

Vor-Ort-Prüfungen von GIS und Kabeln mit Serieresonanz-Anlagen

Th. ASCHWANDEN

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH)
Voltastrasse 9, CH-8044 Zürich

ZUSAMMENFASSUNG

Seit der Entwicklung von modularen Serieresonanz-Anlagen mit abstimmbarer Frequenz stehen für Vor-Ort-Spannungsprüfungen sehr leistungsfähige und leicht transportierbare Prüfquellen zur Erzeugung hoher Wechselspannungen zur Verfügung. Neben einigen technischen Hinweisen zum Serieresonanz-Prüfverfahren wird über Erfahrungen bei Vor-Ort-Prüfungen von GIS und Kabelanlagen berichtet sowie auf neue Prüfmöglichkeiten hingewiesen.

1 Einleitung

In elektrischen Energieübertragungssystemen ist eine Vor-Ort-Prüfung einer Hochspannungsanlage immer dann sinnvoll, wenn wesentliche Teile dieser Anlage erst vor Ort erstellt und/oder durch die Montage massgeblich beeinflusst werden können. Bei gasisolierten 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. Eine Veranlassung für eine Vor-Ort-Spannungsprüfung zum Nachweis der elektrischen Isolationsfestigkeit ergibt sich somit bei folgenden Situationen:

- Bei einer *neuen Anlage* oder nach *grösseren Aus- oder Umbauarbeiten* an bestehenden Anlagen muss vor der Inbetriebnahme sichergestellt werden, dass die Betriebstüchtigkeit der Gesamtanlage nicht durch eine Isolationsminderung infolge von Transportschäden oder durch montagebedingte Defekte (Montagefehler, Verunreinigungen, Beschädigungen) beeinträchtigt ist.
- *Nach einer Reparatur infolge eines Störfalls* sollen durch eine Spannungsprüfung eventuelle Schwachstellen oder Folgeschäden in der Isolation einer Hochspannungsanlage aufgedeckt und lokalisiert werden. Sekundärschäden können z.B. durch hohe, transiente Überspannungen infolge des sehr schnellen Spannungszusammenbruchs und der dadurch ausgelösten Reflexionsvorgänge bei einem dielektrischen Fehler verursacht werden.
- Eine Vor-Ort-Prüfung eines bestimmten Anlagentyps oder einer bestimmten Anlagenklasse kann dann notwendig sein, wenn aufgrund der *Fehlerhäufigkeit* oder aufgrund der *negativen Betriebserfahrung* vermutet werden muss, dass die dielektrische Festigkeit des Isolationssystems dieser Anlagen im neuen oder gealterten Zustand nicht den Anforderungen entspricht, welche im Rahmen der Isolationskoordination verlangt werden.

Die mehr als 25-jährige Erfahrung mit *GIS-Anlagen* und die Analyse der im Betrieb aufgetretenen Fehler zeigen deutlich, dass eine Vor-Ort-Spannungsprüfung bei neuerstellten GIS zur Sicherstellung der notwendigen Isolationsfestigkeit unbedingt erforderlich ist [1], [2]. Allgemein richten sich bei GIS die Art und der Umfang der Vor-Ort-Prüfverfahren (Wechselspannung, Blitzstoss-Spannung oder beide) nach der Spannungsebene, der Schaltanlagengrösse, den durchgeführten Routineprüfungen im Herstellerwerk und nach den Montagebedingungen vor Ort. Die von der CIGRE eingesetzten Arbeitsgruppen 33/23 und 15/23 kommen zum Schluss, dass bei gasisolierten Schaltanlagen aller Spannungsbereiche vor Ort insbesondere eine ausreichende Wechselspannungsfestigkeit nachgewiesen werden muss. Ein Nachweis der Blitzstossfestigkeit vor Ort ist nur bei GIS-Anlagen der höchsten Spannungsebenen notwendig [3], [4].

Bei *Hochspannungskabelanlagen* (> 50-kV) wird die Eignung von verschiedenen Vor-Ort-Prüfverfahren bereits seit längerer Zeit diskutiert [5]. Die Aussagekraft der in den IEC-Vorschriften [6] enthaltenen Vor-Ort-Prüfung mit hoher Gleichspannung muss bei modernen Kabelkonstruktionen mit extrudierter Kunststoffisolation (PE, VPE, EPR) nach heutigen Erkenntnissen sicherlich in Frage gestellt werden, da bei solchen Kabelanlagen mit einer DC-Prüfung auch gravierendste Montagefehler und Defekte nicht erkannt werden können. Ein Vergleich der heute verfügbaren Vor-Ort-Prüfverfahren für kunststoffisolierte Kabel im Hochspannungsbereich ergibt, dass hinsichtlich Aussagekraft und technischem Aufwand eine Wechselspannungsprüfung mit Resonanzanlagen allen anderen Verfahren überlegen ist [7].

Der vorliegende Beitrag behandelt den Vor-Ort-Einsatz von *Serieresonanz-Prüfanlagen* bei Wechselspannungsprüfungen von SF₆-isolierten Schaltanlagen (GIS) und Energiekabelanlagen mit moderner Kunststoffisolation. Die Behandlung beschränkt sich hauptsächlich auf Inbetriebsetzungsprüfungen von Anlagen mit Betriebsspannungen (U_m) von 123-kV bis 420-kV.

Der Aspekt der begleitenden Teilentladungsmessung bei Vor-Ort-Prüfungen wird hier nur am Rande erwähnt; eine ausführlichere Behandlung dieses Themas erfolgt in anderen Beiträgen dieser Tagung. Die prüftechnische Beurteilung von betriebsgealterten GIS-Anlagen oder Kabeln durch sogenannte Vor-Ort-Diagnoseprüfungen ist ebenfalls nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags; dazu sei zum Beispiel auf Arbeiten in [8] verwiesen.

2 Serieresonanz-Prüfanlagen

SF₆-isolierte Schaltanlagen und insbesondere längere Kabelstrecken sind Prüfobjekte mit beträchtlicher Prüflingskapazität C. Diese setzen bei einer Prüfung mit hoher Wechselspannung U_p wegen des grossen Ladestroms I_c und wegen des hohen reaktiven Blindleistungsbedarfs P eine sehr leistungsfähige Prüfquelle voraus:

$$I_c = 2\pi f C U_p \quad (1)$$

$$P = 2\pi f C (U_p)^2 \quad (2)$$

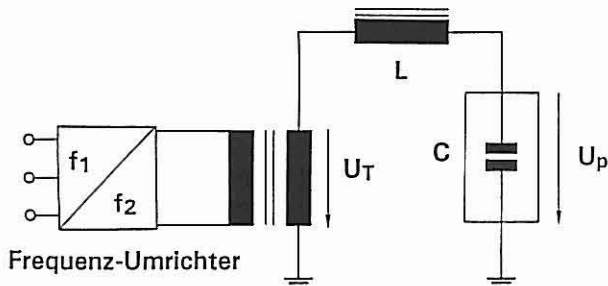
Die typischen Kapazitätswerte liegen bei SF₆-Anlagen (Innenleiter-Kapselung) je nach Baugrösse und Ausrüstung bei ca. 1...2 nF pro Schaltfeld. Bei der Prüfung von kompletten GIS-Anlagen, inkl. gekapselte Sammelschienen, Ausleitungen und Durchführungen, können die Prüflingskapazitäten bis zu einigen 10 nF pro Phase betragen. Damit liegt die erforderliche Prüfleistung für eine Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung einer 420-kV GIS mit 4 bis 5 Schaltfeldern bei einem Prüfspannungspegel von 416-kV (80% der Stehwechselspannung gemäss IEC-Vorschrift 517) im Bereich von 1 MVA (Prüffrequenz: 50 Hz).

Bei kunststoffisolierten Kabeln beträgt die Kapazität Leiter-Schirm ca. 0.1 bis 0.3 μF pro km Kabellänge (abhängig vom Leiterquerschnitt). Für eine 50-Hz-Prüfspannung U_p von 2 U₀ bei einem PE/VPE-Kabel der Spannungsreihe 110-kV erreicht man bei einer Kabellänge von 1 km bereits Prüfleistungen von ca. 1 MVA.

Diese Abschätzungen zeigen, dass konventionelle Prüftransformatoren aufgrund ihres hohen Gewichts und Volumens sowie wegen den sehr hohen Einspeiseleistungen für Vor-Ort-Spannungsprüfungen von längeren Hochspannungskabeln und grösseren SF₆-Anlagen, insbesondere im Bereich der Höchstspannungsebene (U_m > 170-kV), kaum in Frage kommen.

2.1 Serieresonanz-Prüfschaltungen

Zur Lösung von Prüfproblemen mit grossen Prüflingskapazitäten werden sowohl im Labor als auch vor Ort bereits seit längerer Zeit Serieresonanz-Schaltungen eingesetzt (siehe dazu z.B. in [9]). Dabei wird im Prüfkreis in Serie zur Prüflingskapazität C eine Induktivität L hoher Güte Q geschaltet. Das Schaltungsprinzip ist in der Figur 1 dargestellt.



Figur 1: Grundschiung eines Serie-Resonanzprüfkreises

C	Prüflingskapazität
L	Induktivität (Drosselspulen in Serie- oder Parallelschaltung)
U _p	Prüfspannung
U _T	Ausgangsspannung des Step-Up Transformators
f ₁	Netzfrequenz
f ₂	Prüffrequenz

Unter Resonanzbedingungen baut sich über dem Prüfling eine Spannung U_p auf, welche wesentlich höher als die Spannung U_T des Einspeisetransformators ist. Wenn man die Verluste des Resonanzprüfkreises in einem Ersatzwiderstand R zusammenfasst, so wird die erreichbare Spannungsverstärkung bei der Resonanzfrequenz f₀

$$(U_p / U_T) \approx (2\pi f_0 L) / R \approx Q \quad (3)$$

Da insbesondere eine SF₆-Isolation, aber auch PE- oder VPE-Kabelisolationssysteme 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...50 (Güte bestimmt bei 50 Hz). Wie Gl. (3) zeigt, nimmt die Güte in erster Näherung linear mit der Resonanzfrequenz zu (Wirbelstromverluste und andere nichtlineare Effekte vernachlässigt).

Im Vergleich zur reaktiven Prüfleistung (Gl. 2) sind bei Wechselspannungsprüfungen mit Serieresonanz-Anlagen wesentlich geringere Einspeiseleistungen P_{in} erforderlich. Mit Gl. (2) und (3) ergibt sich im Resonanzfall

$$P_{in} \approx P / Q \quad (4)$$

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

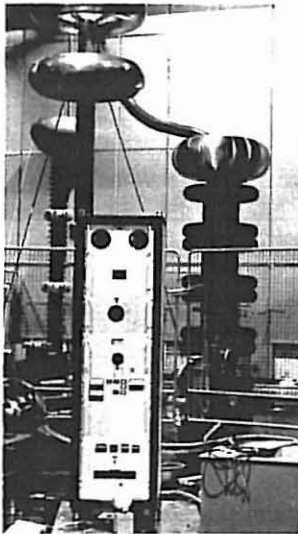
Es gibt heute zwei Varianten von Serie-Resonanzprüfanlagen, welche für einen Vor-Ort-Einsatz in Frage kommen:

- Resonanzkreis mit fester Induktivität und Frequenzabstimmung [10], [11].
- Resonanzkreis mit abstimmbarer Induktivität bei fester Frequenz von 50 Hz bzw. 60 Hz (siehe z.B. [12], [13]).

Für den Vor-Ort Einsatz von Hochspannungs-Prüfanlagen sind insbesondere die Transportierbarkeit (Strasse, Flugzeug), d.h. Gewicht und Volumen der grössten Anlagenkomponente sowie die Robustheit der Konstruktion von ausschlaggebender Bedeutung. In diesen beiden entscheidenden Kriterien bieten modulare Prüfanlagen nach dem Serieresonanz-Prinzip mit abstimmbarer Frequenz gegenüber Prüfanlagen mit abstimmbarer Induktivität erhebliche Vorteile. Resonanzdrosselspulen mit fester Induktivität können bei frequenzabstimmbaren Anlagen wesentlich kompakter und einfacher aufgebaut werden. Dadurch können kleine, gut handhabbare Transporteinheiten realisiert werden. Das Verhältnis von Gewicht zu Prüfleistung beträgt nur ca. 0.5 kg/kVA gegenüber 10 bis 15 kg/kVA bei Anlagen mit verstellbarer Induktivität.

2.2 Serieresonanz-Anlagen mit Frequenzabstimmung

Konzept, Aufbau und Einsatz einer Hochspannungsprüfanlage nach dem Prinzip der Serieresonanz mit Frequenzabstimmung wurden erstmals in [10] beschrieben. Diese modulare Anlage, welche als gemeinsame Entwicklung der FKH (damals *Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen*) und der Fachgruppe Hochspannungstechnik der ETHZ (*Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich*) entstand, war von Anfang an auf Vor-Ort Spannungsprüfungen ausgerichtet. Obwohl die Anlage eigentlich für Inbetriebsetzungsprüfungen von SF₆-Anlagen entwickelt worden war, erlaubte das Konzept mit den kompakten, modular aufgebauten Induktivitäten einen sofortigen Einsatz auch auf dem Gebiet der Vor-Ort Kabelprüfung. Der Prototyp dieser Prüfanlage ist in Fig. 2 abgebildet.



Figur 2: Prototyp der Seriersonanzanlage mit Frequenzabstimmung im Hochspannungslabor. Anordnung für Prüfspannungen bis 800-kV.

Im Vordergrund: 50-kVA-Thyristor-Frequenzumrichter, im Hintergrund rechts: Resonanzdrosseln (4 Module in Serie), hinten links: kapazitiver Spannungsteiler als Lastkapazität.

Seit der Inbetriebnahme der ersten Prüfanlage dieser Art (1978/79) wurden durch die FKH zahlreiche Vor-Ort Prüfungen an GIS- und Hochspannung-Kabelanlagen in der Schweiz und im Ausland durchgeführt. Die Erfahrungen aus diesen Prüfeinsätzen, welche teilweise unter extremen klimatischen Bedingungen abgewickelt werden mussten, sind laufend in die Weiterentwicklung und den Ausbau der FKH-Resonanzanlagen eingeflossen. Über die ersten Prüferfahrungen wurde in [14] berichtet; der Ausbau und die Weiterentwicklung dieser Prüfanlagen, vor allem auch im Hinblick auf die Vor-Ort Kabelprüfung sind in [7] und [11] beschrieben.

Ein ganz wesentlicher Vorteil von frequenzabgestimmten Seriersonanz-Anlagen ist die Möglichkeit, Spannungsprüfungen mit erhöhter Frequenz durchzuführen: damit können bei der Prüfung von SF₆-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 sowohl bei GIS als auch bei Kabelanlagen hat eine nicht-netzfrequente Prüfspannung ausserdem den Vorteil, dass beim Einsatz eines modernen TE-Impulsverarbeitungssystems ein eventuell auftretendes TE-Signal gegenüber netzsynchronen (50-Hz) Störungen wirkungsvoll diskriminiert werden kann (siehe Beitrag 4.3 dieser Tagung).

2.3 Technische Daten der FKH-Seriersonanz-Anlagen

Wie aus Figur 1 ersichtlich ist, besteht eine frequenzabstimmbare Seriersonanz-Prüfanlage aus folgenden Hauptkomponenten:

- Einspeisequelle mit einstellbarer Frequenz
- Step-up Transformator
- Resonanzdrosselspule

Das Kernstück aller FKH-Resonanzprüfanlagen bilden sehr kompakt gebaute Drosselspulen hoher Leistung (1.4 MVA für 10 min). Die Hauptspezifikationen der Drosselspulen-Module sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Durch das modulare Konzept, besteht die Möglichkeit, die Drosselspulen in Serie- und/oder in Parallelschaltung zu betreiben.

Induktivität: 50 H	
U _{max} : 230 kV	Höhe: 770 mm
I _{max} : 6 A (KB 10 min)	Durchmesser: 705 mm
Güte Q: 100 bei 100 Hz	Gewicht: 420 kg

Tabelle 1: Spezifikation der Seriersonanz-Drosselspulen

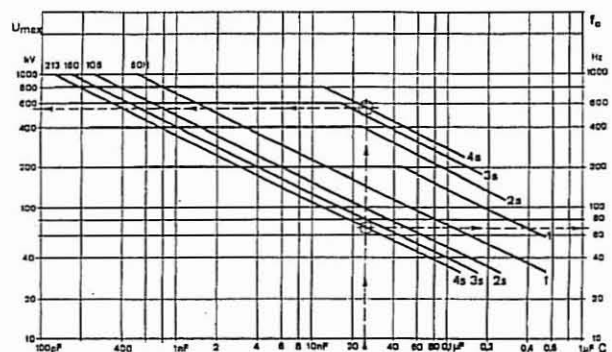
Durch den Einsatz von leistungsmässig abgestuften *Einspeisequellen* kann zusammen mit den modularen aufgebauten Induktivitäten für jeden Prüfeinsatz eine Seriersonanz-Anlage zusammengestellt werden, welche den jeweiligen Anforderungen bezüglich Prüfspannung, Prüfleistung und Prüffrequenz optimal angepasst ist. Eine Übersicht der zur Zeit bei der FKH verfügbaren Einspeisequellen gibt Tabelle 2. Zwei typische Konfigurationen von FKH-Resonanzprüfanlagen mit ihren technischen Daten werden in Tabelle 3 vorgestellt.

	Motor-Generator	Thyristor-Umrichter	Diesel-Generator
P _{in} (max)	10-kVA	50-kVA	100-kVA (200 kVA)*
Frequenzbereich	40 ... 140 Hz	50 ... 1000 Hz	50 ... 150 Hz

Tabelle 2: Einspeisequellen für Seriersonanz-Anlagen mit Frequenzabstimmung (*: Leistungsverdopplung durch Parallelschaltung von zwei Aggregaten).

	GIS-Prüfanlage	Kabelprüfanlage
Drosseln	4 in Serie	8 parallel
Induktivität	200 H	6.25 H
U _{max}	800 kV	230 kV
I _{max}	6 A (10 min)	30 A (15 min)
P _{max}	4.8 MVA	6.9 MVA
Einspeisung	Thyristor-Umrichter	Diesel-Generator
Gesamtgewicht	2300 kg	5160 kg

Tabelle 3: Typische Konfigurationen für Seriersonanz-Prüfanlagen zur Vor-Ort-Spannungsprüfung von SF₆-isolierten Schaltanlagen (GIS) und von Kabelanlagen.



Figur 3: Betriebskennlinien für U_{max} und f₀ in Abhängigkeit der Prüflingskapazität C für Serieschaltungen von bis zu vier Drosselspulen.

4s: 4 Module in Serie, 3s: 3 Module, 2s: 2 Module, 1: ein Modul. Linke Skala: maximal mögliche Prüfspannung U_{max}; rechte Skala: Prüffrequenz f₀.

3 Vor-Ort Prüfung von SF₆-Anlagen (GIS)

Es ist heute sowohl vom Betreiber als auch vom Hersteller allgemein akzeptiert, dass bei SF₆-isolierten Schaltanlagen vor der Inbetriebnahme mit einer Spannungsprüfung nachgewiesen werden muss, dass die Anlage eine ausreichende Isolationsfestigkeit besitzt [1]-[4]. Zur Evaluation selektiver und vom Aufwand vertretbarer Vor-Ort-Prüfverfahren für GIS-Anlagen, müssen die möglichen Ursachen für eine Isolationsminderung genauer analysiert werden. Aufgrund der Erfahrungen von Vor-Ort-Prüfungen und von Störfällen im Betrieb kommen in SF₆-isolierten Anlagen folgende Defekte als Gründe für eine Reduktion der Isolationsfestigkeit in Frage:

- Frei bewegliche Partikel im Gasraum
- Störstellen auf Hochspannungselektroden (Protrusions, ortsfeste Störstellen)
- Partikel auf Isolatoroberflächen
- Schlechte Kontakte
Abschirmelektroden auf freiem Potential
- Beschädigungen und Fehler in oder auf Stützisolatoren
- Werkzeug oder Fremdkörper (z.B. Schrauben).

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 SF₆-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 können aber auch solche Komponenten vor allem in SF₆-Anlagen der höchsten Spannungsebenen Störungen verursachen; inwieweit sie aber zu den deutlich höheren Betriebsfehlerraten der Anlagen des Höchstspannungsbereiches beitragen, ist noch nicht endgültig abgeklärt [1],[3],[15]. Es ist aber sicher richtig, dass diese Zusatzkomponenten einer GIS, z.B. die Spannungswandler, nach Möglichkeit in die Vor-Ort-Prüfung miteinbezogen werden.

3.1 Vor-Ort-Prüfverfahren für GIS

Heute werden weltweit folgende, von der IEC empfohlene Vor-Ort-Prüfverfahren für gasisolierte Schaltanlagen angewendet [16]:

- **Wechselspannungsprüfung (AC)**
Bei diesem mit *Procedure A* bezeichneten Verfahren wird nach einer Konditionierungsphase im Normalfall eine Prüfspannung von 80% der Stehwechselfeldspannung (Fabrikprüfspannung) angelegt. Prüfdauer: 1 Minute. Zulässiger Frequenzbereich: 10...300 Hz.
- **Wechselspannung und Blitzstoss-Spannung (LI/OLI)**
Dieses mit *Procedure B* bezeichnet Verfahren beinhaltet eine Beanspruchung mit zwei Spannungsformen:
(1) Wechselspannungsprüfung mit einer Amplitude von U_0 (starr geerdetes Netz) bzw. von $1.7 U_0$ (Netz mit isoliertem Sternpunkt). Prüfdauer: 5 Minuten. Zulässiger Frequenzbereich: 10...300 Hz.
(2) Blitzstossprüfung mit einem Pegel, welcher 80 % der Stehstossspannung (BIL) entspricht. Je 3 Impulse pro Polarität. Die Anstiegszeit der Blitzstoss-Spannung (LI) muss kleiner als $8 \mu s$ sein. Bei oszillierenden Blitzstoss-Spannungen (OSI) sind $15 \mu s$ Anstiegszeit zulässig.
- **Schaltstoss-Spannungsprüfung (SI/OSI):**
Diese Impulsform (aperiodisch gedämpft oder oszillierend) kann nach IEC-Empfehlung [16] zusätzlich oder als Ersatz für die Blitzstossprüfung in der Prozedur B angewendet werden. Prüfspannungspegel: 80 % der Schaltstehspannung bzw. der Blitzstossstehspannung. Je 3 Impulse pro Polarität.

- AC-Prüfung mit Teilentladungsmessung (AC+TE)

In den internationalen Prüfvorschriften [16] ist dieses Verfahren noch nicht endgültig festgelegt. Empfohlen werden TE-Messungen bei $1.1 U_0$ bzw. U_0 nach der Durchführung einer Stehspannungsprüfung.

Die Bewertung der verschiedenen Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, bei der Vor-Ort Prüfung Defekte oder Fehler aufzudecken, ist in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Defekt/Fehler	Vor-Ort-Prüfverfahren			
	AC	AC+TE	LI/OSI	SI/OSI
Ortsfeste Störstelle auf HV-Elektrode		Δ	o	Δ
Partikel auf Stützisolator		o	o	Δ
Hohlraum in Feststoffisolation	Δ	o		Δ
Freie Partikel	o	o		Δ
Elektroden auf freiem Potential	Δ	o		
Fremdkörper	o	o	o	Δ

Tabelle 4: Die relative Wirksamkeit von Vor-Ort-Prüfverfahren zur Aufdeckung von typischen Defekten. Symbole: o gut; Δ wenig wirksam (nach [3]).

Die Bewertung in der Tabelle 4 zeigt, dass eine Wechselspannungsprüfung mit einer empfindlichen Teilentladungsmessung ein Vor-Ort-Prüfverfahren darstellt, mit dem die am häufigsten vorkommenden Defekte und Fehler erkannt werden können. Es muss hier aber betont werden, dass gewisse Defekte, wie z.B. koronastabilisierte Störstellen mit einer TE-Messung erst bei relativ hohen Feldstärken (background field) detektierbar sind. Die in der IEC-Empfehlung [16] vorgesehenen TE-Messspannungen sind dafür sicher nicht ausreichend.

Neben seiner hohen Wirksamkeit beim Aufdecken von Fehlern, ist eine Wechselspannungsprüfung verbunden mit einer TE-Messung gegenüber einer reinen Stehspannungsprüfung (AC oder LI) auch deshalb von Vorteil, weil damit in den meisten Fällen bei der Prüfung ein Durchschlag in der Gasisolation der Anlage vermieden werden kann. Es ist bekannt, dass bei Durchschlagsvorgängen in SF₆-Anlagen der höheren Spannungsebenen (420-kV), insbesondere bei den hohen Prüfpegeln der Blitzstossprüfung erhebliche Sekundärschäden (z.B. Überschläge an Stütz- oder Schottungsisolatoren) entstehen können [3].

3.2 Prüferfahrung der FKH bei Vor-Ort-Prüfungen von GIS

Innerhalb der Zeitperiode 1980 bis 1993 wurden mit den mobilen Serieresonanz-Anlagen der FKH mehr als 90 GIS-Anlagen mit insgesamt ca. 450 Schaltfeldern mit Wechselspannung geprüft. In den meisten Fällen wurde eine reine Stehspannungsprüfung (z.B. nach IEC 517, Procedure A) durchgeführt. Nur bei ca. 20 % der Prüfeinsätze kam eine Teilentladungsmessung zur Anwendung. In praktisch allen Fällen wurden die Spannungswandler in die Prüfung miteinbezogen. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Verteilung der von der FKH im In- und Ausland durchgeführten GIS-Prüfungen bezüglich der Spannungsebenen.

Spannungsebene	AC-Prüfung (AC + TE)	Prüfung mit LI oder OSI
$U_m < 170\text{-kV}$	49 (15)	5
$170 > U_m < 300\text{-kV}$	17 (1)	1
$U_m > 300\text{-kV}$	25 (1)	7

Tabelle 5: Vor-Ort-Prüfung von SF₆-isolierten Schaltanlagen Anzahl der geprüften Anlagen (1980 bis 1993).

Zu Beginn der FKH-Prüfaktivitäten mit der frequenz-abstimmbaren Serieresonanz-Anlage bestand gegenüber der Anwendung von höheren Prüffrequenzen eine gewisse Skepsis. Man befürchtete, dass das Isolationsverhalten in SF₆-Anlagen bei höheren Frequenzen vom Verhalten bei Nennfrequenz abweiche und dass insbesondere die Bewegung von Metallpartikeln bei höheren Frequenzen weniger ausgeprägt und deshalb die Durchschlagsspannungen bei einem Teilchendurchschlag höher seien [17]. Diese Vorbehalte konnten durch umfangreiche, experimentelle Laboruntersuchungen [18] und durch Resultate der FKH-Prüfpraxis widerlegt werden.

Die Resultate der systematisch durchgeführten Untersuchung in [18] zeigen, dass im Frequenzbereich von 30 bis 200 Hz und unter Bedingungen, welche für SF₆-Anlagen typisch sind (Gasdruck: 4 bar, Schlagweiten: > 40 mm), die Durchschlagsfestigkeit einer SF₆-Gasstrecke in einem weiten Variationsbereich der Feldinhomogenitäten und auch bei Anwesenheit von Metall-Partikeln nahezu unabhängig von der Prüffrequenz ist.

Ganz allgemein deckt sich die Prüferfahrung der FKH mit den in [2] gemachten Feststellungen, dass insbesondere bei der Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von 420-kV Anlagen bereits bei einem Prüfspannungspegel von 80% der spezifizierten Stehwechselspannung (520-kV), eine sehr hohe Fehlerrate auftritt: bei mehr als 50% der 420-kV-GIS-Prüfungen ist bei dieser Beanspruchung ein Durchschlag aufgetreten. Die Fehlerursachen sind sehr vielfältig (siehe Tabelle 6) und konnte nicht in allen Fällen abgeklärt werden.

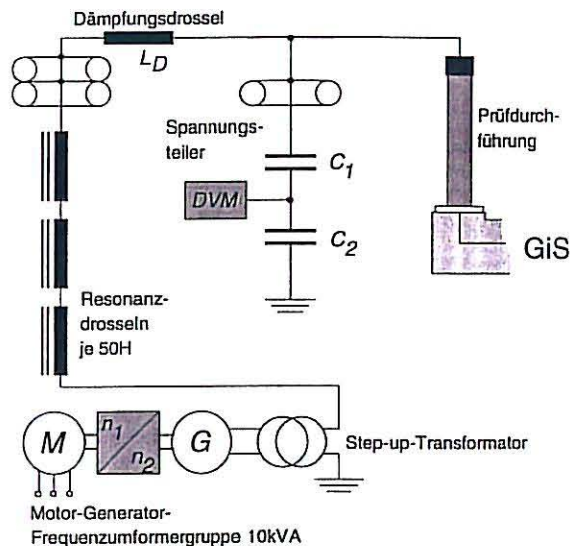
Fehlerursache	Relative Häufigkeit		
	oft	selten	nur einmal
Metallpartikel (Abrieb, Späne)	X		
Defekte Isolatoren (Transportschäden)	X		
kleine Fremdkörper (Drahtstücke, Schweissperlen)		X	
grosse Fremdkörper (Werkzeug)			X
fehlerhaft Montage		X	

Tabelle 6: Relative Häufigkeit der Fehlerursachen bei Vor-Ort-Wechselspannungsprüfungen von GIS.

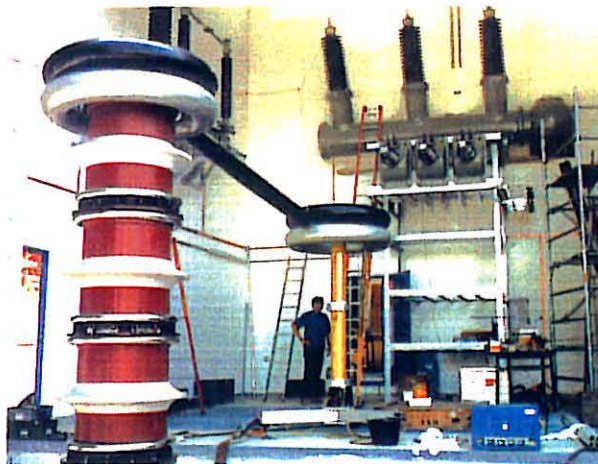
Eine typische Serieresonanz-Prüfschaltung für die Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von SF₆-Anlagen ist in Figur 4 dargestellt. Mit der dargestellten Prüfanlagenkonfiguration können GIS-Anlagen der Spannungsebenen 123-kV und 245-kV bis zu einer Gesamtkapazität von ca. 10 nF pro Phase geprüft werden (bis zu 5 Schaltfelder).

Die Prüffrequenzen liegen je nach Anlagengröße bzw. Prüflingskapazität zwischen 100 und 120 Hz (vgl. Betriebskennlinien in Fig. 3). Bei diesen Prüffrequenzen können die aufgesetzten Spannungswandler mitgeprüft werden. Die Prüfanordnung mit drei Drosseln in Serie ist bis zu einer Prüfspannung von ca. 400-kV teilentladungsfrei.

Im Normalfall wird bei der Prüfung von 420-kV GIS-Anlagen eine Schaltung mit vier Drosselspulen in Serie (U_{\max} : 800-kV) eingesetzt. Um bei den höheren Prüfspannungen die aufzubringende Einspeiseleistung abzudecken, muss anstelle der rotierenden Frequenzumformergruppe (Dauerleistung: 10-kVA) eine leistungsfähigere Einspeisequelle eingesetzt werden (siehe Tabelle 2). In den Figuren 5 und 6 sind typische Prüfaufbauten für die Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von GIS-Anlagen dargestellt.

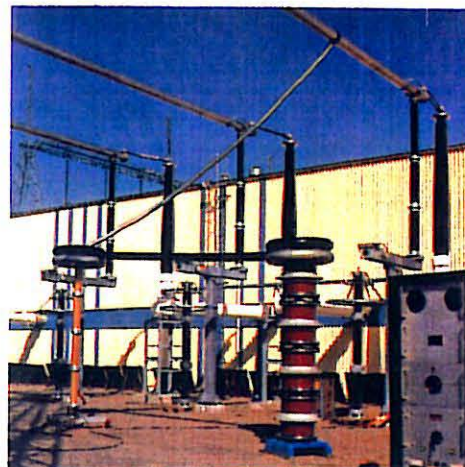


Figur 4: Serieresonanz-Prüfschaltung für die Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von SF₆-Anlagen. Einspeisequelle: rotierender Frequenzumformer.



Figur 5: Vor-Ort-Prüfung einer 123-kV GIS mit Serieresonanz-Anlage.

Im Vordergrund: Drei Prüfdrosseln in Serieschaltung, in Bildmitte: kapazitiver Spannungsteiler, im Hintergrund: Freiluftdurchführungen der GIS (dreiphasig gekapselt).



Figur 6: Vor-Ort-Prüfung einer 420-kV GIS mit Serieresonanz-Anlage.

4 Vor-Ort Prüfung von Hochspannungskabelanlagen

Hochspannungskabelanlagen gehören zu den kostenintensivsten Investitionen des elektrischen Energieversorgungssystems. Aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen und betrieblicher Anforderungen muss von diesen Anlagen ein sehr hohes Mass an Zuverlässigkeit und eine angemessene Lebensdauer verlangt werden.

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). Es werden vor allem Prüfmöglichkeiten im *Hochspannungsbereich* bei Betriebsspannungen bis 150-kV sowie Möglichkeiten und Grenzen der Vor-Ort Prüfung von *Höchstspannungskabeln* (Nennspannung grösser 150-kV) vorgestellt. Nicht behandelt werden hier Prüfungen an Öl-Papier-Kabel bzw. Papier-Masse-Kabel.

4.1 Prüfvorschriften, Prüfverfahren

Die wichtigsten internationalen und nationalen Normen und Vorschriften, welche zur Vor-Ort Prüfung von kunststoffisolierten Kabelanlagen herangezogen werden können, sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Nennspannung	IEC	DIN VDE
1-kV bis 30-kV	502 (1983)	0273 (1987)
30-kV bis 150-kV	840 (1988)	0263 (1984)
über 150-kV	in Vorbereitung	

Tabelle 7: Prüfvorschriften für kunststoffisolierte Hochspannungskabel.

Bei den heute angewendeten elektrischen Vor-Ort Prüfverfahren für Hochspannungskabel wird die Isolation von Kabel und Garnituren mit einer Prüfspannung U_p beansprucht, welche normalerweise über der im normalen Betriebszustand auftretenden Phase-Erde-Nennspannung U_0 (Effektivwert) liegt.

In den einschlägigen Prüfvorschriften (siehe Tabelle 7) sind bei den Modalitäten für eine Vor-Ort Prüfung neben der Art der Spannungsbeanspruchung die entsprechenden Prüfspannungen (U_p) und Prüfdauern (t_p) festgelegt. Bei den in den Normen festgelegten Prüfverfahren fällt auf, dass für Wechselspannungsbeanspruchung (AC) wesentlich kleinere Prüfspannungen zugelassen sind als bei einer Gleichspannungsprüfung (DC).

Nach den IEC-Vorschriften 502 und 840 gelten für die Vor-Ort Prüfung von Kabelanlagen folgende Prüfspannungen und Prüfdauern:

- AC-Prüfung: $1.7 U_0 / 5 \text{ min}$ oder $U_0 / 24 \text{ h}$
- DC-Prüfung: $4 U_0 / 15 \text{ min}$.

Wenn eine Kabelanlage vor Ort nach den heute geltenden IEC-Vorschriften mit Wechselspannung geprüft wird, ist bei dieser Prüfung die zwischen Leiter und Schirm angelegte Spannung kleiner 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.

Bei einer zukünftigen Revision der IEC-Vorschriften 502 und 840 sollte für die Vor-Ort Wechselspannungsprüfung von Neuanlagen ein Prüfspannungspegel von mindestens 80% der Fabrikprüfspannung (z.Z. mindestens $2.5 U_0$) bei vergleichbaren Prüfdauern (30 min) festgelegt werden.

Im *Höchstspannungsbereich* existieren ausser werksinternen Prüfvorschriften für kunststoffisolierte Kabel mit Nennspannung grösser als 150-kV zur Zeit noch keine verbindlichen, international anerkannten Prüfnormen.

Innerhalb der CIGRE befasst sich eine Arbeitsgruppe (WG 21-09) seit längerer Zeit mit Prüfverfahren für verlegte, kunststoffisolierte Kabel. In einer 1990 erschienen Publikation [5] wurden verschiedene Vor-Ort-Prüfverfahren bezüglich ihrer Aussagekraft und Wirksamkeit, Defekte und Fehler in Kabelanlagen aufzudecken, verglichen. Nach eingehenden Versuchen an Modellkabeln mit künstlich eingebauten Defekten kommt man zum Schluss, dass im Vergleich mit den anderen untersuchten Prüfverfahren eine 50-Hz-Prüfung mit einer Spannung von 2 bis 3 U_0 die zuverlässigsten Resultate bezüglich Aufdeckung von Montagefehlern und Schwachstellen liefert [5].

Als vorläufiges Ergebnis dieser seit mehr als zehn Jahren geführten Diskussionen gibt die CIGRE-Arbeitsgruppe 21-09 folgende *Empfehlung* ab [19]:

1. Eine 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. Als Prüfbedingungen für Wechselspannungsprüfungen werden $1.7 U_0 / 1 \text{ h}$ oder $U_0 / 1 \text{ Tag}$ empfohlen.

Man kann davon ausgehen, dass die Effizienz, betriebsgefährdende Fehler einer Kabelanlage aufzudecken, bei der Prüfung mit einer Serie-Resonanzanlage mit Frequenzabstimmung im Bereich der typischen Prüffrequenzen (40...100 Hz) derjenigen einer Wechselspannungsprüfung mit 50-Hz gleichgestellt werden kann. Die im vorangegangenen Abschnitt erwähnte positive Beurteilung der 50-Hz-Prüfmethode durch die CIGRE-Arbeitsgruppe 21-09 hat, bezüglich der Aussagekraft, somit auch für die Vor-Ort Prüfung mit Serieresonanzanlagen Gültigkeit.

4.2 Grenzen der elektrischen Beanspruchung

Um das Ziel einer wirkungsvollen Vor-Ort Spannungsprüfung zu erreichen, müssen die auf U_0 bezogenen Prüfspannungspegel so festgelegt werden, dass einerseits Fehler sicher erkannt werden aber andererseits die bei der Prüfung kurzzeitig auftretenden Feldstärken die Grenzen der beanspruchten Isoliersysteme nicht überschreiten.

Richtlinien und Grenzen für die zulässigen Vor-Ort Prüfspannungspegel ergeben sich aus den *Stehfeldstärken* für AC- und Blitzstoss-Beanspruchung, welche in systematischen Laboruntersuchungen und Langzeitprüfungen an realen Kabelkonstruktionen und Garnituren ermittelten werden.

Zur Verbesserung der Selektivität der Qualitätssicherung werden heute bei vielen Kabelherstellern Hochspannungspolymerkabel (Nennspannung ≤ 150 -kV) teilweise in Abweichung zu den geltenden IEC-Vorschriften bei der Werksprüfung mit Beanspruchungen bis zu 20 kV/mm (30 min) beaufschlagt. Man kann davon ausgehen, dass bei einer Vor-Ort Prüfung zumindest an der Kabelisolierung einer Anlage bei Einhaltung dieses Grenzwerts, welcher durch zahlreiche Laboruntersuchungen und Langzeittests abgesichert ist, keine irreversible Vorschädigung eintritt.

Es ist daher sicher nicht sinnvoll, beispielsweise bei der Vor-Ort Prüfung einer 400-kV-Kabelanlage infolge Fehlens von internationalen Prüfnormen die Anforderungen an den auf U_0 bezogenen Prüfspannungspegel direkt von der Prüfpraxis z.B. der 110-kV-Kabel abzuleiten. Vielmehr müssen vor allem bei Kabelanlagen der Höchstspannungsebene die entsprechenden Vor-Ort Prüfspannungspegel auf die maximal zulässige elektrische Beanspruchung der Kabelkonstruktion und der dazugehörigen Garnituren abgestimmt werden [20].

Für *Endverschlüsse und Muffen* sind in der Dimensionierung wegen den Unsicherheiten bei der vor Ort durchzuführenden Endmontage entsprechende Toleranzen bzw. Reserven vorzusehen. Trotz dieser eingebauten Reserven ist u.U. bei älteren Konstruktionen eine Begrenzung des zulässigen Prüfspannungspegels notwendig. Hier sind vor allem bei grösseren Leiterquerschnitten schon bei Prüfpegeln von ca. $2 U_0$ in vielen Fällen nur noch geringe Reserven in der Spannungsfestigkeit vorhanden.

Als Stand der Technik gelten heute *Garnituren in Aufschiebeteknik* mit vorfabrizierten Feldsteuerelementen aus dauerelastischen Polymerwerkstoffen (z.B. Silikonkautschuk), welche in Japan und Frankreich bis zu einer Übertragungsspannung von 275-kV eingesetzt werden. Bei diesen Konstruktionen sind zwar Betriebsfeldstärken am Aussenleiter des Kabels in der Grössenordnung von 5 kV/mm zulässig, die beherrschbaren Tangentialfeldstärken an den Grenzfläche der Feldsteuerelemente bleiben aber im Vergleich zur Normalkomponente gering.

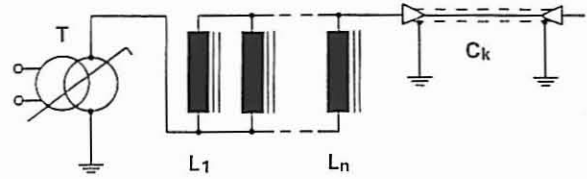
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei einer korrekt installierten Hochspannungskabelanlage mit Polymerisolation (Nennspannung ≤ 150 -kV), welche mit modernen, nach dem Stand der Technik ausgeführten Garnituren ausgerüstet ist, bei einer Vor-Ort Prüfung mit betriebsfrequenten Wechselspannungen bis zu $2.5 U_0$ (30 min) keine Gefährdung wegen Überbeanspruchung der Dielektrika des Kabels und der Garnituren besteht. Nach heutigem Stand des Wissens hat auch eine Vor-Ort Prüfung einer Kabelanlage im Höchstspannungsbereich (≥ 220 -kV) bei einer Beanspruchung mit $2 U_0$ und Prüfzeiten im Minutenbereich (z.B. 15 min) keine nachteiligen Folgen.

4.3 Prüfmöglichkeiten mit Serieresonanz-Anlagen

Der Einsatz von Serieresonanz-Anlagen bei der Vor-Ort-Prüfung von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln bietet keine nennenswerten Schwierigkeiten. Zur Lieferung grosser kapazitiver Ladeströme können mehrere Drosselspulen parallel geschaltet werden. Die Grundschialtung ist aus Figur 7 ersichtlich.

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. Im Rahmen der heute üblichen Prüfspannungspegel sind die Grenzen der Vor-Ort-Prüfmöglichkeiten bei Kabelprüfungen im allgemeinen nicht durch die Spannungsfestigkeit der Serieresonanzprüfanlage gegeben.

Vielmehr sind die Prüfmöglichkeiten bei langen Kabelstrecken wegen den hohen erforderlichen Prüfleistungen, bzw. wegen den hohen Ladeströmen durch die begrenzte thermische Belastbarkeit der Induktivitäten und durch die zur Verfügung stehenden Einspeiseaggregate eingeschränkt.



Figur 7: Serieresonanz-Prüfschialtung mit parallelgeschalteten Induktivitäten für die Vor-Ort-Kabelprüfung.
T: Step-up Transformator, $L_1 \dots L_n$: Resonanzdrosseln, C_k : Kabelkapazität.

In Abhängigkeit vom Kabelquerschnitt bzw. der Kabelkapazität C_k ergeben sich bei einem Maximaleinsatz des gegenwärtig bei der FKH vorhandenen Materials (13 Hochleistungs-Drosselspulen und zwei Dieseldgeneratoren) bei einem Prüfspannungspegel von $2 U_0$ und einer Prüfdauer 15 min folgende Grenzlängen:

U/U_0	$U_p = (2 U_0)$	Prüfdauer	C_k	Kabellänge bis
110/64-kV	127-kV	15 min	0.2 μ F/km	6 km
132/76-kV	152-kV	15 min	0.2 μ F/km	4 km
220/127-kV	254-kV	15 min	0.14 μ F/km	1.6 km
400/230-kV	460-kV	15 min	0.1 μ F/km	0.8 km

Tabelle 8: Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung mit FKH-Serieresonanz-Anlagen: Prüfmöglichkeiten bei Prüfmodus $2 U_0/15$ min.

4.4 Vor-Ort-Prüferfahrung

Seit 1980 führte die FKH mit Serie-Resonanzanlagen Vor-Ort-Wechselspannungsprüfungen an Hochspannungskabeln mit einer totalen Aderlänge von ca. 130 km aus. In jüngster Zeit konnten erstmals auch längere 132-kV-Kabelverbindungen mit EPR-Isolation sowie eine 220-kV-Kabelanlage mit 800 m Trasselänge (Doppelstrang) erfolgreich geprüft werden. Die Prüfaufbauten sind in den Figuren 8 und 9 abgebildet.

Einige Beispiele von Vor-Ort Kabelprüfungen, welche von der FKH in der Schweiz und in Deutschland durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 9 zusammengestellt.

Kabeltyp (U/U_0) Leiterquerschnitt	Prüfleistung	Prüfspannung Prüfdauer	Feldstärke am Innenleiter
XLPE 110/64-kV 630 mm ²	15.1 MVA	210-kV (3.3 U_0) 1 min	20.1 kV/mm
	4.7 MVA	123-kV (1.9 U_0) 5 min	11.6 kV/mm
EPR 132/76-kV 400 mm ²	3.8 MVA	167-kV (2.2 U_0) 15 min	16.7 kV/mm
EPR 132/76-kV 400 mm ²	6.0 MVA	161-kV (2.1 U_0) 15 min	15.9 kV/mm
XLPE 220/127-kV 630 mm ²	5.9 MVA	300-kV (2.4 U_0) 15 min	18.6 kV/mm
XLPE 220/127-kV 800 mm ²	3.6 MVA	300-kV (2.4 U_0) 15 min	19.4 kV/mm

Tabelle 9: Beispiele von Vor-Ort Wechselspannungsprüfungen an kunststoffisolierten Hochspannungskabeln.

Wenn man die bei den AC-Prüfungen aufgetretenen maximalen Beanspruchungen (Feldstärken am Innenleiter) betrachtet, so lagen nach heutigen Erkenntnissen (siehe z.B. [20]) zu Beginn der FKH-Prüftätigkeit bei einigen Vor-Ort-Kabelprüfungen die verwendeten Prüfspannungspegel an der oberen Grenze.

So wurden damals mehrere 110-kV Kabelanlagen auf Wunsch des Anlagenbetreibers mit einer Kurzbeanspruchung (1 min) von $3.6 U_0$ und daran anschliessend mit ca. $2 U_0$ für eine Dauer von 30 min geprüft. Bei den hohen Kurzbeanspruchungen wurde in gewissen Fällen am Innenleiter Feldstärken von mehr als 20 kV/mm erreicht (siehe Tabelle 9).



Figur 8: Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung einer 132-kV Kabelanlage mit EPR-Isolation.

Trasslänge: 3.5 km. Aufstellung von 16 Drosseln in Serie-Parallelschaltung in der Trafoszelle. Prüfspannung: 167-kV. Rechts hinter Spannungsteiler: Endverschluss einer kurzen Kabelverbindung zum Prüfling im Kabelkeller.



Figur 9: Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung einer 220-kV Kabelanlage mit VPE-Isolation.

Isolation: VPE, Trasslänge: 0.8 km (Doppelstranganlage). Prüfspannung: 300-kV. Bildmitte: 8 Drosselspulen in Serie-Parallelschaltung, links: Spannungsteiler, im Hintergrund: Kabelendverschlüsse.

Bei 65 Prüfeinsätzen der FKH wurden in Hochspannungskabelanlagen insgesamt 9 Isolationsdurchschläge registriert. Die Beschreibung der aufgedeckten Schwachstellen und Fehler kann folgendermassen zusammengefasst werden:

- Die Erfahrungen zeigen, dass Beanspruchungen über $3 U_0$ vor allem für die Endverschlüsse eine sehr hart Prüfung darstellen, da diese wesentlich weniger Reserven als die Kabelisolation aufweisen.

- Vier von neun Isolationsdurchschlägen erfolgten in Freiluft-Endverschlüssen. Dabei waren sowohl traditioneller Wickeltechnik als auch moderne Aufschiebe-Garnituren beteiligt.
- Ein Durchschlag wurde auch in einem SF_6 -Endverschluss festgestellt (verschobener Steuerkonus, Montagefehler).
- Nur in einem einzigen Fall hat eine Muffe durchgeschlagen.
- Bei zwei 110-kV Kabelinstallationen 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 ($3.6 U_0$).
- Bei der Prüfung einer neuverlegten 110-kV-Doppelstrangverbindung hat eine von sechs geprüften Kabelstecken bei ca. 210-kV ($3.3 U_0$) 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 traten jeweils beim Hochfahren der Spannung oder kurz nach Erreichen der Prüfspannung innerhalb von wenigen Sekunden auf.

4.5 Schlussfolgerungen, Ausblick

Von den heute verfügbaren Vor-Ort-Prüfmethoden stellt die Wechselspannungsprüfung die wirksamste und sicherste Alternative dar. Einerseits sind für diese Art der Beanspruchung das Verhalten bzw. die Grenzen von Polymerisolationsystemen genau bekannt, andererseits stehen heute leistungsfähige und flexible Prüfanlagen in der Form von Serie-Resonanzanlagen zur Verfügung, welche in mehr als 10-jähriger Prüfpraxis erprobt sind.

Die relativ kleine Anzahl von aufgedeckten Fehlern reicht für eine abschliessende Beurteilung der Aussagekraft des Serieresonanz-Prüfverfahrens noch nicht aus. Dazu waren die Versuchsbedingungen (Prüfspannungspegel und Prüfdauer) bei den verschiedenen Prüfungen zu wenig einheitlich. Verglichen mit einer Gleichspannungsprüfung ist aber eine AC-Resonanzprüfung selbst bei mässigen Prüfspannungen (z.B. $2 U_0$) als wesentlich strenger und selektiver einzustufen.

Im Hochspannungsbereich können die Prüfmöglichkeiten mit Serie-Resonanzanlagen für sehr lange Kabelstrecken (> 6 km) durch den Ausbau der Einspeiseleistung und durch leistungsfähigere Drosselspulen mit grösserer thermischer Kapazität noch wesentlich erweitert werden. Ein Ausbau der Prüfanlagen wäre auch im Hinblick auf eine längere Prüfdauer erwünscht: heute ist bei Vor-Ort Kabelprüfungen eine Prüfdauer von 15 min üblich, aussagekräftiger wären jedoch Prüfdauern von 30 min und mehr.

Bei der Vor-Ort Wechselspannungsprüfung liesse sich die Empfindlichkeit, montagebedingte oder sonstige Schwachstellen von Kabelanlagen aufzudecken, mit Hilfe einer Teilentladungsmessung wesentlich verbessern. Grundsätzlich ist es sicher von Vorteil (auch im Fall von GIS-Prüfungen), wenn das wenig differenzierte Resultat einer Stehspannungsprüfung (Ja/Nein-Entscheidung) durch zusätzliche Aussagen eines zerstörungsfreien Diagnoseverfahrens ergänzt werden. Neben elektrischen Teilentladungs-Verfahren sind für den gezielten Vor-Ort Einsatz an Kabel-Garnituren auch akustische TE-Messverfahren [21] geeignet und sollten in Zukunft näher untersucht werden. Wie neuere Publikationen zeigen, fehlt es nicht an erfolgversprechenden Konzepten für die Realisierung einer Vor-Ort Teilentladungsmessung in Kabelanlagen (z.B. [22]-[25] und [8]).

Wenn heute zur Anspeisung der Verteilnetze in dichtbesiedelten Regionen bzw. städtischen Agglomerationen auf der 110/150-kV-Spannungsebene Unterwerke neugebaut oder erweitert werden müssen, so werden diese Installationen meistens in moderner, platzsparender SF₆-Anlagentechnik ausgeführt. Dabei werden in sehr vielen Fällen bei den Leitungsabgängen sowie bei Trafefeldern kunststoffisolierte Kabelstrecken direkt an die SF₆-Anlage angeschlossen. Im Zusammenhang mit Vor-Ort Prüfungen in Unterwerken stellt sich daher immer öfters die Frage, ob eine *integrale Spannungsprüfung*, d.h. eine gleichzeitige Prüfung des SF₆-Anlagenteils und der daran angeschlossenen Kabelstrecken realisierbar sei. Um einen raschen Fortschritt in diesem Problemkreis zu erzielen und um eine Harmonisierung der sich teilweise widersprechenden Prüfvorschriften zu erreichen, ist eine intensive Zusammenarbeit zwischen den Herstellern und den Betreibern von Hochspannungsanlagen notwendig.

Literatur

- [1] Kopejtkova, D., T. Molony, S. Kobayashi, I.M. Welch, "A twenty-five year review of experience with SF₆ gas insulated Substations (GIS)", "CIGRE-Session 1992, Beitrag 23-101.
- [2] Krüger K., C. Neumann, A. Strnad, G. Balzer, H. Härtel, O. Völker, W. Boeck, K. Feser, K.-H. Weck, "Correlation between on-site test voltages and insulation-coordination of GIS", CIGRE-Session 1992, Beitrag 23/33-02.
- [3] CIGRE WG 33/23.12, "Insulation co-ordination of GIS: Questions on the influence of on-site tests and dielectric diagnosis", CIGRE-Session 1992, Beitrag 23/33-03.
- [4] Weck, K.H., "GIS on-site testing and condition monitoring - Impact on insulation co-ordination", CIGRE-Session 1992, Special Report for Joint Group 23/33.
- [5] 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.
- [6] IEC Publication 840, "Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV (U_m = 36 kV) up to 150 kV (U_m = 170 kV)", first edition, 1988.
- [7] Aschwanden, Th., "Vor-Ort-Prüfung von Hochspannungskabelanlagen", Bulletin SEV/VSE, Vol. 83, 1992, S. 31-40.
- [8] Kärner H. (Hrsg.), "Isolierte Systeme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen", ETG-Fachtagung, Würzburg, 1992, ETG-Fachbericht Nr. 40, VDE-Verlag, Offenbach, 1992.
Diagnostic and Maintenance Techniques, Cigre-Symposium, Berlin, 1993.
- [9] Beyer, M., W. Boeck, K. Müller, W. Zaengl, "Hochspannungstechnik", Springer-Verlag, Berlin, 1986, Abschnitt 9.1.3: Resonanzschaltungen.
- [10] Bernasconi, F., W.S. 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.
- [11] Binz, H. und H.G. Gerlach, "Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung an SF₆-Schaltanlagen und an PE-Hochspannungskabeln nach dem Serienresonanz-Prinzip", Bulletin SEV/VSE, Vol. 79, 1988, S. 763-768.
- [12] Reid, R., "AC high voltage resonant testing", Underground Transmission and Distribution Conference, IEEE Conference Record, No. 74CH0832-6PWR, Paper C74 038-6.
- [13] Spiegelberg, J., H. Bergel, W. Pflücke, W. Eienkel, "A new series of resonant testing-systems for cable testing", 8th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Yokohama, 1993, Beitrag 55.05.
- [14] W. Zaengl, F. Bernasconi, B. Bachmann, W. Schmidt, K. Spinner, "Experience of AC voltage tests with variable frequency using lightweight on-site series resonance device", CIGRE Session 1982, Beitrag 23-07.
- [15] Braun J.M., G.L. Ford, N. Fujimoto, S. Rizzetto, G.C. Stone, "Reliability of GIS epoxy insulators: The need and prospects for more stringent acceptance criteria, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, 1993, S. 121-131.
- [16] IEC-Publication 517, "Gas-insulated metal enclosed switchgear for rated voltages of 72.5-kV and above", 1990.
- [17] Hauschild, W., W. Mosch, "High-voltage-field-testing of GIS from the viewpoint of failure-mechanism", in Gas Insulated Substations - Technology and Practice, (S. Boggs, Hrsg), Pergamon Press, 1986.
- [18] Zwicky, M., "Zur Isolierfestigkeit von Schwefelhexafluorid (SF₆) bei Wechselspannung variabler Frequenz (30 bis 200 Hz), Dissertation Nr. 8148, ETH-Zürich, 1986.
- [19] CIGRE-WG 21-09, "Guidelines for the after-laying test on h.v. extruded-insulation cables", Mai 1993.
- [20] v. Olshausen, R., E. Peschke, R. Schroth, "Dimensionierung und Prüfphilosophie bei der Entwicklung von VPE-Kabeln bis 400 kV", ETZ, Vol. 111, 1990, S. 1000-1009.
- [21] Diebels, W.-D., J. Matthes, H.-J. Stoye, "Praktische Erfahrungen bei der akustischen TE-Detektion zur Fehlerfrüherkennung an Betriebsmitteln der Elektroenergieversorgung", ETG-Fachbericht 40, VDE-Verlag, Berlin, 1992, S. 309-315.
- [22] Lemke, E., W. Weissenberg, M. Hornschuh, D. Flügge, D. Krieger, G. Friese, K. Siebert, "Neues Diagnoseverfahren zur dielektrischen Vor-Ort Prüfung von PE/VPE Mittelspannungskabeln, ELEKTRIE, Vol. 44, 1990, S. 124-126.
- [23] Borsi, H., E. Goekenbuch, U. Schiehler, "Monitoring of partial discharges (pd) in high voltage cables, 8th Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Yokohama, 1993, Vol. 3, Beitrag 67-01.
- [24] Wouters, P., P.C.T. van der Laan, E. Hetzel, F.E. Steennis, "New on-line partial discharge measurement technique for polymer insulated cables and accessories, 8th Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Yokohama, 1993, Vol. 3, Beitrag 63-08.
- [25] Tanaka, H., M. Matsuki, Y. Maruyama, O. Fujii, "Partial discharge propagation of electrical trees in XLPE cables", 8th Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Yokohama, 1993, Vol. 3, Beitrag 67-02.