

Empfindlichkeit der akustischen TE-Messung bei Transformatoren im Labor und vor Ort im Vergleich zur elektrischen TE-Messung (IEC 60270)

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

1 Einleitung

Die in letzter Zeit entwickelten elektrischen Teilentladungs(TE)-Monitoring-Systeme zeigen sowohl den Bedarf an Möglichkeiten der Online- und Offline-Diagnostik, als auch eine begrenzte Empfindlichkeit der elektrischen Methoden (z. Bsp. aufgrund Korona). Die akustische Teilentladungs-Messung ist eine bereits seit langem in Prüffeldern verwendete und ebenfalls anerkannte Messmethode zur Diagnose. Sie zeigt in Versuchsaufbauten eine Empfindlichkeit, die der elektrischen Messung stark überlegen ist. Unter Berücksichtigung des mechanischen Aufbaus Öl-Papier-isolierter Geräte kann daher für Online-Messungen eine Verbesserung der TE-Nachweisgrenze mit Hilfe der akustischen TE-Messung angestrebt werden.

2 Elektrische Teilentladungsmessung vor Ort an Transformatoren im Betrieb

Das zum Monitoring verwendete System wurde bereits in anderen Veröffentlichungen ([Grossmann, 1999], [Lauersdorf, 1998], [Lauersdorf, 1997]) vorgestellt. Es soll daher im Folgenden nur kurz auf die Hardware mit ihrer Signalverarbeitung eingegangen werden. Abschliessend ist die zur Zeit erreichbare Empfindlichkeit beim Online Monitoring vor Ort aufgezeigt.

2.1 Einleitung

Als zerstörungsfreies Verfahren zur Diagnose der Isolation von Hochspannungsbetriebsmitteln wird die Teilentladungsmessung (TE-Messung) schon jahrzehntelang zur Qualitätskontrolle bei Endprüfungen im Werk des Herstellers, bei der Inbetriebnahme oder seit kurzem auch in Einrichtungen zur Betriebsmittelüberwachung (Monitoringsysteme) vor Ort eingesetzt. In elektromagnetisch geschirmten Laboratorien können TE-Messungen mit sehr hoher Empfindlichkeit durchgeführt werden. Bei der Anwendung der TE-Messung in ausgedehnten Schaltanlagen vor Ort, wo Abschirmmaßnahmen nicht möglich sind, kann eine ausreichende Meßempfindlichkeit nur mit Hilfe von Filtermethoden bei der Signalverarbeitung erzielt werden. In den letzten Jahren wurden dazu digitale Verfahren entwickelt, mit denen schmalbandige Störer mit einem hohen Grad in den Meßsignalen unterdrückt werden können. Besonders kritisch blieb bisher die Anwendung der TE-Messung bei Betriebsmitteln, wenn an den Hochspannungsleitungen desselben Meßkreises Koronaentladungen auftreten. Diese Koronaentladungen, sie werden auch als „äußere“ Teilentladungen bezeichnet, wirken als zusätzliche Störquelle auf den TE-Meßkreis.

Bei der TE-Messung an Transformatoren sind zur sinnvollen quantitativen Auswertung nur bandbegrenzte Messungen (nach IEC 270) möglich. Bei der bandbegrenzten TE-Messung werden die Signale im Frequenzbereich bis 1 MHz ausgewertet. In diesem Frequenzbereich unterscheiden sich die Spektren aus den Teilentladungen des Prüflings und den Koronaentladungen des Meßkreises nicht. So kann mit den bisher angewandten Filtermethoden keine Unterdrückung dieser Koronastörer erreicht werden. Ebenso scheiden Verfahren zur

Musternererkennung, bei denen das Impulsverhalten nur global über statistische Kenngrößen beschrieben wird, als Maßnahme zur Unterdrückung von Koronastörern aus.

2.2 Auskopplung des TE-Signals

Messsignale zur elektrischen Teilentladungsmessung werden am häufigsten am Messbelag der Durchführung und im Sternpunkt abgegriffen. Benutzt werden dabei vor allem Ferritkern-Ankoppelvierpole, die das Stromsignal der Teilentladung in ein Spannungssignal umwandeln und es an einen nachfolgenden Transientenrekorder leiten.

Auch Rogowski-Spulen wurden schon oft um den Durchführungsdom angebaut, um die Stromsignale auszukoppeln. Jedoch war das Messsignal durch den ausgedehnten Aufbau meist mit starken Störern behaftet und dadurch nur schwer oder gar nicht auswertbar.

2.3 Filterung der schmalbandigen Störer

Problematisch bei der TE-Messung vor Ort und im Betrieb sind neben starken Einkopplungen von Schmalbandstörern vor allem auch ungünstige Erdverhältnisse und kapazitive Kopplungen zwischen den Leitern des dreiphasigen Systems zu nennen.

Eine Abhilfe, die schmalbandigen Störern zu unterdrücken, ist die digitale Filterung. Das vom Transientenrekorder aufgezeichnete und digitalisierte Messsignal wird dabei durch eine Signalprozessor-Hardware oder in einem PC mit einem FIR-Filteralgorithmus bearbeitet. Neben einer Multiband-Unterdrückung ist auch die äusserst gute Anpassbarkeit an die Umgebungsbedingungen von Vorteil.

Als Ergebnis erhält man ein Signal, das neben einer noch immer sehr guten Breitbandigkeit auch eine wesentlich höhere Messempfindlichkeit aufweist. Im vor Ort Betrieb liess sich das Signal-Störer-Verhältnis damit teilweise bis zu 30 dB verbessern.

2.4 Kompensation der Koronaimpulse

Eine besonders wirksame Methode zur Unterdrückung von Koronastörern wurde mit dem Verfahren der Meßkreiskompensation entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf dem Prinzip der Brückenschaltung. Dabei werden TE-Ströme über zwei unabhängige Stromzweige ausgekoppelt. Ähnlich wie bei der Brückenschaltung müssen auch hier die Stromzweige abgeglichen werden. Dazu wird das Signal eines der beiden Meßzweige (Nebenzweig) gefiltert, um so dessen Signalübertragungsweg an die Übertragungscharakteristik des dazu parallelen Meßzweiges (Meßzweig des Prüflings) für den Fall äußerer Teilentladungen anzugleichen. Nach der Anwendung dieses Filterprozesses, der auch als „Meßkreiskompensation“ bezeichnet wird, lassen sich alle außerhalb des Prüflings entstandenen, leitungsgeführten Impulsstörer durch zwei unterschiedliche Auswerteprinzipien unterdrücken. Im ersten Prinzip, der Differenzbildung, werden die Meßzweigsignale voneinander subtrahiert. Beim zweiten Prinzip wird durch Berechnung des Produkts der Ströme die Signalrichtung bestimmt. Im Fall leitungsgebundener Impulsstörer ergeben sich dann rein positive Signalanteile.

Das Prinzip der Meßkreiskompensation ist auch bei Messungen an dreiphasigen Großtransformatoren vor Ort anwendbar. Hier muß für jeden der drei Leiter eine separate Kompensationsberechnung durchgeführt werden. Die beste Empfindlichkeit ergab sich bei der Auskopplung der Leiterströme zusammen mit dem Summenstromsignal des geerdeten Sternpunktes, das zur Summen-Kompensation herangezogen wird.

2.5 Erreichbare Empfindlichkeit und beeinflussende Faktoren

Erfahrungen mit dem seit etwa fünf Jahren bestehenden Monitoring-System zeigen, dass im Normalfall von einer Empfindlichkeit von 1000 pC ausgegangen werden kann. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings eine Abhängigkeit von der Stufenschalterstellung und von der Konstellation des am Transformator angeschlossenen Leitungsnetzes. Beides kann durch entsprechende Wahl der digitalen Filter berücksichtigt werden.

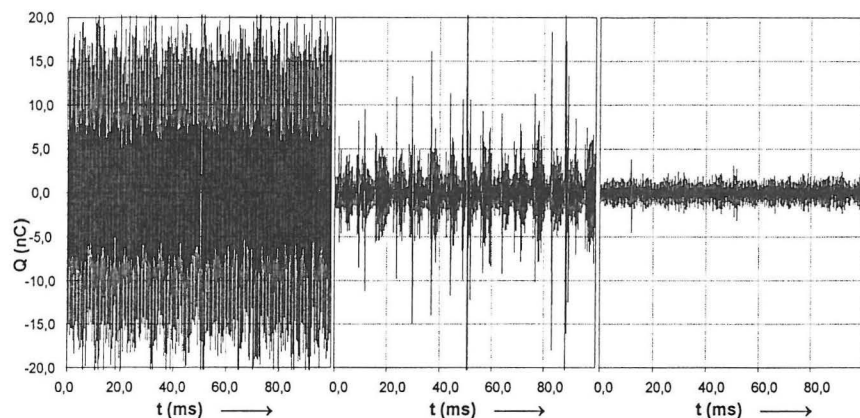


Fig. 1

Störampplitude im Verlauf der Filtersequenz vom Originalsignal (links, alle Peaks abgeschnitten) über das gefilterte Signal (mitte) bis zum kompensierten Signal (rechts)

Als nicht beeinflussbare Faktoren sind zum einen elektromagnetische Einkopplungen in den Messkreis aufzuführen. Sie erzeugen Stromflüsse, die zu denen einer inneren TE gleichgerichtet sind. Auch wird bei sehr starker Korona (z. Bsp. bei Regen), die Empfindlichkeit weiter eingeschränkt. Negative Einflüsse im Messkreis sind weiterhin eine starke kapazitive Kopplung der Phasen, beispielsweise in GIS-Schaltanlagen, eine schlechte Transformatorerdung und Teilentladungen, die ihren Stromkreis über den separat geerdeten Kessel schliessen.

3 Einfließende Faktoren bei der akustischen TE-Messung

Um mit der akustischen Teilentladungsmessung die bestmögliche Empfindlichkeit zu erreichen, muss zunächst das akustisch-mechanische Gesamtsystem des Transformators näher beleuchtet werden. Es lässt sich vereinfacht in das Isolationssystem und den Kessel unterteilen. Ihr Einfluss spiegelt sich später im Messsignal und der erreichbaren Nachweisgrenze wieder. Dementsprechend ist dies auch die Grundlage zur Auswahl der Sensorik und Messtechnik.

3.1 Frequenzabhängiges Dämpfungs- und Reflektionsverhalten in der Isolation

Mögliche Wege der Schallausbreitung sind zunächst alle Raumrichtungen, auf denen sich nur dämpfendes und nicht mechanisch starres oder totalreflektierendes Material befindet. Der letztendlich entscheidende Ausbreitungsweg, der mithin auch die Sensorposition bestimmt, richtet sich nach einem komplexen Muster aus Reflektionen und Dämpfungen.

Um mehr über diese Mechanismen in Erfahrung zu bringen, ist eine detaillierte Untersuchung notwendig. Einzelne Materialien des Isolationsaufbaus und auch zusammengesetzte Strukturen sind bezüglich Dämpfung und Reflektion zu charakterisieren. Über die Bestimmung dieser frequenzabhängigen Eigenschaften können Rückschlüsse auf den Ausbreitungsmechanismus und die damit zugrundeliegende Schallweiterleitung bzw. die akustische Übertragungsfunktion gemacht werden.

Die Bestimmung dieser Materialparameter geschieht in einer „akustischen TEM-Zelle“. Sie erlaubt die Erzeugung verschieden hoher TE-Impulse in ihrer Mitte, ist gänzlich mit Mineralöl gefüllt und besitzt beiderseits der TE-Quelle im Schnittpunkt der Symmetrieachsen akustische

Sensoren auf ihrer Stahlwandung. Ist zum Beispiel die Dämpfung eines Pressboard zu bestimmen, kann dies unter natürlichen Bedingungen (Öl-TE-Quelle, eingetaucht in Mineralöl,...) geschehen. Hierbei gewonnene Ergebnisse zeigen eine sehr hohe Genauigkeit und Realitätsnähe. Vermessungen komplexerer Baugruppen in Isolationsanordnungen können ebenfalls aussagekräftig untersucht werden. Ein einfaches Beispiel ist im folgenden Bild gegeben. Es handelt sich hierbei um eine Betrachtung der Linearität im Dämpfungsverhalten von geschichteten Pressboards. Dabei wird deutlich, dass die gewonnenen Ergebnisse auch zur Hochrechnung einzelner Materialien zu einem Isolationssystem benutzt werden können.

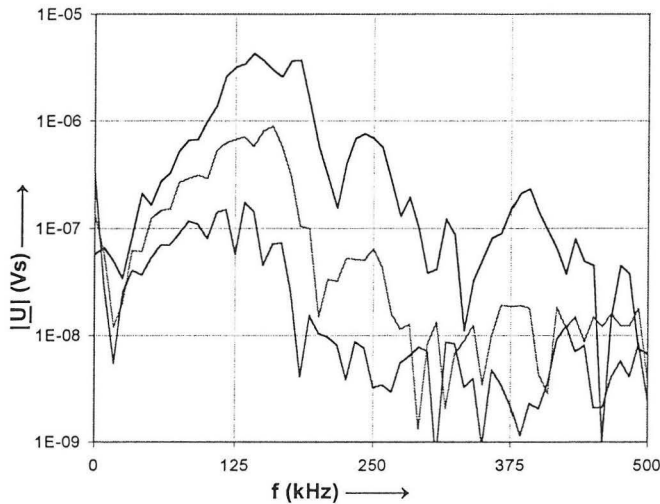


Fig. 2

Linearer Abfall des Spektrums bei zunehmender Anzahl der Boards (v.o.n.u. ungedämpft – ein 4 mm Pressboard – zwei 4 mm Pressboards)

Zur Untersuchung der vorab erwähnten Teilaspekte wurde auch eine Kalibrier-TE-Quelle entwickelt und eingesetzt. Sie erlaubt die Erzeugung von Teilentladungen in kleinen Volumina in Aufbauten, die nicht unter Hochspannung gesetzt werden können bzw. deren Isolation zur TE-Erzeugung nicht zerstört werden darf. Weitergehende Messungen akustischer Teilentladungen wurden damit bereits an Transformatoren ohne Beeinträchtigung des Isolationsaufbaus durchgeführt.

3.2 Wellenausbreitung im Kesselblech

Der zweite Teil des Ausbreitungswegs zwischen TE-Quelle und Sensor führt über die Kesselwandung des ölisierten Geräts. Neben dem Isolationsaufbau ist sie damit eine weitere Kenngröße, die dem Wellenzug ihren Stempel aufprägt. Kennzeichnend sind im Aufbau eines Kesselgehäuses nicht mehr wie bei der Isolation die Materialunterschiede. Wesentlich sind hier die Konstruktion und die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit mit der damit verbundenen Laufzeit und der Dispersion.

Die Laufzeit ist ein relativ einfaches und zuverlässiges Mittel, eine Ortung der TE-Quelle durchzuführen. Da die Laufzeit und die Wellengeschwindigkeit in Stahl gravierend von der der Öl-Papier-Isolation abweicht, muss auch der Eintrittspunkt des Schalls in die Kesselwandung bestimmt werden. Zu beachten ist hierbei auch die Dispersion. Sie wird hervorgerufen durch verschiedene Geschwindigkeiten innerhalb des Wellenpakets, die stark von den Eigenfrequenzen seiner Teilwellen und der Plattendicke abhängen. Zur richtigen Bestimmung des Eintrittspunkts bzw. der Laufzeit ist daher immer die Eigenfrequenz des Wellenpakets mit seiner zugehörigen Geschwindigkeit zu bestimmen.

Hinsichtlich der Konstruktion muss beachtet werden, dass sich ein Sensor stets so nahe wie möglich bei einer TE-Quelle befindet, um die Ausbreitungsstrecke zu minimieren. Technisch ist dies jedoch nicht immer machbar und auch nicht immer sinnvoll. Vor allem in der Nähe von Verstrebungen verschlechtert sich das Messsignal zusehends, weshalb ein Sensor auch vorzugsweise in der Mitte großer und dünnwandiger Plattenkonstruktionen zu befestigen ist. Da

Platten weniger starr sind und eine geringere Masse aufweisen, ist schon ein weniger starker und niederfrequenter Puls ausreichend, sie zu Schwingungen anzuregen.

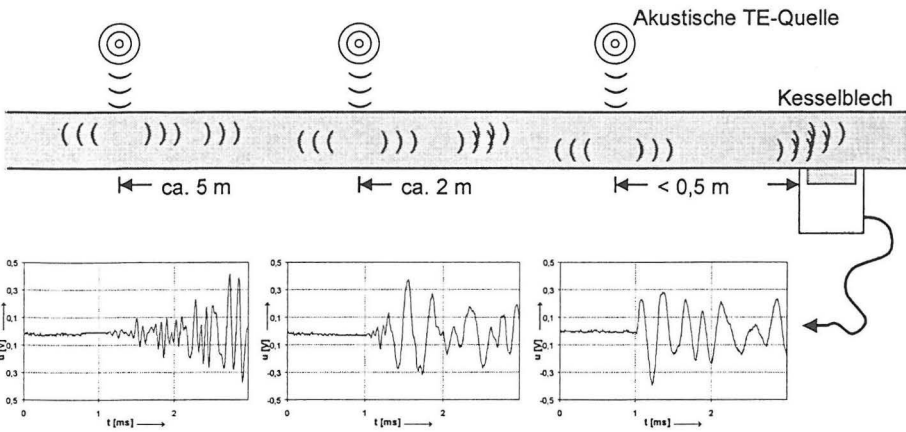


Fig. 3
Ortung mit akustischen Signalen über die je nach Eintrittspunkt verschiedene Dispersion und Laufzeit

Zur näheren Charakterisierung von bestehenden mechanischen Aufbauten (Kesseln) wurde ein akustischer Kalibrator eingesetzt. Er beaufschlagt das Kesselblech mit einer Schallwelle und misst gleichzeitig an einer ausgewählten Sensorstelle das „verformte“ Signal. Aus dem Vergleich zwischen eingestrahelter Welle und ausgekoppelter Welle können Rückschlüsse auf z. Bsp. die Steifheit der Kesselkonstruktion gemacht werden. Somit kann eine vorher gewählte Position hinsichtlich ihrer Eignung als Messstelle näher beschrieben werden und später zu erwartende Eigenresonanzen und Dämpfungen bestimmt werden.

3.3 Sensorik, Messtechnik und signifikante Signalparameter

Die zu messenden Teilentladungsimpulse haben eine eigene akustische Charakteristik. Sie wird stark beeinflusst durch die Übertragungsfunktionen der Medien entlang des Ausbreitungswegs. Die am Sensor eintreffenden Wellen weisen daher einen verschiedenen Verlauf auf und haben quasi ihre eigene Charakteristik. Diesen Eigenschaften muss ein Sensor entsprechen, wenn mit optimaler Empfindlichkeit gemessen werden soll.

Um mechanische Wellen in elektrische Signale umzuwandeln, sind piezoelektrische Sensoren am gebräuchlichsten. Die Gruppe der Schallemissionsensoren eignet sich Fall im des Monitoring Öl-Papier-isolierter Geräte am besten. Sie zeigen die beste Übereinstimmung mit dem Spektrum eines TE-Pulses. Ausserdem besitzen sie gegenüber Beschleunigungssensoren im unteren Frequenzbereich ein geringeres mechanisch-elektrisches Umsetzungsvermögen, was starke niederfrequente Störer bereits natürlich unterdrückt. Ihre Breitbandigkeit erweist sich auch als Vorteil für eine Filterung weiterer Störer, da der verbleibende Energieanteil im Spektrum immer noch hoch genug für eine empfindliche TE-Detektion ist.

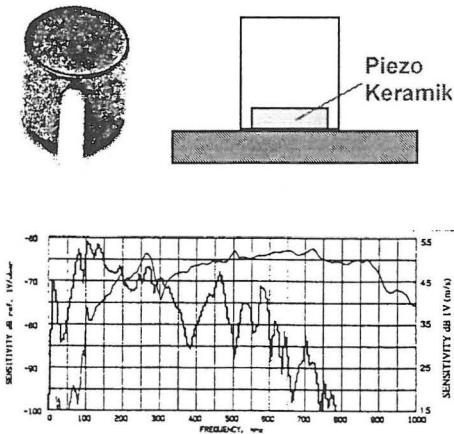


Fig. 4
Schallemissionssensor zur akustischen TE-Messung an Transformatoren Online: Foto (Ø 17 mm, H 16 mm), Schnittbild und spektrale Empfindlichkeit

Über breitbandig ausgekoppelte akustische Impulse lassen sich auch signifikante Parameter ermitteln. Beispiele hierfür sind Eigenfrequenzen, Spektralverlauf, zeitlicher Verlauf, Abklingen, Reflektionen, usw. Die Breitbandigkeit dient damit der sicheren Klassifikation des aufgezeichneten akustischen Vorgangs.

Zusätzliche Hilfsmittel in der Sensorik erlauben eine Verbesserung der Erfassung akustischer Wellen. So kann beispielsweise über die Verwendung von Wellenleitern eine verlustarme Weiterleitung der Schallwellen durch die Kesselwandung hindurch erfolgen. Möglich sind Wellenleiter, die nur bis in die Nähe des Aktivteils, oder auch solche, die bis in die Wicklung hinein reichen. Beachtet werden muss hierbei jedoch das frequenzabhängige Übertragungsverhalten des Wellenleiters und seine Eignung zum Einsatz im Transformator- und Wicklungsinnen. Auch kann eine eventuell vorhandene Richtwirkung diese Methode sehr unempfindlich gegenüber Entladungen machen, die sich nicht im Richtkegel befinden.

4 Akustische Messungen im Labor und vor Ort und erreichbare Empfindlichkeiten

4.1 Messungen im Labor und resultierende Empfindlichkeit

Da Hochspannungsgeräte im Prüffeld unter Laborbedingungen gemessen werden, sind hier bessere Empfindlichkeiten möglich, als vor Ort. Diese begründen sich aber hauptsächlich auf die Abwesenheit eines Laststroms, der direkt die Wicklungen anregt und indirekt durch sein Magnetfeld oder durch Induktion zum Störer wird. Weitere starke Störer, zu denen auch das relativ breitbandige Magnetisierungsrauschen gehört, sind weiterhin unverändert vorhanden.

Der mechanische Aufbau bleibt, soweit es die akustische TE-Messung betrifft, unverändert. Veränderungen im Umfeld (Lüfter, Umgebungsgeräusche,...) liegen in einem zu tiefen Frequenzbereich, um als Störer wirksam zu sein. Es lässt sich daher im Vergleich zur Messung vor Ort nur eine mittelmässige Verbesserung der Empfindlichkeit erreichen.

Höhere Empfindlichkeiten sind nur erreichbar, wenn das mechanische Gesamtsystem verändert wird. Angeführt werden kann hier die Verwendung von Hydrophonen oder Schallwellenleitern, die in der Nähe von feldkritischen Bereichen angebracht werden, und deswegen besonders überwacht werden müssen. Auch ist eine Kombination des akustischen mit dem (im Labor sehr empfindlichen) elektrischen System möglich, um akustische TE-Impulse besser im Signal auffindbar zu machen.

4.2 Störungen vor Ort und Abhilfemöglichkeiten

In Betracht kommende Störungen sind beinahe ausschliesslich mechanischer Natur. Elektrische Störer, wie beispielsweise Radiosender oder Korona haben keinerlei Einfluss auf die akustische Messtechnik. Langwellensender koppeln nur ein, wenn der Messkreis sehr ausgedehnt und das empfangene Signal sehr schwach ist.

Die am häufigsten oder auch kontinuierlich auftretenden Störungen sind im Transformator selbst zu suchen. Die 50 Hz-Komponenten des Stromflusses bilden hierbei im Frequenzbereich betrachtet die untere Grenze des Störbereichs. Pumpengeräusche (vor allem Kavitation) und insbesondere das Magnetisierungsrauschen des Kerns stellen den Hauptanteil dar, der sich teilweise noch bis in den Frequenzbereich der akustischen TE hinein erstreckt. Die obere Grenzfrequenz kann mit ca. 50 kHz angegeben werden.

Das Spektrum akustischer Teilentladungen erstreckt sich vor allem auf den Frequenzbereich von 20...200 kHz, wobei sich das Maximum der Signalenergie bei etwa 150 kHz befindet.

Ausreichend ist daher eine steilflankige Hochpassfilterung des Messsignals. Mit ihr lässt sich das akustische Signal von den Störsignalen separieren.

4.3 Messungen vor Ort und resultierende Empfindlichkeit

Abbildung 5 zeigt einen akustischen TE-Impuls, der einem Grundstörsignal überlagert ist. Dieses Störsignal besteht hauptsächlich aus den 50 Hz-Vielfachen, Lüfter- und Pumpengeräuschen und dem Kernmagnetisierungsrauschen. Langwellensender konnten im Messsignal nicht festgestellt werden. Der Sensor war bei dieser Messung auf einer 30 mm starken Stahlplatte im Abstand von ca. 0,5 m von der TE-Quelle entfernt. Die wahre elektrische Amplitude konnte zu 80 pC bestimmt werden. Die von einem elektrischen TE-Messsystem festgestellte scheinbare elektrische Ladung würde nur einen Bruchteil hiervon betragen und damit mit Sicherheit unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

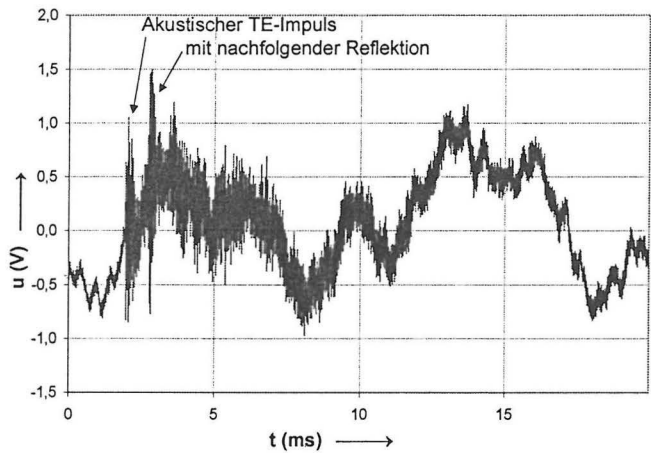


Fig. 5
Zeitsignal einer akustischen TE-Messung (TE und Störung)...

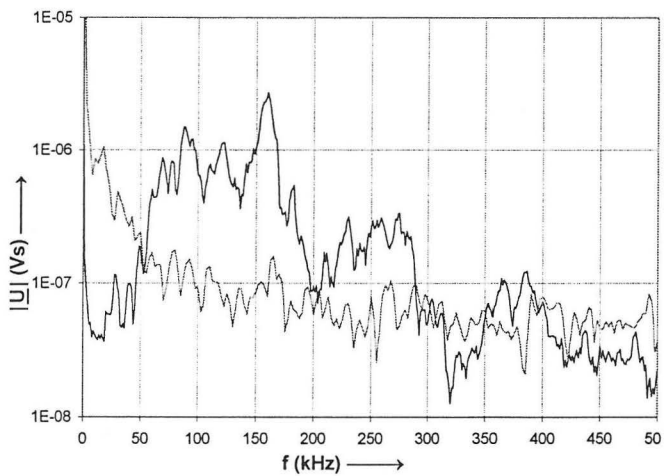


Fig. 6
...und ausschlaggebende Spektralanteile der Störungen (0...50 kHz) und der akustischen TE (50...200 kHz)

An diesem Beispiel lässt sich das hohe Potential des akustischen Verfahrens hinsichtlich einer empfindlichen TE-Messung erkennen. Dies ist vor allem durch die gute Unterscheidbarkeit der Signalanteile „Störer“ und „TE“ gegeben. Eine hochqualitative Filterung, die es vermag, den Störanteil unterhalb 50 kHz hinreichend zu unterdrücken, kann damit ein einfach auszuwertendes Signal liefern.

Weitere mögliche TE-Stellen liefern ähnliche Ergebnisse. Grundsätzlich wird deren Signal durch eine zunehmende Entfernung und dabei durch eine verstärkt auftretende Dämpfung beeinflusst. Ausserdem muss auch TE-Quellen Rechnung getragen werden, die nicht an der Oberfläche der Wicklung, sondern in einer gewissen Tiefe auftreten. Die dabei tatsächlich auftretende Dämpfung ist stark von der Beschaffenheit der Isolationsmaterialien und der Geometrie des Kessels und der Wicklung abhängig. Es kann daher eine „Messbereich“ beziehungsweise eine „Messtiefe“

anhand eines zweidimensionalen Wicklungsquerschnitts erstellt werden, wie es auch in der folgenden Abbildung gezeigt ist.

In dieser stark vereinfachten Skizze wurde von einer Oberspannungswicklung ausgegangen, die ihre Hochspannungsausleitung in der Mitte besitzt. Neben der Spannungsverteilung ist auch ein Aufriss der „Messtiefe“ gegeben. Tiefer liegende und dunkel gefärbte Bereiche weisen darin eine geringere Messempfindlichkeit auf als Wicklungsteile an der Oberfläche. Generell ist aber von einer empfindlichen Erfassung der Hochspannung führenden Einbauten auszugehen. Ein konkretes Modell lässt sich jedoch nur mit präzisen Wicklungsdaten erstellen.

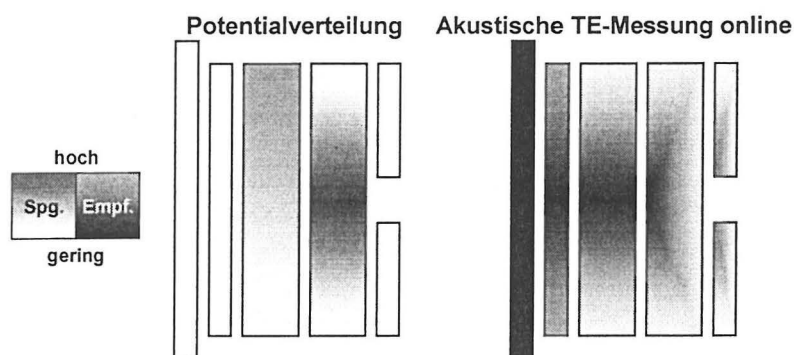


Fig. 7

Vereinfachte Skizze der Potentialverteilung und des empfindlich überwachbaren Bereichs, der die „Messtiefe“ des Systems angibt (von links nach rechts jeweils: Kern, US-, MS-, OS-, Regelwicklung)

Präzise Wicklungsdaten und die Kenntnis des Ausbreitungswegs liefern auch die weiteren Parameter, die eine automatische TE-Erkennung erlauben. Dieser Algorithmus muss so eingestellt werden, dass er bekannte Ausbreitungswege, Dämpfungen, Sensorcharakteristiken,... berücksichtigt und darauf basierend erkennt, ob ein TE-Impuls oder ein Störimpuls vorliegt.

5 Zusammenfassung

Da Hochspannungsgeräte im Prüffeld unter Laborbedingungen gemessen werden, sind hier teilweise weitaus bessere Empfindlichkeiten möglich, als vor Ort. Die elektrische TE-Messung kann bei einer Diagnose stark von diesem geringen Störpegel im Prüffeld profitieren. Sie stellt mit einer Empfindlichkeit von wenigen pC scheinbarer Ladung über den ganzen Wicklungsblock eine äusserst empfindliche Methode dar. Bei den äusserst starken Störern im Online-Messsystem vor Ort ist die elektrische TE-Messung jedoch gravierend beeinträchtigt. Trotz des Einsatzes moderner Filtertechnik erreicht sie nur eine Nachweisgrenze von ca. 1000 pC.

Die Störgeräusche in der akustischen TE-Messung sind hauptsächlich durch die 50 Hz-Komponenten und das Magnetisierungsrauschen gegeben. Sie treten sowohl vor Ort, als auch im Prüffeld auf. Nur wenige akustische Störer sind im Prüffeld nicht zugegen, weshalb die Empfindlichkeitssteigerung, verglichen mit einer Messung vor Ort, auch nur gering ausfällt. Die beeindruckende Empfindlichkeit der akustischen Methode vor Ort wirkt daher im Prüffeld nur als ausreichend. Eine über das Monitoring hinausgehende Lokalisierung eines Defekts kann generell nur über die Akustik erreicht werden.

6 Literatur

- [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
- [Lauersdorf, 1998] M. Lauersdorf, „Ein neues Kompensationsverfahren für TE-Messungen an Transformatoren“, Haefely-Trench Symposium, Echterdingen, 1998

- [Lauersdorf, 1997] M. Lauersdorf, „Verfahren zur Unterdrückung von Koronastörungen bei Teilentladungsmessungen an Transformatoren vor Ort“, Dissertation, Universität Stuttgart, 1997
- [König, 1991] G. König, „Ein adaptives digitales Filterverfahren zur Unterdrückung hochfrequenter periodischer Störungen bei Teilentladungsmessungen“, Dissertation, Universität Stuttgart 1991.
- [Hartje, 1989] M. Hartje, „Erfassung von Teilentladungen an Leistungstransformatoren im Netzbetrieb“, Dissertation, Universität Hannover, 1989
- [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
- [Harrold, 1979] R.T. Harrold, „Acoustic Waveguides for sensing and locating electrical discharges in high voltage power transformers and other apparatus“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, Vol. PAS-98/2
- [Howells, 1978] E. Howells, E.T. Norton, „Detection of partial discharges in transformers using acoustic emission techniques“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, Vol. PAS 97/5