

PC-gestützte Messung und Analyse von Teilentladungen zur On-Line- und Off-Line-Diagnose rotierender Hochspannungsmaschinen

M. Kaufhold A. Bethge
SIEMENS AG, Großmaschinen
Berlin

E. Lemke T. Strehl
LEMKE DIAGNOSTICS GmbH
Volkersdorf

Zusammenfassung: Zur Diagnose rotierender Hochspannungsmaschinen wird zunehmend die PC-gestützte Messung und Analyse von Teilentladungen in der Wicklungsisolierung eingesetzt. Dabei werden die gemessenen TE-Kenngrößen zur Indikation von Zustandsänderungen der Hochspannungswicklung genutzt. Die Potentiale der Diagnose werden hauptsächlich in der Qualitätssicherung, bei der zustandsorientierten Instandhaltung, in verringerten Life-Cycle-Costs und in der erhöhten Prozeßsicherheit gesehen. TE-Messungen können abhängig von der Diagnosestrategie on-line (im Betrieb) oder off-line (vom speisenden Netz getrennt) durchgeführt werden. Zur Auskopplung der TE-Signale stehen unterschiedliche Sensortechniken zur Verfügung, die je nach Anwendungsfall vorteilhaft eingesetzt werden können. Die Analyse der Meßergebnisse erfolgt anhand bestimmter TE-Kennwerte und TE-Muster. Bei der Interpretation der Meß- und Analyseergebnisse sind Einflüsse des Prüflings (Aufbau der Wicklung und des Isoliersystems), des Meßsystems (Frequenzband) und der Umgebungsbedingungen (Störsignale) zu berücksichtigen. Die Diagnose erfolgt vorzugsweise anhand von Trendbetrachtungen oder durch Kollektivbewertungen.

1. Ziele der Diagnose von Hochspannungswicklungsisolierungen

Die Beurteilung des Zustandes der Wicklungsisolierung rotierender Hochspannungsmaschinen mit Hilfe diagnostischer Meßtechnik erfolgt generell mit Hilfe von integralen Verfahren wie Verlustfaktor- und Widerstandsmessungen oder bzw. und mit der TE-Meß- und Analysetechnik, die lokal stark begrenzte Defekte detektieren kann. Mit solchen diagnostischen Messungen werden unterschiedliche Zielstellungen verfolgt: Neue Isoliersysteme werden untersucht, um deren Eig-

nung im Rahmen von Entwicklungsprozessen hinsichtlich der eingesetzten neuen Werkstoffe, Konstruktionsprinzipien oder Fertigungstechnologien zu beurteilen. Es werden an gefertigten Maschinen regelmäßig Messungen im Prüffeld durchgeführt, um die Qualität nachzuweisen und um "Neuwerte" für spätere Trendanalysen beim Betreiber zu generieren. Auch für die zustandsorientierte Wartung und Instandhaltung hat die TE-Messung und -Analyse in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Hier ist es insbesondere mit Trend- und Kollektivbewertungen der Meßergebnisse möglich, den Instandhaltungsaufwand älterer Anlagen unmittelbar auf die betroffenen Maschinen zu fokussieren und damit keine unnötigen Demontage- und Wartungsarbeiten an betriebssicheren Maschinen aufzuwenden. Dadurch können besonders bei stark beanspruchten Maschinen die Prozeßsicherheit erhöht und die Life-Cycle-Costs reduziert werden. Das Potential der TE-Meßtechnik, lokale Änderungen und Defekte des Isoliersystems zu detektieren, wird durch PC-gestützte Messung und Analyse erschließbar, die für die Auswertung hilfreiche Datenkompression gestattet und damit TE-Muster und Kennzahlen wie TE-Häufigkeiten, Polaritätseinflüsse, TE-Amplituden liefert [1,2,3,4]. Die Möglichkeiten und Grenzen derartiger Zustandsbeurteilung rotierender Hochspannungsmaschinen sind bei Herstellern und Betreibern in sehr unterschiedlichem Maße bekannt. Sie werden durch keine Normen beschrieben und erlangen zunehmend an Bedeutung. Im Unterschied zu vielen anderen diagnostischen Verfahren können TE-Messungen sowohl während des laufenden Betriebes der Maschine (on-line) als auch getrennt vom Netz mit Hilfe einer zusätzlichen Prüfspannungsanlage (off-line) durchgeführt werden.

Tabelle 1 Vor und Nachteile diagnostischer on-line und off-line TE-Messungen

On-line Messung	Off-line Messung
Elektrische, thermische, mechanische und Umweltbeanspruchungen sind betriebstypisch	Ausschließlich elektrische Beanspruchung des Isoliersystems
Nur Diagnose der elektrisch hoch beanspruchten Wicklungsteile	Variable Spannung Testschaltungen ermöglichen differenzierte Detektion unterschiedlicher TE-Prozesse
Erhöhte Störsignalbelastung und kompliziertere Störsignalunterdrückung	Geringere Störsignalbelastung und einfachere Störsignalunterdrückung
Erfordert Investition und Umbau im Bereich der Maschinenklemmen	Messungen erfordern Eingriff in den betrieblichen Ablauf und umfangreiche Prüftechniken
Geringer Meßaufwand gestattet beliebig häufige, aufeinanderfolgende Messungen ohne Eingriff in den betrieblichen Ablauf	Im Rahmen zustandsorientierter Wartung und Instandhaltung auf eine relativ lange Dauer zwischen den Meßzyklen beschränkt

Aus diesen unterschiedlichen Verfahren ergeben sich Vor- und Nachteile (Tabelle 1), die bei der Entscheidung für eine Methode gezielt berücksichtigt werden sollten. Je nach Interessenlage der Betreiber und Instandhaltungskonzept werden gegenwärtig beide Verfahren erfolgreich angewendet. Aufgrund der einfachen Handhabung und der Fortschritte bei der Beherrschung der Störsignalprobleme wird sich die on-line Messung voraussichtlich stark verbreiten. Einsatzgebiete der off-line Messung werden sich neben den Arbeitsgebieten Entwicklung und Qualitätssicherung zunehmend auf die Untersuchung bereits "auffälliger" Maschinen konzentrieren, da sich hier der höhere Aufwand eher rentiert.

2. TE-Meßtechniken für rotierenden Maschinen, Einflüsse auf das Meßergebnis

Für die Diagnose der Wicklungsisolierung rotierender Hochspannungsmaschinen werden recht unterschiedliche Meßtechniken eingesetzt. Sowohl bei on-line als auch bei off-line Messungen werden das in IEC 270 empfohlene Auskoppelverfahren (Standard-Meßkreis) wie auch alternative Sensor-Meßtechniken angewendet [5,6,7]. Der Standard-Meßkreis basiert auf der kapazitiven Auskopplung eines Teiles der im Prüfling umgesetzten Impulsladung an den Klemmen der Maschine mit Hilfe eines Koppelkondensators und einer Meßimpedanz. Alternative Auskoppelverfahren nutzen hauptsächlich kapazitiv oder induktiv wirkende Sensoren, die an unterschiedlichen Stellen innerhalb des komplexen Übertragungssystems der Maschinenwicklungen vorteilhaft implementiert werden können. Als Bewertungseinheit werden jeweils Schmalband- oder Breitbandsysteme genutzt, die eine mehr oder weniger korrekte Integration der schnellen Stromsignale realisieren und damit Impulsladungen messen. Die Begriffe schmal- bzw. breitbandig beziehen sich dabei auf die Bandbreiten der zu messenden Signale. Die ebenfalls verwendeten "ultrabreitbandigen" Meßsysteme haben wesentlich höhere Bandbreiten als die zu messenden Signale und verwenden hohe untere Grenzfrequenzen, so daß keine ladungs- sondern stro-

mimpulsproportionale Bewertungen der Einzelimpulse erfolgen.

2.1 Standard-Meßkreis

Das Meßergebnis Einzelimpulsladung hängt von fünf wesentlichen Einflüssen ab:

- I. Eigenschaften des Entladungsmechanismus wie Stromamplitude, Stromverlauf und Folgefrequenz der Einzelimpulse
- II. Übertragungsfunktion zwischen Entladungsort und Maschinenklemmen
- III. Übertragungsfunktion zwischen Maschinenklemmen und Bewertungseinheit
- IV. Frequenzspektrum der Kalibrierimpulse
- V. Bandbreite und Integrationsverfahren der Bewertungseinheit

Die Übertragungsfunktion II führt zu dem unbekannten Verhältnis zwischen wahrer und meßbarer Ladung. Die Einflüsse III und V können teilweise durch eine Kalibrierung kompensiert werden, wodurch aus der gemessenen Ladung eine Scheinladung entsteht. Dabei wird versucht, wenn schon nicht die wahre Ladung dann wenigstens jene Impulsladung zu ermitteln, die infolge der Teilentladung in der Koppel- und Prüflingskapazität verschoben wird. Die meßbare Ladung ist ein Maß für die Empfindlichkeit des Meßsystems und stets nur ein von dem Verhältnis Koppelkapazität (0,1 ...10 nF) zu Prüflingskapazität (1...> 1000 nF) bestimmter Bruchteil der Scheinladung, wobei die tatsächlich erreichbare Empfindlichkeit bei großem Kapazitätsverhältnis zusätzlich durch die komplexe Meßkreisimpedanz einschl. Leitungslängen und -führung reduziert wird (**Bild 1**).

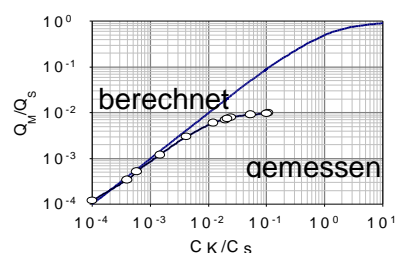


Bild 1 Meßbare Ladung und erreichbare Empfindlichkeit abhängig von Koppel- und Statorwicklungskapazität

Der massive Einfluß des Kapazitätsverhältnisses auf das Meßergebnis ist ein wichtiger und teilweise unterschätzter Beweggrund für das Kalibrieren. Es ist zwar nicht hinreichende aber notwendige Bedingung für Vergleichbarkeit.

Aufgrund erhöhter Störprobleme bei on-line Messungen werden dabei üblicherweise Koppler mit kleineren Kapazitäten (0,1 ... 1 nF) als bei off-line Messungen (1 ... 10 nF) eingesetzt [8].

Die Transferfunktionen II und III führen zu einer starken Reduzierung des Frequenzspektrums der Strom- und Spannungssignale, die aufgrund der Resonanzen oszillierenden Verlauf zeigen und dadurch zusätzlich das Meßergebnis beeinflussen [9,10]. Die Dämpfungseigenschaften der Funktion II führen zu einer abnehmenden gemessenen Scheinladung, wenn der Entladungsort elektrisch weiter von den Klemmen entfernt ist (Bild 2). Dieser Einfluß ist um so prägnanter, je größer die Bandbreite und je höher die untere Grenzfrequenz des Meßkreises einschließlich der Bewertungseinheit sind (Bild 2). Das ist der Hauptgrund dafür, daß "ultrabreitbandige" Meßsysteme nur wenige Windungen weit in die Wicklung "hinein sehen" und elektrisch weiter entfernt liegende Quellen nicht detektiert werden können.

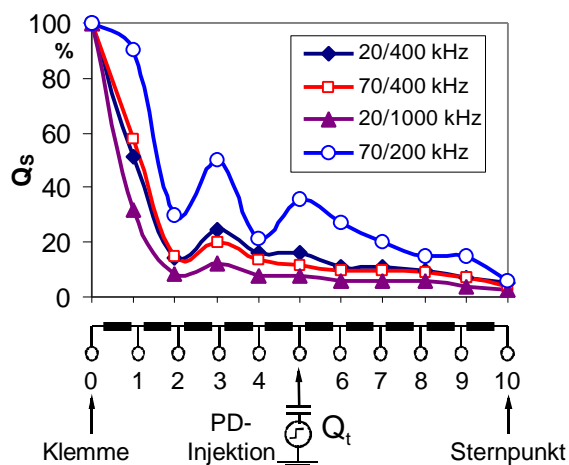


Bild 2 Mit unterschiedlichen Detektoren gemessene Scheinladung abhängig vom Entladungsort

Aus Bild 2 ergibt sich die Schlußfolgerung, daß TE-Messungen am Sternpunkt generell nur den elektrisch kaum oder gar nicht beanspruchten Teil der Wicklung fokussieren, während die Messungen an den Maschinenklemmen die elektrisch hoch beanspruchten Wicklungsteile „sehen“

2.2 Alternative Sensormeßtechniken

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren, [7, 17] die man nach deren dominanter Übertragungseigenschaft einteilen kann:

- kapazitiv (z. B. „C-Sensor“, „Kabelkoppler“)
- induktiv (z. B. L- Sensor, HF-Stromtransformator [18])
- elektromagnetisch („Stator-Slot-Coupler“ [11], Fern-Richtkoppler,).

Die unterschiedlichen Kopplungseigenschaften der Sensoren bewirken ungleiche Empfindlichkeiten und sie sind unterschiedlich stör anfällig. Dies ist auch durch Kalibrieren nicht zu kompensieren.

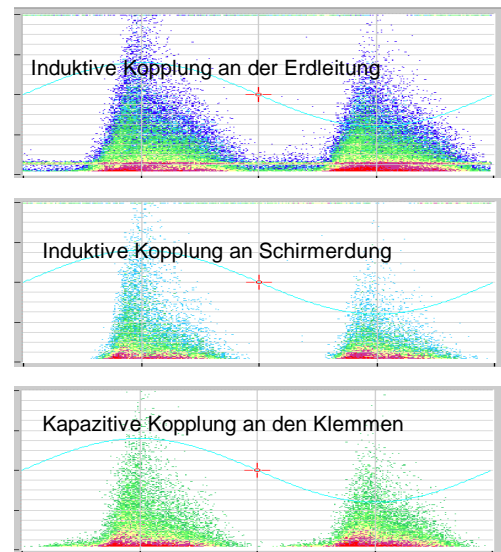


Bild 3 Ergebnisse einer TE-Messung mit unterschiedlichen Sensoren an einer betriebsgealterten Hochspannungsmaschine, gemessen mit Meßsystem LDS-5

Bei gleichem Meßfokus jedoch können die Ergebnisse qualitativ vergleichbar sein (**Bild 3**).

Der Einsatz spezieller Sensoren wird hauptsächlich nach folgenden Kriterien gewählt:

- Permanenter oder vorübergehender Ein- oder Ausbau?
- Für on-line oder für off-line Messungen?
- Betriebsunterbrechung erforderlich?
- Ausfallrisiko (Sensor, Maschine)
- Störsignalprognose
- Feinortung notwendig?

Wenn eine Betriebsunterbrechung der Maschine für die Sensorinstallation nicht möglich ist, kommen ausschließlich Verfahren zum Einsatz, die nach dem Prinzip der induktiven Feldauskopplung der TE-Signale arbeiten. Dabei werden die Sensoren an den Erdleitungen des Schirmes der Anschlußkabel oder an der Erdleitung der Maschine selbst angebracht. Das Maschinengehäuse und das Stator-Blechkpaket sind mit der Hochspannungswicklung kapazitiv gut gekoppelt. Infolgedessen fließt ein Teil des transienten TE-Stromes über die Impedanz der angeschlossenen Erdleitung ab und kann so über sein magnetisches Feld mit Magnetfeldantennen, sogenannten L-Sensoren auf Erdpotential gemessen werden.

Speziell für die Feinortung in Wicklungsisolierungen wird die kapazitive Feldauskopplung von TE-Fehlstellen angewandt. Dabei wird die Streukapazität zwischen Wicklung und Sensor genutzt. Der Sensor ist mit einer tragbaren potentialfreien Sonde verbunden und kann so entlang der Wicklung bewegt

werden, um den Ort der höchsten TE-Intensität einzugrenzen (**Bild 4**). Dieses Prinzip wird bei zweikanaligem Differentialbetrieb der Sonde durch Kompensation noch verstärkt,

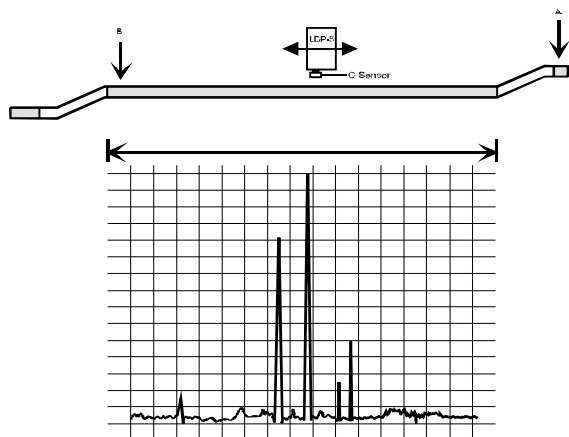


Bild 4 Feinortung von TE-Quellen mit kapazitiver Sondenmeßtechnik

wodurch noch exakter lokalisiert werden kann [19].

3. Anforderungen an Meß- und Analysesystem

TE in Wicklungsisolierungen rotierender Hochspannungsmaschinen zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Dynamik der Amplituden von $<0,1 \dots >100$ nC
- Folgefrequenzen über 100 kHz
- Resonanzen und obere Grenzfrequenzen der TE-Signale an den Klemmen > 10 MHz
- Positive und negative Polarität

Meßsysteme, die für die Diagnose solcher Isoliersysteme geeignet sind, müssen daher eine hohe Einzelimpulsdynamik (z. B. durch logarithmische Bewertungseinheit) bei hohem, polaritätsgerechtem –Auflösungsvermögen aufweisen, um Fehlinterpretationen durch systematische Meßfehler wie z.B. Über- oder Untersteuerung, Überlagerungsfehler, Polaritätsfehler, Patternverformung, Verfälschung der Impulshäufigkeiten auszuschließen.

Zur Analyse der TE-Aktivitäten im Isoliersystem messen und speichern die Systeme die „Urinformationen“

- Spannungsverlauf $U(t)$
 - Höhe der Einzelimpuls Ladungen $q(t)$
- Daraus werden bei dem verwendeten Meßsystem folgende weiterführende Informationen für beide Polaritäten getrennt erarbeitet:
- Zuordnung der Einzelimpuls Ladungen zur Phasenlage der Spannung $q(\phi)$
 - TE-Pattern aus der Häufigkeit aller ermittelten Einzelimpuls Ladungen über der Phase $H(q, \phi)$
 - Phasengerechte Zuordnung der Häufigkeit $H(\phi)$, der maximalen Ladungen $q_{\text{peak}}(\phi)$ und der Ladungsmittelwerte $q_{\text{mean}}(\phi)$

- Entladungshäufigkeit abhängig von der Ladungshöhe $H(q)$

4 Erfahrungen aus Diagnosemessungen an Isoliersystem-Modellen

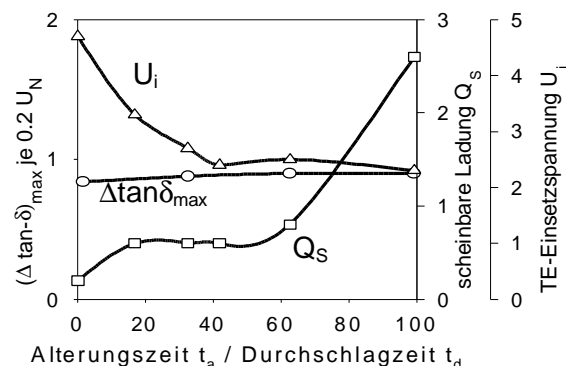
4.1 Trendbewertung von Alterungsmechanismen

In der Wicklungsisolierung von Hochspannungsmaschinen treten stets TE auf, die jedoch aufgrund der Materialauswahl und der Technologie der MICALASTIC-Isolierung zu keiner kritischen elektrischen Alterung des Isoliersystems führen.

Durch komplexe thermische, mechanische, elektrische oder andere Überbeanspruchungen kann jedoch auch eine robuste VPI-Glimmer-Isolierung infolge von Alterung in einen kritischen Zustand kommen. Zur Detektion solcher Alterungsmechanismen sind daher Trendanalysen sehr vorteilhaft einsetzbar.

In einem Langzeitversuch wurde die Nutisolation spezieller Modellspulen elektrisch überbeansprucht (erhöhte Frequenz und Amplitude der Spannung, Raumtemperatur) und zyklisch wurden Diagnosemessungen daran durchgeführt.

Bild 5 TE- und Verlustfaktorwerte während beschleunigter elektrischer Alterung einer Modell-Wicklungsisolierung



Während keine starken Änderungen im Verlustfaktoranstieg beobachtet werden konnten, veränderten sich sowohl maximale Scheinladung als auch Einsatzspannung der Isolierung erheblich (**Bild 5**). Während dieses rein elektrischen Alterungsprozesses haben sich insbesondere vor dem Durchschlag auch TE-Pattern, TE-Häufigkeit und Spannungssteigerungskurve verändert. Ähnliches ergab sich auch in Versuchen, bei denen Isoliersysteme mit umrichtertypischen Impulsspannungen erhöhter Amplitude, Anstiegszeiten von 100 ns und 10 kHz Folgefrequenz elektrisch gealtert wurden[12].

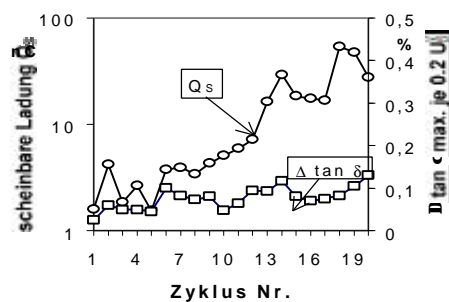


Bild 6 Veränderung von TE- und Verlustfaktorwerten im Verlauf rein thermischer Alterung

Auch während zyklischer, rein thermischer Alterung mit 20 24-h-Zyklen zwischen 20 °C und 110% maximal zulässiger Temperatur eines Isoliersystems von Hochspannungstatorwicklungen haben Trenduntersuchungen gezeigt, daß der Verlustfaktoranstieg kaum Hinweise auf fortschreitenden Veränderungen gibt, wohl aber die maximale Scheinladung (**Bild 6**) und insbesondere die Häufigkeit der Teilentladungen (**Bild 7**).

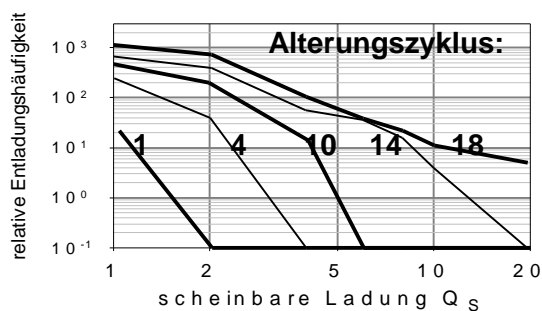


Bild 7 Zunahme der Entladungsenergie im Verlauf der rein thermischen Alterung

Im Verlauf der thermischen Alterung änderten sich die TE-Pattern und durch größere TE-Häufigkeit die durch Entladungsprozesse in der Isolierung umgesetzte Energie. Bei diesem Experiment wurde durch weitergehende Untersuchungen bestätigt, daß infolge der thermo-mechanischen Wechselbeanspruchung räumlich relativ kleine Zonen im Nutaustrittsbereich delaminierten und damit zunehmend sowohl mechanische als auch elektrische Festigkeit verloren. Dieser spezielle Prozeß konnte durch Verlustfaktormessungen nicht detektiert werden.

4.2 Zustandsbewertung des Isoliersystems

Im Rahmen von Entwicklungs- und Testaktivitäten wurden speziell behandelte Modellspulen diagnostiziert, um das Erscheinungsbild der TE bei bestimmten, nicht durch Alterung entstandenen Zuständen zu analysieren. Dabei wurden zum Beispiel unterschiedliche Polaritätsdominanzen abhängig davon gemessen, ob Hohlräume am Teilleiter, am Interface AGS-Blechkpaket oder aber im mittleren Bereich der Hauptisolierung installiert waren.

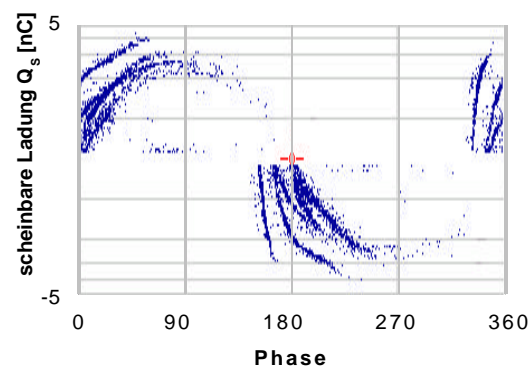


Bild 8 Typische Entladungspattern spezieller Modellspulen von Hochspannungswicklungen

Bild 8 zeigt beispielsweise, daß auch an weitgehend realen Isoliersystemen von Hochspannungswicklungen TE-Pattern gemessen werden können, die theoretisch vorausgesagt und an Einfachmodellen nachvollzogen wurden [13]. Aus solchen qualitativen Zusammenhängen kann bei sehr ausgeprägten Meßergebnissen realer Maschinen auf den Zustand der Wicklungsisolierung geschlossen werden.

5. Erfassung und Bewertung des Zustandes der Wicklungsisolierung betriebsgealterter Hochspannungsmaschinen

5.1 Komplexe Alterungsprozesse

An baugleichen 10 kV-Maschinen mit einer Leistung von 10 MW wurden erstmalig TE-Messungen nach ca. 50.000 h (Gruppe ABCDE) bzw. 150.000 h Betrieb durchgeführt (**Bild 9**).

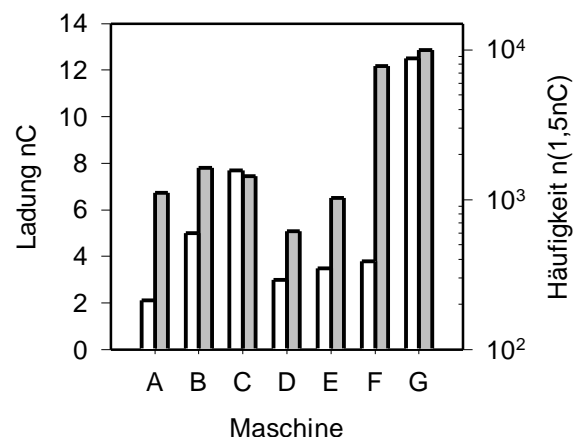


Bild 9 Vergleich von TE-Kennwerten gemessen an betriebsgealterten Maschinen (ABCDE: 50000h, FG: 150000 h)

Die Analyse der für die untersuchten 7 Maschinen aufgetragenen maximalen Scheinladungen und TE-Häufigkeiten bei 1,5 nC ergab:

- Die TE-Häufigkeit und TE-Maximalwerte der Gruppe ABCDE weisen eine typische Spannweite auf.

- Die älteren Maschinen F und G weisen höhere Entladungshäufigkeiten, nicht aber höhere Maximalwerte auf, als ABCDE.

Die Unterschiede zwischen ABCDE und FG weisen darauf hin, daß die längere Betriebsbeanspruchung von F und G sich wohl in der Häufigkeit der Entladungen, kaum aber in der Amplitude spiegeln.

Bei näherer Inspektion der Maschinen F und G wurde deutlich, daß Maschine G zusätzlich zur längeren Betriebszeit bei deutlich höheren Maximaltemperaturen betrieben wurde, als Maschine F. Die zusätzliche Unterscheidung der jeweils 8 Messungen an den Klemmen und am Sternpunkt der 3x1 und 1x3 Stränge dieser Maschinen ergibt vier unterschiedliche Beanspruchungsklassen (**Tabelle 2**), die sich deutlich in einer Clusterung der Meßergebnisse Verlustfaktor, TE-Amplitude und -Häufigkeit abbilden (**Bild 10**).

Tabelle 2 Beanspruchung der gemessenen Wicklungsbereiche

	Beanspruchung	
	thermisch	elektrisch
F, Sternpunkt	kaum	kaum
F, Klemme	kaum	Hoch
G, Sternpunkt	hoch	kaum
G, Klemme	hoch	Hoch

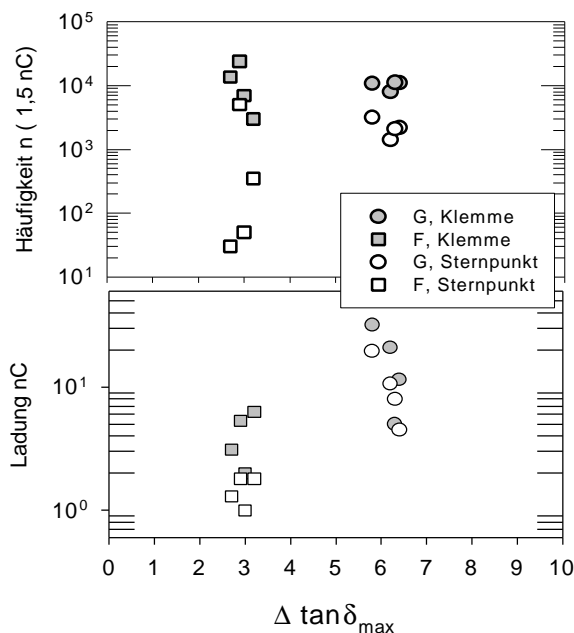


Bild 10 Analyse von Verlustfaktor- und TE-Kennwerten betriebsgealterter Wicklungen

Diese Clusterung spiegelt den jeweilig dominanten Alterungsmechanismus der untersuchten Wicklungsisolierung wieder (**Tabelle 3**) und zeigt prinzipielle Diagnosemöglichkeiten auf [14, 15, 16].

Tabelle 3 Alterungsbedingte Meßergebnisse

	Betriebsbedingte Alterung			
	kaum	thermisch	Elektrisch	Komplex therm./el.
$\Delta \tan \delta_{\max}$	/	+	/	+
TE-Häufigkt.	/	++	++	++
TE-Amplitude	/	+	+	++

5.2 Bewertung von Ertüchtigungsmaßnahmen

Das Isoliersystem der Statorwicklung eines 10 kV-8 MW-Antriebes wies in einem Alter von über 20 Jahren nach einer Betriebszeit von ca. 65.000 h aufgrund von umgebungsbedingten Alterungsprozessen (aggressive Flüssigkeiten und Gase) teilweise Schäden am Glimmschutzsystem auf. Vor und nach Ertüchtigung des Glimmschutzsystems wurden Verlustfaktor- sowie on-line und off-line TE-Messungen an dem Antrieb durchgeführt, um deren Auswirkung auf das Meßergebnis zu bestimmen. Während im Verlustfaktor praktisch keine Änderung ablesbar war, verringerten sich infolge der Maßnahme die maximalen TE-Amplituden leicht und die TE-Häufigkeiten stark. Besonders die Entladungen negativer Polarität, die vor den Arbeiten am Glimmschutzsystem stark dominierten, waren danach deutlich reduziert (**Bild 11**).

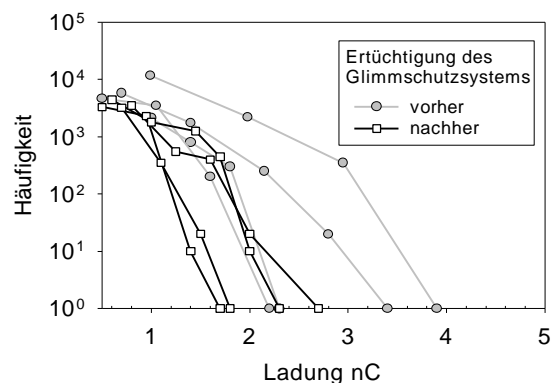


Bild 11 Häufigkeit negativer Entladungen vor und nach Ertüchtigung des Glimmschutzsystems

Diese Wirkung ist darauf zurückzuführen, daß eine bestimmte Entladungsart durch die Ertüchtigung weitgehend ausgeschlossen wurde, während andere TE, die als unkritisch bewertet werden können, nach wie vor stattfinden.

5.3 Berücksichtigung des Betriebszustandes

Besonders bei on-line Messungen ist es möglich, den Betriebszustand der Maschinen systematisch im Sinne einer Diagnose zu berücksichtigen (**Tabelle 1**). Unter anderem beeinflussen folgende Betriebsgrößen abhängig vom Zustand der Wicklungsisolierung die für die Diagnose genutzten TE-Prozesse:

- Wicklungstemperatur
- Temperaturgradienten
- Augenblickswert Drehzahl
- Augenblickswert Drehmoment
- Gehäuseschwingung

- An einer 24 Jahre alten 10 kV Maschine wurden on-line und off-line Messungen mit verschiedenen Sensortechniken (**Bild 3**) durchgeführt. Mit der induktiven Kopplung an der Erdleitung wurde ein einfaches Sensorprinzip verwendet, das hohe und gleiche Empfindlichkeit für on-line- als auch für off-line-Messung gestattet. Bei dieser Kopplung werden TE-Ereignisse alle Wicklungsstränge der Maschine über deren Kapazität der Hauptisolierung und den induktiven Sensor in gleicher Weise ausgekoppelt und der Bewertungseinheit zur Verfügung gestellt.

Die Maschine wies eine sehr ungleichmäßige Verteilung der TE-Aktivitäten aus, eine Phase dominierte, während die anderen Stränge geringe TE aufwiesen. Die für die Strangspannung der geschädigten Phase korrigierten TE-Pattern unterschieden sich abhängig davon, ob die Maschine on-line oder off-line gemessen wurde (**Bild 12**). Das erklärt sich aus der unterschiedlichen elektrischen und mechanischen Beanspruchung der Wicklungsisolierung während on-line bzw. off-line Messung.

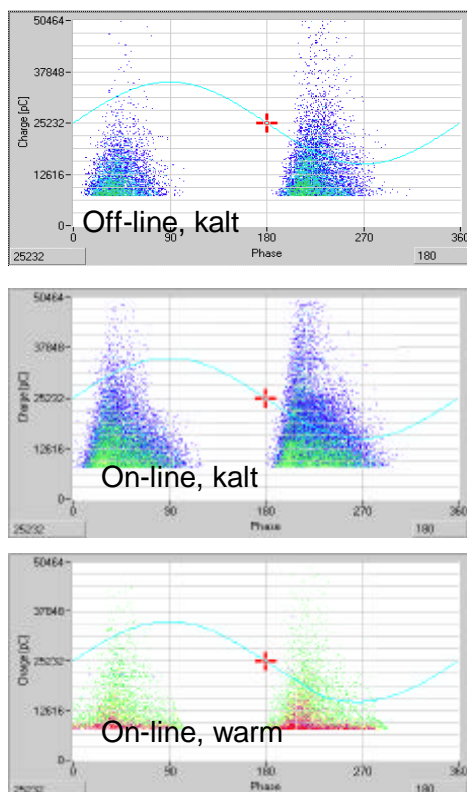


Bild 12 TE-Pattern einer betriebsgealterten Maschine gemessen on-line bzw. off-line bei unterschiedlichen Temperaturen

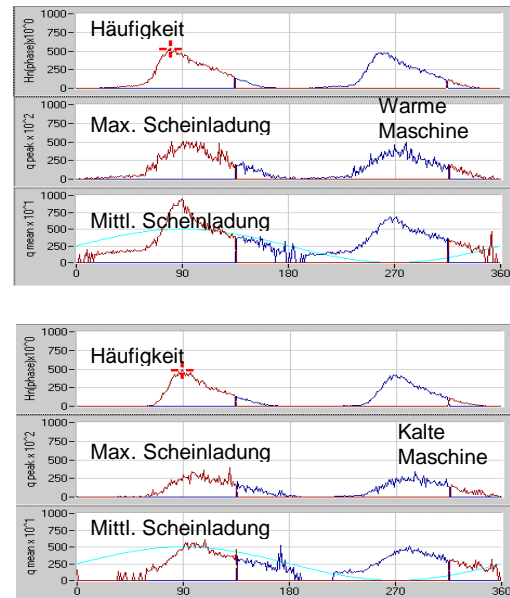


Bild 13 Vergleich von TE-Kenngrößen einer on-line Messung bei kalter und betriebswarmer Maschine

Bei der on-line Messung wird nur ein Teil der Wicklung elektrisch beansprucht, und je nach Stromstärke (Drehmoment) treten mechanische Spannungs- oder Schwingungszustände bei einer Frequenz von 100 Hz auf. Während die Maschinenwicklung off-line mechanisch praktisch nicht beansprucht wird, tritt jedoch eine elektrische Beanspruchung der gesamten Strangisolierung auf. Aufgrund der elektromagnetischen Kräfte des Wicklungskupfers in den Nuten können daher sowohl Amplitude und Häufigkeit als auch die Phasenlage von Teilentladungen neben der Strangspannung auch vom Strangstrom determiniert werden.

Es ist auffällig, daß bei off-line und bei on-line Messung der Maschine im kalten Zustand die Entladungen während der negativen Klemmenspannung dominieren, während dieser Effekt bei on-line Messung der Maschine in betriebswarmer

mem Zustand nicht auftritt. Deutlich wird das beim Vergleich der phasengerecht dargestellten TE-Kennwerte der on-line Messungen im kalten bzw. warmen Zustand (**Bild 13**). Bei kalter Maschine sind die Häufigkeit der Entladungen ca. 30% und die mittleren und maximalen Amplituden ca. 80 % höher, als bei warmer Maschine.

Die geringere elektrische Festigkeit der Luft und die höhere Permittivität der festen Isolierstoffe müßte den umgekehrten Effekt bewirken. Die Ursache ist deshalb anders zu erklären: Der Temperaturunterschied und auch der Unterschied in den Temperaturgradienten der Wicklungsisolierung bewirken aufgrund des geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten des Ständerblechpaketes und des Teilleiterkupfers mechanische Spannungen in der Nut. Dadurch können beispielsweise im kalten Zustand kleine Hohlräume oder Spalten entstehen, die im Betrieb bei höheren Temperaturen - die den Aushärttempe-

raturen der ganzgetränkten VPI-Wicklung entsprechen - nicht auftreten. Bei höheren Temperaturen nimmt die Isolierung ihren „Geburtszustand“ während der thermischen Aushärtung an, wird damit spannungsfreier und geringere TE-Amplituden und Häufigkeiten sind die Folge.

6. Schlußfolgerungen

Die elektrische TE-Messung zur Fehlerfrüherkennung in rotierenden Hochspannungsmaschinen ist sowohl im Bereich der on-line wie off-line Diagnose ein nützliches Instrument, das den Betreibern von Maschinen unnötige Ausfall- und Reparaturkosten erspart. Auf der Basis von Trendanalysen können Stillstandszeiten geplant werden.

Zur PC-gestützten Messung und Analyse von TE in rotierenden Maschinen stehen Meßsysteme zur Verfügung, die nicht nur die Beurteilung phasen aufgelöster TE-Muster, sondern auch die Anwendung einer Vielzahl weiterer Analyseverfahren sowie umfangreiche statistische Auswertungen ermöglichen. Mit derartiger Meßtechnik kann neben der Diagnose des Alterungszustandes und der Eingrenzung des Entladungsortes innerhalb des Isoliersystems auch der Typ bzw. die Ursache der Entladungen ermittelt und hinsichtlich seiner Relevanz für die Betriebssicherheit der Maschine bewertet werden.

Erst dadurch werden klare qualitative und quantitative Diagnosen möglich. Zur Diagnose von Wicklungsisolierungen ist allerdings zusätzlich die Kenntnis der Konstruktion und der verarbeiteten Werkstoffe sowie der Fertigungstechnologie der Maschine erforderlich. Außerdem ist es wichtig, die Beanspruchungen in der Vorgeschichte der Maschinenwicklung zu berücksichtigen. Insbesondere bei on-line Messungen ist es vorteilhaft, wenn für die Diagnose unterschiedliche Betriebszustände der Maschine eingestellt werden können.

Durch die systematische Verwendung der Datenbank, mit der alle Diagnosemessungen an Maschinen gespeichert und archiviert werden, wächst der Erfahrungsschatz und zukünftige Messungen und Analysen können auf den bisherigen Erkenntnissen aufbauen.

Literatur

- [1] Binder, E., Draxler, A., Egger, H., Hummer, A., Muhr, M., Praxl, G.: „Experience with On-Line and Off-Line PD Measurements of Generators“, CIGRE Session 1998
- [2] Warren, V., Stone, G.C., „Recent Developments in Diagnostic Testing of Stator Windings“ IEEE Electrical Insulation Magazine, September / October 1998, Vol. 14, No. 5, p. 16
- [3] Grünewald, P., Weidner, J.: Possibilities and Experience with Off- and On-Line Diagnosis of Turbine Generator Stator Winding Insulations.“ CIGRE-Session 1994, paper 11/206
- [4] Stein, R., Füglistner, T., Delwall, R., Gallasso, G.: „Modern Generator Monitor with Expert System.“ Proceedings of CIGRE/EPRI Colloquium on... Large Motors, Firenze, 1997, Volumen 2
- [5] DIN VDE 57 434 Hochspannungsprüftechnik; Teilentladungsmessung (1983)
- [6] „Partial discharge measurements“, IEC Publication 270, 1981 and Document IEC 42/149/CDV, 1999
- [7] „Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery“, Draft 8 of IEEE P 1434
- [8] Zhu, H., Green, V., Sasic, M., Halliburton, S.: „Increased Sensitivity of Capacitive Couplers for In-Service PD Measurement in Rotating Machines“, 1998 IEEE, PE-455-EC-0-2-1998
- [9] Kemp, I.J. et al., „Calibration Difficulties Associated with PD Detectors in Rotating machines“, Proceedings of the IEEE Electrical Insulation Conference, Chicago, October 1987
- [10] Shu, H., Kemp, I.J.; „Pulse Propagation in Rotating Machines and its Relationship to PD Measurements“, IEEE ISEI, Baltimore, June 1992
- [11] Warren, V., Stone, G.C., „Recent Developments in Diagnostic Testing of Stator Windings“ IEEE Electrical Insulation Magazine, September / October 1998, Vol. 14, No. 5, p. 16
- [12] Kaufhold, M., Bauer, K., Wang, H.: „High Voltage Motor Winding Insulation for High Power Adjustable Speed Drives Fed by IGBT-Converter.“ Conference Proceedings INSUCON '98, Harrogate, Mai 1998
- [13] F. Gutfleisch, L. Niemeyer: „Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, October 1995
- [14] M. Kaufhold, K. Bauer, A. Bethge, H. Wang: „Experiences with Partial Discharge Measurements for the Evaluation of High Voltage Winding Insulation of Large-and Medium-Sized Machines“ Conference Proceedings INSUCON '98, Harrogate, Mai 1998
- [15] Kielmann, F., Schönthier, H., Golbig, W.: „VPI-stator bar Insulation with very low Partial Discharge Level“, Proceedings of 10th ISH, Volume 2, pp. 173, Montreal, 1997
- [16] J. Langer, K. Bauer, A. Bethge, J. Weidner, P. Grünewald: „TE-Messungen zur Qualitätssicherung und Diagnose...“ Proceedings of the „ETG-Fachtagung“, Esslingen, Germany, 1995, pp. 201-206
- [17] Sedding, H., Stone, G.: „Applicability of Partial Discharge Testing for 4 kV Motor and Generator Stator Winding“ Proceedings of EEIC, pp. 665, Chicago, 1995

[18] Lemke, E.: "Möglichkeiten und Grenzen der TE-Messung mit Feldkopplung", Siemens-Tettex-Kolloquium zur Hochspannungs- Prüf- und Meßtechnik, Dresden (1993) Beitrag 4.4

[19] Lemke, E., Schmiegel, P.: "Progress in PD probe measuring technique " Proceeding of 7th ISH, Dresden, 1991, paper 72.01