

Analyse von UHF-TE Langzeitmessungen mittels bilderkennender Verfahren

Long-term UHF-PD Analysis using Image Recognition

Dipl.-Ing. Michael Beltle, Dipl.-Ing. Andreas Müller und Prof. Dr.-Ing Stefan Tenbohlen
 Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland
 Michael.Beltle@ieh.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der effizienten Auswertung der während eines Langzeit UHF-TE-Monitorings erhobenen Messdaten. Diese werden in Form von Phasen aufgelösten Teilentladungsmustern (eng. Phase-Resolved-PD-Pattern, PRPD-Pattern) aufbereitet. Mit bilderkennenden Verfahren werden einzelne Quellen im verfügbaren Datenbestand anhand ihrer Muster automatisch identifiziert. Die Erkennung wird mittels der 2-dimensionalen Kreuzkorrelation realisiert. Der Beitrag erklärt die Anwendung der Kreuzkorrelation für die TE-Mustererkennung. Dabei wird die Eignung des Verfahrens diskutiert und verschiedene Optionen zur Verbesserung der automatischen Erkennung untersucht. Die Anwendung des vorgestellten Prinzips wird anhand einer Fallstudie demonstriert.

Abstract

For partial discharge (PD) monitoring ultra-high-frequency (UHF) measurement is an elegant method. This contribution determines methods for UHF-monitoring data analysis. Like at electric measurements, UHF-monitoring uses phase-resolved PD patterns. By the help of image recognition, PD sources are extracted from monitoring data on the basis of their specific patterns. The contribution discusses pattern recognition using 2-dimensional cross-correlation. The applicability of the method for PD analysis is determined as well as different methods for recognition improvement. A use-case illustrates the application.

1 Einführung

Um lokale Schäden in Leistungstransformatoren frühzeitig erkennen zu können und somit die Gefahr eines Ausfalls zu minimieren, kann das Monitoring konventionelle Diagnosemethoden unterstützen.

Für das Monitoring von Teilentladungen (TE) eignet sich dafür die Ultra High Frequency (UHF) Messung, da sie gegenüber der konventionellen elektrischen Messung [1,2] auch während des regulären Betriebs ohne besonderen Mehraufwand eingesetzt werden kann. Bei diesem Verfahren werden die elektromagnetischen Emissionen der TE durch eine Antenne im Kesselinneren gemessen. Dazu wird eine Antenne, siehe **Bild 1**, über einen Ölschieber in den Innenraum eingebracht, die typischerweise für einen Frequenzbereich zwischen 300 bis 3000 MHz ausgelegt ist.



Bild 1 UHF-Antenne zur Installation an einem Leistungstransformator [3]

Die Messung ist meist resistent gegenüber externen Störern, beispielsweise Korona, da der geerdete Kessel externe gestrahlte Signale abschirmt und leitungsgebundene Störer durch die Streukapazität der Durchführungen gedämpft werden. UHF Messungen können aufgrund der Feldentkopplung nicht kalibriert werden. Eine sichere Korrelation mit der verursachenden Phase ist daher nicht möglich. Die gemessenen TE können jedoch auf eine beliebig gewählte Phase bezogen werden [4].

In diesem Beitrag wird zunächst beschrieben, wie TE-Quellen anhand ihres typischen Musters charakterisiert werden können und daraus eine Vorlage entsteht. Mit dieser Vorlage kann die TE-Quelle in einem TE-Datensatz mit Phasenbezug gesucht werden. Mathematisch wird dieser Vorgang durch die 2-dimensionale Kreuzkorrelation beschrieben, welche die Vorlage mit den aus dem Datensatz generierten PRPD-Pattern vergleicht. Je stärker sich die Vorlage und Teile des PRPD-Pattern ähneln, desto höher ist an dieser Stelle der Korrelationsgrad. Die Kreuzkorrelation weißt aber eine gewisse Toleranz auf, so dass auch ähnliche Muster erkannt werden, die ebenfalls die gesuchten Charakteristiken in verschiedenen Ausprägungen aufweisen. Über eine Schwellwertdefinition des Korrelationsgrades kann so definiert werden, ob eine bestimmte Quelle mit typischem Muster in einer zu untersuchenden Menge von PRPD-Pattern aktiv ist.

2 Online Messungen

Als Grundlage dient ein Datensatz mit Messwerten von über 3 Jahren aus einer Langzeit online UHF-TE Messung an einem Maschinentransformator [5]. Im Vorfeld dieser Untersuchung wurde an diesem Betriebsmittel eine elektrische TE Messung über mehrere Tage hinweg durchgeführt, die verschiedene aktive TE-Quellen auf mehreren Phasen zeigte. Das PRPD Pattern zeigt eine hohe Volatilität. Sichtbar sind verschiedene Pattern, die jedoch nicht permanent aktiv sind. Durchschnittlich variierte der nach Norm IEC 60270 [2] gemessene TE Pegel zwischen 100 und 500 pC. Vereinzelt konnten auch TE im nC-Bereich gemessen werden. Daraufhin wurde der Transformator mit einem online-Monitoringsystem ausgerüstet. Die UHF TE Messung wird mit einem Doble Lemke LDS-6/UHF durchgeführt. UHF Signale werden vor der Messung mit einem Faktor von ca. 35 dB verstärkt. Der Messempfänger wird bei 9 MHz Bandbreite betrieben mit einer Mittenfrequenz von 505 MHz. Alle gemessenen TE werden auf Phase L1 des Transformators bezogen.

3 Langzeit TE Analyse

Bild 2 vermittelt einen Eindruck über die Laufzeiten und die TE Aktivitäten des vermessenen Transformators. Erkennbar ist der nur sporadische Betrieb, hauptsächlich in der Wintersaison. Die schwarze Linie stellt die Anzahl der TE dar. Dazu wird die Anzahl an TE pro Minute aufsummiert; die während eines Betriebstages auftritt. Der größte Minutenwert eines Tages ist im Diagramm zu sehen. Betrachtet werden nur TE mit einem Amplitudenwert über 2 mV, was die Beschriftung darstellt.

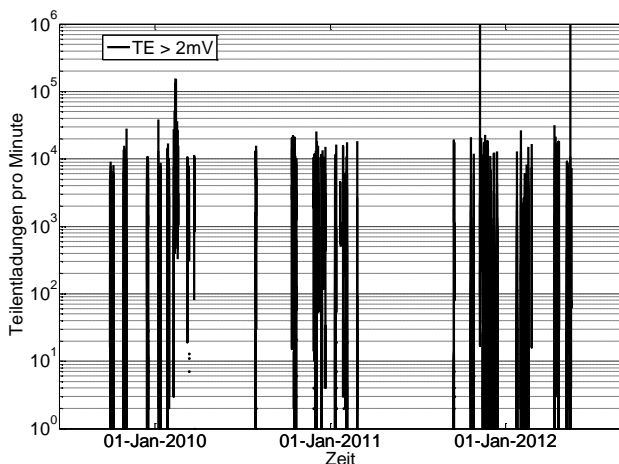


Bild 2 Laufzeiten, Laststrom und TE-Aktivität des betrachteten Transformators während des 3 jährigen Aufzeichnungszeitraums

Der Durchschnitt aller TE liegt bei 3000 Ereignissen pro Minute oder 180000 Ereignissen pro Stunde. Die Standardabweichung beträgt 330000 Ereignisse pro Stunde. Für die UHF-Messung liegt der gemessene Rauschpegel, nach 35 dB Verstärkung, bei ca. 2 mV. Daher werden bei der Summierung nur TE berücksichtigt, die einen höheren Pegel aufweisen. Der Mittelwert der Amplituden liegt bei

15,4 mV. Eine manuelle Durchsicht der PRPD-Pattern zu verschiedenen Zeitpunkten zeigt, dass es mehrere Muster gibt, die jedoch nicht immer aktiv sind, aber teils regelmäßig, teils unregelmäßig wiederkehren. **Bild 3** zeigt einige Beispiele der auftretenden Muster. Aufgrund der durch das Monitoringsystem erhobenen großen Datenmenge wird eine automatische Suche nach den Mustern angestrebt.

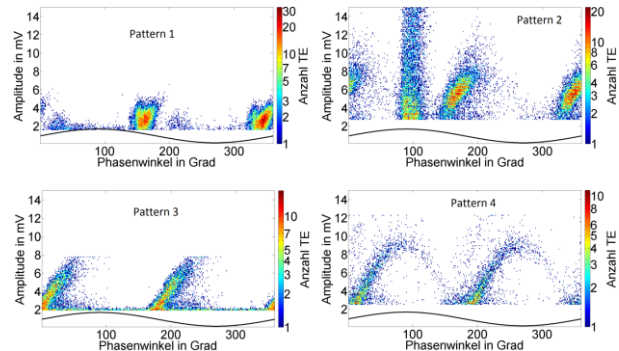


Bild 3 Beispiele verschiedener gemessener Muster des betrachteten Transformators

4 Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelation ist ein Verfahren mit dem zwei Signale miteinander verglichen werden können. In diesem Beitrag wird die zweidimensionale diskrete Kreuzkorrelation verwendet, wie sie auch in der Bilderkennung Anwendung findet. Hierbei wird das PRPD-Pattern mit einer Vorlage kreuzkorreliert. Dadurch kann festgestellt werden, wie sehr sich Vorlage und PRPD-Pattern ähneln. Dabei stellt Formel 1 die allgemeine Kreuzkorrelation dar und Formel 2 die normierte Kreuzkorrelation.

$$C(x_1, y_1) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} A(x, y) B(x + x_1, y + y_1) \quad (1)$$

$$D(x_1, y_1) = \frac{\sum \sum (A(x, y) - \bar{A})(B(x + x_1, y + y_1) - \bar{B})}{\sqrt{\sum \sum (A(x, y) - \bar{A})^2} \sqrt{\sum \sum (B(x + x_1, y + y_1) - \bar{B})^2}} \quad (2)$$

A und B sind die Ausgangsmatrizen, C und D die Ergebnismatrizen der Kreuzkorrelationen. B ist eine Vorlage (engl.: Template), die in „Bild“ A gesucht werden soll. Die Ergebnismatrizen sind in jeder Dimension um eins größer als die Differenz der Größen der Matrizen A und B, sodass jede mögliche vollständige Überlagerung der Vorlage B mit dem „Bild“ A möglich ist. Dabei darf B nicht größer sein als A. Es kann jedes Element der Korrelationsmatrizen C und D aus A und B berechnet werden. X und Y sind die Abmessungen der Matrix B. Die Summenoperatoren in der zweiten Formel durchlaufen jeweils x und y wie in der ersten Formel. \bar{A} und \bar{B} sind die Mittelwerte der Matrixelemente der Vorlage B und der Elemente des entsprechenden Ausschnitts des „Bildes“ A. Durch die Subtraktion werden die beiden Ausschnitte mitelwertfrei, was einen Teil der Normierung darstellt. Der

zweite Teil der Normierung wird durch den Nenner erreicht. Es wird die mittelwertfreie Kreuzkorrelation durch die Effektivwerte des aktuellen Ausschnitts und der Vorlage dividiert, um Kontrastunterschiede herauszurechnen. Der Ergebnisraum der normierten Kreuzkorrelation liegt zwischen $[-1,1]$, wobei eine 1 eine 100 % Trefferquote bedeutet, also exakt die gesuchte Vorlage in Matrix A gefunden wird. Für eine PRPD-Analyse ist dies nicht zu erwarten, da die Vorlage verallgemeinert wird. Dies ist nötig aufgrund der zeitlichen Veränderlichkeit der PRPD-Pattern. Der Ergebniswert -1 tritt auf, wenn die Matrix A eine vollständige Invertierung der Vorlage B enthält.

4.1 PRPD Mustererkennung mittels Kreuzkorrelation

Um zu untersuchen, ob sich die Kreuzkorrelation für die Suche nach bestimmten Mustern eignet, wurde zunächst ein spezielles, häufig auftretendes Muster ausgewählt. Ein dazugehöriges PRPD-Pattern ist in **Bild 4** zu sehen. Das dargestellte Muster wird im Folgenden als Muster 1 bezeichnet.

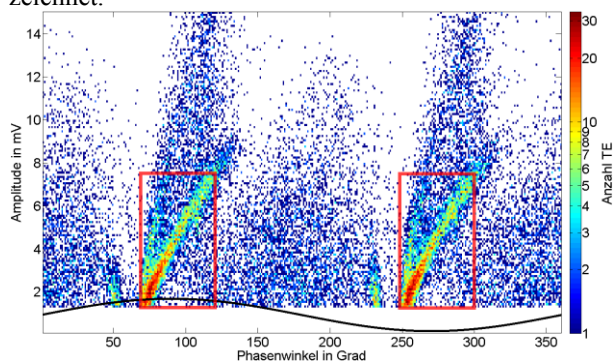


Bild 4 PRPD-Pattern nach einer Minute mit gesuchtem Muster 1, 150 x 360 Matrix „A“

Für dieses Muster wird nun eine Vorlage erstellt, welche mit den PRPD-Pattern aus dem Datensatz korreliert wird. Um einen hohen Korrelationsgrad zu erzielen, sollte die Vorlage ein möglichst charakteristisches Detail aus Muster 1 abbilden. Zusätzlich werden Tiefpass-Filter auf die Vorlage angewendet, um Rauschen zu entfernen. **Bild 5** zeigt zwei farbcodierte Varianten für Matrix B, wobei zunächst nur die große Vorlage verwendet wird.

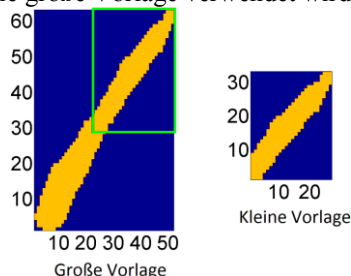


Bild 5 Für Muster 1 erstellte Vorlagen, 63 x 52 und 33 x 27, gelb= TE vorhanden, dunkelblau= keine TE

Dabei entsprechen dunkelblaue Felder Matrixelementen, die zu Null gesetzt sind, also in denen keine TE auftreten sollen; gelbe Felder markieren Elemente, die TE enthalten

müssen. Gemäß Formel (2) wird nun für jede vollständige Überlappung der beiden Matrizen A und B die normierte Kreuzkorrelation errechnet. Die Ergebnismenge der Matrix D ist farbcodiert in **Bild 6** dargestellt.

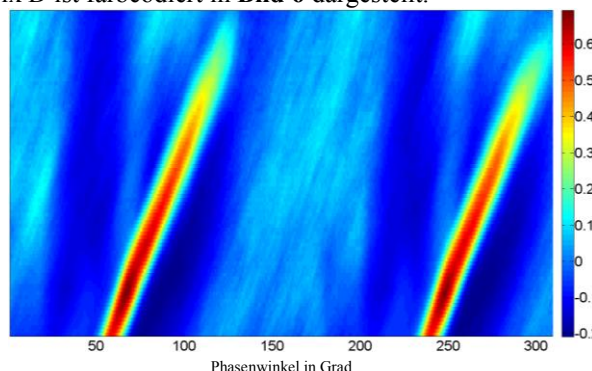


Bild 6 Ergebnismatrix D der norm. Kreuzkorrelation mit farbcodierten Korrelationskoeffizienten über der Phase

Das Muster kann aufgrund der hohen Werte der Korrelationskoeffizienten in diesem PRPD als erkannt bezeichnet werden. Gut zu erkennen ist durch die Farbcodierung die Korrelation beginnend bei 60° und 245° Phasenlage. Das Maximum aller Werte dieser Matrix liegt bei 0,692 und wird im Folgenden als Korrelationsgrad bezeichnet und in Prozent angegeben.

Ideal wäre es, wenn der Korrelationsgrad bei Auftreten des Musters immer deutlich höher liegt, als wenn dieses nicht auftritt, um ein sicheres Schwellwertkriterium definieren zu können. Da für die Generierung eines PRPD-Pattern die Gesamtheit auftretender TE in einem Zeitintervall herangezogen werden, stellt sich die Frage, welche Akkumulationsdauer sich für die Mustererkennung eignet. Daher werden die unterschiedlichen Zeitschritte 1 Minute, 15 Minuten und 1 Stunde untersucht. In **Bild 7** ist der Verlauf der Korrelationsgrade zu sehen. Als Vorlage wurde die in Bild 5 dargestellte große Matrix verwendet. Muster 1 tritt das erste Mal um 2:00 Uhr auf und verschwindet nach etwa 3 Minuten wieder. Ab diesem Zeitpunkt tritt das Muster ungefähr alle 15 Minuten auf und verschwindet kurz danach wieder.

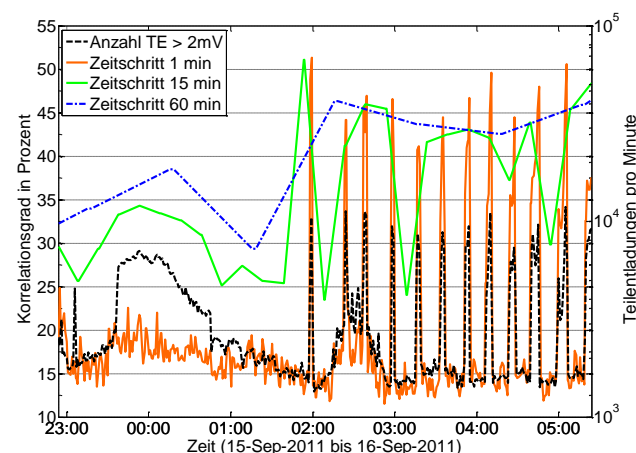


Bild 7 Verlauf des Korrelationsgrades bei Verwendung verschiedener Zeitschritte zur PRPD Pattern Generierung

In Schwarz ist die Anzahl der TE zu sehen. Anhand dieser Kurve lässt sich grob nachvollziehen, wann das Muster vorhanden ist, da sie an den entsprechenden Stellen kurz stark ansteigt. Die rote, grüne und blaue Kurve zeigt jeweils den Verlauf des Korrelationsgrades bei Verwendung des entsprechenden Zeitschritts. Zur Bewertung der Korrelationsgrade wird der betrachtete Zeitraum manuell gesichtet und der jeweilige Korrelationsgrad bewertet. Das Ergebnis ist in **Tabelle 1** zu sehen. Da die Vorlage aus diesem Datensatz extrahiert wurde und keine anderen Muster aktiv sind, ist die Differenz des Korrelationsgrades zwischen Muster tritt auf und tritt nicht auf erwartungsgemäß ausreichend groß. Für den Muster 1 eignet sich ein Zeitschritt von einer Minute (rote Kurve) am besten.

	Zeitschritt 1 Minute	Zeitschritt 15 Minuten	Zeitschritt 1 Stunde
Durchschnittlicher Korrelationsgrad wenn das Muster zu sehen ist	47%	44%	45%
Durchschnittlicher Korrelationsgrad wenn das Muster nicht zu sehen ist	17%	19%	34%
Differenz	30%	25%	11%

Tabelle 1 Vergleich der Korrelationsgrade abhängig vom betrachteten Zeitintervall

4.2 Qualitative Beurteilung des Korrelationsgrades

Um eine Aussage über die Qualität der Mustererkennung treffen zu können, werden die Korrelationsgrade verschiedener Beispieldatensätze verglichen. Es werden drei Datensätze ausgewählt, die jeweils die folgenden Bedingungen erfüllen:

- I. Muster 1 tritt auf
- II. Muster 1 tritt mit anderen Mustern auf
- III. Muster 1 tritt nicht auf, aber andere Muster

Bei den Datensätzen I und II werden jeweils Zeiträume betrachtet, in denen Muster 1 20-mal zu sehen ist. Da das Muster hier häufig über mehrere Minuten vorhanden ist, wird von jedem Auftreten der Maximalwert des Korrelationsgrades ermittelt. Bei Datensatz III wird eine Dauer von etwa drei Tagen herangezogen und der Korrelationsgrad ebenfalls minutenweise ermittelt. Die Ergebnisse werden wieder manuell mit den PRPD Pattern verglichen. Gefordert wird eine Trefferquote von mindestens 90%, dementsprechend müssen 18 der 20 Vorkommnisse erkannt werden. Deswegen wird der drittkleinste vorkommende Korrelationsgrad beim Auftreten von Muster 1 in Datensatz II als Schwellwert gewählt. Um Fehlerkennungen auszuschließen, sollte der Korrelationsgrad aus Datensatz III immer unter diesem Schwellwert liegen. **Tabelle 2** zeigt die Ergebnisse dieser Auswertung, dabei wurden sowohl die bisher verwendete große Vorlage als auch die kleine Variante aus Bild 5 verwendet. Neben den

bereits beschriebenen Schwellwerten ist auch der niedrigste Korrelationsgrad angegeben, bei dem das Muster auftritt. Bei der großen Vorlage liegt Korrelationsgrad in Datensatz III in machen Fällen über dem mit Datensatz II definierten Schwellwert, weswegen es zu Fehlerkennungen kommt.

		Kleine Vorlage	Große Vorlage
Datensatz I	90% erkannt bei	52%	47,6%
	Niedrigster Wert	50,4%	44,9%
Datensatz II	Schwellwert	42%	32%
	Niedrigster Wert	33,5%	26,9%
Datensatz III	90% unterhalb von	31,6%	35,2%
	99% unterhalb von	35,5%	37,4%
Fehlerkennungsrate		0%	22,4%

Tabelle 2 Korrelationsgrade und Fehlerkennungsraten beider Vorlagen bei drei verschiedenen Referenzdatensätzen

Die Fehlererkennungsrate zeigt, dass die kleine Vorlage für die Korrelation besser geeignet ist als eine große Vorlage. Ein Grund hierfür ist, dass die blau gefärbte Fläche der großen Vorlage deutlich größer ist und dort nur wenige TE für einen hohen Korrelationsgrad auftreten dürfen, was aufgrund der Streuung der TE nicht gegeben ist. Außerdem reagiert die große Vorlage deutlich empfindlicher auf Änderungen des Musters, wenn beispielsweise größere Amplituden gemessen werden und das Muster gestreckt wird.

4.3 Erhöhung des Korrelationsgrades durch Filterung

Im Folgenden wird untersucht, inwiefern eine Aufbereitung der PRPD-Patterns zu einer Erhöhung der Erkennung führen kann. Prinzipiell führen verrauschte Kanten und vereinzelte TE in Bereichen, die gemäß der Definition der Vorlage TE frei sein sollen zu einer Verschlechterung der Korrelation. Durch Glätten der Kanten und Entfernen der vereinzelten TE soll die Korrelation erhöht werden.

Eine Möglichkeit zum Entrauschen stellt die Mittelwertfilterung dar. Diese berechnet jeden Punkt einer Matrix aus dem Mittelwert aller in der Nähe befindlichen Punkte neu. So werden bei einem 3 x 3 Mittelwertfilter insgesamt neun Punkte zur Ermittlung des Mittelwerts verwendet: der eigentliche Punkt selbst und die acht direkt angrenzenden Punkte.

Eine zweite Möglichkeit stellt die Tiefpassfilterung dar. Dazu wird das PRPD-Pattern zunächst über eine 2-dimensionale Fouriertransformation in den Frequenzbereich überführt. Hohe Frequenzen entstehen in Bereichen, in denen sich der Wert von Matrixelementen stark ändert, bildlich gesprochen also ein hoher Kontrast auftritt. Die Transformation bildet hohe Frequenzen an den Matrixrändern ab, Tiefe in der Mitte. Die Tiefpassfilterung selektiert daher nur Bereiche aus der Matrixmitte und trans-

formiert diese zurück in den ursprünglichen Bildbereich. Beide Methoden führen zu einer Verringerung des Rauschens. **Bild 8** zeigt beispielhaft den Effekt der Tiefpassfilterung anhand eines typischen Patterns.

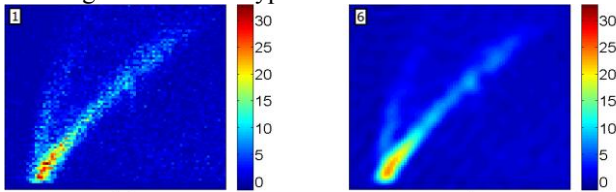


Bild 8 Links: Ursprüngliches PRPD-Pattern (Ausschnitt), rechts: gleicher Ausschnitt nach Tiefpassfilterung, Grenzfrequenz $f_g = 20\%$ von f_{max}

Die Qualitäten der Filterung werden anhand des bereits diskutierten Muster 1 untersucht. **Tabelle 3** zeigt die Zusammenfassung. Die erste Spalte enthält als Referenz die bereits bekannten Schwellwertmessungen aus Tabelle 2. Sowohl bei Datensatz II mit dem Muster als auch bei Datensatz III ohne Muster steigen die Korrelationsgrade. Hinsichtlich Datensatz III kann dies als Erhöhung der Fehlerkennung interpretiert werden. Da es sich jedoch um ein vergleichendes Verfahren handelt, wird nur die Differenz zwischen Schwellwert und Fehlerkennung betrachtet, die durch die Filterung verbessert wird. Ähnliche Ergebnisse lassen sich auch mit der großen Vorlage erzielen. Da jedoch die kleinere Vorlage allgemein bessere Trefferraten erzielt, wird nur diese betrachtet.

	Ohne Filter	mit 3 x 3 Filter	mit 5 x 5 Filter
Datensatz II	42 %	64,6 %	72,6 %
Datensatz III	35,5 %	46,9 %	57,9 %
Differenz	6,3 %	17,7 %	14,7 %
Fehlerkennungsrate	0 %	0 %	0 %

Tabelle 3 Korrelationswerte nach Mittelwert Filterung. Für Muster 1 mit kleiner Vorlage, angegeben ist der Durchschnitt

Ein signifikanter Nachteil des Mittelwertfilters ist die Empfindlichkeit gegenüber Rauschen im PRPD-Pattern. Abhängig von der gewählten Filtergröße kann es vorkommen, dass Verfälschungen des PRPD-Pattern auftreten, siehe **Bild 9**.

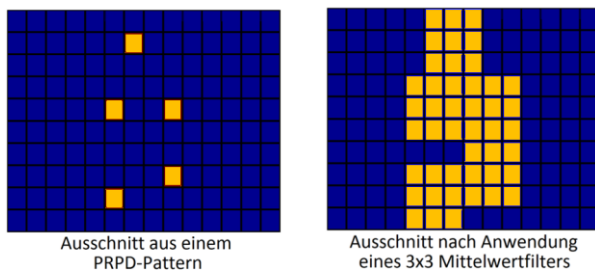


Bild 9 Fehlerhafte Musterbildung durch Mittelwertfilter. Links Rauschen, rechts gefiltertes Ergebnismuster

Kleine, vereinzelte TE führen bei der Mittelwertfilterung zu Flächenbildungen. In einem ungünstigen Fall kann sich

ein Muster ergeben, dass eine hohe Korrelation mit der Vorlage aufweist und zu einer Fehlerkennung führt. Zum Vergleich wird daher auch die Tiefpassfilterung hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Die Filterung kann durch die Größe des Filters parametrisiert werden. Als Parameter dient die Grenzfrequenz des Filters, welche hier in Prozent relativ zur höchsten vorkommenden Frequenz angegeben ist.

Für das Muster 1 soll eine optimale Grenzfrequenz gefunden werden. Dazu werden mithilfe der Datensätze II und III die Fehlertrefferquote sowie die Differenz zwischen dem Schwellwert aus II und III ermittelt. **Bild 10** zeigt die Fehlerkennungsquote und die Differenz der Korrelationsgrade bei hoher Erkennungsrate aus II und Fehlerkennungsrate aus III. Für eine zuverlässige Erkennung sollte die Differenz möglichst groß sein und die Fehlerkennung gering. Das grüne Rechteck in Bild 10 markiert die optimale Schnittmenge beider Bedingungen. Die optimale

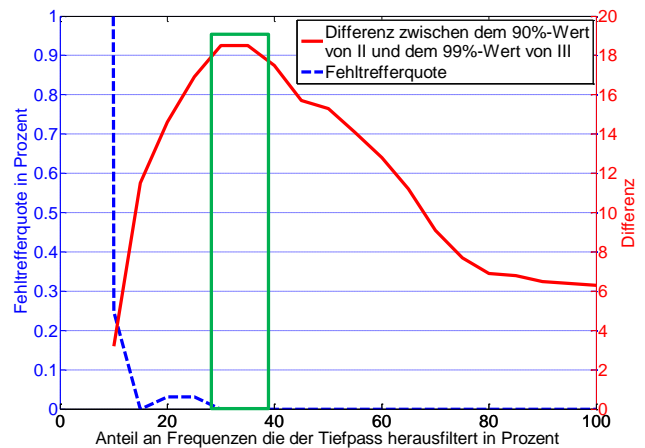


Bild 10 Fehlererkennungsrate aus III und Differenz zwischen Erkennung aus II und Fehlerkennung in Abhängigkeit der Grenzfrequenz des Tiefpasses. Der grüne Bereich zeigt das Optimum der kleinen Vorlage.

Die Auswertung der Datensätze ist in **Tabelle 4** dargestellt. Erkennbar ist die signifikante Erhöhung des Korrelationsgrades um 19 % bei vorhandenem Muster in Datensatz II. Gleichzeitig steigt die Korrelation bei nicht vorhandenem Muster in Datensatz III nur gering an, was die Differenz fast um Faktor drei verbessert.

	Ohne Filter	Tiefpass 35 %
Datensatz II	42 %	60,9 %
Datensatz III	35,5 %	36,5 %
Differenz	6,3 %	17,7 %
Fehlerkennungsrate	0 %	0 %

Tabelle 4 Korrelationswerte nach Tiefpassfilterung. Dabei werden vom ursprünglichen Frequenzspektrum nur die unteren 35% berücksichtigt.

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Filterung der PRPD-Pattern die Mustererkennung mittels Kreuzkor-

relation verbessern kann, insbesondere die geeignet parametrisierte Tiefpassfilterung ist hier zu erwähnen.

5 Fallstudie

Mit dem vorgestellten Verfahren werden nun aus dem gesamten UHF-Datensatz des Maschinentransformators drei verschiedene Muster, bzw. verursachende Quellen untersucht. Neben dem bekannten Muster 1 werden zwei weitere PRPD Pattern, dargestellt in **Bild 11**, mit Hilfe der Kreuzkorrelation gesucht.

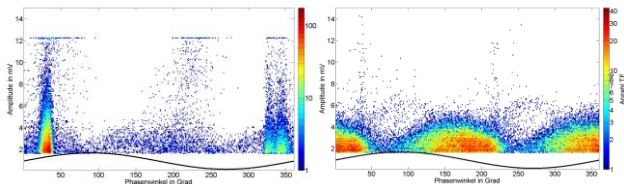


Bild 11 zwei typische Muster für den betrachteten Transformator. Links Muster 2, rechts Muster 3. Aufzeichnungsdauer je 1 Minute

Für Muster 2 und 3 wird jeweils wieder eine Vorlage erstellt und alle Vorlagen mit dem gesamten Datenbestand kreuzkorreliert. Das Ergebnis ist in **Bild 12** dargestellt. Zeiten, in denen der Transformator nicht lief, sind ausgeblendet. Das obere Diagramm stellt alle aufgezeichneten TE pro Minute in blau dar, in rot ist der Gleitende Durchschnitt über eine halbe Stunde zu sehen. Im unteren Diagramm sind Zeiten, in denen das Muster vorhanden ist jeweils farblich markiert. Erkennbar ist, dass Muster 3 ein Grundmuster darstellt und fast permanent vorhanden ist. Das zuerst betrachtete Muster 1 kommt im Vergleich selten vor. Muster 2 ist ebenfalls seltener aktiv als 3.

Der Vergleich der Teilentladungen pro Minute mit den Mustern zeigt eine Besonderheit bei Aufzeichnungstag 11, an dem die Anzahl der TE überdurchschnittlich hoch liegt. Als Hauptverursacher kann durch die Kreuzkorrelation Muster 2 identifiziert werden.

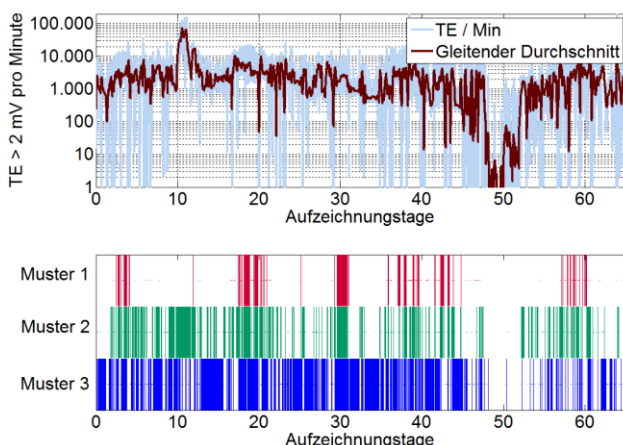


Bild 12 oben: TE pro Minute über der Zeit
unten: Vorkommen der gesuchten Muster 1 bis 3

Die Musterauswertung weist darauf hin, dass für gesamte Anzahl an TE dieses Transformators hauptsächlich die zu den Mustern 2 und 3 gehörenden Quellen verantwortlich

sind. Muster 1 führt zu keiner erkennbaren Erhöhung der Aktivität.

6 Zusammenfassung & Ausblick

Für die Auswertung von PRPD Pattern kann die Kreuzkorrelation herangezogen werden. Empfehlenswert ist dies beispielsweise, wenn große Datenmengen vorliegen. Voraussetzung ist, dass bestimmte Muster bekannt sind, nach denen gesucht werden soll. Die Muster müssen durch eine Vorlagenmatrix möglichst eindeutig charakterisiert werden, um Fehlerkennungen zu vermeiden. Dabei zeigt sich, dass eine kleinere Vorlagenmatrix einer größeren vorzuziehen ist. Die Mustererkennung kann verbessert werden, indem die PRPD-Pattern beispielsweise mit Hilfe von Tiefpass-Filtern entrauscht werden. Die Wahl der Grenzfrequenz ist hier zu berücksichtigen. Sind bestimmte Muster von Interesse, beispielsweise weil die zugehörigen Quellen näher untersucht werden sollen, können diese mit der vorgestellten Methode automatisch gesucht werden. Für Langzeitaufnahmen, die beispielsweise mittels eines UHF-Monitoring aufgezeichnet wurden, kann das vorgestellte Verfahren eingesetzt werden, um die Analyse von TE teilweise zu automatisieren. Einzelne Quellen lassen sich in ihrer Entwicklung verfolgen. Der Trend der TE-Anzahl kann mit den Ergebnissen der Kreuzkorrelation zusätzlich mit der gesamten TE Anzahl im Zeitintervall verglichen werden, so dass der Beitrag einzelner Quellen zur Gesamtaktivität verfolgt werden kann. Damit lässt sich abschätzen, welche Muster, respektive Quellen den Hauptanteil der TE Aktivität verantworten und ob sich diese Verhältnisse im Laufe der Zeit ändern.

7 Literatur

- [1] S. Tenbohlen, A. Pfeffer, S. Coenen, "On-site Experiences with Multi-Terminal IEC PD Measurements, UHF PD Measurements and Acoustic PD Localisation", Electrical Insulation Conference CA, 2010
- [2] High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, IEC Standard 60270, 3. Edition, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2000.
- [3] S. Coenen, S. Tenbohlen, S.M. Markalous, T. Strehl, "Sensitivity of UHF PD Measurements in Power Transformers", IEEE Tr. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6/2008, pp. 1553-1558.
- [4] S. Coenen, S. Tenbohlen, T. Strehl, S. Markalous, "Fundamental Characteristics of UHF PD Probes and the Radiation Behaviour of PD Sources in Power Transformers", Proceedings of 16th ISH, Cape Town, South Africa, 2009.
- [5] A. Müller, M. Beltle, S. Coenen, S. Tenbohlen, "Correlation of DGA, UHF PD Measurement and Vibration Data for Power Transformer Monitoring", 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. F-071