

Hochspannungsteiler : Typen, Messeigenschaften und Einsatz

Autor(en): **Modrusan, M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **74 (1983)**

Heft 17

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904855>

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.

Hochspannungsteiler: Typen, Messeigenschaften und Einsatz

M. Modrusan

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst ein Überblick über die heute meistgebrauchten Typen von Hochspannungsteilern gegeben. Bei der Messung von rasch veränderlichen Spannungen treten die meisten Schwierigkeiten auf. Die beiden Spannungsteilertypen, die hier in Frage kommen, nämlich der ohmsche Spannungsteiler sowie der gedämpft kapazitive Spannungsteiler, werden bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeit Parameter und Grenzen eingehend behandelt.

Aperçu des types de diviseurs haute tension les plus souvent employés actuellement. La plupart des difficultés se présentent lors de la mesure de tensions qui varient rapidement. Pour les deux types de diviseurs considérés, le résistif et le capacitif amorti, les possibilités d'emploi, les paramètres et les limites sont traités en détail.

1. Einleitung

Bei der Messung von hohen Spannungen (z.B. einige MV) ist es erforderlich, diese Spannungen zunächst formgetreu auf ein wesentlich niedrigeres Niveau von einigen 100 V herabzusetzen. Danach können sie mit den entsprechenden Geräten einfach gemessen werden. Diese «Verkleinerung» der hohen Spannungen auf eine messbare Grösse wird mittels Spannungsteiler durchgeführt. Je nach der Form der zu messenden Hochspannung werden an die Spannungsteiler verschiedene Bedingungen gestellt. Generell müssen alle Spannungsteiler folgende zwei wesentlichen Bedingungen erfüllen:

- auf der Niederspannungsseite des Teilers soll ein getreues Abbild der Hochspannung am Prüfobjekt erhalten werden;

- die Rückwirkung des Spannungsteilers auf die zu messende Spannung soll vernachlässigbar bleiben oder eine gewollte Form annehmen (z.B. als Belastungskapazität des Stoss-generators).

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden insbesondere bei der Messung von extrem schnellveränderlichen und sehr hohen Spannungen (mehrere MV) grosse Fortschritte erzielt [1...4]. Diese Erkenntnisse fanden auch in entsprechenden internationalen und einigen nationalen Vorschriften ihren Niederschlag (z.B. IEC-Publ. 60-1 bis 4, VDE 0432 [5; 6]). Darin wurden die wesentlichen Eigenschaften des Hochspannungs-Messkreises für die Messung der genormten Prüfspannungen, z.B. der Blitzstossspannung 1,2/50, definiert. Da jedoch die Ausarbeitung von internationalen Vorschriften sehr

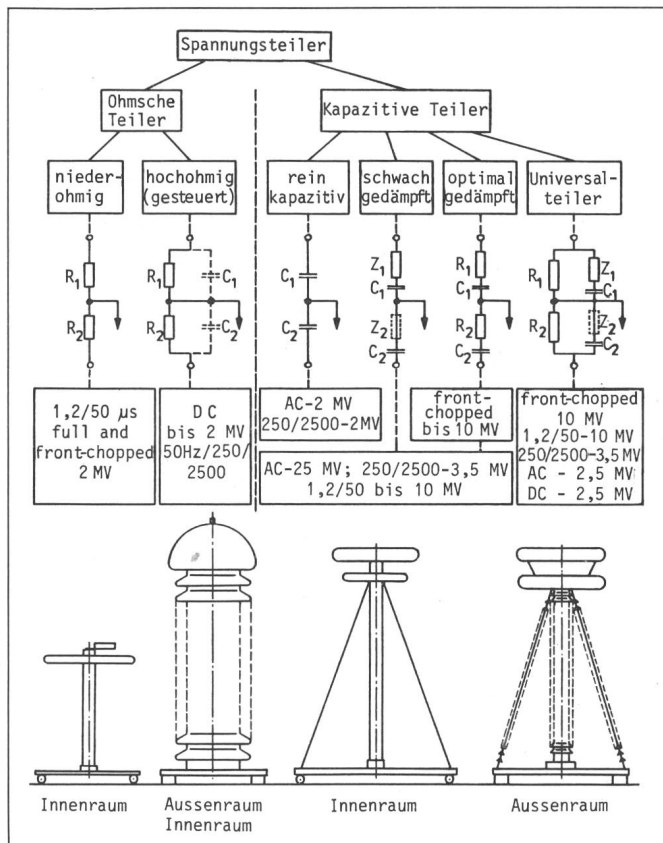


Fig. 1
Übersicht über die wichtigsten Teilertypen
Front-chopped = in der Front abgeschnitten

Adresse des Autors

Dr.-Ing. Martin Modrusan, Emil Haefely & Cie. AG,
4028 Basel.

langwierig ist, sind diese zum Teil bereits bei ihrer Herausgabe (Publ. 60-4, 1977) durch neuere Erkenntnisse z.T. überholt. Um eine Mindestgenauigkeit bei der Messung der Blitzstossspannung 1,2/50, insbesondere deren Anstiegszeit, zu gewährleisten, wird eine teilweise Neudefinierung der Übertragungseigenschaften erforderlich sein (siehe Abschnitt 4.2).

2. Übersicht über die Teiltertypen

Für die Praxis ist es vor allem wichtig, die richtige Wahl des Teiltertyps für die Messung einer bestimmten Spannungsform zu treffen. In Figur 1 sind alle wichtigen Teiltertypen mit ihren Grundschemas, Spannungsarten, den geeigneten Spannungsbereichen sowie mit ihren Ausführungsformen angegeben. Bereits daraus könnte der entsprechende Teiltertyp gewählt werden. In Figur 2 sind zudem die Frequenzbereiche der einzelnen Spannungsformen sowie die zu verwendenden Teiltertypen angegeben.

Bei den *ohmschen Teilern* unterscheidet man zwei Typen, die sich im Ohmwert um einen Faktor von rund $5 \cdot 10^4$ unterscheiden. Der niederohmige Teiler wird ausschliesslich für die Messung der Blitzspannung 1,2/50 verwendet, wobei der Ohmwert stets kleiner als 20 k Ω bleibt.

Der *hochohmige Teiler* wird hauptsächlich für die Gleichspannungsmessung (HGÜ) eingesetzt. Um die Widerstandssäule bei allfälligen Spannungszusammenbrüchen vor Beschädigungen zu schützen, wird normalerweise parallel eine kapazitive Steuersäule eingebaut. Diese kann ihrerseits für Messzwecke bis zu einigen kHz eingesetzt werden. Der Ohmwert des Teilers wird durch zwei Kriterien bestimmt: Einerseits soll der Messstrom möglichst gross sein, um den durch Kriechströme verursachten Messfehler zu unterdrücken ($I_{\min} = 0,5 \text{ mA}$); andererseits soll die Verlustleistung möglichst gering bleiben.

Da bei Gleichspannung wegen der Oberflächenverschmutzung grosse Kriechweglängen erforderlich sind (bis 3 cm/kV), haben hochohmige Teiler relativ grosse Abmessungen (etwa 1 m/100 kV).

Mit ungesteuerten hochohmigen Teilern kann praktisch nur Gleichspannung gemessen werden. Die Bandbreite F_b eines derartigen Teilers wird in [3] wie folgt angegeben:

$$F_b \approx (50 \dots 150) / (H \cdot U)$$

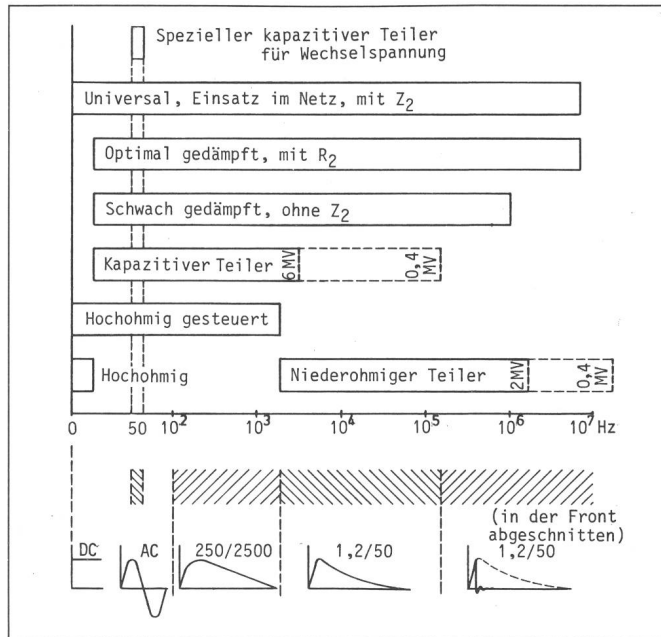


Fig. 2
Anwendung der einzelnen Spannungsteilertypen nach dem Frequenzbereich
(Zuleitung zum Teiler berücksichtigt)

H = Teilerhöhe in m, U = Spannung in MV. Für eine Spannung von $U = 500 \text{ kV}$ und eine entsprechende Höhe $H \approx 5 \text{ m}$ ergibt sich somit eine mittlere Bandbreite $F_b \approx 30 \text{ Hz}$. Eine Messgenauigkeit von rund 1% wäre jedoch erst bei siebenmal kleinerer Frequenz möglich, d.h. unterhalb 4 Hz. Deshalb scheidet dieser Teiltertyp für die Spannungsmessungen der Industriefrequenz aus. Bei *kapazitiven Teilern* unterscheidet man zwischen rein kapazitiven und gedämpft kapazitiven Typen.

Der *rein kapazitive Teiler* (d.h. ohne jegliche Dämpfung) wird hauptsächlich für die Messung von relativ langsamen Spannungsverläufen, wie etwa für Wechselspannung und Schaltspannung, eingesetzt. Spezielle Wechselspannungsteiler werden im Niederspannungsteil meistens durch eine Sperre gegen transiente Spannungen geschützt (d.h. es sind keine höheren Frequenzen messbar). Da die Schaltspannung praktisch immer zusammen mit der Blitzspannung vorkommt, wird deswegen meistens der geeignetere gedämpft kapazitive Teiler für die Messung der beiden Impulsformen eingesetzt.

Bei einer allfälligen Messung der vollen Blitzspannung (1,2/50) mit dem rein kapazitiven Teiler können grosse Messfehler sowohl im Frontteil (starke Schwingungen, insbesondere bei Stosseneratoren mit internen Seriewiderständen) als auch im Scheitel auftreten. Will man diesen letzten Fehler in vertretbaren Grenzen halten, dann sollten die zu messenden Ampli-

tudenspektren eine Frequenz von rund $0,1 f_0$ nicht überschreiten. Dabei wird mit f_0 die Eigenfrequenz des gesamten Hochspannungsmesskreises des kapazitiven Teilers bezeichnet. Man kann diese näherungsweise mit $f_0 = 1/2\pi\sqrt{CL}$ bestimmen, wobei C die Teilerkapazität und L die ganze Kreisinduktivität darstellt. Diese kann mit dem empirischen Ausdruck $L \approx H (6,6 - 0,36 H) \cdot 10^{-6}$ annähernd bestimmt werden (Teilerhöhe $H \approx 2,5 \cdot U_{\text{MV}}$).

Zu erwähnen ist, dass das Amplituden-Frequenzspektrum der Blitzspannung z.B. bei 200 kHz noch 11% beträgt. Würde man auch dieses mit einem kapazitiven Teiler erfassen wollen, dürfte dieser z.B. bei 2 MV eine Kapazität von höchstens 250 pF haben. Auch dann würde man, wie erwähnt, starke Schwingungen im Frontteil erhalten, die eine Auswertung stark beeinträchtigen würden [4]. Deswegen kann der rein kapazitive Teiler für eine genaue Blitzstossmessung nicht herangezogen werden.

3. Spannungsteiler für die Messung von rasch veränderlichen Spannungen

3.1 Ermittlung der Sprungantwort

Aus dem Vorhergehenden geht hervor, dass für die Messung schneller Spannungen (z.B. Blitzstoss 1,2/50 μs) lediglich der niederohmige Teiler sowie die gedämpft kapazitiven Teiltertypen in Frage kommen. Bei der Messung der Blitzspannung mit einem Teiler wird dieser zwangsläufig zum Be-

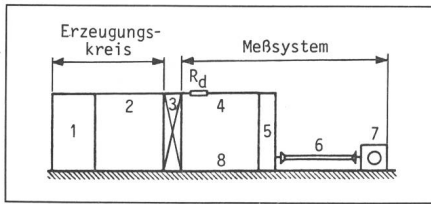


Fig. 3 Prinzipieller Aufbau eines Hochspannungsprüfkreises

- 1 Stossspannungsgenerator
- 2 Zuleitung zum Prüfling
- 3 Prüfling
- 4 Zuleitung zum Spannungsteiler
- 5 Spannungsteiler
- 6 Messkabel
- 7 Messinstrument
- 8 Erdrückleitung

standteil des ganzen Hochspannungsprüfkreises (Fig. 3). Dabei wird gemäss IEC-Publ. 60-4 [5] der Messkreis als Dreikomponenten-Messsystem definiert, das aus einem Abschlusswiderstand am Eingang der Zuleitung, aus der Zuleitung und aus dem Spannungsteiler besteht. Wenn der Zuleitungswiderstand fehlt (speziell im MV-Bereich, wo dieser sehr unhandlich wäre), spricht man vom Zweikomponenten-Messsystem. Diese Definition setzt voraus, dass der Hochspannungsteiler ausschlaggebend für die Güte des ganzen Messsystems ist. Messkabel und Messinstrument sind meistens von derartiger Qualität, dass sie die ganze Messgenauigkeit nicht beeinträchtigen. Der Niederspannungsteil des Teilers dagegen kann eine grössere Beeinflussung der Messeigenschaften hervorrufen, was noch erörtert wird.

Die Güte eines Hochspannungsmesssystems wird gemäss IEC-Publ. 60-4 am zuverlässigsten mittels dessen Übertragungseigenschaften beurteilt, wie dies in Figur 4a schematisch dargestellt ist; bei angelegter Sprungspannung am Anfang der Hochspannungszuleitung (d.h. zwischen 3 und 8 in Fig. 3) registriert man mit einem Oszilloskop den Verlauf der Ausgangsspannung. Bei der Auswertung der Sprungantwort sind folgende Einzeldaten für die Praxis wichtig:

- der fiktive Beginn der Rechteckstossantwort $0'$
- die Antwortzeit T
- die Teilantwortzeit T_α
- die Anfangsverzerrungszeit T_0
- die Beruhigungszeit auf Endwert

Andere Daten, wie z.B. die Antwortzeit der Zuleitung und diejenige des Teilers allein, sind für die Praxis von geringerer Bedeutung.

Die Vorschriften (IEC, VDE) fordern für die Messung der genormten Stossspannungen von einer Hoch-

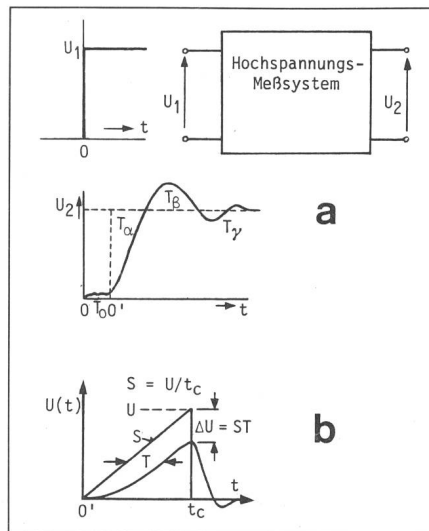


Fig. 4 Übertragungseigenschaften

- a Definition der Übertragungseigenschaften eines Hochspannungsmesssystems Antwortzeit $T = T_\alpha + T_\beta + T_\gamma + \dots$
 b Messfelder einer linear ansteigenden Spannung

spannungs-Messeinrichtung folgende Werte:

- Blitzstoss (1,2/50) $|T| < 200 \text{ ns}$
- abgeschnittener Blitzstoss $|T| < 0,05 T_c$
($T_c = \text{Abschneidezeit}$)
- Schaltstoss (250/2500) $|T| < 0,1 |T_0|$
($T_{cr} = 250 \mu\text{s}$)

Es ist zu beachten, dass diese Werte im tatsächlich verwendeten Prüfaufbau ermittelt werden müssen.

3.2 Ohmscher Teiler

Der ohmsche Teiler wird für die Messung der Blitzspannung lediglich noch dort eingesetzt, wo seine geringe Rückwirkung auf die Spannungsform von Vorteil ist (z.B. bei den Transformatorprüfungen). Ausserdem ist das Übersetzungsverhältnis des ohmschen Teilers von der kapazitiven Kopplung

zu den umliegenden Objekten völlig unempfindlich.

Der Teiler wird meistens als antiinduktiver Drahtwickel auf einem Isolierzylinder ausgeführt. Hochspannungsseitig wird er oft in einen mit Isolieröl gefüllten Zylinder eingebaut (grössere Spannungsfestigkeit und grössere thermische Belastbarkeit). Der Niederspannungsteil wird aus gleichartigen, handelsüblichen Widerständen, jedoch ohne Isolieröl ausgeführt.

Bei der Auslegung eines ohmschen Teilers geht man am besten von den in 3.1 erwähnten Bedingungen aus. So wäre für die oft erforderliche Messung der in der Front abgeschnittenen Blitzspannung ($T_c = 0,5 \mu\text{s}$) eine maximale Antwortzeit $T < 25 \text{ ns}$ nötig. In der Praxis kann die Antwortzeit relativ genau als $T = R \cdot C_e / 8$ bestimmt werden. Die Streukapazität C_e zwischen dem Widerstandskörper und Erde beträgt

$$C_e \approx Kh / \ln [(1,15 (h/a))]$$

$K \approx 56$ ohne Kopfabschirmung und $K \approx 40$ mit Kopfabschirmung; $h = \text{Widerstandslänge}$, $d = \text{Widerstandsdurchmesser}$. Die richtig bemessene Kopfabschirmung bewirkt eine Linearisierung der Verteilung der raschen Spannungsänderungen und führt dadurch zur Verbesserung der Messeigenschaften (d.h. kleines T) [5]. Die Kapazität dieser Abschirmung zur Erde C_p (Fig. 5) bildet dabei zusammen mit der Zuleitungsinduktivität L_z einen Schwingkreis.

Um die Schwingungen bei der Sprungantwort zu bedämpfen, ist ein Dämpfungswiderstand am Teilerkopf von $R_d \approx 200-400 \Omega$ erforderlich. Bei weniger handlichen, jedoch übertragungsmässig etwas besseren Varianten kann der Dämpfungswiderstand am Anfang der Zuleitung angebracht werden. Er wird vorteilhaft der Zuleitungs-Wellenimpedanz angepasst, nämlich $R_z \approx 60 \ln (4h/d_0)$ (Fig. 5).

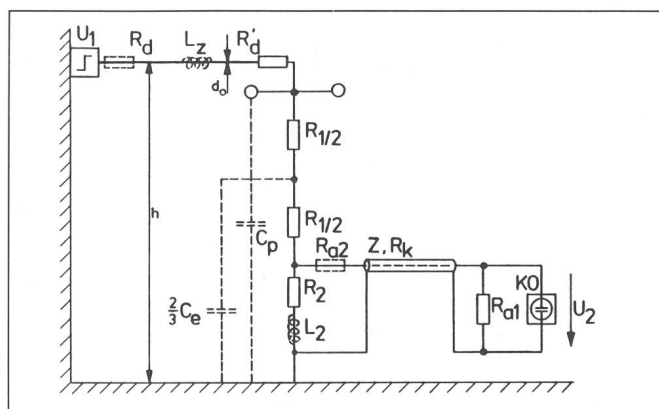


Fig. 5 Hochspannungsmesssystem eines niederohmigen Spannungsteilers

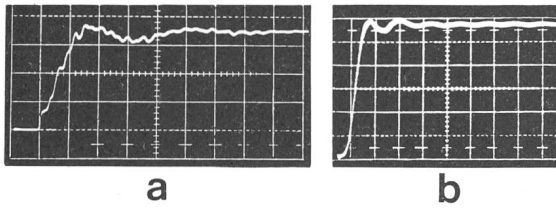


Fig. 6 Rechteckstossantwort der 2-MV-Spannungsteiler

Skala 100 ns
 a ohmscher Spannungsteiler 15 k Ω
 $T_a \approx 68$ ns, $T = 65$ ns
 b gedämpft kapazitiver Spannungsteiler
 $T_a \approx T = 25$ ns, $R_1 = 400$ Ω ,
 $C_1 = 284$ pF, $R_d = 250$ Ω

Will man den Teiler z.B. für die Messung der 1-MV-Blitzspannung auslegen (Teilerlänge etwa 2 m/MV), so dürfte dieser einen Ohmwert von max. 11 k Ω haben. Dieser Wert muss in zwei Hinsichten überprüft werden:

- der Teiler darf den Rückenteil der Blitzspannung nicht stark beeinflussen (d.h. $R \gg R_e =$ Entladungswiderstand des Generators);
- die im Teiler umgesetzte Energie darf den Teiler nicht beschädigen (Richtwert maximal 2 Stösse/min zu je 12 kJ pro m Teilerlänge).

Diese Bedingungen erfordern bereits bei 2-MV-Generatoren einen Ohmwert des Teilers von rund 15 k Ω , was eine Antwortzeit $T \approx 65$ ns zur Folge hätte (Fig. 6a). Die in der Front abgeschnittene Blitzspannung kann somit nicht mehr gemäss der geforderten Genauigkeit gemessen werden. Man kann näherungsweise für die Antwortzeit der ohmschen Teiler schreiben:

$$T \approx 2,25 \cdot R U_{(MV)} \cdot 10^{-12}$$

Die Sprungantwort des ohmschen Teilers kann noch durch verschiedene Anpassungen im Niederspannungsteil, (z.B. durch die Erhöhung der Eigeninduktivität von R_2 , Fig. 5), stark beeinflusst werden [8].

Ein Vorteil des ohmschen Teilers besteht in einer einfachen und genauen Überprüfung des Übersetzungsverhältnisses. Bei angelegter Gleichspannung U_1 (etwa 100 V) an die Eingangsklemmen wird die Ausgangsspannung U_2 gemessen (Fig. 5). Rechnerisch wird das Übersetzungsverhältnis aus den gemessenen Widerständen ermittelt, nämlich als

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_d + R_1 + R_S}{R_S} \cdot \frac{R_K + R_{a1}}{R_{a1}}$$

wobei

$$R_S = [R_2 \cdot (R_K + R_{a1})] / (R_2 + R_K + R_{a1})$$

ist. Der Eigenwiderstand des Messkabels R_K soll dabei berücksichtigt werden. Der zweite Abschlusswiderstand R_{a2} kann bei sehr langen Kabeln sowie bei $R_2 \ll Z$ von Vorteil sein, indem er zusammen mit R_1 und R_2 das Kabel reflexionsfrei abschliessen soll. Zugleich

wird das Übersetzungsverhältnis verdoppelt.

3.3 Gedämpft kapazitiver Teiler

Der grosse Nachteil des kapazitiven Teilers, nämlich seine Neigung zur Schwingung bei schnellen Spannungsänderungen, kann durch das Einfügen von Widerständen in Serie zu den Kondensatoren behoben werden [2]. Damit entsteht der universell brauchbare gedämpft kapazitive Spannungsteiler, der für alle Spannungsformen (ausser für Gleichspannung) und Spannungshöhen gebraucht werden kann. Für die Messung von Blitzspannungen über 2 MV ist er der einzig brauchbare Teiler typ überhaupt.

Der Dämpfungswiderstand kann dabei entweder extern angebracht (bis etwa 1 MV) oder verteilt im Hochspannungskondensator ausgeführt werden. Bei der letzten Lösung werden die Schwingungen im Hochspannungskondensator, die durch mehrfache Reflexionen am Teilerkopf bzw. Teilerfuss entstehen, ebenfalls gedämpft.

Für die Bemessung des Dämpfungswiderstandes hat man zwei Wege eingeschlagen. Man unterscheidet dabei (Fig. 1) den optimal gedämpft kapazitiven Spannungsteiler [2] und den schwach gedämpft kapazitiven Spannungsteiler [4].

Der erste besitzt einen primärseitigen Widerstand von etwa 800...1200 Ω , der nach der Beziehung $R \approx 4\sqrt{L/C_e}$ ausgelegt wird ($L =$ Induktivität des Kondensators, $C_e =$ Streukapazität des Kondensators zur Erde). Der Ohmwert ist dabei von der Spannungshöhe unabhängig. Die Primärkapazität dagegen muss der Spannungshöhe angepasst werden (Fig. 17), um dadurch den Einfluss der Umgebung (C_e) auf das Übersetzungsverhältnis vernachlässigen zu können. Die Zeitkonstante des Primärteils wird einige 100 ns betragen. Dies hat zur Folge, dass beim allfälligen Fehlen einer zusätzlichen Belastungskapazität (ausser Streukapazitäten) die Rückwirkung des Spannungsteilers auf die Blitzstossspannung im Stirnteil zu stark wird [9]. Ausserdem muss im Niederspannungsteil immer ein Seriedämpfungswiderstand eingebaut sein (Fig. 1), um bei hohen Frequenzen die

Übertragungseigenschaften zu verbessern. Da bei diesem Teiler der Dämpfungswiderstand grösser als die Wellenimpedanz der Zuleitung ist, muss am Anfang der Zuleitung immer ein Abschlusswiderstand eingebaut werden, um Reflexionen zu vermeiden (R_d in Fig. 7 sowie Vergleichsmessung Fig. 8a, b). Dieser Widerstand wird bei Spannungshöhen von mehr als 4 MV während einiger 10 ns praktisch mit voller Spannung beansprucht und muss dementsprechend ausgelegt werden.

Die erwähnten Nachteile des optimal gedämpften Spannungsteilers führten in der Praxis zu einer Reduktion des Dämpfungswiderstandes [4], wobei die Zeitkonstante des Hochspannungsteils unter 150 ns bleibt. Dadurch kann die Rückwirkung auf den Stirnteil der Blitzspannung vermieden werden. Ausserdem kann auf den Abschlusswiderstand der Zuleitung verzichtet werden, da der Dämpfungswiderstand im Spannungsteiler (250...500 Ω) als Zuleitungsabschluss wirkt. Der Dämpfungswiderstand im Niederspannungsteil kann ebenfalls weggelassen werden ($R_2 = 0$). Die Sprungantwort des Spannungsteilers weist dabei kleinere Überschwängung auf, wird jedoch zugleich langsamer.

Fügt man noch hinzu, dass im MV-Bereich die einzelnen Hochspannungseinheiten des schwach gedämpften Spannungsteilers kurzgeschlossen werden können (z.B. zur Anpassung des Übersetzungsverhältnisses), werden die Vorteile dieses Teiler typs durch seine universelle Anwendbarkeit noch auffälliger.

Die Kombination des gedämpft kapazitiven Spannungsteilers mit dem hochohmigen Spannungsteiler ergibt einen universellen Teiler typ. Mit diesem können von der Gleichspannung bis zu höchsten Frequenzen alle Spannungen mit gleicher Genauigkeit gemessen werden (vgl. Fig. 1). Allerdings kann bei diesem Teiler typ durch Kurzschliessen der einzelnen Hochspannungseinheiten ein Unterschied zwi-

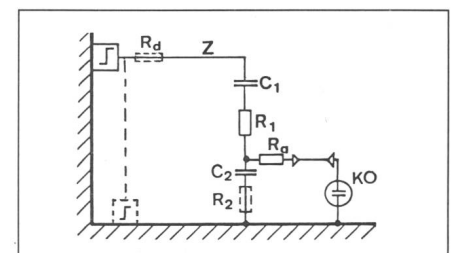


Fig. 7 Anordnung der Sprungantwortmessung eines gedämpft kapazitiven Spannungsteilers

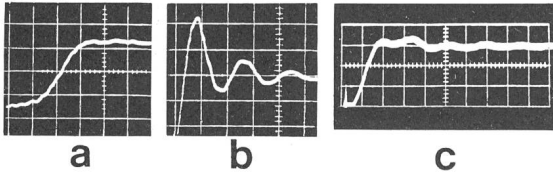


Fig. 8 Rechteckstossantwort des gedämpft kapazitiven Spannungsteilers

- a optimal gedämpfter Spannungsteiler 4,8 MV, $R_1 = 1000 \Omega$, $C_1 = 360 \text{ pF}$, $R_d = 500 \Omega$, $T_a \approx T = 45 \text{ ns}$, 50 ns/div
- b wie a, jedoch $R_d = 0$, $T_a = 32 \text{ ns}$, $T = -73 \text{ ns}$, $\ddot{u} = 82\%$, 200 ns/div
- c schwach gedämpfter Spannungsteiler 4,8 MV mit $R_d = 0$, $R_1 = 400 \Omega$, $C_1 = 380 \text{ pF}$, $T_a = 100 \text{ ns}$, $T = 75 \text{ ns}$, 200 ns/div

schen den Übersetzungen mit ohmschem bzw. kapazitivem Zweig auftreten (Einfluss der Streukapazität).

4. Messeigenschaften des gedämpft kapazitiven Spannungsteilers

Nachdem in den vorhergehenden Betrachtungen die eminente Wichtigkeit des gedämpft kapazitiven Spannungsteilers für die Messung der Blitzspannungen verdeutlicht wurde, wird dieser im nachfolgenden Abschnitt als Teil des ganzen Messsystems analysiert.

4.1 Transiente Übertragungseigenschaften

Wie erwähnt, ist die Sprungantwortmessung die beste und übersichtlichste Methode für die Überprüfung der Messeigenschaften eines Hochspannungsmesskreises. In Figur 7 ist die übliche Anordnung zur Durchführung dieser Messung angegeben. Die von IEC empfohlene Messanordnung in einer Rechteckschleife, wobei der Sprungspannungs-Generator am Boden aufgestellt wird, könnte bei der Beurteilung der gemessenen Sprungantwort zu Fehlschlüssen führen. So wäre z.B. in dieser Anordnung als Folge der grösseren Kreisinduktivität das Überschwingen in der Sprungantwort, insbesondere für den Fall $R_2 = 0$, grösser. Wie erwähnt, ist beim optimal gedämpften Spannungsteiler der Abschlusswiderstand R_d am Anfang der Zuleitung unerlässlich. In Figur 8 ist die Rechteckstossantwort eines derartigen Spannungsteilers wiedergegeben. Bei $R_d = 0$ erhält man dabei ein starkes Überschiesse. Die Messung der Blitzspannung mit einem derartigen Messsystem wäre deshalb fehlerhaft. An einem vergleichbaren Spannungsteiler, der lediglich einen 400- Ω -Dämpfungswiderstand hat, konnte auch bei $R_d = 0$ die Überschwingung noch unter 10% gehalten werden (Fig. 8c). Die Zuleitungs-

impedanz betrug dabei $Z \approx 560 \Omega$. Die um etwa 50% grössere Antwortzeit ist in diesem Fall hauptsächlich auf das Fehlen des Dämpfungswiderstandes im Niederspannungsteil ($R_2 = 0$) zurückzuführen. Die Beeinflussung der Antwortzeit durch die einzelnen Teile des Messsystems wurde z.B. in [10] mit

$$T \approx R_1 C_e / 6 + R_1 C_1 - R_2 C_2 - \tau_z + R_d \Sigma C$$

angegeben (Fig. 9). τ_z ist die Laufzeit in der Hochspannungs-Zuleitung (3,33 ns/m), ΣC die gesamte Eingangskapazität (d.h. $\Sigma C = I_1 / \omega U_i$) und $C_1 = I_2 / \omega U_i$ die wirksame Primärkapazität des Messsystems. Es ist offensichtlich, dass bei $R_d = 0$ die Antwortzeit < 0 sein kann (Fig. 8b). Sie ist demzufolge allein keineswegs ausreichend zur Beurteilung der Güte eines Messsystems. Für den Fall $R_d = 0$ und $R_2 = 0$ wird bei Vernachlässigung des ersten Gliedes ($R_1 C_e / 6 < 10 \text{ ns}$) sowie der Laufzeit τ_z die Antwortzeit $T \lesssim R_1 C_1$.

Gerade diese Variante des Spannungsteilers wird meistens verwendet, insbesondere wenn dessen Kapazität gleichzeitig als Grundbelastung des Stossgenerators dienen soll. Man wählt dabei die Zeitkonstante $R_1 C_1 \approx 100 \text{ ns}$, was gemäss IEC-Vorschriften (vgl. 3.1) ausreichend für die Messung der vollen und im Rücken abgeschnittenen Blitzspannung ist. Die Grundschwingung

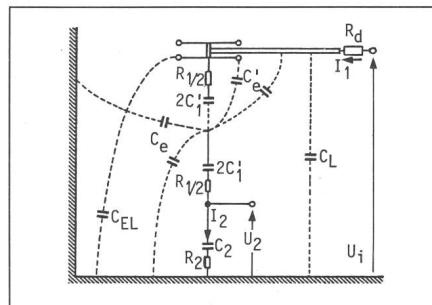


Fig. 9 Streukapazitäten im Messsystem eines kapazitiven Spannungsteilers

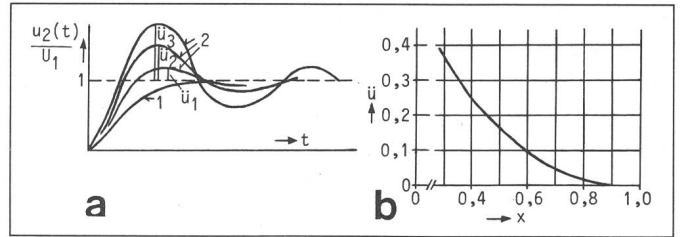


Fig. 10 Ermittlung des Überschiesse der Sprungspannungsantwort eines gedämpft kapazitiven Spannungsteilers bei $R_d = 0$ und $R_2 = 0$

- a qualitativer Verlauf der Sprungstossantwort
 - 1 aperiodischer Verlauf
 - 2 Überschiesse \ddot{u}_i ($i = 1, 2, 3$)
- b Überschiesse \ddot{u} als Funktion der relativen Kreisdämpfung $x = R_1/20 \sqrt{L/C_1}$

folgt dabei der Gesetzmässigkeit eines L - R - C -Schwingkreises, wobei das Spannungsüberschiesse am Kondensator der Figur 10 entnommen werden kann. Die gesamte Kreisinduktivität L ist rund 20% grösser als die in 3.3 angegebene Induktivität beim kapazitiven Spannungsteiler. Würde man jedoch die Sprungantwortmessung nach IEC in einer Rechteckanordnung durchführen (Fig. 7, gestrichelte Anordnung), dann würde die Induktivität der vertikalen Zuleitung ein grösseres Überschiesse hervorrufen. Dies könnte zu einer falschen Beurteilung der Messgenauigkeit bei der Blitzstossmessung führen.

Für eine vorentladungsfreie Prüfung, insbesondere bei Schalt- und Wechselspannungen, ist eine entsprechend dimensionierte Abschirmung erforderlich [11]. Diese hat mit ihrer Erdkapazität C_{EL} (Fig. 9) einen Einfluss auf die Rechteckstossantwort des Spannungsteilers. In Figur 11 ist der Unterschied in der Sprungantwort mit bzw. ohne Kopfabschirmung wiedergegeben. Die Kopfabschirmung wirkt dämpfend auf die Schwingungen; zugleich verlangsamt sie die Anstiegszeit (d.h. grösseres T_a).

Die Hochspannungszuleitung kann entweder mit einem Rohr (Durchmesser dem Spannungsniveau angepasst) oder mit einem dünnen Draht ausgeführt werden. Beim Messsystem mit dem Abschlusswiderstand R_d wird dieser der jeweiligen Wellenimpedanz angepasst, wodurch der Unterschied in der Rechteckstossantwort geringfügig bleibt. Für den Fall $R_d = 0$ dagegen wirkt die höhere Wellenimpedanz dämpfend auf die überlagerten transienten Schwingungen (Fig. 12). Dieser anscheinende Vorteil der Drahtzuleitung kann jedoch bei hoher Spannung, infolge der starken Entladung, einen Fehler des Übersetzungsverhältnisses zur Folge haben (vgl. Fig. 19b).

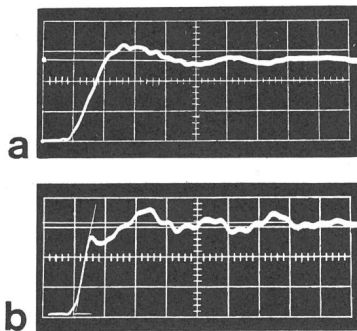


Fig. 11 Einfluss der Kopfabschirmung auf die Rechteckstossantwort eines gedämpft kapazitiven Spannungsteilers

($U = 3 \text{ MV}$, $R_d = 250 \Omega$, mit R_2 , Abschirmung: Doppeltorus)
Messanordnung gemäss Fig. 7, Skala 100 ns
a mit Kopfabschirmung
b ohne Kopfabschirmung

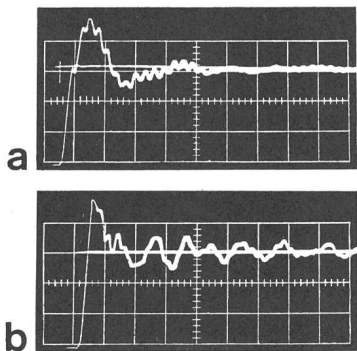


Fig. 12 Einfluss der Zuleitungs-Wellenimpedanz auf die Rechteckstossantwort des Spannungsteilers nach Figur 11 bei $R_d = 0$

a $Z = 630 \Omega$ (Draht $\varnothing 1 \text{ mm}$)
b $Z = 330 \Omega$ (Rohr $\varnothing 150 \text{ mm}$)
Teilung 200 ns

Der angegebene Ausdruck für die Antwortzeit T_{basiert} auf einem Ersatzschaltbild des Hochspannungs-Messkreises. Dabei wurde der Spannungsteiler zusammen mit dem Niederspannungsteil als gleichmässig aufgebaut angenommen. Um diese Voraussetzung erfüllen zu können, sollte z.B. bei einem 3-MV-Spannungsteiler für die maximale Messspannung von 1500 V der Niederspannungsteil eine Länge von rund 4 mm haben. Da dies nicht realisierbar ist, kann eine gewisse Abhilfe durch extrem niederinduktive Bauweise geschaffen werden (d.h. mehrere parallel geschaltete Elemente für C_2 und R_2). Dennoch wird ein gewisser Einfluss des Niederspannungsteiles auf die Sprungantwort des Spannungsteilers bestehen bleiben. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Induktivität des Niederspannungsteiles überproportional gross ist (d.h. $L_2 > L_1/n$). In Figur 13 ist die Rechteckstossantwort eines 3-MV-Spannungsteilers mit zwei Niederspannungsteilen gleicher Eigeninduktivität, jedoch wesentlich ver-

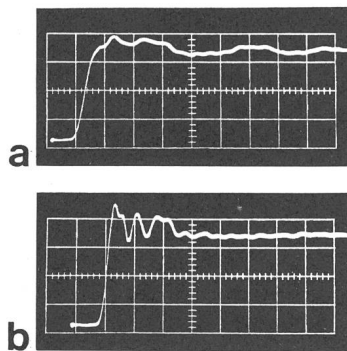


Fig. 13 Einfluss der relativen Induktivität im Niederspannungsteil auf die Rechteckstossantwort

Spannungsteiler wie in Fig. 11,
 $R_d = 0$ und $R_2 = 0$, Skala 100 ns
a Übersetzung $n_1 = 762$
b Übersetzung $n_2 = 8,5 n_1$

schiedener Übersetzungen angegeben. Während im ersten Falle die optimale Bedingung $L_2 = L_1/n_1$ recht gut erfüllt ist, beeinflusst im zweiten Falle (Fig. 13) die relativ grosse Eigeninduktivität ($L_2 \gg L_1/n_2$) die Rechteckstossantwort des ganzen Messsystems stark. Auffallend ist dabei insbesondere der steile Anstieg sowie die überlagerte Schwingung. Das wesentlich kleinere T_α begünstigt die Messung von raschen Spannungsänderungen (z.B. Durchschlägen).

Im Spannungsteiler haben die Hoch- und Niederspannungskondensatoren meistens verschiedene Dielektrika. Es ist darauf zu achten, dass die Frequenzabhängigkeit der beiden Dielektrizitätskonstanten (ϵ) gleich ist. Eine diesbezügliche Kontrolle wird am besten durch die Sprungantwortmessung

durchgeführt, wobei auch bei grösseren Ablenkzeiten (etwa $5 \dots 20 \mu\text{s}/\text{div}$) eine rechteckförmige Spannung gemessen werden muss. Abweichungen im Frequenzgang können z.B. bei Blitzstossspannung einen Messfehler von mehreren Prozenten zur Folge haben.

4.2 Fehler bei Blitzspannungsmessung als Folge der transienten Übertragungseigenschaften

Die in den IEC-Vorschriften festgelegten minimalen Werte der Antwortzeit für eine Spannungs-Messeinrichtung (vgl 3.1) genügen keineswegs, um die Blitzstossspannung mit ausreichender Genauigkeit messen zu können.

In Figur 14 ist die Beeinflussung der Blitzspannung durch das Spannungsmesssystem schematisch dargestellt. Die Abweichungen der Ausgangsspannung (U_2) von der Eingangsspannung (U_1) werden durch den gesamten Verlauf der Rechteckstossantwort beeinflusst, wobei die Antwortzeit eine eher untergeordnete Rolle spielt. Der grösste Fehler tritt bei der Messung der Stirnzeit auf (Fig. 15). Obwohl das betreffende Spannungsmesssystem den Bedingungen nach IEC für die Messung der Blitzspannung voll genügt, wird die Stirnzeit an der unteren Toleranzgrenze mit einem Fehler von -50% und die Amplitude mit einem Fehler von $+3\%$ gemessen. Vergrössert man jedoch die Antwortzeit von 45 ns auf 148,5 ns bei gleichzeitiger Reduktion der Überschwingung (\ddot{u}) auf ca. 6%, so wird der Messfehler der Stirnzeit weniger als 10% betragen; die Amplitude wird sogar fehlerlos gemessen.

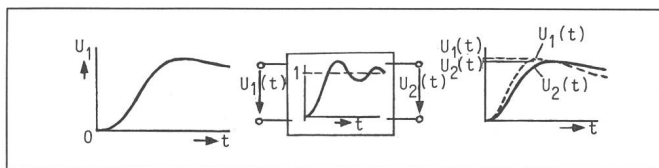


Fig. 14 Verformung der Blitzstossspannung durch das Spannungsmesssystem (Einfluss der transienten Eigenschaften)

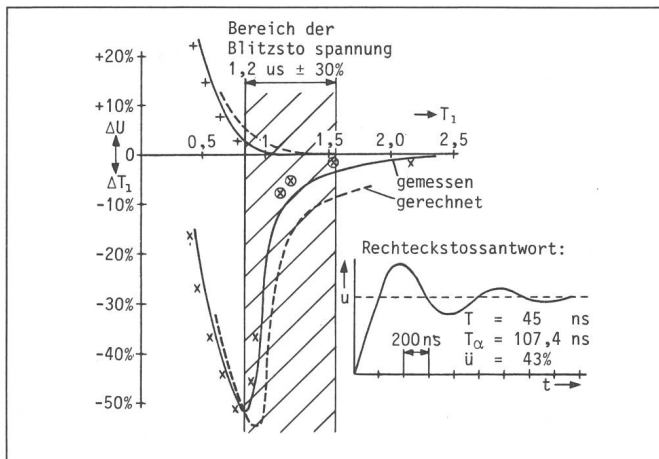


Fig. 15 Fehler bei der Messung der Stirnzeit (T_1) einer Blitzstossspannung mit einem gegebenen Spannungsteiler

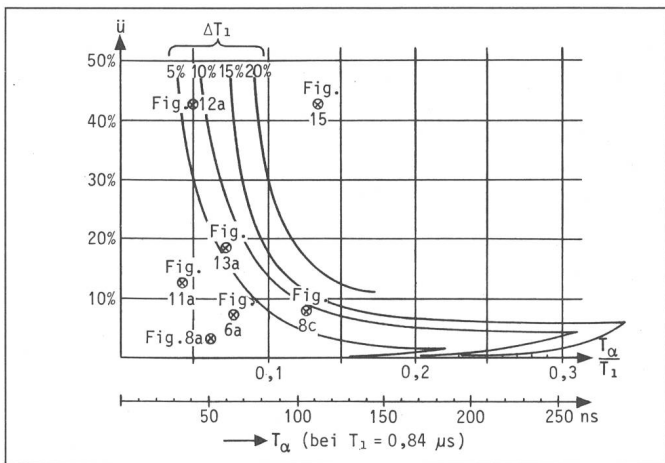


Fig. 16 Maximal zulässiges Überschwingen (\ddot{u}) in Abhängigkeit von der Teilantwortzeit T_α , um bei der Messung der Stirnzeit von Blitzstossspannungen einen bestimmten Fehler (ΔT_1) nicht zu überschreiten [12]

Bei der unteren Skala sind die Messfehler bezogen auf die untere Toleranzgrenze der Stirnzeit, d. h. $T_1 = 0,84 \mu\text{s}$.

Die erforderlichen Übertragungseigenschaften eines Messsystems sollten demzufolge neu definiert werden. Als wesentliche Kriterien werden dabei das Überschwingen sowie die Teilantwortzeit (T_α) in Frage kommen. In Figur 16 ist das maximal zulässige Überschwingen in Abhängigkeit des Verhältnisses T_α/T_1 angegeben, wobei im Unterschied zu [12] die Stirnzeit der Hochspannung U_1 (d.h. am Eingang des Messsystems) herangezogen wurde. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die zu erwartende Verfälschung der Stirnzeitmessung (ΔT_1), mit Hilfe der bekannten Übertragungseigenschaften des Messsystems (T_α, \ddot{u}), im voraus zu kontrollieren. Da der grösste Messfehler bei der Blitzspannung an der unteren Toleranzgrenze entsteht, ist es auch sinnvoll, die Messsysteme für $T_1 = 0,84 \mu\text{s}$ zu überprüfen. Die entsprechende Zeitskala in Figur 16 ermöglicht es, eine schnelle Messfehlerkontrolle für diesen kritischen Fall durchzuführen. Dies wurde für die Rechteckstossantworten der betrachteten Spannungsteilertypen durchgeführt.

Wie man weiterhin aus Figur 16 entnehmen kann, darf das Überschwingen für kleinere T_α durchaus zunehmen, ohne dass dabei der Messfehler grösser wird. Bei grösseren T_α -Werten ist ein Überschwingen von rund 6% anzustreben, was bereits aus der Systemtheorie als die günstigste Form der Sprungantwort bekannt ist. In [12] wurden die Messfehler der Stirnzeit lediglich für die Messsysteme mit reinem R-L-C-Verhalten (d.h. konzentrierte Kreiselemente, ohne Laufzeiteffekte) untersucht. Eine sinngemässe Beurteilung der anders verlaufenden Rechteckstossantworten von Messsystemen sollte eine ausreichend genaue Beurteilung des Messfehlers ermöglichen. Eine messtechnische Überprüfung der Daten der Figur 16, die an Niederspan-

nungsmodellen durchgeführt wurde, ergab allerdings bei kleineren T_α und grösseren \ddot{u} einige Unstimmigkeiten, deren Klärung interessant wäre.

Abschliessend kann gesagt werden, dass es praktisch möglich ist, Spannungsteiler bis zu den höchsten Spannungen zu bauen, mit denen man die Stirnzeit der Blitzspannung sogar an der unteren Toleranzgrenze mit einem Fehler kleiner als 10% messen kann. Es ist dabei wichtig zu wissen, dass der Fehler negativ ist. Ausserdem ist der Messfehler an der oberen Toleranzgrenze (d.h. bei $T_1 = 1,2 \mu\text{s} + 30\%$) selbst bei schlechteren Übertragungseigenschaften kleiner als 10% (Fig. 15).

4.3 Fehlerquellen bei stationären Übersetzungsverhältnissen

Das stationäre Übersetzungsverhältnis wird bei allen Typen von kapazitiven Spannungsteilern auf eine der folgenden drei Arten ermittelt:

- Messung der Hoch- bzw. Niederspannungskapazitäten C_1 und C_2 mit der Schering-Brücke. Das Übersetzungsverhältnis wird danach rechnerisch ermittelt als $n = (1 + C_2/C_1)$. Dabei ist C_2 die gesamte Kapazität im Niederspannungsteil, C_1 die wirksame Hochspannungskapazität.
- Messung der Ein- bzw. Ausgangsspannung (50 Hz, Niederspannung), wobei eine stabile Spannungsquelle sowie ein Messgerät mit ausreichender Eingangsimpedanz vorausgesetzt werden.
- Messung mit speziellen Übersetzungs-Messgeräten.

Wie in [10] gezeigt wird, beeinflussen die Streukapazitäten C_e und C_e' (Fig. 9) die wirksame Kapazität C_1 . Wenn z.B. der Hochspannungs-Messkreis derart ausgeführt würde, dass $C_e = C_e'$ ist (d.h. die Streukapazität zur Erde wäre durch die Streukapazität zu den spannungsführenden Teilen kompensiert),

dann bliebe auch die Primärkapazität durch die Umgebung unverändert (d.h. $C_1 = C_1'$). Meistens ist jedoch $C_e > C_e'$, da die kapazitive Kopplung des Spannungsteilers zu den grossflächigen Erdteilen wesentlich grösser ist als zu den spannungsführenden Teilen. Es ist deshalb naheliegend, die Umgebungsempfindlichkeit des Spannungsteilers durch die Veränderung der Erdstreukapazität C_e zu untersuchen. Falls man zunächst C_e' nicht berücksichtigt, erhält man die wirksame Kapazität zu $C_1 \approx (C_1' - C_e)/6$. Die erforderliche Kapazität C_1' muss deshalb gross genug gewählt werden, um diese gegen die max. mögliche Veränderung von C_e (z.B. Verschiebung zu einer vertikalen Wand) unempfindlich zu machen. In Figur 17 ist die erforderliche Kapazität des Spannungsteilers angegeben, und zwar für die maximale Veränderung von C_1 um 0,25% bzw. 0,50%. Wie man daraus sieht, genügt bereits eine Kapazität von 30 bis 40 pF/m, um den Einfluss der Erdkapazität vernachlässigen zu können.

Um den Einfluss der Streukapazitäten zu spannungsführenden Teilen (C_e') zu verdeutlichen, wurde ein Spannungsteiler mit extrem kleiner Kapazität gewählt. Dabei wurde der Abstand des Spannungsteilers zu einem bandförmigen Widerstand mit gleichmässiger Spannungsverteilung (Nachbildung einer Spannungsquelle) variiert. Wie dem Kurvenlauf Figur 18 zu entnehmen ist, beträgt in diesem Falle die Übersetzungsänderung bei Verschiebung des Spannungsteilers von einer Distanz $a_1 = h$ zu $a_2 = h/2$ rund 1%. Dies bedeutet, dass z.B. die Messung der Stossspannung mit einem kapazitiven Teilertyp, der unmittelbar neben dem Stossgenerator angeschlossen ist (z.B. dem Generator angebaute Spannungsteiler), mit etlichem Fehler erfolgen würde.

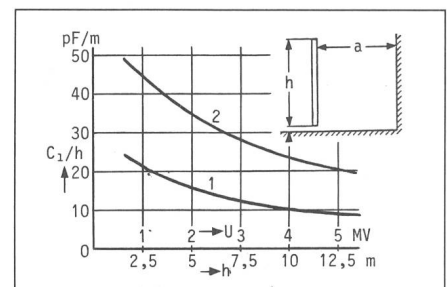


Fig. 17 Minimal erforderliche Kapazität eines kapazitiven Spannungsteilers für einen vorgegebenen Übersetzungsfehler, verursacht durch die Erdkapazität

- 1 für $\Delta n = 0,5\%$
- 2 für $\Delta n = 0,25\%$

(Verschiebung des Spannungsteilers von $a \approx \infty$ bis $a = h/2$)

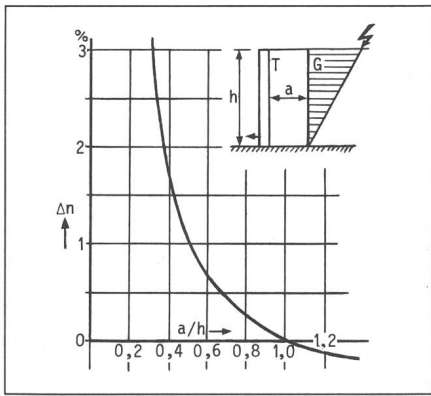


Fig. 18 Übersetzungsfehler eines Spannungsteilers T (800 kV, 13 pF/m) bei Veränderung der Distanz a zum spannungsführenden Teil G

G : Widerstandsband, 30 cm breit, mit gleichmäßiger Spannungsverteilung

Bei der Messung von Blitzspannungen wird die Zuleitung zum Spannungsteiler meistens mit einem dünnen Draht ausgeführt. Die dabei auftretenden Entladungen bewirken eine Vergrößerung der Streukapazität zum Spannungsteiler (C_e'). Die Änderung des Übersetzungsverhältnisses ist dabei spannungsabhängig, bleibt jedoch bei der erwähnten Auslegung des Spannungsteilers mit $C_1 > 40$ pF/m gering. In Figur 19b ist der Einfluss der Entladungen an der Zuleitung angegeben, wobei absichtlich ein Spannungsteiler mit geringem Kapazitätsbelag (12 pF/m) gewählt wurde [13]. Figur 19c zeigt den Einfluss der Entladungen am Zwischenflansch (d.h. Vergrößerung der Streukapazität zur Erde C_e). Es ist zu erwähnen, dass diese Entladungseffekte, die hier für die 50-Hz-Spannung gelten, bei der Blitzspannung geringer sein dürften.

Ein weiterer Übersetzungsfehler kann auftreten, wenn die Hoch- bzw. Niederspannungskapazitäten (C_1 , C_2) verschiedene Temperaturabhängigkeit aufweisen. So kann z.B. dieser Fehler bei einer Temperaturänderung von 20 °C rund 1% ausmachen.

Der Spannungsteiler befindet sich oft sehr weit von der Messstelle entfernt, wodurch die Verwendung von entsprechend langen Messkabeln (z.B. 50 m oder mehr) erforderlich wird. Die Kapazität des Kabels C_k wird dabei nach doppelter Laufzeit zur Sekundärkapazität C_2 zugeschaltet (z.B. beim 50-m-Kabel nach $2\tau = 500$ ns). Sollte dabei die Kabelkapazität (5 nF/100 m beim 50-Ω-Kabel) einige % von C_2 ausmachen, so könnte bei der Spannungsmessung im Zeitabschnitt $t < 2\tau$ ein zusätzlicher Messfehler auftreten. Zur Behebung dieses Fehlers wird am Kabelende eine Seriokombination R_3 , C_3

zwischen Kabellese und Mantel abgeschlossen, wobei die Bedingung

$$R_a (C_1 + C_2) = R_3 (C_k + C_3)$$

erfüllt werden soll [14]. Legt man jedoch die Abschlussimpedanz nach diesem Kriterium aus, so kann bei der Messung von Blitzspannungen ein beträchtlicher Messfehler resultieren. Grund dafür ist der Ohmsche Widerstand des Messkabels R_k , der ebenfalls zu berücksichtigen ist. Bei $C_2 \approx C_3$ beträgt der Messfehler $\Delta n \approx R_k/2R_3$. Eine präzise Auslegung der Abschlussimpedanz ist praktisch nur messtechnisch möglich. Strenggenommen, gilt das Übersetzungsverhältnis im Spannungssystem mit Abschlussimpedanz nur bei definierter Kabellänge und Kabeltyp und wird bestimmt als $n = [(C_s/C_1) + 1]$, mit $C_s = (C_2 + C_k + C_3)$.

5. Zusammenfassung

Aus obigen Betrachtungen über den Einsatz der verschiedenen Teilertypen kann zusammenfassend folgendes gesagt werden:

- *Hohe Gleichspannungen* werden mit ohmschen Spannungsteilern gemessen, wobei der Messstrom minimal 0,5 mA (untere Genauigkeitsgrenze) und maximal etwa 2 mA (Erwärmungsgrenze) beträgt. Bei Gefahr von raschen Spannungsänderungen wird der Widerstand kapazitiv gesteuert. In

diesem Falle könnte Wechselspannung und sogar Schaltspannung mit dem kapazitiven Zweig gemessen werden.

- *Alle Spannungsformen*, die keine Gleichspannungskomponente enthalten, können mit kapazitiven Spannungsteilern gemessen werden. Bei Spannungen, die Frequenzkomponenten über einige 10 kHz enthalten, können praktisch nur die gedämpft kapazitiven Spannungsteiler eingesetzt werden. Da alle kapazitiven Spannungsteiler umgebungsempfindlich sind, sollen sie einen Kapazitätsbelag von mindestens etwa 30 pF/m aufweisen. Einsatzmöglichkeit bis zu höchsten Spannungen.

- *Die Blitzspannung* kann, ausser mit gedämpft kapazitivem Spannungsteiler, auch mit dem relativ niederohmigen Spannungsteiler (≈ 15 kΩ) gemessen werden. Der in der Front abgeschnittene Blitzstoss kann dabei lediglich bis zu etwa 600 kV genau gemessen werden. Die Grenzspannung für den Einsatz dieses Teilertyps liegt bei 2 MV. Sein Vorteil liegt in vernachlässigbarer Rückwirkung, Unempfindlichkeit auf die Umgebung und einfachen Genauigkeitsüberprüfungen.

Literatur

- [1] A. Asner: Fortschritte auf dem Gebiete der Messung sehr hoher, rasch veränderlicher Stossspannungen. Brown Boveri Mitt. 47(1960)4, S. 239...267.
- [2] W. Zaengl: Ein neuer Teiler für steile Stossspannungen. Bull. SEV 56(1965)7, S. 232...240.
- [3] W. Zaengl: Les différents types de diviseur - Détermination du temps de réponse et du rapport. Rev. Gén. Electr. 87(1978) Numéro spécial Juin, p. 19...38.
- [4] K. Feser: Ein neuer Spannungsteiler für die Messung hoher Stoss- und Wechselspannungen. Bull. SEV 62(1971)19, S. 929...935.
- [5] Technique des essais à haute tension. Parties I/II/III/IV/V. Publications de la CEI 60-1/V, 1973/77.
- [6] Hochspannungs-Prüftechnik. Teil 1/2/3/4. VDE-Bestimmungen 0432, Teil 1/4, 1978/80.
- [7] R. Malewski and R. S. Marvada: Computer assisted design of impulse voltage dividers. IEEE Trans. PAS 95(1976)4, p. 1267...1274.
- [8] N. Hylten-Cavallius: Impulse voltage dividers with minimized response errors. CEPTEL-Technical Report No 270/81. Rio de Janeiro, Centro de Pesquisas de Energia Eletrica, 1981.
- [9] K. Feser: Heutiger Stand der Messung hoher Stossspannungen. Bericht des PTB-Seminars über «Neuere Entwicklungen in der Stossspannungsmesstechnik». Braunschweig, 10...11. März 1982. PTB-Bericht E-21(1982), S. 8...34.
- [10] M. V. Palva: Confrontés aux problèmes de mesure en THT par le «Groupe IRR-IMS». Electra -(1974)35, p. 157...254.
- [11] K. Feser: Bemessung von Elektroden im UHV-Bereich, gezeigt am Beispiel von Toroidelektroden für Spannungsteiler. ETZ-A 96(1975)4, S. 206...210.
- [12] Qi, Qing-Cheng: Errors on the measurement of the front time of lightning impulses and their relationship to step-response-parameter. Zürich, ETH-Institut für Hochspannungstechnik, 1981.
- [13] An investigation of a 6 MV impulse measuring system comprising a series-damped capacitor divider. CIGRE-WG 33.03 TFIM, Barbizon, August 21...23, 1972; Report IRR-IMS.
- [14] W. Zaengl: Ein Beitrag zur Schrittantwort kapazitiver Spannungsteiler mit langen Messkabeln. ETZ-A 98(1977)12, S. 792...795.
- [15] K. Schon: Digitale Messwertverarbeitung und -verarbeitung bei Untersuchungen mit Stossspannungen. Bericht des PTB-Seminars über «Neuere Entwicklungen in der Stossspannungsmesstechnik». Braunschweig, 10...11. März 1982. PTB-Bericht E-21(1982), S. 99...109.

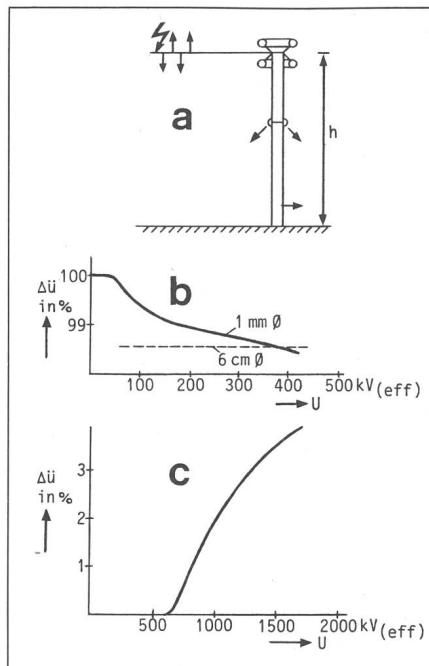


Fig. 19 Einfluss von Vorentladungen auf das Übersetzungsverhältnis n [11]

- a Anordnung
- b Entladung an der Zuleitung ($C_1 = 70$ pF, $h = 6$ m)
- c Entladung an der Zwischenabschirmung