
Online/Offline Messungen an gealterten Betriebsmitteln: Interpretation, Diagnose, Risikoabschätzung

M. Muhr, B. Körbler, R. Schwarz

Kurzfassung:

Die zunehmende Liberalisierung des Energiemarktes und den damit in Verbindung stehenden Kostendruck fordert eine verstärkte Optimierung der Betriebs- und Instandhaltungskosten bei gleichzeitiger Steigerung der Verfügbarkeit der elektrischen Betriebsmittel.

Verschleiß und Alterung sind mitbestimmende Faktoren der Nutzungsdauer von Betriebsmitteln zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Durch die Messung von alterungsrelevanten Kenngrößen, sowie die Interpretation der Messergebnisse aufgrund von Referenz- und definierten Normwerten soll eine Diagnose und somit eine zuverlässige Zustandsbeurteilung realisiert werden. Das dabei gesetzte Ziel ist eine sichere Entscheidungsgrundlage zu erhalten, die eine Risikoabschätzung und somit die Entscheidung einer Instandhaltung oder Neubeschaffung ermöglicht.

Die Diagnose als Klassifizierung und Bewertung des Zustand eines Systems bzw. Teilsystems ist eine Beurteilung, die über die bloße Zusammenfassung der offensichtlichen Anzeichen hinausgeht. Entscheidend für die Eignung eines Diagnoseverfahrens ist die Zuverlässigkeit des Zusammenhangs zwischen den Anzeichen und dem daraus abgeleiteten Befund. Bei der technischen Diagnose wird anhand der Beobachtung von auftretenden „Symptomen“ versucht, Rückschlüsse aufgrund der erfassten Fehler bzw. der Fehlerauswirkung auf die Fehlerursache zu ziehen. Die für die Diagnose herangezogenen Daten, werden von unterschiedlichen Überwachungssystemen geliefert. Bei den dafür eingesetzten Systemen wird zwischen ON-line und OFF-line unterschieden. ON-Line Systeme sind fest verdrahtet und liefern während des Prozesses bzw. des Betriebs kontinuierlich mitgemessene Daten. Bei OFF-Line Diagnose-Systemen erfolgt die Einbringung bzw. Messung unterschiedlicher Daten außerhalb des normalen Betriebs. Abhängig vom jeweiligen elektrischen Betriebsmittel ist die Wahl des Systems.

Diese Überwachung und die darauf folgende Zustandsbeurteilung bildet die Grundlage für die Instandhaltung, Verfügbarkeit (Versorgungsqualität) sowie einer daraus resultierenden Risikoabschätzung.

1 EINLEITUNG

Durch entsprechende OFF-line und ON-line Überwachungen und den damit in Verbindung stehenden Methoden und Monitoringssystemen wird das Ziel verfolgt einerseits eine zuverlässige Energieversorgung, andererseits aber auch mit reduzierten Instandhaltungsmaßnahmen eine optimale Ausnutzung der Betriebsmittel zu erreichen. Zentrale Bedeutung bekommt dabei die Erfassung spezifischer und alterungsrelevanter Messgrößen sowie deren Beurteilung bzw. Diagnose. Diese wiederum bilden gleichzeitig die Grundlage für Verfügbarkeit, Instandhaltung und Risikoabschätzung.

2 KOMPONENTEN ELEKTRISCHER BETRIEBSMITTEL

Grundsätzlich sind alle elektrische Betriebsmittel aus den Komponenten

- elektrische Isolierung
- elektrischer Leiter
- Verbindungen (elektrischer Kontakt)

aufgebaut. Diese Teile stellen – in welcher Form auch immer – den kleinsten gemeinsamen Nenner für die elektrische Funktion verschiedenster elektrischer Betriebsmittels dar. Daher sind diese Komponenten auch für die Betrachtung der Lebensdauer eines elektrischen Betriebsmittels von Bedeutung. Besonders die elektrische Isolierung trägt auf Grund ihres Volumens und Ausdehnung zur Aufrechterhaltung der elektrischen Funktion eines Betriebsmittels bei. Diese wird in einschlägigen nationalen und internationalen Normen besonders behandelt, da diese neben der elektrischen Funktion auch die Funktion der Aufnahme mechanischer Kräfte sowie die Funktion des Wärmeabtransportes von elektrischen Leitern erfüllen muss [VDE 0302 Teil 1 bis 4, IEC 60505, IEC 791]. Weiters bietet die Isolierung oder das Isoliersystem auch einen Schutz des elektrischen Leiters vor chemischen Angriffen der herrschenden Umgebungsbedingungen innerhalb und außerhalb eines Betriebsmittels.

Die Funktion eines Betriebsmittels versagt, wenn eine der genannten Komponenten ausfällt und somit die vorgegebene Ausbreitung des elektrischen Stromes im Betriebsmittel nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Gründe für einen solchen Funktionsverlust findet man, abgesehen von unzureichender Dimensionierung, durch Überlastung und durch Alterung der Komponenten.

3 ALTERUNG ELEKTRISCHER BETRIEBSMITTEL

Der Begriff „Alterung“ wird unter anderem in der deutschen Norm VDE 0302 „Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen“ als „irreversible Änderung von Eigenschaften eines elektrischen Isoliersystems infolge eines oder mehrere Einflussfaktoren“ bezeichnet. Dieser Sachverhalt trifft nicht nur auf elektrische Isoliersysteme zu, sondern auf alle beteiligten Komponenten und Materialien eines elektrischen Betriebsmittels.

Bei der Alterung von Betriebsmittel treten thermische, elektrische, mechanische und ambiente Beeinflussungsfaktoren auf, welche den Verlust der Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels beschleunigen. Für irreversible thermische Beeinflussungen gelten, abgesehen von den reversiblen Veränderungen mechanischer Eigenschaften der im Betriebsmittel eingesetzten Werkstoffe, Gesetze deren Grundlage chemische Reaktionsgesetze darstellen. Beispiel dafür ist das Arrhenius- bzw. Montsingergesetz. Diese sagen aus, dass die Alterung z.B. bei Öl-Papier Isolierungen bei höheren Temperaturen und Steigerungsstufen von 6-8 Kelvin eine Halbierung der Lebensdauer erfahren.

Die Gesetze gelten nicht nur für Öl-Papier sondern auch, in leicht abgewandelter Form, für Kunststoffisoliersysteme.

Arrheniusgesetz:

$$t_L = t_0 \cdot e^{-k \cdot \vartheta}$$

t_L ... Lebensdauer eines Betriebsmittels bei Temperatur

t_0 ... Lebensdauer bei Bezugstemperatur

k ... Zusammenfassung von Materialkonstanten (Temperaturkonstante)

ϑ ... Temperatur

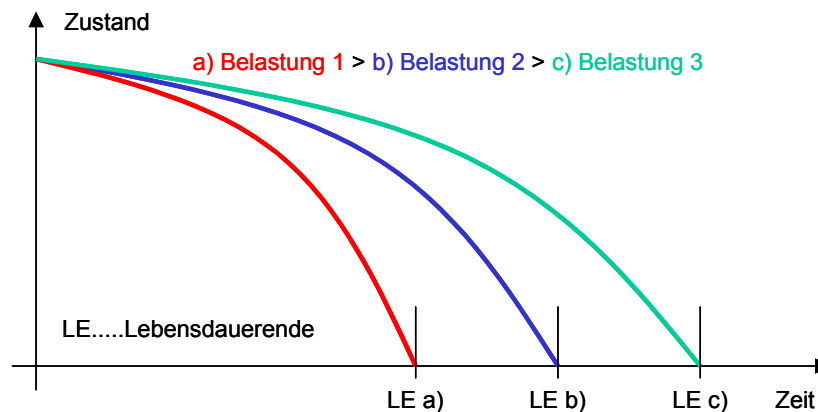


Abbildung 1: Zustandsverhalten in Abhängigkeit der Belastung (Betriebstemperatur)

Betrachtet man die elektrische Beanspruchung und ihre Auswirkungen auf ein Betriebsmittel, so zeigt diese ebenfalls am Isoliersystem die stärksten Effekte. Durch die auftretenden Feldstärken wird die Dissoziation chemischer Verbindungen unterstützt. Somit gilt die elektrische Feldstärke ebenfalls als beschleunigender Alterungsfaktor. Durch den Vergleich von Langzeitversuchen von Isoliersystemen mit erhöhter elektrischer Belastung wurde das „Inverse Power Law“ postuliert, welches besagt, dass die Lebensdauer eines Betriebsmittels logarithmisch mit dem angelegten elektrischen Feld zusammenhängt und mit zunehmenden elektrischen Feld abnimmt [1].

Inverse Power Law:

$$t \cdot E^n = const$$

In logarithmischer Darstellung erhält man:

$$\log E = k - \frac{1}{n} \cdot \log t$$

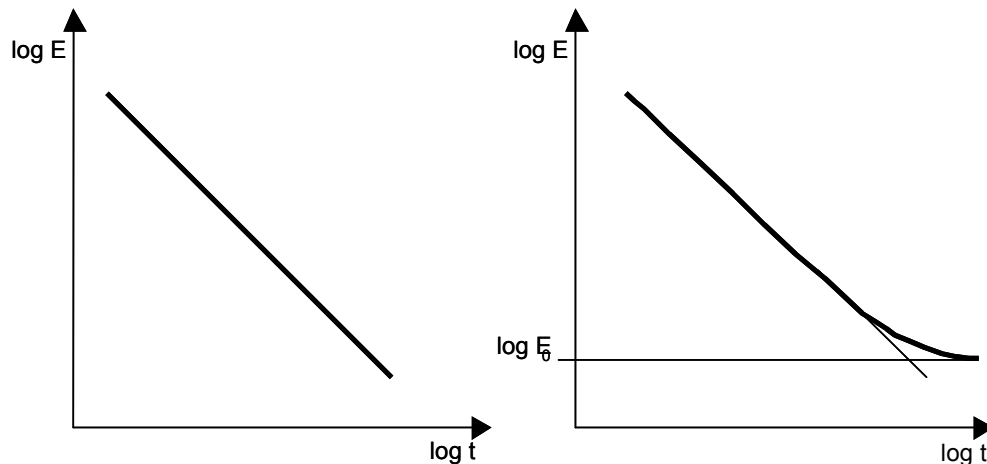


Abbildung 2: Lebensdauergesetze links: "inverse power law", rechts: modifiziertes Lebensdauergesetz mit Schwellenfeldstärke E_0 [1]

Mechanische Belastungen elektrischer Betriebsmittel können in externe und interne Quellen eingeteilt werden. Externe mechanische Belastungen können im und außerhalb des Betriebs auftreten und sind auf Erschütterungen und einwirkende Kräfte auf das Betriebsmittel zurückzuführen. Interne mechanische Belastungen können während des elektrischen Betriebes auftreten, wobei die Kräfte auf die elektromagnetische Kraftwirkung der fließenden Betriebs-, Kurzschluss- und Fehlerströme zurückzuführen sind. Diese stellen auf Wicklungen und Leiteranordnungen meist die härteren Beanspruchungen dar, da diese hohe und impulsförmige Kräfte hervorrufen. Treten durch diese Beanspruchungen Verformungen an den Leitern und auf Isoliersystem auf, so stellen diese Initialpunkte Angriffspunkte für eine beschleunigten Alterung dar.

Initialpunkte oder singuläre Punkte im Isoliersystem bieten mit ihrer Eigenschaft höheren Belastungsfaktoren ausgesetzt zu sein, Punkte an denen chemische Reaktionen schneller ablaufen können als bei homogenen Umgebungsbedingungen und Belastungsfaktoren. An diesen Stellen werden die ablaufenden chemischen Reaktionen durch höhere Temperaturen, höhere elektrische Felder sowie Luftfeuchtigkeit oder anderen an den chemischen Reaktionen als Katalysator wirkenden Stoffen beschleunigt.

4 MESSGRÖSSENERFASSUNG UND METHODEN

Ein immer größer werdendes Interesse den Zustand eines elektrischen Betriebsmittel zu überwachen und gegebenenfalls rechtzeitig Maßnahmen zu setzen, bedeutet auch höhere Ansprüche an die Messwertgewinnung. Ständige Verbesserungen und Weiterentwicklungen auch auf dem Gebiet der Messfühler sind daher unumgänglich.

4.1 Sensoren

Der Sensor ist ein wichtiges Glied für die Erfassung des Ist-Zustandes und damit zur Messwertgewinnung. Er bildet die Grundlage für die Zustandsbeurteilung elektrischer Betriebsmittel und ist zuständig für eine empfindliche Erfassung von physikalischen Größen sowie deren Umwandlung in elektrische Signale. Entscheidend für die Wahl der Sensoren ist je nach Anwendung der Messbereich, Betriebsbereich, Baugröße, Genauigkeit. Sensorsysteme enthalten auch einen Teil der Elektronik für dessen Betrieb und die Aufbereitung der gewonnenen Signals etwa Vorverstärkung, Linearisierung, Temperaturkompensation und Anpassung an die weitere Signalverarbeitung.

Der Einsatz dieser Sensoren bildet die Grundlage für die Erfassung von Kenngrößen bei den eingesetzten Mess- und Prüfmethode.

4.2 Mess- und Prüfmethode

Zur Beurteilung des Isolationszustandes und der Diagnose werden unterschiedliche Methoden zur Erfassung von relevanten Messdaten eingesetzt. Dabei kann grundsätzlich zwischen Messmethoden und Prüfmethode unterschieden werden.

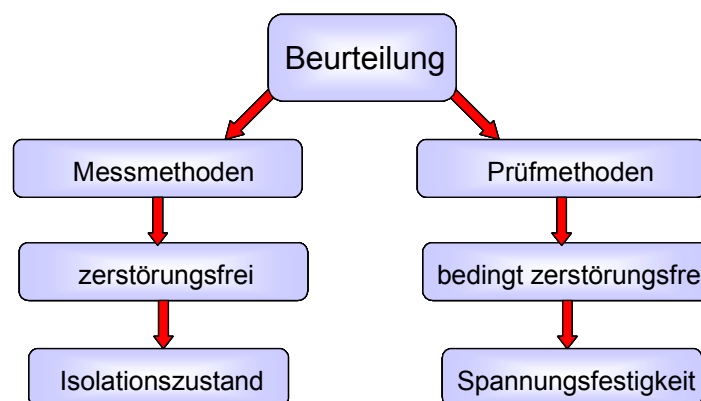


Abbildung 3: Eigenschaften von Mess- und Prüfmethode [2]

Zur Beurteilung des Isolationszustandes werden in Abhängigkeit der Eigenschaften des Isolationsmediums (gasförmig, flüssig und fest) vorwiegend zerstörungsfreie Messmethoden herangezogen. Da jedoch einzelne Methoden nicht alle Schwachstellen innerhalb einer Isolierung erfassen können, werden, um eine hohe Aussagekraft über den Isolationszustand machen zu können, unterschiedliche Methoden in Verbindung gebracht. Erst mit Hilfe dieser Ergebnisse kann eine Beurteilung der Isolierung durchgeführt werden.

Für eine genaue Beurteilung der Spannungsfestigkeit – unabhängig von den physikalischen Eigenschaften des Isoliermediums – ist jedoch eine Spannungsprüfung unerlässlich. Dabei werden neben den betriebsfrequenten Wechspannungsprüfungen auch noch zahlreiche Spannungsprüfmethode mit nicht betriebsfrequenten Spannungsformen eingesetzt.

Aus einer Vielzahl von Methoden werden je nach Betriebsmittel entsprechend Verfahren ausgewählt. Dazu gehören u.a. dielektrische Methoden, die die

Eigenschaften eines Dielektrikums (Isoliersystem) erfassen und bewerten. Parallel dazu werden auch andere physikalische Effekte erfasst und für die Bewertung herangezogen.

Die Höhe der erfassten Größen sowie ihre Abhängigkeit von den Alterungsfaktoren thermischer, elektrischer, mechanischer und ambienter Art gelten als Kriterium die Beurteilung des Zustandes des Isoliersystems.

Zu den wichtigsten Messgrößen und Analysemethoden zählen:

Isolationswiderstand

Der Isolationswiderstand zwischen zwei Elektroden ergibt sich aus einem Widerstandsnetzwerk, das die unterschiedlichen Materialien und Oberflächen des Isolationssystems nachbildet. Die Werte werden vom Oberflächen- und Durchgangswiderstand der Isoliermaterialien bestimmt. Bei Durchgangswiderstand ist eine starke Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit, der Feldstärke, der Temperatur und der Feuchtigkeit gegeben. Der Oberflächenwiderstand hingegen hängt sehr stark von dem Vorhandensein von Fremdschichten ab.

Kapazitäts- und Verlustfaktor

Kapazitäten und Verlustfaktoren sind stoff- und spezifische Größen. Die klassische Messung erfolgt mit Hilfe der Kapazitäts- und Verlustfaktormessbrücke nach Schering. Heutzutage kommt dabei vermehrt die 0,1 Hz-Methode zur Anwendung.

Teilentladungen

Teilentladungen entstehen durch ein lokales Versagen der elektrischen Isolation. Wird in Isolieranordnungen die kritische Feldstärke überschritten (Inhomogenitäten), treten Entladungen auf. Sind diese Entladungen auf einen kleinen Bereich begrenzt – d.h. sie überbrücken nicht den gesamten Elektrodenzwischenraum – spricht man von Teilentladungen (TE). Teilentladungen finden in Gasen, Festkörpern und Flüssigkeiten statt, wobei sie die kurzzeitige elektrische Festigkeit oft nicht beeinträchtigen. Kenngrößen der Teilentladungsdiagnostik sind die Einsetzspannung, die Intensität - gemessen als scheinbare Ladung, sowie die Phasenwinkelzuordnung der TE zur Prüfspannung.

Für eine Bestimmung der Ladung wird die konventionelle Messung nach IEC 60270 durchgeführt.

Unkonventionellen Methoden (Nachweismethoden) dienen hauptsächlich zur Lokalisierung des Entstehungsorts der Teilentladungen.

Isotherme Relaxationsstrom Analyse (IRC-Analyse)

Die IRC Analyse beruht auf der Messung des Depolarisationsstromes nach vorheriger Formierung mit Gleichspannung. Dabei wird die Funktion des Messstromes durch mehrere Relaxationsstromkomponenten angenähert. Als wesentliches Kriterium gilt es die Umgebungsbedingungen genau zu erfassen.

Chemische Analysen

Chemische Analysen sind vor allem für die Diagnose von Öl-Papier-Isolierungen wichtig, wobei sie die Bestimmungen des Wassergehalts, der im Öl gelösten Spaltgase, der Zersetzungsprodukte von Zellulose sowie des Depolymerisationsgrades erlauben.

Hauptanwendung findet die Gas-in-Öl-Analyse bei Transformatoren und Öl-Papierkabeln, wo die aufgrund einer elektrischen Entladung entstehenden Spaltgase (Öl-Zellulose-Zersetzung) analysiert werden. Die Interpretation gemessener Gaskonzentrationen erlaubt die Identifizierung verschiedener Fehlerarten. Für die automatisierte Online-Überwachung großer Transformatoren stehen Infrarot-Spektrometer zur Verfügung, die die relevantesten Schadgase mit Ausnahme von Wasserstoff erfassen können.

Optische und akustische Verfahren

Lichtwellenleiter sind direkt als Sensoren zur thermischen Überwachung von Kabeln und Leiterseilen einsetzbar. Ebenso werden Lichtleiter verwendet, um Entladungsstellen in Anlagen zu orten. Mit Restlichtverstärkern können Koronaentladungen optisch geortet werden. Zudem können Entladungen durch Richtmikrofone und Körperschallmikrofone akustisch geortet werden.

Als Beispiel eines Einsatzgebietes werden durch passive Verfahren (Beobachten von Schwingungen, die durch den Normalbetrieb oder den gestörten Betrieb der Maschine entstehen) die wesentlichen Maschinenkomponenten als Monitoring (on-line-Diagnose) überwacht. Durch Schwingungsaufnehmer, die an kritischen Stellen der Maschine angebracht sind, werden Geräusche, Vibrationen, Schallemissionen registriert und durch Frequenzanalysatoren bewertet.

Temperaturmessung-Thermografie

Die Temperaturmessung selbst kann über kontaktbehaftete und berührungslose Verfahren erfolgen. Bei berührungslosen Verfahren muss jedoch zur zu messenden Oberfläche eine direkte optische Verbindung bestehen. Bei kontaktbehafteten Verfahren werden die Sensoren direkt am bzw. im Betriebsmittel angebracht. Dabei beeinflussen diese Messungen durch einen Temperatúraustausch zwischen Sensor und Messobjekt das Ergebnis, wobei die Höhe von der Beeinflussung von Verhältnis Sensorgröße zu Objektgröße abhängig ist.

Mit der Infrarot-Thermografie steht ein modernes Messverfahren zur Bestimmung von flächenhaften Temperaturverteilungen bzw. Temperaturprofilen zur Verfügung. Damit lassen sich insbesondere großflächige, sich bewegende, schwer zugängliche oder unter Spannung stehende Objekte messen. Die Grundlage für die Beurteilung setzt die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften zu bewertenden Objektes voraus.

Bestimmung von Systemeigenschaften

Windungsschlüsse in Transformatoren, Verschiebung von Wicklungen, Teildurchschläge in Kondensatorwickeln oder zwischen Durchführungsbelägen, Kurzschlüsse in Kabeln sowie andere elektrische Veränderungen führen zu geänderten Systemeigenschaften, wobei diese durch verschiedene Verfahren wie z.B. Stoßstrommessungen, Transferfunktion, Frequenzgangmessungen oder Reflektometrie, FRA (frequency response analysis) diagnostiziert werden können.

4.3 Einsatzgebiete

Je nach Betriebsmittel unterscheidet sich das Einsatzgebiet der unterschiedlichen Mess- und Prüfmethoden (Tabelle 1):

Betriebsmittel	Diagnosemethoden	
	empfindlich	weniger empfindlich
Transformator		
Wicklungsisolation: thermische Instabilität	Gas in Öl-Analyse Verlustfaktor	Teilentladungen Kapazität Thermovision Furananalyse
Wicklungsisolation: elektrische Überbeanspruchung	Gas in Öl-Analyse Teilentladungen und Verlustfaktor Kapazitätsmessungen	Störspannungsmessung Thermovision Gasdruckmonitoring
Pressboard: Gleitentladungen	Gas in Öl-Analyse Teilentladungsmessungen	Verlustfaktor Isolationswiderstand Polarisationsindex Spannungsprüfungen Ölanalyse
Kabelmuffen und Entverschlüsse		
Grenzflächen, Mantelschäden	Teilentladungen	Temperaturmonitoring mittels Lichtwellenleiter
Rotierende Maschinen		
Statorwindungsisolation Windungskurzschlüsse	(Streufluss) (Frequenzgang)	Teilentladungen Verlustfaktor
Reduktion der Isolationsfestigkeit und Entladungen	Teilentladungen Verlustfaktor Kapazitätsmessungen Ozon	Spannungsprüfungen Isolationswiderstand Polarisationsindex Kühlgasanalyse
Glimmschutz	Teilentladungen Isolationswiderstand Polarisationsindex	Kapazität Verlustfaktor Ozonanalyse

Tabelle 1: Diagnosemöglichkeiten an ausgewählten Betriebsmittel [3]

5 ONLINE/OFFLINE MESSMETHODEN

Je nach Zielsetzung und der Art der Betriebsmittel können die eingesetzten Messsysteme (Diagnosesysteme) sehr unterschiedlich ausgeführt sein. Dabei unterscheidet man zwischen ON-Line und OFF-Line Systemen.

Onlinemessungen können in permanente Messungen und in intermittierende Messungen unterschieden werden. Sie werden mit fest installierten Messaufnehmern und Messgeräten durchgeführt. Bei der permanenten Messung lassen sich mittels modernen Überwachungssystemen zeitgleich mehrere Analysen des gleichen Messsignals durchführen. Bei Aufzeichnung der vorhandenen Betriebsbedingungen können dabei die Messungen definierten Betriebsbedingungen zugeordnet werden und sind somit miteinander vergleichbar.

Diese Systeme werden unterteilt in im Betrieb kontinuierliche messende (In-Serve-ON-Line Monitoring) sowie nur sporadisch angeschlossenen Systeme (ON-Line), die die vor Ort gesammelten und im Betrieb gemessenen Daten auswerten.

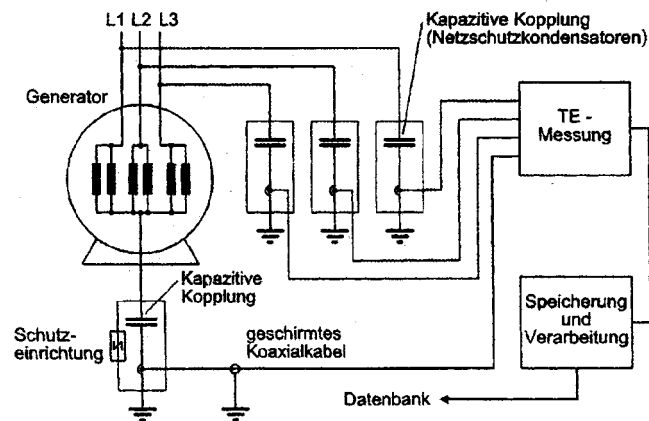


Abbildung 4: ON-Line Teilentladungsmessung [4]

Bei der Offline Messung läuft die Datenerfassung nach individuell vom Anwender festgelegten Zeitabständen periodisch oder sporadisch ab. Diese Messungen werden an nicht im regulären Betrieb befindlichen Betriebsmitteln durchgeführt.

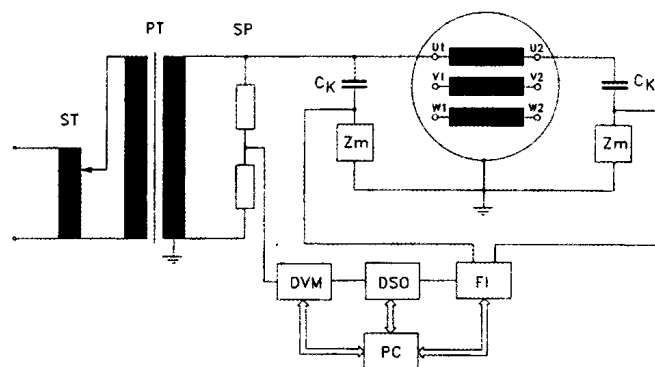


Abbildung 5: OFF-Line Teilentladungsmessung [4]

Der Unterschied von ON-Line Systemen gegenüber OFF-Line Systemen besteht darin, dass die Messdaten über einen längeren Zeitraum bei nahezu gleichen Bedingungen verfolgt und eventuelle Trends detektiert werden können. Im Gegensatz dazu bietet die OFF-Line Messung die Möglichkeit unterschiedliche Beanspruchungsformen (z.B. Spannung, Frequenz,...) die während des Betriebs nicht möglich sind für die Messungen heranzuziehen [5].

6 INTERPRETATION VON MESSERGEBNISSEN

Grundlage einer Diagnose und der Ableitung von Wartungstätigkeiten ist die Interpretation der getätigten Messungen von Messsystemen sowohl bei OFF-Line, quasi ON-Line und ON-Line Monitoringsystemen. Die Interpretation der Messergebnisse beruht oft auf bereits gemachten Erfahrungen und Laboruntersuchungen durch die Kennwerte charakteristischer Kenngrößen festgelegt werden. In der Praxis angewendet kann das Erreichen dieser Kennwerte Anhaltspunkte über den Zustand eines Betriebsmittels geben, dabei ist jedoch zu beachten, dass die Betriebsmittel auch anderen nicht im Labor aufgezeichneten Einflussgrößen unterliegen. Diese können in Verbindung mit anderen Einflussgrößen Synergien in der Betriebsmittelalterung hervorrufen, die diese beschleunigen oder auch verlangsamen können. Das bedeutet, dass die Interpretationen der gemessenen Kenngrößen einer relativ hohen Streubreite unterliegen.

Die mögliche Interpretation und deren Unterschiede von Messergebnissen sollen anhand zweier Beispiele (Thermografie und Teilentladungsmessung) gezeigt werden.

6.1 Thermographieaufnahmen

Da die Temperatur einer der wichtigsten Einflussparameter auf die Lebensdauer von elektrischen Betriebsmittel ist, sollte diese an den verschiedenen Betriebsmittel auch beobachtet werden.

Berührungslose Verfahren sind Verfahren bei denen die von jedem Körper ausgesendete Wärmestrahlung detektiert wird. Die einfachste berührungslose Messung erfolgt über ein Pyrometer, welches in der Lage ist die gemittelte Temperatur einer entsprechenden Messfläche anzuzeigen.

Lokale Heißpunkte können auf Grund der flächenmäßigen Mittelung jedoch nur schwer erkannt werden. Dieses Verfahren kann daher nur für die Bestimmung von Temperaturen homogener Körper mit großen Oberflächen verwendet werden.

Einfacher ist die Bestimmung von Heißstellen und Wärmenestern mit Hilfe der bildgebenden Thermovision. Dabei erhält man ein thermisches Abbild des Betriebsmittels mit der von der Oberfläche des Messobjekts abgestrahlten Temperaturen.

Um jedoch Aussagen von den ermittelten Daten der berührungslosen Temperaturmessmethoden zu erhalten, ist eine genaue Kenntnis der Oberflächeneigenschaften des Messobjekts sowie von der Übertragungsstrecke, also der Atmosphäre, notwendig.

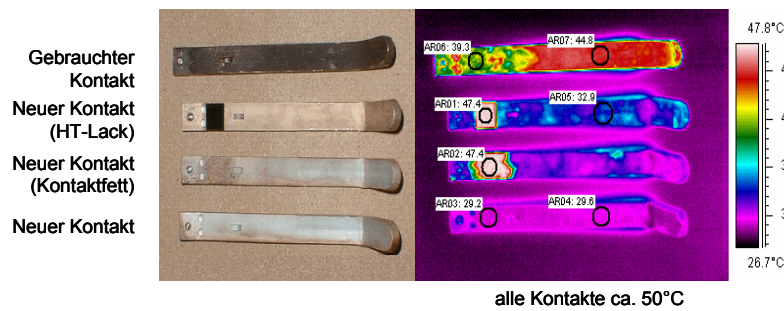


Abbildung 6: Temperaturmessung an Kontaktfingern

Abbildung 6 zeigt die mögliche Missinterpretation einer Thermovisionsaufnahme von Messobjekten mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften aber der gleichen Temperatur von ca. 50°C [6].

6.2 Teilentladungen

Die zu Beginn der Teilentladungsmesstechnik eingesetzten Störspannungsmessgeräte ermöglichten im wesentlichen nur die Identifikation vorhandener Isolierungsmängel. Mit den heute verfügbaren TE Systemen ist jedoch auch teilweise eine Identifikation der Fehlerart, die Abschätzung der Fehlstellengröße und auch deren ungefähre Lokalisierung möglich. Der Einsatz der fortschreitenden Informationstechnologie ermöglicht neben der Analyse (Mustererkennung, neuronale Netze,...) des vorhandenen Messsignal gleichzeitig eine Archivierung der anfallenden Datenmengen.

Aufgrund des Erscheinungsbildes von Teilentladungen in Phasen und amplituden-aufgelöster Darstellung (Fingerprint) erlauben in gewissen Bereichen eine Aussagen über die Art des Fehler und gegebenenfalls den Fehlerort.

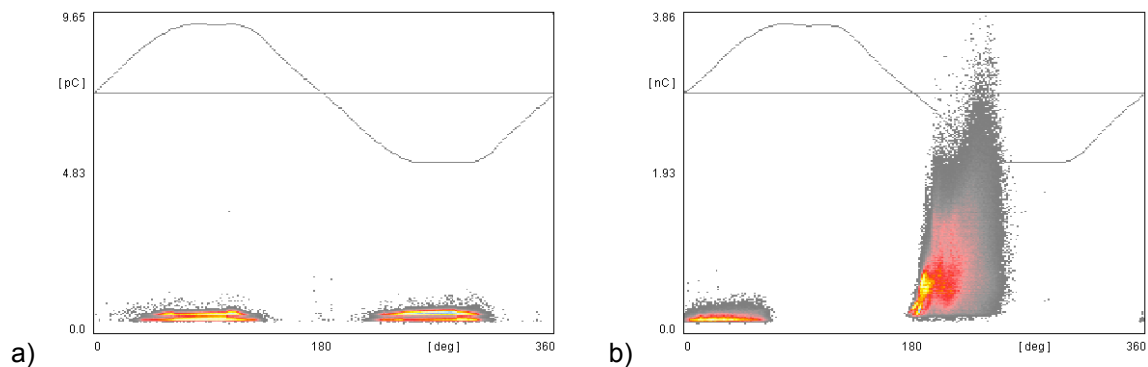


Abbildung 7: Teilentladungsmessung an einem Generatorstab

Abbildung 7 zeigt die durch Teilentladungsmessungen erhaltenen Fingerprints an einem Generatorstab ohne a) und mit b) Fehlerstellen im Bereich des Endenglimmschutzes. Der zusätzliche Einsatz unkonventioneller Messtechniken ermöglicht eine Eingrenzung der Fehlerstelle.

7 BEURTEILUNG UND RISIKOABSCHÄTZUNG

Die Überwachung in Betrieb befindlicher Geräte erfolgt über zerstörungsfreie Messmethoden und bedingt zerstörungsfreie Prüfmethoden. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Methoden kann eine Beurteilung des Betriebsmittelszustandes sowie in weiterer Folge eine Risikoabschätzung hinsichtlich Ausfall und Ausfallskosten durchgeführt werden.

7.1 Beurteilung

Aufgrund der sich ergebenden Ergebnisse erfolgt eine Zustandsbeurteilung anhand folgender Gesichtspunkten:

- Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Messmethoden
- Ergebnisvergleich aktueller Daten mit Daten aus der Vergangenheit
- Erkennung von Tendenzen

Einen Ausgangswert für eine Beurteilung stellen auch die Ergebnisse der Abnahmemessung (-prüfung) beim Hersteller bei der erstmaligen Inbetriebnahme dar. Erst die Berücksichtigung aller möglichen, den Zustand einer Isolationsstrecke beeinflussenden Faktoren, in Verbindung mit der zeitlichen Entwicklung der Messergebnisse, ermöglicht eine umfassende Beurteilung des Isolationszustandes, der durch die Alterungsprozesse, hervorgerufen durch die Betriebsbeanspruchungen und Umgebungsbedingungen, geprägt wird.

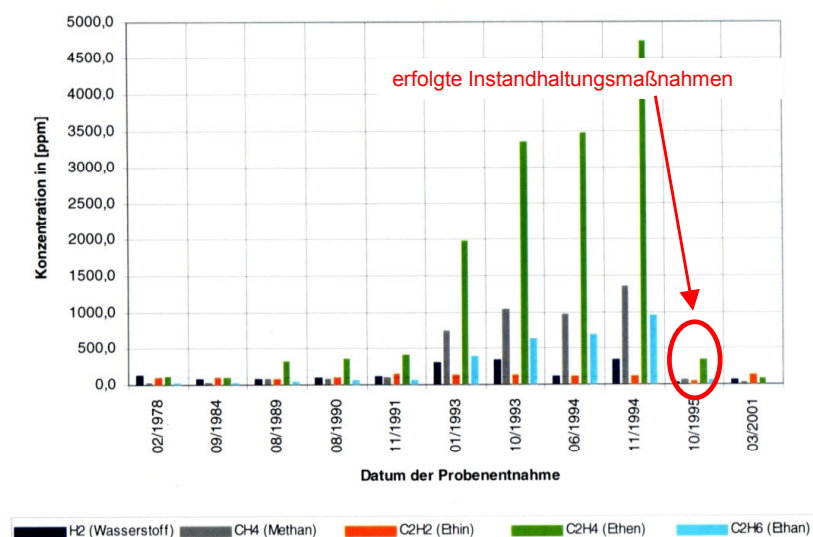


Abbildung 8: Trendentwicklung des Gas-in-Ölgehalts eines Transformators [7]

7.2 Risikoabschätzung

Über den Begriff und die Definition des Risikos gibt es verschiedene Auffassungen. Die mathematische Definition des Risikos wird mit „Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Ausmaß“ angegeben. Im Allgemeinen wird in dieser Definition Ausmaß mit den entstehenden finanziellen Aufwendungen gleichgesetzt die beim Eintreten eines Ereignisses entstehen können aber nicht müssen.

Aus der Sicht eines Betreibers eines elektrischen Betriebsmittels bzw. eines Systems mit mehreren Betriebsmitteln liegt der Grund für eine Risikoabschätzung neben sicherheitstechnischen Überlegungen der Personen- und Gerätesicherheit vor allem im Hinblick auf die wirtschaftlichen Folgen eines durch einen Schaden aufgetretenen Betriebsausfalls.

Abschätzungen und Analysen lassen sich auf dabei auf drei normierte Grundverfahren zurückführen:

- Ausfalleffektanalyse
- Fehlerbaumanalyse
- Störfallablaufanalyse

Diese Verfahren sind in der DIN 25448, DIN 25424 und DIN 25419 verfahrensspezifisch beschrieben und werden für die Feststellung des erwarteten Schadensausmaßes herangezogen.

Wesentlich bei der Abschätzung von Risiken elektrischer Betriebsmittel ist – wie schon erwähnt wurde – die Mitbeeinziehung des Zustands des Betriebsmittels sowie die Beurteilung der auftretenden Belastungen. Zur Veranschaulichung der Auswirkungen von Belastungserhöhungen an elektrischen Betriebsmittel erscheint das folgende vereinfachte Beispiel einer Isolierung als angebracht.

Dabei wird eine Temperatur von 100° C im Nennbetrieb und eine mittleren Lebensdauer von 5 Jahren fiktiv angenommenen. Anhand der Auswirkungen an der gegebenen Ausfallsdichte, werden Zuverlässigkeit, Ausfallswahrscheinlichkeit, Risiko und die Ausfallsrate bei unterschiedlichen Belastungen berechnet und dargestellt. Frühausfälle, welche aus Bedien- und Montagefehlern bestehen werden hierbei vernachlässigt.

Die Belastung ist proportional dem Strom. Die resultierende Temperaturerhöhung wiederum ist quadratisch proportional dem Strom mit

$$P_V = I^2 \cdot R$$

P_V ... Verlustleistung

I ... Strom

R ... Widerstand

Indem man nun die mittlere Lebensdauer bei unterschiedlicher Belastung zur mittleren Lebensdauer bei Nennbetrieb setzt erhält man:

$$\frac{t_B}{t_N} = \frac{t_0 \cdot e^{-k \cdot \vartheta_B}}{t_0 \cdot e^{-k \cdot \vartheta_N}}$$

t_B ... Lebensdauer bei Belastung

t_0 ... Lebensdauer bei Bezugstemperatur

t_N ... Lebensdauer bei Nennbelastung

k ... Zusammenfassung von Materialkonstanten (Temperaturkonstante)

ϑ_N ... Temperatur bei Nennbelastung

ϑ_B ... Belastungstemperatur

Aus diesen beiden Ableitungen erhält man die Werte in Tabelle 2.

Belastung [%]	Strom [p. U.]	Temperatur [p. U.]	durchschnittliche Lebensdauer [Jahre]
90	0,9	0,81	26,5
100	1	1	6,5
105	1,05	1,1	3,5

Tabelle 2: Lebensdauererwartung bei unterschiedlichen Belastungen

Setzt man die erhaltenen Werte in die Ausfallsdichte ein, so erhält man durch Ableitung die Verteilfunktion, welche als Basis für die Herleitung von Zuverlässigkeit, Ausfallswahrscheinlichkeit und Risiko herangezogen werden kann [9].

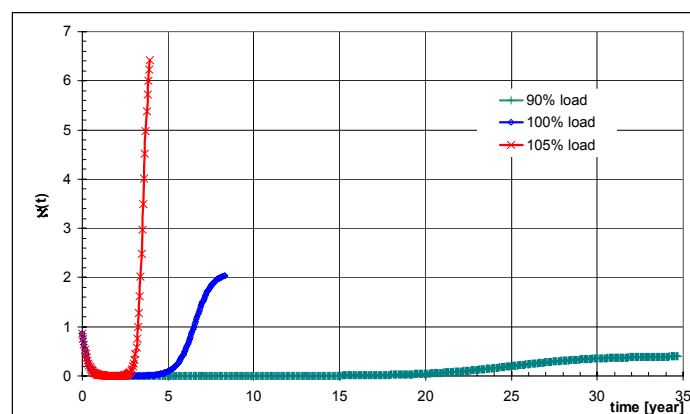


Abbildung 9: Verlauf der Ausfallsrate $\lambda(t)$

In der Abbildung 10 ist zu sehen, dass sich die Entscheidungszeit zur Maßnahmensetzung bei steigender Belastung deutlich verkürzt.

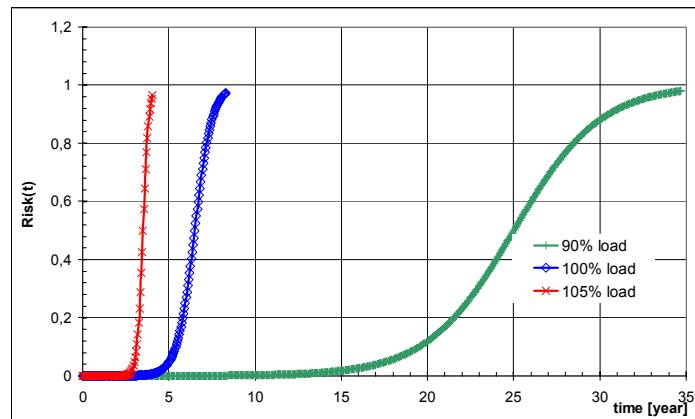


Abbildung 10: Verlauf des Risikos

Durch dieses Beispiel kann gezeigt werden, dass durch die Belastungsveränderungen ein starker Einfluss auf die Lebensdauer und somit auf die Ausfallsrate und das Risiko gegeben ist.

8 ALTERUNGSFAKTOREN UND DIAGNOSEMÖGLICHKEITEN BEI TRANSFORMATOREN

Transformatoren zählen zu den wichtigsten Komponenten der elektrischen Energieversorgung. Dabei spielen neben den Anschaffungskosten eine zuverlässige Stromversorgung eine wichtige Rolle.

8.1 Alterungsfaktoren

Die Kombination von Isolieröl und Feststoffisolation und deren Lebensdauer beeinflusst die technischen Nutzungsdauer.

Die Alterung des Isolationssystems wird verursacht durch die Auswirkungen von:

- Luft (Sauerstoffgehalt)
- Feuchtigkeit
- Temperatur
- mechanischen oder elektrische Beanspruchung
- Verschmutzung

Diese Faktoren sind stark miteinander verbunden und fungieren normalerweise zusammen.

Auswirkungen von Luft

Der Einfluss von Luft verursacht Alterung an der flüssigen (Öl) und festen Isolation. Beim Öl ist dieser Einfluss sehr stark temperaturabhängig. Beschleunigt wird der Degradation durch Katalysatoren, die im Transformator in hoher Menge vorkommen

(Kupfer). Von den Abbauprodukten des Öls wird auch die feste Isolation stark beeinflusst. Die oxidative Alterung fester Isolierungen schreitet unter Normalbedingungen sehr langsam voran, jedoch durch die Zersetzungsprodukte des Öls und hohe Temperaturen altern diese wesentlich schneller.

Auswirkungen von Feuchtigkeit

In den Transformator eingedrungene Luftfeuchtigkeit sowie die Alterung des Öls und die Depolymerisation der Zellulose setzen Wasser frei.

Diese Feuchtigkeit verursacht:

- Beschleunigung der Alterungsrate von Papier und Pressboardisolationen
- Reduktion der dielektrischen Festigkeit von Isolieröl, Papier und Pressboard

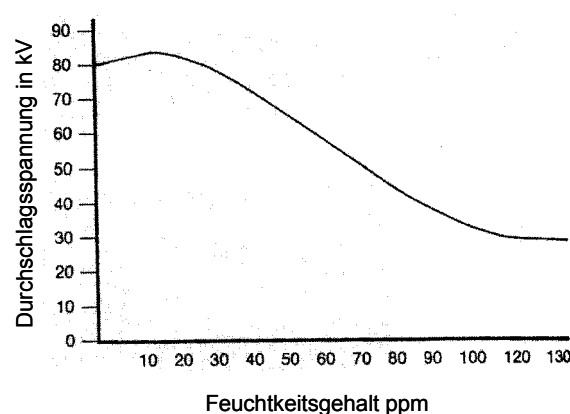


Abbildung 11: Durchschlagsspannung in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt [8]

Wasser ist somit sowohl Ursache als auch Resultat der Papierzersetzung.

Auswirkungen der Temperatur

In Verbindung mit anderen Alterungsfaktoren ist die Temperatur hauptverantwortlich für die thermische Zersetzung von Zellulose und Isolieröl. Die Zersetzung von Zellulose kann in hydrolytische, oxidative und pyrolytische Zersetzungsprodukte eingeteilt werden:

- Hydrolyse stellt eine Zersetzungsform dar, der neben der Temperatur den Einfluss von Wasser und Säuren unterworfen ist.
- Oxidative Zersetzungen benötigen neben Sauerstoff ebenfalls und thermische Energie.
- Pyrolytische Zersetzungen finden aufgrund der Temperatur statt.

Diese Alterungsfaktoren spiegeln sich in der Arrheniusgleichung wieder, die bei einer Temperaturerhöhung von 6 – 10°C in einem Temperaturintervall von 80 – 120°C zu einer Verdopplung der Alterungsrate führen.

Auswirkungen mechanischen oder elektrische Beanspruchung

Überbeanspruchungen elektrischer und mechanischer Natur können die dielektrische Festigkeit herabsetzen. Mechanische Überbeanspruchungen werden vorwiegend durch Resonanzphänomene oder beim Transport und Montage hervorgerufen.

Elektrische Überlastungen werden vorwiegend durch auftretende Überspannungen im Netz oder auch durch entstehende Spannungen bei Resonanzen in Windungen hervorgerufen.

Auswirkungen von Verschmutzungen

Verschmutzung des Isoliersystems haben ihre Ursache in der Degradation des Betriebsstoffe sowie durch den Eintrag von metallischen Teilchen durch Umwälzpumpen und beweglicher anderer mechanischen Ausstattung. Auch eine unsaubere Fertigung ist für die Verschmutzung verantwortlich.

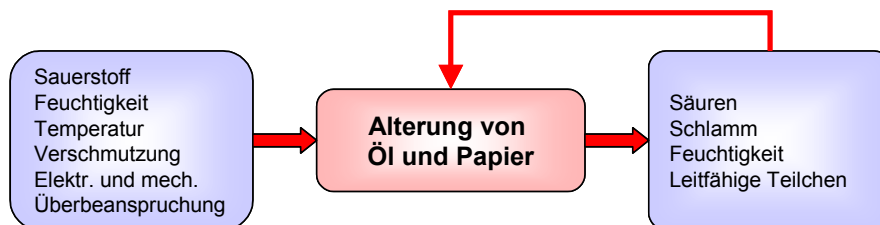


Abbildung 12: Zusammenspiel zwischen den unterschiedlichen Alterungsfaktoren [10]

8.2 Diagnosemöglichkeiten

Aufgrund der komplizierten Struktur und der Kombination von festen und flüssigen Isolierungsbestandteilen innerhalb eines Transformators ist eine universelle Methode zur umfassenden Einschätzung des Zustandes oder zur Erkennung von Art und Ort eines im Entstehen befindlichen Fehlers nicht vorhanden. Für die Diagnose stehen dabei zahlreiche Einzelmethode und Verfahren zur Verfügung, die die Untersuchung der wichtigsten Bestandteile der Transformatorisolierung, des Isolieröls und der Zellulosekomponenten gestatten.

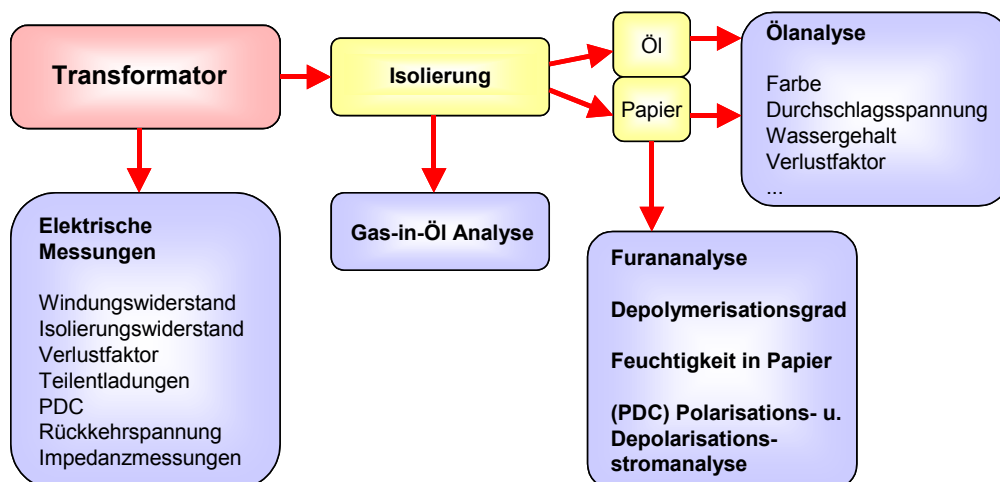


Abbildung 13: Schema der Transformator Diagnostik

8.3 Risikoabschätzung

Für die Risikoabschätzung von Transformatoren werden neben der reinen Diagnostikverfahren verwendet, die die Bedeutung bzw. die Priorität des Betriebsmittels mit einbeziehen. Grundlage dieser Verfahren sind graphische Methoden, die es ermöglichen eine Bewertung des Risikos bei vorhandenen Daten des Zustand und der Priorität mit geringen zeitlichen Aufwand durchzuführen.

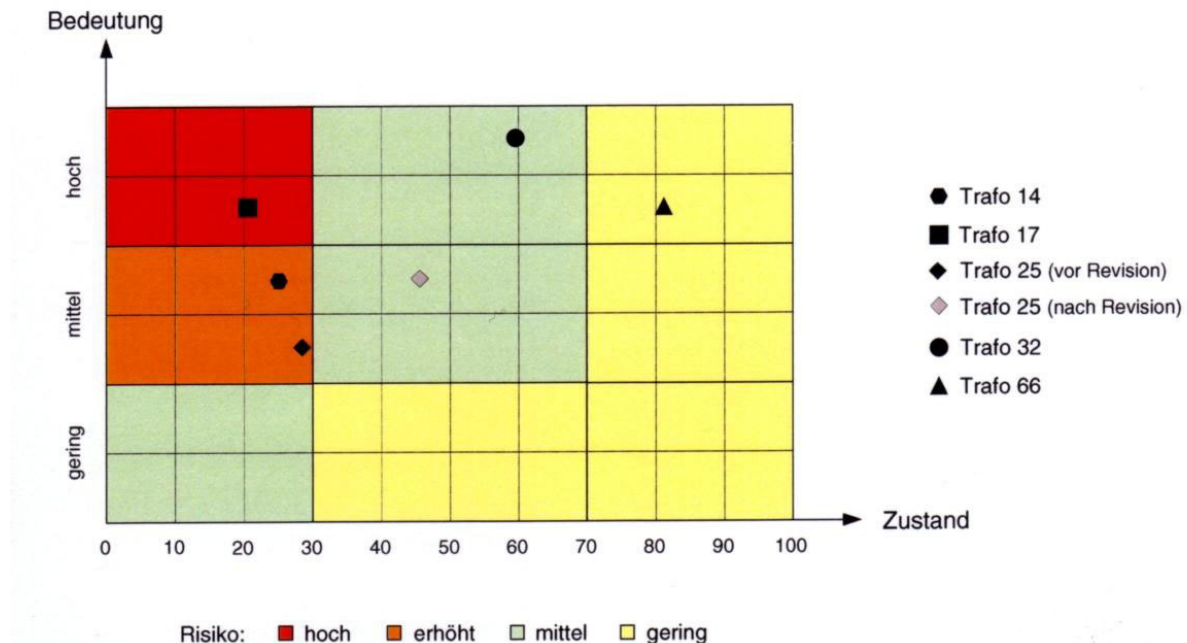


Abbildung 14: Risikoabschätzung

Das Beispiel zeigt das Risiko als Funktion des Zustandes und der Bedeutung (Priorität) von Verteiltransformatoren in einem Elektrizitätsunternehmen.

9 ZUSAMMENFASSUNG

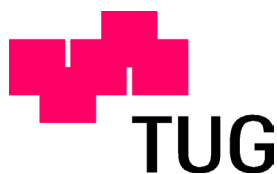
Für die Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik stellen der Verschleiß und die Alterung mitbestimmende Faktoren für deren Nutzungsdauer dar. Ausgehend von der Alterung elektrischer Betriebsmitteln und den stärksten Einflussfaktoren wurden die wichtigsten Prüf- und Messmethoden für die Diagnose aufgezählt, wobei die Grundlage für eine sichere Zustandsbeurteilung die Messung alterungsrelevanter Kenngrößen und deren richtige Interpretation bildet. Durch die neuen und immer leistungsfähigeren Datenerfassungs- und Verarbeitungssysteme wird die Zustandserfassung und die Beurteilung deutlich verbessert. Neben den aktuellen Daten sind aber auch Daten aus der Vergangenheit von großer Bedeutung. Mittels Datenbanksystemen können die notwendigen Information gesammelt und gezielt ausgewertet werden.

Das dabei gesetzte Ziel ist eine sichere Entscheidungsgrundlage zu erhalten, die eine Risikoabschätzung und somit die Entscheidung einer Instandhaltung oder Neubeschaffung ermöglicht.

10 LITERATUR

- [1] Kärner H. C.: Alterung-Degradation-Lebensdauer. Der Unterschied zwischen Theorie und Praxis. ETG Fachbericht 55, Nutzungsdauer von Hochspannungsbetriebsmitteln, VDE 1995
- [2] Egger H.: Strategien zur Überwachung der Hochspannungsisolierungen von Betriebsmittel elektrischer Energiesysteme. Habilitation TU Graz, Februar 2002
- [3] Cigre-Publikation: Service Aged Insulation – Guidelines on Managing the Ageing Process, Paris Juni 2003
- [4] Muhr M., Technische Diagnostik – Strategie für eine moderne Instandhaltung. Vortrag, 36. Fachtagung der ÖGE im ÖVE, Klagenfurt 1998. E&I 115. Jg. (1998), H.10
- [5] Claudi A., Hausschild W.: Prüfungen, Monitoring und Diagnose im Lebenszyklus eines elektrischen Betriebsmittels, ETG Fachbericht 87, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2002
- [6] Pack S., Körbler B., Jauffer S.: Zustandsbewertung von Freiluft-Trennschaltern mit Hilfe von Thermovision, ETG 2004
- [7] Marketz M.: Instandhaltungsstrategien für Verteilnetze im liberalisierten Elektrizitätsmarkt. Dissertation TU-Graz, Dezember 2003
- [8] Kachler A.J.: Service and Diagnostics – Power Transformer Management, Siemens Power Transformer Division, Nürnberg 2003
- [9] Gramms T.: Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements, Zuverlässigkeit-Sicherheit-Bedienbarkeit, Vieweg Verlag, Juni 2001
- [10] Höhle I.: Zustands- und Lebensdauerabschätzung mittels Alterungsanalytik von Isolierstoffen, Transformer, Life Management, Werterhaltung von Leistungstransformatoren, Siemens Nürnberg, Juni 2002

Anschrift der Autoren:



TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Inffeldgasse 18

A-8010 Graz - ÖSTERREICH

Tel.: +43-316-873-7400

Fax: +43-316-873-7408

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Muhr

muhr@hspt.tu-graz.ac.at

DW 7400

Univ. -Ass Dipl.-Ing. Bernhard Körbler

koerbler@hspt.tu-graz.ac.at

DW 7415

Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Robert Schwarz

schwarz@hspt.tu-graz.ac.at

DW 7418