

## Editorial

In dieser zweiten Ausgabe des AFIF Newsletter stellen wir Ihnen mit einem Interview und einem Fachartikel die uns administrativ angegliederte Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH und ihre Aktivitäten vor. Ähnlich wie die AFIF ist auch die FKH eine Brücke zwischen der Hochschulforschung und der industriellen Praxis. Ihre Dienstleistungen werden speziell von Elektrizitätswerken und von Firmen dieser Branche in Anspruch genommen. Das Zusammenwirken von AFIF und FKH ermöglicht die Realisierung einer Reihe von Synergien. Unsere Auftraggeber erhalten dadurch die Möglichkeit, ein breiteres Feld von multidisziplinären Problemen durch uns einer Lösung zuzuführen.

Sie lesen in dieser Ausgabe auch einen Bericht über die Generalversammlung der GFF, unseres Trägervereins, die am 26. Mai 1994 in Basel stattfand. Gastgeber und Organisator des interessanten Rahmenprogrammes war unser Mitglied Ciba-Geigy AG. An der GV erfolgte die Verabschiedung der neuen Statuten und der Rücktritt des GFF-Direktors H.A. Laett, dessen während dreizehn Jahren für die GFF und AFIF erbrachten Leistungen gewürdigt und verdankt wurden.

Im Abschnitt «Neues aus der ETH» stellt Ihnen Prof. H. Feichtinger, Gruppe für metallurgische Verfahrenstechnik im Technopark Zürich, seine inhouse-Zusammenarbeit mit der AFIF vor.

«AFIF aktuell» berichtet über die ersten zwei Feierabendgespräche in Bern und Altdorf. Die Reihe solcher Feierabendgespräche, bei denen die AFIF in die Regionen geht und lokale Industrievertreter über ihre Tätigkeit informiert, soll fortgesetzt werden mit dem Ziel, die Möglichkeiten des Technologietransfers Hochschule - Industrie den Firmen in verschiedenen Regionen der Schweiz näher zu bringen.



Dr. Werner J. Borer, Direktor AFIF

## Überwachung des Isolationszustandes bei Betriebsmitteln der elektrischen Energieübertragung

Dr. Th. Aschwanden, Dr. R. Bräunlich  
Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH

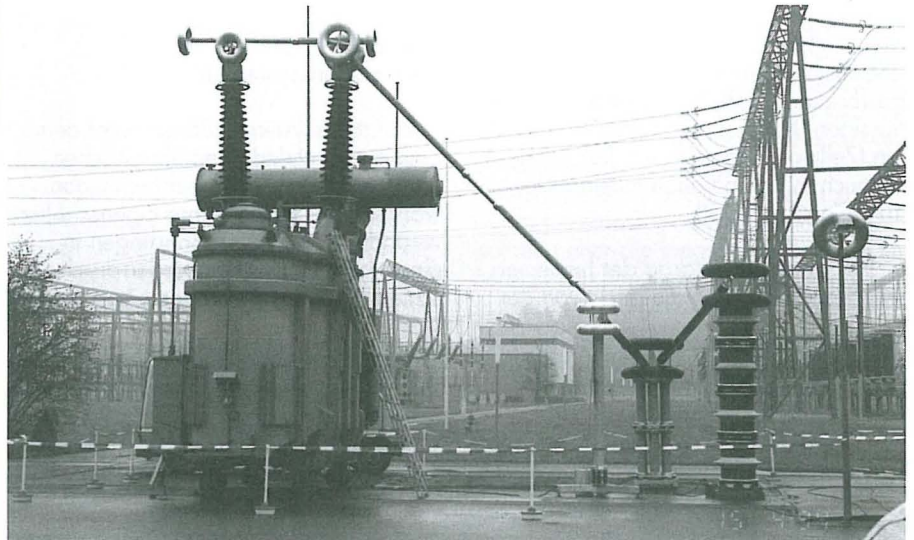


Bild 1: Fremdspannungsprüfung mit TE-Diagnose an einem 220 kV Transformator im Unterwerk

Eine sehr hohe Zuverlässigkeit und eine möglichst kontinuierliche Verfügbarkeit der elektrischen Energieversorgung sind heute wichtige Voraussetzungen für das Funktionieren unserer hochindustrialisierten Gesellschaft.

Um eine sichere Stromversorgung zu gewährleisten, müssen die Betriebsmittel des Energieversorgungssystems – Generatoren, Transformatoren, Schaltanlagen, Übertragungsleitungen, Leittechnik, usw. – einen hohen Grad an Zuverlässigkeit besitzen. Dieses Ziel wird durch folgende technische Massnahmen erreicht:

- richtige Wahl der System- und Anlagekonzepte
- korrekte Dimensionierung der Betriebsmittel
- Störungs- und Ausfallmanagement
- vorbeugende Instandhaltung bzw. Ersatzstrategie
- gezielter Einsatz von Diagnoseverfahren
- Zustandsüberwachung von strategisch wichtigen Komponenten

Da das gesamte Themengebiet der Instandhaltung und Zustandsüberwachung

ausserordentlich umfangreich und komplex ist, konzentriert sich dieser Beitrag auf Massnahmen und Werkzeuge der Diagnostik und der Überwachung (Monitoring) von Isolationssystemen der wichtigsten Komponenten der elektrischen Energieversorgung. Neben der Herstellerseite und grösseren Energieversorgungsunternehmen sind es in der Schweiz vor allem die ETH Zürich (Fachgruppe Hochspannungstechnik) und die Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH, wel-

### Inhalt:

**Überwachung des Isolationszustandes bei Betriebsmitteln der elektrischen Energieübertragung**

Seite 1

**Auf dem Gebiet der Vor-Ort-Prüfungen an vorderster Front**

Seite 5

**Neues aus der ETH**

Seite 7

**AFIF aktuell**

Seite 8



che die Thematik der Vor-Ort-Prüfung und Diagnose von energietechnischen Komponenten und Anlagen bereits seit einiger Zeit bearbeiten.

### Isolationssysteme von Betriebsmitteln

Unter Isolationssystem versteht man die Gesamtheit von Isolieranordnungen und Isolierstoffen, die in einem Betriebsmittel zur sicheren Potentialtrennung von spannungsführenden und geerdeten Metallteilen bzw. Leitern verwendet werden. Dabei kommen eine Vielzahl von gasförmigen (Luft, Schwefelhexafluorid), flüssigen (Isolieröl) und festen Isolierstoffen (Zellulose, Epoxidharz, Polyäthylen), oft auch in Kombination miteinander, zum Einsatz (Bild 2).

Der Komplexitätsgrad der heute verwendeten Isoliersysteme reicht von der

einfachen Luftisolation bei einer Freileitung bis zu komplizierten Isolierstoffkombinationen und Konstruktionen bei Leistungstransformatoren und Grossgeneratoren. Die zulässige elektrische Beanspruchung im Betrieb ist eine wichtige Dimensionierungsgrösse, die eng mit dem Komplexitätsgrad des Isolationssystems sowie mit den thermischen und mechanischen Anforderungen korreliert ist (Tabelle 1).

### Alterungsverhalten bei Isolationssystemen

Isolationssysteme können unter dem Einfluss der elektrischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen während des Betriebs ihre Eigenschaften verändern. Diese Veränderungen in einem Isolationssystem werden durch verschiedene Alterungsprozesse hervorgeru-

fen. Im schlimmsten Fall kann ein Versagen der Isolation, verbunden mit einem elektrischen Durchschlag, die Folge sein.

Der Begriff «**Alterung**» kann bei Isolierstoffen folgendermassen definiert werden: Veränderung (üblicherweise Verschlechterung) der physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften mit der Zeit unter Einwirkung von betrieblichen Belastungen. Solche Belastungen können elektrisch, thermisch, mechanisch, chemisch bzw. umweltbedingt sein. Meist treten mehrere dieser Belastungen gleichzeitig auf. Durch Alterung kommt es zu:

- temporären Eigenschaftsveränderungen (engl. degradation)
- permanenten, irreversiblen Eigenschaftsveränderungen (engl. deterioration)

Viele Isolationssysteme zeigen bei einer Langzeitbeanspruchung eine mit der Zeit abnehmende elektrische Isolationsfestigkeit.

### Ziele beim Einsatz von Diagnoseverfahren

Das übergeordnete Ziel beim Einsatz von Diagnoseverfahren und Überwachungssystemen in der Energieversorgung besteht darin, ein «Frühwarnsystem» zur Verfügung zu haben, das gefährliche Veränderungen des Isolationszustandes rechtzeitig signalisiert, um grössere Fehler, insbesondere den unvorhergesehenen Ausfall eines Betriebsmittels zu verhindern und um Folgeschäden zu vermeiden.

Neben der Früherkennung von Fehlern ist es eine Aufgabe der Diagnostik, ausreichende Informationen für die **Einschätzung der Fehlerrisikos** zu liefern. Es wird insbesondere erwartet, dass aus der Interpretation der Diagnoseresultate eine Entscheidungshilfe für das weitere Vorgehen abgeleitet werden kann.

### Diagnosemethoden

Es sollen hier nur solche Methoden beschrieben werden, die auch am Einsatzort der Betriebsmittel (z.B. in einer Schaltanlage) eingesetzt werden können. Gewisse Diagnoseverfahren können nur unter **Off-line** Bedingungen eingesetzt werden. Dabei muss die zu untersuchende Komponente vom Netz abgetrennt bzw. freigeschaltet werden. Bei **On-line** Diagnoseverfahren, die auch während des Netzbetriebs zur Anwendung gelan-

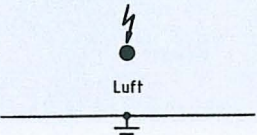
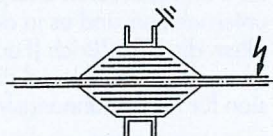
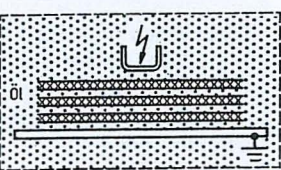
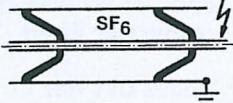
| Isoliersystem                                                                       | typische Anwendung                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|  | Freileitung                                                     |
|  | Kabel<br>Giessharzwandler<br>Gasisolierte Schaltanlage (GIS)    |
|  | Hochspannungs-Durchführung                                      |
|  | Transformator                                                   |
|  | SF <sub>6</sub> -Schaltanlage (GIS)<br>mit Schottungsisolatoren |

Bild 2: Schematische Darstellung von typischen Isoliersystemen der elektrischen Energietechnik



|                                | Elektrische Beanspruchung (kV/cm) | Mechanische Beanspruchung (relativ) | Komplexität des Aufbaus (relativ) | Automatisierungsgrad bei der Herstellung (relativ) |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| Generator                      | 25                                | 1                                   | 1                                 | 0.2                                                |
| Transformator                  | 50                                | 1                                   | 0.9                               | 0.3                                                |
| SF <sub>6</sub> -Schaltanlagen | 40                                | 0.2                                 | 0.3                               | 0.1                                                |
| Kabel                          | 50 ... 100                        | 0.5                                 | 0.2                               | 1                                                  |
| Kondensator                    | 600 ... 1000                      | 0.1                                 | 0.2                               | 0.8                                                |

Tabelle 1: Isolationssysteme von Betriebsmitteln

gen, werden von den Anlagebetreibern hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und an die Störfestigkeit der Sensoren gestellt.

Zum Nachweis von Veränderungen in Isolationssystemen können folgende physikalische Phänomene herangezogen werden:

- Zunahme der Teilentladungsaktivität. Eine Teilentladung (TE) ist ein elektrischer Durchschlag an einer Fehlerstelle (z.B. kleiner Hohlraum) im Isolationssystem. Der übrige, noch gesunde Teil der Isolierung kann die elektrische Beanspruchung noch ertragen.
- Veränderung von dielektrischen Eigenschaften, wie Verlustfaktor oder Kapazität
- Chemische oder morphologische Veränderungen, z.B. Polymerisationsgrad, Oxidation, Zersetzung, Treeing
- Veränderung von mechanischen Eigenschaften, z.B. Versprödung, Erosion, Delamination

**Chemische Diagnosemethoden** werden zu Diagnosezwecken vor allem dann eingesetzt, wenn Geräte oder Anlagen mit einem Isoliergas, z.B. SF<sub>6</sub> (Schwefelhexafluorid), oder einem flüssigen Isoliermedium gefüllt sind. Unter besonderen Bedingungen – z.B. bei thermischer Überbeanspruchung in Lichtbögen oder beim Auftreten von Teilentladungen – können Isolierstoffe chemisch zersetzt werden. Dabei werden gasförmige Zersetzungsprodukte gebildet. Die entstehenden Zersetzungsprodukte sind mit Hilfe eines **Gaschromatographen** oder mit einem **Massenspektrometer** nachweisbar.

In gasisolierten, metallgekapselten Schaltanlagen (GIS) führt eine Zersetzung von SF<sub>6</sub> zu teilweise aggressiven Verbindungen, z.B. SF<sub>4</sub> und S<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, die mit Gas-

verunreinigungen (Sauerstoff, Wasserdampf) spontan weiterreagieren. Zur Überwachung von SF<sub>6</sub>-Gasisolationen eignen sich deshalb die durch Sekundärreaktionen gebildeten gasförmigen Zersetzungsprodukte wie SOF<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>.

Bei Leistungstransformatoren und anderen ölisierten Apparaten hat neben den klassischen **Verfahren zur Bestimmung des Wasser- oder Säuregehalts** von Isolierölen auch die **Gas in Öl Analyse** eine breite Anwendung gefunden. Mit dieser Analyse lassen sich vor allem die im Öl schwer löslichen Gase wie Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), CO und CO<sub>2</sub> sowie andere gasförmige Kohlenwasserstoffe nachweisen. Die Reproduzierbarkeit der Analyseresultate ist durch eine Standardisierung der Probenentnahme, Untersuchungsmethoden sowie durch Auswertungsverfahren sichergestellt. Die Zusammensetzung der Spaltgase lässt im wesentlichen folgende Fehler erkennen: Teilladungen, lokale Überhitzung, Zelluloseabbau, Kontaktprobleme.

Zur Beurteilung des Alterungszustandes von ölprägnierten Papier-Isolierungen wird heute oft eine **Analyse des Furangehaltes** im Isolieröl durchgeführt. Furane (C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O) und ihre Derivate sind zuverlässige Indikatoren des Celluloseabbaus bei stark gealterter Papierisolation.

Die klassische **elektrische Diagnosemethode** zur Überwachung der dielektrischen Eigenschaften bzw. des Alterungszustandes von Isolationssystemen sind die Messung des Verlustwinkels (tan δ) bzw. der Kapazität bei Betriebsfrequenz (50 Hz) mittels einer Scheringbrücke. Diese integralen Messmethoden werden bei der Qualitätsprüfung im Herstellerwerk routinemässig angewendet. Sie können

unter gewissen Einschränkungen (Störbeeinflussung) auch zur Off-Line Diagnose vor Ort, z.B. zur regelmässigen Überprüfung von Transformatordurchführungen, erfolgreich eingesetzt werden.

Die Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften von Feststoffisolationen können im Zeitbereich auch durch eine sog. **Nachentladestrommessung** bestimmt werden. Ein Dielektrikum, das eine gewisse Zeit einem konstanten elektrischen Feld ausgesetzt war, wird kurzgeschlossen und der Strom, der im Kurzschluss fließt, gemessen. Die gemessenen Ströme lassen Rückschlüsse über die Depolarisationsvorgänge bzw. Relaxationsprozesse im Isolationsbereich zu, wobei für eine Zustandsbeurteilung der Isolation eher die langsamen Prozesse im Bereich von Sekunden und Minuten interessieren (z.B. Grenzschichtpolarisation). Diese Diagnosemethode wird heute zur Beurteilung von gealterten Kabelisolationen eingesetzt.

Betriebserfahrung und Laboruntersuchungen zeigen, dass Isoliersysteme mit festen und flüssigen Isolierstoffen bzw. Kombinationen aus beiden, unter normalen Betriebsbedingungen altern und dass dabei **Teilentladungen (TE)** auftreten.

Eine reine Gasisolation (z.B. SF<sub>6</sub>) ist praktisch keiner Alterung unterworfen. In gasisolierten Systemen können aber Teilentladungen durch Montage- und Fabrikationsfehler entstehen: z.B. freie Metallpartikel im Gasraum oder Hohlräume in Feststoffisolationen.

Da die mit TE verbundenen impulsartigen Vorgänge elektrisch oder auch akustisch (Ultraschallbereich) im allgemeinen relativ leicht erfassbar sind, können diese Signale sehr gut für eine Diagnose von energietechnischen Komponenten und Anlagen benutzt werden.

Die elektrischen TE-Messverfahren sind für Laboranwendungen in nationalen und internationalen Prüfvorschriften festgelegt. Für Anwendungen unter Vor-Ort-Bedingungen wird bei der TE-Diagnose oft im Zusammenhang mit der Optimierung der Detektionsempfindlichkeit von diesen Prüfvorschriften abgewichen, indem man auf eine echte Kalibrierung der TE-Intensität («scheinbare» Ladung) verzichtet.

Abgesehen von einfachen modellhaften Anordnungen ist für die Bewertung



der TE-Aktivität der direkte Zusammenhang zwischen den messbaren TE-Größen (Anzahl Impulse, umgesetzte Ladung oder Energie) und dem Schädigungsausmass im allgemeinen nicht bekannt. Die heutigen TE-Grenzwerte beruhen fast nur auf Erfahrungswerten.

In vielen TE-Diagnoseanwendungen besteht der Wunsch, die Fehlerstellen innerhalb eines grösseren Hochspannungsapparates zu orten. Zur Zeit gelingt eine eindeutige Fehlerortung nur bei geometrisch einfachen Isolationssystemen, wie z.B. bei Kabeln und GIS. Trotz dieser Einschränkungen stellt die TE-Messung eines der wichtigsten und empfindlichsten

lyse) und auf Langzeiterfahrung zurückgreifen kann.

Grundsätzlich werden alle Diagnoseverfahren anwendungsbezogen eingesetzt:

- dauernde Überwachung eines Betriebsmittels (On-Line Monitoring)
- periodische Diagnosemessungen (z.B. einmal pro Jahr)
- ereignisinduzierte Überprüfung (z.B. Diagnose nach Störfall)

Bei der On-Line Überwachung werden vom Monitoringsystem Daten von festinstallierten Sensoren laufend registriert und ausgewertet. Beim Überschreiten eines

durchgeführten Diagnosemessungen dient meist dazu, zu entscheiden, ob das Betriebsmittel ohne Gefährdung des Netzbetriebs wieder eingeschaltet werden darf.

In den Bildern 1 und 3 werden praktische Beispiele für den Vor-Ort-Einsatz von Diagnoseverfahren dargestellt, welche aus dem Tätigkeitsbereich der FKH stammen:

- Vor-Ort TE-Diagnoseprüfung an einem Grosstransformator nach einem Störfall (Bild 1)
- Überprüfung von betriebsgealterten Hochspannungsmesswandlern (Bild 3)

Die eingesetzten Hochspannungsprüfanlagen und ein grosser Teil der Messeinrichtungen sind von der FKH entwickelt worden.

## Ausblick

Die Beurteilung des Isolationszustandes von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung mit elektrischen und chemischen Diagnosemethoden hat sich zu einem bedeutenden interdisziplinären Forschungsgebiet entwickelt. Obwohl die verfügbaren Diagnoseinstrumente bereits heute einen wichtigen Beitrag zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit und zur Vermeidung bzw. Reduktion von Ausfallzeiten und -kosten liefern, kommt der Entwicklung von neuen, aussagekräftigen Verfahren grosse Bedeutung zu.

Bei der Interpretation der Diagnoseergebnisse spielt die Erfahrung (Expertenwissen) eine wesentliche Rolle. In den meisten Fällen ist der Zusammenhang zwischen dem diagnostisch ermittelten Befund und dem aktuellen Alterungszustand oder einem Fehler äusserst komplex und kann nicht immer vollständig abgeklärt werden. Hier sind noch mehr systematische Untersuchungen notwendig.

Der zunehmende Einsatz von modernen, computergestützten Diagnoseverfahren und vollautomatisierten Monitoringsystemen ist bereits jetzt absehbar. Für die richtige Interpretation und beim Entscheid über die zu treffenden Massnahmen wird aber auch in Zukunft der Faktor «Mensch» nicht zu ersetzen sein. □

Vergrosserter Ausschnitt aus der Isolation

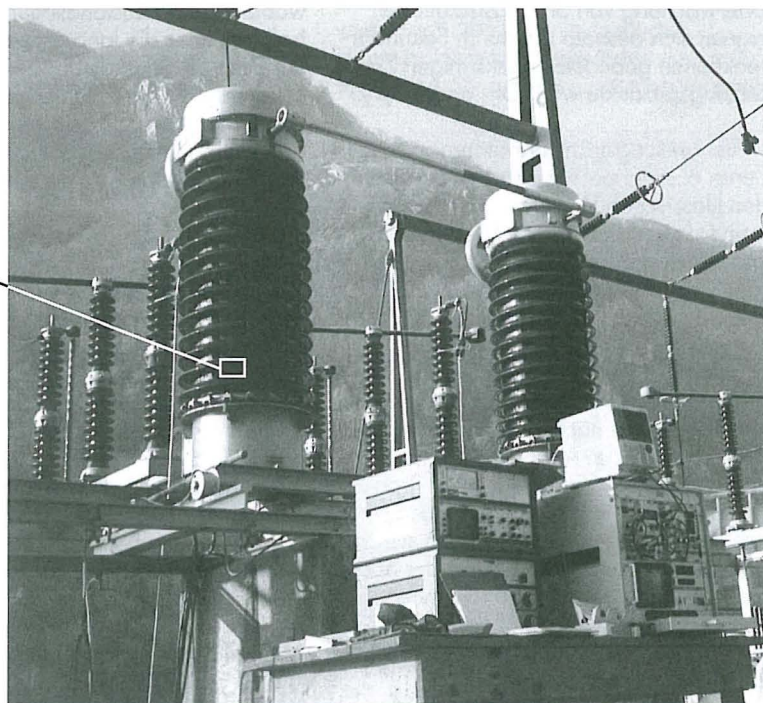


Bild 3: Vor-Ort-Teilentladungsmessung an Hochspannungsmesswandlern

Diagnosemittel dar, das bei praktisch allen Betriebsmitteln eingesetzt werden kann.

## Einsatz von Vor-Ort-Monitoring und Diagnoseverfahren

Bei der Wahl der Diagnosemethode für die Beurteilung eines bestimmten Betriebsmittels spielt die Aussagekraft der Methode eine dominante Rolle. Damit werden vor allem diejenigen Methoden bevorzugt, bei denen man auf einen grossen Datenpool (z.B. Gas in Öl Ana-

lyse) und auf Langzeiterfahrung zurückgreifen kann. Grundsätzlich werden alle Diagnoseverfahren anwendungsbezogen eingesetzt:

Bei periodischen Diagnoseprüfungen oder auch ereignisinduzierten Prüfungen nach besonderen Vorkommnissen im Netz (z.B. Kurzschluss, Überspannung) muss das Betriebsmittel meistens freigeschaltet werden. Das Resultat der vor Ort