

Methoden zur Überwachung des Isolationszustandes von energietechnischen Komponenten

Thomas Aschwanden

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

Zusammenfassung

Der Beitrag befasst sich mit den Verfahren zur Erfassung und Beurteilung des Isolationszustandes von strategisch wichtigen Komponenten und Anlagen der elektrischen Energieübertragung: z.B. Transformatoren, Messwandler, Kabelanlagen, Schaltanlagen. Durch die betriebliche Beanspruchung können in den Isolationssystemen von energietechnischen Geräten und Anlagen Schwachstellen und Alterungsdefekte auftreten, welche mit geeigneten Diagnoseverfahren erfasst und beurteilt werden können. Die wichtigsten Diagnosemethoden werden vorgestellt und ihr Einsatz anhand von Anwendungsbeispielen erläutert.

1. Einleitung

Eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie setzt Produktionsanlagen (z.B. Wasserkraftwerke, Kernkraftwerke) und Verteilsysteme (Übertragungsleitungen, Unterwerke) voraus, welche einen hohen Grad an Zuverlässigkeit besitzen müssen. Damit die angestrebte Versorgungssicherheit tatsächlich erreicht wird, werden an alle eingesetzten Betriebsmittel (energietechnische Komponenten) sehr hohe Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit gestellt: Generatoren, Transformatoren, Schaltanlagen, Übertragungsleitungen, Schutzsysteme, Leittechnik, usw.

Die geforderte Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit wird bei energietechnischen Anlagen und Komponenten durch folgende technische Massnahmen erreicht:

- richtige Wahl der System- und Anlagenkonzepte (Redundanz)
- korrekte Dimensionierung der Betriebsmittel (Sicherheitsmargen)
- optimiertes Störungs- und Ausfallmanagement
- vorbeugende Instandhaltung bzw. Ersatzstrategie
- gezielter Einsatz von Diagnoseverfahren
- on-line Zustandsüberwachung von strategisch wichtigen Komponenten

Bild 1: *Technische Massnahmen zur Sicherung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von energietechnischen Komponenten und Systemen*

2. Überwachung des Isolationszustandes als Element der Instandhaltung

Diagnose und Überwachung (Monitoring) des aktuellen Zustandes der Betriebsmittel sind integrale Bestandteile der Instandhaltung. Die Bemühungen der Energieversorgungsunternehmen und Kraftwerksbetreiber, die Instandhaltung der Betriebsmittel durch erhöhte Qualität der technischen Massnahmen (Bild 1) zu optimieren und damit die Kosten zu senken, haben weltweit zu einem erhöhten Interesse an Methoden und Verfahren der Zustandsüberwachung von energietechnischen Komponenten geführt [1], [2], [3], [4], [5].

Das steigende Interesse an der Instandhaltung und an der Zustandsüberwachung von energietechnischen Betriebsmitteln ist insbesondere auch im Zusammenhang mit der **Altersverteilung** dieser Apparate und Systeme zu sehen: bedingt durch den massiven Ausbau der Produktionskapazitäten (Kraftwerke) und des Verbundnetzes (220-kV und 380-kV-Netz) in den 60-Jahren, erreichen sowohl in der Schweiz als auch in ganz Mitteleuropa eine sehr grosse Anzahl von Anlagen und Komponenten ein Alter von 30 und mehr Jahren und nähern sich damit dem Ende der Lebensdauer (typisch ca. 40 Jahre).

Bezüglich **Instandhaltungs- und Ersatzstrategien** können bei Komponenten und Apparaten der elektrischen Energietechnik heute folgende zwei (extreme) Wege beschritten werden:

1. Betrieb der Einrichtung mit üblichem Wartungsaufwand (z.B. visuelle Kontrolle und Ersatz von Verschleissteilen) ohne zusätzlichen Einsatz von diagnostischen Hilfsmitteln, verbunden mit einem relativ hohen Ausfallrisiko vor allem am Ende der Lebensdauer des Betriebsmittels infolge von Alterungseffekten. Das Risiko eines unplanmässigen Betriebsunterbruchs kann z.B. durch eine vorzeitige Ausserbetriebnahme oder durch den Parallelbetrieb einer neuen Einheit (Redundanz) vermindert werden.
2. Kontinuierliche Beobachtung des Zustandes der Betriebsmittel durch moderne Diagnoseverfahren und Überwachungssysteme. Damit steht vor allem für die Abschätzung des Ausfallrisikos bzw. für die Ausserbetriebnahme von betriebsgealterten Komponenten eine objektive Entscheidungsgrundlage zur Verfügung.

Für strategisch wichtige und kostenintensive Betriebsmittel, wie z.B. Grossgeneratoren und Blocktransformatoren in Kernkraftwerken, SF₆-isolierte Hochspannungsschaltanlagen und Netzkupplungs-Transformatoren in Unterwerken, wird in zunehmendem Masse der zweite Weg gewählt.

Die "**technische**" Lebensdauer (Betrieb bis zum Bruch) kann bei strategisch wichtigen Betriebsmitteln nie vollständig ausgeschöpft werden, weil durch **Alterungseffekte** in Konstruktions- und Isoliermaterialien das Risiko für das Auftreten grösserer Defekte oder eines Totalausfalls am Ende der Lebensdauer stark zunimmt. Die langjährige Erfahrung zeigt, dass die nutzbare Restlebensdauer von betriebsgealterten Hochspannungskomponenten und Apparaten u.a. stark vom **Alterungszustand des elektrischen Isolationssystems** abhängig ist.

Da das gesamte Themengebiet ausserordentlich umfangreich und komplex ist, konzentriert sich dieser Beitrag auf Methoden der **Diagnostik** und der **Zustandsüberwachung** (Monitoring) der Isolationssysteme von ausgewählten Komponenten der elektrischen Energieversorgung: Transformatoren, Messwandler, SF₆-Schaltanlagen, Kabelanlagen. Die Verfahren zur Zustandserfassung bei Generatoren, Schutzsystemen und in der Leittechnik werden in anderen Beiträgen dieser Tagung behandelt.

3. Isolationssysteme von energietechnischen Komponenten

Unter Isolationssystem versteht man die Gesamtheit von Isolieranordnungen und Isolierstoffen, welche in einem Hochspannungsgerät oder -System 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 (z.B. Zellulose, Epoxidharz, Polyäthylen), oft auch in Kombination miteinander, zum Einsatz.

In energietechnischen Komponenten ist die **betriebliche Beanspruchung** der elektrischen Isolation infolge der grossen Zahl der relevanten Belastungsparameter äusserst komplex; bei der Dimensionierung muss sowohl der normale Betriebszustand als auch der Fehlerfall berücksichtigt werden. Die wichtigsten Beanspruchungsparameter von Isolationssystemen und mögliche Fehlererscheinungen bei Alterung und/oder Überlastung sind in Bild 2 zusammengefasst.

Beanspruchung	im Normalbetrieb	Überlastung durch	Fehlererscheinungen (Beispiele)
elektrisch	elektrisches Feld magnetisches Feld	Überspannungen Kurzschluss-Ströme	Teilentladungen Durchschlag Lichtbogen
mechanisch	statische Kräfte Vibrationen Schwingungen	Schaltmomente Kurzschlusskräfte	Wicklungsdeformation Delamination Leiterbruch
thermisch	Verlustwärme Umgebungstemperatur	Lastzyklen Fehler-Ströme Wärmestau	Hot Spot Verbrennung Zersetzung
chemisch/ physikalisch	Witterung Verschmutzung Bestrahlung	Verunreinigung Leckagen Wassereintritt	Strukturänderungen Korrosion Explosion

Bild 2: Betriebsbeanspruchung und mögliche Fehlererscheinungen bei Isolationssystemen

Für die Konstruktion von energietechnischen Komponenten und Hochspannungsapparaten ist die **zulässige elektrische Beanspruchung** eine der wichtigsten Dimensionierungsgrössen; sie wirkt sich stark auf die Betriebssicherheit und auf die Lebensdauer eines Betriebsmittels aus. Die zulässigen Feldstärken sind eng mit dem Komplexitätsgrad des Isolationssystems sowie mit den thermischen und mechanischen Anforderungen korreliert (Bild 3).

	Zulässige 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 ₆ -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

Bild 3: Korrelation zwischen zulässiger Beanspruchung und Isolationsaufbau bei wichtigen Betriebsmitteln [3].

4. Alterungsverhalten von Isolationssystemen

Unter dem Einfluss der elektrischen, thermischen und mechanischen Langzeitbeanspruchungen während des Betriebs können sich wichtige Eigenschaften von Isolierstoffen verändern. Diese Veränderungen in einem Isolationssystem, oft auch mit dem Begriff "Alterung" umschrieben (Definition in Bild 4), werden durch verschiedene physikalische und/oder chemische Prozesse hervorgerufen. Dabei können sowohl temporäre Eigenschaftsveränderungen (engl. degradation) als auch permanente, irreversible Eigenschaftsveränderungen (engl. deterioration) auftreten. Bei einer Langzeitbeanspruchung nimmt infolge der Alterungsvorgänge (z.B. Bildung von Defekten und Schwachstellen) die elektrische Isolationsfestigkeit im allgemeinen mit der Zeit ab.

Alterung:

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 (multi-stress).

Bild 4: Definition von Alterung bei elektrischen Isolationssystemen

Die einfachsten **mathematischen Modelle** (sogn. Lebensdauermodelle) für die chemischen Alterungsprozesse in Isolierstoffen basieren auf der Arrheniusgleichung der Reaktionskinetik: eine Erhöhung der Beanspruchungstemperatur um 8...11° K (je nach Reaktionstyp) bewirkt eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit der ablaufenden chemischen Prozesse; d.h die Lebensdauer einer Isolierung wird halbiert [6].

Analog dazu lässt sich für die elektrische Beanspruchung ein Zusammenhang zwischen der Höhe der elektrischen Feldstärke E (Belastung) und der Lebensdauer t (Zeit bis zum Ausfall bzw. Durchschlag) mit einer **empirisch gefundenen Näherung** beschreiben (siehe z.B. [7]):

$$t \cdot E^n = K \quad \text{oder} \quad \log E = K - (1/n) \log t \quad (\text{Lebensdauergleichung})$$

Dabei ist K eine experimentell bestimmte Konstante und n ist der sogn. Lebensdauerkoeffizient. Typische Werte für n bei "gesunden" Isolationssystemen liegen zwischen 10 und 20. Ähnliche Beziehungen gelten qualitativ auch für thermische oder mechanische Beanspruchungen. Für praktische Isolationssysteme dürfen aber diese stark vereinfachten "Lebensdauergleichungen" (invers power law) nur über eine relativ eng begrenzte Beanspruchungszeit angewendet werden. Eine Ermittlung der technischen Lebensdauer durch Extrapolation auf der Basis dieser einfachen mathematischen Modelle ist nicht möglich [7].

Beispiele von **irreversibeln Zustandsänderungen** in praxisrelevanten Isolationssystemen sind: Zersetzung von Öl (Gasbildung) und Zellulose (Depolymerisation) in Öl-/Papier-Isolation (Transformatoren, Messwandler) durch thermische Beanspruchung [8], Veränderungen in der Morphologie bei polymeren Isolierstoffen durch Temperaturbelastung und Bildung von sogn. "Wasserbäumchen" (water trees) durch Feuchtigkeit und/oder durch Verunreinigungen in Polyäthylen (Energiekabel) [9], erhöhte Leitfähigkeit und Verlust der mechanischen Festigkeit (z.B. Zugfestigkeit, Dehnung) bei allen Polymer-Isolierstoffen unter Langzeit-Strahlenbelastung (Röntgenstrahlung, Neutronenstrahlung) [9].

5. Grundlagen der Isolations-Diagnose und -Überwachung

Diagnose- oder Überwachungsverfahren zur Zustandserfassung und Beurteilung von energietechnischen Komponenten laufen allgemein in einem 3-Stufen Prozess ab, bei welchem Veränderungen gegenüber einem Referenzwert erfasst und bewertet werden (siehe Bild 5).

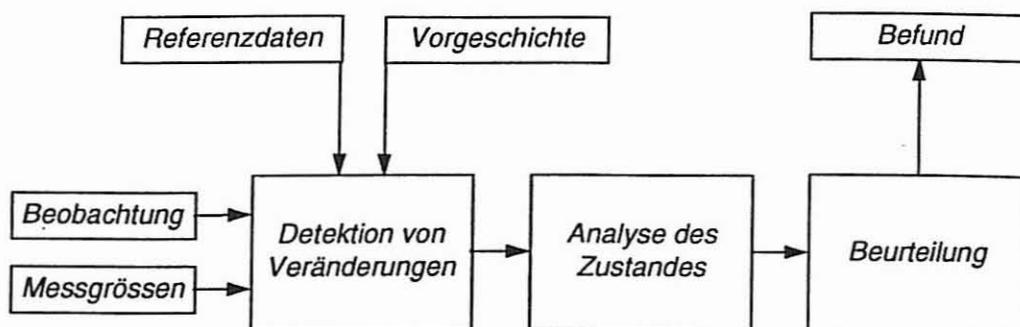


Bild 5: Diagnose-Prozess

Das übergeordnete Ziel beim Einsatz von Diagnoseverfahren und Überwachungssystemen besteht darin, ein "Frühwarnsystem" zur Verfügung zu haben, das gefährliche Veränderungen des Isolationszustandes von energietechnischen Komponenten rechtzeitig signalisiert, um grössere Fehler, insbesondere einen unvorhergesehenen Ausfall eines Betriebsmittels zu verhindern und um Folgeschäden zu vermeiden.

Neben der Früherkennung von Fehlern hat die Diagnostik die Aufgabe, ausreichende Informationen für die **Einschätzung des Fehlerrisikos** zu liefern. Der Betreiber von energietechnischen Anlagen erwartet insbesondere, dass durch die Interpretation von Diagnoseresultaten der aktuelle Ist-Zustand der untersuchten Komponente erfasst und bewertet werden kann. Diese Beurteilung dient in erster Linie als Entscheidungshilfe für das weitere Vorgehen (z.B. sofortige Ausserbetriebnahme oder Abwarten bis zum nächsten Revisionstermin).

Alle Verfahren der Zustandserfassung von elektrischen Isolationssystemen sind dadurch charakterisiert, dass die zu beurteilende Eigenschaft in der Form von "Messgrößen" nur indirekt erfasst werden kann. Eine **diagnostische Beurteilung** (Befund) eines Systems ist nur dann möglich, wenn wir das Systemverhalten verstehen und wenn ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Belastung (Beanspruchung) und Wirkung besteht. Diese Zusammenhänge sind aber bei sehr komplex aufgebauten Isolationssystemen in grossen energietechnischen Apparaten nicht immer bekannt.

Bei regelmässig durchgeführten Diagnosemessungen und bei kontinuierlicher Überwachung (Monitoring-Systeme) gilt immer, dass die **zeitliche Veränderung** einer Diagnosegrösse viel wichtiger ist, als der gemessene Absolutwert. Durch Trendanalyse und dynamische Modellierung des Systems (z.B. on-line Berechnung der Temperaturverteilung in einem Transformator) lässt sich bei kontinuierlicher Zustandsänderung (z.B. Zunahme von Gasgehalt in Isolieröl) eine Schadenentwicklung frühzeitig erkennen. Eine Fehlererkennung auf der Basis einer Trendanalyse ist jedoch nicht immer möglich, da sich Isolationssysteme unter gewissen Belastungen auch stochastisch verhalten können, d.h. es treten diskontinuierliche Zustandsveränderungen auf (z.B. elektrischer Durchschlag in einer Gasisolation).

6. Vor-Ort-Diagnosemethoden

In der folgenden Übersicht werden nur solche Diagnosemethoden beschrieben, die für die Beurteilung von energietechnischen Komponenten vor Ort, d.h. am Aufstellungsort im Kraftwerk oder im Unterwerk, geeignet sind (Labormethoden sind selten vor-Ort-tauglich!). Eine umfassende Beschreibung der heute verfügbaren Diagnosemethoden für Komponenten und Anlagen der elektrischen Energietechnik ist in [5] und [6] zu finden.

Zur Überwachung des Zustandes von energietechnischen Komponenten können folgende Veränderungen von physikalischen, chemischen, elektrischen oder mechanische Eigenschaften des Isolationssystems herangezogen werden:

- **Chemische und morphologische Veränderungen**, z.B. Oxidation, Zersetzung, Treeing, Fremdstoffgehalt, Kristallinitätsgrad, Polymerisationsgrad
- **Veränderung von dielektrischen Eigenschaften**: Verlustfaktor, Kapazität, Relaxationsströme
- **Einsatz von Teilentladungsaktivität**. Eine Teilentladung (TE) ist ein elektrischer Durchschlag an einer Schwachstelle (z.B. kleiner Hohlraum) im Isolationssystem. Der übrige, noch gesunde Teil der Isolierung kann die elektrische Beanspruchung noch aushalten.
- **Veränderung mechanischer Eigenschaften**, z.B. Deformation, Delamination, Versprödung, Rissbildung, Erosion, Bruch.

Bei den ersten beiden Zustandsänderungen handelt es sich um **Volumeneffekte**, d.h. es wird der Effekt aller im Isolationssystem vorhandenen Defektstellen integral erfasst (keine Ortung möglich). Bei der Detektion von Teilentladungen oder bei der Detektion von Veränderungen im mechanischen Verhalten können auch **lokale Schwachstellen** in der Isolation nachgewiesen und in einigen Fällen auch geortet werden.

6.1 Vor-Ort-Spannungsprüfung

Die elektrische Beanspruchung mit Wechsel- Gleich- oder Impuls-Spannung (Blitzstoss oder Schaltstoss) ist eine einfache und sehr weit verbreitete Methode, um die Isulationsfestigkeit eines Betriebsmittels nachzuweisen. Bei Anwendungen an Betriebsmitteln vor Ort wird normalerweise eine **Stehspannungsprüfung** durchgeführt. Das Diagnosekriterium besteht in einer einfachen Ja/Nein-Entscheidung: Halten der Spannung oder plötzlicher Spannungszusammenbruch beim Versagen der Isolation (z.B. Durchschlag, Überschlag).

Für **neue Hochspannungsanlagen**, die zum grossen Teil am Aufstellungsort montiert werden müssen, wie z.B. Hochspannungs-Kabelanlagen, SF₆-isolierten Schaltanlagen (gas insulated substation, GIS), wird üblicherweise vor der Inbetriebnahme prophylaktisch eine Vor-Ort-Stehspannungsprüfung mit erhöhter Wechselspannung durchgeführt, um Montagefehler und Transportschäden zu identifizieren [10],[11].

Bei **gealterten Betriebsmitteln** ist für die Ermittlung des Isolationsszustandes eine reine Spannungsprüfung oft zu wenig aussagekräftig: hier sollte die Ja/Nein-Entscheidung einer Stehspannungsprüfung (Durchschlag-kein Durchschlag) durch zusätzliche Diagnosemessungen ergänzt und differenziert werden [6]. So können bei einer Beanspruchung mit Wechselspannung sinnvollerweise integrale dielektrische Diagnosemethoden (Abs. 6.3) oder ein Teilentladungsmessverfahren (Abs. 6.4) eingesetzt werden.

6.2 Chemische Diagnosemethoden

Chemische Diagnosemethoden werden zu Diagnosezwecken vor allem dann eingesetzt, wenn Geräte oder Anlagen mit einem Isoliergas, z.B. SF₆ (Schwefelhexafluorid), oder mit einem flüssigen Isoliermedium (z.B. Öl) gefüllt sind. Unter besonderen Bedingungen - z.B. bei thermischer Überbeanspruchung in Lichtbögen oder beim Auftreten von Teilentladungen - können Isolierstoffe chemisch zersetzt werden und es werden dabei gasförmige Zersetzungsprodukte gebildet. Die entstehenden Zersetzungsprodukte sind mit Hilfe eines **Gaschromatographen** oder mit einem **Massenspektrometer** nachweisbar.

Bei Teilentladungen in gasisolierten, metallgekapselten Schaltanlagen (GIS) entstehen durch Zersetzung des Isoliergases SF₆ teilweise aggressive Verbindungen, z.B. SF₄ und S₂F₄, welche mit Gasverunreinigungen (Sauerstoff, Wasserdampf) spontan weiterreagieren. Zur empfindlichen Überwachung von SF₆-Gasisolationen eignen sich (neben der elektrischen und der akustischen Teilentladungsdetektion) vor allem die durch Sekundärreaktionen gebildeten gasförmigen **Zersetzungsprodukte**, wie SOF₂ und SO₂F₂, welche heute im ppm-Bereich nachgewiesen werden können [1],[2].

Bei Leistungstransformatoren und andern ölisolierten Hochspannungsapparaten haben neben den klassischen Verfahren zur Bestimmung des Wasser- oder Säuregehalts (Neutralisationszahl) von Isolierölen insbesondere die **Gas-in-Oel-Analyse** (desolved gas analysis, DGA) seit vielen Jahren eine breite Anwendung gefunden [5],[8]. Mit einer solchen Analyse lassen sich vor allem die im Öl schwer löslichen Gase, wie Wasserstoff (H₂), Methan (CH₄), CO und CO₂ sowie andere gasförmige Kohlewasserstoffe nachweisen. Die Reproduzierbarkeit der Anlyseresultate ist durch eine Standardisierung der Probenentnahme, Untersuchungsmethoden und Auswertungsverfahren sichergestellt [12]. Aus der Zusammensetzung der Spaltgase lassen sich im wesentlichen folgende Fehler erkennen: Teilentladungen, lokale Überhitzung, Zelluloseabbau, Kontaktprobleme.

Zur Beurteilung des Alterungszustandes von ölimprägnierten Zellulose-Isolierungen wird heute oft eine **Analyse des Furangehaltes** im Isolieröl durchgeführt. Furane (C₄H₄O) und seine Derivate wie Furfurol sind zuverlässige Indikatoren des Zelluloseabbaus (Spaltung der Zellulose-Kettenmoleküle) bei stark gealterter Isolation. Furane sind im Isolieröl löslich und können mittels Hochdruckflüssigkeits-Chromatographie (HPLC) nachgewiesen werden [8],[13]. Diese Methode ist für Grosstransformatoren deshalb von Bedeutung, da bekannt ist, dass durch die Strukturveränderung in der gealterten Zellulose eine mechanische Schwächung (Versprödung) der Wicklungsisolation eintritt und dass dadurch die Kurzschluss-Festigkeit eines Transformators abnimmt [5].

6.3 Integrale dielektrische Methoden

Dielektrische Methoden beobachten und bewerten die Wechselwirkung eines elektrischen Feldes mit einem dielektrischen Material (Isolierstoff) [9]. Die klassischen Methoden zur Überwachung der dielektrischen Eigenschaften 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. Mit speziellen Störunterdrückungsmethoden können sie auch zur off-line Diagnose vor Ort, z.B. zur regelmässigen Überprüfung von Transformatordurchführungen, erfolgreich eingesetzt werden [5].

Eine einzelne $\tan \delta$ -Messung bei 50 Hz hat nur begrenzte Aussagekraft bezüglich des Zustandes einer Isolation; wesentlich aufschlussreicher ist die Ermittlung des Verlustfaktors in Abhängigkeit von Spannung und/oder Frequenz. Für solche Messungen wird eine oberwellenfreie, stabile Hochspannungsquelle benötigt, bei der sowohl Amplitude als auch Prüffrequenz verändert werden können. Mit den heute verfügbaren Resonanz-Prüfanlagen (siehe Bild 6) können diese Anforderungen weitgehend erfüllt werden [10].

Gewisse dielektrischen Eigenschaften von Isolationssystemen (Polymere, Epoxidharz, Öl/Papier) können auch im Zeitbereich durch eine sog. **Relaxationsstrommessung** (Polarisations- und Depolarisationsströme) bestimmt werden [6],[14],[15]. Ein Dielektrikum, das eine gewisse Zeit einem konstanten elektrischen Gleichfeld ausgesetzt war, wird kurzgeschlossen und der Strom der im Kurzschluss fließt, gemessen.

Die gemessenen Ströme lassen Rückschlüsse über die verschiedenen Relaxationsprozesse (Polarisation/Depolarisation) im Isolationssystem zu, wobei für eine Zustandsbeurteilung der Isolation vornehmlich die langsamen Prozesse der Grenzschichtpolarisation im Bereich von Sekunden und Minuten interessieren. Diese Diagnosemethode wurde zur Beurteilung von Kabelisolationen mit Polymerisolation (PE, EPR) bereits erfolgreich eingesetzt, wobei Aussagen bezüglich der Schädigung durch die Bildung von Wasserbäumchen gemacht werden können [14].

Da der apparative Aufwand gering ist und diese Methode einen breiten Anwendungsbereich besitzt, wird die Relaxationsstrommessung als Vor-Ort-Diagnosemittel seit jüngster Zeit auch zur Beurteilung des Alterungszustandes von Öl/Papier-Isolationen bei Grosstransformatoren eingesetzt [15].

6.4 Methoden zur Teilentladungsdetektion

Teilentladungen (TE) können dadurch auftreten, dass Isoliersysteme mit festen und flüssigen Isolierstoffen, bzw. Kombinationen aus beiden, unter normalen Betriebsbedingungen altern und dass sich dabei durch Strukturänderungen im Isoliermaterial **lokale Schwachstellen** (Inhomogenitäten, electrical trees) bilden [6] [9],[16].

Eine reine Gasisolation ist zwar praktisch keiner Alterung unterworfen. In gasisolierten Systemen können aber Teilentladungen durch Montage- und Fabrikationsfehler oder durch Überbeanspruchung im Betrieb entstehen: z.B. freie Metallpartikel im Gasraum, kleine Störstellen auf Elektroden oder kleine Hohlräume oder Risse in einem Feststoffisolator.

Da die mit TE verbundenen **impulshaften Vorgänge** elektrisch oder auch akustisch (Ultraschallbereich) im allgemeinen mit sehr hoher Messempfindlichkeit erfassbar sind, können diese Signale sehr gut für eine Diagnose von energietechnischen Komponenten (z.B. Transformatoren, Messwandler) und zur Zustandsüberwachung von Hochspannungskabelanlagen und SF₆-isolierten Schaltanlagen benutzt werden [6],[16][18].

Für Prüfungen im Labor oder im Prüffeld sind die elektrischen TE-Messverfahren in nationalen und internationalen Vorschriften [17] festgelegt. Für Anwendungen unter Vor-Ort-Bedingungen wird bei der TE-Diagnose oft im Zusammenhang mit der Optimierung der Detektionsempfindlichkeit von diesen Prüfvorschriften abgewichen. Zur Verbesserung der Empfindlichkeit sind bei der elektrischen TE-Detektion sowohl bei on-line als auch bei

6.5 Detektion von mechanischen Veränderungen: Transferfunktionsanalyse

Die Analyse der Transferfunktion (Frequency Response Analysis, FRA) ist ein empfindliches computergestütztes Werkzeug, zur Erfassung von mechanischen bzw. geometrischen Veränderungen bei Wicklungssystemen in Transformatoren, Drosselspulen und Messwandlern [19]. Die untersuchte Wicklung wird als Vierpol betrachtet und deren **Transferfunktion im Frequenzbereich** (z.B. Transferadmittanz) als Quotient des Ausgangssignals (z.B. Strom in der Wicklung) bezogen auf eine Anregungsfunktion (z.B. Spannung über der Wicklung) bestimmt. Der für die FRA-Methode nutzbare Frequenzbereich reicht typischerweise von 500 Hz bis ca. 2 MHz.

Da die Transferfunktion einer intakten Wicklung per Definition - lineare Verhältnisse vorausgesetzt - von der Anregungsfunktion (sinusförmig oder impulsförmig) unabhängig ist und nur von den durch die Kapazitäten und Induktivitäten der untersuchten Wicklung bestimmt wird, lassen Abweichungen der Transferfunktion im Vergleich mit einer Referenzmessung auf **geometrische Veränderungen** schliessen: z.B. Verschiebung oder Deformation der Wicklung durch Kurzschlusskräfte. Durch Variation der Amplitude der Anregungsfunktion (z.B. Blitzstoss-Impulse im Kilovolt-Bereich) lassen sich auch spannungsabhängige Fehler, wie z.B. unvollständige Windungsschlüsse, detektieren.

7. Einsatz von Isolations-Diagnose und Überwachungssystemen

Grundsätzlich wird der Einsatz von Diagnosemethoden auf das entsprechende Isolations-system und auf dessen Zustand (neu oder stark gealtert) abgestimmt. Bei der Wahl der Methode spielt neben den Kosten und dem Zeitaufwand des Diagnoseverfahrens vor allem dessen **Aussagekraft** eine dominante Rolle. Damit werden vor allem diejenigen Methoden bevorzugt, bei denen man sowohl auf eine fundierte theoretische Basis (Verständnis des Systemverhaltens) als auch auf einen grossen Datenpool (z.B. bei der Gas-in-Oel-Analyse) und auf Langzeiterfahrung zurückgreifen kann. Der internationalen **Standardisierung** eines Diagnoseverfahrens kommt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle zu, da damit die Resultate vergleichbar sind und damit ein Erfahrungsaustausch zwischen verschiedenen Anwendern stattfinden kann [4].

Typische Anwendungsfälle für den gezielten Einsatz von Verfahren der Isolations-Diagnose und der Zustandsüberwachung sind in Bild 7 zusammengestellt.

- ereignisorientierte Diagnose nach Störfall oder bei akutem Verdacht
- periodische Diagnosemessungen zur Kontrolle (z.B. einmal pro Jahr)
- dauernde Überwachung während des Betriebs (on-line Monitoring)

Bild 7: Einsatz von Diagnose- und Überwachungsverfahren in der Praxis

Einsatz von off-line Diagnoseverfahren: Für die periodischen Diagnoseprüfungen zur Kontrolle des Isolationszustandes oder auch bei ereignisindizierten Prüfungen nach besonderen Vorkommnissen im Netz (z.B. Kurzschluss, Überspannung) muss das Betriebsmittel meistens freigeschaltet werden (off-line Diagnose). Bei periodischen Prüfungen soll das Ergebnis

off-line-Messungen in den meisten Fällen besondere **Störunterdrückungsmassnahmen** notwendig (z.B. Brückenschaltung, selektive Filter), um die TE-Impulse gegenüber überlagerten hochfrequenten Störungen (z.B. Radiosender) wirkungsvoll zu diskriminieren [18]. Zur Erfassung von Teilentladungen in metallgekapselten SF₆-Anlagen kommen neuerdings auch Verfahren zum Einsatz (UHF-Methode), welche die elektromagnetischen Wellen, die durch TE-Impulse in diesen Anlagen angeregt werden, bei sehr hohen Frequenzen (ca. 100 MHz bis 1 GHz) mit eingebauten Feldsensoren (Antennen) detektieren (siehe z.B. Beiträge in [1],[2],[6]).

In vielen TE-Diagnoseanwendungen besteht der Wunsch, die Fehlerstellen innerhalb eines grösseren Hochspannungsapparats zu orten. Zur Zeit gelingt eine eindeutige **Fehlerortung** nur bei geometrisch einfachen Isolationssystemen, wie z.B. bei Kabeln und GIS. In gewissen Anwendungsfällen (Transformatoren, GIS) kann die Ortung einer Fehlerstellen durch eine akustische Teilentladungsdetektion (Ultraschallbereich) unterstützt werden [6],[16]. Trotz Einschränkungen stellt die TE-Messung eines der wichtigsten und empfindlichsten Diagnosemittel dar, welches bei praktisch allen Betriebsmitteln eingesetzt werden kann.

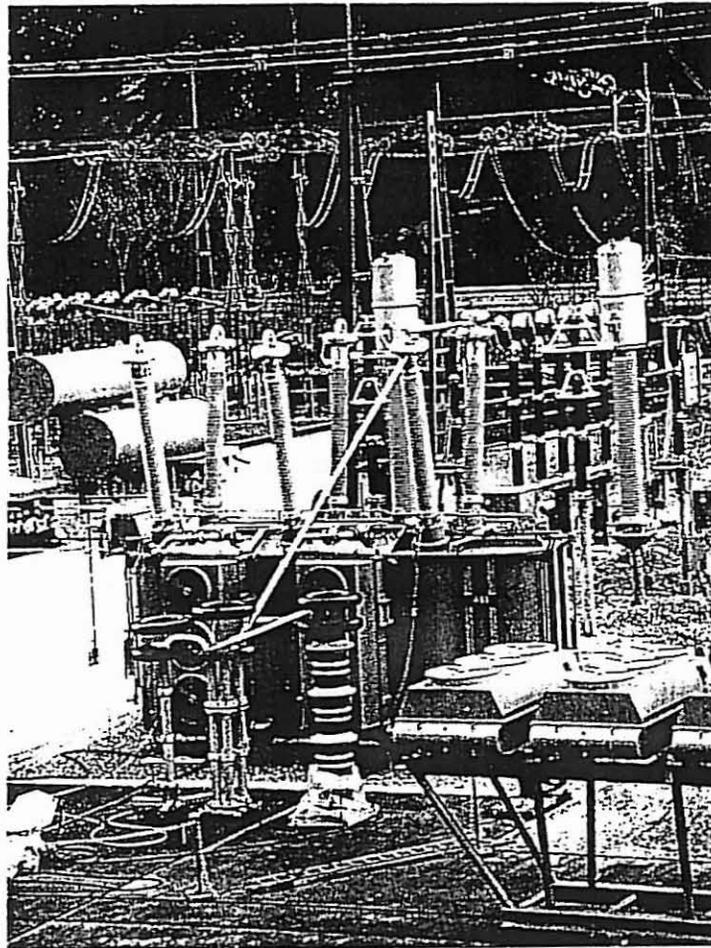


Bild 6

Vor-Ort-Spannungsprüfung mit Teilentladungsmessung an einem 220-kV/120 MVA-Reguliertransformator in einem Unterwerk. Im Vordergrund: Seriersonanz-Prüfanlage zur Erzeugung der Prüfbeanspruchung (Fremdspannungsprüfung).

Rückschlüsse auf den allgemeinen Isolationszustand und auf abnormale Betriebsereignisse zwischen den Prüfperioden ermöglichen. In akuten Fällen (z.B. nach Alarmauslösung) wird das Resultat einer Diagnosemessung zusammen mit anderen Kriterien (z.B. Netzzustand, Redundanzen usw.) herangezogen, um zu entscheiden, ob ein Betriebsmittel ohne Gefährdung des Netzbetriebs wieder eingeschaltet werden darf.

Einsatz von on-line Überwachungssystemen: Die kontinuierliche Isolations-Zustandsüberwachung im Betrieb (on-line) wird heute nur bei strategisch wichtigen Komponenten des Energieversorgungssystems, wie Grossgeneratoren, grossen Leistungstransformatoren, gasolierten Schaltanlagen und Hochspannungs-Kabelanlagen, angewendet [4].

Bei der on-line Zustandsüberwachung werden von einem **Monitoring-System** Daten von Sensoren (z.B. TE-Sensor, Gas-in-Öl-Sensor) zu festen Messintervallen registriert und ausgewertet (Bild 8). Mit einem computergestützten Experten-System wird der Ist-Zustand des überwachten Betriebsmittels laufend aktualisiert und das Ergebnis unter Einbezug von weiteren Betriebs- und Randbedingungen in einem Entscheidungsmodul beurteilt. Das daraus abgeleitete Endresultat besteht in einer mehr oder weniger spezifisch formulierten Fehlermeldung bzw. in einer Empfehlung an den Operateur für eine Handlung. Im einfachsten Fall wird beim Überschreiten eines vorher festgelegten Schwellwerts ein Alarmsignal ausgelöst.

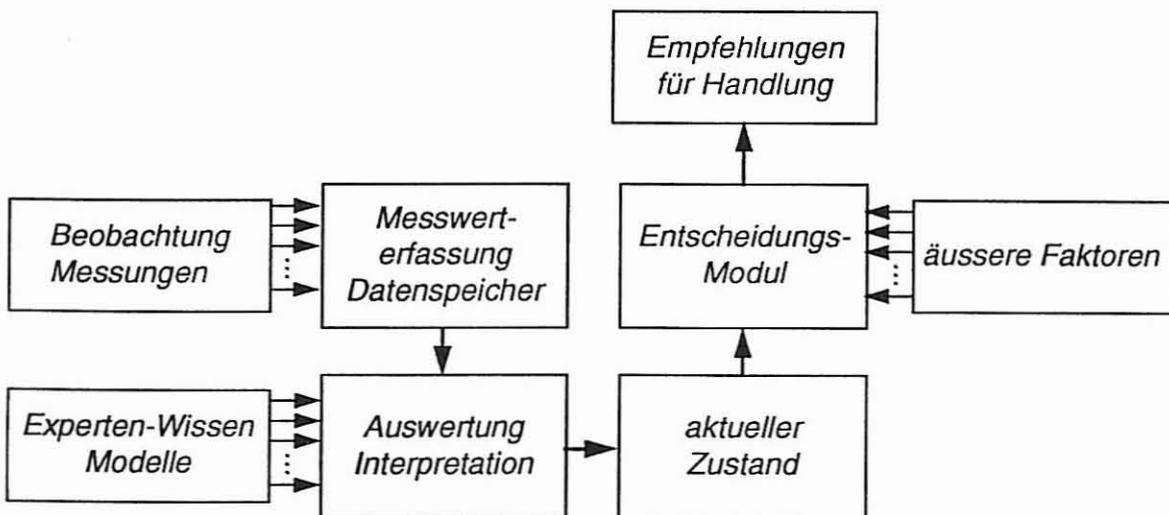


Bild 8: Monitoring-System für die on-line Zustandsüberwachung

Zur Entwicklung und Erprobung von **Diagnose- und Überwachungssystemen für Leistungstransformatoren** läuft z.Z in der Schweiz ein breit abgestütztes Forschungsprojekt, an dem Elektrizitätswerke (Trafobetreiber), Hersteller von Grosstransformatoren (inkl. Zulieferanten), die technischen Hochschulen ETHZ, EPFL und die FKH beteiligt sind. In diesem Projekt werden folgende Ziele verfolgt [20]:

- Systematische Untersuchung des dielektrischen Verhaltens von Öl/Papier-Isolationssystemen als Grundlage für die Entwicklung neuer Diagnosesysteme
- Entwicklung und Erprobung von neuen Vor-Ort-Diagnoseverfahren für die Beurteilung des Isolationszustandes von Grosstransformatoren
- Aufbau und Pilotbetrieb eines On-Line-Monitoring-Systems zur kontinuierlichen Überwachung von Leistungstransformatoren während des Betriebs.

8. Ausblick

Die Beurteilung des Isolationszustandes von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung mit elektrischen und chemisch/physikalischen 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. zur Reduktion von Ausfallzeiten und -kosten liefern, kommt der Entwicklung von neuen, aussagekräftigen Verfahren der Zustandserfassung und -Beurteilung eine grosse Bedeutung zu. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft bei vielen energietechnischen Komponenten die für die Zustandserfassung notwendigen Sensoren in die Konstruktion integriert sein werden; auf dieser Grundlage lassen sich kostengünstige und zuverlässige Diagnoseverfahren und Monitoring-Systeme realisieren.

Bei der Interpretation von Diagnoseresultate spielt die Erfahrung (Expertenwissen) eine wesentliche Rolle. In vielen Fällen ist der Zusammenhang zwischen dem diagnostisch ermittelten Befund und dem aktuellen Alterungszustand eines Isolationssystems äusserst komplex und nicht immer vollständig abgeklärt. Als Basis für eine zuverlässige Beurteilung von Diagnosemessungen sind hier noch mehr systematische Untersuchungen notwendig.

Der zunehmende Einsatz von modernen, computergestützten Diagnoseverfahren und vollautomatisierten Systemen zur Überwachung des Isolationszustandes ist absehbar. Entscheidend für die nächste Generation von "intelligenten" Monitoring-Systemen wird sein, ob es gelingt, die komplexen Alterungsvorgänge und Fehlermechanismen der energietechnischen Betriebsmittel und den vorhandenen, immensen Erfahrungsschatz über die Konstruktion und das Betriebsverhalten von praktischen Isolationssystemen in zuverlässigen Computercode umzusetzen. Zur Erreichung dieses Zieles ist eine sehr intensive Zusammenarbeit zwischen Softwarespezialisten, Experten der Isolationsdiagnose, Herstellern von energietechnischen Komponenten und den Energieversorgungsunternehmen notwendig.

9. Literatur

- [1] ETG-Fachtagung Würzburg 1992: *Isoliersysteme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen*, ETG-Fachbericht Nr. 40, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1992.
- [2] CIGRE-Symposium Berlin 1993: *Diagnostics and Maintenance Techniques*, 1993.
- [3] B.S. Bernstein und E.L. Brancato: *Aging of equipment in the electric utilities*, IEEE Transactions on El. Insulation, Vol. 28, Nr. 5, 1993, S. 866-875.
- [4] CIGRE-Conference Paris 1996: *Progress on high-voltage insulation monitoring systems for in-service power apparatus*, Status Report, Joint Working Group 15/33-08, CIGRE Session 1996, Paper 15/21/33-20.
- [5] FKH-/VSE-Fachtagung Fribourg 1996: *Diagnosemethoden und Überwachungssysteme für Betriebsmittel mit Öl/Papier-Isolation*, VSE-Druckschrift 5.61 d/f, 1996.
- [6] R. Porzel, E. Neudert, M. Sturm: *Diagnostik der Elektrischen Energietechnik*, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1996.
- [7] Ch. Dang, J.-P. Parpal, J.-P. Crine: *Electrical aging of extruded dielectric cables*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 2, 1996, S. 237-247.

- [8] H.-J. Knab: *Die Betriebsüberwachung von Transformatoren*, Bulletin SEV/VSE, Vol. 87, Nr. 21, 1996, S. 41-47.
- [9] R. Bartnikas, R.M. Eichhorn (Eds.): *Engineering Dielectrics, Vol. II A: Electrical properties of solid insulating materials*, ASTM-Publication STP783, Baltimore, 1993.
- [10] Th. Aschwanden: *Vor-Ort-Prüfung von Hochspannungs-Kabelanlagen*, Bulletin SEV/VSE, Vol. 83, Nr. 15, 1993, S. 31-40.
- [11] IEC Publikation 517 (1990): *Gas-insulated metal enclosed switchgear for rated voltages of 72.5-kV and above*.
- [12] IEC Publikation 567 (1992): *Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases*.
IEC Publikation 599 (1978): *Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service*.
- [13] IEC-Publikation 1198 (1993): *Mineral insulating oils - Methods for the determination of 2-fural and related compounds*.
- [14] Th. Heizmann, W. Zaengl: *Vor-Ort-Diagnose von polymerisolierten Mittelspannungskabeln*, Bulletin SEV/VSE, Vol. 85, Nr. 23, 1994, S. 27-37.
- [15] V. Der Houhanessian, W. Zaengl: *Vor-Ort-Diagnose für Leistungstransformatoren*, Bulletin SEV/VSE, Vol. 87, Nr. 23, 1996, S. 19-28.
- [16] D. König, Y. Narayana Rao (Eds.): *Teilentladung in Betriebsmitteln der Energietechnik*, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1993.
- [17] IEC-Publication 270 (1981): *Partial discharge measurements*.
DIN/VDE0434/05.83: *Hochspannungsprüftechnik, Teilentladungsmessungen*, VDE, Berlin und Offenbach, 1993.
- [18] Th. Aschwanden, R. Bräunlich, M. Hässig, *TE-Prüfung an Hochspannungswandlern in Umspannwerken*, ETG-Fachtagung 1994 in Esslingen, ETG-Fachbericht Nr. 56, Berlin und Offenbach, 1994, S. 247-252.
- [19] R. Malewski, E. Gockenbach, R. Maier, K.H. Fellmann, C. Claudi: *Five years of monitoring the impulse test of power transformers with digital recorders and the transfer function method*, CIGRE-Session, Paris, 1992, Beitrag 12-201.
- [20] Projekt und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL): *PSEL-Tätigkeitsbericht 1995*, Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Zürich, 1996.