Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 12

Artikel: Konstruktion und Übertragungseigenschaften ausgeführter Spannungsteiler für mehrere MV

Autor: Feser, K. / Sutter, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915296

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: 10.12.2025

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

Konstruktion und Übertragungseigenschaften ausgeführter Spannungsteiler für mehrere MV

Von K. Feser und H. Sutter

621.316.722.4.027.89

Es werden einige konstruktive Merkmale von Spannungsteilern für einige Millionen Volt anhand einiger Beispiele von ausgeführten Spannungsteilern diskutiert. An einem Freiluft-Spannungsteiler von 5 Millionen Volt wird die mechanische Festigkeitsberechnung näher erläutert. Ein Vergleich der elektrischen Übertragungseigenschaften von vier Spannungsteilern mit Nennspannungen zwischen 4,8 und 6 Millionen Volt zeigt, dass auch im Mega-Volt-Bereich die Spannungsmessung der genormten Spannungsimpulse mit genügender Genauigkeit möglich ist.

Discussion de certaines particularités de la construction des diviseurs de tension pour quelques millions de volts, à l'aide d'exemples de diviseurs exécutés. Le calcul de la résistance mécanique est expliqué plus en détail pour un diviseur de tension en plein air de 5 millions de volts. Une comparaison des propriétés électriques de transformation de quatre diviseurs de tension avec tensions nominales comprises entre 4,8 et 6 millions de volts montre qu'il est également possible de mesurer avec une précision suffisante les impulsions de tensions normalisées dans le domaine des mégavolts.

Einleitung

Für die Spannungsmessung im MV-Bereich werden üblicherweise Spannungsteiler eingesetzt, die die Spannung von einigen Millionen Volt auf einige 100 V herabsetzen. Da die Spannungserzeugung in der Prüftechnik meist in Luft erfolgt, werden die Prüfanlagen und damit auch die Spannungsteiler in ihren Abmessungen durch die Festigkeit der Luft wesentlich bestimmt. Bei z. B. 5 Millionen Volt kann man mit Mindestabmessungen der Bauelemente von über 10 m rechnen. Durch diese grossen räumlichen Abmessungen muss die Spannungsmesseinrichtung in die Gesamtkonzeption einer Prüfanlage integriert werden, besonders auch deshalb, weil die Spannungsmesseinrichtung teilweise Rückwirkungen auf die Erzeugung der Spannungen hat.

Als wesentliche vorher festzulegende Kriterien für die Spannungsmesseinrichtung müssen folgende Varianten diskutiert bzw. abgeklärt werden:

- Freiluft- oder Innenraumteiler;
- am Boden stehend, an der Decke oder Wand hängend;
- ortsfest oder fahrbar;
- nur Spannungsteiler oder Spannungsteiler und Belastungskondensator;
- Anwendungsbereich (Spannungsform, Spannungshöhe, Daten der Prüflinge).

Im folgenden seien anhand von einigen ausgeführten Beispielen von kapazitiven und gedämpft kapazitiven Spannungsteilern spezielle konstruktive Probleme und deren Lösungsmöglichkeiten diskutiert. Ausserdem werden die elektrischen Daten, d. h. im wesentlichen die gemessenen Übertragungseigenschaften von einigen Spannungsteilern mitgeteilt. Die theoretischen Grundlagen und praktischen Probleme bei der Ermittlung der elektrischen Daten sind in der Literatur bereits ausführlich behandelt [1...4][1]).

1. Mechanischer Aufbau

Falls die eingangs erwähnten Kriterien festgelegt wurden, können die für die Festigkeitsberechnungen notwendigen mechanischen Belastungen zusammengestellt werden. Insbesondere sind zu berücksichtigen:

- Eigengewicht der Aktivteile;
- Gewicht der Abschirmungen;
- Zugkräfte an den elektrischen Verbindungsleitungen zum Generator und zum Prüfobjekt am Kopf des Spannungsteilers;
- Beschleunigungen beim Standortwechsel (in der Regel vernachlässigbar);
- Beschleunigungen bei Erdbeben.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Zusätzlich sind bei Freiluftteilern zu berücksichtigen:

- Windlast;
- Schnee- und Eislast;
- Temperaturbereich.

Die Festigkeitsberechnung kontrolliert die auftretenden mechanischen Kräfte und erlaubt damit die Aussage, ob die Materialauswahl und die Konstruktion für die geforderte Anwendung geeignet sind.

1.1 Beanspruchungen

Folgende Beanspruchungen sind zu beachten:

- *Druckbeanspruchung / Zugbeanspruchung*

Die Druckbeanspruchung ist am Fuss des stehenden Spannungsteilers am grössten. Sie berücksichtigt das Eigengewicht der Aktivteile, das Gewicht der Abschirmungen, den Strebenzug, die vertikale Erdbebenbeschleunigung und eventuell die Schnee- und Eislast. Mit der Wandstärke und dem Material der Zylinder lässt sich die Druckbeanspruchung beherrschen. Die Stirnflächen der Zylinder liegen auf den Flanschen auf, so dass die Druckbeanspruchung nicht über die Leimstellen übertragen werden muss.

Die Zugbeanspruchung von an der Decke hängenden Teilern muss dagegen über die Leimstellen übertragen werden können. Die Dichtungen sollten dabei so ausgeführt sein, dass keine mechanischen Beanspruchungen auf die Dichtungen wirken. Ausserdem sollten diese Teiler an der Decke frei beweglich, d. h. an einem Aufhänge-

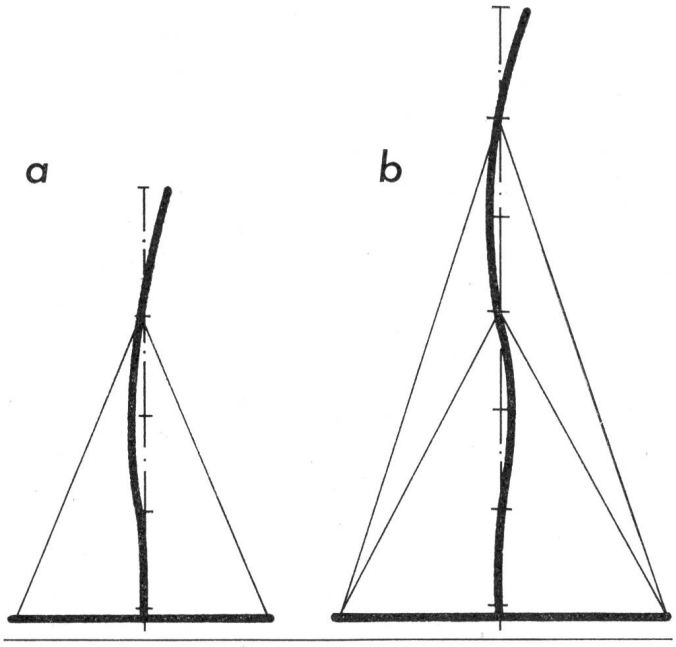


Fig. 1 Spannungsteiler mit Streben (feste Einspannstellen)
a eine Einspannstelle *b* zwei Einspannstellen

punkt, hängen. Damit erhält man eindeutige Festigkeitsverhältnisse. Wird als Aufhängepunkt ein Kranhaken mit Seilwinde verwendet, so kann man den Teiler am Boden montieren und stufenweise in die Höhe ziehen.

– *Biegebeanspruchung*

Durch den seitlichen Zug der Verbindungsleitungen, durch die Windkräfte bei Freiluftteilern, durch die Beschleunigung beim Standortwechsel und bei Erdbebenbelastungen treten grosse Biegemomente auf, insbesondere weil durch die räumliche Ausdehnung der Spannungsteiler der Hebelarm vom Angriffspunkt der Kräfte bis zur Einspannstelle sehr gross ist. Bei dieser Beanspruchung sind die Verbindungsstellen Flansch–Zylinder, die sog. Leimstellen, am meisten gefährdet.

Mit der Höhe des Flansches und mit zusätzlichen Leimrillen kann die zulässige Schubspannung verändert werden. Überschlägig kann für eine Leimfuge mit einer zulässigen Schubspannung von 10 kp/cm² gerechnet werden. Für eine Leimrille kann man mit etwa 100 kp/cm² rechnen.

Um die Schubspannungen besser zu beherrschen, ist es ratsam, ab etwa 6 m Bauhöhe Streben zu verwenden. Der Angriffspunkt der Streben sollte möglichst hoch sein, um die Schubspannungen in den Leimstellen beherrschen zu können. Dies hat aber den Nachteil, dass das Fahrgestell eine grosse Ausladung (Armlänge) aufweisen muss, um die Druckspannungen zu beherrschen.

– *Knickung*

Mit dem Anbringen von Streben wird der Teil zwischen Fahrgestell und Strebenangriffspunkt zum Knickstab (Fig. 1). Durch die Wahl eines geeigneten Materials (elastisches Material, z. B. Glasfaserzylinder) oder mit Hilfe einer geeigneten Konstruktion (z. B. gelenkige Einspannstellen bei Porzellan, d. h. Freiluftteilern (Fig. 2) kann auch diese Beanspruchung gut beherrscht werden. Fig. 3 zeigt die gelenkig ausgeführte Verbindungsstelle eines Freiluft-Spannungsteilers für 6 MV.

1.2 Materialauswahl und Konstruktionsbeispiele

Die Aktivteile des Hochspannungsteiles eines Spannungsteilers bestehen aus Kondensatoren und Widerständen. Für einige Millionen Volt werden viele Einzelkondensatoren und bei gedämpft kapazitiven Spannungsteilern zusätzlich Einzelwiderstände abwechselnd in Reihe geschaltet. Als Dielektrikum der Kondensatoren wird Ölpapier verwendet, die Widerstände bestehen aus anti-induktiv gewickelten Drahtwiderständen. Die Auswahl des Materials wird durch die Spannungsabhängigkeit und die Temperaturabhängigkeit wesentlich mitbestimmt. Die Aktivteile von Hoch- und Niederspannungsteilen sollten vergleichbare Eigenschaften besitzen, damit sich das Übersetzungsverhältnis, z. B. in Abhängigkeit von der Spannung oder der Temperatur, nicht ändert.

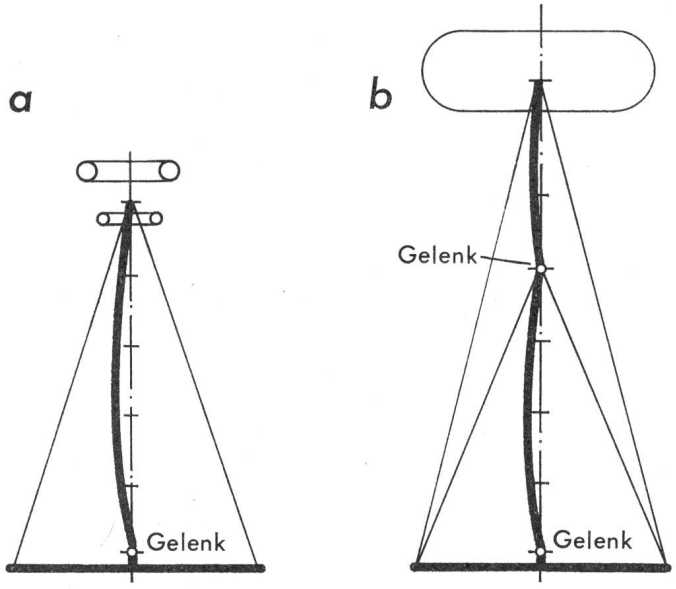


Fig. 2 Spannungsteiler mit Streben (gelenkige Einspannstellen)
a eine Einspannstelle *b* zwei Einspannstellen

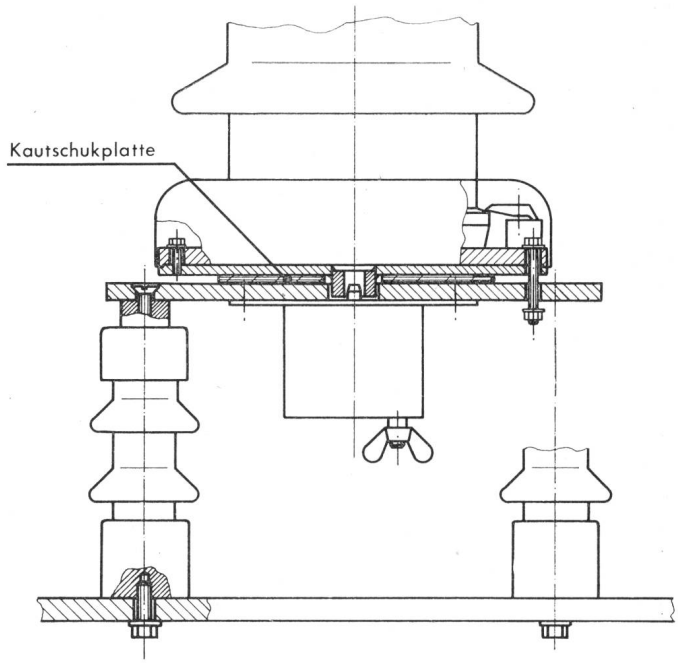


Fig. 3 Konstruktive Ausführung einer gelenkigen Einspannstelle

Die Aktivteile des Hochspannungsteiles werden in Zylinder eingebaut, die die elektrischen (Spannungsfestigkeit) und mechanischen Aufgaben (Traggerüst für Elektroden und weitere Zylinder) zu übernehmen haben. Mehrere meist elektrisch und mechanisch identische Zylinder werden übereinander gestellt und bilden den Hochspannungsteil. Bei Spannungsteilern von einigen MV mit entsprechenden Kopfelektroden [2] bestehen die Zylinder bei Innenraumteilern aus glasfaserverstärktem Epoxyharz. Hartpapier wird bei stehenden Teilern mit Nennspannungen bis etwa 4 MV, die meist kleine Kopfelektroden haben, verwendet. Für Freiluftteiler, die auch unter Regen verwendet werden, wird Porzellan eingesetzt.

Für die Abspannungen (Streben) werden für Innenraumteiler ebenfalls glasfaserverstärkte Epoxyharzstangen verwendet. Bei Freiluftteilern genügen diese Zugstangen, falls der Spannungsteiler nur für Stoßspannungen ausgelegt wird. Falls aber, wie oft gefordert, zugleich Wechselspannungen unter Regen zu messen sind, sind Abspannungen mit Schirmen zu versehen. Da Porzellanketten aus Gewichtsgründen ausscheiden, werden Glasfaserstangen mit Kunststoffisolatoren (aus Silikonkautschuk), die auch bereits als 5 m lange Stücke erhältlich sind, eingesetzt. Besondere konstruktive Aufmerksamkeit ist aus elektrischen und mechanischen Gründen den Einspannstellen zu widmen.

Fig. 4 zeigt einen 4-MV-Innenraumteiler mit Glasfaserzylinder und Glasfaserabspannungen. Dieser Spannungsteiler kann auch an die Decke gehängt werden, wobei bis zu 6 Einheiten aneinandergeflanscht werden und über den Flansch zusätzlich das Gewicht einer grossen Elektrode übertragen wird. Bei sechs an der Decke hängenden Zylindern treten am

obersten Flansch (direkt an der Decke) Zugkräfte von 5300 kp auf, die die Leimstelle Flansch–Zylinder beanspruchen. Fig. 5 zeigt die konstruktive Ausführung der Aufhängeeinrichtung eines 6-MV-Teilers. Der Spannungsteiler wird an einen Kranhaken gehängt und ist damit frei beweglich. Auch der Niederspannungsteil kann direkt am letzten Flansch angehängt werden.

Ein besonderes Problem stellt ein an der Decke hängender Freiluft-Spannungsteiler mit Porzellanzylindern dar. Die Schrauben, die für die Dichtungen notwendig sind, können nicht gleichzeitig die Zugkräfte vom Gewicht der Einheiten und der Abschirmung übernehmen, da diese Kräfte dem notwendigen Dichtungsdruck entgegenwirken. Deshalb ist es vorteilhaft, eine Hängekonstruktion mit Isolierstäben und Zwischenplattformen zu wählen, über die die Zugkräfte übertragen werden. Die Porzellanzylinder stehen dabei auf den Zwischenplattformen, die über 3 Glasfaserstangen, über welche Porzellanüberwürfe gesteckt sind, mit der darüberliegenden Zwischenplatte verbunden sind. Der Zwischenraum zwischen der Glasfaserstange und dem Porzellanüberwurf ist mit Polyurethan ausgeschäumt, um Längsüberschläge längs der Glasfaserstangen zu vermeiden und der Kondenswasserbildung vorzubeugen. Die mechanischen Kräfte werden in diesem Beispiel über die Glasfaserstangen übertragen, die elektrischen Verbindungen sind über die einseitig feststehenden Porzellanzylinder ausgeführt. Fig. 6 zeigt die Montage dieses hängenden Freiluftspannungsteilers für eine Nennspannung von 5,4 MV.

Eine am Boden stehende Freiluftausführung eines 6-MV-Teilers mit Porzellanzylindern und Kunststoffabspannungen zeigt Fig. 7. An den Einspannstellen ist die Porzellansäule gelenkig gelagert (s. auch Fig. 2).

Aus elektrischen Gründen stehen die Hochspannungseinheiten auf Isolierstützer auf dem Fahrgestell. Der Niederspannungsteil wird zentrisch am untersten Flansch eingehängt und kann somit sehr leicht ausgewechselt werden, um ein anderes Übersetzungsverhältnis zu erhalten (s. auch Fig. 3).

Um eine optimale Raumausnützung und eine hohe Flexibilität im Prüfaufbau zu erreichen, werden praktisch alle Spannungsteiler fahrbar ausgeführt. Das Fahrgestell besteht aus breitflanschigen I-Trägern mit grossem Widerstandsmoment oder aus Kastenprofilen.

Neben Lenkrollen werden immer mehr Luftkissenfahrgestelle verwendet. Mit Luftkissen ist bei guten Bodenverhältnissen eine leichte und genaue Standortwahl möglich. Bei Lenkrollen ist eine genaue Standortwahl infolge der Rollreibung und der jeweiligen Richtung der Rollen schwieriger zu realisieren. Fig. 8 zeigt ein Detail eines Luftkissenfahrgestells mit Druckluftversorgung. Zwei Personen können diesen Teiler mühelos verschieben. In Fig. 9 ist ein 5-MV-Spannungsteiler mit einem Fahrgestell mit Lenkrollen dargestellt.

Um Vorentladungen, die das Übersetzungsverhältnis verändern können, bei hohen Spannungen zu vermeiden, haben Spannungsteiler für einige MV Kopfelektroden und Zwischenelektroden. Zwischenelektroden sind vor allem an den Ein-

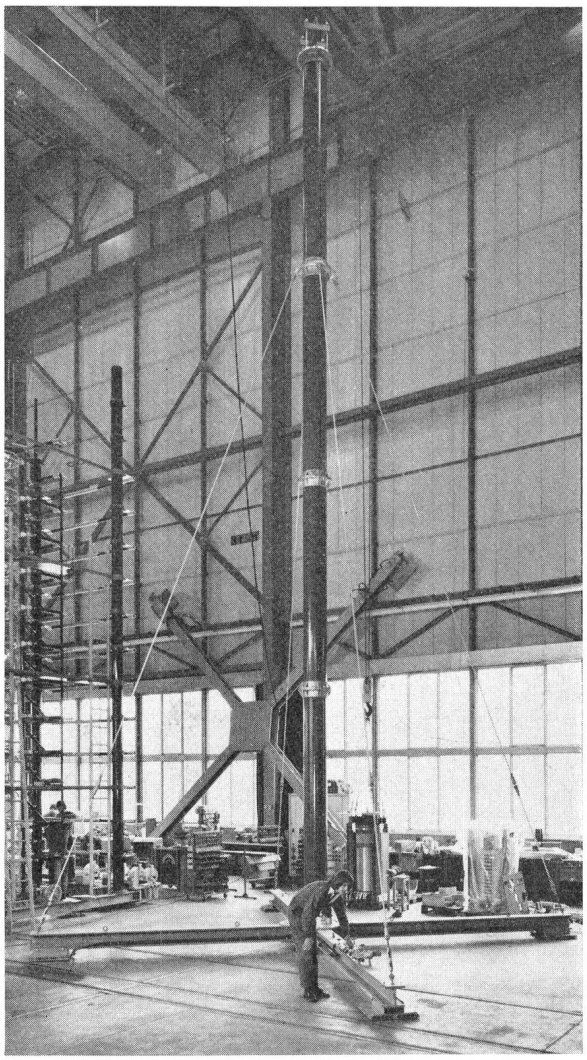


Fig. 4 4-MV-Innenraumteiler mit Glasfaserzylinder und Glasfaserabspannungen (ohne Elektroden)

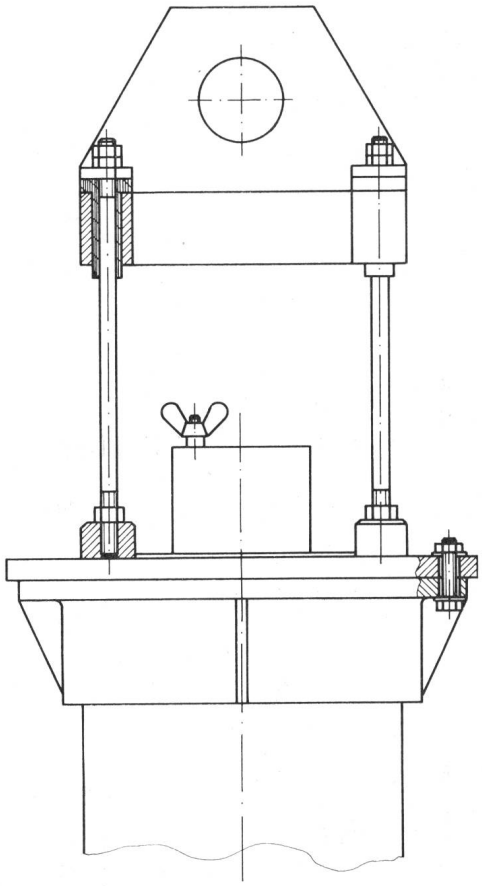
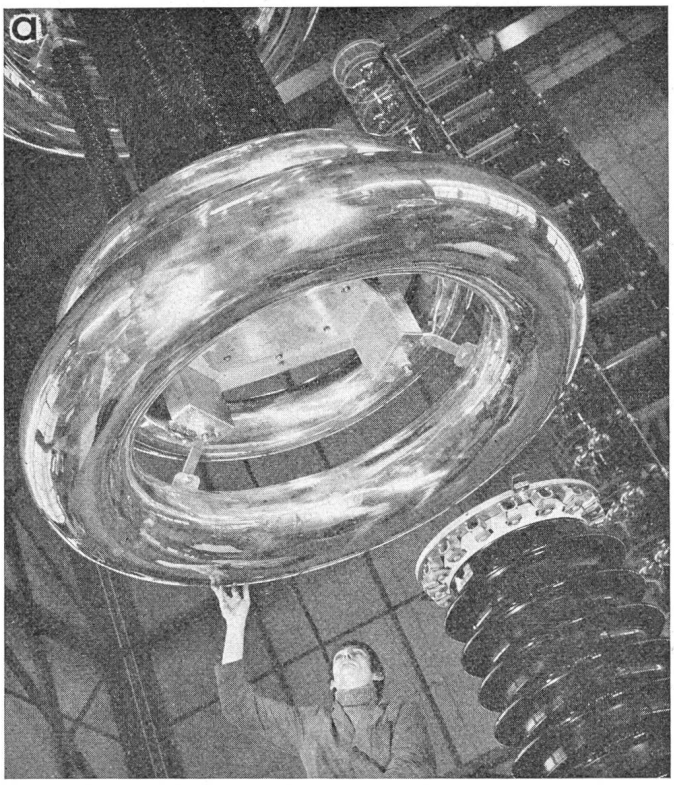
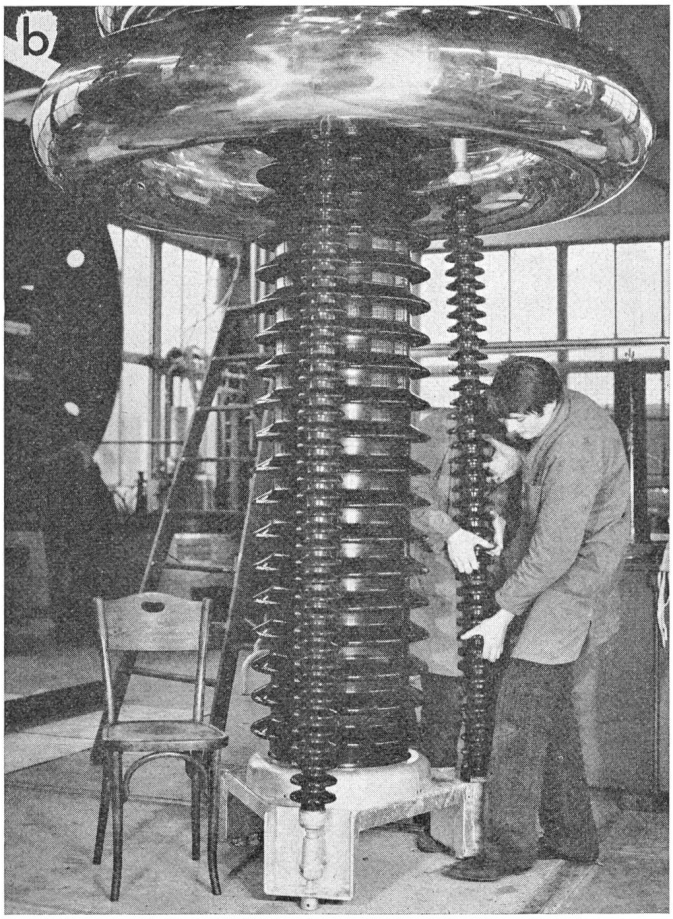


Fig. 5 Aufhängevorrichtung für 6-MV-Innenraumteiler

spannstellen der Abspannungen notwendig (s. auch Fig. 7). Die Grösse der Elektrode wird durch die maximale Spannung und die Spannungsform bestimmt. Als Material für die Elektroden werden aus Gewichtsgründen Aluminium oder leitfähig beschichtete Kunststoffelektroden verwendet. Die Form der Elektroden ist häufig toroidal, da damit die Spannungszuführung kein Problem darstellt. Bei sehr hohen Spannungen werden aber Toroide teuer, und es treten wegen der Abmessungen Transportprobleme auf. Fig. 10 zeigt die zunehmenden relativen Kosten einer Kopfelektrode bezogen auf die Gesamtkosten eines Spannungsteilers mit zunehmender Spannung. Man erkennt, dass bei einem 6-MV-Spannungsteiler etwa 70 %





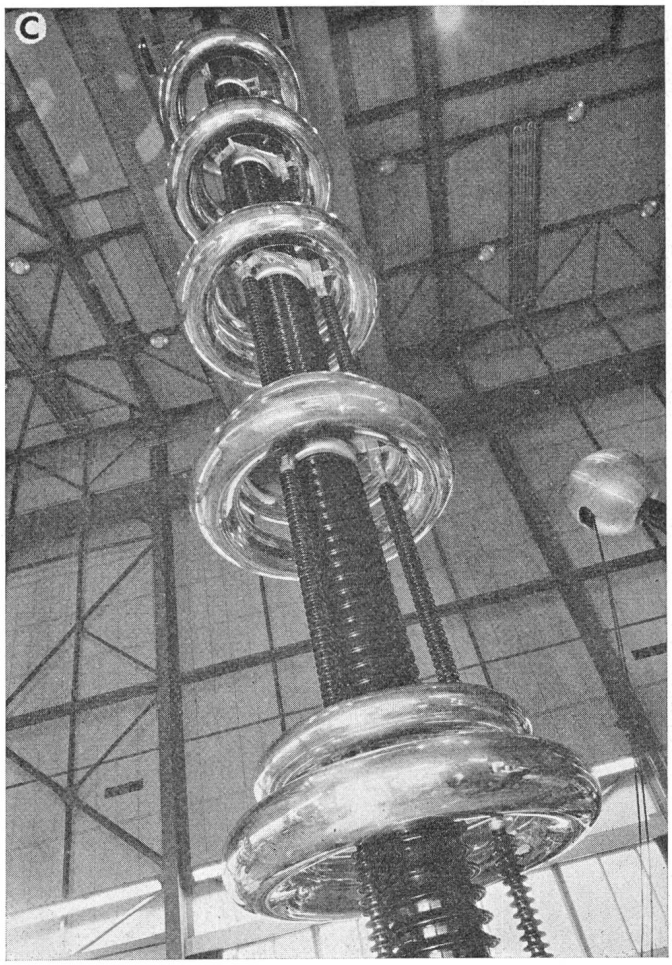


Fig. 6
Montage eines an der Decke hängenden 5,4-MV-Spannungsteilers mit Porzellanzylindern
a Montage der nächsten Einheit
b Einhängen der Zugstangen
c Gesamter Spannungsteiler am Kranhaken

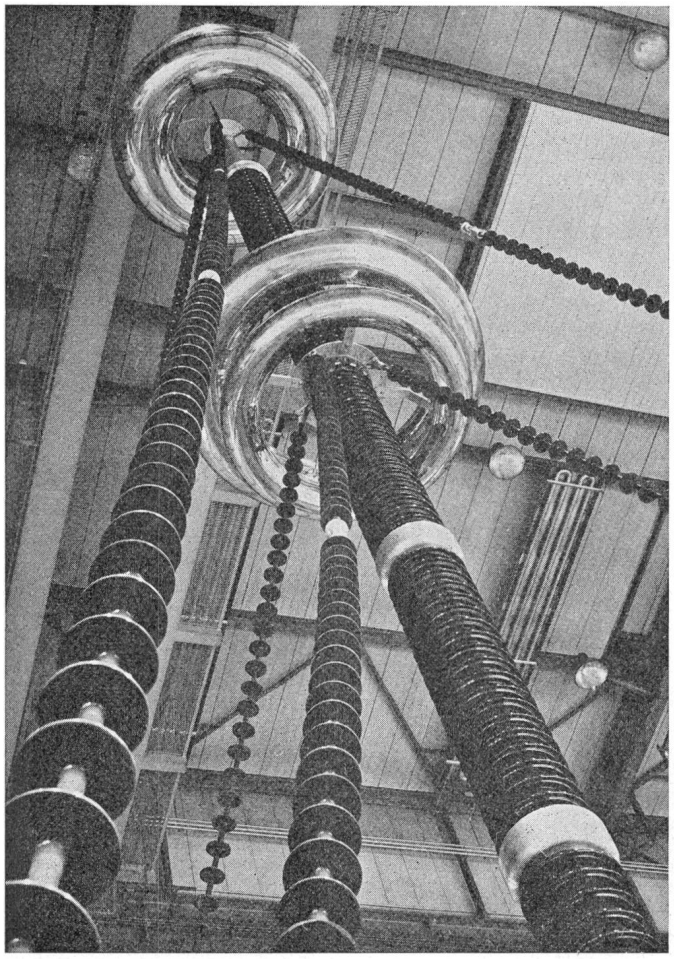


Fig. 7 6-MV-Freiluftspannungsteiler mit Kunststoffabspannungen

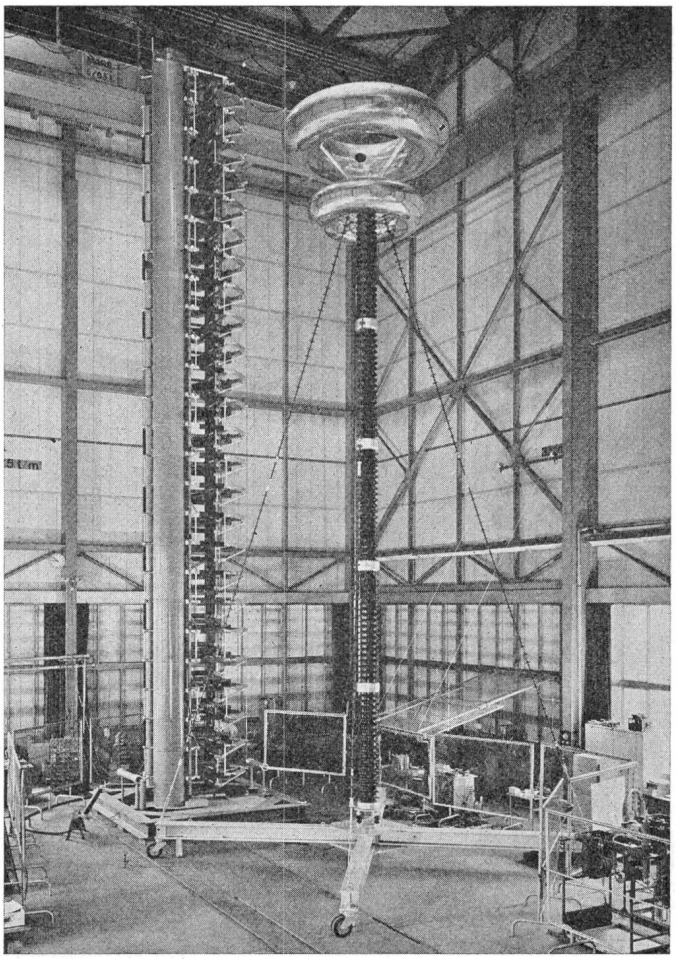


Fig. 9 5-MV-Freiluftspannungsteiler mit einem Fahrgestell mit Lenkrollen

der Kosten allein für die Kopfelektrode aufzubringen sind. Aus Kostengründen, aus Transportüberlegungen und aus Reparaturgründen wird bei hohen Spannungen deshalb auch die sog. Polygonelektrode eingesetzt (Fig. 11).

2. Berechnungsbeispiel

Im folgenden soll am Beispiel eines 5-MV-Freiluftteilers die mechanische Berechnung näher erläutert werden. Die Ausführung dieses gedämpft kapazitiven Spannungsteilers hat folgende Bedingungen zu berücksichtigen, die zu den gewählten Konstruktionsmerkmalen führen:

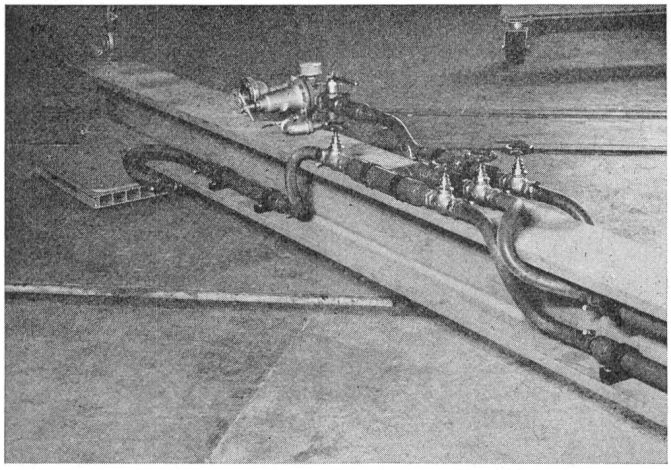


Fig. 8 Detail eines Luftkissenfahrgestells

Bedingungen		*Folge*
Freiluftausführung	→	Porzellanzylinder
Fahrbar auf rauhem Boden	→	Fahrgestell mit Rollen
Schaltstoßspannung 2,7 MV	→	Doppeltoroid-Elektrode mit den Abmessungen entsprechend Fig. 12
Blitzstoßspannung 5 MV	→	5 Einheiten von je 1000 kV
Schaltstoßspannung auch bei Regen	→	Streben mit Kunststoffschirmen

Maximale Windgeschwindigkeit: 105 km/h
Erdbeben (horizontal und vertikal): 0,2 g
Zug der Verbindungsleitungen: 150 kp
Temperaturbereich: − 40 bis + 70 °C

Konstruktionsmerkmale

– Infolge der hohen Belastung und der Porzellanausführung wurde eine gelenkige Ausführung gewählt.

– Die Strebenbefestigung wird so gewählt, dass von der Abschirmung praktisch kein Biegemoment auf die Säule übertragen wird (Fig. 12).

2.1 Festigkeitsberechnung für die Zylinder

Für die Berechnung der Windkräfte ist der Staudruck [3] massgebend:

Staudruck:

$$q = \frac{\gamma}{2g} v^2 = \frac{1{,}3}{2 \cdot 9{,}81} \cdot 29{,}2^2 = 56{,}5 \text{ kp/m}^2$$

(γ spezifisches Gewicht der Luft in kp/m³;
v Windgeschwindigkeit in m/s;
$g = 9{,}81$ m/s² Erdbeschleunigung).

Obwohl die Windkräfte mit der Höhe über dem Boden im allgemeinen zunehmen (wegen der höheren Windgeschwindig-

keit), kann bei diesen Höhen von 5 bis etwa 20 m mit einem konstanten Staudruck über der gesamten Baulänge gerechnet werden.

Die am Spannungsteiler vom Wind auftretenden Kräfte können aus dem Staudruck, der Angriffsfläche und einem Beiwert, der die Form und Rauhigkeit der Oberfläche berücksichtigt, mit Hilfe der Formel [3]

$$K_n = C_n \, q \, A \qquad \text{kp}$$

berechnet werden.

C_n Beiwert für glatte Oberfläche $C_n \approx 0{,}5$
für rauhe Oberfläche (kantige Rippen, Porzellan) $C_n \approx 1$
q Staudruck in kp/m²
A Fläche in m²

Damit ermitteln sich folgende Windkräfte:

an der Kondensatorsäule:
$K_{n1} = 1 \cdot 56{,}5 \cdot 0{,}97 \quad = 55$ kp/Kondensator

an der oberen Abschirmung:
$K_{n2} = 0{,}5 \cdot 56{,}5 \cdot 1{,}84 = 52$ kp

an der unteren Abschirmung:
$K_{n3} = 0{,}5 \cdot 56{,}5 \cdot 0{,}96 = 27$ kp

2.2 Biegebeanspruchung/Knickung

Aus den Druckkräften und den Abmessungen (Fig. 13) können die auftretenden Biegemomente ermittelt werden.

Das zulässige Biegemoment beträgt (empirisch ermittelt):

$M_{b\,zul} = 835$ mkp

Aus der Windbelastung $K_{n1} = 55$ kp pro Kondensator, $A = B = 137$ kp (Fig. 13) ermittelt sich ein maximales Biegemoment in der Mitte des Spannungsteilers von

$M_{b\,Wind} = 403$ mkp $< M_{bzul}$

Bei Erdbebenbelastung ermitteln sich die Kräfte mit einem Gewicht pro Kondensator von 380 kp zu:

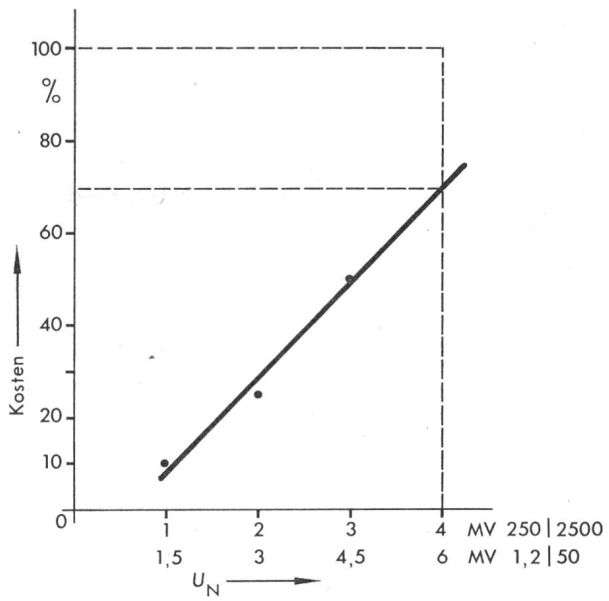


Fig. 10 Anteil der Kosten für eine Kopfelektrode an den Gesamtkosten eines Spannungsteilers
U_N Nennspannung

$$K_E = m\,b = \frac{380}{9{,}81} \cdot 0{,}2 \cdot 9{,}81 = 76 \text{ kp/Kondensator}$$

$A = B = 190$ kp

Daraus errechnet sich das maximale Biegemoment bei Erdbeben zu

$M_{b\,Erdbeben} = 560$ mkp $< M_{bzul}$

Windkräfte und Erdbebenkräfte werden als nicht gleichzeitig wirkend angenommen [3]. Bei der Berücksichtigung der Erdbebenbeanspruchungen ist besonders zu beachten, dass die Eigenfrequenz des Spannungsteilers nicht mit der Frequenz des Erdbebens übereinstimmt.

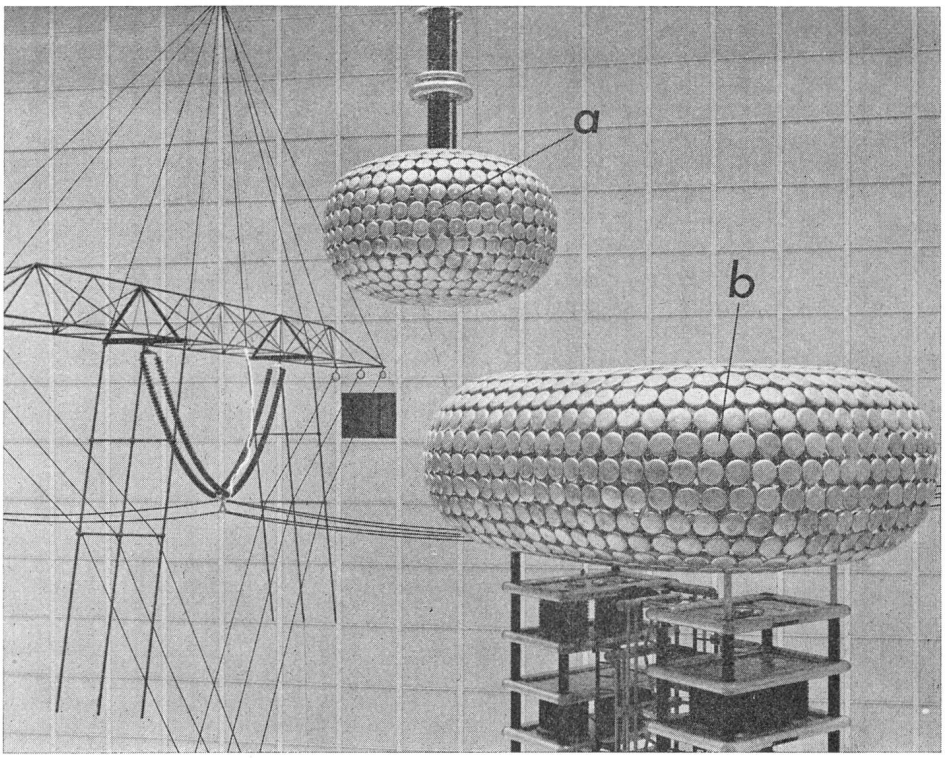


Fig. 11
Polygonelektroden für 5,4-MV-Spannungsteiler (*a*) und für 6,4-MV-Stoss-Spannungsgenerator (*b*)

2.3 Strebenzug

Der Strebenzug (Fig. 14) errechnet sich aus dem maximalen Zug am Kopf des Spannungsteilers und der Anordnung der Streben zu:

S = Windlast von Kondensatorsäule + Windlast von Abschirmung + Zug der Verbindungsleitungen

$S = 137 + 52 + 27 + 150 = 366$ kp

Daraus ermittelt sich: $Z = 1200$ kp

Mit diesen Werten kann nun die maximale Beanspruchung, die für dieses Beispiel wegen der gelenkigen Ausführung in der Mitte des Spannungsteilers auftritt, ermittelt werden. Es ergibt sich für die Druckbeanspruchung:

Gewicht:	2½ Kondensatoren à 380 kp	950 kp
	obere Abschirmung	200 kp
	untere Abschirmung	70 kp
	Anteil vom Strebenzug Z'	1130 kp
	Total:	2350 kp

Fläche: $A_{\text{POR.}} = 182\ \text{cm}^2$

$$\sigma_{\text{Druck}} = \frac{2350}{182} = 12{,}9\ \text{kp/cm}^2$$

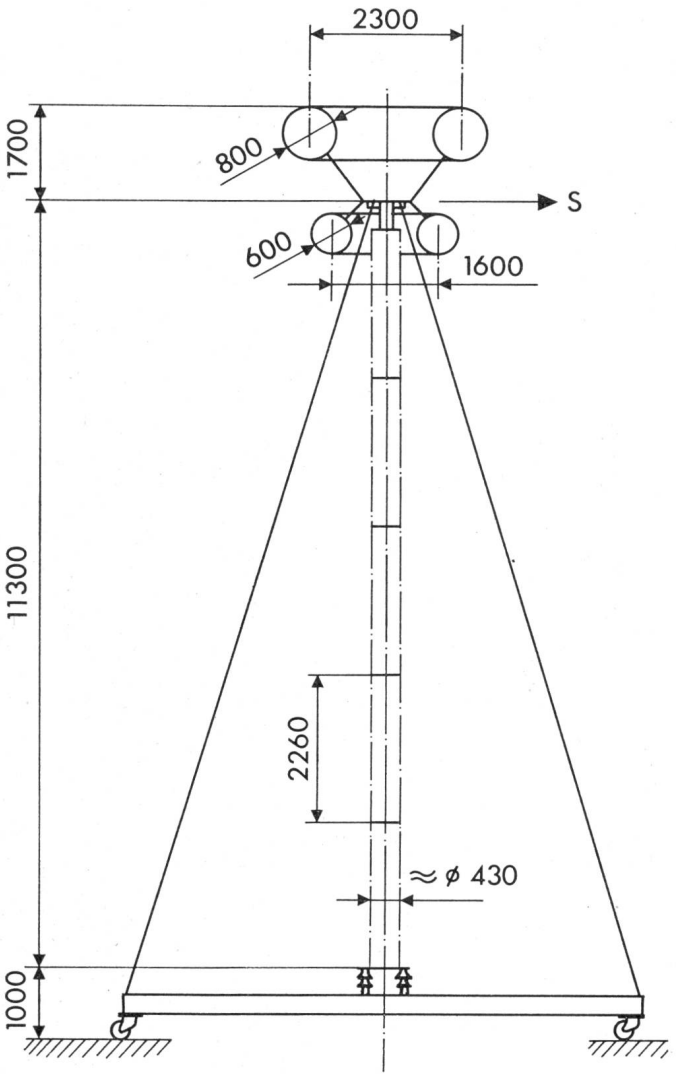


Fig. 12 Skizze eines 5-MV-Freiluftspannungsteilers
S Wirksame horizontale Kräfte
Masse in mm

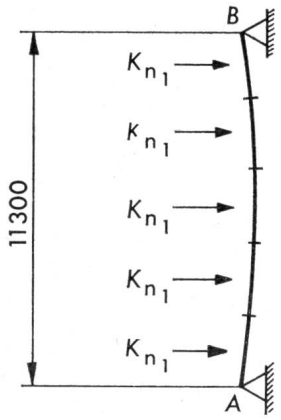


Fig. 13
Für die Biegebeanspruchung wichtige Druckkräfte K_{n1}
A, B Einspannpunkte

Für die Biegebeanspruchung ermittelt sich:

$M_b = 403$ mkp

Widerstandsmoment vom Porzellan: $W_b = 1043\ \text{cm}^3$

$$\sigma_{\text{Bieg}} = \frac{M_b}{W_b} = \frac{40\,300}{1043} = 38{,}8\ \text{kp/cm}^2$$

Die zusammengesetzte Beanspruchung ergibt sich damit zu:

$$\sigma_{\max} = \sigma_D + \sigma_B = 51{,}7\ \text{kp/cm}^2$$

Damit ermittelt sich die Sicherheit zu

$$\frac{\sigma_{\text{Bruch}}}{\sigma_{\max}} = \frac{150}{51{,}7} = 2{,}9$$

Es besteht eine 2,9fache Sicherheit. (Im Extremfall, falls Windlast und Erdbeben gleichzeitig berücksichtigt werden, ergäbe sich eine $\frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}} = \frac{150}{108} = 1{,}4$fache Sicherheit.)

3. Festigkeitsberechnung für das Fahrgestell

3.1 Bestimmung der minimalen Standfläche

Für den Gleichgewichtszustand gilt (Fig. 14):

$$Z'\,a = S\,h$$

Die vertikalen Kräfte (Z') ermitteln sich aus dem Gewicht der Zylindersäule (1900 kp), dem Gewicht des Fahrgestells (3300 kp) und der Abschirmungen (270 kp) zu etwa 5470 kp.

Die insgesamt wirksamen horizontalen Kräfte S ermitteln sich aus den für den Strebenzug ermittelten Kräften von 366 kp und den Kräften (230 kp), die von der horizontalen Erdbebenbeschleunigung am Kopf des Spannungsteilers wirksam werden, zu 596 kp.

Daraus errechnet sich die minimale Armlänge für ein Vierbein zu

$$a_{\min} = \frac{S\,h}{Z'} = \frac{596 \cdot 12}{5470}\sqrt{2} = 1{,}9\ \text{m}$$

Die Armlänge wurde zu 4 m gewählt, womit eine 2fache Sicherheit besteht.

3.2 Auswahl des Trägers für das Fahrgestell

Für das Widerstandsmoment des Trägers müssen die Vertikalkräfte, die vertikale Erdbebenbeschleunigung und der Strebenzug berücksichtigt werden. Diese Kräfte bedingen ein Widerstandsmoment W_b des Trägers von etwa 1400 cm³. Gewählt wurde ein I-Träger HEM 240 mit einem Widerstandsmoment von 1800 cm³.

4. Elektrischer Aufbau

Die Kenndaten eines Spannungsteilers für einige MV müssen mit der gesamten Stoßspannungsanlage optimiert werden. Der Anwendungsbereich bestimmt dabei wesentlich auch die Kenndaten des Spannungsteilers. Für kapazitive und gedämpft kapazitive Spannungsteiler ist in erster Linie die Frage zu klären, ob der Spannungsteiler zugleich als Belastungskondensator eingesetzt werden soll. Aus Kostengründen ist im UHV-Bereich die Kombination der beiden Aufgaben sinnvoll. Die minimale Grösse der Hochspannungskapazität wird durch den Umgebungseinfluss bestimmt. Bei einer Dimensionierung entsprechend der Beziehung

$$C_1 = 33...50 \cdot H \text{ pF } (H \text{ in m})$$

ist die Veränderung des Übersetzungsverhältnisses durch die Umgebung vernachlässigbar. In bestimmten Anwendungsfällen, z. B. bei grossen Prüflingskapazitäten, ist eine möglichst kleine Kapazität erwünscht, um die Blitzstoßspannung 1,2|50 auch bei grossen Prüflingskapazitäten normgerecht erzeugen zu können. In diesen Fällen, z. B. bei der Prüfung von Transformatoren, kann durch eine definierte Aufstellung des Spannungsteilers (z. B. an der Decke) die minimale Kapazität gewählt werden. Bei der Gasentladungsforschung mit Schaltstoßspannungen ist im Gegensatz dazu eine möglichst hohe Belastungskapazität von über 1000 pF erwünscht, um durch die Vorentladungsströme keine Spannungseinbrüche zu erhalten [2].

Der Widerstand im Hochspannungsteil eines Spannungsteilers sollte für eine optimale Dimensionierung des Spannungsteilers ohne Berücksichtigung der Zuleitung der Beziehung

$$R_1 \approx 4\sqrt{\frac{L}{C_e}}$$

entsprechen [6]. Mit dieser Dimensionierung ist ein Spannungsteiler ein optimales Messinstrument. Ein zusätzlicher Belastungskondensator ist für die Impulsformung notwendig. Soll der gedämpft kapazitive Spannungsteiler gleichzeitig als Belastungskondensator eingesetzt werden, so sollte der Widerstand R im Hochspannungsteil entsprechend einer Zeitkonstante des Hochspannungsteiles von kleiner als 120 ns gewählt werden [4].

Das Übersetzungsverhältnis sollte so gewählt werden, dass eine möglichst hohe Sekundärspannung erzielt wird, damit das Nutzsignal möglichst weit über jedem Störsignal liegt. Eine Sekundärspannung von einigen 100 V ist gebräuchlich. Für die elektrische Weiterverarbeitung kann die Spannung am Eingang zum elektronischen Gerät weiter herunter geteilt werden.

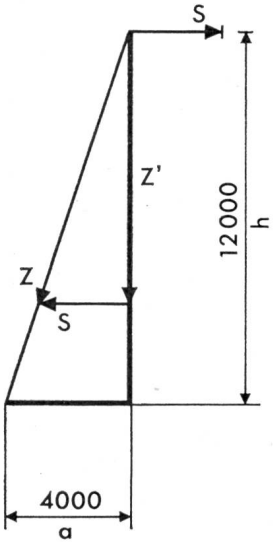


Fig. 14
Ermittlung des Strebenzuges
S Horizontale Kraft am Kopf des Spannungsteilers
h Höhe des Spannungsteilers
Z Strebenzug
Z' Vertikale Kraft
a Ausladung der Abschirmung am Fahrgestell

5. Elektrische Eigenschaften

Im folgenden seien Ergebnisse von kapazitiven und gedämpft kapazitiven Spannungsteilern von einigen MV mitgeteilt. Dabei werden im wesentlichen die Übertragungseigenschaften der verschiedenen Typen, die sich in der Dimensionierung des Hochspannungswiderstandes R_1 unterscheiden, mitgeteilt und verglichen. Die Übertragungseigenschaften wurden in allen Fällen mit einer horizontalen Zuleitung zum Spannungsteiler (Draht: 2 mm ⌀, Länge des Drahtes ≈ Höhe des Spannungsteilers) gemessen. Der Rechteckimpulsgenerator wurde an der vertikalen Laborwand in Höhe des Spannungsteilerkopfes angebracht. Für die Praxis interessieren vor allem die Übertragungseigenschaften des Systems «Spannungsteiler mit Zuleitung», weshalb im folgenden die Messung dieser Eigenschaften mitgeteilt wird.

In der Praxis der Prüftechnik im UHV-Bereich, d. h. bei der Messung von Blitzstoßspannungen und Schaltstoßspannungen, werden Spannungsteiler in der Regel ohne einen Zuleitungswiderstand am Anfang der Zuleitung angeschlossen. Im UHV-Bereich würde dieser Zuleitungswiderstand infolge der notwendigen Spannungsfestigkeit zu grosse Dimensionen annehmen. Deshalb werden im folgenden die Eigenschaften ohne Dämpfungswiderstand am Anfang der Zuleitung wiedergegeben. In den folgenden Beispielen interessieren der generelle Verlauf der Rechteckstossantwort und die entsprechend den Vorschriften wichtigen Kennwerte. Es werden die Übertragungseigenschaften von vier Spannungsteilern mit Nennspannungen für die Blitzstoßspannung 1,2|50 zwischen 4,8 und 6 MV diskutiert. Diese vier Spannungsteiler unterscheiden sich im wesentlichen in der Dimensionierung des Hochspannungswiderstandes. In Fig. 15 sind die Übertragungseigenschaften dieser vier ausgeführten Spannungsteiler zusammen mit ihren Daten (C_1 R_1) zusammengestellt. Die Rechteckstossantworten der vier Spannungsteiler unterscheiden sich vor allem im Überschwingen und in der Anstiegszeit.

Die Übertragungseigenschaften eines rein kapazitiven Spannungsteilers für 5 MV sind durch starke Schwingungen gekennzeichnet. Die Auswertung der Antwortzeit ist problematisch (theoretisch: $T^0 = 0$).

Neben der Grundschwingung, die durch die Kreisdaten (L_1, C_1) gegeben ist, treten hochfrequente Schwingungen auf. Diese stark oszillierende Rechteckstossantwort bedingt, dass auch im Anstieg einer Blitzstoßspannung eine merkbare Schwingung auftritt, da die hohen Frequenzen, die vom Durchzünden des Generators kommen, mit diesem Meßsystem übertragen werden können, wie dies die sehr kurze Anstiegszeit bereits andeutet.

Der optimal gedämpft kapazitive Spannungsteiler für 4,8 MV zeigt ebenfalls eine stark überschiessende Rechteckstossantwort ($ü \approx 82$ %), da die Wanderwelle auf der Zuleitung am hohen Dämpfungswiderstand R_1 reflektiert wird und am Anfang der Zuleitung ebenfalls keinen Abschluss der Zuleitung vorfindet (Fig. 15b). Die höher frequenten Schwingungen im Primärteil des Spannungsteilers sind dagegen optimal gedämpft. Mit einem Dämpfungswiderstand am Anfang der Zuleitung kann die Rechteckstossantwort dieses Meßsystems

optimal gedämpft ausgeführt werden [4]. Der Nachteil dieses so dimensionierten Spannungsteilers im UHV-Bereich ist, dass dieser Spannungsteiler nicht als Belastungskondensator eingesetzt werden kann. Bei seinem Einsatz als Messteiler ist es unbedingt erforderlich, dass die Ohmsche Komponente und die kapazitive Komponente im Übertragungsverhalten aufeinander abgestimmt werden ($R_1C_1 = R_2C_2$) [4].

Ein schwach gedämpft kapazitiver Spannungsteiler für 5 MV, der so dimensioniert ist, dass er zugleich als Belastungskondensator verwendet werden kann, zeigt eine stark gedämpfte Schwingung, wobei die Anstiegszeit der Rechteckstossantwort durch die Zeitkonstante des Primärteils des Spannungsteilers (R_1C_1) bestimmt wird (Fig. 15c). Für die höher frequenten Schwingungen im Spannungsteiler reicht die Dämpfung für die Messung von Blitzstoßspannungen und Schaltstoßspannungen ebenfalls aus. Als Vorteil dieses Spannungsteilers erkennt man das kleinere Überschwingen der Rechteckstossantwort ($\ddot{u} \approx 30\,\%$). Die Anstiegszeit und die Antwortzeit dieses Spannungsteilers kann durch einen zusätzlichen Widerstand im Sekundärteil verkleinert werden [4].

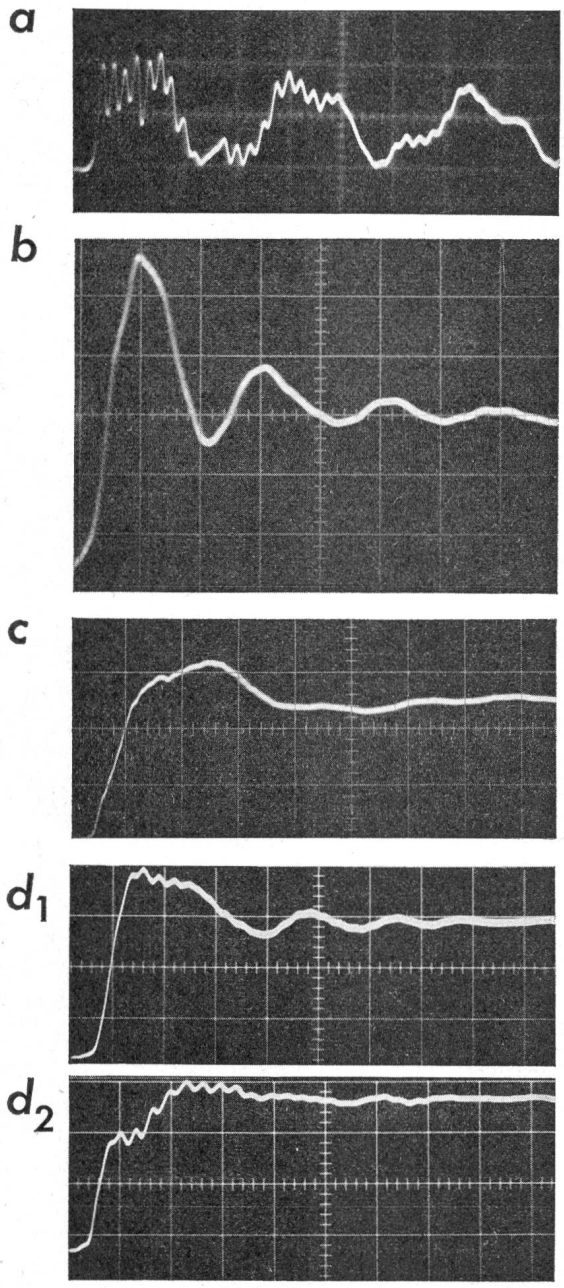


Fig. 15 Übertragungseigenschaften von vier Spannungsteilern im MV-Bereich

Zeitablenkung: 200 ns/Einheit

a kapazitiver Spannungsteiler von 5 MV ($R_1 = 0$, $C_1 = 290$ pF)

b optimal gedämpft kapazitiver Spannungsteiler von 4,8 MV ($R_1 = 1000\ \Omega$, $C_1 = 360$ pF)

c Schwach gedämpft kapazitiver Spannungsteiler von 5 MV ($R_1 = 230\ \Omega$, $C_1 = 480$ pF)

d Schwach gedämpft kapazitiver Spannungsteiler von 6 MV ($R_1 = 440\ \Omega$, $C_1 = 400$ pF)

d_1 mit R_2 d_2 ohne R_2

Als viertes Beispiel (Fig. 15d) ist die Übertragungseigenschaft eines 6 MV schwachgedämpft kapazitiven Spannungsteilers gezeigt, dem eine Dimensionierung des Hochspannungswiderstandes nach der Grösse des Wellenwiderstandes der Zuleitung zugrunde liegt. Dieser so dimensionierte Spannungsteiler ($R_1 \approx \Gamma_{zul}$) ist bei kleinen Kapazitäten C_1 zugleich als Belastungskondensator verwendbar. Bei grossen Kapazitäten C_1 wird die Zeitkonstante R_1C_1 zu gross, so dass dieser Spannungsteiler dann nicht mehr als Belastungskondensator bei kleinen Prüflingskapazitäten verwendbar ist.

Die Rechteckstossantwort zeigt mit einer Ohmschen Übertragungskomponente ($R_1C_1 \approx R_2C_2$) ein Überschwingen von etwa 40 %. Die Anstiegszeit ermittelt sich zu 40 ns. Entfernt man bei diesem Spannungsteiler den Widerstand R_2 im Niederspannungsteil, so wird das Überschwingen, das durch die Ohmsche Komponente im Übertragungsverhalten bedingt wird, auf etwa 10 % vermindert. Der rasche Anstieg in der Rechteckstossantwort wird durch die Induktivität im Niederspannungsteil hervorgerufen, die nicht entsprechend dem Übersetzungsverhältnis gewählt wurde (Fig. 15d).

Man erkennt aus dieser Gegenüberstellung der Übertragungseigenschaften, dass für UHV-Systeme ein Spannungsteiler, der zugleich als Belastungskondensator einsetzbar ist, eine optimale Lösung auch bezüglich des Aufbaus des gesamten Hochspannungskreises darstellt. Sucht man im UHV-Bereich nach einer wirtschaftlichen Lösung für die Gesamtsysteme der Spannungserzeugung, so wird die optimale Lösung darin bestehen, den Hochspannungsteil eines Spannungsteilers so zu dimensionieren, dass er eine gewünschte Rückwirkung auf den Spannungsverlauf erreicht und den Niederspannungsteil so zu dimensionieren, dass optimale Übertragungseigenschaften erzielt werden. Durch den Sekundärteil eines Spannungsteilers können bestimmte Eigenschaften im Übertragungsverhalten verbessert oder verschlechtert werden. Insbesondere kann eine zu hohe Induktivität im Niederspannungsteil zu unerwünschten Schwingungen führen [4]. Deshalb muss die Ausführung der Niederspannungseinheit besonders sorgfältig gemacht werden [5].

Literatur

[1] *W. Zaengl:* Der Stoßspannungsteiler mit Zuleitung. Bull. SEV 61(1972)21, S. 1003...1017.

[2] *K. Feser:* Probleme bei der Erzeugung hoher Schaltstoßspannungen im Prüffeld. Bull. SEV/VSE 65(1974)7, S. 496...508.

[3] Norm für die Belastungsannahme, die Inbetriebnahme und die Überwachung von Bauten. SIA-Norm Nr. 160 (1970).

[4] *K. Feser:* Transient behaviour of damped capacitive voltage dividers of some million volts. Trans. IEEE PAS 93(1974)1, p. 116...121.

[5] *R. Malewski* and *N. Hylten-Cavallius:* A low voltage arm for EHV impulse dividers. Trans. IEEE PAS 93(1974)6, p. 1797...1804.

[6] *W. Zaengl:* Ein neuer Teiler für steile Stoßspannungen. Bull. SEV 56 (1965)7, S. 232...240.

Adresse der Autoren:

K. Feser und *H. Sutter,* Emil Haefely & Cie. AG, Lehenmattstrasse 353, 4000 Basel.