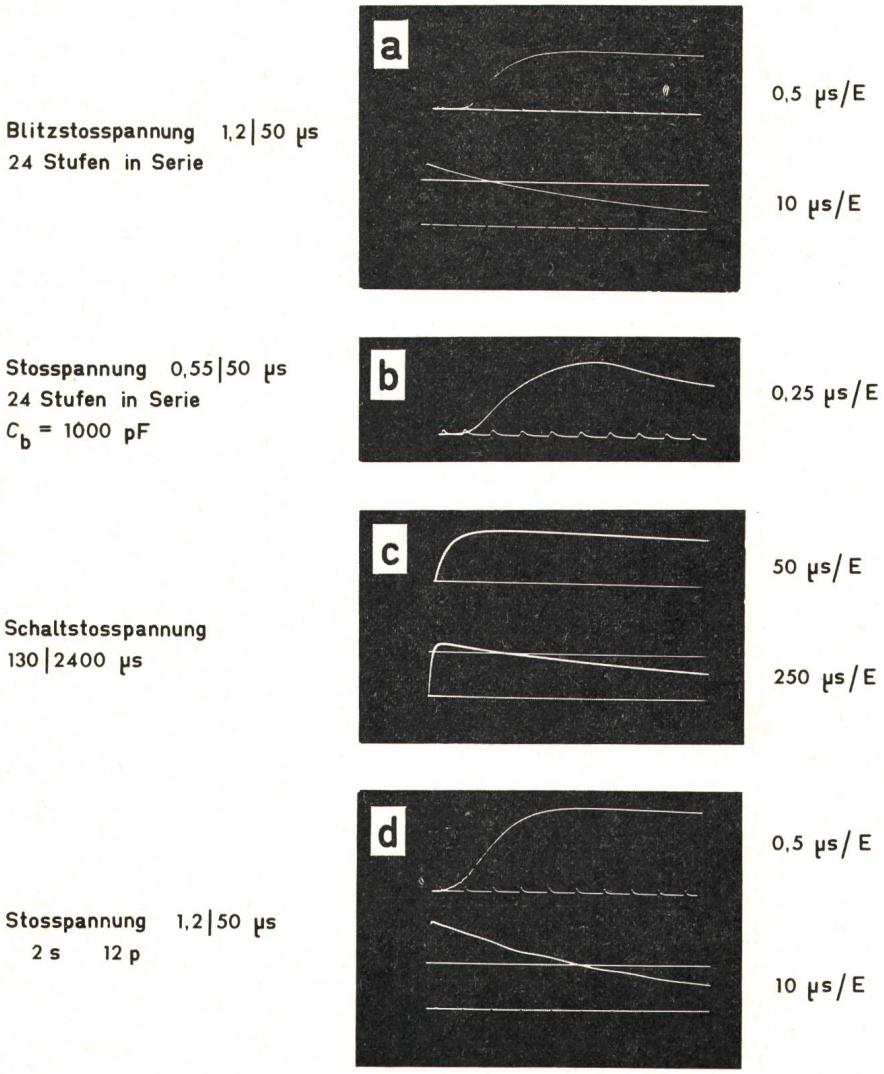


Fig. 9
Impulsformen des 24-stufigen 4,8-MV-Stossgenerators in verschiedenen Schaltungen

a Blitzstoßspannung 1,2|50 µs, 24 Stufen in Serie $C_b = 1$ nF

b Stoßspannung 0,55|50 µs, 24 Stufen in Serie $C_b = 1$ nF

c Schaltstoßspannung 130|2400 µs, 24 Stufen in Serie $C_b = 2$ nF

d Blitzstoßspannung 1,2|50 µs, 2 Stufen in Serie, 12 Stufen parallel, $C_b = 1$ nF

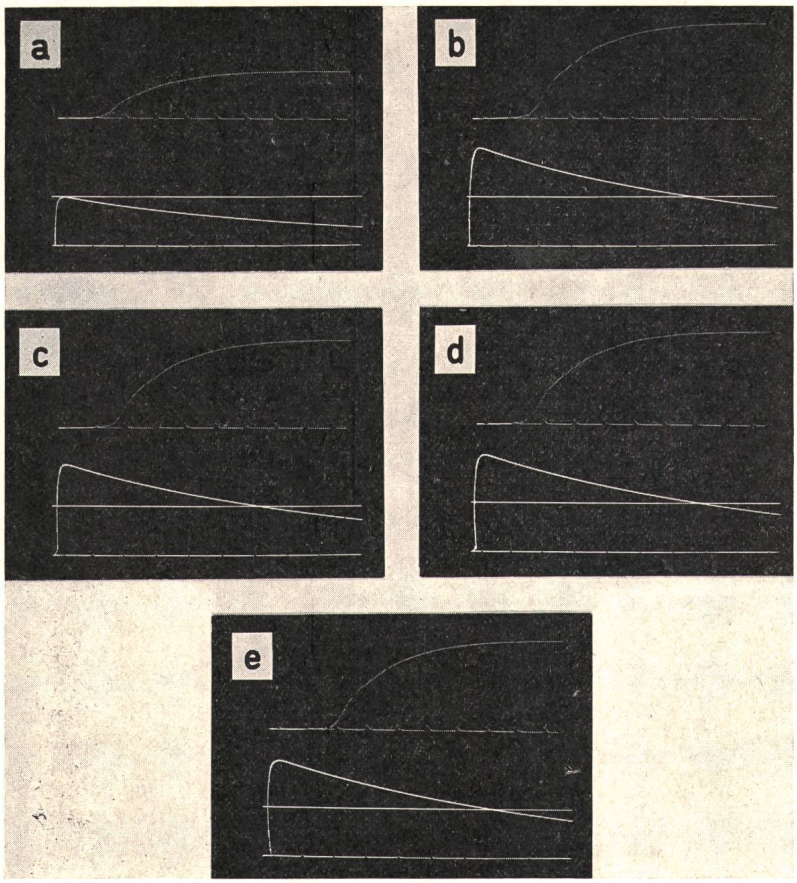


Fig. 10
Vergleichsoszillogramme bei verschiedenen Auslösespannungen

Schaltung: 8 Stufen in Serie, 3 Stufen parallel
Belastung: 2 nF
Ablenkung: 0,5 µs/E, 10 µs/E

a U_L = 40 kV, Abs. ×1
b U_L = 80 kV, Abs. ×1
c U_L = 120 kV, Abs. ×1,6
d U_L = 160 kV, Abs. ×2
e U_L = 200 kV, Abs. ×2,5

Versuche in einer Parallelschaltung (3 Stufen parallel, 8 Stufen in Serie) durchgeführt wurde, hat ergeben, dass der gemessene Scheitelwert der Stoßspannung im Vergleich zur eingegebenen Primärspannung innerhalb der Messgenauigkeit (± 1%) im gesamten Spannungsbereich von 20 kV bis 200 kV absolut linear ist (Tabelle II).

Ein Vergleich der fünf Oszillogramme zeigt ausserdem, dass neben dem Scheitelwert auch die Spannungsform reproduzierbar ist (Fig. 10). Diese Vergleichsoszillogramme wurden mit einer Last von etwa 2 nF aufgenommen, da infolge von Vorentladungen, deren Grösse u. a. von der Spannungshöhe abhängig ist, sich bei geringer kapazitiver Belastung die Spannungsform vor allem im Scheitel der Stoßspannung in Abhängigkeit von der Ladespannung ändern wird. Um dies auch bei geringer kapazitiver Belastung zu verhindern, müsste der Stosskreis, d. h. vor allem die Kopfelektroden am Generator, Teiler und Prüfobjekt und die Zuleitungen, vorentladungsfrei ausgeführt werden.

5. Schlussfolgerungen

Für die Prüfung von elektrischen Geräten für die zukünftigen UHV-Übertragungsspannungen von 1100 kV oder 1500 kV werden Stossanlagen mit einer hohen gespeicherten Energie und grosser Flexibilität in der Spannungsform gefordert. Der vorliegende Beitrag versucht, die Art der Prüfung zu diskutieren und zeigt, dass die Spannungserzeugung in diesem Spannungsbereich von einigen Millionen Volt auch mit den heute genormten Prüfspannungen innerhalb der bestehenden Toleranzen möglich ist.

Linearitätskontrolle

Tabelle II

Ladespannung kV	Ausgangsspannung in % bezogen auf U_n
40	19,8
80	39,7
120	59,8
160	80,5
200	100

Literatur

[1] Essais à haute tension. Publication de la CEI No. 60. Deuxième edition, 1962.
[2] *K. Feser* und *M. G. Kratzenstein:* Das Durchschlagverhalten einer Stab–Stab-Funkenstrecke in Isolieröl bei Mischspannungen. ETZ-A 90(1969)24, S. 623...628.
[3] *K. Feser:* Das Durchschlagverhalten von Luftfunkenstrecken mit inhomogenem Feld bei Mischspannungen. Bull. SEV 62(1971)6, S. 320...329.
[4] *K. Feser:* Mechanismus zur Erklärung des Schaltspannungsphänomens. STZ 68(1971)46, S. 937...946.
[5] *E. Marx:* Versuche über die Prüfung von Isolatoren mit Spannungsstössen. ETZ 45(1924)25, S. 652...654.
[6] *D. Kind* und *J. Salge:* Über die Erzeugung von Schaltspannungen mit Hochspannungs-Prüftransformatoren. ETZ-A 86(1965)20, S. 648...651.
[7] *D. Kind* u. a.: Explodierende Drähte zur Erzeugung von Megavolt-Impulsen in Hochspannungsprüfkreisen. ETZ-A 92(1971)1, S. 46...51.
[8] *D. Kind:* Hochspannungstechnik heute. ETZ-B 21(1969)3, S. 49...53.
[9] *H. Prinz:* Warum Höchstspannungsprüffelder. ETZ-B 21(1969)4, S. 73...78.
[10] *A. Rodewald:* Über eine Marxsche Vervielfachungsschaltung mit Hilfsfunkenstrecken zur Verbreiterung des Auslösebereiches. ETZ-A 92 (1971)1, S. 56...57.
[11] *K. Feser:* Ein Beitrag zur Berechnung der Spannungsverteilung von Hochspannungskondensatoren. Bull. SEV 61(1970)8, S. 345...348.
[12] *G. Bahder, A. S. Brookes* et *F. G. Garcia:* Coordination de l'isolement dans les câbles à courant continu à haute tension. Rapport Cigré No. 21–03, 1972.
[13] *A. Rodewald:* Ausgleichsvorgänge in der Marxschen Vervielfachungsschaltung nach der Zündung der ersten Schaltfunkenstrecke. Bull. SEV 60(1969)2, S. 37...44.
[14] *A. Rodewald:* Die Zündwahrscheinlichkeit der Schaltfunkenstrecke in der Marxschen Vervielfachungsschaltung. Bull. SEV 60(1969)18, S. 857...863.
[15] *A. Rodewald:* Zur präzisen Auslösung von Stossgeneratoren bei einer vorgewählten Ladespannung. Bull. SEV 59(1968)20, S. 947...952.
[16] *H. C. Barnes* and *B. Thorén:* Résultats de trois années du programme de recherches UHT AEP–ASEA. Rapport Cigré No. 31–03, 1972.
[17] *K. Feser:* Ein neuer Spannungsteiler für die Messung hoher Stoss- und Wechselspannungen. Bull. SEV 62(1971)19, S. 929...935.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *K. Feser,* E. Haefely & Cie. AG, Lehenmattstrasse 353, 4000 Basel 28.