

## Die Praxis von Hochspannungsprüfungen vor Ort

Th. Aschwanden

Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH

CH-8044 Zürich

### Zusammenfassung

Durch die Anwendung moderner Prüf- und Diagnoseverfahren kann heute mit mobilen Prüfeinrichtungen sowohl bei einzelnen Betriebsmitteln als auch bei kompletten Hochspannungsanlagen der Nachweis der elektrischen Isolationsfestigkeit vor Ort erbracht werden. Der Beitrag behandelt die heutigen Möglichkeiten und Grenzen der Durchführung von Vor-Ort-Hochspannungsprüfungen mit begleitender Teilentladungsdetektion. Neben den praktischen Aspekten bei der Prüfung von gasisolierten Schaltanlagen und Hochspannungskabelanlagen wird auch auf neue Einsatzmöglichkeiten von modularen Serie-Resonanzprüfanlagen bei der Prüfung von Leistungstransformatoren in Umspannwerken und Kraftwerken hingewiesen.

### 1. Einleitung

Eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie setzt Produktionsanlagen (z.B. Wasserkraftwerke, Kernkraftwerke) und Verteilsysteme (Hochspannungsleitungen, Umspannwerke) voraus, welche einen hohen Grad an Zuverlässigkeit besitzen müssen. Die geforderte Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit wird bei Hochspannungs-Anlagen und -Komponenten u.a. durch folgende technische Massnahmen erreicht:

- korrekte Wahl der System- und Anlagenkonzepte
- korrekte Dimensionierung der Betriebsmittel
- Qualitätsicherung bei Fabrikation und Montage
- vorbeugende Instandhaltung bzw. Ersatzstrategie.

Im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit von Energieübertragungsanlagen spielt die Isolationsfestigkeit bzw. der allgemeine Isolationszustand der eingesetzten Betriebsmittel eine entscheidende Rolle. Zur Überprüfung der Integrität der elektrischen Isolation bei strategisch wichtigen und kosteninten-

siven Betriebsmitteln, wie z.B. bei Grossgeneratoren und Leistungstransformatoren, SF<sub>6</sub> - isolierten Hochspannungsschaltanlagen und Hochspannungskabelanlagen, werden heute aufwendige Spannungsprüfungen am Aufstellungsort durchgeführt.

Eine Vor-Ort-Prüfung einer neuen Hochspannungsanlage ist immer dann sinnvoll, wenn wesentliche Teile dieser Anlage erst vor Ort erstellt und/oder durch die Montage massgeblich beeinflusst werden können. Bei SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen (GIS) und Kabelanlagen im Hochspannungsbereich trifft dies gleichermaßen zu, da einzelne, im Herstellerwerk geprüfte Komponenten oder Baugruppen erst am Aufstellungsort zu einer funktionsfähigen Gesamtanlage zusammengebaut werden. Auch grosse Leistungstransformatoren, bei denen nach dem Transport auf der Baustelle noch Montagearbeiten sowie die Ölaufbereitung unter teilweise schwierigen Bedingungen durchgeführt werden müssen, werden heute vor der Inbetriebnahme vermehrt einer Hochspannungsprüfung unterzogen.

Die Aussagekraft solcher Vor-Ort-Prüfungen wird durch begleitende Diagnoseverfahren, z.B. durch eine empfindliche Detektion von Teilentladungen (TE), stark verbessert. Mit dem gezielten Einsatz von modernen Vor-Ort-Diagnosemethoden soll der allgemeine Isolationszustand von energietechnischen Betriebsmitteln sowohl im Neuzustand als auch im betriebsgealterten Zustand zuverlässig beurteilt werden.

Da das Gebiet der Vor-Ort-Prüfung und Isolationsdiagnostik ausserordentlich umfangreich und komplex ist, konzentriert sich dieser Beitrag auf *Vor-Ort-Spannungsprüfverfahren* mit begleitender *Teilentladungsdetektion*. Für eine umfassendere Behandlung der heute verfügbaren Methoden und Verfahren der Isolationsdiagnose wird auf die aktuellen Fachliteratur verwiesen [1],[2],[3].

## 2. Vor-Ort-Prüfverfahren

Für *neue Hochspannungsanlagen*, die zum grossen Teil am Aufstellungsort montiert werden müssen, wie z.B. Hochspannungs-Kabelanlagen, SF<sub>6</sub>-isolierte Schaltanlagen und sehr grosse Leistungstransformatoren, wird üblicherweise vor der Inbetriebnahme prophylaktisch vor Ort eine Prüfung mit Wechselspannung und/oder Blitzstossspannung durchgeführt, um Montagefehler und Transportschäden zu identifizieren [4]. Solche Vor-Ort-Prüfungen werden teilweise auch nach umfangreichen Reparaturen verlangt, da diese Arbeiten am Aufstellungsort oft unter schwierigen Bedingungen ausgeführt werden müssen.

Bei *gealterten Betriebsmitteln* ist die Ermittlung des Isolationszustandes durch eine reine Spannungsprüfung oft nicht möglich und auch nicht sinnvoll. Aussagen über den Zustand der Isolation können hier aber durch die Anwendung von integralen Diagnosemethoden (z.B. Verlustfaktormessungen, siehe auch [3]) oder insbesondere durch eine empfindliche Teilentladungsmessung gemacht werden [2].

### 2.1 Stehspannungsprüfung (AC, DC, Stoss)

Bis vor kurzem war eine Hochspannungsprüfung die einzige praktikable Methode, um das Isoliervermögen einer energietechnischen Komponente oder Anlage nachzuweisen bzw. zu ermitteln. Mit einer definierten elektrischen Überbeanspruchung als verschärfte Betriebsbedingung sollen mit Wechsel-, Gleich- oder Impuls-Spannung (Blitzstoss oder Schaltstoss) die integrale Isolationsfestigkeit getestet und eventuelle Schwachstellen aufgedeckt werden.

Hochspannungsprüfungen werden im Herstellerwerk als Element der Qualitätssicherung routinemässig durchgeführt, wobei Ablauf sowie Form und Amplitude der elektrischen Beanspruchung auf das entsprechende Betriebsmittel bzw. Isolationssystem abgestimmt und in nationalen und internationalen Prüfvorschriften definiert sind [5],[6],[7],[8]. Das Prüfkriterium besteht in einer einfachen Ja/Nein-Entscheidung: Halten der Spannung oder Versagen der Isolation (Durchschlag, Überschlag). Man geht bei einer dielektrischen Prüfung allgemein davon aus, dass ein Zusammenhang zwischen dem Prüfpegel und der Wahrscheinlichkeit besteht, Schwachstellen in einem Isolationssystem aufzudecken.

Das Ziel einer Stehspannungsprüfung ist der Nachweis einer bestimmten Isolationsfestigkeit. Dieses Isolationsniveau entspricht nur bei Typprüfungen der in der Isolationskoordination festgelegten *Steh-Spannung* (rated withstand voltage). Bei den üblichen Vor-Ort-Prüfprozeduren [5],[6] wird die dielektrische Beanspruchung gegenüber der spezifizierten Steh-Spannung signifikant reduziert: bei neuen GIS-Anlagen wird normalerweise ein

Prüfpegel von 80% der AC-Stehspannungsfestigkeit gewählt (36% LIWL). Dieser reduzierte Prüfpegel wird vielfach auch bei Vor-Ort-Spannungsprüfungen nach Reparaturarbeiten angewendet.

Vor-Ort-Spannungsprüfungen von energietechnischen Komponenten werden in den meisten Fällen mit *Wechselspannung (AC)* bei Industriefrequenzen (10...300 Hz) durchgeführt. Nur in speziellen Prüffällen (z.B. bei GIS) wird vor Ort zusätzlich zur Wechselspannungs-Beanspruchung eine Prüfung mit Blitzstoss-Spannung gefordert [4],[5].

Prinzipiell müssen bei einer reinen Spannungsprüfung die folgenden *Einschränkungen* berücksichtigt werden:

- Das Resultat einer Stehspannungsprüfung ermöglicht keine differenzierte Aussage über den Isolationszustand.
- Das Verfahren ist grundsätzlich nicht zerstörungsfrei, d.h. beim Aufdecken und Lokalisieren von Schwachstellen können Durchschläge auftreten, welche das geprüfte Isolationssystem irreversibel schädigen können (z.B. Feststoffisolation).
- Wenn bei einer Spannungsprüfung Durchschläge auftreten, kann dies in komplexen Anlagen und Geräten zu schwer kontrollierbaren Folgeschäden führen (z.B. in einer GIS-Anlage durch Überspannungen infolge von Reflexionsvorgängen). Diese versteckten Folgeschäden können die Betriebsicherheit einer geprüften Anlage vermindern.

### 2.2 Wechselspannungsprüfung mit begleitender TE-Messung

Durch eine empfindliche Teilentladungsdetektion kann grundsätzlich bei jeder Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung die Aussagekraft und die Selektivität, mögliche Schwachstellen in der Isolation aufzudecken, wesentlich verbessert werden. Bei der Festlegung der dazu notwendigen Prüfbeanspruchung (Prüfpegel) müssen folgende Fälle unterschieden werden:

- TE-Prüfung von Komponenten und Anlagen vor der Inbetriebsetzung
- TE-Prüfung von Komponenten nach einer Reparatur oder Revision
- TE-Diagnoseprüfung an stark gealterten Komponenten und Anlagen.
- TE-Diagnoseprüfung zur Abklärung betrieblicher Störungen (z.B. Alarm).

Bei der Inbetriebsetzung von neuen Anlagen oder nach Revisionen werden im Anschluss an eine Stehspannungsprüfung (z.B. mit 80% der Stehwechselspannung) Teilentladungsmessungen bei einer Prüfbeanspruchung von ca. 100% bis 150% U<sub>n</sub> durchgeführt. Wichtig ist, dass bei der TE-Prüfung die Spannungsbeanspruchung genügend lange

ansteht, damit das statistische Verhalten bestimmter Fehlerstellen in der Isolation (z.B. Gaseinschluss in Feststoffisolation) berücksichtigt wird. Bei einem Prüfpegel von  $150\% U_n$  ist eine Prüfdauer von mehreren Minuten notwendig.

Prüfungen von gealterten Betriebsmitteln mit erhöhter Wechselspannungen sind, mit der Ausnahme einer kurzzeitigen Überbeanspruchung mit z.B.  $120\% U_n$  vor der eigentlichen TE-Prüfung zur Simulation von temporären Überspannungen, nicht sinnvoll. Bei einer Vor-Ort-TE-Prüfung von betriebsgealterten Anlagen und Komponenten geht es primär um den Nachweis der Teilentladungsfreiheit bei Betriebsspannung.

Die Prüfpraxis zeigt, dass durch eine Vor-Ort-TE-Messung Schwachstellen aufgedeckt und in vielen Fällen auch geortet werden können. Dass dabei während der Spannungsbeanspruchung bei richtigem Vorgehen ein überraschender Isolationsdurchschlag vermieden werden kann, ist sicher als grosser Vorteil zu werten. Damit sind bei Vor-Ort-Prüfverfahren mit empfindlicher TE-Detektion im Normalfall auch keine versteckten Folgeschäden zu befürchten.

### 3. Mobile Prüfgeräte für den Vor-Ort-Einsatz

Bei der Spannungsprüfung von kompletten Hochspannungsanlagen vor Ort besteht grundsätzlich das Problem, dass die Hochspannungsisolation solcher Prüflinge eine grosse kapazitive Belastung für die Prüfquellen darstellt und somit spezielle Prüfeinrichtungen erfordert. Normale Laborprüfgeräte (z.B. Prüftransformatoren) sind wegen der limitierten Leistungsfähigkeit und vor allem auch aus Gründen der Transportierbarkeit für den Vor-Ort-Einsatz wenig geeignet.

#### 3.1 Mobile Stossgeneratoren

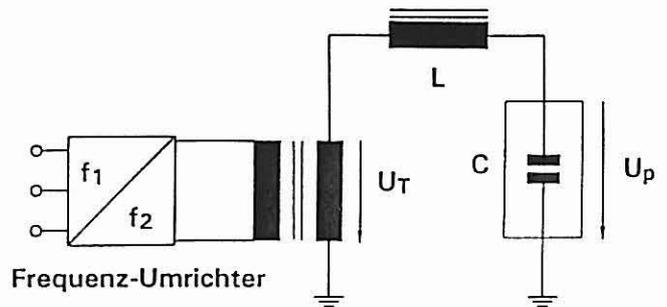
Die hohe kapazitive Belastung grosser Prüflinge (z.B. Kabelanlagen) stellt an Impulsspannungsquellen, wie z.B. Stoss-Generatoren in Marx-Schaltung, hohe Anforderungen an die gespeicherte Energie, um einen vernünftigen Spannungs-Ausnutzungsfaktor zu erreichen. Mobile Stossgeneratoren besitzen aus Gründen der Transportierbarkeit (Gewichts- bzw. Volumenbeschränkung) immer einen relativ kleinen Energieinhalt und sind deshalb zur Stossprüfung von grossen Prüflingskapazitäten, wie z.B. Hochspannungs-Kabelanlagen, nur mit Einschränkungen einsetzbar. Die Kapazitäten von GIS-Anlagen (ca. 10 bis 20 nF) können aber in der Praxis problemlos geprüft werden.

Als Beispiel eines speziellen Vor-Ort-Prüfgeräts sei hier der mobile Stossgenerator der FKH (Eigenentwicklung) erwähnt: Energieinhalt: 40 kJ, Stufenzahl: 10, Ladespannung: 800-kV, Gewicht: 1600 kg, Volumen:  $15 \text{ m}^3$  (Lufttransport möglich). Mit einer

Zusatz-Schwingdrossel können auch oszillierende Blitz- oder Schaltstoss-Spannungen mit Amplituden bis 1.2 MV erzeugt werden.

#### 3.2 Serieresonanz-Prüfanlagen

Zur Lösung von Wechselspannungs-Prüfproblemen bei grossen Prüflingskapazitäten wurden von der FKH bereits ab 1980 Serieresonanz-Schaltungen eingesetzt [9],[10]. Mit diesem einfachen Schaltungskonzept können mobile AC-Prüfquellen mit sehr hoher reaktiver Prüfleistung im MVAr-Bereich realisiert werden. Für die Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen und von längeren Kabelstrecken eröffneten sich damit neue Möglichkeiten [4]. Das Schaltungsprinzip ist in der Figur 1 dargestellt.



Figur 1: *Grundsaltung eines Serie-Resonanzprüfkreises*

- C* Prüflingskapazität
- L* Induktivität (Drosselspulen in Serie- oder Parallelschaltung)
- U<sub>p</sub>* Prüfspannung
- U<sub>T</sub>* Ausgangsspannung des Step-Up Transformators
- f<sub>1</sub>* Netzfrequenz
- f<sub>2</sub>* Prüffrequenz

Wenn man die Verluste des Resonanzprüfkreises in einem Ersatzwiderstand  $R$  zusammenfasst, so wird die erreichbare Spannungsverstärkung bei der Resonanzfrequenz  $f_0$

$$(U_p / U_T) \approx (2\pi f_0 L) / R \approx Q. \quad (1)$$

Da insbesondere eine SF<sub>6</sub>-Isolation, aber auch PE- oder VPE-Kabelisolation mit ihren verschwindend kleinen dielektrischen Verlusten ( $\tan \delta < 10^{-3}$ ), eine nahezu ideale Kapazität darstellen, ist die praktisch erreichbare Resonanzüberhöhung nur durch die Verluste der als Induktivität verwendeten Drosselspulen, d.h. durch deren Güte  $Q$  gegeben. Durch eine optimierte Konstruktion der Resonanzdrosselspulen lassen sich diese Verluste gering halten; typische  $Q$ -Werte von bestehenden Drosselkonstruktionen liegen bei 40...100 ( $Q$  nimmt mit der Frequenz zu).

Im Vergleich zur reaktiven Prüfleistung  $P$  sind bei Wechselspannungsprüfungen mit Serieresonanz-Anlagen nur sehr kleine Einspeiseleistungen  $P_{in}$  erforderlich. Im Resonanzfall ergibt sich:

$$P_{in} \approx P / Q \quad (2)$$

Diese Reduktion der Einspeiseleistung kann bei Vor-Ort-Prüfungen von entscheidender Bedeutung sein, da auf Baustellen oft nur eine Stromversorgung mit begrenzter Anschlussleistung zur Verfügung steht.

Gegenüber der Spannungserzeugung mit einem 50-Hz-Prüftransformator bietet damit der Einsatz einer Serie-Resonanzanlage für eine Vor-Ort-Prüfung generell folgende *Vorteile*:

- Geringerer Leistungsbedarf auf der EinspeiseSeite
- Sinusförmige Spannung am Prüfling ohne Oberwellen
- Wesentlich geringeres Gewicht bzw. Volumen bezogen auf die Prüfleistung
- Minimaler Energieumsatz an der Fehlerstelle beim Durchschlag des Prüflings.

Es gibt heute *zwei Varianten* von Serie-Resonanzprüfanlagen, welche für einen Vor-Ort-Einsatz in Frage kommen:

- Resonanzkreis mit fester Induktivität und Frequenzabstimmung [4],[9],[10],[12].
- Resonanzkreis mit abstimmbarer Induktivität bei fester Frequenz von 50 Hz bzw. 60 Hz [11].

### 3.2.1 Serieresonanz-Anlagen mit Frequenzabstimmung

Wie aus Figur 1 ersichtlich ist, besteht eine frequenzabstimmbare Serieresonanz-Prüfanlage aus folgenden Hauptkomponenten: Einspeisequelle mit einstellbarer Frequenz, Step-up Transformator, Resonanz-Drosselspulen. Konzept, Aufbau und Einsatz einer Hochspannungsprüfanlage nach dem Prinzip der Serieresonanz mit Frequenzabstimmung wurden erstmals in [9] beschrieben. Mit der Einführung von modernen IGBT-Frequenzumrichtern als Einspeisequellen wurde dieses Serie-Resonanzprüfverfahren auch erstmals kommerziell auf dem Markt angeboten [12].

Ein ganz wesentlicher Vorteil von frequenzabgestimmten Serieresonanz-Anlagen ist die Möglichkeit, Spannungsprüfungen mit erhöhter Frequenz durchzuführen: damit können bei der Prüfung von SF<sub>6</sub>-Anlagen auch die Spannungswandler mit der vollen Prüfspannung beaufschlagt werden, da bei höherer Prüffrequenz (z.B. 100 Hz) keine Gefahr der Sättigung der Wandlerkerne besteht.

Bei einer begleitenden Vor-Ort Teilentladungsmessung hat eine nicht-netzfrequente Prüfspannung ausserdem den Vorteil, dass beim Einsatz eines modernen TE-Impulsverarbeitungssystems eine eventuell im Innern der Isolation auftretende Teil-

entladung gegenüber netzsynchronen (50-Hz), äusseren Störungen wirkungsvoll diskriminiert werden kann [13].

### 3.2.2 Technische Daten der modularen FKH-Serieresonanz-Anlagen

Das Kernstück aller FKH-Resonanzprüfanlagen bilden sehr kompakt gebaute Drosselspulen hoher Leistung. Die Hauptspezifikationen der Drosselspulen-Module sind in Tabelle 1 und 2 zusammengefasst. Durch das modulare Konzept besteht die Möglichkeit, die Drosselspulen in Serie- und/oder in Parallelschaltung zu betreiben.

Induktivität: 50 H	Nennfrequenz: 100 Hz
U <sub>max</sub> : 230 kV	Höhe: 770 mm
I <sub>max</sub> : 6 A (KB 10 min)	Durchmesser: 705 mm
Güte Q: 140 bei 100 Hz	Gewicht: 420 kg

Tabelle 1: 50 H-Resonanz-Drosselmodul

Induktivität: 10 H	Nennfrequenz: 40 Hz
U <sub>max</sub> : 65 kV	Höhe: 810 mm
I <sub>max</sub> : 25 A (KB 30 min)	Durchmesser: 1170 mm
Güte Q: 65 bei 40 Hz	Gewicht: 860 kg

Tabelle 2: 10 H-Resonanz-Drosselmodul für Kabelprüfungen

Durch den Einsatz von leistungsmässig abgestuften *Einspeisequellen* kann zusammen mit den modular aufgebauten Induktivitäten für jeden Prüfeinsatz eine Serieresonanz-Anlage zusammengestellt werden, welche den jeweiligen Anforderungen bezüglich Prüfspannung, Prüfleistung und Prüffrequenz optimal angepasst ist. Eine Übersicht der zur Zeit bei der FKH verfügbaren Einspeisequellen gibt Tabelle 3.

	IGBT-Frequenz-Umrichter **	IGBT-Frequenz-Umrichter	Diesel-Generator **
P <sub>in</sub> (max)	45-kVA	200-kVA	100-kVA (200 kVA *)
Frequenzbereich	30...200 Hz	18....1000 Hz	50...150 Hz

Tabelle 3: *Einspeisequellen für Serieresonanz-Anlagen mit Frequenzabstimmung (\* : Leistungsverdopplung durch Parallelschaltung von zwei Aggregaten, \*\* : TE-frei).*

#### 4. Beispiele aus der Prüfpraxis

##### 4.1 Vor-Ort-Prüfung von SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen (GIS)

Es ist heute sowohl vom Betreiber als auch vom Hersteller allgemein akzeptiert, dass bei SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen vor der Inbetriebnahme eine ausreichende Isolationsfestigkeit mit einer Spannungsprüfung nachgewiesen werden muss [14],[15].

Neben mechanischen Beschädigungen, welche beim Transport, bei der Lagerung oder beim Zusammenbau der Anlage entstehen können, sind es vor allem bewegliche, metallische Partikel, welche die elektrische Festigkeit der SF<sub>6</sub>-Isolation stark reduzieren können. Aufgrund der strengen Qualitätskontrollen im Herstellerwerk (Stückprüfung mit TE-Messung) kann man davon ausgehen, dass eine Isolationsminderung durch Defekte in Feststoffisolatoren oder durch Fehler in zusätzlich eingebauten Anlagenkomponenten (z.B. Spannungswandler) weit weniger wahrscheinlich ist. Trotzdem ist es für GIS-Anlagen aller Spannungsklassen empfehlenswert, alle vor Ort eingebauten Komponenten in die dielektrische Prüfung miteinzubeziehen.

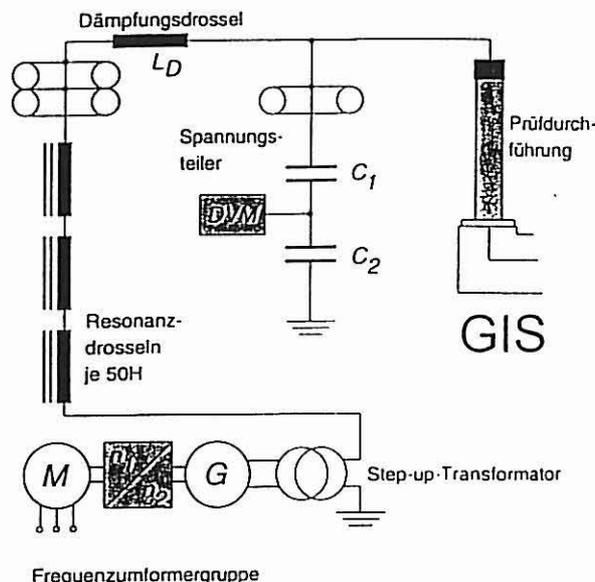
##### 4.1.1 Prüferfahrungen bei GIS vor Ort

Innerhalb der Zeitperiode von 1980 bis 1996 wurden mit den mobilen Serie-Resonanzanlagen der FKH mehr als 100 GIS-Anlagen mit insgesamt mehr als 500 Schaltfeldern mit Wechselspannung geprüft. In den meisten Fällen wurde eine reine Stehspannungsprüfung (z.B. nach IEC 517, Procedure A [5]) durchgeführt. In ca. 20 % der Prüfeinsätze kam eine Teilentladungsmessung zur Anwendung. In praktisch allen Fällen wurden die angebauten GIS-Spannungswandler mit erhöhter Frequenz (typischerweise bei 100...120 Hz) mitgeprüft.

Eine typische Seriersonanz-Prüfschaltung für die Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von SF<sub>6</sub>-Anlagen ist in Figur 2 dargestellt. Durch den modularen Aufbau der Resonanzdrosseln (beliebige Serie- und/oder Parallelschaltung) können GIS-Anlagen aller Spannungsebenen bis zu einer Gesamtkapazität von ca. 20 nF pro Phase geprüft werden (bis zu 10 Schaltfelder bei 420-kV-Anlagen). Die Prüfanordnung mit vier Resonanz-Drosseln in Serie ist bis zu einer Prüfspannung von ca. 500-kV teilentladungsfrei.

Ganz allgemein deckt sich die Prüferfahrung der FKH mit den in [14] gemachten Feststellungen, dass vor allem bei 420-kV Anlagen bei der Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung mit einem Prüfspannungspegel von 80% der spezifizierten Stehwechselspannung (540-kV) eine sehr hohe Fehlerrate auftritt: bei mehr als 50% der geprüften 420-kV-GIS-Anlagen verschiedener Hersteller ist bei dieser Beanspruchung ein Durchschlag aufgetreten.

Die Fehlerursachen waren sehr vielfältig (siehe Tabelle 4) und konnten in einigen Fällen nicht eindeutig abgeklärt werden.



Figur 2: Seriersonanz-Prüfschaltung für die Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung einer SF<sub>6</sub>-Anlage (GIS).

Fehlerursache	Relative Häufigkeit		
	oft	selten	nur einmal
freie Metallpartikel (Abrieb, Späne)	X		
Defekte Isolatoren (Transportschäden)	X		
kleine Fremdkörper (Drahtstücke, Schweissperlen)		X	
grosse Fremdkörper (Werkzeug)			X
fehlerhafte Montage		X	

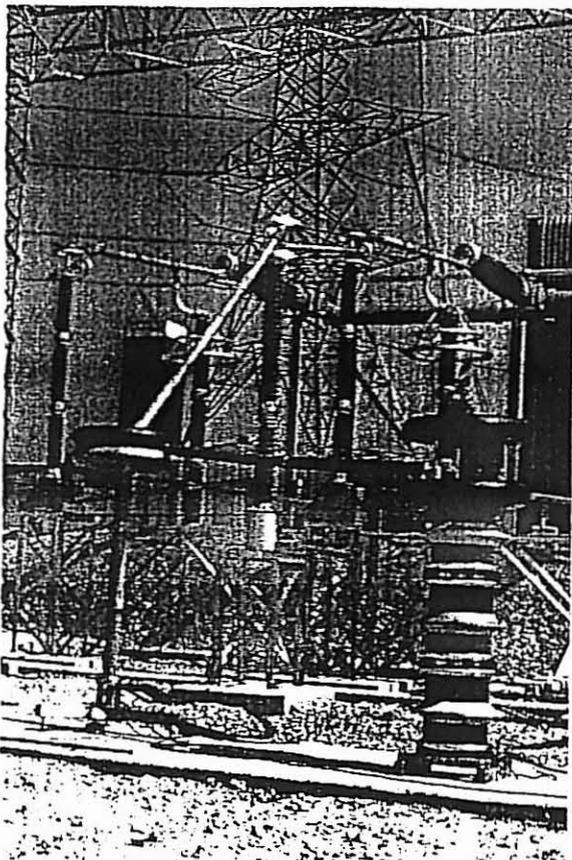
Tabelle 4: Wichtigste Fehlerursachen bei Vor-Ort-Wechselspannungsprüfungen von GIS.

Von einer internationalen Arbeitsgruppe der CIGRE (WG 23/33-12) sind für die Durchführung von Teilentladungsmessungen an GIS vor Ort kürzlich Empfehlungen ausgearbeitet worden, welche vor allem die Prüfbeanspruchung und den Prüfablauf festlegen [15]. Die wichtigsten Punkte dieser Prüfprozedur sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

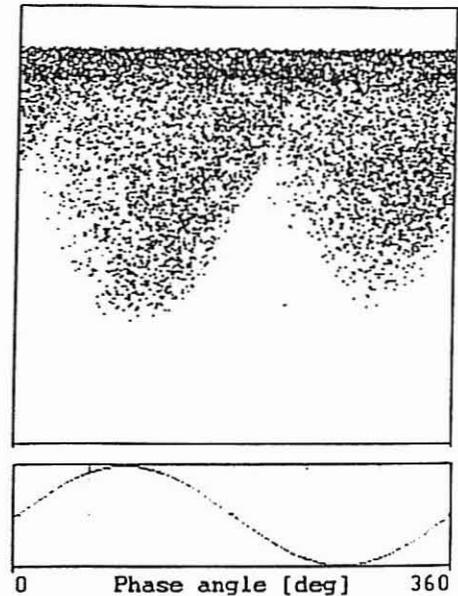
Prüfschritt	Prübeanspruchung	Prüfdauer
Konditionierung	1.0 ... 1.7 $U_0$	> 15 min
TE-Messung	0.8 x 0.36 LIWL	einige Minuten
Spannungsprüfung	0.36 LIWL	1 min
TE-Messung	0.8 x 0.36 LIWL	einige Minuten

**Tabelle 5:** Empfehlungen der CIGRE [15] für die Vor-Ort-Spannungsprüfung mit TE-Messung an GIS-Anlagen (LIWL: Stehblitzstossspannung,  $U_0$ : Phase-Erde Spannung).

Bei der Teilentladungsmessung an GIS sind die bisherigen Erfahrungen der FKH mit der UHF-Detektionsmethode (siehe z.B. [13]) sehr positiv verlaufen: insbesondere konnten auch in Anlagen mit Freiluftdurchführungen hohe Detektionsempfindlichkeiten erreicht werden und in mehreren Prüffällen wurden freie metallische Partikel erfolgreich detektiert und geortet (siehe Figur 4). Andere Fehler, die mit TE-Messung aufgedeckt werden konnten, sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Ungelöst bei der UHF-Methode ist hingegen das Problem der Kalibrierung bzw. der Quantifizierung der gemessenen Grössen.



**Figur 3:** Vor-Ort-Prüfung einer 420-kV GIS mit Serieresonanz-Anlage. Vorne rechts: Resonanzdrosseln, links: kapazitiver Spannungsteiler.



**Figur 4:** Detektion von Teilentladungen in einer GIS (UHF-Sensor): Verunreinigung durch freie metallische Partikel (PRPDA-Darstellung).

#### 4.2 Vor-Ort Prüfung von Hochspannungs-Kabelanlagen

Bei einer neu erstellten Kabelanlage darf man im allgemeinen erwarten, dass die einzelnen Komponenten dieser Anlage - Teillängen des Kabels, Endverschlüsse, Muffen - ordnungsgemäss geliefert worden sind und dass sie die notwendigen Qualitätsprüfungen bestanden haben. Da im Herstellerwerk nur die Einzelkomponenten einer Kabelanlage den üblichen Typen- und Routineprüfungen unterzogen werden, besteht sowohl vom Ersteller bzw. Betreiber der Anlage als auch von der Kabelherstellerseite ein Interesse, die fertiggestellte Anlage als Ganzes vor der Inbetriebnahme zu überprüfen. Dabei soll sichergestellt werden, dass bei der Installation keine Montagefehler unterlaufen sind und dass am Material keine Beschädigungen durch Transport oder Verlegung vorliegen.

Der folgenden Teil des Beitrags beschränkt sich auf die Vor-Ort Spannungsprüfung von Einleiter-Energiekabel mit moderner Kunststoffisolation, d.h. mit Polyäthylen (PE), vernetztem Polyäthylen (VPE oder XLPE) sowie mit dem Copolymerisat EPR (Ethylene-Propylene-Rubber). Nicht behandelt werden hier Prüfungen an Öl-Papier-Kabel bzw. Papier-Masse-Kabel. Diese Unterscheidung drängt sich auf, da heute feststeht, dass die Prüfspannungsform auf das Kabeldielektrikum abgestimmt werden muss, d.h. die bei Öl-Papier-Kabeln bewährten Vor-Ort-Prüfungen mit hoher Gleichspannung (z.B.  $4 U_0$ ) sind bei kunststoffisolierten Kabeln nutzlos und können in gewissen Fällen sogar schädlich sein [16].

#### 4.2.1 Prüfvorschriften, Empfehlungen

Wenn eine kunststoffisolierte Kabelanlage vor Ort nach den heute geltenden IEC-Vorschriften [6] mit Wechselspannung geprüft wird, ist bei dieser Prüfung die zwischen Leiter und Schirm angelegte Spannung kleiner ( $1.7 U_0$ ) als die für Dauerbetrieb zugelassene maximale Systemspannung  $U_m$  (z.B. 123-kV bei einer 110-kV-Anlage), welche bei einem satten einpoligen Erdschluss im Extremfall in einem *isolierten Netz* kurzzeitig an den nicht betroffenen Leitern gegenüber Erde auftreten kann. Was die Vor-Ort-Spannungsprüfung anbetrifft, ist die geltende IEC-Vorschrift [6] technisch überholt, da dort auch immer noch die Prüfung mit hoher Gleichspannung ( $4 U_0/15 \text{ min}$ ) empfohlen wird.

Innerhalb der CIGRE befasst sich eine Arbeitsgruppe (WG 21-09) seit längerer Zeit mit Prüfverfahren für kunststoffisolierte Kabel nach deren Verlegung. Die seit mehr als zehn Jahren geführten Diskussionen über die Prüftechnik bei kunststoffisolierten Kabeln nach der Verlegung können folgendermassen zusammengefasst werden [17]:

1. Eine Vor-Ort-Prüfung kunststoffisolierter Kabel mit Gleichspannung ist nicht aussagekräftig.
2. Die Wahrscheinlichkeit von Beschädigungen während der Kabelverlegung ist gering. Eine korrekt durchgeführte Mantelprüfung mit Gleichspannung kann eventuelle Schäden am Kabelmantel aufdecken.
3. Aufgrund einer Analyse der am häufigsten auftretenden Schäden soll eine Vor-Ort-Spannungsprüfung hauptsächlich auf das Kabelzubehör, d.h. auf die Endverschlüsse und Muffen, ausgerichtet sein.
4. Nach systematischen Versuchen mit künstlich eingebauten Defekten kommt man zum Schluss, dass im Vergleich mit den anderen untersuchten Prüfverfahren eine Wechselspannungsprüfung mit einer Spannung von 2 bis 3  $U_0$  die zuverlässigsten Resultate bezüglich Aufdeckung von Montagefehlern und Schwachstellen liefert.

Aufgrund von diesen Empfehlungen und eigenen Erfahrungen sind viele deutsche und auch schweizerische Betreiber von Kabelanlagen inzwischen dazu übergegangen, für die Inbetriebnahme von neuerstellten, kunststoffisolierten Kabelanlagen folgende Prüfbedingungen zu fordern:

Sternpunktbehandlung im Netz	Prüfbeanspruchung	Prüfdauer
starr geerdet	AC: $2.0 \dots 2.5 U_0$	15 min
gelöscht	AC: $2.0 U_0$	60 min

Tabelle 6: Bedingungen für Wechselspannungsprüfung vor Ort bei kunststoffisolierten Kabeln ( $U_0$ : Phase-Erde Spannung).

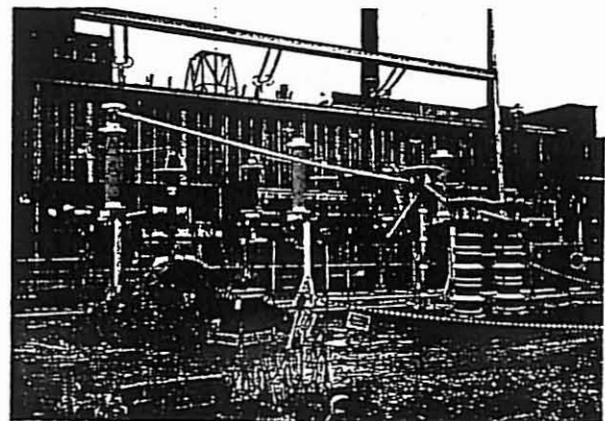
#### 4.2.2 AC-Prüfmöglichkeiten

Der Einsatz von Serieresonanz-Anlagen bei der Vor-Ort-Prüfung von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln bietet keine nennenswerte Schwierigkeiten [4],[12],[16]. Zur Lieferung grosser kapazitiver Ladeströme können mehrere Drossel­spulen parallel geschaltet werden. Mit den heute zur Verfügung stehenden Serieresonanz-Anlagen der FKH können neben 110-kV und 132-kV-Kabelverbindungen auch Kabel der 220-kV und der 420-kV-Spannungsebene vor Ort geprüft werden.

In Abhängigkeit vom Kabelquerschnitt bzw. der Kabelkapazität  $C_K$  ergeben sich bei einem Prüfspannungspegel von  $2 U_0$  und einer Prüfdauer 15 min folgende Grenzlängen:

$U/U_0$	$2 U_0$	Prüfdauer	$C_K$	Kabellänge bis
110/64-kV	128-kV	15 min	$0.2 \mu\text{F}/\text{km}$	6 km 10 km*
220/127-kV	254-kV	15 min	$0.14 \mu\text{F}/\text{km}$	1.6 km
400/230-kV	460-kV	15 min	$0.1 \mu\text{F}/\text{km}$	0.8 km

Tabelle 7: Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von kunststoffisolierten Kabeln mit Serie - Resonanzanlagen. Prüfmöglichkeiten bei  $2 U_0/15 \text{ min}$  (\* mit 10 H-Drossel­spulen).



Figur 5: Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung an einer 220-kV Kabelanlage mit VPE-Isolation (Prüfspannung: 300-kV).

#### 4.2.3 Prüferfahrungen

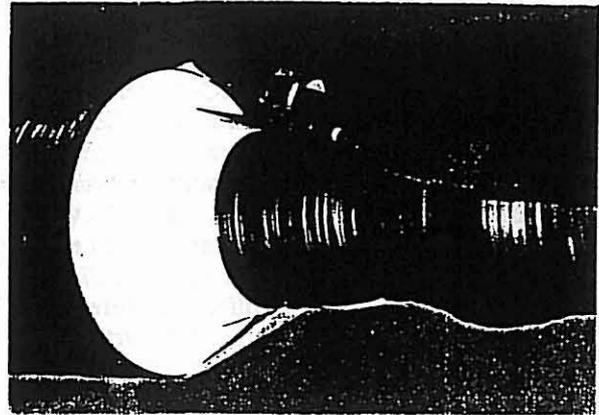
Bei einigen Prüfeinsätzen der FKH wurden in kunststoffisolierten Hochspannungs-Kabelanlagen Isolationsdurchschläge und Fehler registriert. Die wichtigsten Schwachstellen und Fehler, die dabei aufgedeckt wurden, können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Vier Isolationsdurchschläge erfolgten in *Frei-luft-Endverschlüssen*. Dabei waren sowohl Konstruktionen mit traditioneller Wickeltechnik als auch moderne Aufschiebe-Garnituren beteiligt.
- Durchschläge wurden auch in *SF6-isolierten End-verschlüssen* festgestellt (verschobene Steuerkonen, Montagefehler).
- Bei der Prüfung einer neuerlegten 110-kV-Doppelkabelanlage haben 3 von insgesamt 12 *Kabelmuffen* (Wickeltechnik) durchgeschlagen. Als Ursache wird ein Materialfehler oder ein Montagefehler vermutet.
- Bei zwei 110-kV Kabelanlagen erfolgte ein *Durchschlag im extrudierten Teil des Kabels*. Die Durchschlagsstellen befanden sich in beiden Fällen am Kabelende ca. 10 bis 20 m vom Endverschluss entfernt.
- In einem Fall handelte es sich um ein *betriebsgealtertes* Kabelstück (Alter: 5 Jahre). Die angelegte Prüfspannung zum Zeitpunkt des Durchschlags lag bei 230-kV.
- Bei der Prüfung einer *neuerlegten* 110-kV-Doppelstrangverbindung hat eine von sechs geprüften Kabelstecken bei ca. 210-kV durchgeschlagen. Nach einer Reparatur durch Nachziehen und Setzen einer Muffe führte die Wiederholungsprüfung erneut zu einem Durchschlag im gleichen Kabelabschnitt. Genauere Untersuchungen des betroffenen Kabelabschnitts haben ergeben, dass auf dem inneren Halbleiterbelag unzulässige Störstellen vorhanden waren. Diese Defekte hätten eigentlich bereits bei der Qualitätsprüfung im Werk entdeckt werden sollen.

Alle Durchschläge in den Kabeln und Garnituren traten jeweils entweder direkt beim Hochfahren der Spannung oder kurz nach Erreichen der Prüfspannung *innerhalb von wenigen Minuten* auf.

#### 4.2.4 Teilentladungsdetektion an Kabelmuffen

Für die Kontrolle und Überwachung von Verbindungsmuffen (Aufschiebetechnik) in Hochspannungs-Kabelanlagen wurde ein breitbandiger Teilentladungssensor entwickelt (siehe Figur 6). Kalibrationsmessungen im Labor ergaben eine Detektionsempfindlichkeit von ca. 5 pC. Dieser Sensor wurde in total 15 Muffen von drei neuerstellten 170-kV-Kabelstrecken im Stadtnetz von Zürich installiert. Anlässlich der Inbetriebnahmeprüfungen (Resonanzprüfung mit Wechselspannung) dieser Kabelanlagen wurde die Funktionstüchtigkeit des TE-Sensors nachgewiesen [18]. Die Anschlüsse des Sensors sind für spätere Messungen während des Betriebs jederzeit zugänglich.



Figur 6: *TE-Sensor an Aufschiebemuffe installiert (vorgefertigter Muffenkörper links).*

### 4.3 Vor-Ort-Prüfung von Leistungstransformatoren

#### 4.3.1 Veranlassung und Ziel

Dielektrische Prüfungen an grossen Leistungstransformatoren mit Wechsel- und Stossspannung werden bei der Endprüfung im Prüffeld der Hersteller routinemässig durchgeführt [8]; die Prüfbedingungen sind in entsprechenden Vorschriften festgelegt [7]. Da solche Prüfungen am Aufstellungsort von Transformatoren bisher nur in wenigen Ausnahmefällen durchgeführt worden sind, soll die Veranlassung für eine Spannungsprüfung an Leistungstransformatoren vor Ort kurz erläutert werden.

Grosse Leistungstransformatoren (> 100 MVA) müssen sehr oft wegen dem hohen Transportgewicht und den Transportabmessungen sowie zunehmend auch aus Umweltschutz-Gründen ohne Öl und ohne Hochspannungs-Durchführungen transportiert werden. Am Aufstellungsort findet dann die endgültige Montage und Füllung mit Öl statt. Ähnlich wie bei anderen Betriebsmitteln (Kabelanlagen, GIS-Anlagen), die vor Ort montiert werden, besteht auch hier von der Betreiberseite der Wunsch, nach der Endmontage vor dem Einschalten ans Netz eine endgültige Kontrolle des Isolationsystems durchzuführen.

Nach einem Transportschaden und einer Reparatur vor Ort wird eine Überprüfung der Integrität des Isolationsystems ebenfalls empfohlen. Auch bei Revisionsarbeiten vor Ort, insbesondere wenn der Aktivteil eines Transformators aus dem Kessel ausgehoben werden muss, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass Montagefehler auftreten, welche zu einer Reduktion der Betriebssicherheit führen können.

Ein weiterer Anlass für eine Überprüfung einer Transformator-Isolation kann ein spezielles betriebliches Ereignis sein, wenn z.B. ein Transformator durch ein Buchholz-Relais oder durch den Differentialschutz ausgeschaltet wurde.

#### 4.3.2 Praktische Erfahrungen vor Ort

Aus der langjährigen Praxis im Prüffeld ist bekannt, dass Schwachstellen im Isolationssystem von grossen Leistungstransformatoren mit einer empfindlichen Teilentladungsmessung erkannt werden können [8]. In einem von schweizerischen Energieversorgungsunternehmen unterstützten Projekt [19] wurden von der FKH zusammen mit den EVU's und der Industrie mehrere vor Ort taugliche Wechselspannungsprüfvarianten mit TE-Detektion praktisch erprobt:

- induzierte Spannungsprüfung mit dreiphasiger Erregung ab Kraftwerksgenerator (Inselbetrieb)
- induzierte Spannungsprüfung mit dreiphasiger Erregung via Tertiärwicklung ab Fremdquelle (z.B. Diesel-Generator, Frequenzumrichter)
- einphasige Fremdspannungsprüfung mit Serie-Resonanzanlage variabler Frequenz.

Die an mehreren Transformatoreinheiten durchgeführten Wechselspannungsprüfungen erfolgten bei einem Prüfspannungspegel, welcher 10 ... 20% über der Nennspannung lag. Es handelt sich hier somit nicht um eine Spannungsprüfung im Sinne einer Endprüfung wie im Herstellerwerk (Nachweis der korrekten dielektrischen Auslegung und Ausführung des Transformators), sondern mit diesen Vor-Ort-Prüfungen wird eine Kontrolle aller auf Platz vorgenommenen Montage- und Ölaufbereitungsarbeiten angestrebt. Bei neuinstallierten Transformatoren können die dabei gewonnenen TE-Resultate auch als Basis (Referenzmessung) für eine Trendanalyse verwendet werden, falls solche TE-Prüfungen später wiederholt werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass vor Ort dann eine hohe TE-Detektionsempfindlichkeit ( $< 100 \text{ pC}$ ) zu erreichen ist, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Erregung des Transformators mit netz-assynchroner, TE-freier Prüfquelle
- Auskopplung der TE-Signale direkt ab Messanschluss der Durchführungen
- statistische Auswertung der TE-Signale mit digitalem Impulsverarbeitungssystem (Korrelation mit der Prüfbeanspruchung).

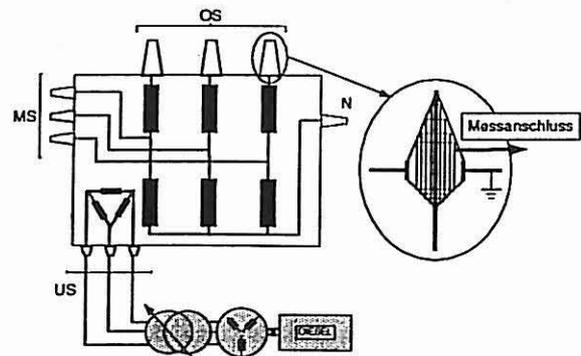
Anhand von praktischen Prüfbeispielen sollen die Möglichkeiten von Vor-Ort-Teilentladungsmessungen an Netzkupplungs-Transformatoren aufgezeigt werden. Generell wird bei Umspann-Transformatoren der Aufwand einer induzierten

Spannungsprüfung bei Vorhandensein einer Tertiärwicklung stark reduziert, da leicht verfügbare Step-up Transformatoren zur Anpassung an die Primärquellen (Generatoren) verwendet werden können.

##### 4.3.2.1 Dreiphasige induzierte Spannungsprüfung mit TE-Messung

Eine induzierte Spannungsprüfung ist immer dann angezeigt, wenn die Hochspannungswicklung des Transformators eine abgestufte Isolationsfestigkeit aufweist (Sternpunkt nicht voll isoliert). Wenn am Transformator eine Tertiärwicklung vorhanden ist, kann das Prüfobjekt via Step-up Transformator direkt ab einem Diesel-Generator-Aggregat erregt werden. Um den Prüfling über die Nennspannung hinaus erregen zu können, muss die Primärquelle eine höhere Frequenz (z.B. 60 Hz) als die Nennfrequenz des Transformators erzeugen können.

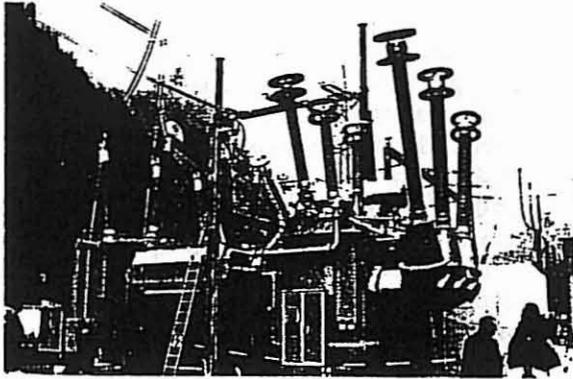
Diese dreiphasige Erregung wurde an einem neuinstallierten 220/400-kV-Netzkupplungstransformator mit Längs- und Querregelung (Reguliertransformator in separatem Kessel) realisiert. Dabei wurde der 400 MVA-Hauptpol mit einem 380-kVA Diesel-Generator-Aggregat und einem Step-up Transformator (0,4/16-kV) via Tertiärwicklung bei ca. 60 Hz dreiphasig erregt. Die realisierte Prüfschaltung ist in Figur 7 dargestellt; der Prüfaufbau in der Schaltanlage ist in Figur 8 zu sehen.



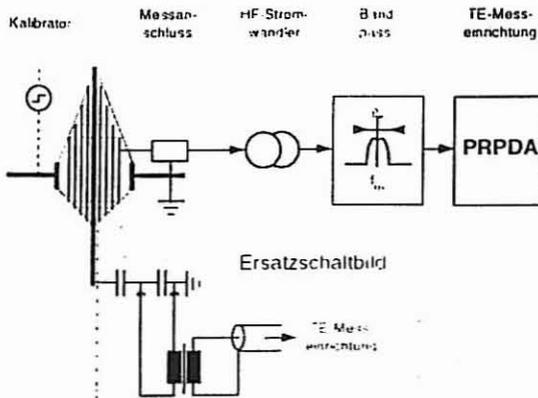
Figur 7: Induzierte Spannungsprüfung mit TE-Messung eines Auto-Transformators. Erregung via Tertiärwicklung mit Fremdquelle.

Die hochfrequenzmässige Auskopplung der Teilentladungssignale erfolgte über die herausgeführten Steuerbeläge der Durchführungen (siehe Figur 9) mittels spezieller Stromwandler. Die von der Netzfrequenz abweichende Frequenz der Prüfspannung erweist sich in allen Fällen als Vorteil, da durch den Einsatz eines digitalen TE-Impulsverarbeitungssystems die äusseren 50-Hz-Koronastörungen von benachbarten Leitungen effizient unterdrückt werden können [13]. Die Detektionsempfindlichkeit lag bei diesem Prüfaufbau bei ca.  $40 \text{ pC}$  (scheinbare Ladung nach IEC 270).

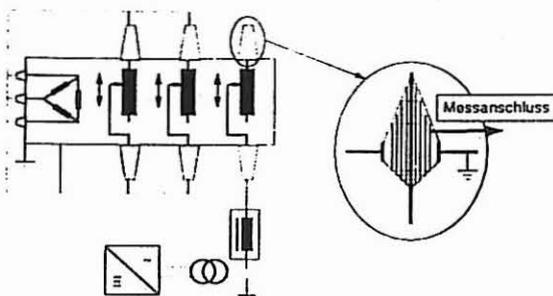
Bei der Vor-Ort-TE-Prüfung dieses Hauptpols wurde ein Montagefehler in der 400-kV Durchführungen aufgedeckt, der vor Ort behoben werden konnte. Bei einer anschliessenden Wiederholung der TE-Messung wurde die TE-Freiheit des Isolationssystems bei 110%  $U_N$  während einer Stunde nachgewiesen.



Figur 8: Vor-Ort-Prüfung eines 220/400-kV-Netzkupplungstransformators (Hauptpol)  
Rechts: 400-kV-Ausleitung.



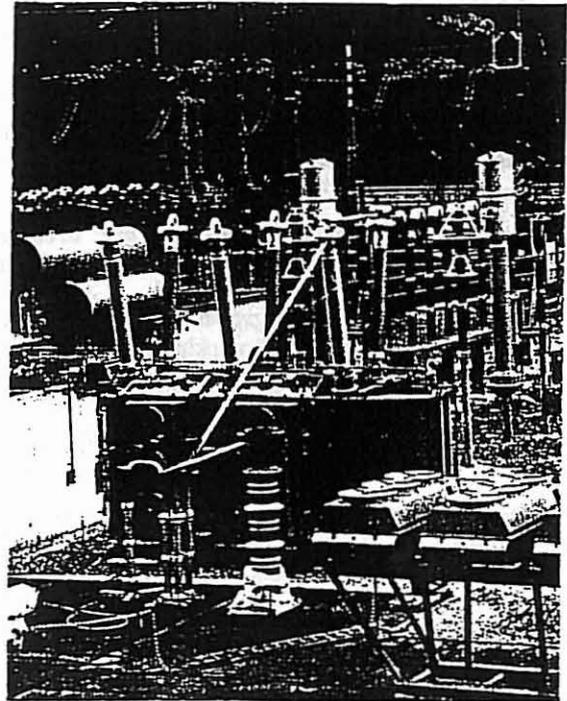
Figur 9: Teilentladungs-Detektion an Transformatoren: Auskopplung der TE-Signale an den Durchführungen, TE-Signalaufbereitung.



Figur 10: Einphasige Fremdspannungsprüfung mit einer Serie-Resonanzschaltung

#### 4.3.2.2 Einphasige Fremdspannungsprüfung mit TE-Messung mit Serie-Resonanzanlage

Beim oben erwähnten Netzkupplungstransformator wurde zur Vor-Ort-TE-Prüfung des dreiphasigen Regulatortransformators, welcher in einem separaten Kessel untergebracht ist, eine für diesen Zweck neuartige Prüfschaltung angewendet: Fremdspannungsprüfung mit Serie-Resonanzschaltung. Die realisierte Prüfschaltung ist in Figur 10 dargestellt.



Figur 11: Vor-Ort-Spannungsprüfung mit Serie-Resonanzanlage eines 220-kV/120 MVA-Regulatortransformators. Im Vordergrund mitte: Resonanz-Drosselpulen mit Spannungsteiler und  $C_z$  (siehe Text).

In dieser Prüfschaltung bildet die Kapazität der zu prüfenden vollisolierten Wicklung gegen den Kessel und gegen benachbarte Wicklungen zusammen mit einem externen Zusatzkondensator ( $C_z$ ) die kapazitive Komponente des Resonanzkreises. Die induktive Komponente wird durch eine Serieschaltung von mehreren Hochleistungsdrosselpulen (50 H, 230-kV) gebildet (siehe Figur 11). Die Anregung des Resonanzkreises erfolgt mit einer Einspeisequelle variabler Frequenz (Frequenzumrichter). Mit der Grösse von  $C_z$  kann die Prüffrequenz (Resonanzfrequenz) angepasst werden (50 bis 150 Hz).

Mit dieser Resonanz-Prüfschaltung wurde eine ausreichend hohe Teilentladungsempfindlichkeit von ca. 30 pC erreicht. Bei der phasenweise durchgeführten Prüfung konnte die TE-Freiheit des Regulatorpols bei 110%  $U_N$  während einer Stunde erfolgreich nachgewiesen werden.

## 5. Schlussfolgerungen, Ausblick

Selbst bei den grössten und komplexesten Betriebsmitteln der elektrischen Energieübertragung stellt die Überprüfung der Isolationsfestigkeit vor Ort heute kein unüberwindbares Hindernis mehr dar. Die jüngsten Entwicklungen im Bereich der mobilen Resonanz-Prüfanlagen haben neue Möglichkeiten geschaffen, auch im Höchstspannungsbereich längere Kabelstrecken und auch ausgedehnte SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen oder auch Freiluft-Anlagen zu prüfen. Die Vorteile dieser modular und kompakt aufgebauten Prüfanlagen wurden inzwischen in der Fachwelt weitgehend erkannt. Neue Anwendungen zeichnen sich bereits ab: im Vordergrund stehen neben (vollisolierten) Transformatorwicklungen und Generatorwicklungen auch Messwandler sowie diverse feststoffisolierte Sammelschienen.

Der Trend bei den Vor-Ort-Prüfungen geht eindeutig von einer reinen Stehspannungsprüfung (grundsätzlich nicht zerstörungsfrei) zu einer Wechselspannungsbeanspruchung mit begleitender Teilentladungsdetektion. Mit einer empfindlichen TE-Detektion können lokale Schwachstellen im Isolationssystem erkannt und in vielen Fällen auch geortet werden. Damit ist eine wesentlich zuverlässigere Aussage über den Isolationszustand der geprüften Komponente oder Anlage möglich. Diese Aussage kann durch Ergebnisse von zusätzlichen, integralen dielektrischen Diagnoseverfahren (z.B. Relaxationsstrommessungen, Verlustfaktormessungen bei tiefen Frequenzen) unterstützt werden.

Auf dem Gebiet der Isolations-Diagnose (inkl. TE-Messungen) sind weitere Anstrengungen bei der Interpretation und bei der Entwicklung von einfachen physikalischen Modellen notwendig, um auch in komplexen Systemen die Ergebnisse von verschiedenen Methoden richtig korrelieren zu können um abschliessend zu einem eindeutigen Befund zu kommen. Diese grundlegenden Erkenntnisse sind auch notwendig, um die gerätespezifischen Prüfvorschriften zu überarbeiten.

## 6. Verdankung

Der Autor dankt seinen Kollegen R. Bräunlich, M. Hässig, G. Storf und Th. Heizmann für ihre tatkräftige Unterstützung und Mitarbeit bei der Realisierung der beschriebenen Vor-Ort-Prüfungen.

Die kritische Durchsicht des Manuskripts besorgte Frau Dr. J. Fuhr. Auch für diese Unterstützung möchte sich der Autor herzlich bedanken.

## 7. Literatur

- [1] ETG-Fachtagung Würzburg 1992: *Isolierte Systeme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen*, ETG-Fachbericht Nr. 40, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1992.
- [2] D. König, Y. Narayana Rao (Eds.): *Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik*, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1993.
- [3] R. Porzel, E. Neudert, M. Sturm: *Diagnostik der Elektrischen Energietechnik*, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1996.
- [4] Th. Aschwanden: *Vor-Ort-Prüfungen von GIS und Kabeln mit Serieresonanz-Anlagen*, SIEMENS-TETTEX Kolloquium, Dresden 1993, Beitrag 07.
- [5] IEC-Publication 517, *Gas-insulated metal enclosed switchgear for rated voltages of 72.5-kV and above*, 1990.
- [6] IEC Publication 840, *Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV (Um = 36 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV)*, first edition, 1988.
- [7] IEC Publikation 76-3, *Power Transformers, Part 3: Insulation levels and dielectric tests*, 1980.
- [8] D.J. Kraaij, G.S. Schemel, F.M. Wegscheider: *Die Prüfung von Leistungstransformatoren*, Buchverlag Elektrotechnik, Aarau, 1983.
- [9] F. Bernasconi, W. Zaengl, K. Vonwiller: *A new high voltage series resonant circuit for dielectric tests*, 3rd Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Milan, 1979, Vol.2, Beitrag 43.02.
- [10] W. Zaengl, F. Bernasconi, B. Bachmann, W. Schmidt, K. Spinnler: *Experience of AC voltage tests with variable frequency using light-weight on-site series resonance device*, CIGRE-Session 1982, Beitrag 23-07.
- [11] J. Spiegelberg, H. Bergel, W. Pflücke, W. Einkenkel: *A new series of resonant testing-systems for cable testing*, 8th Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Yokohama, 1993, Beitrag 55.05.
- [12] W. Schufft, J. Spiegelberg, W. Hauschild: *Powerful frequency-tuned resonant test systems for after-laying cable tests*, 9th Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Graz, 1995, Beitrag 44.86.
- [13] Th. Aschwanden, P. Osvath: *Anwendungsorientierte TE-Messung im Prüffeld und vor Ort*, SIEMENS-TETTEX Kolloquium, Dresden 1993, Beitrag 17.
- [14] K.H. Weck: *GIS on-site testing and condition monitoring - Impact on insulation co-ordination*, CIGRE-Session 1992, Special Report for Joint Group 23/33.
- [15] CIGRE WG 33/23-12: *Insulation coordination of GIS: return of experience, on site tests and diagnostic techniques*, CIGRE 33-96 (WG33/23-12) IWD, Entwurf für Electra-Publikation.
- [16] Th. Aschwanden: *Vor-Ort-Prüfung von Hochspannungs-Kabelanlagen*, Bulletin SEV/VSE, Vol. 83, Nr. 15, 1993, S. 31-40.
- [17] Aucourt, C., W. Boone, W. Kalkner, R.D. Naybour, F. Ombello, "Recommendations for a new after laying test method for high voltage extruded cable systems", CIGRE-Session 1990, Beitrag 21-105.
- [18] Th. Heizmann, Th. Aschwanden, H. Hahn, M. Laurent, L. Ritter: *On-site partial discharge measurements on pre-moulded cross-bonding joints of 170-kV XLPE and EPR-cables*, Beitrag eingereicht für IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1997, Berlin.
- [19] PSEL-Projekt Nr. 74: *Entwicklung und Erprobung von Vor-Ort-Diagnoseverfahren für die Beurteilung des Isolationszustandes von Grosstransformatoren*, Projekt und Studienfonds der Schweizerischen Elektrizitätswerke (PSEL), 1996.