Anwendungsorientierte TE-Messungen im Prüffeld und vor Ort

Th. Aschwanden
Fachkommission für
Hochspannungsfragen (FKH)
Voltastrasse 9
CH-8044 Zürich

P. Osvàth
TETTEX-Instruments AG
Bernstrasse 90
CH-8953 Dietikon

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von praxisbezogenen Beispielen werden aktuelle Probleme und neue Möglichkeiten der Teilentladungs-Messtechnik vorgestellt. Neben einigen Hinweisen auf Methoden zur Störungsunterdrückung werden vor allem Anwendungen von Teilentladungsmessungen zur Überprüfung von energietechnischen Komponenten und Anlagen erläutert: Transformatoren, Hochspannungs-Messwandler, gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und Generatoren.

1. Einleitung

Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise der gebräuchlichen Prüfkreise und der entsprechenden Mess-Systeme zur Erfassung und Bewertung von Teilentladungen (TE) sind grundsätzlich bekannt (siehe z.B. [1], [2], [3]) und die Anforderungen für die Durchführung von standardmässigen TE-Messungen sind in entsprechenden IEC- bzw. DIN/VDE-Vorschriften [4], [5] definiert. Trotzdem entstehen bei der praktischen Durchführung von Teilentladungsmessungen in Prüflabors und insbesondere bei Messungen "vor Ort" eine Vielfalt von Problemen, zu deren Lösung einschlägige Erfahrung sowohl auf dem Gebiet der Messtechnik als auch auf dem Gebiet der Isolationstechnik und ihrer Anwendungen erforderlich sind.

Die Entwicklung, Anpassung und korrekte Anwendung von TE-Messsystemen zur Lösung von geräte- oder anlagenspezifischen Messproblemen ist eine interessante und anspruchsvolle Ingenieurtätigkeit, welche sich in starkem Masse auch auf die praktische Messerfahrung abstützen muss. Im Interesse einer effizienten und praxisgerechten Weiterentwicklung der TE-Messtechnik ist somit ein intensiver Kontakt zwischen Messgeräte-Hersteller und Anwender von grossem Nutzen.

In diesem Beitrag werden mit ausgewählten Beispielen von anwendungsorientierten TE-Messungen einige aktuelle TE-Messprobleme und deren Lösungsmöglichkeiten diskutiert. Ausführlich behandelt werden die Möglichkeiten der Störbeeinflussung von TE-Prüfkreisen und die entsprechenden Abhilfemassnahmen zur Beherrschung der schwierigen Vor-Ort-Messbedingungen. Der Einsatz dieser Massnahmen wird anhand von Vor-Ort-Teilentladungsmessungen an Hochspannungs-Komponenten und -Anlagen erläutert.

1.1 TE-Messungen im Labor und Prüffeld

Neben den Anwendungen in der Forschung und Entwicklung neuer Isolierstoffe sowie in der Abklärung des Alterungsverhaltens von technischen Isolationssystemen, wird die Teilentladungsmesstechnik in erster Linie zur Qualitätssicherung bei der Fertigung von Hochspannungskomponenten eingesetzt.

Im Prüflabor des Herstellers besteht das primäre Ziel von TE-Messungen darin, die Qualität eines gefertigten Isolations-Systems zu überprüfen. Damit sollen mögliche Produktions- oder Montagefehler spätestens bei der Abnahmeprüfung aufgedeckt werden. Das Resultat dieser oft routinemässig durchgeführten *Qualitätsprüfungen* ist in den meisten Fällen wenig differenziert: (1) der Prüfling ist "TE-frei" (2) die festgestellte TE liegt innerhalb der zulässigen Grenzen oder (3) die TE-Aktivität überschreitet einen vorgegebenen Grenzwert.

In der Prüfpraxis bedeutet "*TE-frei*", dass bei einem vorgegebenen Prüfkreis und bei einer festgelegten Prüfspannung innerhalb der Grenzen der Messempfindlichkeit des eingesetzten TE-Messsystems im Prüfling keine TE-Aktivität feststellbar ist. Wenn bei einem Prüfling Teilentladungen auftreten, werden nach gängiger Laborpraxis als Prüfergebnis meistens nur die grössten, während der Messzeit erfassten, *scheinbaren Ladungen* q_m (Teilentladungsstärke nach [5]) herangezogen und mit einem Grenzwert verglichen. Dieses Vorgehen entspricht den heute gültigen nationalen oder internationalen Prüfvorschriften.

Die *maximal zulässigen TE-Pegel* (scheinbare Ladung) sind in gerätespezifischen Prüfvorschriften unterschiedlich festgelegt. In Spezialfällen werden sie auch individuell zwischen Hersteller und Kunde vor der Prüfung vereinbart.

Es darf aufgrund der heutigen Erkentnisse sicher in Frage gestellt werden, ob das Resultat einer TE-Prüfung, welches sich allein auf den Zahlenwert der gemessenen, maximalen scheinbaren Ladung abstützt, isolationstechnisch relevant ist und ob nicht *andere Teilentladungs-Kenngrössen,* wie z.B. Impulshäufigkeit und Verteilung, Phasenlage, Energie, usw., aussagekräftigere Kriterien für die Qualität eines Isolationssystems darstellen. Diese Frage und andere grundlegende Probleme der TE-Prüftechnik, insbesondere auch im Zusammenhang mit der kürzlich begonnen Überarbeitung der entsprechenden IEC-Prüfvorschriften [6], werden in anderen Beiträgen dieser Tagung behandelt.

1.2 TE-Messungen vor Ort

Die Veranlassung für eine TE-Messung an energietechnischen Apparaten oder Anlagen "vor Ort" kann die Inbetriebnahme einer neuen oder umgebauten Anlage sein oder es sind alterungsbedingte Schadenfälle, welche eine TE-Messung als vorbeugende oder diagnostische Massnahme notwendig erscheinen lassen.

Bei *Inbetriebnahmeprüfungen* wird eine Teilentladungsmessung meist als zusätzliche Diagnosemöglichkeit vor und nach einer Stehspannungsprüfung eingesetzt. Ziel eines solchen Vor-Ort-Prüfverfahrens ist es, die Unversehrtheit einer Hochspannungsanlage (z.B. GIS, Kabel) nach Montage- und Installationsarbeiten zu überprüfen und möglicherweise vorhandene Defekte aufzufinden. In den gerätespezifischen Prüfvorschriften sind Vor-Ort-Teilentladungsmessungen nur in den wenigsten Fällen erwähnt (z.B. IEC-Publ. 517 für GIS); die Prüfspannungen und die zulässigen TE-Pegel müssen deshalb individuell vereinbart bzw. auf die entsprechende Vor-Ort-Situation (Prüfanlagen, Grundstörpegel, erreichbare Messempfindlichkeit) abgestimmt werden.

Bei einer Vor-Ort-Teilentladungsmessung an *betriebsgealterten Hochspannungskomponenten* geht es darum, den Zustand bzw. die Betriebssicherheit des entsprechenden Isolationssystems zu überprüfen. Abgesehen von der wesentlich längeren Ausfallzeit, ist es aus Gründen des Transportaufwands und der damit verbundenen Risiken vor allem bei grösseren Geräten mit Oel-Isolation (Trafos, Messwandler, Kondensatoren) äusserst wünschenswert, solche Diagnoseprüfungen am Aufstellungsort durchführen zu können.

Wird in einem Prüfobjekt bei einer solchen TE-Messung eindeutig eine Teilentladungsaktivität festgestellt, so muss abgeklärt werden, ob dadurch der sichere Betrieb der Komponente oder der entsprechenden Anlage nicht gefährdet ist. Eine einigermassen zuverlässige Abklärung des Alterungszustands von Betriebsmitteln kann aber nicht allein aufgrund der Analyse einer einzigen TE-Messung erfolgen. Vielmehr muss eine solche Beurteilung im Zusammenhang mit anderen wichtigen Informationen erfolgen: TE-Werte an verschiedenen Mess-Stellen (z.B. bei Trafos) und bei unterschiedlichen Spannungsniveaus, genaue Kenntnis des Aufbaus des Isolationssystems und der verwendeten Isolierstoffe, Angaben über die elektrische und thermische Betriebsbeanspruchung (Überspannungen, Überlast), Information über die gerätetypischen oder anlagenspezifischen TE-Defekte usw. Einige dieser Informationen, insbesondere diejenigen über die typischen Defekte und konstruktiven Schwachstellen werden vom Gerätehersteller nicht ohne weiteres herausgegeben. Daher ist in den meisten Fällen eine genaue Abklärung der Betriebssicherheit von TE-behafteten Komponenten oder Anlageteilen nur in Zusammenarbeit mit dem Hersteller möglich.

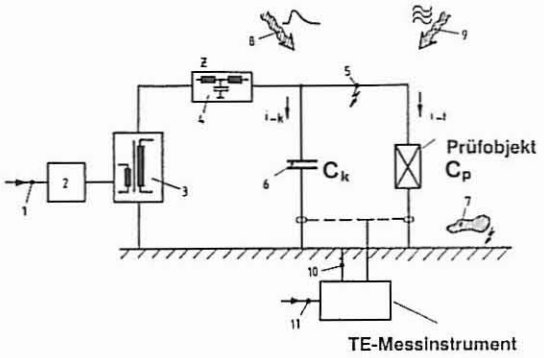
Das Resultat einer solchen Vor-Ort-Diagnose kann zu einer Reparatur im Werk oder zu einer permanenten Überwachung der Teilentladungsaktivität (Monitoring) im Betrieb führen. Obwohl für grössere Betriebsmittel zur Zeit bezüglich Teilentladungen noch kein einheitliches Beurteilungskriterium oder gar eine Regel für die Klassierung von betriebsgealterten Isolationssystemen existiert, bietet die *kontinuierliche Überwachung (Monitoring)* und Trendanalyse der TE-Aktivität von strategisch wichtigen Komponenten des Energieversorgungssystems (Generatoren, Trafos) eine gute Möglichkeit, eine Verschlechterung oder eine gravierende Zustandsänderung im Isolationssystem dieser Betriebsmittel frühzeitig zu erkennen und damit einen unplanmässigen Ausfall zu verhindern. Die zahlreichen Veröffentlichungen in der Fachliteratur zeigen, dass weltweit diesem Problemkreis der Vor-Ort-Diagnose und Überwachung von Isoliersystemen eine grosse Bedeutung zugemessen wird. Eine gute Übersicht der nationalen und internationalen Aktivitäten auf diesem Gebiet ist in [7] und [8] zu finden.

2. Messempfindlichkeit und Störbeeinflussung

Von grundlegender Bedeutung für die Beurteilung der Resultate von Teilentladungsmessungen ist die *Empfindlichkeit* einer spezifischen Messanordnung bezüglich der Detektion von "echten" (inneren) Teilentladungen im Isolationssystem des Prüflings. Quantitativ kann die tatsächlich an einer Fehlerstelle im Isolationssystem umgesetzte Ladung q_s nicht direkt gemessen werden [1]. Die (ideale) scheinbare Ladung q der im Prüfkreis von einer TE verursachten Stromimpulse ist immer kleiner als q_s. Bei ungünstigen Kopplungsverhältnissen ($C_p > C_k$) wird auserdem die *messbare Ladung qm* wesentlich kleiner als die im Messkreis auftretende, ideale scheinbare Ladung q sein. Für eine aussagekräftige TE-Messung muss deshalb, unabhängig von den Prüfvorschriften, grundsätzlich immer die grösstmögliche Detektionsempfindlichkeit gefordert werden.

Neben der inhärenten Empfindlichkeitsgrenze des TE-Messystems, welche durch die Dynamik und Bandbreite der Mess-Signalverstärkung (Verstärkerrauschen) und durch den Prüfkreisaufbau (Ankopplungsverhältnisse) bestimmt wird, sind es vor allem hochfrequente, impulsförmige Störeinflüsse, welche sich galvanisch, induktiv oder kapazitiv in den Prüfkreis einkoppeln und damit die Empfindlichkeit einer Teilentladungsmessung wesentlich herabsetzen können.

Die Reduktion der TE-Messempfindlichkeit durch Störungsbeinflussung spielt nicht nur bei Vor-Ort-Messungen, bei denen naturgemäss ein wesentlich höherer Störsignalpegel zu erwarten ist, eine wichtige Rolle. Die Praxis zeigt, dass auch bei TE-Messaufbauten in abgeschirmten Prüflabors genügend externe und interne Störeinflüsse vorhanden sein können. Die wichtigsten Störquellen, welche in einem TE-Prüfkreis ein Rolle spielen, sind in Figur 1 dargestellt.



Figur 1: *Typische Störquellen in TE-Prüfkreisen (nach [2]).*

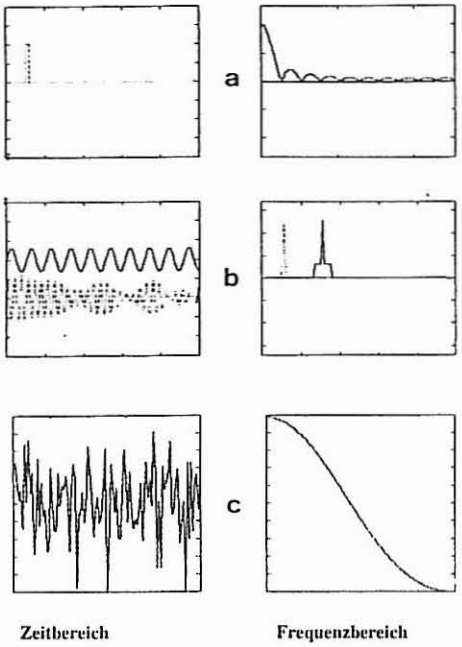
1/11 Netzeinspeisung (netzgebundene Störungen)
2 Spannungssteller oder -Regler (z.B. Gleitkontakte)
3 Prüftransformator (innere oder äussere TE)
4 Hochspannungsfilter (z.B. Unterbruch, Kontaktproblem)
5 Korona an Zuleitungen oder Elektroden
6 Defekt am Kopplungskondensator (z.B. verschmutzte Isolatoroberfläche)
7 nicht geerdete, metallische Gegenstände
8 elektromagnetische Impulse (z.B. el. Schaltvorgänge)
9 harmonische Störungen (z.B. Radio- TV-Sender)
10 Ströme im Erdungssystem

Bei Standard-Prüfkreisen können unter optimalen Laborbedingungen typische *Grundstörpegel* von weniger als 1 Picocoulomb (pC) scheinbarer Ladung erreicht werden. Für Vor-Ort Bedingungen lässt sich kein typischer Wert angeben, da die Verhältnisse stark vom Prüfkreisaufbau und der lokalen Störsituation abhängig sind. Zudem treten für einen bestimmten Standort in den meisten Fällen beträchtliche, tageszeitabhägige Schankungen des Grundstörpegels auf.

Die erreichbare Empfindlichkeit von TE-Messungen und die Aussagekraft eines TE-Befunds hängen letztendlich entscheidend davon ab, ob vom TE-Messingenieur Störbeeinflussungen richtig erkannt, Mängel im Prüfkreisaufbau konsequent beseitigt und geeignete Störunterdrückungsmassnahmen richtig eingesetzt werden.

2.1 Analyse und Klassifizierung von Störsignalen

Der erste Schritt in der Beseitigung von Störquellen ist deren Lokalisierung und Identifikation. Die Beschreibung von Störsignalen kann sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich erfolgen; zur messtechnischen Erfassung können Digital-Oszilloskop und/oder Spektrumanalyser eingesetzt werden. In Figur 2 sind die Verhältnisse für die wichtigsten Störsignalformen zusammengestellt.



Figur 2: *Typische Störsignale im Zeit- und Frequenzbereich*
(a) Impuls-Störung (z.B. Thyristor, Schaltvorgang)
(b) Harmonische Störung (z.B. Radiosender, Netzoberwellen)
(c) Stochastische Störung (z.B. Korona)

Das Frequenzspektrum von Störimpulsen aus dem Bereich der Leistungselektronik (Umrichter, Gleichrichter) hat eine Struktur mit einer sin (f)/f - Envelope. Die harmonischen Störungen weisen nur diskrete Linien im Spektrum auf und die breitbandigen, stochastisch auftretenden Störungen (z.B. Teilentladungen, Korona, schlechte Kontakte) sind durch ein abfallendes Spektrum mit Frequenzanteilen bis in den MHz-Bereich gekennzeichnet.

Durch eine Modifikation des Orginalaufbau des Prüfkreises kann abgeklärt werden, ob Beeinflussungen vorwiegend kapazitiver (E-Feld) oder induktiver Art (B-Feld) verliegen. Zur Ermittlung des magnetfeldbedingten Störpegels wird anstelle des Prüflings ein Leiterstück eingesetzt (induzierte Störspannung); durch Entfernung des Prüflings und kann die Antennenwirkung des Prüfkreisaufbaus und die mit dem elektrischen Störfeld verküpfte Beinflussungsgrösse (influenzierter Störstrom) bestimmt werden.

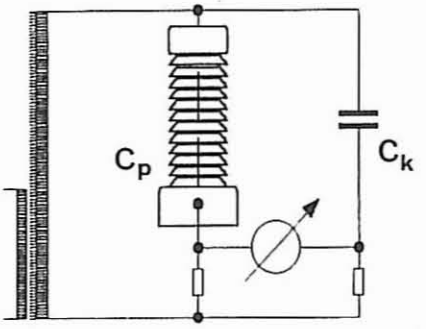
Erst nach einer gründlichen Analyse der Störumgebung, welche bei Vor-Ort Messungen insbesondere auch die lokalen Verhältnisse bezüglich der zu erwartenden Störquellen aus den Frequenzbändern des Kommunikations- und Rundfunkbereichs einbeziehen muss, können die entsprechenden Störunterdrückungsmassnahmen optimal eingesetzt und genutzt werden.

3. Störunterdrückungsmassnahmen

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf ausgewählte Verfahren zur Störunterdrückung, welche einzeln oder auch in Kombination angewendet werden können. Eine Beschriebung von grundlegenden Störunterdrückungsmassnahmen (Filter, Abschirmung) und Hinweise zum korrekten Aufbau von TE-Prüfkreisen sind in z.B. [1] und [3] zu finden.

3.1 Brückenschaltung nach Schering-Kreuger

Die Anwendung einer Schering-Brücke in einem TE-Prüfkreis (balanced circuit) ist ein effektives Mittel, um harmonische und impulsförmige Gleichtakt-Störsignale (Common Mode Störungen) zu unterdrücken [1], [2]. Die Grundschaltung ist in Figur 3 dargestellt.



Figur 3: *Schematische Darstellung einer Brückenschaltung für TE-Messungen mit Prüfling C_p und Kopplungskapazität C_k.*

In den TE-Messkreis können Störsignale sowohl durch das elektrische als auch durch das magnetische Feld eingekoppelt werden. Bei der *kapazitiven* Einkopplung (E-Feld) wird bei einer Brückenschaltung in beiden Brücken-Zweigen (Prüfling und Kopplungskapazität) ein Strom gleicher Richtung erzeugt (Gleichtaktsignal). Wird die Schering-Messbrücke impedanzmässig in Betrag und Phase abgeglichen, können diese gleichsinnigen Zweigströme in der Brückendiagnonale kein Messignal hervorrufen, d.h. Gleichtaktsignale werden durch Subtraktion in der Brückenschaltung unterdrückt.

Eine innere Teilentladung im Prüfling ruft dagegen einen Ausgleichstrom zwischen der C_k und C_p hervor, welcher im Messaufbau als *Kreisstrom* fliesst. Dieser Kreisstrom muss somit in einem Zweig (z.B. Kopplungskapazität) positiv und in anderem Zweig (z.B. Prüflingskapazität) negativ sein. Dadurch wird in der Brückendiagonale ein leicht detektierbares Mess-Signal auftreten. Der *Nachteil* dieser Methode besteht darin, dass im Messkreisaufbau auch durch ein äusseres Magnetfeld (harmonisch oder impulshaft) ein Kreisstrom erzeugt werden kann. Dies bedeutet, dass induktiv eingekoppelte Störsignale nicht unterdrückt werden können.

Durch das Kurzschliessen eines Zweiges an der Scheringbrücke kann die Wirksamkeit der Störsignalunterdrückung nachgewiesen werden; der Messkreis entspricht in diesem Fall dem klassischen TE-Messkreis mit nur einer Ankopplungsimpedanz (Fig. 1, straight detection). In der Praxis erreicht man mit einer hochfrequenzmässig optimierten Scheringbrücke unter idealen Bedingungen (symmetrischer Aufbau der Brückenzweige, optimaler Abgleich) eine Störunterdrückung für kapazitiv eingekoppelte Common-Mode Störungen von ca. 30 bis 50 dB.

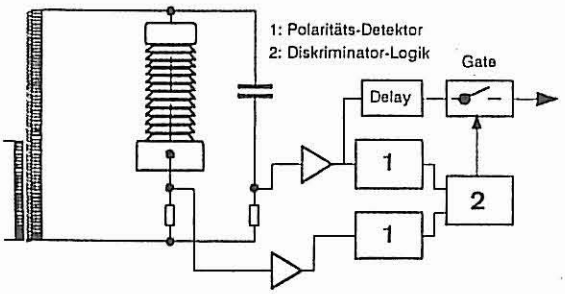
Die Anwendung der Brückenmethode zur Störunterdrückung bei TE-Messungen ist nur unter folgenden Bedingungen erfolgreich: (1) die externen magnetischen Störfelder sind gering, d.h. die induzierten Störströme im TE-Prüfkreis sind vernachlässigbar klein (kleine Schlaufe), (2) die beiden in die Brücken-Zweige geschalteten Objekte verhalten sich impedanzmässig über einen grossen Frequenzbereich annähernd gleich.

Bei der Vor-Ort Prüfung von Hochspannungsapparaten in Freiluftschaltanlagen besteht durch die 3-phasige Anordnung in den meisten Fällen die Möglichkeit, mit den Komponenten von zwei benachbarten Phasen identische Brückenzweige aufzubauen. Hier hat sich die Brückenmethode als sehr effektive Lösung herausgestellt, sowohl aus der Sicht der Störunterdrückung, als auch unter dem Aspekt einer rationellen Abwicklung einer TE-Prüfung, indem zwei Geräte gleichzeitig geprüft werden können.

3.2 Impulsdiskriminator-Methode

Sind in einem TE-Messkreis vorwiegend impulsförmige Störungen vorhanden, so kann eine elektronische Logikschaltung eingesetzt werden, um TE-Impulse von Störimpulsen zu diskriminieren [9]. Dieses in Figur 4 schematisch dargestellte Impulsdiskriminatorsystem kann theoretisch als eine *"1 Bit"-Brückenschaltung* angesehen werden, da nur die Vorzeichen (positiv, negativ) der von den Brückenzweigen (Prüfling, Koppelkondensator) gleichzeitig ankommenden Signale, nicht aber deren Amplitude ausgewertet werden.

Besitzen beide Signale gleiche Polarität (Gleichtaktsignale), wird der Signalpfad unterbrochen, indem ein elektronischer Schalter (Gate) durch die Diskriminator-Logik geöffnet wird. Im Falle einer TE im Isolationssystem des Prüfobjekts wird in den beiden Brückenzweigen ein Stromimpuls mit *unterschiedlicher Polarität* erzeugt (Kreisstrom), d.h. das Gate ist geschlossen und das ankommende Signal wird verstärkt und weiterverarbeitet.

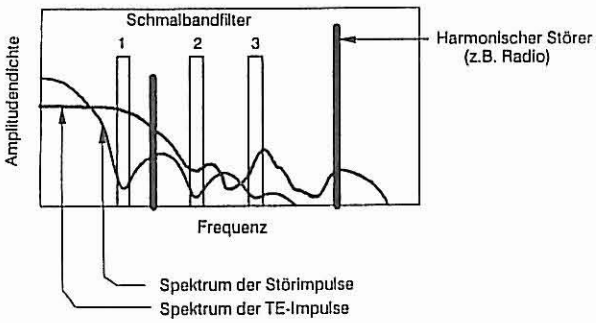


Figur 4: *TE-Impulsdiskriminator-Schaltung*

Die bei der Brückenschaltung gemachte *Einschränkung* bezüglich der Unterdrückung von induktiv eingekoppelten Störimpulsen (B-Felder) gilt auch bei dieser Methode. Auch kontinuierliche, harmonische Störungen lassen sich nicht unterdrücken. Es ist zu beachten, dass die Gleichtaktunterdrückung nur bei Mess-Signalen mit eindeutig erkennbarer Polarität funktionieren kann, was breitbandige Kopplungsimpedanzen und Signalverstärkung voraussetzt. Damit ist ein Einsatz der Impulsdiskriminator-Methode vor allem auf Prüflinge mit kompaktem Isolationsaufbau beschränkt, da bei sehr grossen Prüfobjekten (z.B. bei Grosstransformatoren) die TE-Ströme einen mehr oder weniger stark bipolar schwingenden Verlauf haben können und dadurch die TE-Impulse nicht zuverlässig erkannt werden.

3.3 Anwendung von selektiven Filtern

Eine sehr wirksame und universelle Methode zur Störsignalunterdrückung ist die Anwendung von selektiven, d.h. *durchstimmbaren Bandpassfiltern*. Bei vielen TE-Messgeräten bilden schmalbandige Filterverstärker einen integralen Bestandteil des Messsystems [2]. Für spezielle Anwendungen (z.B. bei Messungen vor Ort) können z.B. auch Spektrumanalysatoren als selektive Filter eingesetzt werden.



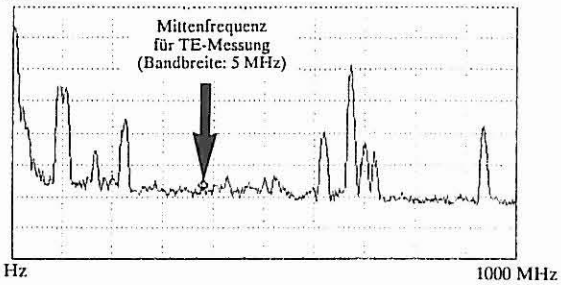
Figur 5: *Einsatz selektiver Filter bei einer TE-Messung*

Mit durchstimmbaren Filtern können vor allem dort Störungen effektiv unterdrückt werden, wo sich die Amplitudendichte im Frequenzspektrum des TE-Signals und die dominanten Frequenzen des Störspektrums überlappen. Wenn man die Störumgebung genauer analysiert, kann fast immer eine "Lücke" im Spektrum gefunden werden, in dem der Frequenzanteil der Störsignale ein Minimum aufweist und bei dem das Spektrum des TE-Signals immer noch eine konstante Amplitudendichte besitzt.

Die Bandbreite von selektiven Filtern beträgt bei TE-Messsystemen typischerweise 9 kHz (- 6 dB). Zur Verbesserung der Messempfindlichkeit können in Situationen, wo die Selektivität nicht kritisch ist, auch wesentlich grössere Filterbandbreiten eingesetzt werden. Um *Integrationsfehler* bei der Ermittlung der scheinbaren Ladung nach dem Prinzip der Quasi-Integration gering zu halten, müssen aber bei selektiven Filtern in TE-Messsystemen gewisse Bedingungen bezüglich der Grenzfrequenzen des Durchlassbereichs bzw. der Bandpass-Mittenfrequenz eingehalten werden [1], [10].

Eine schematische Darstellung einer *typischen Störungsumgebung* in der sowohl harmonische als auch impulsförmige Störquellen auftreten, ist in Figur 5 wiedergegeben. Vom Schmalbandfilter "1" werden alle vorhanden Störquellen unterdrückt; das vom Filter durchgelassene, TE-proportionale Signal hingegen lässt sich mit guter Empfindlichkeit detektieren. Hinsichtlich der zu erwartenden Fehler bei der Quasi-Integration wäre die Wahl der Mittenfrequenzen der Filter "2" und "3" ungünstig (TE-Spektrum stark abgefallen).

In Figur 6 ist die Anwendung eines selektiven Filters (Spektrum-Analysator) bei einer Vor-Ort TE-Messung an einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) dargestellt. Bei der Auskopplung des TE-Mess-Signals mit einer kapazitiven Mess-Sonde, welche in die GIS eingebaut ist, kann die Störumgebung bis zu sehr hohen Frequenzen (1 GHz) analysiert werden. Oberhalb von 100 MHz sind vor allem die Störungen von nahgelegenen Fernseh- und Kommunikationsender dominant. Für die TE-Messung wurde das Durchlassband (3dB-Bandbreite: 5 MHz) des Spektrumanalysators auf die grosse "Lücke" im Bereich von 400 MHz gesetzt.



Figur 6: *Frequenzspektrum der Störumgebung bei einer Vor-Ort-TE-Messung an einer 110-kV GIS mit montierter Prüfdurchführung und angeschlossenem Messkreis.*

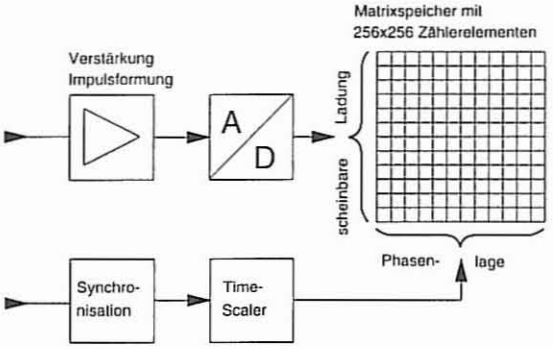
Auskopplung des Messsignals durch eingebaute E-Feldsonden (UHF-Bereich). Spektrumanalysator im Peak-Accumulation Mode. 200MHz/Div, 10 dB/Div, Referenzlevel am oberem Bildrand: -40 dBm.

3.4 Digitale TE-Impulsverarbeitungssysteme

Ein computergestütztes Impulsverarbeitungssystem, welches das Auftreten von TE-Impulsen bezüglich der Phasenlage der angelegten Prüfpannung statistisch auswertet, wurde von [12] vorgestellt. Dieses PRPDA-System[1], welches für hohen Datendurchsatz konzipiert ist (Totzeit pro Periode ca. 50 µs), digitalisiert und speichert sämtliche Teilentladungsereignisse, die während einer definierten Messzeit (typisch 1...10 min) auftreten. Im Verlauf einer solchen Messung wird die Häufigkeitsverteilung der erfassten TE-Ereignisse mit der Phasenlage der Prüfspannung korreliert und das Ergebnis auf einem Bildschirm sichtbar gemacht.

1 PRPDA: Phase Resolved Partial Discharge Analyzer

In Figur 7 ist das *Prinzip des PRPDA-Systems* dargestellt. Das Kernstück besteht aus einem schnellen A/D-Wandler und einer Speichermatrix (RAM) mit 256 x 256 Elementen. Zu Beginn jeder Messung werden sämtliche Matrixelemente auf "Null" gesetzt. Jedes einzelne TE-Ereignis erhöht ein bestimmtes Matrixelement um den Wert "Eins". Die Matrix-Zeile, in welcher sich das inkrementierte Zählerelement befindet, wird durch die Amplitude des TE-Impulses (scheinbare Ladung) bestimmt; die Kolonne des betreffenden Matrixelements wird aus der Phasenlage bezüglich der Prüfwechselspannung ermittelt.



Figur 7: *Schematische Darstellung eines digitalen TE-Impulsverarbeitungsystems (PRPDA-System).*

Durch die Verwendung einer *nicht-netzfrequenten Prüfspannungsquelle* zusammen mit einem PRPDA-System kann bei TE-Messungen in Freiluft-Schaltanlagen eine sehr wirkungsvolle Diskriminierung von 50-Hz Koronastörungen und anderen netzsynchronen Störquellen gegenüber TE-Signalen erreicht werden. Nicht-netzfrequente Prüfspannungen lassen sich vor Ort z.B. mit Serieresonanzanlagen erzeugen [11].

Weicht bei einer TE-Prüfung die Frequenz der Prüfspannung von der Netzfrequenz (50/60 Hz) ab, so fallen bei einer statistischen Auswertung aller vom TE-Messystem detektierten Impulse die netzsynchronen Störungen als Ereignisse ohne Phasenbezug zur Prüfspannung an. Die während einer längeren Messzeit erfassten, mit der Prüfspannung korrelierten TE-Impulse heben sich von diesem Störhintergrund deutlich ab. Unter gewissen Bedingungen ist hiermit eine aussagekräftige TE-Messung selbst dann noch möglich, wenn der Grundstörpegel den Teilentladungspegel übersteigt.

Andere digitale Signalverarbeitungsverfahren zur Unterdrückung von sinusförmigen und phasenstarren Störern (z.B. [13]) basieren auf schnellen *Signalprozessoren, digitalen Filtern oder entsprechenden Algorithmen* (z.B. FFT).

4. Anwendungsbeispiele aus der Praxis

4.1 TE-Messungen an Transformatoren

Die Anforderungen und Bedingungen für die elektrische TE-Messungen an Transformatoren bei *Werks- und Abnahmeprüfungen* sind in entsprechenden Normen festgelegt (IEC Publ. 76-3 sowie [4],[5]). Die Probleme der Messemfindlichkeit und der TE-Fehlerstellenortung, welche insbesondere bei der Prüfung von Grosstransformatoren auftreten können, sind durch eine gute Laborabschirmung und Filterung der Einspeisequellen sowie durch die gleichzeitige Erfassung und Auswertung der TE-Signale an mehreren Messstellen und durch die Anwendung von akustischen Ortungsverfahren grundsätzlich lösbar (siehe z.B. in [3]).

Bei *TE-Diagnosemessungen* an Transformatoren in Umspannwerken können wegen den hohen Grundstörpegeln die im Labor erzielbaren Messempfindlichkeiten nicht erreicht werden. Vielfach ist aber bei solchen Messungen aufgrund der verschiedenen Zielsetzung eine Messempfindlichkeit von ca. 100 pC ausreichend. Eine umfassende Übersicht über die vielfältigen Probleme und deren Lösungsmöglichkeiten bei der elektrischen und akustischen Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren vor Ort ist in [14] zu finden.

4.1.1 TE-Messungen im Prüffeld, Systemlösungen

Im Prüffeld werden bei Leistungstransformatoren TE-Messungen üblicherweise an allen drei Phasen gleichzeitig durchgeführt (3-phasige Selbsterregung). Zur TE-Signalauskopplung werden die drei Hochspannungsdurchführungen des Transformators und in vielen Fällen auch die Niederspannungsdurchführungen und der Sternpunkt mit *Messimpedanzen* ausgerüstet. Die speziell für Trafodurchführungen mit Messabgriff entwickelte Messimpedanz (TETTEX Typ 9238) koppelt die hochfrequenten TE-Impulse aus. Zusammen mit einem Signal, welches der Prüfspannung an der Messstelle proportional ist, wird das TE-Signal über ein gemeinsames 50-Ω Messkabel zu einem Multiplexer (Messstellen-Umschalter) und von dort zum TE-Messgerät geführt.

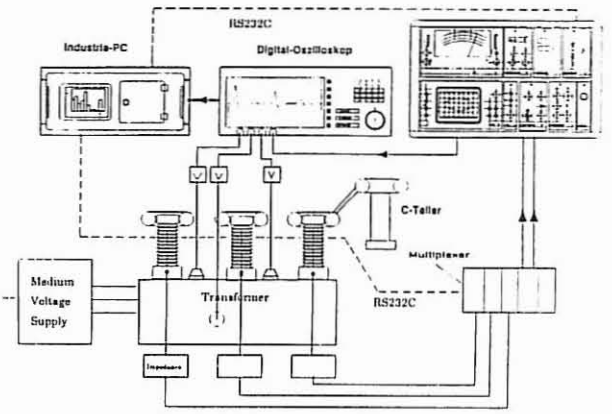
Für Trafoprüfungen in einem gut geschirmten Labor wird normalerweise ein breitbandiges TE-Messgerät eingesetzt, d.h. der Durchlassbereich des Bandpass-Verstärkers reicht von ca. 20 kHz bis 200 kHz. In einem Prüffeld mit stärker gestörter Umgebung kann zur Unterdrückung von harmonischen Störquellen (Rundfunksender) als Alternative auch ein durchstimmbarer Schmalband-Verstärker (Typ ASR) verwendet werden [15].

Das TE-Messsystem TETTEX Typ 9120 mit den fernsteuerbaren Bandpass-Verstärkern (AKR, ASR) und mit dem programmierbaren Multiplexer als Messstellenumschalter bietet die Möglichkeit, für Trafoprüffelder *Systemlösungen* zu realisieren. Beim Beispiel, welches in Fig. 6 dargestellt ist, wird der gesamte Messablauf von einem Industrie-PC via RS 232-Interface gesteuert. Ein entsprechendes Computerprogramm steuert folgende Abläufe:

(1) *Automatische Suche der optimalen Bandpass-Mittenfrequenz* mit dem besten Signal/Störverhältnis.

(2) *Kalibrierung der Mess-Stellen*: der Kalibrierimpuls wird nur an einer Messstelle eingespeist. Die Messempfindlichkeiten der anderen Mess-Stellen werden aus dem Verhältnis der an der Referenz-Messstelle eingespeisten Ladung zur gemessenen Ladung der einzelnen Mess-Stellen als Skalierungsfaktoren berechnet und und gespeichert.

(3) *TE-Messung:* die Spannungssteigerung kann sowohl manuell als auch ferngesteuert durchgeführt werden. Bei der gewünschten Prüfspannung werden alle Messstellen via Multiplexer abgefragt, die jeweiligen TE-Pegel gemessen, mit dem Skalierungsfaktor korrigiert und abgespeichert. Falls im Prüfablauf auch akustische Detektoren eingesetzt werden, können diese Messstellen ebenfalls abgefragt werden. Die bei der TE-Messung anstehende Prüfspannung wird automatisch gemessen und der entsprechende Messwert wird abgespeichert. Während des Messablaufs können die TE-Werte (scheinbare Ladungen) in Abhängigkeit der Prüfspannung aufgezeichnet werden. Am Ende einer TE-Prüfung werden alle gespeicherten Messdaten in der Form eines Protokolls ausgedruckt.



Figur 6: *Teilentladungs-Messsystem für die Prüfung von Leistungstransformatoren*

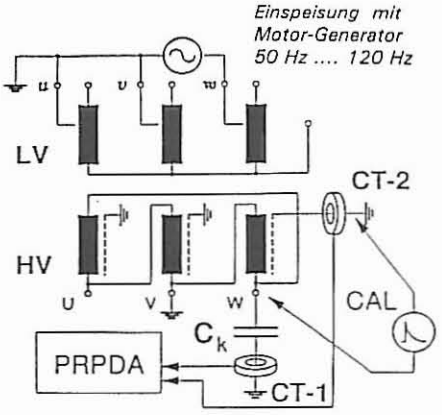
4.1.1 TE-Messungen an Transformatoren vor Ort

Grundsätzlich kann bei Vor-Ort-Teilentladungsmessungen der zu prüfende Transformator *selbsterregt* werden, d.h. die Einspeisung erfolgt auf der Unterspannungsseite des Prüflings (induzierte Spannungsprüfung). Die Selbsterregung bietet bei Vor-Ort Messungen vor allem dann *Vorteile*, wenn die Einspeisespannung innerhalb bestimmter Grenzen in Amplitude und Frequenz einstellbar ist: (1) Entkopplung des Prüfkreises vom 50-Hz-Netz, (2) bei erhöhter Frequenz (z.B. 150 Hz) kann eine höhere Prüfspannung (z.B. 1.5 U_0) erzeugt werden, ohne dass der Kern in die Sättigung geht, (3) durch die Wahl einer nicht-netzsynchronen Prüfspannung können die von benachbarten, in Betrieb stehenden Anlageteilen verursachten Störsignale (z.B. Korona) besser von objektspezifischen TE-Signalen unterschieden werden, (4) die TE-Aktivität kann in Abhängigkeit von der Prüfspannungsamplitude systematisch untersucht werden, was für die Beurteilung eines TE-Befunds von Bedeutung sein kann.

Bei der TE-Prüfung vor Ort lässt sich diese Art der Erregung bei kleineren Einheiten (bis ca. 5 MVA), insbesondere bei Transformatoren des Verteilnetzes noch mit relativ kleinem Aufwand realisieren (z.B. Motor-Generator Aggregat). Für TE-Messungen an Grosstransformatoren (> 100 MVA) stehen aber wegen des grossen Leistungsbedarfs geeignete mobile Einspeisequellen nur sehr selten zur Verfügung. Die Prüfbeanspruchung wird hier meistens durch die anstehende Netzspannung erzeugt (Trafo im Leerlauf). Die als Alternative vorgeschlagene Serie-Resonanzeinspeisung [15] für die Vor-Ort-Prüfung von Leistungstransformatoren ist in der Praxis noch nicht ausreichend erprobt.

Bei TE-Messungen an Transformatoren vor Ort haben sich zur Auskopplung der TE-Signale breitbandige *Rogowski-Spulen* als sehr vorteilhaft erwiesen [14]. Die induktive Ankopplung ist hinsichtlich der Störempfindlichkeit vor allem deshalb überlegen, weil der TE-Messkreis vom Erdungssystem galvanisch getrennt ist (keine Erdschleifen) und dadurch die vom Erdungsystem verursachten Störungen stark abgeschwächt werden. Bei Transformatoren kann diese induktive Ankopplung an den Hochspannungsdurchführungen, an einem externen Kopplungskondensator oder auch im Sternpunkt erfolgen.

Ein in der Praxis erprobter Prüfkreis zur Durchführung von TE-Messungen an Transformatoren mit *1-phasiger Erregung* mittels einer mobilen Motor-Generator-Einspeisequelle mit einstellbarer Frequenz ist in Figur 7 dargestellt. Mit dieser Schaltung wurden mehrere giessharzisolierte Trockentransformatoren (0.4/16-kV bis 1.5 MVA) untersucht. Mit einem Kopplungskondensator C_K von 1.5 nF und mit dem zur Signalauskopplung benutzten Rogowski-Wandler (CT-1, 2.5V/A) lag die Messempfindlichkeit für q_m bei ca. 10 pC.



Figur 7: *Mess-Schaltung für Vor-Ort Teilentladungsmessung an Transformatoren.*

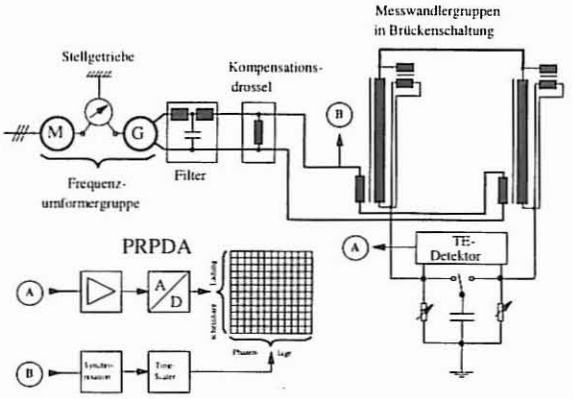
Auskopplung des TE-Signals mit Rogowski-Spulen (CT1 und CT2). PRPDA: digitales TE-Impulsverarbeitungssystem.

4.2 TE-Messung an Messwandlern vor Ort

Die Durchführbarkeit von Teilentladungsmessungen an induktiven Spannungswandlern und an Kombiwandlern (Strom- und Spannungswandler) in Unterwerken des Hochspannungsnetzes wurde bereits vor einiger Zeit nachgewiesen [16], [17], [18]. Im Rahmen eines von den Schweizerischen Überlandwerken finanzierten Projektes wurde von der FKH ein feldtaugliches, standardisiertes TE-Prüfverfahren für Hochspannungsmesswandler mit Oel-Papierisolation entwickelt. Diese TE-Prüfung ist Bestandteil eines mehrstufigen Diagnoseverfahrens [19] und dient als Entscheidungshilfe bei der Ausserbetriebsetzung von stark gealterten, schadhaften Messwandlern des Hochspannungsnetzes (U_n > 100-kV).

4.2.1 Mobile Prüfeinrichtung

Die von der FKH realisierte Prüfeinrichtung besteht aus folgenden *funktionellen Hauptbestandteilen*: Frequenzvariable Einspeisequelle, Filter und Kompensationsdrossel, Brückendetektor mit Bandpassfilter-Verstärker, digitales Impulsverarbeitungssystem PRPDA. Sämtliche Komponenten finden in einem mittelgrossen Lieferwagen Platz, so dass die Einrichtungszeit minimal ist und die Prüfanlage als ganzes innerhalb des Unterwerks leicht transportiert werden kann. Für die Teilentladungsmessung werden jeweils zwei induktive Messwandler hochspannungsseitig miteinander verbunden und gemeinsam in einer *Brückenschaltung* geprüft. Die Wandler müssen dazu vom Netz getrennt werden, bleiben aber an ihren Austellungsorten stehen. Die Prüfspannung wird durch *unterspannungsseite Erregung* der Spannungswandler erzeugt. Mit der bestehenden Prüfeinrichtung können im Mittel sechs Messgruppen pro Tag geprüft werden. Die Mess-Schaltung ist in Figur 8 dargestellt.



Figur 8: *Schaltung für TE-Prüfung an Messwandlern*

Im Bestreben, möglichst kleine Ströme in den Sekundärwicklungen der Spannungswandler zu erreichen, wird eine *frequenzvariable Speisespannung* mit einer Motor-Generatorgruppe (10 kVA, 45...140 Hz) eingesetzt. Die zur Sekundärrerregung von Hochspannungswandlern notwendigen Ströme liegen zwischen 10 und 60 A und stellen im wesentlichen die transformierten Ladeströme für die Kapazität der Hochspannungswicklung dar. Um die Speisequelle zu entlasten, werden die kapazitiven Ströme mit einer umschaltbaren Eisenkerndrossel: 15/50 mH, 30 kVAr kompensiert.

Trotz der galvanischen Trennung vom Niederspannungsnetz wurden zusätzlich speziell ausgelegte Netzfilter zwischen Speisequelle (Synchrongenerator) und Wandler eingebaut. Diese sind räumlich getrennt sowohl in der Motor-Generatorgruppe als auch in der Kompensationsdrossel untergebracht. Um die Einkopplung von hochfrequenten Störungen zu verhindern wurden ausserdem die Einspeiseverbindungen Generator-Prüfling sowie die Messleitungen mit einer doppelten Abschirmung versehen, welche beidseitig geerdet ist.

Durch die konsequente Anwendung der beschriebenen Störunterdrückungsmassnahmen kann eine *Messempfindlichkeit* erreicht werden, welche es erlaubt, die bei Abnahmeprüfungen im Werk maximal zulässigen, scheinbaren Ladungen von 5 pC bzw. 10 pC auch vor Ort nachzuweisen. Bei den durchgeführten Messkampagnen in 150-kV und 220-kV Anlagen lag die typische Messempfindlichkeit im Bereich von 1 bis 2 pC. Diese tiefen, sonst nur unter Laborbedingungen erreichbaren Werte sind vor allem auf den kombinierten Einsatz eines Brückendetektors mit selektiven Bandpass-Filterverstärkern sowie auf die Verwendung des PRPDA-Systems zurückzuführen. Eine nicht unwesentliche Rolle bei der Diskriminierung gegenüber den in Hochspannungsanlagen üblichen, impulshaften Störeren spielt die von 50 Hz abweichende Frequenz der Prüfspannung.

4.2.2 Messverfahren

In Absprache mit der zuständigen Fachkommission 38 (Messwandler) des CES wurde bei den bisher in der Schweiz durchgeführten Messkampagnen folgender *Prüfablauf* konsequent eingehalten:

1. Teilentladungsmessung bei U_0	Messzeit: 1 Minute
2. Beanspruchung mit $1.2 \cdot U_0$	Dauer: 5 Minuten
3. Teilentladungsmessung bei U_0	Messzeit: 1 Minute

Während diesem Prüfablauf werden die zu prüfenden Wandler mit einer temporären Überspannung beansprucht, wie sie grundsätzlich auch im Betrieb möglich wäre. Neben den gemessenen scheinbaren Ladungen sind bei diesem Verfahren vor allem *Veränderungen* in der statistisch ausgewerteten TE-Information zwischen der Messung vor und nach der 5-minütigen Überbeanspruchung von ausschlaggebender Bedeutung. Ein Ansteigen der Teilentladungsaktivität (Anzahl Impulse pro Periode, Phasenlage) oder das Auftreten einer neuen TE-Störstelle bei der zweiten Teilentladungsmessung weist in den meisten Fällen auf eine fortschreitende Isolationsschädigung hin.

Während der Messzeit von einer Minute werden alle detektierten Teilentladungsimpulse erfasst und im PRPDA-System abgespeichert. Das Ergebnis einer Prüfung kann sofort auf dem Bildschirm visuell begutachtet und anschliessend zur *Dokumentation* als phasenaufgelöstes Impulshäufigkeits-Diagramm ausgedruckt werden. Die digital abgespeicherte Information über die Teilentladungsaktivität eines Messwandlers kann zur weiteren statistischen Auswertung verwendet werden oder sie steht bei einer periodischen Überprüfung des Wandlers bei der nächsten Messung zum direkten Vergleich (Trendanalyse) zur Verfügung.

4.3 TE-Mesungen an SF_6-isolierten Schaltanlagen vor Ort

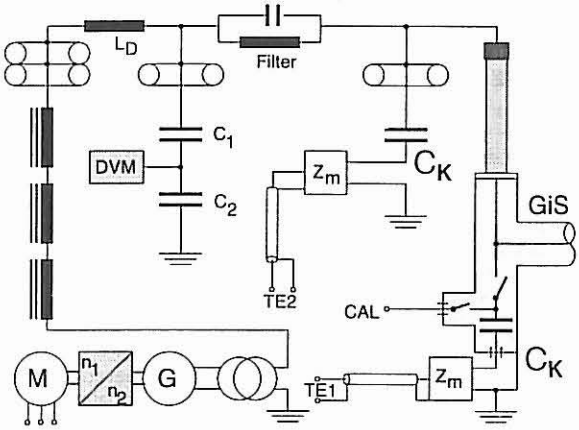
Die selektivsten Verfahren für den Nachweis der Isolationsfestigkeit einer gasisolierten Schaltanlagen (GIS) sind die Stehspannungsprüfung mit Wechselspannung oder die Beanspruchung der GIS mit Blitzstoss-Spannungen mit Anstiegszeiten von wenigen µs. Beide Prüfmethoden sind nicht vollständig zerstörungsfrei, d.h. eine Fehlerstelle kann nur durch ein Versagen des Isolationssystems in der Form eines Durchschlags detektiert werden. Es ist ausserdem bekannt, dass beide Prüfverfahren nur einen Teil aller möglichen Fehlerursachen abdecken können (siehe z.B. [8], [20]).

Wenn bei Vor-Ort-Prüfungen von SF_6-isolierten Anlagen mit Wechselspannung eine ausreichend empfindliche Teilentladungsmessung zur Verfügung steht, kann auf eine Prüfung mit Stoss-Spannung verzichtet werden, da auch die bei der Blitzstoss-Prüfung erkennbaren Fehler durch eine TE-Messung detektiert werden können [20]. Es werden hier nachfolgend zwei TE-Messanordnungen kurz beschrieben, welche heute zur Detektion von Fehlerstellen in GIS-Anlagen eingesetzt werden können. Die Hauptunterschiede der beiden Anordnungen liegen in der Auskopplung der hochfrequenten TE-Signale und in der unterschiedlichen Signalverarbeitung. Die Erzeugung der Prüfwechselspannung erfolgt in beiden Fällen mit mobilen Serieresonanz-Anlagen variabler Frequenz [11].

4.3.1 Konventionell aufgebaute Messanordnung

Mit einem konventionellen TE-Messsystem, d.h. mit Kopplungskondensator C_K, Messimpedanz Z_m und Bandpass-Filterverstärker zur Quasi-Integration kann unter Ausnutzung der Abschirmwirkung der GIS-Kapselung eine ausreichende Messempfindlichkeit erreicht werden, wenn auch der Kopplungskondensator gekapselt ausgeführt ist. Eine entsprechende Messanordnung für eine integrale TE-Prüfung von GIS-Anlagen (inkl. Spannungswandler) mit Serieresonanz-Einspeisung ist in Fig. 9 dargestellt. Dieser Messaufbau mit angeflanschter Prüfdurchführung kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn bei einer Anlage nur Kabelanschlüsse vorhanden sind.

Bei der Kalibrierung wird ein Ladungsimpuls q_0 über einen eingelegten, von der Kapselung isolierten Erder auf den Innenleiter der GIS geschickt. Die erreichbaren Detektionsempfindlichkeiten liegen bei 2 bis 5 pC. Mit einer ausserhalb der GIS befindlichen Kopplungskapazität kann bei Bedarf die äussere TE-Aktivität überwacht werden. Diese gleiche Komponente dient bei kleiner Prüflingskapazität (z.B. Prüfung einzelner Felder) auch als Belastungskapazität, um eine obere Grenze der Prüffrequenz einzuhalten.

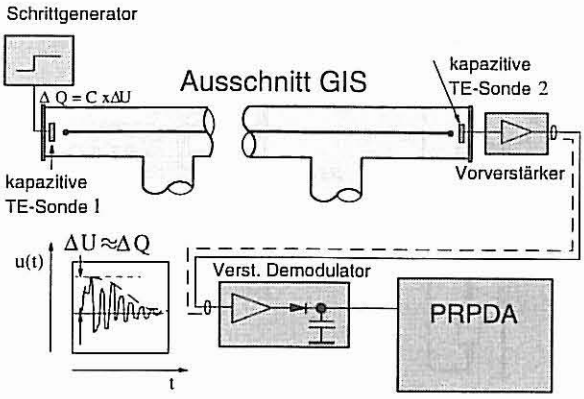


Figur 9: *Messaufbau für TE-Prüfung an GIS*

Prüfspannungserzeugung mit Serieresonanz-Prüfanlage bestehend aus Induktivitäten (3 in Serie, je 50 H) und Einspeisung aus Frequenz-Umformergruppe (10-kVA, 50...140 Hz).

4.3.2 TE-Messung mit UHF-Feldsonden

Das Detektionsprinzip, welches schon seit einiger Zeit bekannt ist [21], [22], beruht auf der Auskopplung der durch Teilentladungen verursachten, elektromagnetischen Wellen im UHF-Bereich (100 MHz bis ca. 2 GHz). In diesem Frequenzbereich wirkt eine SF_6-Anlage als koaxialer Wellenleiter und überträgt neben der Grundwelle (TEM) des anregenden TE-Impulses auch höhere Wellen-Moden, welche sich im innerhalb der GIS ausbreiten und von kapazitiven Sonden (Antennen) aufgefangen werden. Solche UHF-Feldsonden müssen an geeigneter Stelle in der GIS eingebaut sein.



Figur 10: *TE-Messsystem für GIS mit UHF-Feldsonden*

In der in Figur 10 dargestellten Messanordnung wird das oszillierende Messsignal direkt an der TE-Sonde breitbandig verstärkt und anschliessend demoduliert. Die Signalauswertung erfolgt in einem digitalen Impulsverarbeitungssystem (PRPDA-System). Zur Kalibrierung sind mindestens zwei Sonden pro Phase notwendig: an der Sonde 1 wird mit einem Schrittgenerator eine Ladung bekannter Grösse eingespeist und an Sonde 2 wird das empfangene Signal detektiert. Genaugenommen gilt diese Kalibrierung nur für den jeweiligen Ort der Einspeisung, bzw. der Messignalauskopplung. Abgesehen von lokalen Resonanzeffekten, sind aufgrund der sehr kleinen Dämpfung in der GIS (ca. 2 dB/km bei 1 GHz) bei geänderter Sondenposition keine allzu grossen Unterschiede bei der Kalibrierung zu erwarten.

Durch das Hochpassverhalten einer richtig dimensionierten UHF-Sonde werden nur Frequenzen ab ca. 100 MHz übertragen. Man erreicht damit zusammen mit der HF-Demodulation und der digitalen Impulsverarbeitung eine sehr hohe Detektionsempfindlichkeit, die es ermöglicht, auch SF_6-Anlagen des Höchstspannungsbereichs mit Freiluftdurchführungen bei ausreichender Messepfindlichkeit zu prüfen. Falls starke Störquellen im UHF-Band vorhanden sind, kann ein selektives Filter (z.B. Spektrumanalysator, siehe Fig. 5) eingesetzt werden.

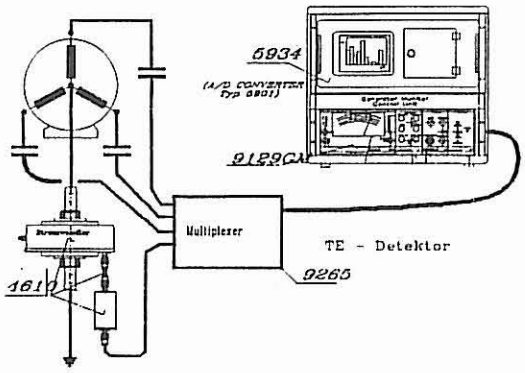
4.4 TE-Überwachung von Grossgeneratoren im Betrieb

Mit der Weiterentwicklung der bestehenden TE-Messsysteme in die Richtung leistungsfähiger Signalverarbeitungssyteme bietet sich die Möglichkeit, die kostenintensiven Hochspannungskomponenten der Energieerzeugung- und Übertragungs-Systeme kontinuierlich zu überwachen. Dabei wird in einer sogenannten Trendanalyse der Zustand des Isolationssystems unter Betriebsbedingungen laufend diagnostiziert. Ein von TETTEX-Instruments und ABB-Drives (Birr, Schweiz) entwickeltes System [23] für die TE-Überwachung in Grossgeneratoren (PAMOS-System) ist in Figur 11 dargestellt.

Bei TE-Messungen an in Betrieb stehenden Generatoren sind nicht nur die kapazitiv eingekoppelten "normalen" Störsignale, sondern auch die galvanisch eingekoppelten Netzstörungen vorhanden. Dies muss bei der Auswahl der geeigneten Störunterdrückungsmassnahmen berücksichtigt werden.

Glücklicherweise muss die Messempfindlichkeit für die Überwachung von Generatoren nicht in pC-Bereich liegen. Für die heute eingesetzten Generatorstab-Isolationssysteme (Mica-Epoxy) sind TE-Pegel von einigen nC für den sicheren Betrieb eines Generators zulässig. Die bei der Stator-Wicklungsisolation gefürchteten Nuten-Entladungen (slot-discharges, arcing), deren Ursache eine mechanische Zerstörung der Stabisolation sein kann, erzeugen nach heutigen Erkenntnissen TE-Signale, deren scheinbare Ladungen im Bereich von 100 nC liegen.

Zur TE-Detektion wird der Generator an allen drei Phasenleiter mit speziellen Kopplungskondensatoren ausgerüstet. Im Generator-Sternpunkt ist ein Breitband-Stromwandler eingebaut.



Figur 11: *Generator-Überwachungssystem*

Im Überwachungssystem PAMOS ist die gleichzeitige Signalverarbeitung durch zwei verschiedene Filter-Verstärker vorgesehen: (1) ein Breitbandverstärker (Typ AKR) dient zur statistischen Erfassung der TE-Aktivität und (2) mit einem durchstimmbaren Schmalbandverstärker (Typ ASR) kann das Spektrum der TE-Signale aufgenommen werden. Von den vier über einen Multiplexer zur Verfügung stehenden Messkanälen wird entweder ein einzelnes Messsignal ausgewertet oder es wird die Differenz von zwei Kanälen gebildet. Das PAMOS-System ist von einem komplexen Computerprogramm gesteuert, welches die Erfassung, die Digitalisierung und die Verarbeitung der ladungsproportionalen Impulse übernimmt. Mit Hilfe eines Expertensystems wird die Identifizierung und Ortung von Teilentladungs-Defekten ermöglicht.

Literatur

[1] **Beyer, M., W. Boeck, W. Möller, W.S. Zaengl**, "Hochspannungstechnik", Springer Verlag, Berlin, 1986.

[2] **Osvath, P., W. Zaengl, H.J. Weber**, "Teilentladungsmessung: Probleme und deren Lösung mit einem flexiblen Messsystem", Bulletin SEV/VSE, Vol. 76 (1985), S. 1137-1143.

[3] **König, D., Y. N. Rao**, " Teilentladungen in Betriebsmiteln der Energietechnik", VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1993.

[4] **IEC-Publikation 270**, "Partial discharge measurements", 1981.

[5] **DIN VDE 0434/05.83**, "Hochspannungs-Prüftechnik", Teilentladungsmessungen", 1983.

[6] **Zaengl, W.**, "Mit welchem Ziel wird die IEC-Publikation 270 Teilentladungsmesstechnik überarbeitet ?", SIEMENS-TETTEX-Kolloquium, Dresden, 1993, Beitrag 4.1.

[7] **Isoliersysteme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen**, ETG-Fachtagung, Würzburg, 1992, ETG-Fachbericht Nr. 40 (H. Kärner, Hrsg.), VDE-Verlag, Offenbach, 1992.

[8] **Diagnostic and Maintenance Techniques**, CIGRE-Syposium, Berlin, 1993.

[9] **Black, I.A.**, "A pulse discrimination system for discharge detection in electrically noisy environments", Proc. 2nd Int. Symp. Hochspannungstechnik, ISH, Zürich, Vol, 1, Paper 3.2-02.

[10] **Zaengl, W.S., P. Osvath, H.J. Weber**, "Correlation between the bandwith of pd-detectors and his inherent integration errors", Conference Record of the 1986 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Washington D.C., 1986, S. 115-121.

[11] **Aschwanden, Th.**, "Vor-Ort-Prüfungen von GIS und Kabeln mit Resonanz-Anlagen", SIEMENS-TETTEX-Kolloquium, Dresden, 1993, Beitrag 2.5.

[12] **Fruth, B., J. Fuhr**, "Partial discharge pattern recognition - a tool for diagnosis and monitoring of ageing", CIGRE-Session 1990, Paper 15/33-12.

[13] **U. Köpf, K. Feser**, "Noise suppression in partial discharge instruments", 6th Int. Symp. High Voltage Engineering, Yokohama 1993, Vol. 3, Paper 63.02, S. 81-84.

[14] **Hartje, M.**, "Erfassung von Teilentladungen an Leistungstransformatoren im Netzbetrieb", Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 21, Nr. 61, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.

[14] **Gerlach, H.G.**, "Resonant power supply kit system for high voltage testing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6 (1991), S. 1-7.

[15] **Osvath, P.**, "Schmalbandige Teilentladungsprüfungen an Leistungs- und Verteiltransformatoren, TETTEX-Application 514, 1992.

[16] **H.J. Weber, R. Seeberger, G. Stolpe**, "Field measurements of partial discharges in potential transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.2 (1986), No. 5, S. 34-38.

[17] **Zaengl, W.S., A. Klaus**, " On-site surveillance of potential transformers by means of pd-measurements", CIGRE-Symposium "New and Improved Materials for Electrotechnology", Wien, 1987, Paper 400-03.

[18] **Klaus A., H.G. Gerlach**, "Teilentladungsmessungen an Hochspannungsapparaten in ungeschirmten elektrischen Verteilanlagen", Bulletin SEV/VSE, Vol. 79 (1988), S. 769-774.

[19] **Vorwerk, H.J.**, "Einige Gesichtspunkte zur Qualititätssicherung bei Messwandlern", Bulletin SEV/VSE, Vol. 78 (1987), S. 469-477.

[20] **Feser, K, R. Sun, A. Eriksson, K. Fröhlich**, "On-site dielectric testing of GIS: theoretical and practical considerations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6 (1991), S. 615-625.

[21] **Boggs, S.A., G.L. Ford, R.C. Madge**, "Coupling devices for the detection of partial discharges in gas-insulated switchgear", IEEE Transaction on Power Apparatur and Systems, Vol. PAS-100 (1981), S. 3969-3973.

[22] **Hampton, B.F., R.J. Meats, B. Pryor, B. Watson-Jones**, " The application of partial discharge measurements to GIS", in "Gas Insulated Substations, Technology and Practice", Pergamon Press, New York, 1986, S. 313-321.

[23] **Schuler, R., W. Hutter**, "Erfassung und Bewertung von Teilentladungen an Statorwicklungen von rotierenden Hochspannungsmaschinen", Bulletin SEV/VSE, Vol. 81 (1990), No. 3, S. 31-35.