

Mobile Vor-Ort-Prüfanlagen

Dipl.-Ing. Michael Gamlin, Haefely Test AG, Basel

1. Einleitung

Warum werden Hochspannungsprüfungen durchgeführt ?

Hochspannungstypprüfungen:	Überprüfung des Designs sowie der Zuverlässigkeit von Hochspannungsisolationen.
Hochspannungsroutineprüfungen:	Überprüfung der Fertigungsqualität einer Hochspannungsisolation.
Hochspannungs-Vor-Ort Prüfungen [2]:	Überprüfung, daß weder durch Transport noch durch Installation Beschädigungen in der Hochspannungsisolation aufgetreten sind. Überprüfung nach einer Reparatur oder Modifikation. Durchführung von Diagnosemessungen um etwaige Risikopotentiale abschätzen zu können.

Der Vortrag gibt einen kurzen Überblick auf zur Zeit erhältliche Vor-Ort Prüfanlagen, und geht auf deren Einsatzgebiete ein, wobei Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien aufgezeigt werden.

2. Prüfen mit Gleichspannung (DC)

Grundprinzip:

Wechselspannungsanlage mit nachgeschalteter Greinacherkaskade. Die elektrische Feldverteilung bei DC stellt sich entsprechend der Leitwerte der beteiligten Isolationsmaterialien ein.

Vorteile:

- sehr kleiner Leistungsbedarf (Ladestrom) woraus eine kompakte Bauart resultiert
- große Erfahrung bei der DC-Prüfung von Öl/Papier-Kabeln
- sinnvollste Prüfmethode für DC-Kabeln

Nachteile:

- bei einer DC-Prüfung liegt eine andere elektrische Feldverteilung vor, als dies bei Wechselspannung der Fall wäre. Dies tritt vor allem am Übergang zu den Muffen und Kabelendverschlüssen bei kunststoffisolierten Kabelsystemen auf.
- Raumladungen, die während der DC-Prüfung von XLPE-Kabeln erzeugt werden, können lokal im Kabel und am Übergang zu den Accessories zu Feldstärkeüberhöhungen bis zum Faktor 5 ergeben.
- unmittelbar betriebsgefährdende Schwachstellen (water trees, Nadelfehlstelle) in Kunststoffkabeln können mit DC-Spannung auch bei erhöhten Prüfpegeln ($8 \dots 10 U_0$) nicht aufgedeckt werden [4], [6].

3. Prüfen mit 0.1 Hz (VLF)

Grundprinzip:

Das Kernstück der Prüfanlage besteht z.B. aus einem rotierenden Gleichrichter, der durch periodisches Laden (Prüfling, Stützkondensator), Umladen (auf Gegenspannung) und Nachladen (zum Ausgleich der Kabelverluste) eine Cosinus-Rechteckspannung mit einer Periodendauer von 10 s erzeugt. Auf dem Markt erhältliche VLF-Prüfsysteme erzeugen eine Prüfspannung bis ca. 100 kV und können Kabel bis ca. 5 μF prüfen.

Vorteile:

- sehr kleiner Leistungsbedarf (Ladestrom) woraus eine kompakte Bauart resultiert
- kann mit einer Verlustfaktormessung kombiniert werden, um water trees in Kunststoffkabeln zu detektieren. Große Sensitivität bei water trees [6].

Nachteile:

- bei 0.1 Hz muß ein höherer Spannungspegel im Kabel erzeugt werden, um den gleichen TE-Pegel bzw. die gleiche Prüfbeanspruchung zu erzeugen, als dies bei 50/60 Hz der Fall wäre. Vor-Ort Daten und Fabrikdaten sind deshalb nicht vergleichbar.

4. Prüfen mit oszillierenden Blitz- und Schaltstoßspannungen (OLI, OSI)

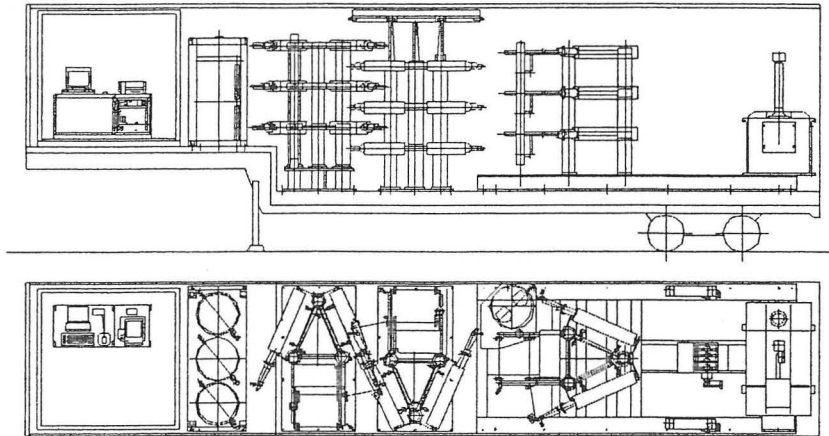
Grundprinzip:

Ein konventioneller Stoßgenerator wird mit einer zusätzlichen externen Drossel ausgerüstet. Die Schwingungsfrequenz wird im wesentlichen durch die Induktivität der Zusatzdrossel sowie der Prüflingskapazität bestimmt. Der Vorteil gegenüber der aperiodischen Stoßspannung liegt darin, daß ein kleinerer und damit leichter Stoßspannungsgenerator zur Erzeugung des gleichen Spannungspegels verwendet werden kann. Bei einer OLI-Prüfung beträgt die Frontzeit max. 20 μs , während bei der OSI-Prüfung Frontzeiten von 150 μs bis 10 ms erzeugt werden.

OLI und OSI werden hauptsächlich bei gasisolierten Schaltanlagen angewendet, um Spitzen an Elektroden (OLI und OSI), Teilchen auf Isolatoren (OLI) und Fremdkörper wie z.B. vergessene Werkzeuge/Schrauben/Muttern (OLI) zu erkennen. Mit OSI-Prüfungen können zum Teil freie Teilchen erkannt und entschärft werden, was sonst nur bei AC-Prüfungen der Fall ist.

OLI und OSI Prüfungen werden in der Regel bei GIS Prüfungen mit einer Nennspannung $> 170 \text{ kV}$ eingesetzt [7].

Bei Kabelprüfungen wird das Kabel mittels einer DC-Quelle aufgeladen, mit einer geeigneten Induktivität wird dann ein gedämpfter Serienschwingkreis (0.3 .. 10 kHz) erzeugt. Die Entladung erfolgt über eine getriggerte Funkenstrecke.



modularer Stoßgenerator 1800 kV, 90 kJ (3 Module, 3 Stufen pro Modul)

Vorteile:

- gute Methode (OLI) um Spitzen an Elektroden in einer GIS zu detektieren
- relativ einfacher Prüfaufbau beim Vorhandensein einer Luft-SF6 Durchführung
- äußere Einflüsse wie Grundstörspegel spielen keine Rolle
- kleiner Leistungsbedarf

Nachteile:

- für lange Prüfobjekte muß die Anstiegszeit so groß gewählt werden, so daß die örtlich unterschiedlichen Spannungsamplituden, die sich durch Laufzeiteffekte ergeben, nur geringfügig voneinander abweichen, und somit der gesamte Prüfling praktisch die selbe Spannungshöhe sieht [7].
- Teile auf freiem Potential können nur schwer erkannt werden
- Die Zeitdauer der OSI-Schwingung ist nur kurz, die Anzahl der Zyklen ist klein

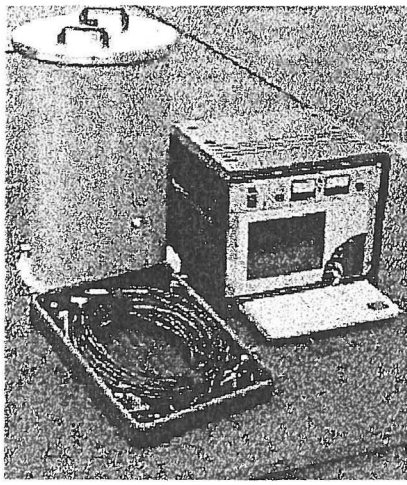
5. Diagnose mit oszillierenden Spannungen (OW)

Grundprinzip:

Das kapazitive Prüfobjekt (Mittelspannungskabel) wird während einiger Sekunden mit DC-Spannung geladen. Mittels eines schnellen Halbleiterschalters (Schließzeit < 1 µs) wird das Mittelspannungskabel über einen Reihenschwingkreises (Güte Q= 30 .. 100) entladen. In Abhängigkeit von der Induktivität L der „Luftkernspule“, sowie der Prüflingskapazität C stellt sich die Reihenschwingkreisfrequenz f nach folgender Beziehung ein:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

In der Regel liegt die Induktivität im Bereich von 1 H, so daß Kabelkapazitäten im Bereich von 0.1 µF bis 2 µF bei Frequenzen zwischen 50 Hz und 1 kHz geprüft werden können [1].



Oszillating waves test system (OWTS)

links: Luftkernspule, Teiler/Koppler, AKV und Halbleiterschalter im Isolierzylindergehäuse

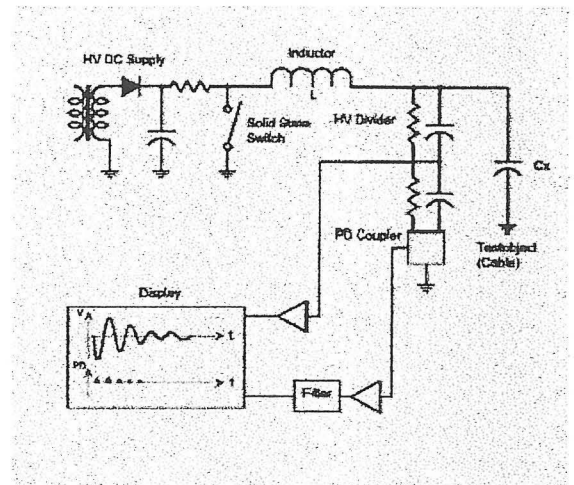
rechts: Steuerung, TE-Detektor und DC-Quelle

Vorteile:

- sehr leicht und kostengünstig (HV-Komponenten ca. 65 kg, Elektronik und DC-Quelle ca. 35 kg)
- zerstörungsfreie AC-Diagnosemethode
- das kurze Aufladen des Kabels (einige Sekunden) mit Gleichspannung führt nicht zu ungewollten Raumladungen

Nachteile:

- die OW-Technologie ist im Moment limitiert auf max. 50 kV (Halbleiterschalters)
- die Impulsdauer liegt abhängig von der Dämpfung im Bereich von 0.3 .. 1 s. Die OW-Technologie ist deshalb in Verbindung mit einer TE-Messung eine reine Diagnosetechnologie, es kann mit ihr keine Spannungsprüfung durchgeführt werden.
- im Feldeinsatz hängt die Auswertbarkeit der Meßergebnisse für Diagnosezwecke sehr stark vom Grundstörpegel ab



OWTS Prüf- und Meßkreis zur TE-Prüfung von kapazitiven Komponenten mittels oszillierenden Wellen

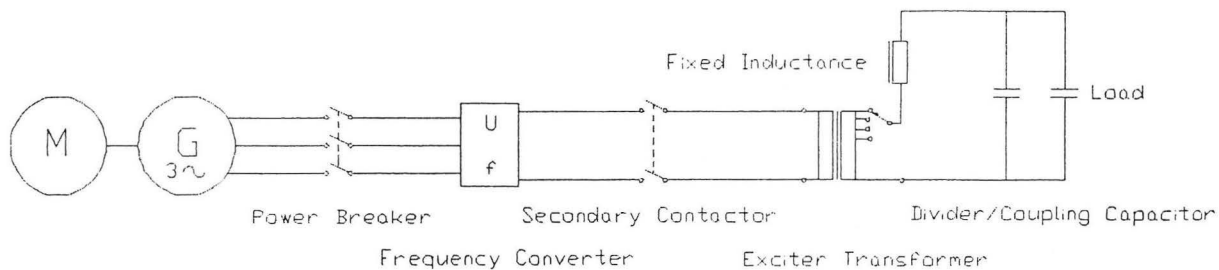
6. Prüfen mit Wechselspannung (AC)

Grundprinzip:

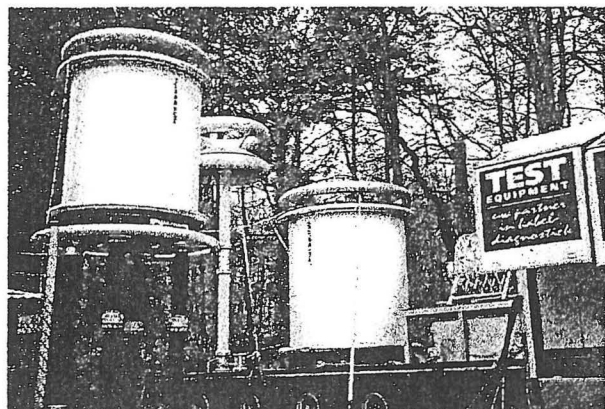
Vor-Ort werden Prüfwechselspannungen entweder nach dem konventionellen Transformatorprinzip oder mittels eines Serienresonanzkreises mit variabler Induktivität bzw. variabler Frequenz (30 .. 200 Hz) erzeugt.

Beim Transformatorprinzip hat man den Vorteil, daß mit Netzfrequenz (50/60 Hz) geprüft werden kann, wobei aber ein relativ hohes spezifisches „Prüfgewicht“ von > 10 kg/kVA in Kauf genommen werden muß.

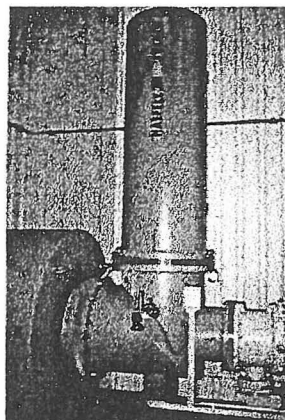
Bei Serienresonanzprüfanlagen mit variabler Induktivität liegt das spezifische „Prüfgewicht“ niedriger bei ca. 5 kg/kVA, wobei ein Tuningbereich von $C_{\max}/C_{\min} = 20$ erreicht werden kann. Serienresonanzprüfanlagen mit variabler Frequenz reduzieren das spezifische „Prüfgewicht“ noch einmal auf ca. 1.5 kg/kVA, wobei ein Tuningbereich von $C_{\max}/C_{\min} = 44.4$ (30 .. 200 Hz) erreicht werden kann.



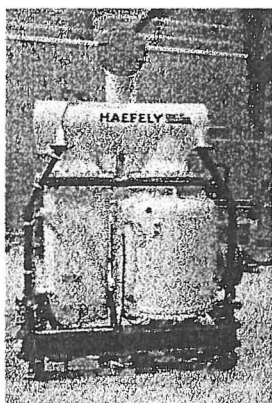
Prinzipschaltbild einer Prüfanordnung mit variabler Frequenz



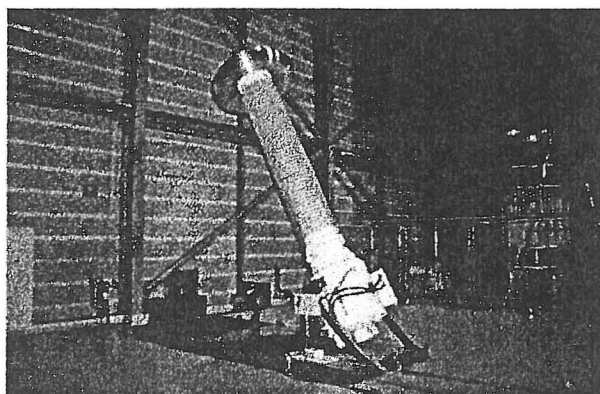
440 kV, 66 A Serienresonanzanlage mit variabler Frequenz



400 kV, 0.8 A Serienresonanzanlage mit variabler Frequenz, direkt anflanschbar an eine GIS oder GIL



hydraulisch höhenverstellbarer Prüftransformator mit Koppelkondensator
275 kV, 0.33 A



hydraulisch aufrichtbarer Prüftransformator
510 kV, 0.18 A

Vorteile:

- mit Wechselspannung kann eine Vor-Ort Prüfung unter Betriebsbedingungen durchgeführt werden. Frequenzen im Bereich von 20 ... bis 300 Hz haben verglichen zu den Betriebsfrequenzen 50/60 Hz wenig Einfluß auf das Durchschlagsverhalten, da die Durchschlagsprozesse physikalisch sehr ähnlich sind [5], [8].
- es können Spannungsprüfungen über längere Zeiträume (mehrere Stunden) durchgeführt werden.

Nachteile:

- vor allem 50/60 Hz Prüfanlagen sind groß, schwer und damit auch teuer. 50/60 Hz Transformator Vor-Ort Prüfsysteme sind deshalb nur bei kleinen Prüfleistungen < 250 kVA ökonomisch (spez. Prüfungsgewicht: > 10 kg/kVA). Bei 50/60 Hz Resonanzprüfanlagen geht das spezifische Prüfungsgewicht (ca. 5 kg/kVA) und damit auch der Preis merklich zurück. Das kleinste spezifische Prüfungsgewicht (ca. 1.5 kg/kVA) haben Prüfanlagen mit variabler Frequenz.

7. Zusammenfassung

Vor-Ort Prüfungen von GIS und GIL

Hier werden nur AC, OLI und OSI Prüfungen durchgeführt. Die Wirksamkeit genannter Vor-Ort Prüfungen ist in der unten stehenden Tabelle kurz zusammengefaßt

Fehlerursache	AC-Spannungsprüfung	AC-Spannungsprüfung mit empfindlicher TE-Messung	OSI	OLI
Montagefehler (z.B. vergessene Teile)	mittel	mittel	mittel	gut
Spitzen an den Elektroden	schlecht	gut	mittel	gut
Defekte am Isolator	schlecht	gut	mittel	gut
frei bewegliche Teilchen	gut	gut	schlecht	schlecht

Vor-Ort Prüfungen von Kabeln, Leistungstransformatoren und Meßwandlern

Die Anwendbarkeit der einzelnen Prüfmethoden wird in der nachfolgenden Tabelle kurz zusammengefaßt. Die OW-Methode wird nicht berücksichtigt, da sie aufgrund der kurzen Prüfdauer (einige Sekunden) nur zur Diagnose eingesetzt werden kann.

Es wurde bewertet, daß die Prüfspannung Vor-Ort möglichst einfach erzeugbar sein muß, sowie z.B. Kabelfehler mit einem möglichst kleinen Prüfspannungspegel erkannt werden sollten, um somit die Wahrscheinlichkeit für zusätzliche Schädigungen durch die Prüfung selbst gering zu halten (sowohl im Kabel wie auch in den Muffen und Endverschlüssen) [8]. Die Prüfdauer sollte bei Kabeln im Bereich von 30 .. 60 min liegen.

Prüfobjekt	DC-Prüfung	VLF-Prüfung	AC-Prüfung
Öl/Papierkabel	mittel	gut	gut
Kunststoffkabel			
water trees	schlecht	gut	gut
Muffendefekte	schlecht	mittel	gut
Fehler in der Isolation	schlecht	mittel	gut
Wandler	überhaupt nicht	überhaupt nicht	gut
Leistungstransformatoren	überhaupt nicht	überhaupt nicht	gut

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Vor-Ort AC-Prüfung die umfassendste, und physikalisch sinnvollste Prüfung ist, bei der mögliche Fehler im Prüfobjekt mit dem kleinsten Prüfspannungspegel erkannt werden können. Eine parallel zur reinen Spannungsprüfung durchgeführte TE-Messung, sofern diese aufgrund des Grundstörpegels oder durch mit Sensoren ausgestattete Kabelmuffen durchführbar ist, ist für Diagnosezwecke empfehlenswert. Bei GIS/GIL Anwendungen ist eine ergänzende OLI-Prüfung sicherlich sinnvoll.

8. Literatur

- [1] Mark Turner, *OWTS - a new method for diagnosis of installed medium voltage power cables*
- [2] Cigre Working Group 33.03, Task Force 04, *Proposed Requirements For High-Voltage Withstand And Diagnostic Testing On Site*
- [3] Cigre Working Group 21.09, Colloq. 95/03, *After Laying Tests Of High Voltage Extruded Insulation Cable Systems*
- [4] Nico van Schaik, *On-Site Testing of High Voltage Cable Systems After Laying; Voltage Tests*, IEE Colloquium On „Super Tension (66-500 kV) Polymeric Cables And Their Accessories,“; London, November 20 and 21, 1995
- [5] Ernst Gockenbach, *Breakdown Behaviour Of Polymer Insulating Material At Different Frequencies*
- [6] Rober Bach, Peter Craatz, Wilfried Kalkner, Karl-Heinz Krefter, Heiko Oldehoff, Georg Ritte, *Spannungsprüfungen zur Beurteilung von Mittelspannungskabelanlagen*, ETZ Sonderdruck Nr. 4497
- [7] A. Dießner, E. Kynast, B. Suermann, *Stand und Trend von Hochspannungsprüfungen vor Ort an SF6-isolierten Systemen*
- [8] Gundolf Schiller, *Das Durchschlagsverhalten von vernetztem Polyethylen (VPE) bei unterschiedlichen Spannungsformen und Vorbeanspruchung*