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: 72 (1981)

Heft: 1

Artikel: Hochspannungsprüfungen von metallgekapselten, gasisolierten Anlagen Vor-Ort

Autor: Feser, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905054

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: 09.07.2025

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

Hochspannungsprüfungen von metallgekapselten, gasisolierten Anlagen Vor-Ort

Von K. Feser

621.3.027.3

Verschiedene Möglichkeiten der Hochspannungsprüfung SF_6-isolierter Anlagen werden auf ihre physikalische und technische Brauchbarkeit untersucht. Die Besonderheiten von SF_6-Isoliersystemen und von Vor-Ort üblichen Fehlern führen zu einem Vorschlag für die Prüfung, die physikalisch begründet und technisch mit relativ geringen Kosten realisierbar ist. Mit Wechselspannung, deren Amplitude etwa der Phasenspannung entspricht, soll eine Konditionierung der SF_6-Anlage erfolgen. Anschliessend erfolgt die Spannungsprüfung mit einer Impulsspannung, die schwingend ausgeführt wird und eine Frontzeit von über 100 µs haben sollte. Darnach wird ein Prüfsystem beschrieben, das speziell für Vor-Ort-Prüfungen für SF_6-Anlagen entwickelt wurde.

Diverses possibilités d'essai à haute tension d'installations isolées au SF_6 sont examinées des points de vue physique et technique. Les particularités des systèmes d'isolement au SF_6 et des défauts usuels conduisent à une proposition pour cet essai, physiquement justifiée et techniquement réalisable à peu de frais. On procède à un conditionnement de l'installation à SF_6 sous tension alternative d'une amplitude analogue à la tension de phase, puis à un essai de rigidité diélectrique sous une tension oscillatoire d'une durée de front de plus de 100 µs. L'auteur décrit ensuite un système d'essai sur place, spécialement conçu pour les installations à SF_6.

1. Einleitung

Die SF_6-Isoliertechnik ist heute aus dem Schaltanlagenbau und bei den Rohrgaskabeln nicht mehr wegzudenken. Durch sie konnte der Flächen- und Raumbedarf für elektrische Verteilanlagen im Vergleich zur konventionellen Technik auf ca. 10% reduziert werden [1]. Infolge der grösseren Betriebssicherheit durch die vollständige Metallkapselung und die Unabhängigkeit der Anlagen vor atmosphärischen Verschmutzungen und sonstigen Ausseneinflüssen ist diese Isoliertechnik aber nicht nur bei Verteilanlagen im städtischen Bereich interessant, sondern auch für Anlagen im höheren Spannungsbereich, wobei heute bereits Entwicklungen im Bereich von Übertragungsspannungen bis 1200 kV durchgeführt werden. Ein für die Vor-Ort-Prüfung wichtiger Gesichtspunkt ist die Tatsache, dass es mit dieser Technik infolge der wesentlich geringeren Kosten für die Erschliessung und Gestaltung von Gelände für die Verteilanlagen heute möglich wird, Verteilanlagen auf Staudämmen, in Kavernen oder auf unter sonstigen extremen Umweltbedingungen zu erschliessendem Gelände zu bauen.

Da im Werk nicht die vollständigen Anlagen, sondern lediglich transportfähige Baugruppen der üblichen Stück- und Typenprüfungen unterzogen werden, wird als weitere Prüfung eine zusätzliche Hochspannungsprüfung der kompletten Anlage Vor-Ort erforderlich. In den 15 Jahren seit Einführung der SF_6-Technik im Schaltanlagenbau wurde dabei diese Vor-Ort-Prüfung mehr von den vorhandenen Prüfgeräten diktiert, als von den physikalischen und technischen Notwendigkeiten. Mit der zunehmenden Verbreitung der SF_6-Technik beginnt man sich jedoch über die Vor-Ort-Prüfung vor allem bei hohen Spannungen Gedanken zu machen [2; 3; 4].

Der folgende Beitrag soll unter Berücksichtigung der Vor-Ort möglichen Fehler eine Prüfmethode und mögliche Ausführungsvarianten für die Vor-Ort nötigen Prüfanlagen für den gesamten heute diskutierten Spannungsbereich bis 1200 kV zur Diskussion stellen.

2. Heutige Prüfpraxis Vor-Ort

Die Vor-Ort-Prüftechnik hat bereits eine gewisse Entwicklung auf Grund der praktischen Erfahrungen mitgemacht. Während man in den ersten Jahren noch Anlagen ohne Spannungsprüfung Vor-Ort in Betrieb genommen hat, hat sich doch sehr schnell die Notwendigkeit einer Spannungsprüfung durchgesetzt. Logischerweise wurden dabei nach Möglichkeit die bekannten und im Werk benützten Prüfspannungen verwendet.

Die heute für die Prüfung Vor-Ort verwendeten Prüfspannungen sind: Gleichspannung; Wechselspannung, 50 Hz oder 60 Hz; Blitzstoßspannung 1,2/50 sowie oszillierende Schaltstoßspannung. Die Amplitude der Prüfspannung wird für die Wechselspannung und die Impulsspannungen in der Regel zu ca. 80% der entsprechenden Prüfspannung im Werk gewählt. Bei der Durchführung der Prüfung werden sehr verschiedene Verfahren (z.B. Anzahl der Impulsspannungen, Polarität der Impulsspannungen, Steigerung der Spannungen, Prüfdauer der Wechsel- oder Gleichspannung usw.), angewendet, die sich aus der Erfahrung der jeweils Beteiligten ergeben haben.

3. Einfluss der Vor-Ort möglichen Fehler auf das Isolierverhalten typischer Anordnungen

Die Vor-Ort auftretenden Fehler kann man auf Grund ihres physikalischen Verhaltens in zwei Kategorien einteilen:

Kategorie A: freibewegliche Teilchen, leitend oder nicht leitend.

Kategorie B: lokale, örtlich feste Feldstörungen infolge Verschiebungen von Bauteilen bei der Montage auf Grund der Toleranzen oder wegen Beschädigungen an Elektroden oder Leiter während der Montage oder des Transportes oder gar wegen vergessener Werkzeuge.

Für die Vor-Ort-Prüfung entscheidend ist, wie sich die in SF_6-Anlagen hauptsächlich angewendeten Isoliersysteme – die reine Gasisolation mit relativ homogenem Feld und die Kombination Gas/Feststoff – gegenüber den genannten Fehlern verhält [3; 5...10].

Fig. 1 zeigt die Durchschlagsspannung einer koaxialen Zylinderanordnung für verschiedene Spannungsbeanspruchungen in Abhängigkeit vom Druck [10]. Es zeigt sich, dass in einem bestimmten Druckbereich die Durchschlagsspannung mit Wechselspannungen wesentlich höher sein kann als die Durchschlagsspannung mit positiven Blitzstoßspannungen oder positiven Schaltstoßspannungen. Fig. 1 zeigt auch, dass die positiven Impulsspannungen bei diesen Bedingungen kritischer sind als die negativen. Die Erklärung ist das Vorent-

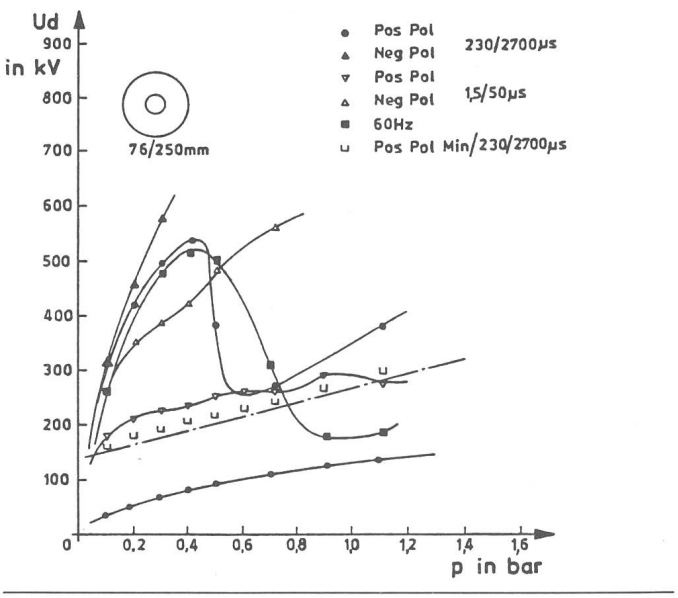

Fig. 1 Durchschlagspannung U_d einer koaxialen Zylinderanordnung mit einem 6,4 mm langen, am Innenzylinder befestigten Al-Teilchen in Abhängigkeit vom Druck [10]
Parameter: Spannungsform

ladungsverhalten an den Fehlerstellen, wobei mit Wechselspannung eine Koronastabilisierung beobachtet werden kann. Die Schlussfolgerung für die Vor-Ort-Prüfung muss sein, dass bei Vor-Ort-Prüfungen zusätzlich zur negativen Impulsspannung, die für die Dimensionierung der «sauberen» Anordnung massgebend ist, noch mit positiven Impulsspannungen zu prüfen ist. Weitere Messergebnisse [10] zeigen ähnliche Resultate für isolierte Teilchen.

In [9] wird über Messergebnisse berichtet, die zeigen, dass bei beschädigten Elektroden (ca. 1 mm Tiefe) in einem Zylinderfeld die Durchschlagsspannung mit Wechselspannungen nicht beeinflusst wird, während die negative Blitzstoßspannung stark abgesenkt wird und praktisch dem Scheitelwert der Durchschlagsspannung mit Wechselspannung entspricht. Die Folgerung für die Vor-Ort-Prüfung muss deshalb für diese Art von Fehler eine Spannungsprüfung mit negativen Impulsspannungen sein. Dies insbesondere deshalb, da die Amplituden der Prüfspannungen je nach Art der Spannungsform sehr verschieden sind. Falls man sich für eine Prüfspannung Vor-Ort von 80% der Prüfspannung im Werk entschliesst, bedeutet dies, dass die Amplitude der Vor-Ort-Prüfspannung für die Spannungsprüfung unabhängig von der gewählten Spannungsform (Wechselspannung, Blitzstoßspannung oder Schaltstoßspannung) zu 80% der Amplitude der Blitzstoßspannung im Werk. d.h. zu 80% des BIL, gewählt werden sollte.

In Fig. 2 sind Ergebnisse von Durchschlagsversuchen mit Stützern im Zylinderfeld mit oszillierenden Schaltstoßspannungen (60/4000 µs) wiedergegeben [8]. Die Durchschlagsspannung wird durch die leitenden Teilchen um über 70% abgesenkt. Diese Absenkung hängt von der Lage der Teilchen auf dem Isolator und vom Druck ab (Fig. 3). Während der Anwendung einer Wechsel- oder Gleichspannung können Schmutzteilchen in einer Anlage bewegt und auf der Oberfläche von Stützelementen abgelagert werden. Infolge einer zu niedrigen Spannung erfolgt dabei kein Durchschlag. Wegen der erheblichen Absenkung der Stoßspannungsfestigkeit der Anordnung sollte nach dem Anlegen einer Wechselspannung noch eine Überprüfung der Festigkeit mit Impulsspannungen erfolgen, um diesen Effekt auszuschliessen. Diese Prüfung sollte bei Nenndruck erfolgen.

Wertet man die Literatur [3; 5; 6; 7] aus und wendet die Ergebnisse z.B. an einem 420-kV-System an, so erhält man das in Fig. 4 dargestellte Resultat. Die Durchschlagswerte bei den einzelnen Fehlermöglichkeiten wurden prozentual aufgetragen und mit den Prüfspannungen einer 420-kV-Anlage verglichen. Es wurde dabei angenommen, dass die Dimensionierung nach der Blitzstoßspannung erfolgte, d.h. der Durchschlagswert mit der Blitzstoßspannung wurde als 100% gesetzt. Man erkennt, dass für saubere Anordnungen, sowohl die negative Blitzstoßspannung 1,2/50 als auch die negative Schaltstoßspannung 250/2500 gleich kritisch sind, obwohl die Schaltstoßspannung einen 24% kleineren Scheitelwert der Prüfspannung aufweist. Diese Tatsache kommt daher, dass die Reduktion der Durchschlagsspannung vom theoretischen Wert auch von der Spannungsform abhängig ist.

Ferner zeigt Fig. 4, dass Fehler der Kategorie A einen

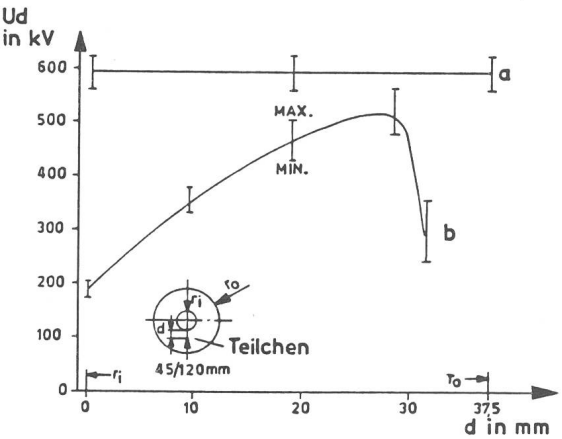

Fig. 2 Durchschlagspannung U_d mit negativen schwingenden Schaltstossspannungen in einem Zylinderfeld in Abhängigkeit vom Abstand d zwischen Innenelektrode und der Spitze eines Teilchens, das auf der Oberfläche befestigt ist [8]
a saubere Anordnung
b mit Al-Teilchen, Länge 6 mm, ∅ ≈ 0,45 mm

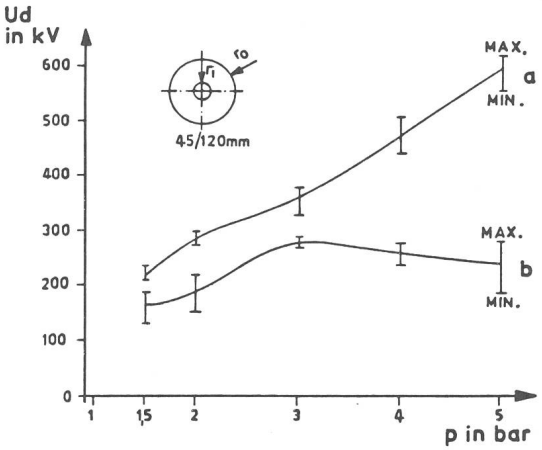

Fig. 3 Durchschlagspannung U_d mit negativen schwingenden Schaltstoßspannungen in einem Zylinderfeld in Abhängigkeit vom SF_6-Druck [8]
a Saubere Oberfläche
b Oberfläche mit Teilchen

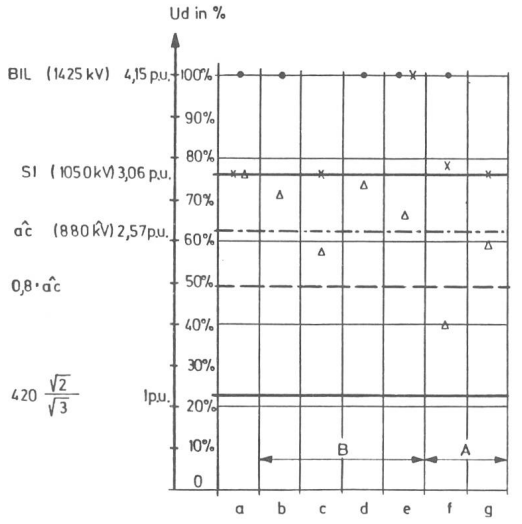

Fig. 4 Ergebnisse von Durchschlagspannungen U_d für praktische Anordnungen, verglichen mit den Prüfspannungen für eine 420-kV-Anlage

- ● Blitzstoßspannung
- × Schaltstoßspannung
- △ Wechselspannung (Scheitelwert)
- A Fehler der Kategorie A
- B Fehler der Kategorie B
- BIL Basic Insulation Level
- SI Schaltstoßspannung
- ac Wechselspannung
- p.u. Bezug auf Scheitelwert der Nenn-Phasenspannung
- a Saubere Anordnung, Zylinderfeld mit und ohne Stützer [3; 5]
- b Teilchen, befestigt am Innenzylinder, 3,5 bar [3]
- c Teilchen, befestigt am Innenzylinder, 2,5 bar [5]
- d Schraube [3]
- e Stützer mit scharfkantigem Teilchen an der Elektrode [3]
- f Stützer, Al-Teilchen auf der Oberfläche befestigt [3]
- g Bewegliche Teilchen, Zylinderfeld, 2,5 bar [5]

starken Einfluss auf die Wechselspannungsfestigkeit ausüben und dazu führen, dass die Wechselspannung die kritischste Beanspruchung wird. Dabei ist aber interessant, dass nur in einem Fall mit einer Vor-Ort-Prüfspannung von 80% der Prüfspannung im Werk ein Durchschlag auftreten würde, d.h. in allen anderen Fällen wäre die Impulsfestigkeit, die nur mit Wechselspannung kontrolliert wurde, nicht ausreichend.

Fehler der Kategorie B führen bei negativen Impulsspannungen zu den tiefsten Durchschlagswerten, wenn man die Amplitude der Prüfspannungen berücksichtigt.

Von den in der Literatur wiedergegebenen Messergebnissen sind weiterhin für die Vor-Ort-Prüfung zu berücksichtigen:

– Die Abhebespannungen für frei bewegliche Teilchen, typisch für die Praxis, liegen bei Wechselspannungsbeanspruchung bei ca. 25% der Durchschlagswerte [5]. Die Abhebespannungen bei Schaltstoßspannungsbeanspruchung liegen bei ca. 40% der Durchschlagswerte. Daraus kann abgeleitet werden, dass mit relativ niedrigen Wechselspannungen bzw. auch Schaltstoßspannungen eine Konditionierung der Anlage und bei gleichzeitiger Teilentladungsmessung auch eine Kontrolle auf Fehler der Kategorie A erfolgen kann.

– Weitere Ergebnisse [11] zeigen, dass auch mit oszillierenden Schaltstoßspannungen, sogar mit Durchschlägen eine Reinigung für Fehler der Kategorie A erzielt werden kann.

– In [3] wird für typische praxisnahe Anordnungen nachgewiesen, dass in SF_6-Systemen bei oszillierenden Schaltstoßspannungen praktisch gleiche Durchschlagswerte erzielt werden, wie mit exponentiellen Schaltstoßspannungen. Dieses Ergebnis ist bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Auswahl einer Prüfanlage zu berücksichtigen.

4. Prüfvorgang

Berücksichtigt man die Messergebnisse, so sollte aus technischen und wirtschaftlichen Gründen folgendes Vorgehen für die Vor-Ort-Prüfung von SF_6-isolierten Anlagen diskutiert werden:

a) Konditionierungsprüfung mit Wechselspannungen 50 Hz/60 Hz. Amplitude: $1{,}1 \cdot U_{phase}$; Dauer der Prüfspannung: 30 min; die Spannung sollte in Stufen von 10 bis 20% gesteigert werden. Fehlerdetektion: Teilentladungsmessung.

b) Spannungsprüfung mit oszillierenden Schaltstoßspannungen. Amplitude: 100% der relevanten Schaltstossprüfspannung im Werk (oder 80% des BIL).

Stirnzeit > 100 µs; Rückenzeit > 1000 µs.
Polarität negativ und positiv.

Anzahl Stösse: 10; die Stoßspannung sollte in Stufen von ca. 5...10% beginnend bei 50% der Prüfspannung bis zur Prüfspannung gesteigert werden. Pro Stufe sollten 5 negative Stösse angelegt werden. Fehlerdetektion: Durchschläge (Spannungsoszillogramm)

– Durchschläge, die bei mehreren Stössen bei gleicher Amplitude bestehen bleiben, deuten auf Fehler der Kategorie B.

– Durchschläge, die nach einem oder mehreren Durchschlägen auch bei höherer Spannung zu keinen weiteren Durchschlägen führen, deuten auf Fehler der Kategorie A (Reinigungsdurchschläge).

Das vorgeschlagene Prüfprogramm scheint den Eigenheiten der SF_6-Isoliersysteme und den Vor-Ort möglichen Fehlern Rechnung zu tragen. Trotzdem sollten folgende Punkte besonders diskutiert werden:

– Amplitude der Konditionierungsspannung, z.B. statt $1{,}1 \cdot U_{phase}$, 1,0 oder $1{,}2 \cdot U_{phase}$

– Dauer der Konditionierungsprüfung, z.B. statt 30 min, solange bis keine Teilentladung (< 20 pC) mehr gemessen wird.

– Statt der Konditionierung mit Wechselspannung könnte eine Konditionierung mit Schaltstoßspannungen verwendet werden, falls keine Wechselspannungsprüfanlage zur Verfügung steht. Weitere Messergebnisse sind dazu nötig, vor allem um die Anzahl und Amplitude der Schaltstoßspannungen festlegen zu können.

– Amplitude der Vor-Ort-Prüfspannung. Soll die Amplitude der schwingenden Schaltstoßspannung 80% oder 100% der jeweiligen Prüfspannung im Werk betragen. Für 100% der Prüfspannung spricht die Tatsache, dass die SF_6-Isoliersysteme auch durch mehrmalige Überschläge nicht bleibend zerstört werden, solange es sich nicht um ein defektes Stützelement handelt. Zusätzlich wird mit einer Prüfung mit 100% der Schaltstoßspannung auch eine sichere Überprüfung der Blitzstossfestigkeit mit ca. 80% der Prüfspannung gewährleistet.

– Vorgehen bei der Spannungsprüfung.

– Ist eine zusätzliche Gleichspannungsprüfung (Amplitude, Zeitdauer) von SF_6-Anlagen nötig? Beim Abschalten von Anlageteilen, falls keine magnetischen Wandler im abgeschalteten Teil eingebaut sind oder keine Erdung erfolgt, können lange andauernde Gleichspannungskomponenten auftreten. SF_6-Isoliersysteme sind besonders empfindlich gegenüber einer Gleichspannungsbeanspruchung.

5. Prüfanlagen für die Vor-Ort-Prüfung von SF_6-Anlagen

Die bei SF_6-Anlagen bis zu den höchsten Spannungen zu erwartenden Prüflingsimpedanzen sind bei Verteilanlagen Kapazitäten von 1 bis 20 nF und bei Anschluss von SF_6-Rohrleitungen Kapazitäten bis 50 nF. Öfters werden SF_6-Anlagen über Kabel eingespeist. In diesen Fällen ist es notwendig, die Kabelabgänge und evtl. auch Teile der SF_6-Anlage mit Gleichspannungen zu prüfen. Mit dem Einsatz moderner elektronischer Bauteile in Schutz- und Steuerkreisen und dem direkten Anschluss von Computern zur Führung von Hochspannungsnetzen wird auch die Problematik der Störung und Zerstörung von Bauteilen im Niederspannungsbereich bei Überschlägen

auf der Hochspannungsseite besondere Aufmerksamkeit zuteil werden. Ob dabei Hochspannungsprüfungen in Zukunft notwendig werden, ist heute noch nicht abzusehen, sollte aber bei der Entwicklung eines Vor-Ort-Prüfsystems mitberücksichtigt werden.

Tabelle I zeigt die benötigten Spannungen für die Vor-Ort-Prüfung von SF_6-Anlagen für verschiedene Übertragungsspannungen.

Bei Prüfanlagen, die für Vor-Ort-Prüfungen eingesetzt werden sollen, sind vor allem folgende Bedingungen zu beachten:

- Gewicht, vor allem max. Einzelgewicht, falls eine Anlage aus mehreren Bauteilen zusammengesetzt wird
- Volumen, besonders max. Einzelvolumen
- Transportierbarkeit (auf Strassen, in Flugzeugen)
- Benötigte Anschlussleistung
- Einfache Montage
- Bedingt freiluftbeständig
- Geringe Energienachlieferung im Falle eines Durchschlages

Für den Bau der Prüfanlagen bestehen für die Prüfung von SF_6-Anlagen im Prinzip zwei Möglichkeiten: vollkommen metallgekapselte Prüfanlagen, nach Möglichkeit ebenfalls SF_6-isoliert, die direkt an die Anlagen angeflanscht werden oder Prüfanlagen, die aus möglichst kleinen Bauteilen Vor-Ort zusammengesetzt werden und die Spannungen über Durchführungen in die SF_6-Anlagen bringen.

Die erste Lösung führt zu kompakten Prüfanlagen, die im oberen Spannungsbereich (ab ca. 420 kV) grosse und teuere Anlagen bedingen [12], die nur noch bedingt transportfähig sind.

Wegen der höheren Flexibilität und den wesentlich geringeren Gesamtkosten (zu beachten sind dabei auch die laufenden Transportkosten für jede Prüfung) wurde die zweite Lösung angestrebt. Der Nachteil, dass die Spannungen in Luft erzeugt werden und damit beträchtliche Sicherheitsabstände eingehalten werden müssen, wurde bewusst in Kauf genommen.

Im folgenden wird ein Prüfsystem vorgestellt, das speziell für die Vor-Ort-Prüfung von SF_6-Anlagen bei höheren Spannungen (Reihenspannungen über 245 kV) geeignet ist.

5.1 Wechselspannungsprüfanlagen für die Konditionierungsprüfung

Da die Wechselspannung während der Konditionierungsprüfung nur $1{,}1 \times U_{phase}$ beträgt, kann der magnetische Spannungswandler während dem gesamten Prüfablauf eingebaut bleiben. Für die unteren Spannungsbereiche (bis Reihe 245 kV) und für kleinere Prüfkapazitäten kann vorteilhaft ein magnetischer Wandler oder ein normaler Prüftransformator eingesetzt werden. Für die höheren Reihenspannungen eignet sich speziell eine Serieresonanzanlage, da der Prüfling eine reine Kapazität darstellt.

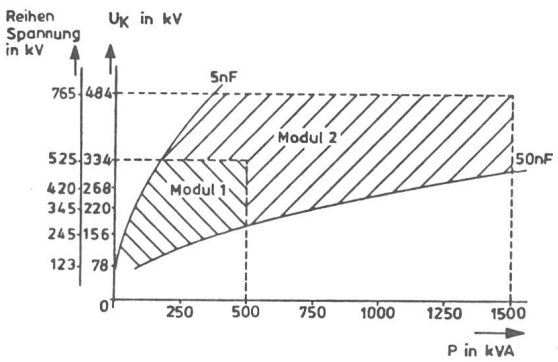

Fig. 5 Notwendige Leistung P einer Prüfanlage bei den verschiedenen Reihenspannungen, um die Konditionierungsspannung U_K zu erreichen

Von den beiden Möglichkeiten einer Serieresonanzanlage – variable Induktivität bei fester Frequenz (50 Hz/60 Hz) oder variable Frequenz bei fester Induktivität [13] – wurde die erste Lösung gewählt, da dann die Konditionierung mit Netzfrequenz erfolgt und darüber im Moment mehr gesicherte Ergebnisse vorliegen, obwohl eine Anlage mit fester Induktivität gewichtsmässige Vorteile bietet.

In Fig. 5 ist die notwendige Leistung der Prüfanlage in Abhängigkeit von der Reihenspannung (Konditionierungsspannung) für verschiedene kapazitive Prüfobjekte aufgetragen. Eine Normung hat zur Entwicklung von zwei Modulen geführt:

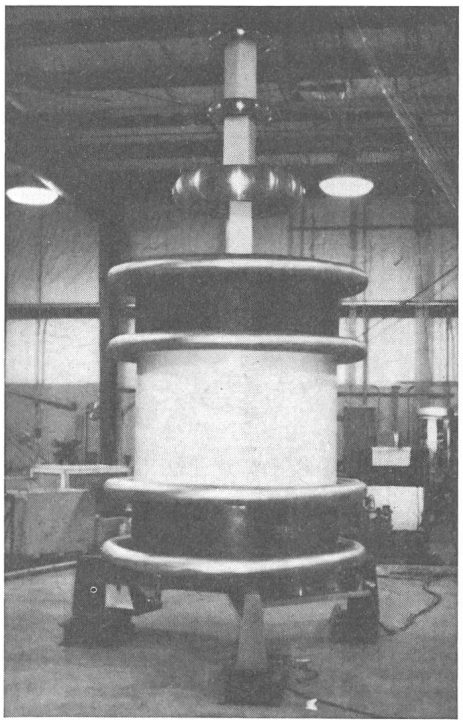

Fig. 6
350-kV-Serieresonanzanlage (Modul 1)
(Photo Am HVTS)

Tabelle I

System-Spannung in kV	123	245	345	420	525	765
Konditionierungsspannung: Wechselspannung, 50 Hz/60 Hz in kV $U_k = 1{,}1 \cdot U_{phase}$	78	156	220	268	334	484
Prüfspannung: schwingende Schaltstoßspannung in kV	440	760	950	1050	1175	1550

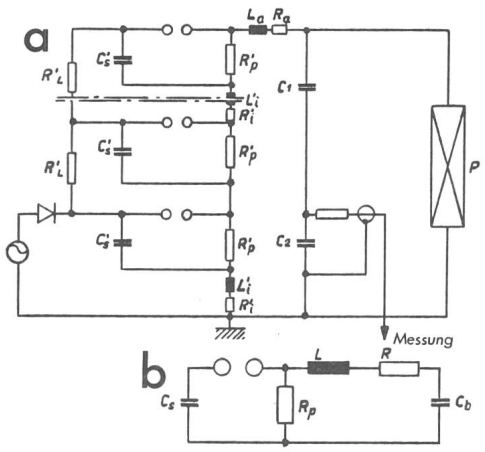

Fig. 7 Ersatzschaltbilder des schwingenden Schaltstossgenerators
a mehrstufig b einstufig

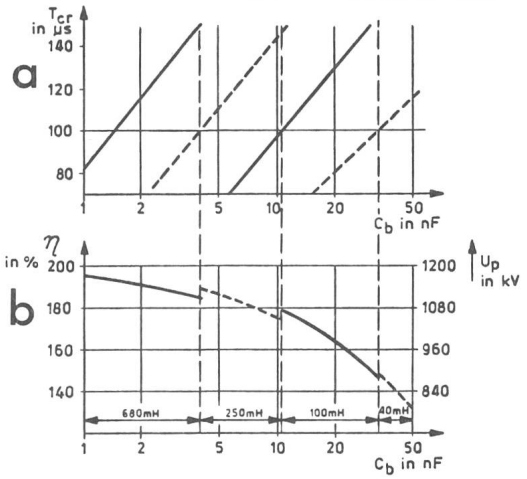

Fig. 9 Stirnzeit T_{cr} und Ausnutzungsgrad η eines 6stufigen schwingenden Schaltstossgenerators in Abhängigkeit von der Belastungskapazität C_b
C_s = 100 nF
Parameter: Induktivität L

Modul 1: 350 kV, 500 kVA, 30 min. Höhe 3 m, Durchmesser 1,7 m. Gewicht 6 t. (Fig. 6: Modul für Reihenspannung 420 kV bis 20 nF oder 525 kV bis 15 nF.)

Modul 2: 500 kV, 1500 kVA, 30 min. Höhe 4,5 m, Durchmesser 2,5 m. Gewicht 15 t.

Falls keine Wechselspannungsprüfanlage zur Verfügung steht, ist es auch möglich, die Konditionierung mit Wechselspannung direkt über das einspeisende Netz durchzuführen. In diesem Fall sollte vor Anlegen der Wechselspannung eine Konditionierung mit Schaltstoßspannungen bis ca. 70% der Schaltstossprüfspannung erfolgen.

5.2 Prüfanlage für schwingende Schaltstoßspannungen

Als Prüfanlage für die Spannungsprüfung mit schwingenden Schaltstoßspannungen eignet sich speziell der normale Marx-Generator, wobei die Seriewiderstände durch Induktivitäten ersetzt werden [14]. Fig. 7a zeigt das n-stufige Ersatzschaltbild eines schwingenden Schaltstossgenerators, Fig. 7b das einstufige Ersatzschaltbild. In Fig. 8 sind die Definitionen der Stirnzeit T_{cr} und der Rückenhalbwertszeit T_h für die schwingende Schaltstoßspannung zusammengestellt. Aus dem einfachen Ersatzschaltbild lassen sich die folgenden Beziehungen ableiten:

Stirnzeit $$T_{cr} \approx \pi \sqrt{L \cdot \frac{C_b \cdot C_s}{C_b + C_s}}$$

Rückenhalbwertszeit $$T_h \approx (C_s + C_b) \cdot R_p$$

Wirkungsgrad $$\eta \approx \frac{C_s}{C_s + C_b} \left(1 + e^{-\frac{R}{2L} \cdot T_{cr}}\right)$$

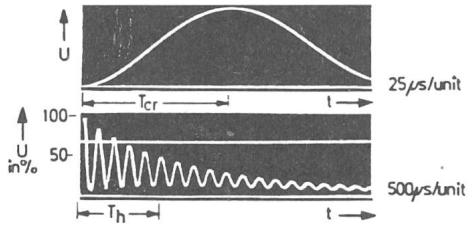

Fig. 8 Definitionen der schwingenden Schaltstoßspannung
T_{cr} Stirnzeit
T_h Rückenhalbwertszeit

Bei der Prüfung von SF_6-Anlagen wird eine Stirnzeit von über 100 µs angestrebt [2]. Da der Wirkungsgrad mit zunehmender Stirnzeit abnimmt, wird man für einen Belastungsbereich von 1 nF bis 50 nF, wie es für SF_6-Anlagen gegeben ist, mehrere Induktivitäten vorsehen. Bei der Konstruktion und Berechnung der Induktivitäten ist darauf zu achten, dass der Gleichstromwiderstand der Induktivität genügend klein ist, da dieser ebenfalls in den Wirkungsgrad eingeht. Zusätzlich ist zu beachten, dass Durchschläge bei der Prüfung von SF_6-Anlagen sehr steil sind (wenige ns) und damit eine nichtlineare Spannungsverteilung an der Induktivität ergeben, die durch konstruktive oder schaltungstechnische Massnahmen linearisiert werden muss. Betrachtet man die Formel für den Wirkungsgrad, so erkennt man, dass neben der Induktivität L, die bestimmend für die Stirnzeit T_{cr} ist, und dem Widerstand R die Grösse der Stosskapazität C_s wesentlich eingeht. Gewählt wurde eine Stosskapazität von 600 nF/100 kV, bestehend aus 2 Kondensatoren mit je einem Gewicht von 35 kg. Dies ist zugleich das grösste Einzelgewicht der Anlage.

Fig. 9 zeigt für eine 6stufige Prüfanlage (C_s = 100 nF) mit 4 verschiedenen Induktivitäten die Stirnzeit T_{cr} und den Wirkungsgrad η (und damit die maximale Prüfspannung) in Abhängigkeit von der Belastungskapazität C_b. Man erkennt, dass diese Prüfanlage für eine Reihenspannung von 420 kV bis zu Belastungskapazitäten von 15 nF ausreichend ist. Für grössere Belastungskapazitäten muss entweder die Anzahl der Generatorstufen oder die Energie des Stossgenerators erhöht werden.

Unter der Annahme einer Stosskapazität von 600 nF/100 kV zeigt Tabelle II die notwendige Ladespannung eines Stossgenerators für schwingende Schaltstoßspannungen, um im Belastungsbereich von 1 nF bis 50 nF eine schwingende Schaltstoßspannung mit einer Stirnzeit T_{cr} von 100 µs bei der jeweiligen Reihenspannung erzeugen zu können. In Fig. 10 sind zwei typische Oszillogramme von schwingenden Schaltstoßspannungen bei verschiedener Belastung für einen 7stufigen Generator mit einer Induktivität von 900 mH gezeigt.

Als Schaltfunkenstrecken wurden 2 verschiedene Typen neu entwickelt. Eine Mehrfachfunkenstrecke mit 8 Teilfunkenstrecken hat ihren grossen Vorteil in einem Triggerbereich von 60% [14]; ein gewisser Nachteil ist die offene Konstruktion.

Tabelle II

Reihenspannung in kV		123	245	345	420	525	765
Prüfspannung in kV		440	760	950	1050	1175	1550
Ladespannung bei	5 nF	300	400	500	600	700	900
	10 nF	300	500	600	600	700	1000
	20 nF	300	500	600	700	800	1200
in kV	50 nF	400	600	800	1000	1200	2000

Deshalb wurde eine komplett gekapselte Einfachfunkenstrecke als Schaltfunkenstrecke entwickelt. Diese ist sowohl mit Abstandsverstellung (von Hand) als auch mit Druckluftanschluss (bei konstantem Abstand) versehen. Die getriggerte Auslösung der Stossanlage erfolgt in der ersten Stufe über die bekannte Quertriggerung mit einem Triggerimpuls von ca. 25 kV; die übrigen Stufen werden mit den natürlichen Überspannungen getriggert, wobei in jeder gekapselten Funkenstrecke ein Hilfsfunken gezündet wird, um die Streuung des Durchzündens so klein wie möglich zu halten.

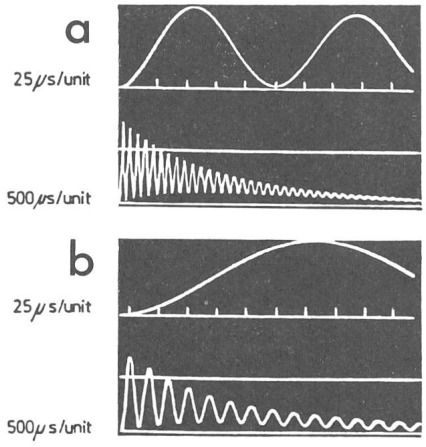

Fig. 10 Impulsformen bei verschiedener Belastung
a $C_b = 0{,}5$ nF, $T_{cr} = 68$ µs, $\eta = 1{,}88$
b $C_b = 3{,}4$ nF, $T_{cr} = 170$ µs, $\eta = 1{,}74$

Da für die Prüfung Vor-Ort vor allem das Gewicht und das Volumen der Einzelteile zu beachten sind und zusätzlich die Transportkosten wesentlich in die Prüfkosten eingehen, wurde die Prüfanlage so konzipiert, dass der Generator in 100-kV-Stufen und der Spannungsteiler sowie die Induktivität in 300-kV-Stufen zerlegbar sind. Damit muss nur die notwendige Anzahl Elemente für die jeweilige Prüfspannung transportiert werden. Ebenso wichtig wie geringe Einzelgewichte ist der Raumbedarf der Prüfanlage. Durch die äussere Induktivität tritt am Kopf des Stoßspannungsgenerators keine Schaltstossspannung auf, wodurch der Stossgenerator relativ nahe an geerdete Teile gestellt werden kann (z.B. für 1000 kV bis auf 1,5 m). Zusätzlich wurden die Elektroden des Spannungsteilers entsprechend der Einsatzspannung bei positiven Schaltstossspannungen optimiert [15].

Um die Flexibilität der Stossanlage zu erhöhen, wurden die Ladewiderstände und die Parallelwiderstände so gewählt, dass durch Ersetzen der Induktivitäten durch Seriewiderstände die genormte Schaltstoßspannung 250/2500 erzeugt werden kann. Durch Zuschalten eines weiteren Parallelwiderstandes sowie Ersetzen der Serieinduktivitäten kann der Generator auch auf Blitzstoßspannungen umgestellt werden.

Selbstverständlich ist der Spannungsteiler so ausgelegt, dass er bei der Konditionierungsprüfung mit Wechselspannung ebenfalls als Spannungsteiler eingesetzt werden kann.

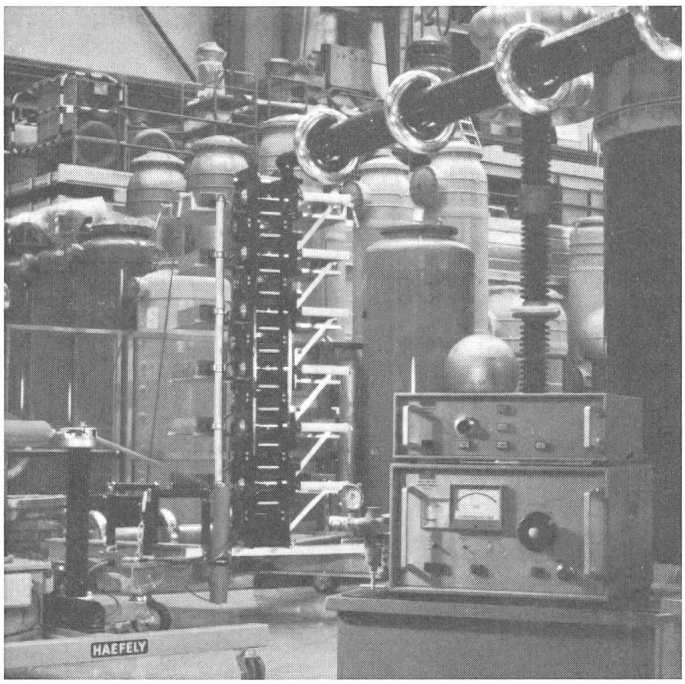

Fig. 11 6stufiger schwingender Schaltstossgenerator
Werkphoto BBC

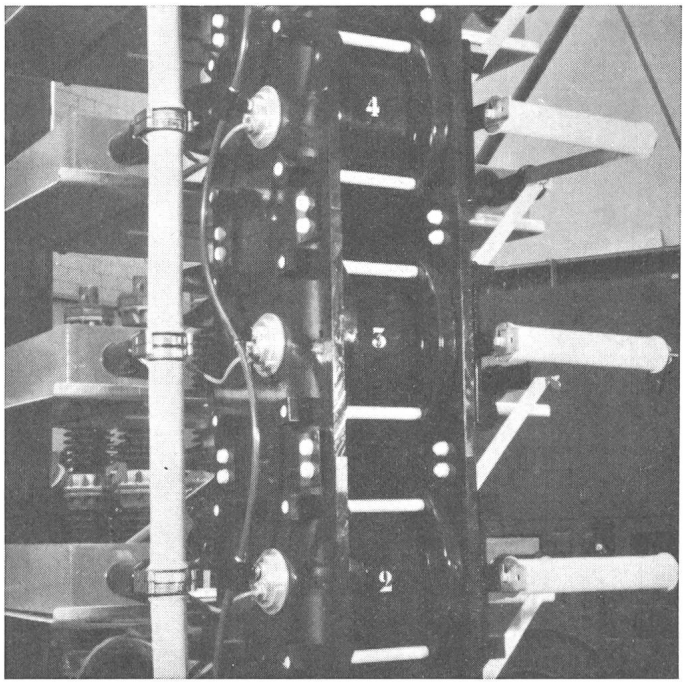

Fig. 12 Detail der Druckluftfunkenstrecken
In Bildmitte: Druckluftfunkenstrecken

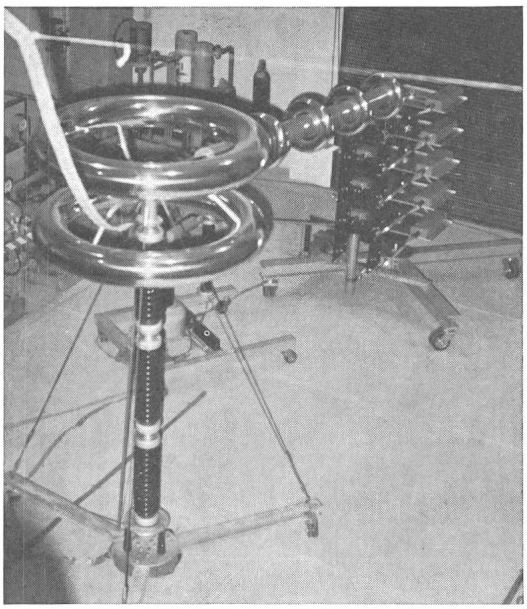

Fig. 13 Prüfung einer 362-kV-Anlage mit senkrechtem Rohrleiter in der Kaverne
Werkphoto Siemens

Im Vordergrund: Spannungsteiler
Im Hintergrund: 5stufiger schwingender Schaltstossgenerator

Fig. 11 zeigt eine komplette 6stufige Prüfanlage. In Fig. 12 ist eine Detailaufnahme der Druckluftfunkenstrecke zu sehen. Für die gesamte Anlage wurden Transportkisten konstruiert, wobei jede Stufe in einer Kiste untergebracht wurde. Die gesamte Prüfanlage kann damit mit normalen Lastwagen oder auch mit Flugzeugen leicht transportiert werden.

Fig. 13 zeigt den Prüfaufbau bei der Prüfung einer 362-kV-Anlage mit 2 vertikalen Rohrleitern in Südafrika. Nur durch die geringen Gewichte und kleinen Abmessungen der Einzelteile der Prüfanlage war es möglich, die Prüfanlage in die Kaverne zu transportieren und eine Vor-Ort-Prüfung durchzuführen. In vielen praktischen Fällen ist es nicht möglich, von aussen alle Teile einer SF_6-Anlage zu prüfen. Dies gilt insbesondere für Anlagen in Kavernen, die über SF_6-Rohrleitungen an die Freiluftanlage angeschlossen sind.

5.3 Weitere Vor-Ort-Prüfungen

Bei der Entwicklung des beschriebenen Prüfsystems für die Vor-Ort-Prüfung von SF_6-Anlagen wurden andere Vor-Ort-Prüfungen beachtet, so dass es durch Erweiterung mit wenigen Komponenten weitere Vor-Ort-Prüfungen gestattet.

Gleichspannungsprüfung

Eine besonders oft benötigte Erweiterung ist die Vergrösserung des Ladegleichrichters zu einer Gleichspannungsprüfanlage. Die vorliegende Grundausrüstung als Ladegleichrichter kann nach dem Vervielfachungsprinzip von Greinacher durch zusätzliche Stufen zu einem Prüfgleichrichter mit einer Nennspannung von 530 kV und einem Nennstrom von 8 mA erweitert werden, wobei der gleiche Mess- und Bedienungseinschub verwendet wird. Fig. 14 zeigt die Erweiterung des Ladegleichrichters zu einer Gleichspannungsprüfanlage. Mit dieser Anlage können Kabelendverschlüsse oder aber auch die SF_6-Anlage mit Gleichspannungen geprüft werden.

Elektromagnetische Verträglichkeitsprüfung

Die Vor-Ort-Prüfung der verlegten Niederspannungsverkabelung in einer Schaltanlage mit angeschlossenen elektronischen Geräten wird mit der Einführung der modernen Elektronik in Schutz- und Steuerkreisen mit ihren sehr niedrigen Spannungspegeln und damit dem geringen Störabstand immer zwingender. Für die Prüfung eines komplizierten vermaschten Systems kommt dabei nur eine Hochspannungsprüfung in Frage. Dabei müssen die sehr schnellen Spannungsänderungen, die beim Schalten eines Leistungsschalters oder bei Überschlägen in der Schaltanlage auftreten, simuliert werden.

Mit dem schwingenden Schaltstossgenerator steht Vor-Ort ein Generator zur Verfügung, der mit Hilfe eines Nachkreises und einer Antenne eine elektromagnetische Verträglichkeitsprüfung gestattet. Fig. 15 zeigt eine mobile 500-kV-EMP-Anlage. Mit dieser Anlage können elektrische Feldstärken von 50...100 kV/m bei Anstiegszeiten von weniger als 10 ns erreicht

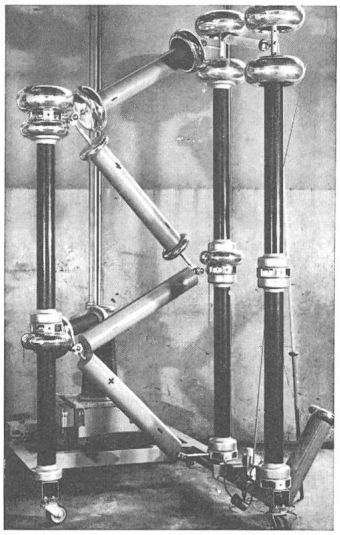

Fig. 14
Ladegleichrichter, erweitert zu einer Gleichspannungsprüfanlage für 530 kV, 8 mA

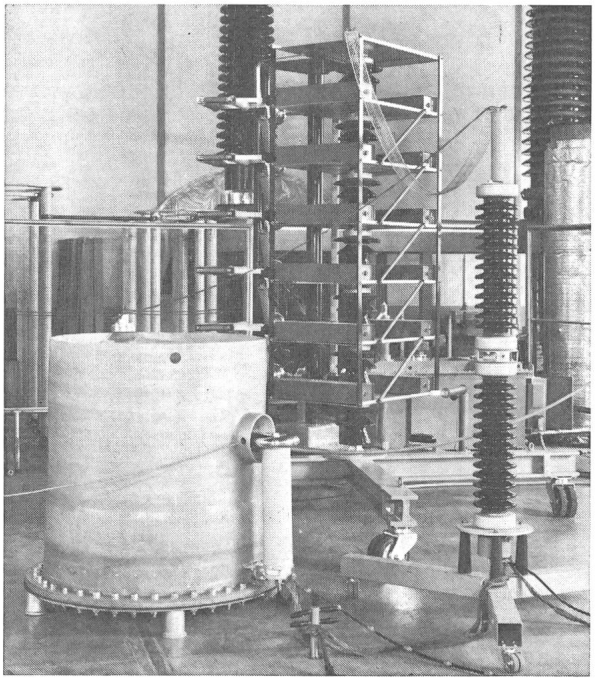

Fig. 15 Schwingender Schaltstossgenerator, erweitert zu 500-kV-EMP-Generator
Im Vordergrund: SF_6-isolierter Nachkreis des EMP-Generators

werden. Je nach Schaltung und Abschlusswiderstand der Antenne sind Rückenzeiten zwischen 200 ns und 20 µs möglich [16]. Der elektromagnetische Impuls wird über eine Antenne (Vertikal- oder Horizontalantenne) auf den Prüfling, z.B. die elektronischen Schutzeinrichtungen, abgestrahlt.

Neben der direkten elektromagnetischen Störbeeinflussung eines elektronischen Gerätes sind die Störgrössen, die über den Kabelmantel ein elektronisches Gerät erreichen, zu beachten. Ob Geräte immun gegen Störungen auf dem Kabelmantel sind, kann am besten mit Prüfgeräten kontrolliert werden, die die simulierte Störung direkt auf den Kabelmantel geben. Momentan werden in verschiedenen Gremien die Form und die Amplitude der auftretenden Störgrössen diskutiert [17].

Literatur

[1] *A. Eidinger:* Die Anwendung von SF_6 im Anlagen- und Schalterbau. Bull. SEV/VSE 69(1978)22, S. 1202...1206.

[2] *W. Boeck, D. Kind* und *K.-H. Schneider:* Hochspannungsprüfungen von SF_6-Anlagen vor Ort. ETZ-A 94(1973)7, S. 406...412.

[3] *W. Schmidt, P. Högg* und *A. Eidinger:* Vor-Ort-Hochspannungsprüfung von SF_6-isolierten, metallgekapselten Schaltanlagen und Rohrgaskabeln. Brown Boveri Mitt. 64(1977)11, S. 640...645.

[4] *S.A. Boggs:* SF_6 field acceptance tests – a utility view. Transmission and Distribution 29(1977)8, p. 24...26 + 56...57.

[5] *V. Berthold:* Zum Einfluss der Spannungsform auf den partikelgezündeten Durchschlag von SF_6-Isolierungen. Elektrie 30(1976)8, S. 444...446.

[6] *F. Bachofen* und *W. Zaengl:* Beeinflussung der dielektrischen Festigkeit von SF_6-Isolationen durch funktionsbedingte Störstellen auf den Elektroden. Bull. SEV/VSE 68(1977)12, S. 575...581.

[7] *A. Pedersen:* The effect of surface roughness on breakdown in SF_6. IEEE Trans. PAS 94(1975)5, p. 1749...1754.

[8] *H. Kärner* and *H.J. Vogt:* The particle influenced breakdown of insulating surfaced in SF_6 under oscillating switching impulse voltage. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979.

[9] *J. Donon* and *J. Vigreux:* Partial discharge detection and measurements compressed SF_6 at high electric field. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979.

[10] *S.J. Dale* and *R.E. Wootton:* Effect of fixed particle protrusions on 60 Hz and impulse breakdown voltage– pressure characteristics in SF_6. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979.

[11] *M. Crucius, A. Diessner* und *G. Luxa:* Schwingende Schaltstoßspannung zur Hochspannungsprüfung von SF_6-isolierten Systemen. ETZ-A 98(1977)2, S. 132...136.

[12] *F. Brändlin, K. Feser* und *H. Sutter:* eine fahrbare Stossanlage für die Prüfung von gekapselten SF_6-isolierten Schaltanlagen. Bull. SEV64(1973)3, S. 113...119.

[13] *F. Bernasconi, W. Zaengl* and *K. Vonwiller:* A new high voltage series resonant circuit for dielectric tests. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979.

[14] *K. Feser:* Hochspannungsprüfungen von SF_6-Anlagen Vor-Ort mit schwingenden Schaltstoßspannungen. Bull. SEV/VSE 68(1977)12, S. 569...574.

[15] *K. Feser:* Bemessung von Elektroden im UHV-Bereich, gezeigt am Beispiel Toroidelektroden für Spannungsteiler. ETZ-A 96(1975)4, S. 206...210.

[16] *K. Feser, M. Modrusan* and *H. Sutter:* Steep front impulse generators. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, September 1979.

[17] Guide on surge voltages in AC power circuits rated up to 600 V. Document prepared by Working Group 3.4.4 of the Surge Protective Device Committee the Power Engineering Society IEEE. Second draft P 587.1/F 1979.

Adresse des Autors

Dr. Ing. *Kurt Feser*, Emil Haefely & Cie. AG, 4000 Basel 28.

Harald Ernst Malmsten Schering 1880–1959

Zur Messung von Kapazitäten sowie von kleinsten dielektrischen Verlusten in den Isolierstoffen von Hochspannungskabeln, -kondensatoren und -transformatoren werden weltweit sog. Schering-Messbrücken verwendet. Ihr Erfinder, Harald Schering, wurde am 25. November 1880 in Göttingen geboren. Sein Herkommen prädestinierte ihn zu einer wissenschaftlichen Laufbahn, war doch sein Vater Mathematikprofessor in Göttingen und seine Mutter die Tochter des Mathematikprofessors Malmsten in Uppsala (Schweden).

Schering studierte an der Universität Göttingen und ergänzte sein Wissen durch Vorlesungsbesuche an der Technischen Hochschule Darmstadt. Er promovierte 1904 zum Dr. phil. in Göttingen, wo er Assistent am geophysikalischen Institut war.

Von 1905 bis zum Frühling 1927 wirkte er an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin; 1910 wurde er ständiger Mitarbeiter, 1919 Mitglied der Anstalt und gleichzeitig Professor. In jener Zeit – von 1914 bis 1916 unterbrochen durch Kriegsdienst, bei dem er verwundet wurde – entwickelte er Messmethoden und erfand Messinstrumente, vor allem verschiedene Messbrücken samt den dazugehörenden Normalwiderständen, Luft- und Pressgas-Normalkondensatoren, Induktivitäten sowie ein Nadel-Vibrations-Galvanometer. Auch die Fehlerwinkel von Messwandlern werden mit seinen Messbrücken ermittelt.

1927 folgte Schering der Berufung zum ordentlichen Professor für allgemeine Elektrotechnik und Hochspannungstechnik an die Technische Hochschule Hannover. Dort wurde er 1938 mit dem Bau eines neuen Hochspannungslaboratoriums betraut, das aber des Krieges wegen erst 1955 fertiggestellt werden konnte. Es besitzt eine 16 m hohe Halle von 38 m Länge und 19 m Breite. Mit einem Stossgenerator können Stoßströme bis zu 250 kA erzeugt werden. Anlässlich der Einweihung dieses Laboratoriums erhielt das Elektrotechnische Institut den Namen «Schering-Institut».

Schering-Institut der Universität Hannover

In Hannover befasste sich Professor Schering ausserdem mit Untersuchungen über die Vorgänge beim Durchschlag bei Normalfrequenz und bei Stoss sowie mit Koronafragen.

Schering war ein gütiger Mensch mit gesundem Humor, ein beliebter Lehrer, bescheiden und seinen Studenten gegenüber hilfreich. Indem er bei seinen zahlreichen Publikationen seine Mitarbeiter mitunterzeichnen liess, wurden diese bekannt und erhielten eine wertvolle Starthilfe. Er stellte sein Wissen auch in den Dienst des VDE, bei dem er in verschiedenen Kommissionen mitwirkte und der ihn 1954 zum Ehrenmitglied ernannte.

Schering war ein grosser Naturfreund und pflegte seinen Garten mit grosser Liebe. Er erlebte viele Erfolge und viel Schönes, hatte aber auch manch Schweres zu erdulden. Im Zweiten Weltkrieg verlor er seinen einzigen Sohn, eine seiner beiden Töchter erlag jung einer Krankheit, und schliesslich musste er noch seine Frau hinscheiden sehen. Nur eine verheiratete Tochter überlebte ihn, als er nach kurzer Krankheit am 10. April 1959 in Hannover starb.

H. Wüger