

Teilentladungsmessungen an rotierenden elektrischen Maschinen – Erfahrungen und Innovationen

F. Öttl, M. Krüger, W. Koltunowicz, L.-V. Badicu, B. Gorgan

Die Teilentladungsmessung (TE-Messung) gilt heute als weltweit akzeptierte Diagnosemethode für die Zustandserfassung des Isoliersystems von rotierenden elektrischen Maschinen. Im Beitrag wird neben ihren Besonderheiten auch auf die unterschiedlichen Ansätze der Messung eingegangen. Die Diskussion wird mit praktischen Beispielen und Versuchen untermauert. Die Vorteile eines digitalen Messsystems mit fortgeschrittenen Möglichkeiten zur Separierung einzelner TE-Quellen oder der Identifikation von externen Störern werden aufgezeigt. Abschließend wird die automatisierte Erkennung phasenaufgelöster Muster als Endstufe der softwarebasierten Auswertehilfe vorgestellt und erklärt.

Schlüsselwörter: rotierende elektrische Maschinen; Isoliersystem; Teilentladungen; phasenaufgelöstes Muster; automatische Mustererkennung

Partial discharge measurements on rotating machines—experience and innovation.

Partial discharge (PD) measurement is nowadays a worldwide accepted method for the condition-based assessment of stator insulation. The advantage of having a fully digital measuring system, with advanced hardware and software capabilities that allows improved insulation diagnosis by means of PD analysis, is shown. The sensitivity of the PD measurements can be strongly limited by a high noise level. State-of-the-art features based on synchronous multi-channel and multi-frequency techniques for signal separation of noise and PD defects are presented. The examples of data evaluation are described and the use of the automated PD pattern recognition system is discussed.

Keywords: rotating electrical machines; insulation system; partial discharges; interference suppression; pattern recognition

Eingegangen am 12. Juli 2017, angenommen am 22. August 2017, online publiziert am 20. November 2017
© Springer-Verlag GmbH Austria, ein Teil von Springer Nature 2017



1. Einleitung

Rotierende elektrische Maschinen, (Motoren und Generatoren) gehören zu den neuralgischen Punkten einer funktionierenden Energieversorgung oder einer störungsfreien Industrieproduktion. Ein ungeplanter Ausfall bei der Erzeugung von elektrischer Energie oder eines Motors entlang einer Fertigungsstraße kann hohe Kosten mit sich bringen. Vor allem Schäden im Isoliersystem von Statorwicklungen der Maschine sind häufige Ausfallgründe für diese Betriebsmittel. Die Teilentladungsmessung (TE-Messung) ist ein geeignetes Diagnose- und Wartungstool zur Erkennung und Beurteilung einiger dieser Schäden. Dies hat sie bereits mehrfach in der Praxis bewiesen.

In diesem Beitrag wird auf den Nutzen genauer eingegangen. Es werden Vor- und Nachteile der Messmethoden erläutert und aufgezeigt, warum Teilentladungsmessungen an rotierenden elektrischen Maschinen sinnvoll sind.

Zudem wird erklärt, wie moderne, digitale, softwaregestützte Teilentladungs-Messsysteme den Benutzer bei der TE-Messung unterstützen. Dies reicht von der Separierung der unterschiedlichen TE-Quellen in der Maschine bis hin zur automatischen Interpretation der Phänomene.

2. Messen von Teilentladungen

Die Teilentladungsmessung an Wicklungen von rotierenden elektrischen Maschinen bietet die Möglichkeit einer zerstörungsfreien nicht-invasiven Methode zur Identifizierung einzelner Schwachstellen in deren Isolierung. In den Kunstharz-Feinglimmer Isolierungen,

welche in den Mittelspannungsmaschinen zum Einsatz kommen, können dies unter anderem innere Entladungen, Ablösung von Isolierschichten, mechanische Erosion durch Vibration oder das Abtragen der Steuer-Beläge sein, um nur einige zu nennen. Damit unterscheidet sich diese zu anderen Methoden wie z. B. der Isolationswiderstandsmessung oder der Verlustfaktormessung, welche eine ganzheitliche Aussage über den Isolationszustand der gesamten Wicklung, einzelner Phasen oder Phasenstränge liefert, abhängig davon, wieweit die Wicklung aufgetrennt werden kann.

Ähnlich der beiden anderen Methoden bedarf die Teilentladungsmessung einer Interpretation nach erfolgter Durchführung. Moderne Messgeräte bieten hierfür sehr elegante Methoden der Aufzeichnung wie etwa Stream-Files an, wo die Messung einem Film gleich am Rechner beliebig oft abgespielt werden kann.

Die Physik der Teilentladung (TE) bietet umfangreichen Stoff und kann in diesem Artikel nicht vollständig behandelt werden. Trotzdem soll hier kurz ein Definitionsversuch unternommen werden:

Öttl, Fabian, Omicron electronics GmbH, Oberes Ried 1, 6833 Klaus, Österreich (E-Mail: fabian.oettl@omicronenergy.com); **Krüger, Michael**, Omicron electronics GmbH, Oberes Ried 1, 6833 Klaus, Österreich; **Koltunowicz, Wojciech**, Omicron Energy Solutions GmbH, Lorenzweg 5, 12099 Berlin, Deutschland; **Badicu, Laurentiu-Viorel**, Omicron Energy Solutions GmbH, Lorenzweg 5, 12099 Berlin, Deutschland; **Gorgan, Bogdan**, Omicron Energy Solutions GmbH, Lorenzweg 5, 12099 Berlin, Deutschland

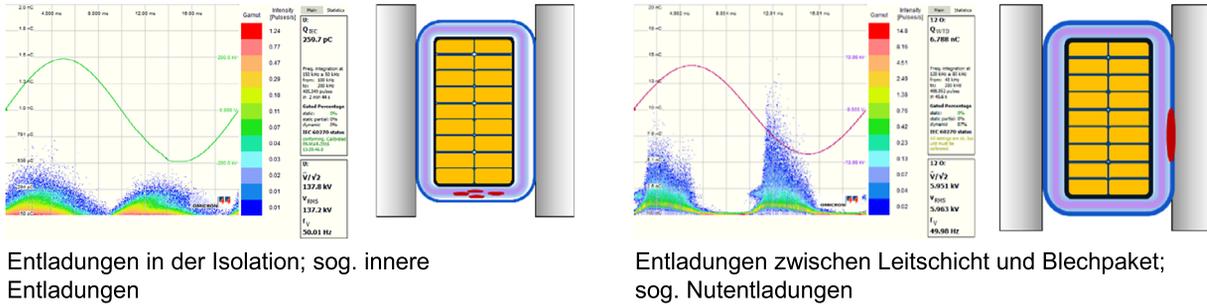


Abb. 1. Phasenaufgelöste Teilentladungsmuster mit dazugehörigen Defekten

Als Teilentladung bezeichnet man einen partiellen Durchschlag in Isolierungen von Hochspannungsbetriebsmitteln, verursacht durch eine lokale Erhöhung der Feldstärke, hervorgerufen durch Verunreinigungen oder Fehlstellen in der Isolierung. Der dadurch freiwerdende elektromagnetische Impuls kann messtechnisch erfasst werden und kann somit Rückschlüsse auf den Zustand der Isolierung geben. [1]

Durch das Messen von Teilentladungen kann man auf Herstellungsmängel, sowie auf innere und äußere Schadensstellen am Isoliertsystem von elektrischen Maschinen schließen und somit frühzeitig mögliche Ursachen für Betriebsausfälle detektieren. Die daraus resultierenden Wartungsmaßnahmen sind planbar und erleichtern den zielgerechten Einsatz der oft knappen Ressourcen.

Für die Interpretation der Messung hat sich zunehmend das sog. PRPD-Pattern durchgesetzt. PRPD steht dabei für **Phase Resolved Partial Discharge**, zu Deutsch etwa phasenaufgelöstes Teilentladungsmuster. Hier werden die einzelnen Teilentladungsimpulse in ihrer Häufigkeit, Amplitude, Polarität und Phasenlage mit der Hochspannung korreliert. Der Vorteil dieser Darstellung ergibt sich aus der Zuordnung typischer Muster zu der Art der TE-Quelle in der Wicklung. Somit erreicht man nicht nur eine Identifizierung des Fehlers, sondern kann auch eine Klassifizierung des Risikos gemäß internationalen Standards vornehmen [2]. Ein Beispiel ist in Abb. 1 dargestellt, wo die phasenaufgelösten Muster mit den entsprechenden bekannten Defekten korreliert werden.

Neben den phasenaufgelösten Mustern der Einzelmessung bietet die Interpretation der Ergebnisse aus mehreren aufeinanderfolgenden Messungen bei gleichen Umgebungsbedingungen (relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur) die belastbarste Aussage betreffend Kritikalität des Isolationszustandes der Maschine. Eine Veränderung der Muster in den phasenaufgelösten Ergebnissen oder ein starker Anstieg der Amplitude können weitere Maßnahmen erforderlich machen. Voraussetzung hierfür sind Teilentladungsmessungen in regelmäßigen Abständen in Verbindung mit einer externen Hochspannungsquelle (in weiterer Folge als OFF-line-TE-Messung bezeichnet) oder kontinuierliche Messungen an laufenden Maschinen während des Betriebes, ohne externe Quelle (in weiterer Folge als ON-line-TE-Messung bezeichnet). Beide Methoden haben ihre Vor- und Nachteile, welche in Abschn. 4 eingehender diskutiert werden.

Vielfach wird versucht, Grenzwerte für Teilentladungen zu definieren und nur anhand der Amplitude der TE den Zustand der Isolierung zu bewerten. Es ist dies der Versuch komplexe Vorgänge auf ein JA/NEIN-Kriterium zu vereinfachen. Nur sehr selten kann aus einer Einzelmessung direkter Handlungsbedarf abgeleitet werden.

Die TE-Messung bietet ein geeignetes Inspektions-Tool das maßgeblich zur Zustandsbeurteilung des Isoliertsystems von rotierenden elektrischen Maschinen beiträgt und dem Betreiber hilft,

zustandsorientierte Instandhaltungsmaßnahmen innerhalb seiner Maschinen-Flotte zu setzen.

3. Ausbreitungsverhalten der TE-Impulse in der Wicklung

Da bei komplexen Isoliertsystemen wie die in Generatoren oder Motoren ein direktes Erfassen der TE-Impulse an der Fehlstelle nicht möglich ist, wird die an den Klemmen messbare scheinbare Ladung für eine Interpretation der Resultate der TE-Messung herangezogen.

Für ein korrektes Interpretieren der Ergebnisse einer TE-Messung an der Statorwicklung sollte dem Messingenieur bekannt sein, dass der kurze, unipolare TE-Impuls auf seinem Weg zu den Generatorklemmen durch Dämpfung, Reflexionen, Dispersionen und elektromagnetische Koppelleinflüsse in ein mehr oder weniger stark verlängertes, schwingendes Signal umgewandelt wird. Abhängig von den Filtereinstellungen des Messgerätes können somit die Amplitudenwerte der an den Klemmen erfassbaren Ladung stark vom Entstehungsort abhängig sein. Somit sollte die zuvor diskutierte Vergleichsmessung stets mit denselben Messgeräteeinstellungen durchgeführt werden. Um diesen Umstand zu demonstrieren wurden an einem ausrangierten Wasserkraftgenerator mit einer Nennleistung von 102 MVA die Leiter der Statorwicklung angebohrt. Ziel war es, künstliche Teilentladungsimpulse mit bekannter Amplitude direkt in die Wicklung zu induzieren und diese an den Klemmen mit unterschiedlichen Filtereinstellungen zu messen.

Abbildung 2 stellt schematisch den Versuchsaufbau dar. Entlang der Wicklung werden idente Impulse mit einer definierten Ladung von 10 nC eingespeist. Die Messung erfolgt an den Klemmen der Ausleitung wo die HF-Signale mittels eines Koppelkondensators C_c und eines Auskoppelvierpols dem TE-Messsystem zugeführt werden.

Das Ergebnis ist eine sogenannte „Dämpfungsmatrix“ (Abb. 3), welche die scheinbare Ladung an den Klemmen in Abhängigkeit vom Einspeisepunkt der künstlichen Fehlstelle darstellt. Für eine weitere Beschreibung der Untersuchung und der Ergebnisse ist an dieser Stelle auf [3] verwiesen.

Das Resultat aus den frequenzselektiven Messungen bestätigt die bekannte Tatsache, dass eine zuverlässige Messung der scheinbaren

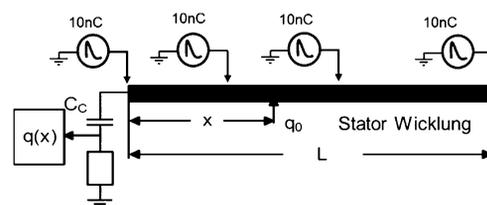


Abb. 2. Ersatzschaltbild der Einspeisung entlang der Wicklung

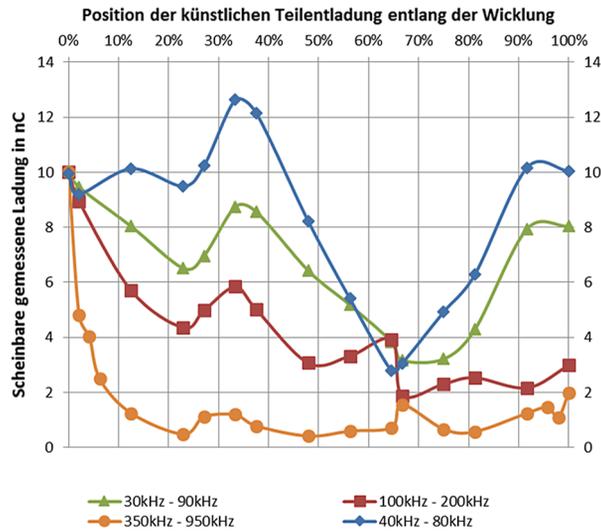


Abb. 3. Dämpfungsmatrix; Messergebnisse an der Ausleitung bei Einspeisung von 10 nC entlang der Wicklung, aufgenommen mit verschiedenen Filterfrequenzen

Ladung an Generatoren nur bei tiefen Mittenfrequenzen des Bandpassfilters möglich ist.

Deutlich erkennbar in Abb. 3 ist der Vorteil der frequenzselektiven Messung. Unterschiedliche Einspeiseorte treten bei verschiedenen Filterfrequenzen unterschiedlich stark hervor. Diesen Umstand nutzen heutige TE-Messsysteme zur Quellenseparierung (Abschn. 5) [4].

3.1 Quasiintegration oder Peak-Detektion

Wie schon erwähnt, wird bei der Teilentladungsmessung die scheinbare Ladung ermittelt. Das Ergebnis der Messung wird in Coulomb angegeben. Im anglo-amerikanischen Raum findet man auch die Interpretation der Werte in mV. Häufig gestellte Anfragen beziehen sich auf die Vergleichbarkeit der beiden Messmethoden. Sovieil sei hier vorweggenommen: Die Werte in nC und mV können nicht miteinander verglichen werden!

Die Berechnung der scheinbaren Ladung kann man sich stark vereinfacht als eine Integration der vom TE-Impuls eingeschlossenen Fläche vorstellen (Abb. 4). Diese Betrachtung ist nicht vollkommen korrekt, da bei der Messung mit dem Auskoppel-Hochpass keine Gleichanteile übertragen werden und somit eine „Quasiintegration“ in einem höheren Frequenz Bereich vorgenommen werden muss. Für die weitere Betrachtung ist das Erklärungsmodell in Abb. 4 jedoch ausreichend.

Durch diese Methode werden zwei große Vorteile nutzbar gemacht:

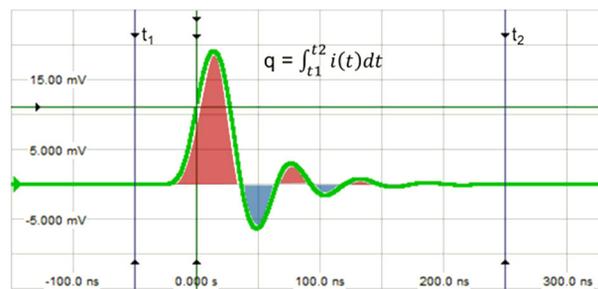


Abb. 4. Erklärungsmodell zur Integration der scheinbaren Ladung im Zeitbereich

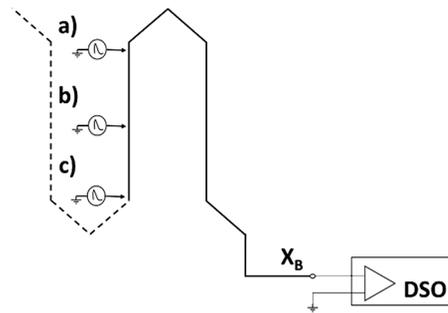


Abb. 5. Ausschnitt aus dem Wickelschema mit Einspeisepunkten und Digitaloszilloskop am Messpunkt

- Zum einen ist die Fläche proportional der in der Fehlerstelle umgesetzten Energie und somit zur Größe der Fehlerstelle.
- Zum anderen können Defekte, deren Entstehungsort auch relativ weit von den Klemmen entfernt liegen noch mit hinreichender Genauigkeit detektiert werden (Abb. 3), da bei entsprechender Filter Wahl „langsame“ Frequenzanteile des Impulses gemessen werden können.

Die Peak Detektion dagegen misst den höchsten Peak des Zeitsignals in mV und muss deshalb auf sehr breitbandige Filter zurückgreifen. Die schnellen Anteile des Signals dominieren, werden jedoch bereits nach wenigen Wicklungsabschnitten sehr stark gedämpft. Dies ist in Abb. 6 anhand einer praktischen Messung aus dem in Abschn. 3 beschriebenen Testobjekt zusammengefasst. Aus dem Vergleich der Signale in der Abb. 6 erkennt man ein „Zerfließen“ der Signale, die nach Durchlaufen eines einzigen Unterstabes und Teilen eines Oberstabes bereits deutlich höhere Anstiegs-/Abfallzeiten zeigen, als der kurze Einspeiseimpuls. Eine Reduktion der Amplitude von 2,5 V auf 155 mV (!) erfolgt bereits nach einem Roebelstab. Die Messung der Signale, welche in den Punkten b) und c) eingespeist werden, ergibt eine weitere Reduktion auf 75 mV und 60 mV Spitze.

Wie Anfangs in diesem Abschnitt erwähnt, stellen Dämpfung, Reflexionen, Dispersionen und elektromagnetische Koppelleinflüsse die Gründe für das „Zerfließen“ der Signale dar, welche im Abstand von nur 3 m bis 5 m von der Klemme entfernt eingespeist wurden (Abb. 5).

Wird die oben beschriebene breitbandige Spannungsmessung in mV hingegen mittels Quasiintegration der scheinbaren Ladung an denselben Einspeiseorten wiederholt, so werden die eingespeisten 10 nC immerhin noch als noch als 9–9,5 nC an den Klemmen detektiert. Natürlich ist dies abhängig von den Filtereinstellungen; in Abb. 3 gilt dies jedoch für alle „niederfrequenten“ Filterbandbreiten [3].

4. ON-line Messung oder OFF-line Messung

Wie zuvor bereits erwähnt gibt es bei der Teilentladungs-Messung zwei unterschiedliche Ansätze, diese durchzuführen. Zum einen durch eine sog. OFF-line-Messung, bei welcher die Maschine abgeklemmt und die Prüfspannung durch eine externe Quelle zu Verfügung gestellt wird und zum anderen durch eine sog. ON-line-Messung, bei welcher die Maschine im laufenden Betrieb temporären oder kontinuierlichen Messungen mit vorinstallierten Koppelkondensatoren unterzogen wird (Abb. 7).

Bei der ON-line-Messung können Daten während unterschiedlicher Betriebspunkte und somit bei unterschiedlicher Belastung oder Temperatur ohne die Maschine außer Betrieb zu nehmen, generiert werden. Die Messung erfolgt somit unter realen Betriebsbedingungen [5]. Der Vorteil wird im Allgemeinen durch eine deutlich höhere

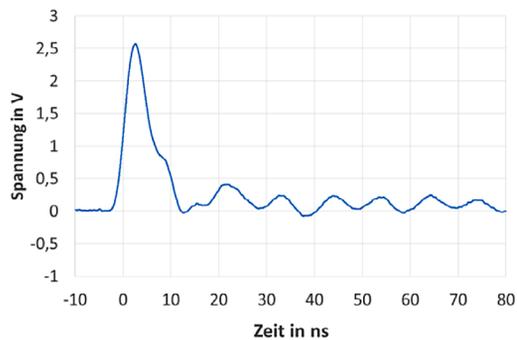
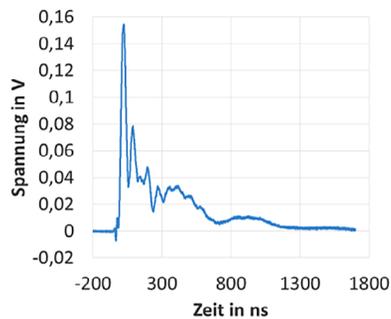
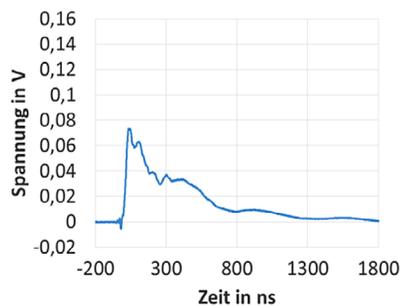
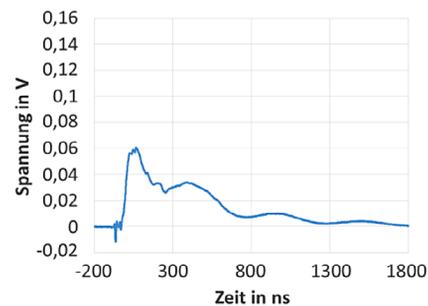
Einspeiseimpuls*Messung an der Klemme X_B bei Einspeisung an a)**Messung an der Klemme X_B bei Einspeisung an b)**Messung an der Klemme X_B bei Einspeisung an c)*

Abb. 6. Einspeisung des Impulses an drei verschiedenen Stellen entlang des Oberstabs in Nut 2 (2. Stab nach dem Sternpunkt) wie in Abb. 5 dargestellt. Achtung: unterschiedliche Skalierung beim Einspeisesignal



Abb. 7. ON-line Messung mit installierten Koppelkondensatoren

Präsenz von externen Störeinflüssen erkaufte. Diese stammen nicht aus dem Isoliersystem der Maschine und sollten somit nicht in die Diagnose einfließen. Um sie zu umgehen und einen genügend hohen Abstand vom Nutz- zum Störsignal zu garantieren, bedarf es im Allgemeinen des Ausweichens auf höhere Filterfrequenzen. Wie zuvor im Abschn. 3 beschrieben, werden die damit gemessenen hohen Frequenzanteile von ihrem Entstehungsort zum Ort der Messung jedoch sehr schnell gedämpft, wodurch nur Teile der Wicklung diagnostisch abgedeckt werden können. Demgegenüber steht natürlich die Tatsache, dass im laufenden Betrieb die Spannungsverteilung der Wicklung hin zum Sternpunkt abnimmt.

Im Gegensatz dazu wird bei der OFF-line-Messung die gesamte Wicklung auf dasselbe Hochspannungspotenzial angehoben, wodurch auch Fehlstellen, welche im Betrieb nicht hervortreten, im phasenaufgelösten Muster sichtbar werden. Eine Früherkennung wird somit deutlich wahrscheinlicher. Ein weiterer Vorteil ist der im Allgemeinen sehr geringe Störpegel, wodurch mit deutlich tieferen Filterfrequenzen gearbeitet werden kann. Dies ermöglicht das Messen der langsamen Impulse und somit das Erfassen von Teilentladungen entlang eines Großteils der Wicklung. Zudem bietet die OFF-line-Messung die Kalibrier-Möglichkeit des Aufbaus. Die Vorteile werden durch den deutlich höheren Aufwand der Messung bei der Durchführung mit dem Abklemmen der Maschine und dem Aufbau einer externen Quelle erkaufte (Abb. 8). Diese Art von Messungen werden daher normalerweise während eines Service Intervalls durchgeführt.

Als nachteilig hat sich bei OFF-line-Messungen auch der signifikante Einfluss der Luftfeuchtigkeit und der Wicklungs- und Umgebungstemperatur auf die Höhe der TE-Intensität von äußeren Entladungen wie z. B. Nutentladungen erwiesen. Bei Luftfechtigkeiten von mehr als 50% können die TE-Intensitäten um mehr als 50% reduziert sein [12].

Durch die unterschiedlichen Vor- und Nachteile der beiden Messungen und die verschiedenen diagnostischen Möglichkeiten sind die OFF- und ON-line Messung komplementäre Methoden zum Bestimmen des Zustandes der Isolierung [6].

5. Separierung der Teilentladungsphänomene

All jene, die sich schon einmal mit der TE-Messung an Motoren oder Generatoren befasst haben, wissen nur zu gut, dass sich die Ergeb-

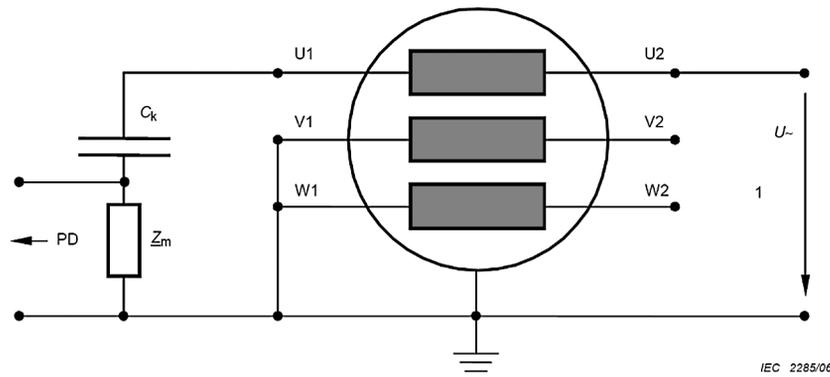


Abb. 8. Ersatzschaltbild der OFF-line Messung für einen Kanal an Phase U nach [2]

nisse der Messung meist aus mehreren TE-Quellen zusammensetzen. Um eine verlässliche Aussage betreffend des Risikos resultierend aus den einzelnen Phänomenen treffen zu können, ist deshalb eine Separierung der einzelnen TE-Quellen wichtig. Der Messingenieur hat dabei meist mit drei Arten von Herausforderungen zu kämpfen:

- 1) Externe Störer
- 2) Überlagerungen diverser TE-Phänomene
- 3) Überkopplung aus benachbarten Phasen (ON-line Messung)

Um eine möglichst geringe Beeinflussung der Signale durch Störeinflüsse zu gewährleisten, wird vermehrt auf die Digitalisierung des Signals unmittelbar am Erfassungsort zurückgegriffen. Das Übertragen der analogen Signale über weite Strecken entfällt damit, wodurch die Messung so robust wie möglich ausgeführt werden kann. Frequenzselektive Messsysteme bieten außerdem die Möglichkeit die Filtereinstellungen entsprechend zu wählen und gegebenenfalls mit höheren Frequenzen zu messen, bei denen der Störpegel deutlich geringer ist. Dies ist jedoch mit allergrößter Vorsicht zu genießen, da die Sensitivität der Messung stark von diesem Parameter beeinflusst wird (Abb. 3).

Punkte 2) und 3) können auch gemeinsam betrachtet werden. Die Unterscheidung verschiedener Phänomene in einem einzelnen phasenaufgelösten Muster kann sich als schwierig gestalten. Neben der Erfahrung bietet zum Beispiel das Einsetzen der einzelnen TE-Quellen bei verschiedenen Spannungsschritten in einer OFF-line-Messung eine mögliche Interpretationshilfe. Ist letzteres Entscheidungskriterium nicht gegeben oder sind bei der ON-line Mes-

sung hohe Störpegel vorhanden, bieten frequenzselektive, synchrone, mehrkanalige Messsysteme softwarebasierte Hilfen, die es dem Benutzer erleichtern belastbare Aussagen tätigen zu können. Beispiele dieser sind:

- 3PARD (3 Phase **A**mplitude **R**atio **D**iagramm)
- 3CFRD (3 **C**enter **F**requency **R**atio **D**iagramm)

3PARD Die Funktionsweise des 3PARD ist schematisch in Abb. 9 dargestellt. Drei synchrone Kanäle – in diesem Fall die Phasen L1, L2 und L3 – detektieren innerhalb einer benutzerdefinierten Zeit denselben Teilentladungsimpuls mit unterschiedlicher Amplitude. Angenommen, das Phänomen findet in L1 statt, so hat man hier die höchste Intensität. Die beiden anderen Kanäle messen den Impuls durch Überkopplung in der Wicklung ebenfalls mit. Die Amplitude wird nun in einen Vektor umgewandelt, welcher graphisch aufsummiert einen Punkt im 3PARD-Sterndiagramm ergibt. Tritt die TE-Quelle regelmäßig auf, so bilden mehrere Punkte eine Wolke, auch „Cluster“ genannt. Verschiedene TE-Quellen bilden unterschiedliche Cluster auf dem Diagramm, welche anschließend separiert und in das phasenaufgelöste Pattern zur weiteren Analyse rücktransformiert werden können [7, 8].

Zum besseren Verständnis ist in Abb. 10 ein praktisches Beispiel angeführt. Links sind die drei einzelnen, synchronen Kanäle mit ihren phasenaufgelösten TE-Mustern dargestellt. Da es sich um eine ON-line Messung handelt, sind diese jeweils um 120° phasenverschoben. Die Amplitude der Ladung in den einzelnen phasenaufge-

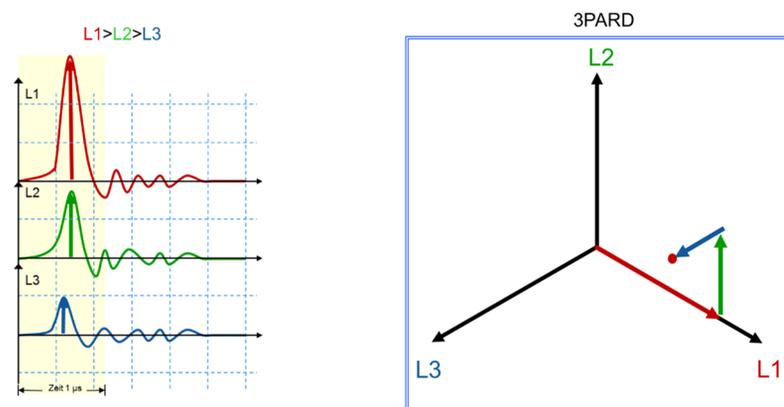


Abb. 9. Funktionsweise 3PARD; Links: Der Impuls wird in den drei Kanälen mit unterschiedlicher Amplitude detektiert; Rechts: Graphische Summierung der Vektoren im 3PARD-Diagramm

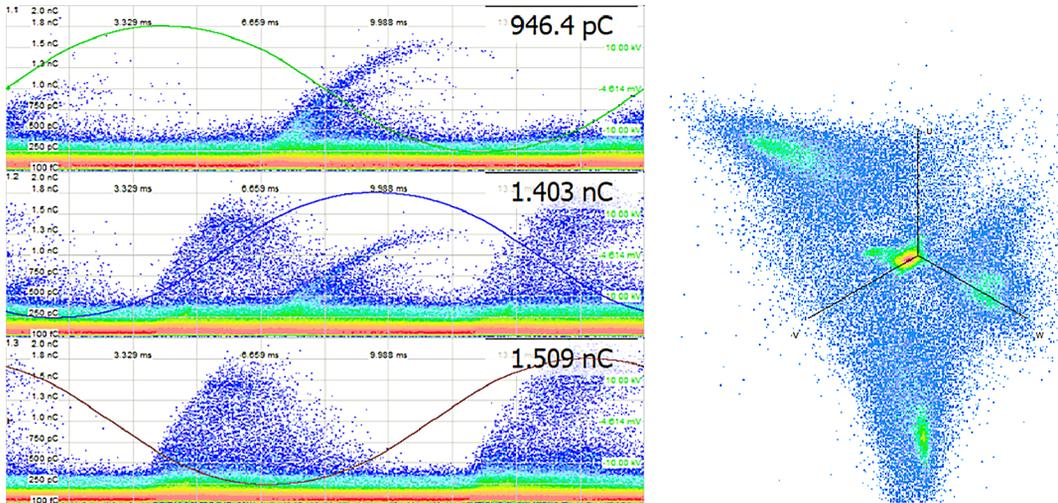


Abb. 10. 3PARD, praktisches Beispiel mit Ausgangsmessung und 3PARD-Ansicht

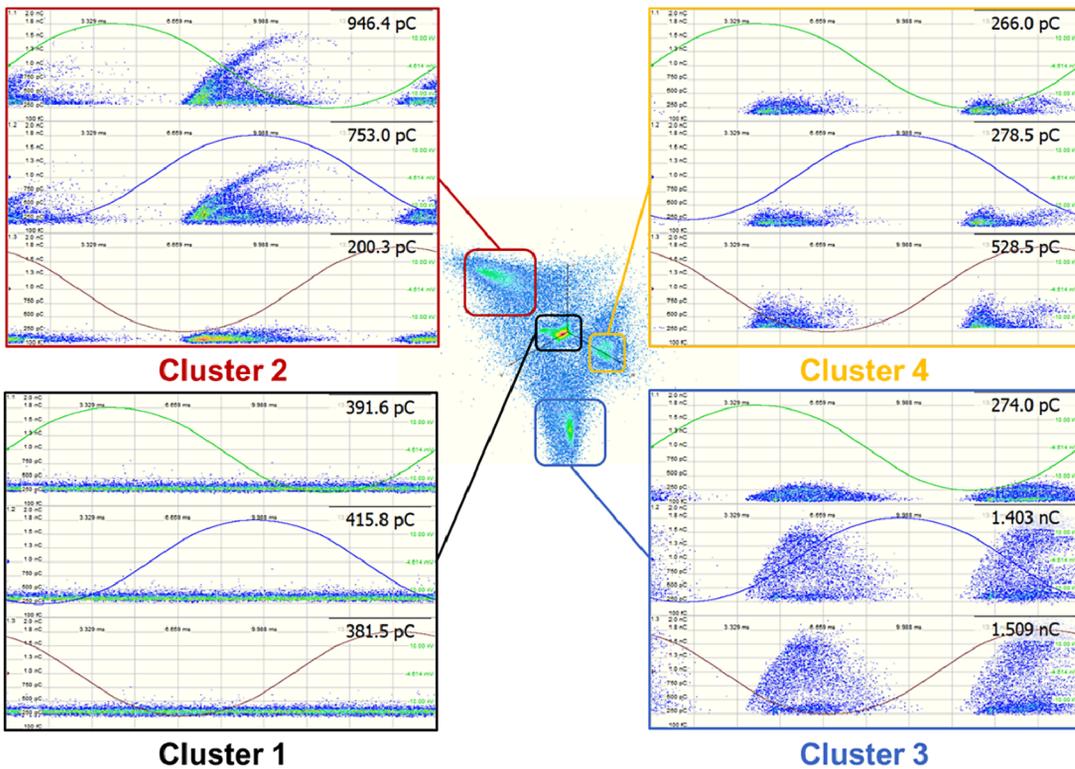


Abb. 11. Separierung der TE-Quellen aus Abb. 10

lösten Mustern ist dabei der momentane Wert in Coulomb. Deutlich zu erkennen ist das Auftreten mehrerer TE-Quellen, welche sich teilweise überlappen. Im rechten Teil der Abbildung findet sich die 3PARD Ansicht.

Die vier Cluster dieser Ansicht können nun markiert und in deren phasen aufgelöste TE-Muster rücktransformiert werden. Abbildung 11 erläutert die Vorgehensweise. Die einzelnen Phänomene werden so identifiziert und eine Risikoabschätzung kann getroffen werden. Die Delamination in Cluster 2, sowie die Wickelkopfentladungen zwischen den Phasen V und W ist mit etwas Erfahrung auch in der Ausgangsmessung erkennbar. Die innere Entladung in

Cluster 4 ist in der Ausgangsmessung jedoch nicht erkennbar, da sie vom Rauschen, identifiziert im Cluster 1, vollkommen verdeckt wird.

3CFRD Die Methode des 3CFRD separiert die TE-Quellen nach ähnlicher Vorgehensweise und kommt vor allem dort zum Einsatz, wo das Messen mit drei Kanälen nicht möglich ist, oder ein zusätzliches Entscheidungskriterium zum 3PARD benötigt wird. Bei dem 3CFRD werden TE-Impulse simultan mit drei unterschiedlichen Filterbandbreiten gemessen. Abhängig von Entstehungsmechanismus, Signalausbreitung und Dämpfung besitzen verschiedene TE-Quellen

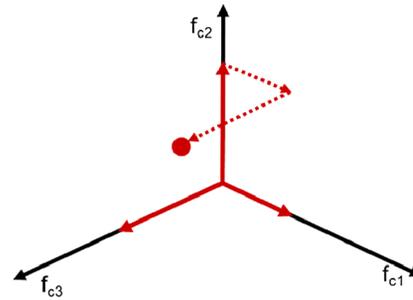
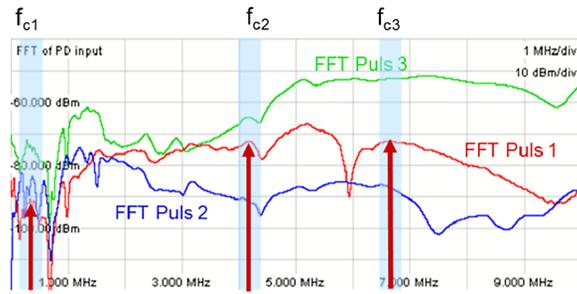


Abb. 12. Prinzip des 3CFRD; Die drei unterschiedlichen TE-Quellen im linken Bild bilden nach dem graphischen Aufsummieren im rechten Bild (dargestellt für den roten TE-Impuls) jeweils verschiedene Cluster

auch unterschiedliche Amplituden in den jeweiligen Filtereinstellungen (Abb. 12).

Diese werden wiederum in das oben beschriebene Sterndiagramm eingetragen und bilden nach graphischem Aufsummieren Cluster für die unterschiedlichen TE-Phänomene [7, 9].

5.1 Automatische Cluster-Erkennung

Um dem Benutzer größtmögliche Unterstützung zu garantieren, kann die oben beschriebene Cluster Separierung softwaregestützt durchgeführt werden. Die automatische Separierung ist Voraussetzung für den nächsten Schritt hin zur größtmöglichen Unterstützung in der Auswertung. Wie zuvor beschrieben kann angenommen werden, dass je ein Cluster eine TE-Quelle repräsentiert. Die verschiedenen Defekte erzeugen Teilentladungen, deren phasen aufgelöste Muster bekannt sind. Nach der automatischen Separierung der TE-Quellen ist es möglich, diese Muster automatisiert mit Hilfe von Algorithmen zu interpretieren.

Das Ergebnis der Software-gestützten Interpretation ist nicht unabhängig von einigen Systemparametern. Eine der wichtigsten ist dabei die Messzeit, welche genügend groß sein muss, um ausreichend klare PRPD-Muster zu generieren. Ist dies der Fall, so kann die Vorgehensweise vereinfacht in folgenden fünf Schritten dargestellt werden:

1. Erstellen des 3PARD mit den separierten Clustern
2. Unterscheidung zwischen TE-Quellen aus der Maschine und anderen Signalen
3. Klassifizierung – Eigenschaftsbasierte Auswertung
4. Klassifizierung – Mustererkennung
5. Berichterstellung

Die Cluster-Erkennung erfolgt mit Hilfe von OPTICS (**O**rding **P**oints **T**o **I**dentify the **C**lustering **S**tructure), einem dichte-basierten Algorithmus zur Identifizierung von Clustern. Dabei werden nur jene Punktwolken mit ausreichender Dichte in Betracht gezogen. Einzel-

ne Punkte oder Cluster mit zu geringer Dichte fallen auf Grund ihrer unzureichenden Datenpunkte durch das Raster.

Das anschließende Erkennen der Störsignale und die Unterscheidung von den Nutzsignalen des Isoliersystems der Maschine eliminieren alle für eine Interpretation nicht relevanten Datenpunkte. Dabei ist die Software in der Lage, unterschiedliche Rauschphänomene zu erkennen. Unter anderem können asynchrone, wie der häufige „Rauschteppich“ in den PRPD-Mustern oder synchrone Störer, wie Erregerimpulse identifiziert werden.

Ist die Messung von allen nicht relevanten Daten befreit, widmet sich die Software der Interpretation der verbleibenden Cluster. Im ersten Schritt passiert dies anhand unterschiedlicher Attribute wie in Tab. 1 dargestellt.

Die Software führt mehrere Iterationsschritte entlang eines Entscheidungsbaums durch. Trifft eine Aussage zu, so befindet man sich auf dem richtigen Weg und das nächste Kriterium wird abgefragt. Der Entscheidungsbaum bietet eine deterministische Vorgehensweise für eindeutige, klare Fälle. Ist letzteres nicht der Fall, so wird zusätzlich eine Mustererkennung herangezogen [10, 11].

Hier werden die zu untersuchenden Muster mit einer Vielzahl von Referenzmustern, welche in einer Datenbank hinterlegt sind, verglichen. Die Ähnlichkeit des gemessenen Phänomens mit dem bekannten Vergleich wird mit Hilfe des Euklidischen Abstandes ermittelt:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

In welcher d der Abstand, x_i der Eigenschaftsvektor des aktuellen PRPD-Musters und y_i der Eigenschaftsvektor des Referenzmusters sind. Der Index i steht für die verschiedenen Eigenschaften. Geht der Abstand gegen Null, so kann angenommen werden, dass das gemessene Phänomen der Referenz entspricht und die Art der Fehlerstelle ist identifiziert.

Am Ende jeder automatischen Erkennung wird dann ein detaillierter Report mit den Arten der unterschiedlichen TE-Quellen ausgegeben (Abb. 13).

Tab. 1. Beispiele für Attribute einer Klassifizierung der Teilentladungen

Attribut Name	Attribut Eigenschaft
Puls-Ladungs Verteilung in der positiven Halbwelle	Breit
Puls-Ladungs Symmetrie in der positiven Halbwelle	Symmetrisch
Puls-Ladungs Verhalten in der positiven Halbwelle	Zuspitzend
Polaritätsverteilung	Gleiche Polarität
Puls-Phasen Symmetrie in der positiven Halbwelle	Rechtslastig
Ladungs-Phasen Regelmäßigkeit in der positiven Halbwelle	Nicht flach
Ladungs-Phasen Symmetrie in der positiven Halbwelle	Rechtslastig

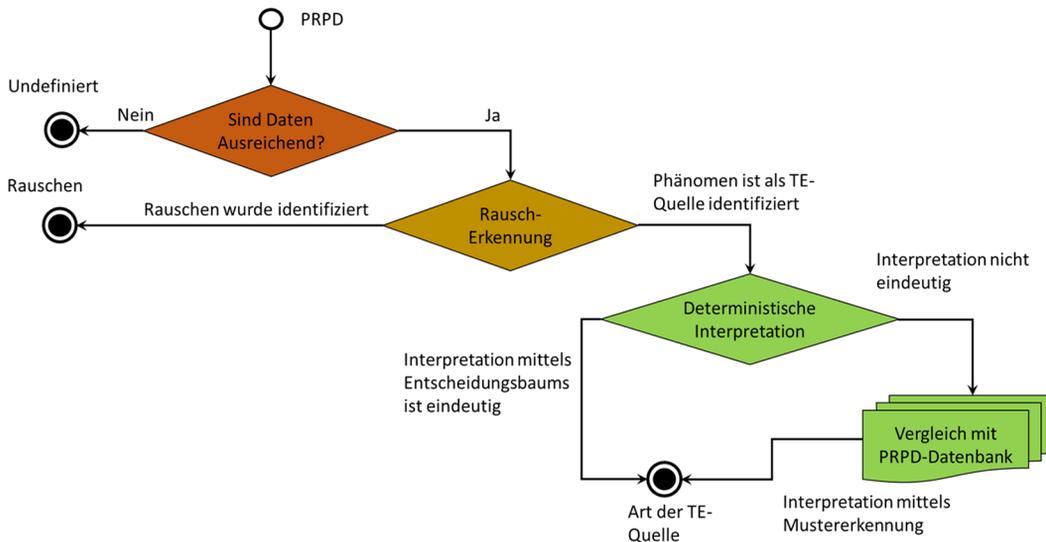


Abb. 13. Zusammengefasste Vorgehensweise bei der automatischen Interpretation

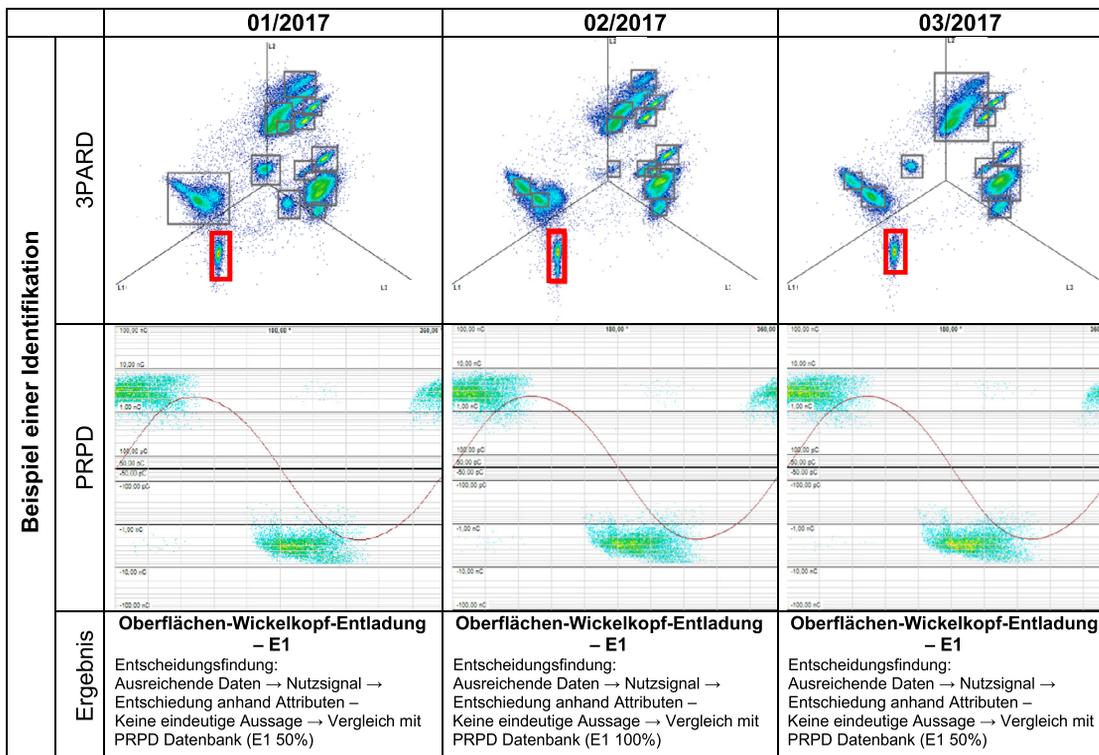


Abb. 14. Clustererkennung aus mehreren Messungen mit der Entscheidungsfindung

Anhand eines praktischen Beispiels soll die oben beschriebene Entscheidungsfindung noch einmal veranschaulicht werden. Dabei handelt es sich um ein 2012 installiertes Monitoring an einem 1160 MVA Turboläufer mit einer Nennspannung von 27 kV. Die historischen Daten werden anhand der Mustererkennung identifiziert und bewertet. Das analysierte Cluster ist in der Abb. 14 rot umrandet.

Dabei wird das zu analysierende Cluster als solches vom Programm identifiziert und als ausreichend bezüglich der Datenpunkte bewertet. Die Klassifizierung anhand der Attribute führt zu einem Grenzfall zwischen zwei Phänomenen. In jedem der drei Messun-

gen kehrt das System dann zur Erkennung mit Hilfe des Vergleichs mit den aus der Datenbank bekannten Phänomenen zurück.

6. Zusammenfassung

Die Teilentladungsmessung an rotierenden elektrischen Maschinen gilt heute als die elektrischste Messmethode, welche die detailliertesten Aussagen über den Zustand des Isoisystems der Statorwicklungen von rotierenden Maschine zulässt. Eine Vielzahl unterschiedlicher Defekte kann – oft in Verbindung mit komplementären Inspektionmethoden wie z. B. der visuellen Inspektion, UV-Kamera,

Ultraschallmessung und Ozonmessung – verlässlich identifiziert und betreffend ihres Risikos klassifiziert werden.

Trotz der vielen Vorteile, die die Messung bietet, muss man sich bei der Interpretation der Ergebnisse über die Besonderheiten der Messung im Klaren sein, wie z. B. die impulsverformenden Eigenschaften während der Ausbreitung durch die Wicklung, die Anschlussstechnik, die Beeinflussung durch Störsignale oder das Auftreten mehrerer gleichzeitiger Teilentladungsphänomene sowie der Einflüsse von Umgebungsbedingungen.

Digitale, frequenzselektive Teilentladungssysteme bieten dem Benutzer Hilfestellungen, die es ermöglichen einige dieser Besonderheiten zu meistern und belastbare Aussagen tätigen zu können. Diese reichen von der Digitalisierung unmittelbar am Erfassungsort über die Messung mit unterschiedlichen Filtereinstellungen bis hin zur automatischen Interpretation der verschiedenen Teilentladungsquellen.

Literatur

1. IEC 60270 (2015): High-voltage test techniques – partial discharge measurements.
2. IEC 60034-27 (2006): Rotating electrical machines – part 27: off-line partial discharge measurements on the stator winding of rotating electrical machines.
3. Öttl, F., Fuhr, J., Riesen, D., Krüger, M., Binder, E., Storr, B., Pöschl, J., Keßler, T., Bittner, B. (2016): Eine Untersuchung zum Ausbreitungsverhalten von Teilentladungsimpulsen in der Hochspannungswicklung rotierender elektrischer Maschinen. In VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik.

Autoren



Fabian Öttl

ist Produktmanager für die Prüf- und Messtechnik an rotierenden elektrischen Maschinen bei OMICRON electronics in Klaus, Österreich. Vor seiner Tätigkeit bei OMICRON war er im Bereich Forschung und Entwicklung als Isolationstechniker bei ANDRITZ Hydro, ebenfalls in Österreich, tätig. Er absolvierte das Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Graz, Österreich, und erwarb sein Diplom im Jahr 2011.



Michael Krüger

ist Principal Engineer für die Prüfung und Diagnose elektrischer Betriebsmittel bei OMICRON in Klaus, Österreich. Er studierte Elektrische Energietechnik an der RWTH Aachen und an der Universität Kaiserslautern, Deutschland, und diplomierte im Jahr 1976. Im Jahr 1990 wurde er an der Technischen Universität Wien, Österreich, zum Dr. techn. promoviert. Michael Krüger hat mehr als 40

Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik und der Diagnostik von Transformatoren, Messwandlern, elektrischen rotierenden Maschinen, Kabeln und gasisolierten Schaltanlagen. Er ist Mitglied im VDE, bei der Cigre und beim IEEE und arbeitet in mehreren Working Groups von OVE, Cigre und IEC mit.

4. Kraetge, A., Hoek, S., Koch, M., Koltunowicz, W. (2013): Robust measurement, monitoring and analysis of partial discharges in transformers and other HV apparatus. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 20(6), 1715–1723.
5. Badicu, L. V., Koltunowicz, W., Broniecki, U., Battle, B. (2016): Increased operation reliability through PD monitoring of stator winding. In 13th international electrical insulation conference INSUCON, Birmingham, UK.
6. Binder, E., Draxler, A., Egger, H., Hummer, A., Muhr, M., Praxl, G. (1998): Experience with on-line and off-line PD measurements of generators. In Cigre general session.
7. Koltunowicz, W., Plath, R. (2008): Synchronous multi-channel PD measurements. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 15(6), 2043–2051.
8. Badicu, L. V., Koltunowicz, W., Koch, M., Piccolo, A. (2013): Return of experience from continuous PD monitoring of rotating machines. In 18th international symposium on high voltage engineering ISH, Seoul, South Korea.
9. Rethmeier, K., Obralic, A., Kraetge, A., Krüger, M., Kalkner, W., Plath, R. (2009): Improved noise suppression by real-time pulse-waveform analysis of PD pulses and pulse-shaped disturbances. In 16th international symposium on high voltage engineering ISH, Cape Town, South Africa.
10. Koltunowicz, W., Belkov, A., Broniecki, U., Badicu, L. V., Gorgan, B., Krause, O. (2017): Automated evaluation of PRPD patterns for on-line PD monitoring of stator windings. In 20th international symposium on high voltage engineering ISH, Buenos Aires, Argentina.
11. Koltunowicz, W., Badicu, L. V., Broniecki, U. (2016): Increased operation reliability of HV apparatus through PD monitoring. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 23(6), 1347–1354.
12. Binder, E., Draxler, A., Muhr, M., Pack, S., Schwarz, R., Egger, H., Hummer, A. (1999): Effects of air humidity and temperature to the activities of external partial discharges of stator windings. In Eleventh international symposium on high voltage engineering. Conf. publ. No. 467.



Wojciech Koltunowicz

erwarb 1980 seinen Abschluss im Studium der Elektrotechnik und erhielt in den Jahren 1985 seine Promotion zum Dr. techn. sowie 2004 seine Habilitation für Hochspannungstechnik an der Technischen Universität Warschau, Polen. Von 1987 bis 2007 war er bei CESI in Italien tätig, wo er sich hauptsächlich mit Hochspannungsprüfungen und der Diagnose von Hochspannungsanlagen beschäftigte.

Seit 2007 ist er Senior Technical Consultant bei OMICRON Energy Solutions in Berlin, Deutschland, und beschäftigt sich dort mit der Überwachung von Hochspannungsbetriebsmitteln. Er ist der Österreichische Vertreter im CIGRE Study Committee D1 „Materials and Emerging Test Techniques“ und Vorsitzender der CIGRE Arbeitsgruppe WG D1.66 „Requirements for Partial Discharge Monitoring Systems for Gas Insulated Systems“. Außerdem ist er Mitglied der IEC TC42 WG14.



Laurentiu-Viorel Badicu

erwarb 2008 seinen Abschluss im Studium der Elektrotechnik und erhielt 2012 seine Promotion zum Doktor der Elektrotechnik an der Universität „Politehnica“ in Bukarest, Rumänien. Er ist 2012 bei OMICRON als Prüfingenieur eingetreten und war zunächst im Bereich der Wartung der Monitoringsysteme sowie für die Analyse von TE-Dateien und deren Berichterstattung tätig. Seit 2015 ist Badicu

Produktmanager bei OMICRON und für Online-Monitoringsysteme und deren Weiterentwicklung verantwortlich.

**Bogdan Gorgan**

erhielt 2009 den Dipl.-Ing. sowie 2013 den Ph.D.-Grad in Elektrotechnik von der Universität Politehnica in Bukarest, Rumänien. Von 2012 bis 2015 war er bei Simtech International in Rumänien tätig, wo er vor allem an Hochspannungsprüfung und Diagnostik von Leistungstransformatoren, Online-Monitoring-Systemen für Leistungstransformatoren sowie Healthindex- und Zu-

verlässigkeitsberechnungen für HV-Anlagen beteiligt war. Seit 2016 ist er bei OMICRON tätig und arbeitet als Hochspannungs-Applikationsingenieur und ist an der Überwachung und Diagnose von HV-Geräten beteiligt.