

Armin Dießner

*Vor der Zuschaltung von SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen (GIS) haben sich drei Schritte von Hochspannungsprüfungen durchgesetzt, nämlich die Stückprüfung an Isolatoren, die Baugruppenprüfung vor dem Verlassen des Werkes und die Prüfung nach der Montage vor Ort. Die Stück- und Baugruppenprüfungen mit Wechselspannung im Werk erlauben auch immer empfindliche TE-Messungen; bei den Prüfungen vor Ort muß von Fall zu Fall untersucht werden, welche TE-Meßmethode sinnvoll ist. Die vorliegenden Erfahrungen lassen den Schluß auf weitere Entwicklungstendenzen zu.*

### 1. Einleitung

Teilentladungen in GIS führen im Betrieb im allgemeinen zur Verminderung der dielektrischen Festigkeit, was schließlich zum Ausfall führen kann. Für das Entstehen von TE sind Unregelmäßigkeiten bei der Fertigung und bei den verschiedenen Montageschritten, aber auch Details der Konstruktion und die Höhe der dielektrischen Beanspruchung ausschlaggebend. Die Auswirkungen hängen entscheidend von der Art der TE ab.

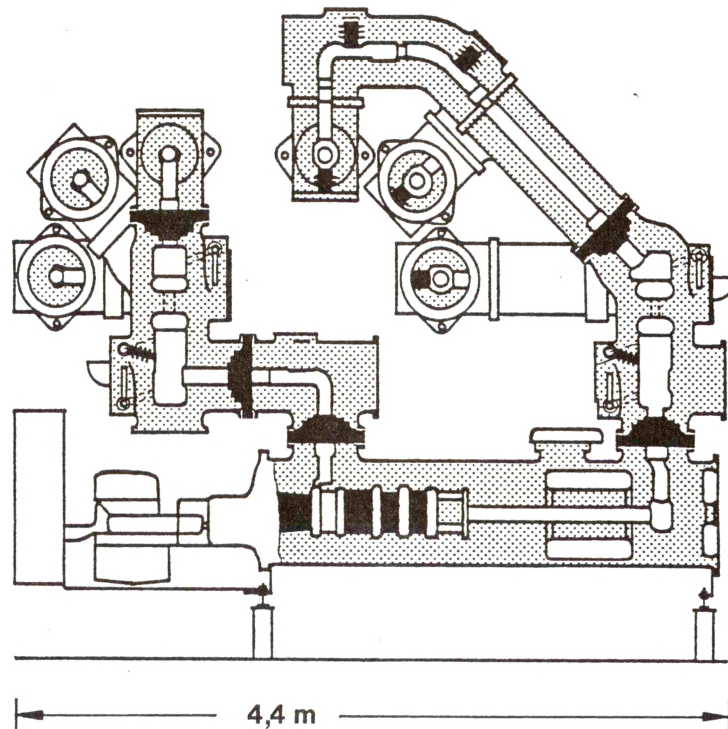


Bild 1. Schnittbild eines modernen 245-kV-GIS-Feldes

Die Abmessungen in GIS - Bild 1 zeigt als Beispiel den Schnitt durch ein Kuppelfeld einer 245-kV-GIS - sind infolge der hervorragenden Isoliereigenschaften des  $\text{SF}_6$ -Druckgases gegenüber den konventionellen Freiluft-Geräten und -Anlagen wesentlich geringer. Gleichzeitig werden damit die Feststoff-Isolatoren dielektrisch höher ausgenutzt. Somit haben die TE-Messungen bei GIS große Bedeutung.

Vor der Zuschaltung von GIS haben sich drei Schritte von Hochspannungsprüfungen durchgesetzt:

- Stückprüfung der Isolatoren,
- Baugruppenprüfung vor dem Verlassen des Werkes,
- Prüfung nach der Montage vor Ort.

Im folgenden werden verschiedene Gesichtspunkte zu den entsprechenden TE-Messungen besprochen.

## 2. Prüfung von Isolatoren

### 2.1 Stückprüfung

Für empfindliche TE-Messungen ist grundsätzlich eine Schirmung erforderlich. Nur so können äußere Störfelder hinreichend gedämpft werden. Deshalb sind zahlreiche Hochspannungshallen metallisch geschirmt. Bei der TE-Messung von GIS-Isolatoren bietet sich jedoch aufgrund des Prüfaufbaues die Möglichkeit, mit einem ungeschirmten Prüfraum auszukommen. Die Isolatoren werden in einem geerdeten Kessel mit  $\text{SF}_6$ -Gasfüllung geprüft; somit ist eine Schirmung bereits gegeben. Mit dem Prüfkessel sind Prüftransformator, Spannungsteiler und Koppelkondensator vollständig gekapselt verbunden (Bild 2).

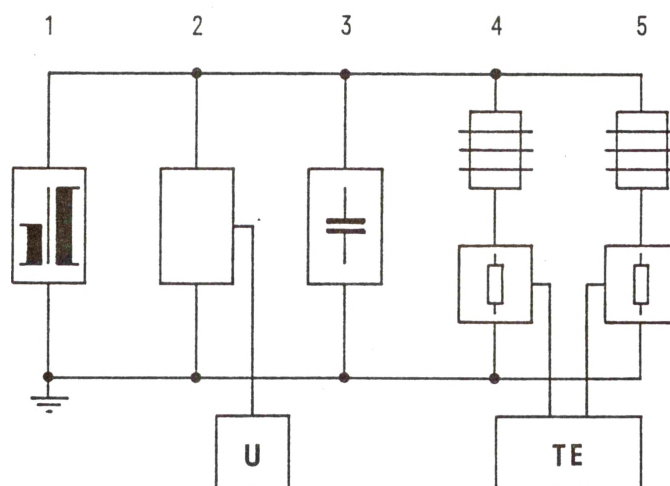


Bild 2. Blockschaltbild für die Stückprüfung von Isolatoren. 1 ... Prüftransformator. 2 ... Spannungsteiler zur Messung der Hochspannung U. 3 ... Koppelkondensator. 4 und 5 ... Isolatoren mit Ankoppelwiderständen zur TE-Messung.

Die TE-Messung an den Isolatoren erfolgt jeweils über einen Widerstand, der am Fußpunkt jedes Isolators liegt. Die koaxialen Meßleitungen mit geerdeten Kabelmänteln führen über eine geschirmte Durchführungsplatte isoliert aus dem Prüfkessel zu einem Umschalter; so können die Isolierstoff-Bauteile einzeln auf TE-Werte abgefragt werden.

Bei den Prüfaufbauten sind die Hochspannungsleiter und die geerdeten Teile denen der Geräte nachgebildet. Dadurch erhält man bei der Prüfung solche Feldstärke-Verteilungen, die denen im kompletten Gerät entsprechen. Der  $\text{SF}_6$ -Druck stimmt bei der Prüfung mit dem für die GIS festgelegten Mindestbetriebsdruck überein. Zu einem Prüfzyklus werden mehrere gleichartige Isolatoren zusammengefaßt. Wie Bild 3 zeigt, sind sie hochspannungsseitig über den Leiter verbunden. Die erdseitigen Einspannungen mit den Gehäusenachbildungen sind auf dem Montagewagen isoliert aufgebaut.

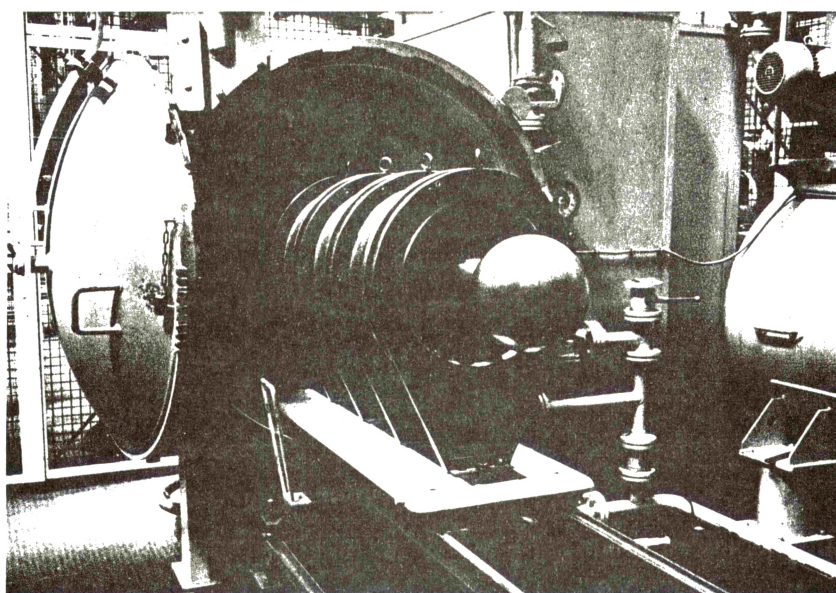
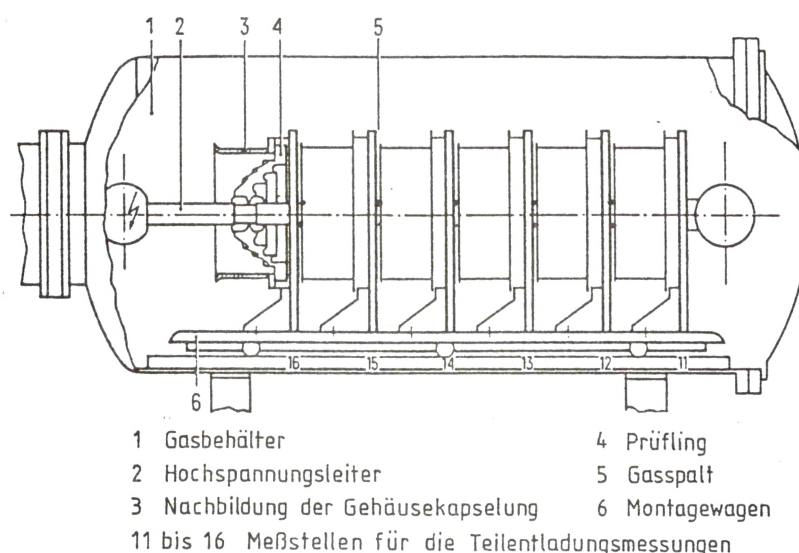


Bild 3. Prüfaufbau für die Stückprüfung von Durchführungsisolatoren.



Diese Messungen werden an den elektrisch hoch beanspruchten Isolatoren im Rahmen von Stückprüfungen durchgeführt. Die Spannungen, bei denen die TE-Werte abgefragt werden, und die zulässigen Grenzwerte sind unter dem Gesichtspunkt einer genügenden dielektrischen Zuverlässigkeit intern festgelegt.

Für Isolatoren, die zum Einsatz in GIS für die Nennspannung  $U$  (Spannung Leiter - Leiter) bestimmt sind, gehören die folgenden Schritte zum typischen Prüfprogramm:

- Kontinuierliches Steigern der Spannung auf  $1,1 \cdot U$ ; das ist nahezu der doppelte Wert der im Betrieb maximal dauernd anliegenden Spannung. Bei dieser Spannung dürfen keine meßbaren TE auftreten. Die Meßempfindlichkeit beim Einsatz schmalbandiger Meßgeräte liegt für die scheinbare Ladung bei etwa 1 bis 2 pC. Diese interne Forderung geht weit über die in IEC 517 /1/ und DIN VDE 0670 Teil 8 /2/ genannten Werte hinaus.
- Weitere Spannungssteigerung bis zur Prüfspannung, die mehrere Minuten (nach IEC und VDE: 1 min) gehalten werden muß.
- Senken der Spannung wieder auf den Wert  $1,1 \cdot U$  und erneute TE-Messung mit den gleichen Anforderungen wie beim ersten Schritt.

Entspricht ein Isolierteil nicht den genannten Anforderungen, wird es aussortiert und nicht für die Montage freigegeben.

## 2.2 Auswirkungen von TE - Ergebnisse von Langzeitversuchen

Allgemein ist bekannt, daß feste Isolierstoffe unter dem Einfluß der elektrischen Beanspruchung altern können. Wichtige Erkenntnisse über das Langzeitverhalten liefern insbesondere Langzeitversuche mit überhöhten Spannungen. Über den Alterungsvorgang an kleinen Gießharz-Probekörpern liegen zahlreiche Versuchsergebnisse vor. Diese Ergebnisse sind aber nur teilweise auf die wirklichen Isolatoren übertragbar. Es müssen nämlich die vielen Einflüsse der industriellen Fertigung berücksichtigt werden, um die Isolatoren der GIS richtig beurteilen zu können. Daher werden Langzeitversuche an Original-Isolatoren unter  $\text{SF}_6$ -Druckgas durchgeführt /3/.

Bild 4 zeigt als Beispiel zwei Prüfgefäße mit herausgefahrenen Prüflingsträgern für Versuche an Stützisolatoren, die sternförmig und axial hintereinander auf etwa 4 m langen Rohren montiert sind. So können mehr als 300 Stützer gleichzeitig geprüft werden. Die wichtigsten Ergebnisse im Hinblick auf TE-Messungen sind im Bild 5 zusammengestellt. Die Untersuchungen liefen mit mehreren Variaten, die alle die geometrische Form der 170-kV-Stützer hatten, über einen Zeitraum von bis zu 20.000 h bei einer konstanten Spannung von 400 kV; das entspricht einer maximalen elektrischen Feldstärke im Gießharz von 12 kV/mm (Eff.-Wert) und etwa der 4fachen Dauerbelastung in einer 170-kV-GIS. Nach jedem Stützer-Durchschlag wurde der Aufbau geöffnet und der defekte Isolator entfernt. Die anderen Isolatoren wurden wieder an Spannung gelegt.

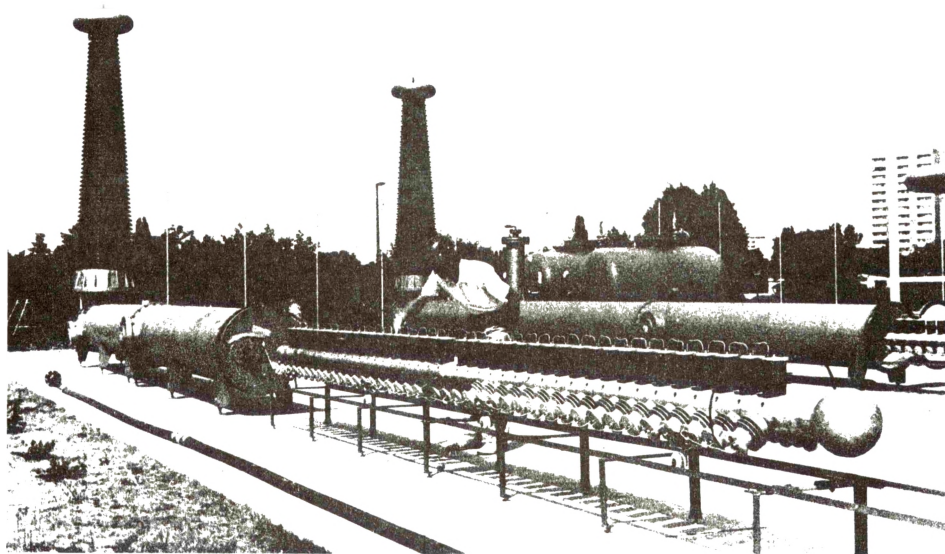


Bild 4. Geöffneter Prüfaufbau für 170-kV-GIS-Stützisolatoren

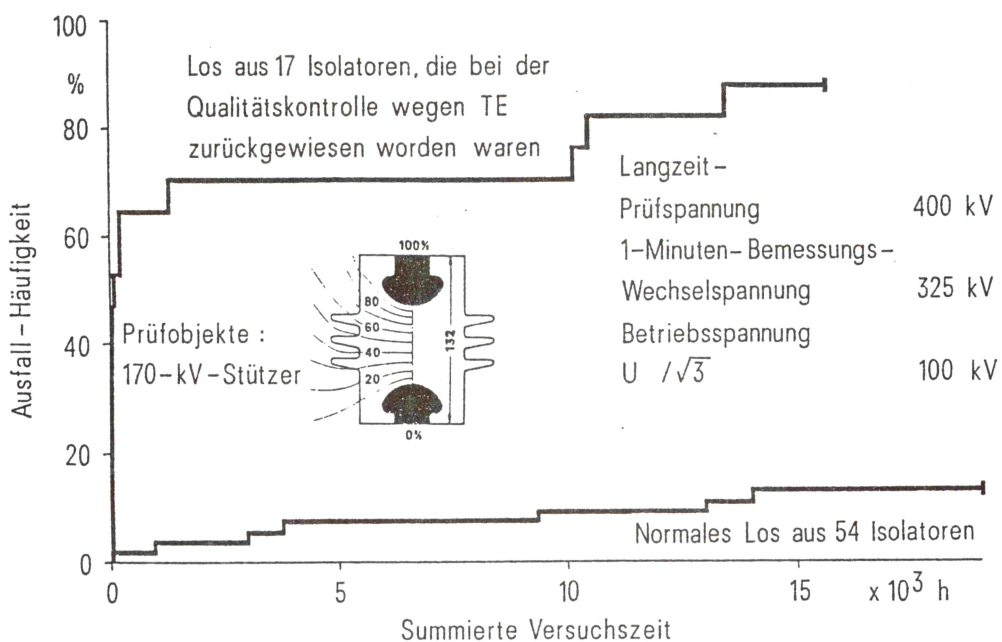


Bild 5. Elektrische Langzeitversuche an GIS-Isolatoren: Einfluß von TE

In der Darstellung der Ausfall-Häufigkeit über der summierten Versuchszeit stellt ein Ausfall einen Sprung von  $1/n$  dar, wobei  $n$  die jeweilige Zahl eines Loses von "gleichartigen" Stützern bedeutet. Im Bild 5 sind die Ergebnisse eines normalen Loses aus 54 Isolatoren verglichen mit einem Los aus 17 Isolatoren, die bei der unter 2.1 beschriebenen TE-Messung zurückgewiesen worden waren. Die TE-behafteten Isolatoren zeigen bereits kurz nach dem Versuchsbeginn eine hohe Ausfall-Häufigkeit im Verhältnis zu den normalen Isolatoren. Die TE-Messung hat sich also als sehr sinnvoll für die Qualitätskontrolle erwiesen.

### 3. Baugruppenprüfung vor dem Verlassen des Werkes

Die Prüfeinrichtungen für die abschließende Hochspannungsprüfung der GIS-Baugruppen vor dem Verlassen des Werkes stehen vorzugsweise direkt im Montagebereich am Ende des Fertigungsflusses. Um die Abmessungen klein zu halten und äußere Störeinflüsse zu vermeiden, sind die Hochspannungseinrichtungen in der Montagehalle komplett metallgekapstelt (Bild 6 oben).

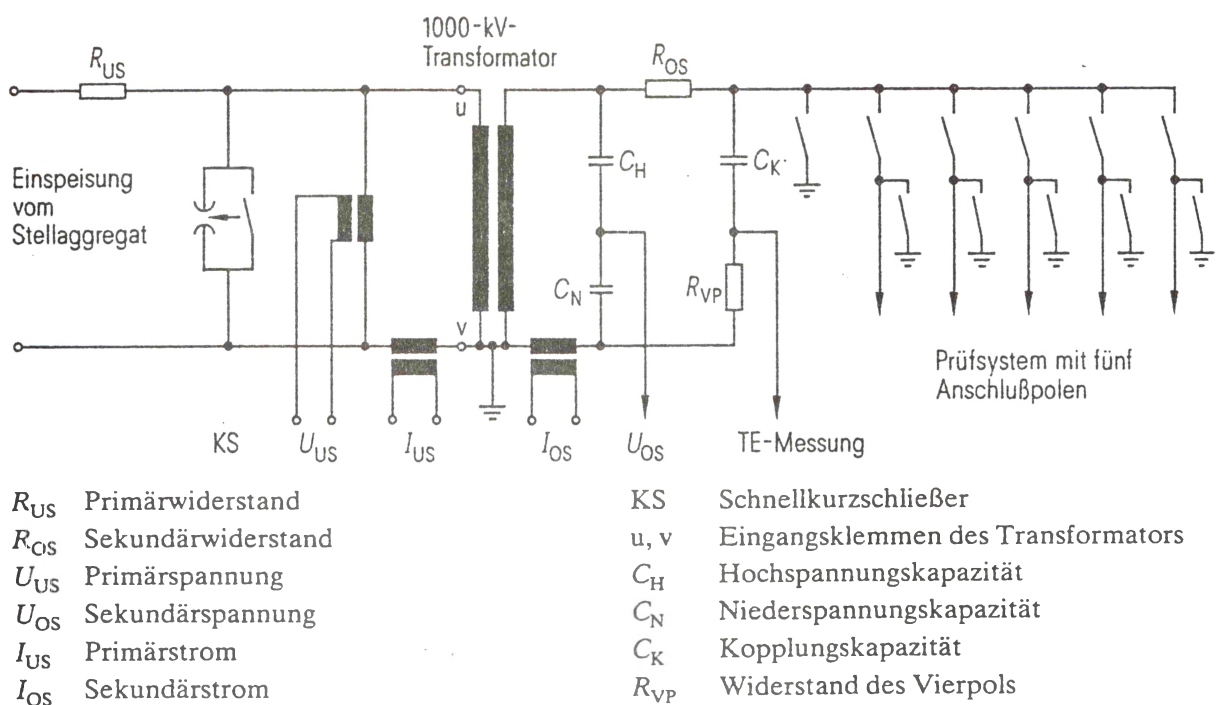
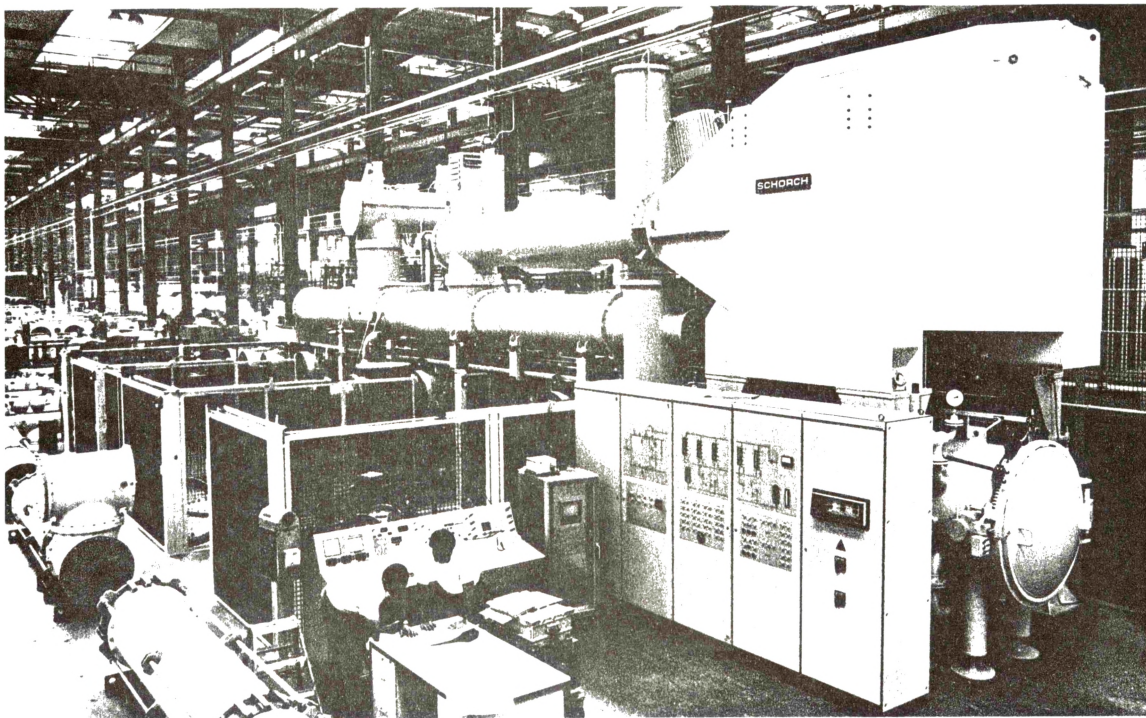


Bild 6. Hochspannungs-Prüfeinrichtung für GIS-Baugruppen.



Bild 6 unten zeigt das Prinzipschaltbild der Prüfanlage. Der Koppelkondensator (ca. 500 pF) für die TE-Messungen ist auch innerhalb der Metallkapselung der Prüfanlage. Der Abgriff-Vierpol liegt zwar außerhalb der Druck-Kapselung, aber hochfrequenzmäßig geschirmt unmittelbar nach der gasdichten Meßdurchführung. Das koaxiale Meßkabel ist zur weiteren Abschirmung in einem Kupferrohr verlegt und führt zu einem geerdeten Meßpult, in dem die Meßgeräte untergebracht sind. Damit konnte eine weitgehende Abschirmung gegenüber den Störeinflüssen, verursacht beispielsweise durch Motoren und Schalter in der Montagehalle, erreicht werden.

Beim Einsatz schmalbandiger TE-Meßgeräte zur Bestimmung der maximalen scheinbaren Ladung liegt die Meßempfindlichkeit bei etwa 2 pC. Die Zuordnung der TE zur Phasenlage der Spannung geschieht durch die Überlagerung der verstärkten TE-Impulse und der 50-Hz-Wechselspannung. Die Prüfanlage ist "TE-frei" bis zu einer Prüfspannung von 800 kV, das ist höher als die Bemessungsspannung von 525-kV-GIS.

Im Vergleich zu den Stückprüfungen, wo hauptsächlich eine hohe Empfindlichkeit der TE-Messung interessiert, stellt sich beim Bemerken von TE bei der Prüfung ganzer Baugruppen sofort die Frage, wo die TE auftreten.

Verschiedene Fehlerarten bewirken unterschiedliche scheinbare Ladungen und andere charakteristische Erscheinungen. Sie können mit den eingesetzten Meßgeräten in einem gewissen Umfang diagnostiziert werden. Wird ein spezifisches TE-Verhalten erkannt, so wird die Fehlersuche erleichtert. Notwendig sind dazu allerdings genügende Erfahrungen sowohl mit den Meßeinrichtungen als auch mit den zu prüfenden Objekten.

Besonders deutlich zeigen sich Kontaktunterbrechungen, beispielsweise Abschirmungen ohne feste Potentialanbindung. Hierbei ergeben sich sehr hohe scheinbare Ladungen.

Beim Verdacht auf kleine frei bewegliche Partikel hat sich der zusätzliche Einsatz von tragbaren Ultraschall-Meßgeräten bewährt. Diese Geräte haben einen metallischen Meßfühler, der mit der Hand gegen die Gehäusewand gepreßt wird. Infolge der Frequenzumwandlung im Gerät werden charakteristische Störgeräusche für das menschliche Ohr wahrnehmbar. Da frei bewegliche Partikel die Tendenz zeigen, in feldschwache Räume zu wandern, können sich die auftretenden TE auch bei konstant gehaltener Spannung laufend ändern.

Scharfe Kanten, Spitzen und Grate (fehlende Abschirmungen) verursachen TE mit scheinbaren Ladungen, die oft kleiner als 20 pC sind. Polaritätseffekte sind nicht immer eindeutig, da die Störungen sowohl am Hochspannungsleiter als auch auf der Erdseite liegen können.

#### 4. Prüfung nach der Montage vor Ort

Für GIS ist die dielektrische Festigkeit im Hinblick auf die Auswirkung innerer Fehler von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grunde wird jede GIS nach der Montage vor Ort mit Hochspannung geprüft, um so mögliche Fehlerursachen zu eliminieren. Solche Ursachen könnten beispielsweise Beschädigungen bei der Handhabung, beim Transport, bei der Lagerung oder bei der Errichtung sein, oder auch Fremdkörper oder falsche Montage. Die Prüfungen vor Ort ergänzen die Stück- und Baugruppenprüfungen mit dem Ziel, die dielektrische Eignung der fertig montierten Anlage festzustellen.

Es soll hier nicht auf die Details zur Begründung geeigneter Prüfprogramme (Form, Höhe und Reihenfolge der Spannungen) eingegangen werden, sondern es werden nur einige Gesichtspunkte zu TE-Messungen besprochen.

##### 4.1 Wechselspannungsprüfungen

Wechselspannung ist gut geeignet zur Überprüfung des dielektrischen Zustandes der GIS. Zusätzlich wird Wechselspannung vorteilhaft zum elektrischen Konditionieren verwendet; dieser wichtige Effekt tritt auch während des normalen Betriebs auf.

Prüftransformatoren werden vorzugsweise für GIS mit Nennspannungen bis 170 kV verwendet. Durch direktes Anflanschen eines Transformators an die GIS sind sinnvolle TE-Messungen über Auskopplung vom Hochspannungs-Strom des Transformators an der Erdklemme oder durch kapazitive Auskopplung möglich. Für höhere Nennspannungen und übliche Prüfabschnitte mit einigen Nanofarad Kapazität sind Prüftransformatoren und Regeleinrichtungen groß und schwer. Bild 7 zeigt jedoch, daß kleine 420-kV-GIS-Abschnitte auch vollgekapselt geprüft werden können.

Bei dreipolig gekapselten Anlagen wird jeweils einpolig geprüft, die beiden anderen Phasenleiter werden geerdet. Wenn man diese beiden Phasenleiter aber nicht direkt, sondern über einen Meßvierpol erdet, so sind TE-Messungen möglich, wobei die Kapazität zwischen dem Hochspannungsleiter und den beiden anderen Phasenleitern als Koppelkapazität wirkt.

Zur Erzeugung hoher Wechselspannungen kann man die erforderliche Anschlußleistung klein halten, wenn man eine Resonanzdrossel in Serie mit der GIS, die als Kapazität wirkt, schaltet. Bild 8 zeigt den Aufbau zur Prüfung einer 550-kV-GIS mit einer 60-Hz-Resonanzdrossel. Die elektrische Verbindung vom kapazitiven Spannungsteiler zur Freiluft-Durchführung der GIS ist aus dünnem Draht, so daß TE-Messungen nicht sinnvoll erscheinen. Als Alternative haben sich Ultraschall-Messungen bewährt, um frei bewegliche Partikel zu bemerken, zu orten und eventuell ihr Liegenbleiben in einer Teilchenfalle festzustellen.



Bild 7. Prüftransformator direkt angeflanscht an eine 420-kV-GIS

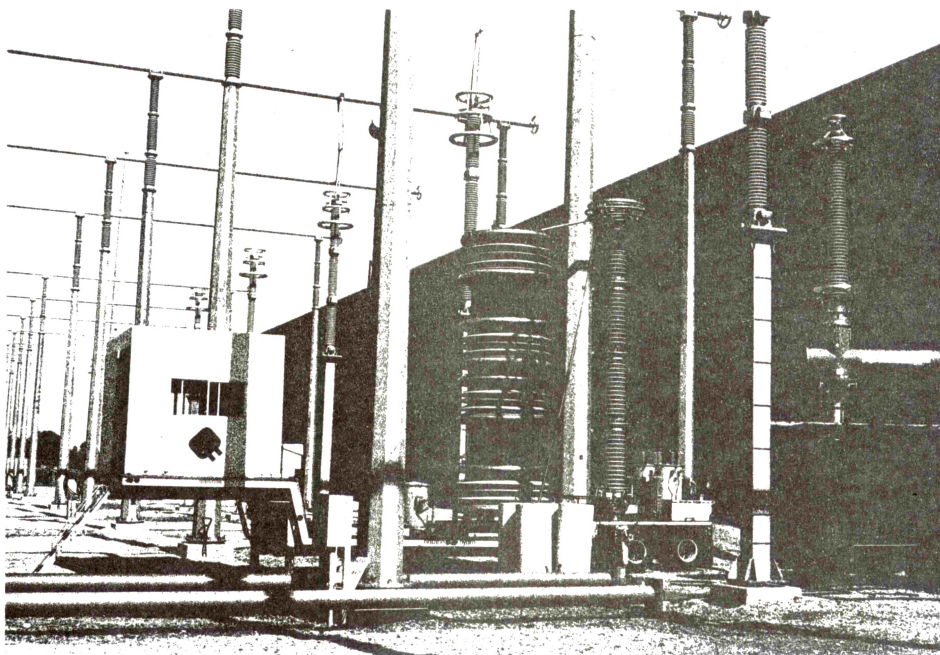
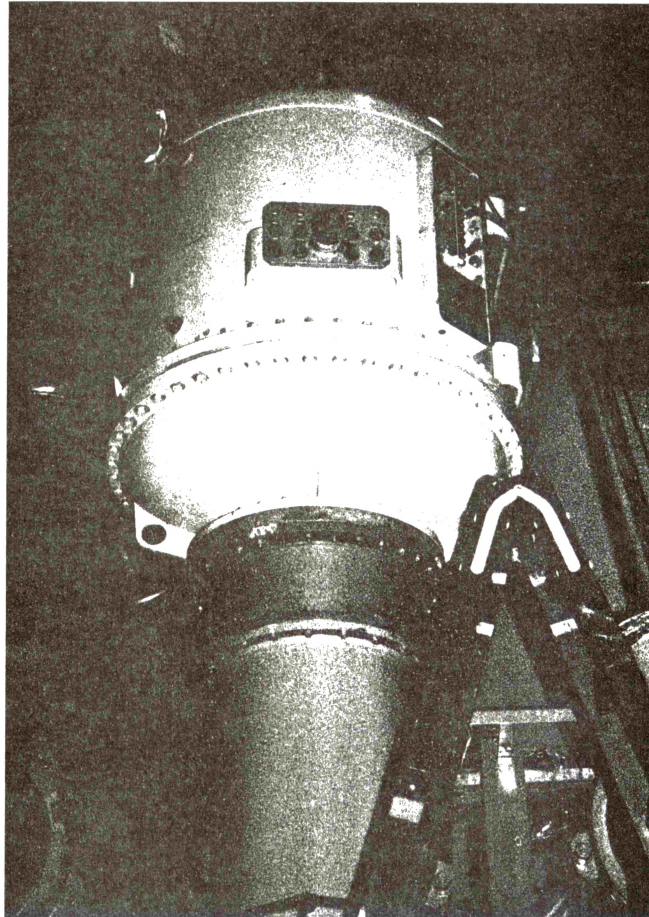


Bild 8. 60-Hz-Resonanzanlage zur Hochspannungsprüfung einer 550-kV-GIS

## 4.2 Stoßspannungsprüfungen

Für Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfungen vor Ort haben sich unipolar schwingende Spannungsformen durchgesetzt, da sie insbesondere bei höheren Nennspannungen mit verhältnismäßig einfachen Prüfeinrichtungen zu erzeugen sind. Bild 9 zeigt zwischen einem 11-stufigen Stoßspannungsgenerator (im Wetterschutzurm) und einem 1200-kV-Spannungsteiler eine 6-teilige Spule für schwingende Schaltstoßspannung. Durch Austausch der Spule kann im gleichen Aufbau auch schwingende Blitzstoßspannung erzeugt werden. Es liegen allerdings keine Erfahrungen über TE-Messungen während der Stoßspannungsprüfungen vor.

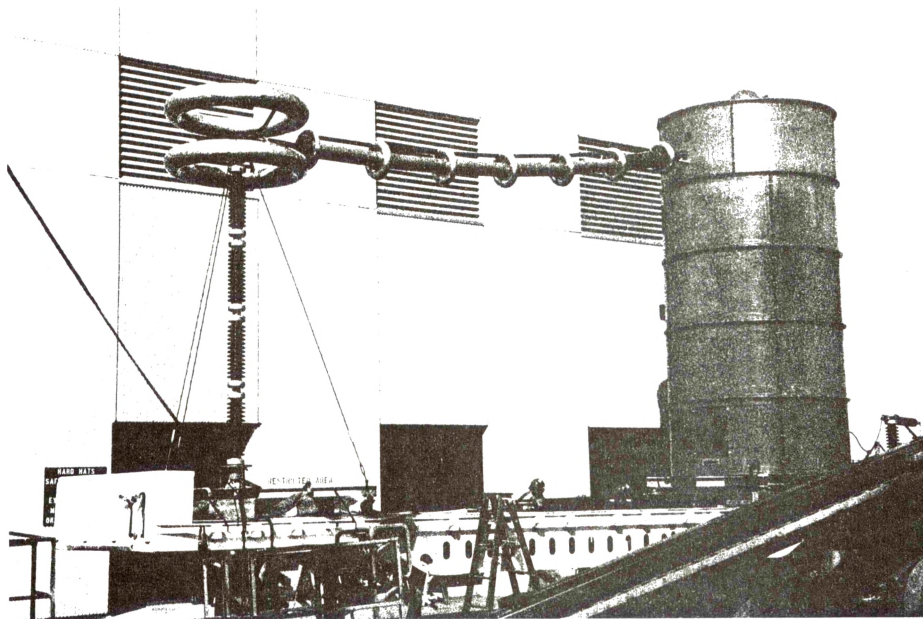


Bild 9. Stoßspannungsgenerator mit Hochspannungsspule und Spannungsteiler für schwingende Stoßspannungen bis 1200 kV

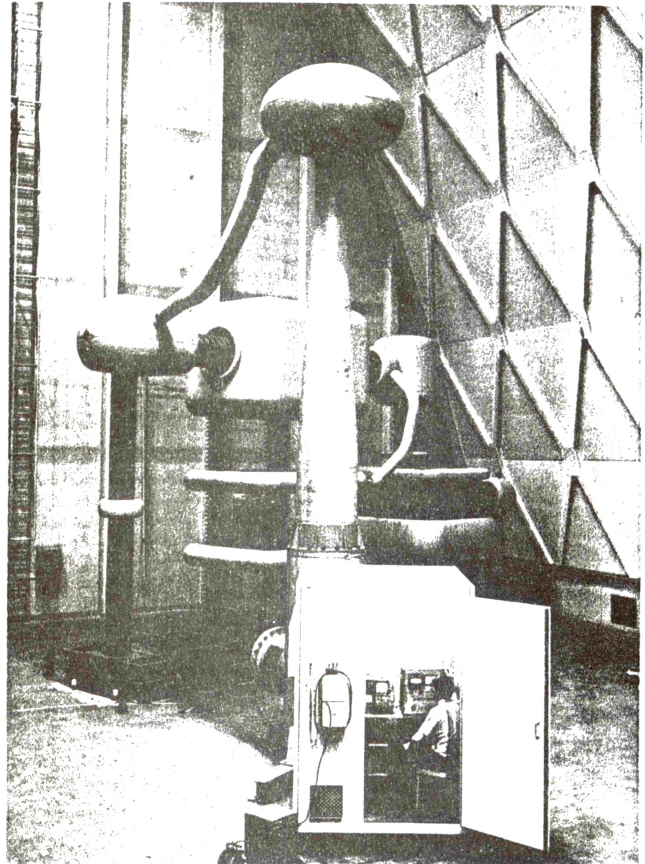
## 5. Diskussion und Ausblick

Die bisher zur Verfügung stehenden konventionellen TE-Meßgeräte und Meßverfahren haben sich bei der Qualitätsüberwachung sehr bewährt. Damit konnte eine hohe Zuverlässigkeit der GIS im Betrieb erreicht werden.

Beim weiteren Fortschritt der Technik herrscht auch in Zukunft das Streben nach kleineren Abmessungen. Das bedeutet aber noch höhere spezifische Belastungen. Daher werden auch an die TE-Meßtechnik immer höhere Anforderungen gestellt. Der Einsatz von Rechnern ist zum Bewältigen der großen Datenmengen notwendig. Laboruntersuchungen an Prüflingen in realer Größe (Bild 10) dienen der Entwicklung bzw. Erprobung von industriell einsetzbaren Meß- und Auswerteverfahren.



Bild 10. TE-Meßaufbau in geschirmter Hochspannungshalle



Der Ausschuß-Anteil bei der Qualitätskontrolle der Isolatoren ist sehr gering, und wieder nur ein Teil davon fällt bei der TE-Messung an. Die genaue Untersuchung der Fehlerursachen fällt in das Gebiet der Forschungs- und Entwicklungsabteilungen. In einem internationalen Forschungsprojekt /4/ werden u.a. Möglichkeiten zur industriell anwendbaren Erhöhung der TE-Meßempfindlichkeit behandelt. Es hat sich gezeigt, daß die erhöhte Empfindlichkeit insbesondere bei der TE-Messung an Isolatoren für höhere Spannungen wünschenswert ist.

Bei der Baugruppenprüfung kommt zum Wunsch nach hoher Empfindlichkeit noch der Wunsch nach Diagnose-Möglichkeiten: Art und Ort der Störung. Denn im Gegensatz zur Stückprüfung, wo ein defekter Isolator eliminiert wird, muß an einer defekten Baugruppe der Fehler behoben werden. Es ist anzunehmen, daß hier in der Zukunft Expertensysteme sinnvoll eingesetzt werden können.

Auch für die Prüfung nach der Montage vor Ort gilt der Wunsch nach der Diagnose-Möglichkeit hinsichtlich Art und Ort einer Störung, die TE verursacht. Hierfür sind besonders robuste Meßsysteme notwendig.

Bei der Konzeption von TE-Meßsystemen für GIS ist zu berücksichtigen, daß bei den Hochspannungsprüfungen Durchschläge vorkommen können. Dabei treten sehr schnelle



transiente Spannungsänderungen auf, deren Amplituden um mehrere Größenordnungen höher sind, als die zu messenden TE-Spannungen, und zwar im gleich Frequenzbereich. Ein wirksames Schutzkonzept ist notwendig; möglicherweise gelingt dies durch den gezielten Austausch von Bauteilen, die sich bei einem Durchschlag opfern müssen.

Als Ziel der weiteren Arbeiten auf dem Gebiet der TE-Meßtechnik und Meßwertverarbeitung gilt weiterhin, genauere Aussagen hinsichtlich der Fehlererkennung und Ortung zu finden.

## 6. Schrifttum

- /1/ IEC Publication 517, second edition, 1986. Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above.
- /2/ DIN VDE 0670 Teil 8, September 1988. Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV. Gasisolierte metallgekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Nennspannungen von 72.5 kV und darüber.
- /3/ A. Dießner, G. Luxa, W. Neyer. Elektrische Langzeitversuche an Epoxidharz-Isolatoren in SF<sub>6</sub>-isolierten metallgekapselten Schaltanlagen. etzArchiv Bd. 8 (1986), S. 359 ... 363.
- /4/ N. Fujimoto, G.C. Stone, H.G. Sedding, S. Rizetto. Improved Partial Discharge Detection Methods for Epoxy Spacers in Gas-Insulated Switchgear. 6th ISH, New Orleans, Aug./Sep. 1989, Report 15.04.