Online TE-Messung an Transformatoren: Möglichkeiten und Grenzen

Dipl.-Ing. Ekard Grossmann, IEH, Universität Stuttgart

1 Einleitung

Zur Online-Diagnostik entwickelte elektrische TE-Monitoring-Systeme ([Grossmann, 1999], [Lauersdorf, 1997]) zeigen eine begrenzte Empfindlichkeit der elektrischen Methoden (z. Bsp. aufgrund Korona).

Bei der akustischen Teilentladungsüberwachung werden wenige Sensoren über den gesamten Kessel verteilt montiert und schaffen so die Voraussetzung für eine möglichst gleichmässige Überwachung des gesamten Volumens. Es wird dabei nur an einem einzigen Sensor ein akustischer TE-Impuls benötigt, da nur eine Aussage über „TE" oder „keine TE" getroffen werden soll – unabhängig vom Teilentladungsort.

Der Frequenzbereich der bestmöglichen Empfindlichkeit muss dazu mit den im Betrieb auftretenden Störern und den mechanischen Eigenschaften der Öl-Papier-Isolation und des Kessels abgestimmt werden. Mit den in der Signalverarbeitung klassifizierten Störern konnten adäquate Filtermethoden entwickelt werden. Damit lassen sich auch noch bei hohem Störpegel Teilentladungsimpulse leicht identifizieren und von Störimpulsen unterscheiden. Die Integration des Know-Hows in ein stand-alone Geräte eröffnet neue Möglichkeiten zu einem kostengünstigen Gerät zur TE-Überwachung.

2 Anforderungen aus dem Betrieb

Zur bestmöglichen Empfindlichkeit müssen die Auswertung und die Erfassung angepaßt werden. Wichtig sind dabei zum einen die akustischen Eigenschaften des Hochspannungsgeräts (Öl-Papier-Isolation und Kessel) und zum anderen die im Betrieb auftretenden Störer.

2.1 Akustische Struktur eines Hochspannungsgeräts

Der Isolationsaufbau zeigt ein unterschiedlich dämpfendes Verhalten, das sowohl hinsichtlich der durchlaufenen Materialien als auch in Bezug auf die Ausbreitungsrichtung „radial" (Kühlkanäle) oder „axial" (Streuspalte) untersucht wurde. Allen Strukturen ist näherungsweise eine mit dem Quadrat der Frequenz zunehmende Dämpfung gemeinsam.

Der Kessel weist mit starkem Resonanzverhalten gänzlich andere Eigenschaften auf. Eine Modalanalyse zeigte hier Eigenfrequenzen auf, die dem Signal ihren Stempel aufprägen und Frequenzbereiche bevorzugter Schallweiterleitung definieren. Sie müssen berücksichtigt werden, wenn noch TE-Impulse gemessen werden sollen, die in grösserer Entfernung in das Kesselblech einkoppelten.

2.2 Anforderungen an Sensorik und Hardware

Sensorik und Hardware sind für den Einsatz vor Ort robust auszulegen und müssen dennoch eine Erfassung höchster Empfindlichkeit gewährleisten. Praktische Gesichtspunkte wie auch die

Eigenschaften der akustischen Impulse führten zur Verwendung von auf dem Kessel befestigten piezoelektrischen Sensoren.

Sie erlauben es einerseits, eine Montage während des Betriebs des Hochspannungsgeräts vorzunehmen. Andererseits ermöglicht ihre breitbandige Charakteristik nachträglich eine Filterung schmalbandiger Störer.

2.3 Stör- und Nutzsignale

Unter den Störeinflüssen stellen die elektromagnetischen Einkopplungen eine Klasse dar. Die mechanisch-akustischen Störer sind am besten nach ihrer Herkunft in einen äußeren Bereich (Luftschall), den Kessel (Körperschall) und den inneren Bereich (Ölraum mit Schallquellen) zu unterteilen.

Einzig die elektromagnetischen Einkopplungen und der Körperschall sind als Störsignale einzustufen. Dagegen beeinflusst der Luftschall die Messung kaum. Schall aus dem kritischen inneren Bereich wird richtigerweise als gefährlich bzw. „TE" eingestuft.

3 Neue Signalverarbeitung

3.1 Heutiger Stand der Signalverarbeitung - Signalparameter

Die Auswertung und Reduktion der Signale auf einfache Signalparameter erlaubt die Bewertung und den Vergleich ursprünglich großer Datenmengen bei geringem Speicherbedarf. Die Meßsignale werden bei diesem Verfahren in kurzen Zeitabschnitten erfasst (üblicherweise einige 100 kByte). Danach werden die Parameter bestimmt, um schließlich die Zeitsignale zu löschen und nur die Parameter zu archivieren. Typische Werte, die beispielsweise in [DGZfP SE1, 1989] und [DIN EN 1330-9, 1996] normiert sind und auch größtenteils von käuflichen Softwarepakten standardmäßig ausgewertet werden, sind in Bild 1 dargestellt.

- Nullpunkt und Dauer t_2
- Anstiegszeit t_1 und Abfallzeit t_2-t_1
- Signalmaximum u_{max} und -minimum u_{min}
- Zahl der Überschwingungen (Überschreitungen des Schwellwerts)
- Spektrum
- Effektivwert und Energie
- Signalrate (Impulse pro Zeiteinheit)

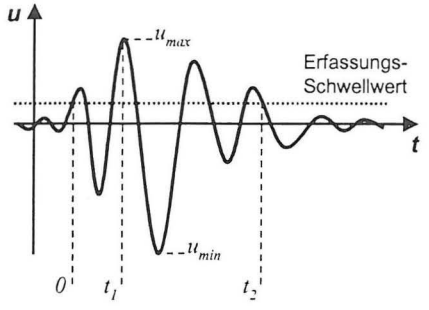


Bild 1: Typische Signalparameter, die auch in der TE-Überwachung verwendet werden können.

Diese Parameter sind zwar kaum geeeignet, einen TE-Impuls positiv zu identifizieren. Als Anhaltspunkte über die allgemeine Beschaffenheit des Signals oder zur Bewertung der Funktion der Signalerfassung (Übersteuerung, schlechte Sensorankopplung, defekte Elektronik und ähnliches) sollten sie dennoch auch bei der akustischen TE-Messung bestimmt werden.

3.2 Heutiger Stand der Signalverarbeitung - Mittelwertbildner

Eine gängige Methode der Störpegelreduktion ist die Mittelung mehrerer aufgezeichneter Signale im Zeitbereich. Sie wird vor allem im Prüffeld verwendet.

In der Praxis werden mit dem Mittelwertbildner im Zusammenhang mit der TE-Ortung meist ausreichend gute Verbesserungen erreicht. Die Bildung eines Mittelwerts dient dabei vor allem der genaueren Bestimmung des Nullpunkts eines Impulses. Ausgehend von einem festen Triggerzeitpunkt bezüglich der Entstehung des Teildurchschlags werden mehrere Zeitverläufe

über eine Addition überlagert. Dadurch verringert sich die von Rauschen und Störern ausgehende Amplitude meistens. Sofern aber kein reines weißes Rauschen vorliegt oder ein fester Phasenbezug der Störsignale zum TE-Impuls besteht, wird nicht der rechnerisch mögliche Signal-Störabstand aufgrund der konstanten Rauschleistung und der sich addierenden Impulse erreicht, sondern nur ein geringerer Faktor. Es ergibt sich aus der Praxis für die Erhöhung G_{SSV} (in dB) des Signal-Stör-Verhältnisses bei n Messungen eine Abschätzung über einen Korrekturfaktor k:

$$G_{SSV} = k \cdot 20 \log(\sqrt{n}) \qquad ; \quad k \approx 0{,}5...0{,}7$$

Damit die erfaßten TE-Impulse selbst nicht zu sehr abgeschwächt werden, ist es notwendig, daß sie eine größtmögliche Ähnlichkeit in ihrem Verlauf besitzen und der Triggerzeitpunkt eine durchweg exakt gleiche Phasenlage erzeugt. Gerade die Triggerung auf den Zeitpunkt des Teildurchschlags ist aber vor Ort selten möglich. Das Verfahren der Mittelwertbildung kann daher nicht zur Überwachung genutzt werden.

3.3 Zweidimensionale FFT

In der Entwicklung hin zu einer modernen Signalverarbeitung konnte die Empfindlichkeit wesentlich gesteigert und die Interpretation der gemessenen Daten erleichtert werden. Das entsprechende Verfahren ist der „zweidimensionale FFT"-Algorithmus oder kurz „FFT2D" (siehe *Bild 2*).

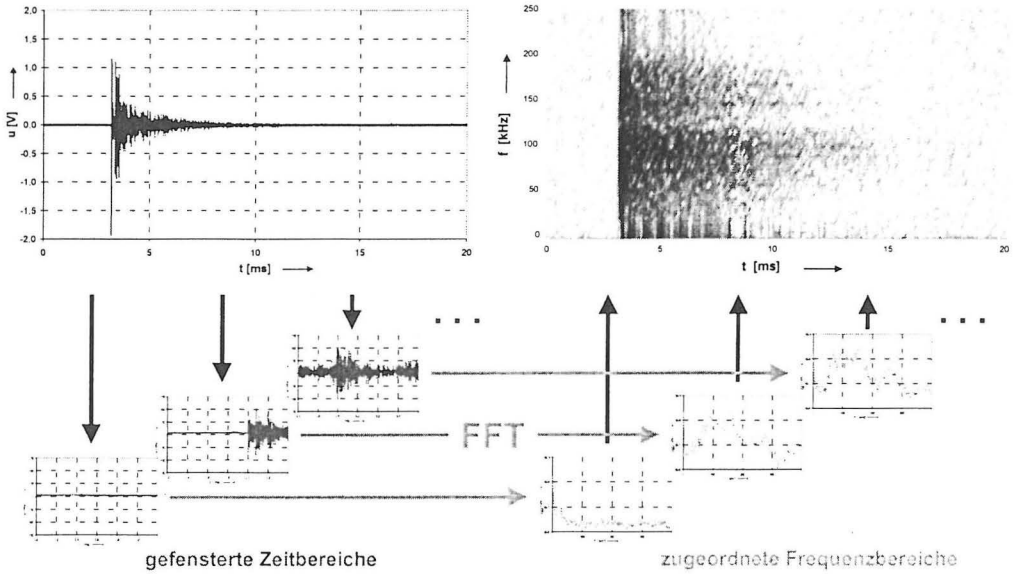


Bild 2: Algorithmus zur „Zweidimensionalen FFT": Die gefensterten Zeitbereiche des TE-Impulses werden einer FFT unterworfen und wieder an ihrem Zeitindex dargestellt (Ordinate = Frequenzachse, Spektralamplitude = Schwärzung).

Zur praktischen Interpretation der mit FFT2D gewonnenen Muster können folgende Eigenschaften des Algorithmus angegeben werden:

- Das exponentielle Abklingen der Impulse wird durch die Logarithmierung zu einem linearen gewandelt, das den Farbverlauf linear aufhellt.
- Kurze, steile Impulse entsprechen vertikalen Linien.
- Störungen auf einer bestimmten Frequenz prägen sich durch waagrechte Linien aus.
- Weißes Rauschen tritt als gleichmässig verteiltes Punkteraster auf, das die von Signalen gegebenen Farbwerte geringfügig verändert.

Aufgeführt seien auch noch prinzipielle Verläufe verschiedener Vorgänge wie schmalbandige Störer, das Magnetisierungsrauschen, ein mechanischer Impuls und ein TE-Impuls.

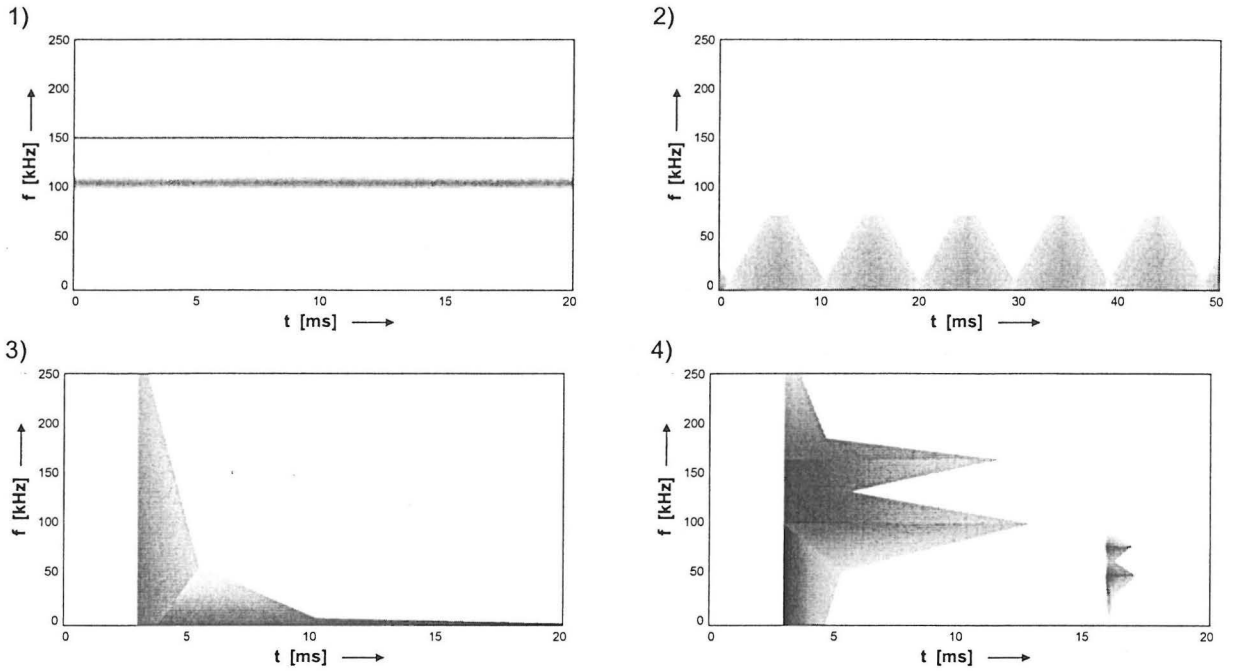


Bild 3: Häufig auftretende FFT2D-Muster:

1) Elektromagnetische Störung bzw. mechanisch angeregte Eigenfrequenz des Hoch spannungsgeräts

2) Magnetisierungsrauschen (im 50 Hz Netz)

3) Mechanischer Impuls

4) TE-Impuls (links) mit zwei sehr ausgeprägten Eigenfrequenzen, und stark gedämpfter TE-Impuls einer anderen Anordnungen (rechts).

Wendet man diese Auswerteroutine auf Beispieldatensätze an, ergeben sich folgende Diagramme (*Bild 4*).

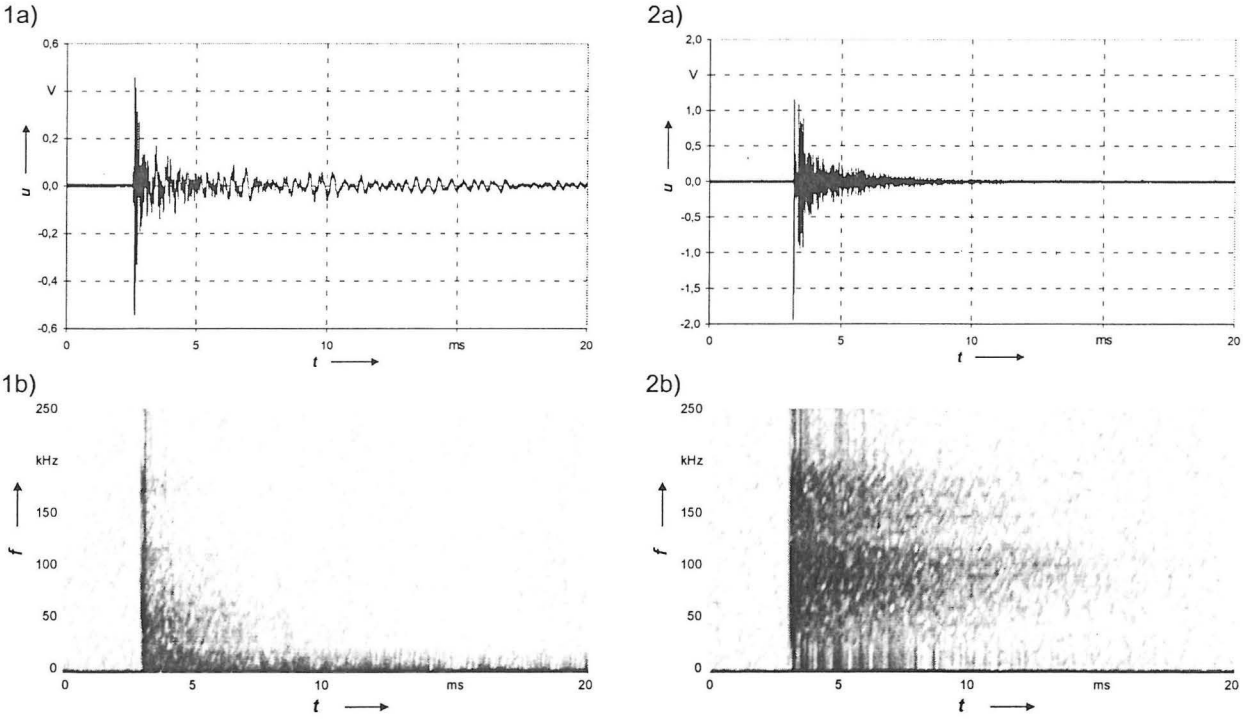


Bild 4: Unterscheidung von Störimpuls (1) und TE-Impuls (2): Ähnliches Zeitsignal (1a, 2a) und sichere Identifikation im FFT2D-Diagramm.

Anhand dieser Diagramme (*Bild 4*) läßt sich beweisen, daß über die visuelle Auswertung eine sehr detaillierte Interpretation zustande kommt. Vorteilhaft wirkt sich auch die automatische Kompensation von Parameteränderungen im Hochspannungsgerät, der Störumgebung, und der Signalerfassung aus, da jedes Bild individuell für sich bewertet und verglichen werden kann.

3.4 Vergleich des Energiepegels

Aus der FFT2D-Funktion geht auch die automatisierte TE-Detektion hervor. Gerade bei einer unterbrechungsfreie Diagnose (Überwachung) ist es erforderlich, das Know-How in einen selbständig arbeitenden und entscheidenden Algorithmus zu überführen, der eine Aussage „TE" oder „keine TE" ableitet.

Ermöglicht wird dies durch einen Vergleich der Energiepegel verschiedener Frequenzbänder. Die entsprechende Routine wurde mit „ELC" (Energy Level Comparison) bezeichnet. Das grundsätzliche Verfahren ist in *Bild 5* dargestellt.

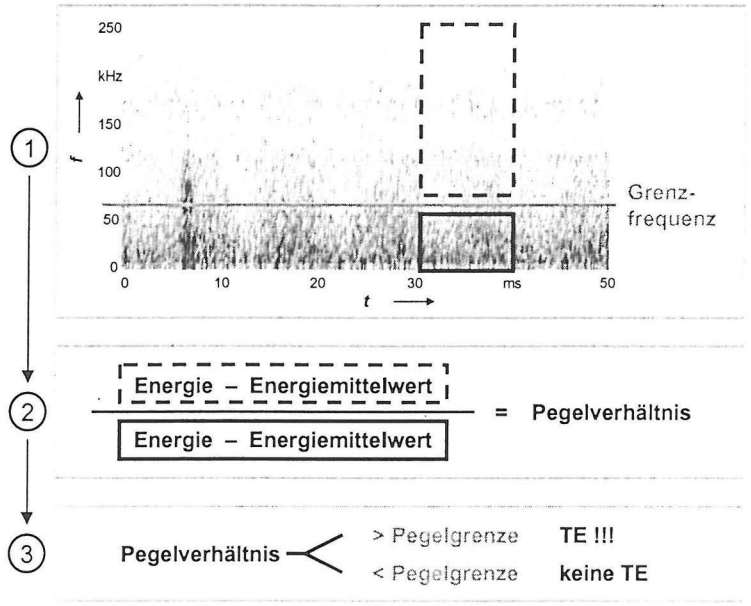


Bild 5: ELC (Energy Level Comparison): Der Vergleich der Energiepegel verschiedener Frequenzbereiche entscheidet in „TE" oder „keine TE" (1: Unterteilung in Frequenzbereiche, 2: Berechnung der Energie, 3: Entscheidung).

Um den dargelegten Algorithmus an die Gegebenheiten einer Messung anzupassen, ist die Grenzfrequenz und der Verhältnisgrenzwert entsprechend zu wählen. Dies geschieht am zweckmäßigsten über die Variation dieser beiden Parameter und den Vergleich der jeweils erhaltenen Ergebnisse. Wird eine genügend umfangreiche Datenbank zu dieser Einstellung verwendet, kann die Kombination mit der besten Trefferquote leicht gefunden werden. Damit ist die Richtigkeit der Aussage mit einer hohen Sicherheit gewährleistet.

Anhand einer Datenbank mit weit über 1000 Zeitsignalen wurde ein solches „Training" bereits durchgeführt. Die Erfolgsquote einer richtigen Zuordnung der Signale aus verschiedensten Meßumgebungen (Experimentalaufbau, Kombiwandler, 1 MVA Transformator, 750 MVA Transformator,...) lag bei über 80% ! Dabei wurde ein und dieselbe Grenzfrequenz von 70 kHz und eine Pegelgrenze von 0,16 verwendet. Die trotz unterschiedlichster Hochspannungsgeräte, Sensoren und Lokalitäten (Labor, Prüffeld, vor Ort) sehr hohe Trefferquote deutet dabei auf ein fundamental gleichartiges Verhalten akustischer TE-Impulse hin.

4 Geräte zur TE-Überwachung

4.1 Akustische TE-Überwachung von Hochspannungsgeräten

Die durch einen Transientenrekorder digitalisierten Werte sind in der stand-alone Überwachung (*Bild 6*) am zweckmäßigsten über den ELC-Algorithmus und auch über Signalparameter auszuwerten.

Die abgebildete TE-Überwachung (*Bild 6*) besteht aus einem miniaturisierten PC, der zusammen mit ADUs, Netzteilen und Ankoppeleinheiten in einem 19"-Gehäuse untergebracht ist. Die Ankoppeleinheiten binden dabei die Sensoren und die Vorverstärker über Standard-Koaxialkabel (RG 214) an die Erfassungseinheit an. Die Fernüberwachung und das Auslesen der archivierten Daten ist über Seriellverbindung, Modem oder LAN möglich.

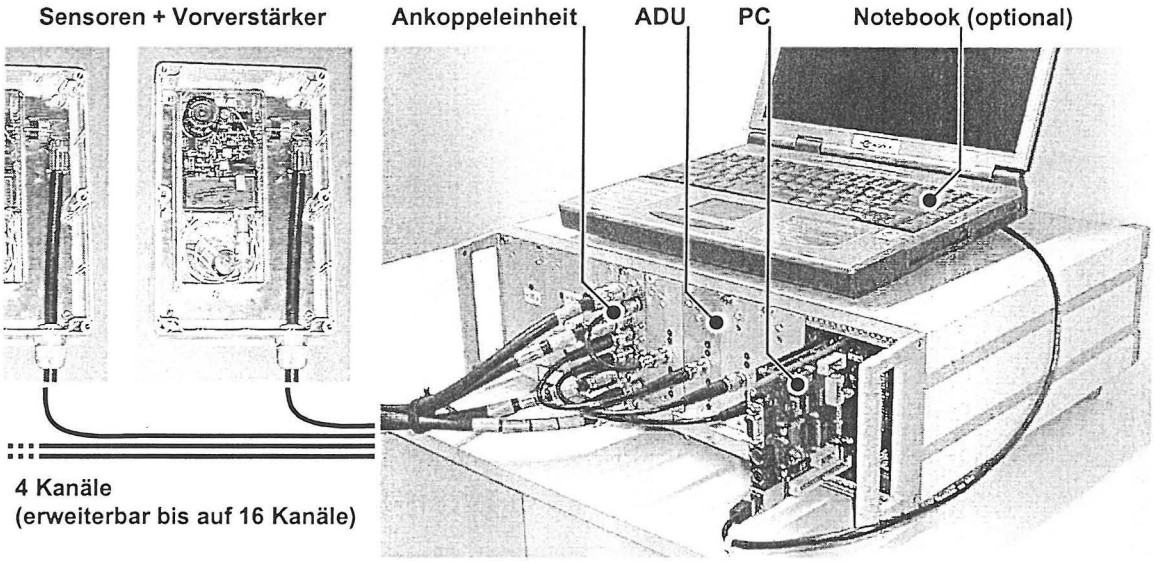


Bild 6: Preisgünstige, autarke Signalerfassung und -auswertung der Sensorsignale über Standard-ADU-Einheiten und den ELC-Algorithmus auf einem „Scheckkarten-PC" (Warnmeldung und Anzeige der Meßwerte über integrierten Webserver, modulare Erfassungssystem-Elemente, Notebook optional über LAN angebunden).

Eine Kombination der akustischen mit der elektrischen TE-Messung ist in diesem Gerät zwar prinzipiell möglich, sollte aber mit Bedacht geschehen. Die elektrische TE-Messung an Transformatoren in Betrieb weist bei der besten Empfindlichkeit von etwa 1000 pC sehr häufig Störimpulse auf, die nicht von TE-Impulsen unterschieden werden können und zu falschen Interpretationen führen. Das Signal höherer Entscheidungspriorität sollte daher immer das akustische sein, da hier die positive Identifizierung eines TE-Impulses mit weit größerer Sicherheit geschieht. Werden Impulse in beiden Systemen mit zum Beispiel gleichbleibendem Zeitversatz aufgezeichnet, kann aber die Diagnose des akustischen Systems über die des elektrischen Systems bestätigt werden.

4.2 Auditive Interpretation

Die wohl bemerkenswerteste Signalcharakterisierung, die mit einem anpaßbaren Filter und einem äußerst leistungsfähigen neuronalen Netz ausgestattet ist, besitzt das menschliche Hörverständnis. Dem menschlichen Gehirn ist es in kürzester Zeit möglich, sich auf verschiedenste Nutzsignale einzustellen, und darüber hinaus Störgeräusche selektiv zu unterdrücken. Die Ähnlichkeit zwischen den Mustern der TE-Messung und des Hörverständnisses kann direkt aus *Bild 7* ersehen werden. So weisen Vokale eine Verwandschaft mit nicht impulsförmigen Störern auf und "harte" bzw. „weiche" Konsonanten wie „k" oder „d" besitzen Gemeinsamkeiten mit den TE-Impulsen und den impulsförmigen Störern.

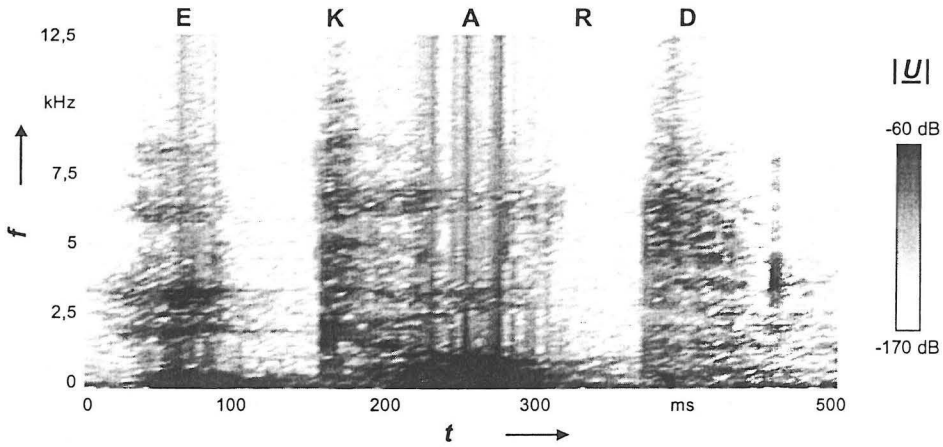


Bild 7: Zeitsignal des gesprochenen Namens „Ekard" in der FFT2D-Darstellung. Am oberen Rand des Bildes sind den akustischen Einzelereignissen die Buchstaben zugeordnet. (Zu beachten: Zeit- und Frequenzmaßstab).

Um das menschliche Hörverständnis voll auszunutzen, sind vorab verschiedene Voraussetzungen zu erfüllen. Diese betreffen zum einen den Frequenzbereich und zum anderen die zeitliche Auflösung des Schallsignals. Das menschliche Ohr kann Frequenzen zwischen 16 Hz und etwa 10 kHz (50-Jähriger) bis 20 kHz (Kind) wahrnehmen. Weiterhin ist eine zeitliche Mindestdehnung der nur wenige Millisekunden langen TE-Impulse erforderlich, so daß ein asynchroner Einsatz und die Tonhöhe erkannt werden kann.

Neben der Struktur des Frequenzbereichs (20...250 kHz) von Teilentladungen liegt als Erfahrungswert auch die Zeitdauer sehr kurzer Impulse (ca. 1 ms) und die Impulsfolgefrequenz (oft >10 kHz) bzw. ihr zeitlicher Abstand (<100 µs) vor.

Um TE-Impulse hörbar zu machen ist das aufgezeichnete Zeitsignal folglich verlangsamt abzuspielen. Es verlängert sich dabei die Zeitdauer und der zeitliche Abstand der Impulse und es wird gleichzeitig der ursprüngliche Frequenzbereich in einen tiefer liegenden transformiert. Ausgehend davon läßt sich ein Streckungs-/Stauchungsfaktor m bestimmen, mit dem der Hörbereich optimal ausgenutzt wird und mit dem auch das Einordnen der Tonhöhe kurz dauernder Impulse möglich ist.

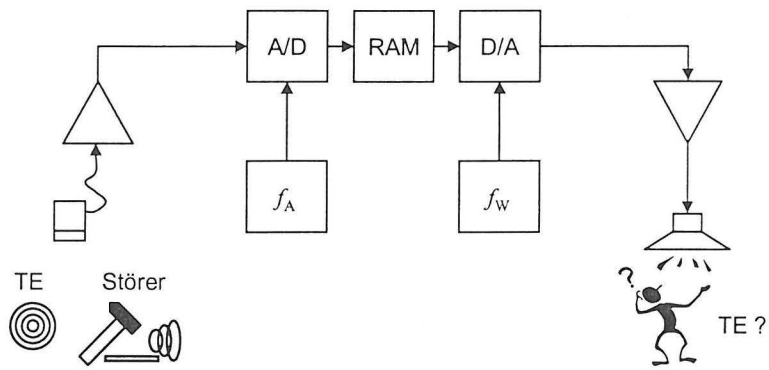


Bild 8: Über die verlangsamte Wiedergabe ($f_A > f_W$) der schnell abgetasteten und im RAM zwischengespeicherten akustischen Signale wird der ursprüngliche Frequenz- und Zeitbereich dem des menschlichen Hörvermögens angepaßt.

Das Konzept der Umsetzung ist in *Bild 8* veranschaulicht. Die Wiederherstellungsfrequenz f_W ist so zu wählen, daß mit der vorgegebenen Abtastfrequenz f_A der zur Umsetzung notwendige Faktor m erreicht wird. Es gilt damit $f_W = f_A / m$. Benutzt werden die im Komponenten des vorgestellten modularen Überwachungssystems. Die aufgezeichneten Signale sind nach der Digitalisierung in ein RAM abzuspeichern, aus dem sie mit geringerer Tastrate über einen Verstärker und einen Lautsprecher als hörbare Geräusche ausgegeben werden.

Tests im Labor haben bereits nach kurzer Einlernzeit eine gute Erkennungs- und Unterscheidungsrate eines menschlichen Zuhörers erbracht. Das Endprodukt ist damit zwar nicht zur stand-alone Überwachung benutzbar, sondern nur „auf Anforderung". Es besticht aber insgesamt durch seine Einfachheit und gleichzeitig durch seine hohe Leistungsfähigkeit.

5 Erreichbare Empfindlichkeit

5.1 Kalibrierung der Empfindlichkeit

Beim Wettbewerb der akustischen Überwachung mit anderen Systemen und Methoden ist die Angabe einer vergleichbaren Größe anzustreben. Diese sollte die „wahre" Ladung sein. Schon Vergleiche elektrischer Meßmethoden über die „scheinbare" Ladung sind im Prinzip nicht schlüssig, da besonders die überall vorhandenen parasitären Kapazitäten in jedem Verfahren anders eingehen. Damit existiert auch bei elektrischen Systemen eine Empfindlichkeitsstruktur, die aber bislang vernachlässigt wurde. Eine Möglichkeit, immer die „wahre" Ladung zu erfassen, bietet die künstliche TE-Quelle, deren Einsatz daher in größerem Umfang zu befürworten ist. [Grossmann, 2001]

5.2 Empfindlichkeitsstruktur

Aus akustischer Sicht muß dem Hochspannungsgerät in seinem dreidimensionalen Volumen eine „Empfindlichkeitsstruktur" zugewiesen werden. Je nach Ausbreitungsweg und dessen Charakteristik erhält man je Sensor ein gewisses Einzugsgebiet, das mit zunehmender Entfernung eine immer schlechtere Detektionsgrenze aufweist. Durch Überschneidungen dieser jedem Sensor zugeordneten räumlichen Verläufe erhält man für jeden Raumpunkt einen Grenzwert der akustischen Impulsamplitude. Dieser kann einer wahren Ladung (bzw. über die Kalibrierung auch einer scheinbaren Ladung) zugeordnet werden.

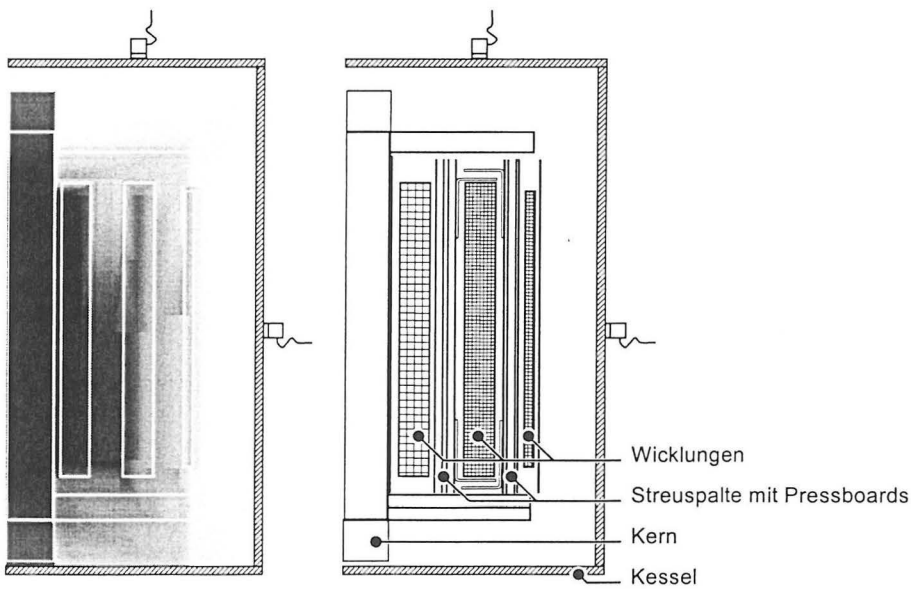


Bild 9: Querschnitt durch einen Transformator mit zugeordneter Empfindlichkeit für die eingezeichnete Sensoranordnung. (Weiß = sehr empfindlich, Schwarz = nicht überwachbar).

Aufgrund der komplexen Verhältnisse im Aufbau der Hochspannungsgeräte ist dieser Verlauf nur abschätzbar. Zusätzlich kann er über im Versuch gemessene Stützpunkte kontrolliert werden. Verschiedene Anordnungen zeigten bereits Empfindlichkeiten, die im Bereich der Oberspannungswicklung im Vergleich zur elektrischen TE-Überwachung eine etwa 10-fach bessere Nachweisgrenze besaßen.

6 Beispiel einer akustischen TE-Überwachung

Ein achtkanaliges Überwachungssystem zur Online-TE-Messung ist bereits seit längerem an einem 350 MVA 405 / 115 kV Transformator in Betrieb [Lauersdorf, 1997]. Aufgezeichnet werden vier Meßkanäle (3 Phasen + Sternpunkt) der Oberspannungsseite. Eine Teilentladungsaktivität könnte mit einer Empfindlichkeit der elektrischen TE-Messung von etwa 1000 pC detektiert werden.

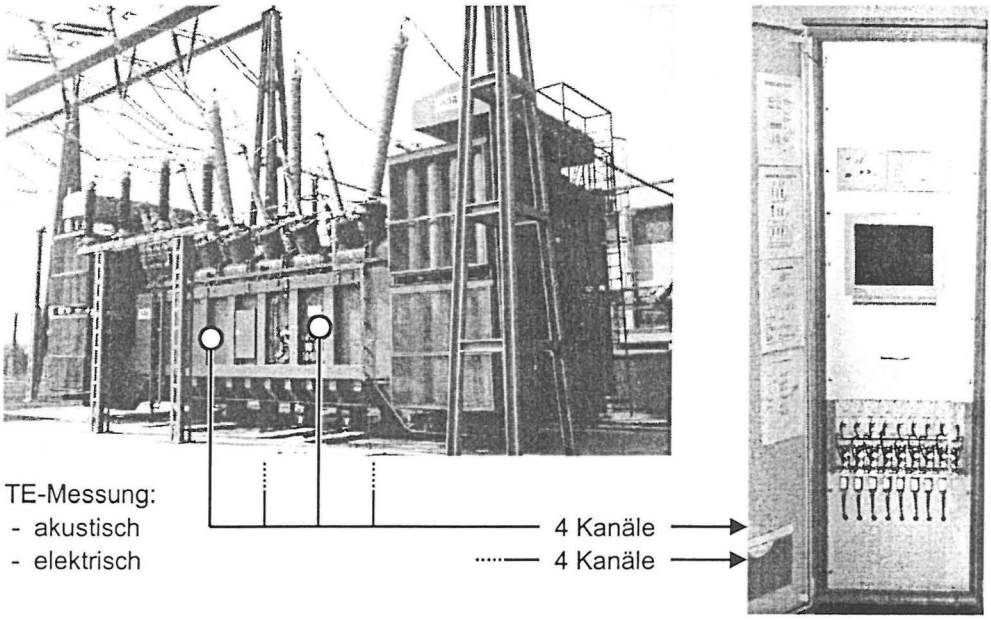


Bild 10: 350 MVA Transformator mit elektrischer und akustischer TE-Überwachung (je 4 Kanäle). Die Einheit zur Signalerfassung und der autark auswertende PC sind in der Schaltwarte aufgestellt.

Die akustische Teilentladungsmessung (*Bild 6* ohne ADUs und PC) wurde an diesem System auf die weiteren 4 Kanäle aufgelegt (*Bild 10*). Die zugehörigen 4 Sensoren sollten prinzipiell tetragonal angebracht werden. Aufgrund der im Deckelbereich stark verstrebten Konstruktion bot ein Rechteck (je ein Sensor in Mitte der linken und rechten Hälfte der Front- und Rückseite) jedoch mehr Vorteile.

Der Wicklungsaufbau aus Regel-, Oberspannungs-, Unterspannungs- und Tertiärwicklung zeigt im Querschnitt viele Kühlkanäle und breite Streuspalte. Es ist von einer empfindlichen Überwachung bis hinter die Oberspannungswicklung auszugehen. Die Unterspannungswicklung wird dagegen nur mäßig gut und die ganz innen liegende Tertiärwicklung nur unempfindlich überwachbar sein.

Ein Online aufgezeichnetes akustisches Signal ist in *Bild 11* dargestellt. Das FFT2D-Diagramm zeigt deutlich, daß es sich beim Zeitsignal um eine Überlagerung mehrerer schmalbandiger Störer handelt. Die dunkle Färbung der einzelnen Anteile weist diese zwar teilweise als leistungsstark aus. Die dazwischen liegenden Frequenzbereiche bieten jedoch mehr als genug Spielraum für eine sichere Erkennung und Identifizierung von akustischen TE-Impulsen. Das bei allen Transformatoren vorhandene Magnetisierungsrauschen besitzt in diesem Fall eine zu geringe Amplitude, um als eigenständiges Muster erkennbar zu sein.

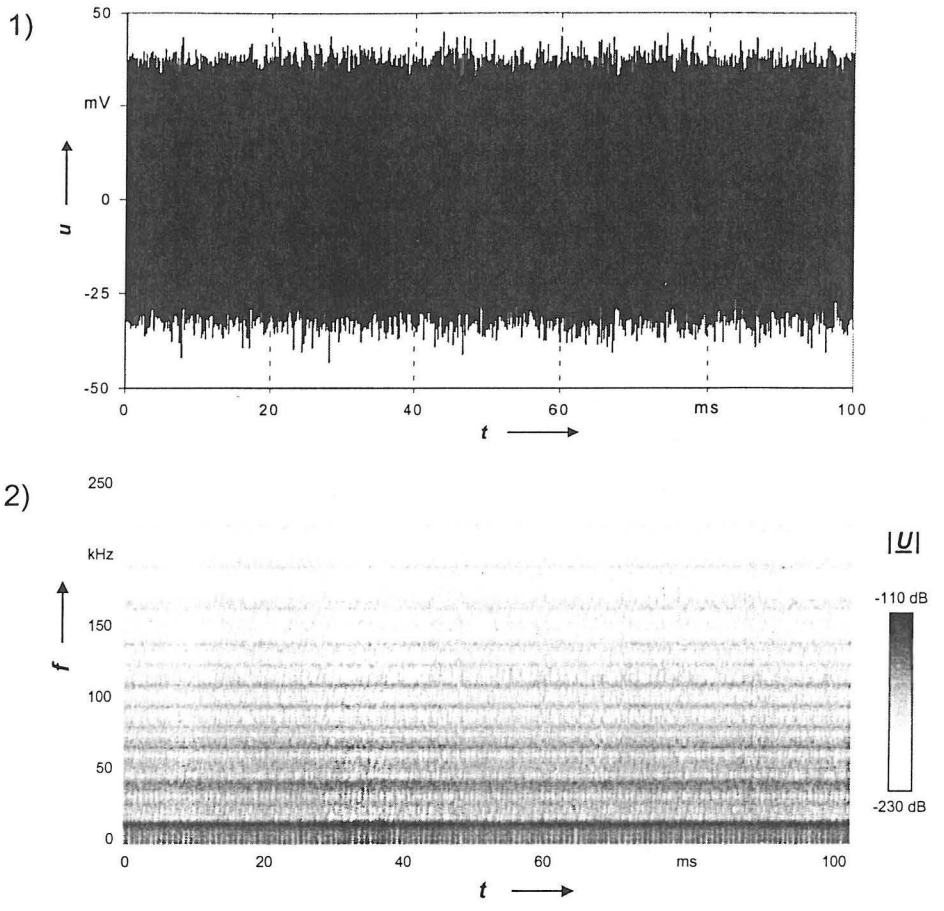


Bild 11: Signal der akustischen Online-TE-Überwachung:
1) Zeitsignal: ohne erkennbaren Informationsgehalt
2) FFT2D-Diagramm: nur schmalbandige Störer; das Magnetisierungsrauschen besitzt eine zu kleine Amplitude, um erkennbar zu sein.

Da dieser Transformator erst seit fünf Jahren in Betrieb ist, wurde weder von der akustischen noch von der elektrischen Sensorik Teilentladungsimpulse aufgezeichnet. Auch bislang auftretende Überspannungen oder andere Unregelmäßigkeiten haben noch keine TE-Aktivität ausgelöst. Diese Diagnose wurde auch von der Gas-in-Öl Überwachung bestätigt.

7 Zusammenfassung

Die akustischen Eigenschaften von Hochspannungsgeräten konnten bestimmt und die Sensorik daraufhin optimiert werden. In der Signalverarbeitung wurden die Störer klassifiziert und adäquate Filtermethoden entwickelt. Insbesondere kann bei der Visualisierung durch den zweidimensionalen FFT-Algorithmus ein Teilentladungsimpuls auch noch bei einem hohen Störpegel leicht identifiziert und von einem Störimpuls unterschieden werden.

Das optimierte akustische Gesamtsystem eröffnet damit die Möglichkeit bisherige Empfindlichkeitsgrenzen elektrischer TE-Überwachungssysteme zu übertreffen und die Detektionsfähigkeit und Aussagekraft zu verbessern. Auch ist sie mit etwa 2500 € Fixkosten und 1000 € pro Meßkanal gegenüber anderen am Markt befindlichen Überwachungssystemen recht preiswert. Technische Daten wie Aussagekraft, Empfindlichkeit und Genauigkeit können ferner über die Höhe des finanziellen Aufwands (bzw. die Anzahl der Kanäle) festgelegt werden.

8 Literatur

[DGZfP SE1, 1989] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), „DGZfP Richtlinie SE1, Schallemission - Begriffe", Richtlinie, 1989.

[DIN EN 1330-9, 1996] Europäische Norm, „DIN EN 1330-9, Terminologie - Begriffe der Schallemissionsprüfung", DIN, 1996.

[Grossmann, 1999] E. Grossmann, K. Feser, M. Lauersdorf, Th. Grun, „Improvement of sensitivity in online pd-measurements on transformers by digital filtering", ISH 99 London, UK, August 1999

[Grossmann, 2001] E.Grossmann, K.Feser, *„New Calibrators for Acoustic PD-Measurements",* 12th ISH, August 2001

[Hartje, 1989] M. Hartje, „Erfassung von Teilentladungen an Leistungstranformatoren im Netzbetrieb", Dissertation, Universität Hannover, 1989

[Lauersdorf, 1997] M. Lauersdorf, „Verfahren zur Unterdrückung von Koronastörern bei Teilentladungsmessungen an Transformatoren vor Ort", Dissertation, Universität Stuttgart, 1997

[Lundgaard, 1989] L.E. Lundgaard, W. Hansen, „Location of discharges in power transformers using external acoustic sensors", 6th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 1989, Paper No. 15.05

[Nieschwitz, 1982] H. Nieschwitz, „Ortung von Teilentladungen in Transformatoren", 50. VDE-Seminar, 1982

[Stearns, 1994] S. D. Stearns, D. R. Hush, *"Digitale Verarbeitung analoger Signale"*, München, Oldenbourg-Verlag, 1994