



Diagnosemessungen an Messwandlern

Eine Übersicht und Zuordnung von Diagnosemessungen

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Artikel befasst sich mit den gebräuchlichsten und effektivsten Diagnosemessungen zur Beurteilung des Zustands und der Zuverlässigkeit von Strom- und Spannungswandlern. Solche Messungen sollen mögliche Fehler, z.B. durch Alterungsprozesse oder andere betriebs- oder transportbedingte Einflüsse während der Betriebsdauer des Messwandlers, aufzeigen. Die Fehlerursache findet sich dabei entweder im elektromagnetischen Kreis (beispielsweise Windungsschlüsse oder -unterbrechungen) oder in der Isolation des Wandlers (beispielsweise Teilentladungen oder Eindringen von Feuchtigkeit). Die Bedeutung einer regelmäßigen Durchführung von Diagnoseprüfungen wird durch Fallstudien unterstrichen.

STICHWÖRTER

Messwandler, elektromagnetischer Kreis, Isolation, Diagnoseprüfungen

Autoren: Florian Predl, Dr. Michael Freiburg, Dr. Martin Anghuber

1 Einleitung

Messwandler sind so etwas wie die Sinnesorgane des elektrischen Versorgungssystems. Auch wenn sie vergleichsweise kostengünstige Betriebsmittel sind und wesentlich schneller ausgetauscht werden können als Leistungstransformatoren oder Generatoren, kann ein gravierender Fehler an einem Messwandler zu einer ernststen Gefahr für Personen sowie zu erheblichen Schäden und Kosten an den umliegenden Betriebsmitteln führen. Somit kann ein Wandlerfehler unmittelbar eine Gefahr für das gesamte System bedeuten. Aus diesem Grund sollten Messwandler während des Herstellungsprozesses und Lebenszyklus (Abnahmeprüfung, Transportkontrolle, Inbetriebnahme, Wartung) geprüft werden, um mögliche Fehler rechtzeitig zu erkennen.

2 Übersicht und Zuordnung

Generell lassen sich Diagnosemessungen an Messwandlern in zwei Hauptgruppen unterteilen. Diese sind ebenso angelehnt an die zwei Hauptfunktionen eines Messwandlers – die der Isolation und der Transformation:

- Messungen am Isolationssystem
- Messungen am elektromagnetischen Kreis

2.1 Messungen am elektromagnetischen Kreis

Messungen am elektromagnetischen Kreis umfassen den Eisenkern, die Primär- und Sekundärwicklungen sowie bei kapazitiven Spannungswandlern die Kompensationsdrossel und den kapazitiven Teiler. Die Übertragungsgenauigkeit des Messwandlers (also die Messabweichung und der Fehlwinkel) ist auch vom elektrischen Kreis abhängig und kann somit ebenso zur Beurteilung dessen Integrität herangezogen werden.

Messwandler müssen eine hohe Genauigkeit aufweisen. Bei induktiven Strom- und Spannungswandlern sowie bei kapazitiven Spannungswandlern können sich jedoch nach einer gewissen Betriebsdauer die Messabweichung und der Fehlwinkel nach und nach erhöhen. Windungsschlüsse in Stromwandlern oder Kurzschlüsse im kapazitiven Teiler von kapazitiven Spannungswandlern (CVT) bleiben oftmals unentdeckt. Dies kann zu fehlerhaften Messungen, Problemen beim Netzschutz und manchmal sogar zu kompletten Ausfällen führen.

Die Verifizierung der Integrität des elektromagnetischen Kreises kann auf mehrere Arten erfolgen. Aufgrund der hohen Präzision der Wandler und der Sensitivität der Wandlercharakteristik auf etwaige Fehler, eignet sich – wie bereits erwähnt – insbesondere eine vollständige Genauigkeitsmessung als Diagnosewerkzeug. Eine Möglichkeit ist die konventionelle Messung, oft auch "Primäreinspeisung" [1] genannt. Bei diesem Ansatz erfolgt die Überprüfung der Messabweichung und des Fehlwinkels durch Einspeisen des Nennstromes oder Anlegen der Nennspannung an den Messwandler. Die Messung des Übersetzungsverhältnisses und des Fehlwinkels erfolgt unter Belastung der Sekundärwicklung bzw. den Sekundärwicklungen mit Nennbürde. Zur Bestimmung der Genauigkeit wird das Übertragungsverhalten des Untersuchungsobjektes mit dem Übertragungsverhalten eines Referenzwandlers mit genau bekanntem Fehler verglichen.

Moderne Prüfgeräte [2] bieten eine weitere Möglichkeit zur Messung. Hier erfolgt die Ermittlung der Messabweichung und des Fehlwinkels lastabhängig durch eine sogenannte "modellbasierte Prüfung". Dieses Verfahren wird oft auch als nicht konventionelles Messverfahren bezeichnet. Der Messwandler wird dabei anhand seines elektrischen Ersatzschaltbildes modelliert. Die Bestimmung der unbekannt Parameter des Ersatzschaltbildes erfolgt durch das Prüfgerät mittels kleiner Spannungs- und Stromsignale, wobei die Ermittlung der einzelnen Parameter durch Messung von beiden Seiten (Primär- und

Sekundärseite) stattfindet. Das Prüfgerät verwendet hierbei im Vergleich zu den Nennwerten relativ kleine Strom- und Spannungssignale und errechnet daraus die Genauigkeit des Strom- oder Spannungswandlers, welche eine deutliche Abhängigkeit gegenüber Spannung, Strom und Bürde aufweist. Dieser modellbasierte Ansatz ermöglicht eine hochgenaue Messung der Übertragungsgenauigkeit von Strom- und Spannungswandlern. Insbesondere der Einsatz vor Ort ist aufgrund der kurzen Prüfzeiten und sicheren Prüfsignalen mit geringem Aufwand und Risiko möglich. Eine nähere Ausführung findet sich in Kapitel 6. Es wird somit ein komfortabler Weg zur Messung und Kalibrierung des Wandlers ermöglicht.

3 Messungen am Isolationssystem

Die zweite Hauptgruppe zur Einteilung der Messungen an Messwandlern sind Messungen am Isolationssystem. Die Eigenschaften der Isolationen von Messwandlern sind sehr stark mit den Eigenschaften von Durchführungen für Leistungstransformatoren vergleichbar – daher sind auch die Prüf- und Diagnosemöglichkeiten vergleichbar.

Zur Ermittlung des Wassergehaltes in Öl-Papier-Isolationen wurden über die vergangenen Jahre unterschiedliche Verfahren für die Anwendung am Messwandler optimiert. Diese basieren auf der Messung der dielektrischen Eigenschaften, beispielsweise durch Messung der Polarisations- und Depolarisationsströme (PDC) oder durch die Frequenzbereichsspektroskopie (FDS), und stellen somit Erweiterungen des für Leistungstransformatoren entwickelten Ansatzes dar.

Eine Teilentladungsanalyse hilft bei der Erkennung und Lokalisierung von Defekten im Isolationssystem. Für Messwandler mit Epoxidharz-/Trockenisolationen für den Mittelspannungsbereich (1 kV bis 75 kV) ist die TE-Prüfung die einzig praktikable Diagnosemöglichkeit. Moderne Softwarefilter ermöglichen dabei empfindliche Messungen auch in störungsbehafteten Prüfumgebungen, wie sie vor Ort herrschen.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der gebräuchlichsten Diagnosemessungen für Messwandler und die Fehlerarten, die durch das jeweilige Messverfahren erkannt werden können. Da die nichtkonventionelle Genauigkeitsprüfung auf Basis des zuvor messtechnisch bestimmten elektrischen Ersatzschaltbildes arbeitet, kann dieses Verfahren ebenso zur Fehlerortung resp. -eingrenzung eingesetzt werden, da sich einzelne Fehler auf bestimmte, im Ersatzschaltbild modellierte Parameter, auswirken.

Table 1: Diagnosemessungen an Messwandlern

Elektrischer Teil des Messwandlers	Feststellbare Fehler	Diagnosemessung
Magnetkern	Mechanische Deformation, offene Kernerdung, Magnetische Kurzschlüsse	Messung der Genauigkeit (konventionell und nicht konventionell), Messung der Magnetisierungscharakteristik
Wicklung	Windungsschlüsse, offene Stromkreise	Messung der Genauigkeit (konventionell und nicht konventionell), Messung des Wicklungswiderstandes, Übersetzungsmessung, Magnetisierungsmessung, Stehspannungsprüfung an der Wicklung
Kapazitiver Spannungsteiler (nur in kapazitiven Spannungswandlern (CVT))	Teildurchschlag beim kapazitiven Teiler	Messung der Genauigkeit (konventionell und nicht konventionell), Messung von Kapazität und Verlustfaktor

Kompensations-Drossel (nur in kapazitiven Spannungswandlern (CVT))	Kurzschlüsse einzelner Windungen	Messung der Genauigkeit (konventionell und nicht konventionell), Messung der Kurzschlussimpedanz
Isolationsmaterial	Teilentladung, Feuchte in festen Isolationen, Alterung, Verunreinigung von Isolierflüssigkeiten	Teilentladungsmessungen, Messung von Kapazität und Verlustfaktor, Frequenzbereichsspektroskopie (FDS), Messung der Polarisations-/Depolarisationsströme (PDC)

4 Messung der Magnetisierungscharakteristik an Strom- und Spannungswandlern

Die Messung der Magnetisierungscharakteristik ist ein sehr effektives Verfahren zur Erkennung von elektrischen oder magnetischen Problemen des Magnetkerns.

Für diese Messung wird der Magnetkern durch Anlegen einer Spannung an die Sekundärwicklung (bei Strom- und Spannungswandlern) erregt. Alle anderen Wicklungen des Wandlers müssen dabei offen sein. Bei Spannungswandlern wäre ebenso eine Messung an der Primärseite möglich, die Komplexität und die Anforderungen an einen Prüfaufbau sind hingegen für die Vor-Ort-Anwendung zu hoch.

Bei sekundärseitiger Messung von Spannungswandlern besitzt die Hochspannungsisolation der Primärwicklung eine gewisse Kapazität, die sogenannte primäre Streukapazität C_p (siehe Abbildung 6). Diese Streukapazität tritt zwischen der Hochspannungsseite und Erde auf und sollte mathematisch berücksichtigt werden, da andernfalls statt eines induktiven Magnetisierungsstromes ein kapazitiver Strom gemessen wird. Für einfache Diagnosemessungen und entsprechende Vergleiche von unterschiedlichen Magnetisierungskurven desselben Wandlers oder des gleichen Typs eignen sich jedoch auch Magnetisierungsmessungen ohne die mathematische Berücksichtigung des kapazitiven Einflusses. In diesem Fall besteht der gemessene Strom aus Magnetisierungsstrom und dielektrischem Strom (typischer s-förmiger Verlauf) und eignet sich zum direkten Vergleich über die Zeit.

Die Magnetisierungsspannung, der Magnetisierungsstrom und der Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom werden über einen breiten Spannungs- resp. Aussteuerungsbereich, bis hin zur magnetischen Sättigung hinweg, gemessen. Vorzugsweise wird die Messung so durchgeführt, dass die Spannung von der Sättigungsspannung ausgehend bis auf einen niedrigen Spannungspegel reduziert wird. Auf diese Weise hat eine eventuelle Remanenz keinen Einfluss auf die Messung und der Eisenkern ist nach der Prüfung bereits entmagnetisiert.

Um den Kern magnetisch zu sättigen, kann die Erregung des Eisenkerns auf zweierlei Ebenen erfolgen. Einerseits sorgt eine Erhöhung der dem Fluss proportionalen Spannung, andererseits eine Reduktion der Messfrequenz für den gewünschten Effekt.

Die Verwendung einer reduzierten Messfrequenz erlaubt die Prüfung mit kleinen Spannungen und macht somit bei Spannungswandlern die gesamte Messung in Bezug auf die primärseitig induzierten Spannungen sicherer. Außerdem können so die Auswirkungen von Streukapazitäten auf ein Minimum reduziert werden. Eine mathematische Berücksichtigung der frequenzabhängigen Verluste ist bei diesem Verfahren unerlässlich, um auf Basis der Messungen bei niedriger Messfrequenz das Verhalten bei 50/60 Hz zu bestimmen.

Bei Stromwandlern wird durch Reduktion der Messfrequenz ebenfalls eine Erhöhung der Sicherheit ermöglicht. Gleichzeitig können auch große Stromwandler mit hohen Knipunkten mit vergleichsweise kleinen Spannungen (und somit kleinen Prüfgeräten) geprüft werden. Andererseits erlaubt eine Erhöhung der Messfrequenz bei Wandlern mit kleinem Kern die Optimierung der Prüfzeit.

Das Prinzip der Sättigung des Eisenkerns mittels niedriger Frequenzen ist in Abbildung 2 gezeigt.

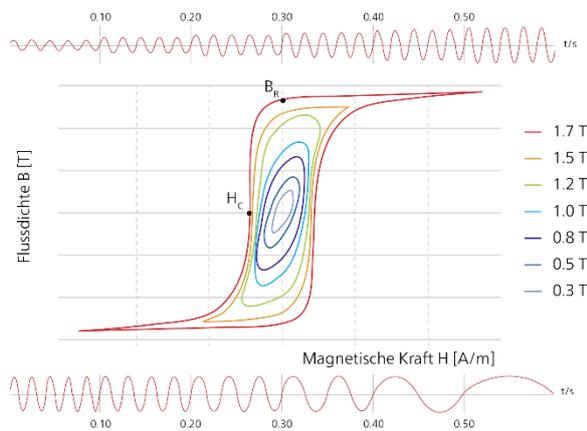


Figure 1: Hystereseschleifen

Die Transformatorformel (1) erklärt das physikalische Verhalten der magnetischen Flussdichte (in Tesla) im Kern. Eine Reduzierung der Frequenz bei konstanter Magnetisierungsspannung führt zu einem Anstieg der magnetischen Flussdichte im Kern. Dies hat denselben Effekt wie eine Erhöhung der angelegten Magnetisierungsspannung bei gleichbleibender Frequenz.

$$\hat{B} = \frac{\hat{V}_c}{n * 2 * \pi * f * A} \quad (1)$$

Für eine exakte Darstellung der initialen Magnetisierungskennlinie bei Netzfrequenz müssen die frequenzabhängigen (ohmschen) Verluste im Kern entsprechend berücksichtigt werden.

Für eine Analyse der Prüfergebnisse kann man die Magnetisierungskennlinie (Hauptinduktivität und komplette Kennlinie) mit Referenzdaten aus Abnahmeprüfungen vergleichen. Sollte das Protokoll der Abnahmeprüfung nicht verfügbar sein, kann ein Quervergleich zwischen den Wandlern der einzelnen Phasen vorgenommen werden. Wichtig ist, dass ein Vergleich nur zwischen Messwandlern desselben Typs und derselben Klasse vorgenommen wird.

Die Klasse PX ist in der Norm IEC 61869-2 für Schutzstromwandler mit geringer Streureaktanz ohne Grenzwert für den Remanenzfluss definiert [4a]. Bewertungskriterien für die Klasse PX sind der Kniepunkt, der Magnetisierungsstrom, der sekundärseitige Wicklungswiderstand und die Messabweichung. Bei Schutzstromwandlern der Klasse PX sind auf dem Typenschild die Bemessungswerte für die Kniepunktspannung und den Magnetisierungsstrom bei der Bemessungs-Kniepunktspannung angegeben. Dieser Referenzpunkt kann für eine Bewertung der Magnetisierungskennlinie verwendet werden. Die Bewertung findet wie folgt statt:

Als Beispiel verwenden wir hier die Klassenangabe 0.02PX100R25. Die Klassenbezeichnung bedeutet, dass die Bemessungs-Kniepunktspannung 100 V beträgt. Die gemessene Kniepunktspannung muss somit größer als 100 V sein. Weiter beträgt der Bemessungs-Magnetisierungsstrom bei 100 V 0,02 A. Der gemessene Magnetisierungsstrom bei 100 V muss demnach kleiner sein als 0,02 A. Außerdem muss laut Definition der auf 75 °C korrigierte gemessene DC-Wicklungswiderstand kleiner als 25 Ω sein.

4.1 Fallstudie I: Messung der Stromwandler-Magnetisierung

Es sind zwei Stromwandler desselben Typs mit derselben Klasse untersucht worden. Einer der Stromwandler weist eine sehr viel höhere Messabweichung als der andere auf. Da sowohl der Übersetzungsfehler als auch die Phasenverschiebung betroffen waren, ist angenommen worden, dass

das Problem am Kern zu suchen ist, da ein Anstieg des Übersetzungsfehlers und der Phasenverschiebung durch einen übermäßig hohen Magnetisierungsstrom verursacht wird.

Der Magnetisierungsstrom (in Abbildung 3 als Effektivwert dargestellt) ist die Summe aus induktivem Magnetisierungsstrom (Strom durch Hauptinduktivität L_m) und dem durch die Kernverluste (Wirbelstrom- und Hystereseverluste) verursachten Strom (Siehe Abbildung 5). Jede Erhöhung der Kernverluste wird also immer auch zu einer Erhöhung des Übersetzungsfehlers und der Phasenverschiebung führen. Eine Messung der Magnetisierungskennlinie an beiden Wandlern bestätigt, dass das Problem im Magnetkern liegt (vgl. Abbildung 3).

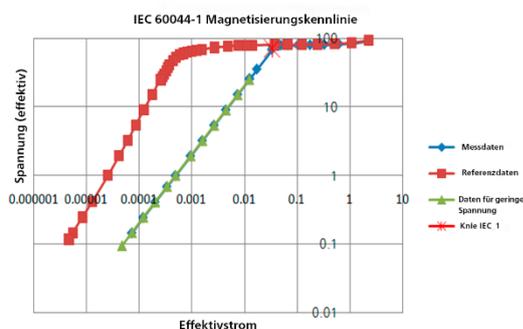


Figure 2: Vergleich der initialen Magnetisierungskennlinien

Die rote Kurve in Abbildung 3 ist die Referenz-Magnetisierungskennlinie. Der fehlerhafte Wandler (grünblaue Kennlinie) zeigte bei derselben Magnetisierungsspannung (hier als Effektivwert dargestellt) sehr viel höhere Magnetisierungsströme als der intakte Wandler.

Als Ursache des Problems ist eine fehlende Verbindung des Schirms zum Erdpotenzial herausgestellt worden.

5 Wicklungswiderstandsmessung

Die DC-Wicklungswiderstandsmessung ist eine etablierte Methode zur Erkennung von Windungsschlüssen und offenen Stromkreisen oder schlechten Verbindungen. Sie ist sehr einfach, dennoch können grundlegende Fehler gemacht werden, wenn die Messzeit nicht berücksichtigt wird. Ein Gleichstrom (I_{DC}) wird in die Wicklung eingespeist und der resultierende Spannungsabfall (U_{DC}) an der Wicklung gemessen. Aufgrund der Induktivität des Kerns müssen sich sowohl der Strom als auch die Spannung zuerst stabilisieren, bevor die Messung dieser Größen erfolgen darf. Je nach Zeitkonstante kann das einige Sekunden dauern. In Abbildung 4 ist exemplarisch das Profil des Wicklungswiderstands über die Zeit dargestellt.

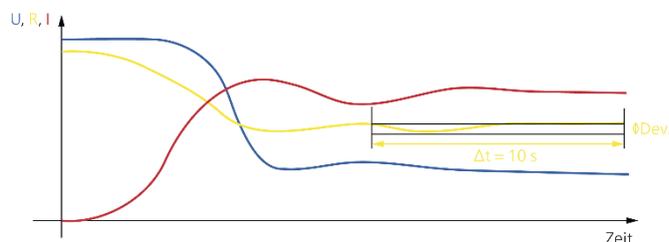


Figure 3: Profil des Wicklungswiderstandes über die Zeit

Die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs des Widerstandswertes lässt eine Überprüfung zu, ob Strom- und Spannung ausreichend stabil für die Messung sind. Fällt die Abweichung unter einen bestimmten Wert (typischerweise $< 0,1\%$), so wird der Widerstandswert als stabil angesehen. Der DC-

Wicklungswiderstand kann dann anhand von Formel (2) ermittelt werden.

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad (2)$$

Für eine Bewertung der Prüfergebnisse kann man den Widerstandwert aus der Vor-Ort-Messung mit den Referenzergebnissen aus der Werksabnahmeprüfung oder den Werten der Wandler der beiden anderen Phasen (mit derselben Klassenangabe) vergleichen. Wichtig ist, dass für den bei Umgebungstemperatur (T_{meas}) gemessenen Widerstandwert (R_{meas}) eine Temperaturkorrektur vorgenommen wird. Üblicherweise erfolgt der Vergleich der Ergebnisse für eine Referenztemperatur (T_{ref}) von 75 °C [1].

6 Messung des Übersetzungsverhältnisses

Die Messung des Übersetzungsverhältnisses ist eine sehr einfache und effektive Methode zur Erkennung von Windungsschlüssen an Messwandlern (einschließlich kapazitiven Spannungswandlern (CVT)). Die Prüfungen können sowohl mit Primärgrößen als auch mit Sekundärgrößen der Strom- oder Spannungswandler erfolgen.

Bei der sogenannten Sekundärspannungsmethode wird bei Stromwandlern an die Sekundärwicklung eine Wechselspannung (V_{sec}) angelegt und die dadurch auf der Primärseite induzierte Spannung (V_{prim}) gemessen. Aufgrund der Leerlaufverluste (I_{exc}) ist es wichtig, den Spannungsabfall am Wicklungswiderstand zu kompensieren. Die Übersetzung (N) kann dann anhand von Formel (4) ermittelt werden.

$$N = \left| \frac{V_{sec} - I_{exc} * R_{DC}}{V_{prim}} \right| \quad (4)$$

Moderne Prüfsysteme erlauben derart präzise Spannungs- und Strommessungen, dass mit dem o.g. Verfahren sogar eine Erkennung einzelner Windungsschlüsse möglich ist. Für die mobile Anwendung Vor-Ort stellt diese Sekundärspannungsmethode eine gute Alternative zur Prüfung mit Primärstrom dar, da deutlich kleinere Prüfaufbauten nötig sind.

Manchmal treten Windungsschlüsse nur bei einer bestimmten Spannung auf, da ein Teil der Isolation um die Fehlstelle noch intakt ist. Für solche Fälle kann die auf der Sekundärseite angelegte Spannung erhöht werden, um auch derartige „hochohmige Windungsschlüsse“ erkennen zu können (Stehspannungsprüfung). Hierfür sollte auch die Prüffrequenz erhöht werden, um eine Sättigung des Kerns zu verhindern, die die Genauigkeit der Übersetzungsmessung beeinflusst und zu große Prüfströme erfordert. Für diese Prüfung ist allgemein keine Blindleistungskompensation erforderlich.

Die Leerlauf-Spannungsübersetzung von induktiven Spannungswandlern (IVT) kann gemessen werden, indem man eine Spannung an die Primärwicklung anlegt und die dadurch in der Sekundärwicklung induzierte Spannung mit einem hochohmigen Spannungsmessgerät misst.

7 Messung der Genauigkeit von Strom- und Spannungswandlern

Die Messung der Genauigkeit umfasst die Messung des Strom- resp. Spannungsmessabweichung und der Phasenverschiebung (siehe Abbildung 1). Verwendet man hierfür den oben beschriebenen modellbasierten Ansatz, so basiert dieser auf der Berechnung der Genauigkeit auf Basis des Ersatzschaltbildes eines Messwandlers. Hierzu müssen zuvor die Parameter des Ersatzschaltbildes exakt bestimmt werden.

Bei Stromwandlern wird die Genauigkeit durch den Magnetisierungsstrom, also die Verluste im Wandlerkern bestimmt (Magnetisierungsstrom und ohmsche Verluste). Die ohmschen Verluste werden gemessen und dann in Kupferverluste und Eisenverluste unterteilt. Die Kupferverluste werden durch den Wicklungswiderstand R_{CT} des Stromwandlers beschrieben. Die Eisenverluste werden durch die Wirbelstromverluste (repräsentiert durch den Wirbelstromwiderstand R_{eddy}) und die Hystereseverluste (Hysterese-Verlust-Widerstand R_H des Kerns) beschrieben.

Anhand der Magnetisierungskurve (Gesamtverluste des Kerns) können mit Hilfe eines mathematischen Modells die Strommessabweichung und der Fehlwinkel für jeden Primärstrom und jede Bürde auf der Sekundärseite berechnet werden. Somit können die Werte für alle in der relevanten Norm festgelegten Betriebspunkte ermittelt werden.

Außerdem können mit diesem Verfahren weitere wichtige Stromwandler-Parameter ermittelt werden, unter anderem der Restmagnetismus, die ungesättigte Hauptinduktivität, die Hauptinduktivität bei Sättigung, der Überstrombegrenzungsfaktor oder der transiente Dimensionierungsfaktor (gemäß IEC 60044-6 für die Berechnung des Verhaltens bei transienten Fehlerströmen [5]).

Die nachfolgenden Messungen müssen nacheinander ausgeführt werden, um alle Parameter entsprechend des Ersatzschaltbildes (vgl. Abbildung 5) zu messen:

- Messung des sekundärseitigen Wicklungswiderstandes (R_{CT})
- Messung der Magnetisierungskennlinie (Kern repräsentiert durch L_m)
- Messung der Wirbelstromverluste und der Hystereseverluste (R_{eddy} und R_H)
- Messung des Übersetzungsverhältnisses N (Kernübersetzung)
- Berechnung der Strommessabweichung und des Phasen-Fehlwinkels für die gewünschte Bürde und die gewünschten Primärstromwerte auf Basis des Vektordiagramms für einen Stromwandler

Die modellbasierte Genauigkeitsbestimmung von Stromwandlern auf Basis des Ersatzschaltbildes (Abbildung 5) stellt nicht nur für die regelmäßige Prüfung und Kalibrierung von Stromwandlern, sondern auch für Diagnosemessungen ein sehr leistungsstarkes Werkzeug dar, da sie alle bisher genannten Diagnoseprüfungen beinhaltet. Somit kann neben der Diagnose anhand des Übersetzungsfehlers und des Fehlwinkels auch eine detailliertere Fehler- und Ursachensuche durchgeführt werden.

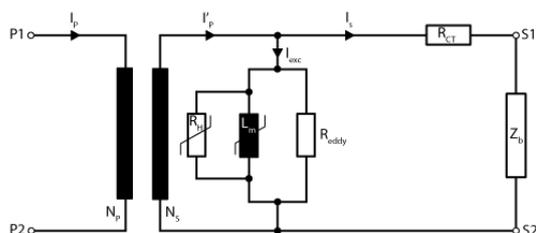


Figure 4: Ersatzschaltbild für einen an eine Bürde Z_b angeschlossenen Stromwandler

Bei Spannungswandlern bestehen die Verluste, die zu einer Messabweichung des Wandlers führen, aus den Kernverlusten und den primären und sekundären Streuverlusten. Für induktive Spannungswandler (IVT) müssen die nachfolgenden Messungen nacheinander ausgeführt werden, um alle Parameter entsprechend des Ersatzschaltbildes zu messen (siehe Abbildung 6):

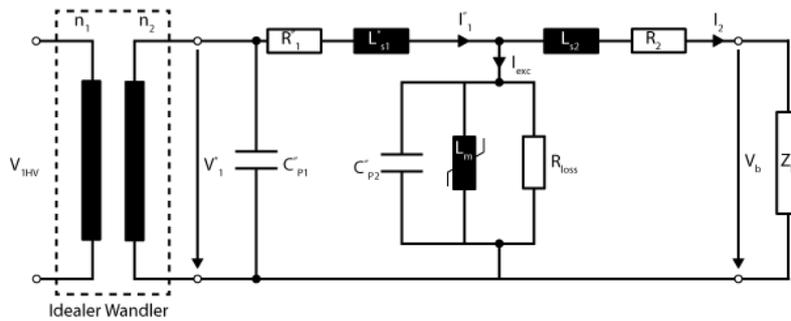


Figure 5: Ersatzschaltbild eines induktiven Spannungswandlers (IVT)

- Messung der Kurzschlussimpedanz
- Messung/Berechnung der Wicklungswiderstände
- Messung der primären Streukapazität (C_p'')
- Messung der Magnetisierungskennlinie (Kern repräsentiert durch L_m)
- Messung der Wirbelstromverluste und der Hystereseverluste (R_{eddy} und R_H)
- Messung des Übersetzungsverhältnisses bzw. des Leerlaufverhältnisses
- Berechnung der Spannungsmessabweichung und des Fehlwinkels für die gewünschte Bürde und die gewünschten Primärspannungswerte auf Basis des Vektordiagramms für einen Spannungswandler

Bei kapazitiven Spannungswandlern (CVT) wird zusätzlich die Spannungsübersetzung des kapazitiven Teilers gemessen.

7.1 Fallstudie II: Messung der Genauigkeit eines kapazitiven Spannungswandlers (CVT)

Untersuchungsobjekt ist in diesem Fall ein kapazitiver Spannungswandler. Es werden die lastabhängige Messabweichung und der Fehlwinkel des Spannungswandlers gemessen und analysiert. Weitere Details zur Genauigkeit von kapazitiven Spannungswandlern und geeigneter Diagnostiken finden sich in [CMD 2016, Freiburg/Sperling/Predl].

Die Typenschildangaben am Spannungswandler lauten wie folgt:

- Spannungsübersetzung: 110 kV / 100 V
- Nennverhältnis des kapazitiven Teilers: 7,5 (Verhältnis der Kapazität bei Frequenzen zwischen 10 mHz und 50 Hz [6])
- Klasse: 1, Messwandler
- Nennbürde: 120 VA bei Leistungsfaktor 0,8

Die Ergebnisse für die Spannungsmessabweichung und den Fehlwinkel sind in den Abbildungen 7 und 8 gezeigt. Die gestrichelten roten Linien zeigen die in der Norm festgelegten Fehlergrenzen, die zur Einhaltung der Klasse nicht überschritten werden dürfen.

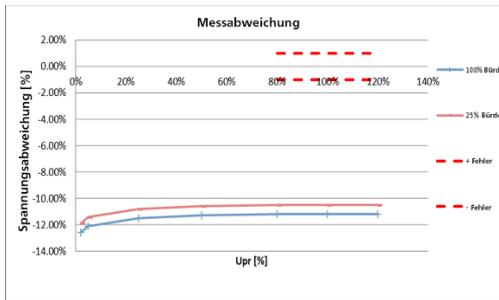


Figure 6: Messabweichung des zu prüfenden kapazitiven Spannungswandlers

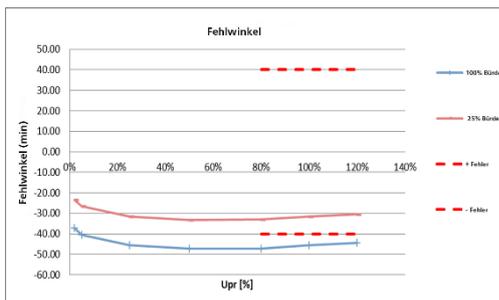


Figure 7: Fehlwinkel des zu prüfenden kapazitiven Spannungswandlers

Die Messungen bestätigten, dass die Spannungsmessabweichung des Wandlers zu negativ ist, was dazu führt, dass die gemessene Sekundärspannung unterhalb der Nennspannung liegt. Eine nähere Betrachtung des gemessenen kapazitiven Teilverhältnisses zeigt einen Wert von 8,37. Die Abweichung des gemessenen Teilverhältnisses zur Nennübersetzung von 7,5 deutet also auf Kurzschlüsse im kapazitiven Teiler in C2 (Teil 2 des kapazitiven Teilers) hin.

Auf Basis dieser Messungen ist der kapazitive Spannungswandler zerlegt worden und ein Teildurchschlag des kapazitiven Teilers konnte bestätigt werden. Als Konsequenz ist das Betriebsmittel ausgetauscht worden.

8 Messung von Kapazität und Verlustfaktor

Der Verlustfaktor wird gemessen, indem man den Strom eines Prüfobjektes mit einer bekannten Referenz (also einem "idealen" kapazitiven Strom) vergleicht. Bestimmt wird die Phasendifferenz zwischen dem Referenzstrom und dem Strom durch das Prüfobjekt.

Die Messung der Kapazität und des Verlustfaktors ist eine etablierte Methode zur Ermittlung des Isolationszustands. Eine ideale (verlustfreie) Isolation besteht aus einer Vakuumkapazität, die auch geometrische Kapazität C_0 genannt wird. Wird ein anderes Isolationsmaterial als Vakuum verwendet, so können unterschiedliche Polarisationsprozesse festgestellt werden. Diese repräsentieren das elektrische (frequenzabhängige) Verhalten des verwendeten Isolationsmaterials im Wechselfeld. Diese Polarisationsprozesse, z.B. die Rotation von Dipolen, führen zu Verlusten, die einen Anstieg des Verlustfaktors bewirken. Die Polarisation führt durch die feldverstärkende Wirkung außerdem zu einer Erhöhung der gemessenen Kapazität (Dielektrizitätskonstante von größer als 1). Zusätzlich besitzt das Isolationsmaterial eine gewisse Leitfähigkeit. Dadurch kommt es ebenso zu Verlusten im Isolationsmaterial [7], die den Verlustfaktor beeinflussen. In Abbildung 9 sind die Verluste in einem Isolationssystem schematisch und als elektrisches Ersatzschaltbild dargestellt. Die Gruppe der Polarisationsverluste ist nicht weiter unterteilt und nur gesamtheitlich dargestellt.

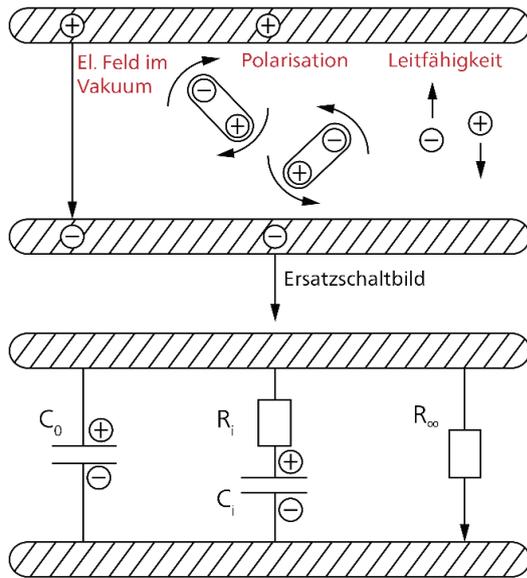


Figure 8: Isolation und deren Verluste

8.1 Anwendungen der Kapazitäts- und Verlustfaktor-Prüfung

Grundsätzlich ist eine Erhöhung des Verlustfaktors ein Anzeichen für Fehlstellen oder das Ablaufen von Alterungsprozessen (Eindringen von Feuchtigkeit, Teilentladungen usw.) im Isolationssystem.

Die Messung der Kapazität und des Verlustfaktors am kapazitiven Teiler von kapazitiven Spannungswandlern kann eine mögliche Verschlechterung der Isolierung und kurzgeschlossene kapazitive Lagen aufzeigen. Der physikalische Aufbau des kapazitiven Teilers ist ähnlich wie der von Kondensatordurchführungen. Ein Durchschlag einer kapazitiven Lage führt zu einer Erhöhung der Gesamtkapazität des Teilers. Durch Vergleiche der Messergebnisse der drei Phasen oder durch Vergleich mit den Ergebnissen bereits zuvor durchgeführter Messungen („Fingerprinting“) kann eine Aussage zur Systemintegrität getroffen werden.

Vom Messaufbau nicht erfassbare Leckströme durch die Isolierung von kapazitiven Spannungswandlern führen oftmals dazu, dass der Verlustfaktor niedriger angezeigt wird, als es tatsächlich der Fall ist, oder dass dieser sogar einen negativen Wert aufweist, obwohl der Messwert für die Kapazität korrekt ist [8]. Ändern sich also die Ergebnisse für die gemessene Kapazität (C_1 in Reihe mit C_2) von einer Stückprüfung zur nächsten, sollten weitergehende Untersuchungen durchgeführt werden. In diesem Fall sind jedoch lediglich vergleichende Messungen empfehlenswert.

Bei induktiven Spannungswandlern (IVT) kann aufgrund der Wandlertopologie die Messung der Kapazität der Isolierung und die Verlustfaktormessung nicht für die gesamte Isolierung durchgeführt werden, da die Hauptisolierung nicht direkt zwischen Primär- und Sekundärwicklung zugänglich ist. Allerdings kann die Messung des Verlustfaktors zwischen der Primär- und der Sekundärwicklung sowie zwischen der Primärwicklung und Erde vorgenommen werden. Besitzt der Wandler eine Schirmelektrode, so erfolgt die Messung vorzugsweise zwischen der Primärwicklung und dem Schirm. Ob ein Schirm vorhanden ist und ob dieser am Sekundäranschluss zugänglich ist, hängt vom Typ des Spannungswandlers ab.

Bei induktiven Stromwandlern mit Öl-Papier-Isolierung ist durch die Wandlertopologie die gesamte Hauptisolierung zwischen dem Primär- und Sekundärleiter des Stromwandlers zugänglich. Eine Messung von Kapazität und Verlustfaktor führt somit zu guten und reproduzierbaren Ergebnissen.

Durch eine „Spannungs-Tip-Up-Prüfung“ (also ein Rampen der Prüfspannung) kann indirekt über eine Verlustfaktormessung überprüft werden, ob Teilentladungsaktivität vorhanden ist. Eine Erhöhung des

Verlustfaktors bei einer bestimmten Einsatzspannung deutet dabei auf mögliche TE-Aktivität hin. Für Generatoren und Motoren ist dies ein gebräuchliches Verfahren zur Diagnose. Allerdings erlaubt die Messung des Verlustfaktors keine exakte Lokalisierung von Teilentladungen.

9 Messung der Kurzschlussimpedanz

Kapazitive Spannungswandler (CVT) besitzen zur Kompensation der durch die Kapazitäten eingeführten Phasenverschiebung eine Kompensationsdrossel (L_{comp}). Die Induktivität der Spule ist daher auf die Parallelkapazität des kapazitiven Teilers C_1 und C_2 bei Netzfrequenz abgestimmt. Je nach Hersteller wird die Spule typischerweise bei Spannungen von 10 kV bis 30 kV betrieben. Abbildung 10 zeigt ein vereinfachtes Schaltbild eines kapazitiven Spannungswandlers. Ein häufiger Fehler – neben dem Teildurchschlag von Kondensatorwickeln – ist ein Windungsschluss in dieser Kompensationsdrossel. Windungsschlüsse in der Wicklung verursachen einen Abfall der Induktivität. Der kapazitive Teiler ist dann nicht mehr korrekt kompensiert, was zu einer Verschiebung des Phasenwinkels des gesamten Spannungswandlers führt.

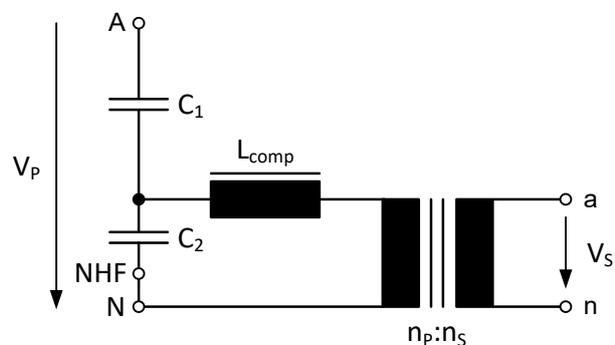


Figure 9: Vereinfachtes Schaltbild eines kapazitiven Spannungswandlers

Mit einer Messung der Kurzschlussimpedanz bei Netzfrequenz kann überprüft werden, ob die Spule intakt ist. Dazu wird ein Wechselstrom in die Sekundärwicklung eingespeist und der Spannungsabfall an der Sekundärwicklung sowie der Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom gemessen. Die Primärseite (kapazitiver Teiler) muss hierbei gegen Erde kurzgeschlossen werden (siehe Abbildung 11). Wenn der Blindanteil der komplexen Kurzschlussimpedanz nahe 0Ω beträgt, zeigt dies an, dass der kapazitive Teiler (C_1 und C_2) korrekt kompensiert ist.

Da man jedoch nicht mit Gewissheit sagen kann, in welchem Maße der Teiler vom Hersteller kompensiert worden ist, stellt die Kurzschlussimpedanzmessung lediglich ein einfaches Werkzeug dar, um auch ohne großen Aufwand die Integrität des Systems prüfen zu können. Besser eignet sich die zuvor beschriebene modellbasierte Prüfung des Wandlers, bei der sowohl die Genauigkeit als auch die Ersatzschaltbildparameter bestimmt werden können.

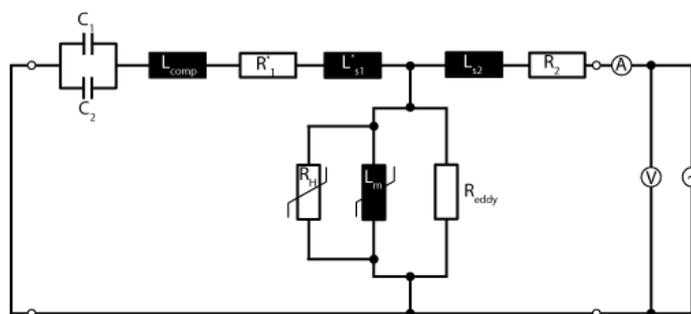


Figure 10: Messung der Kurzschlussimpedanz an einem kapazitiven Spannungswandler

9.1 Fallstudie III: Messung der Genauigkeit eines kapazitiven Spannungswandlers (CVT)

An zwei baugleichen kapazitiven Spannungswandlern sind Ölproben entnommen worden. Eine Probe hat vergleichsweise hohe Gaswerte geliefert. Das Ergebnis der Gas-in-Öl-Analyse zeigt Anzeichen für Teilentladungsaktivität und Lichtbogenbildung. Aufgrund dieser Unregelmäßigkeiten sind weitere Untersuchungen an beiden Messobjekten durchgeführt worden.

Table 2: Angaben auf den Typenschildern der zu prüfenden kapazitiven Spannungswandler

Nennspannung primär	220/√3 kV	Leiter-Erde		
Anschlüsse Sekundärseite	Sekundärspannung (V)	Übersetzung (zu 1)	Genauigkeitsklasse	Nennausgangsleistung (VA)
1 _{a2} – 1 _{a1}	110/√3	2000	0.2/3P	0 - 100
2 _{a2} – 2 _{a1}	110/√3	2000	0.2/3P	0 - 100
Gesamt-Nennkapazität	6200 pF	C ₁ 7106 pF	C ₂ 76393 pF	

Der Spannungswandler mit den erhöhten Gas-in-Öl-Werten bei der Ölprobe wies auch erheblich höhere Werte für die Messabweichung und den Fehlwinkel bei einer durchgeführten modellbasierten Genauigkeitsprüfung auf. Eine nähere Betrachtung der einzelnen ermittelten Ersatzschaltbildparameter bestätigte, dass der Blindanteil der Kurzschlussimpedanz des "fehlerhaften" kapazitiven Spannungswandlers ein kapazitives Verhalten zeigte (eine ähnliche Aussage wäre auch mit der Messung der Kurzschlussimpedanz möglich).

Dies bestätigte, dass die Kompensationsspule Windungsschlüsse aufwies, die wiederum zu Teilentladungen und Lichtbogenaktivität führte. Der kapazitive Teiler war bei Netzfrequenz nicht mehr korrekt kompensiert.

Die Messabweichung und der Fehlwinkel des fehlerhaften kapazitiven Spannungswandlers sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt.

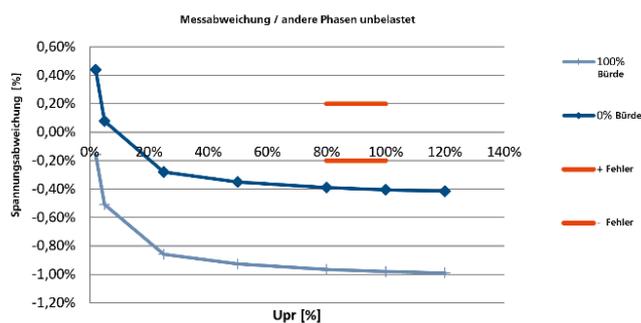


Figure 11: Messabweichung des fehlerhaften kapazitiven Spannungswandlers

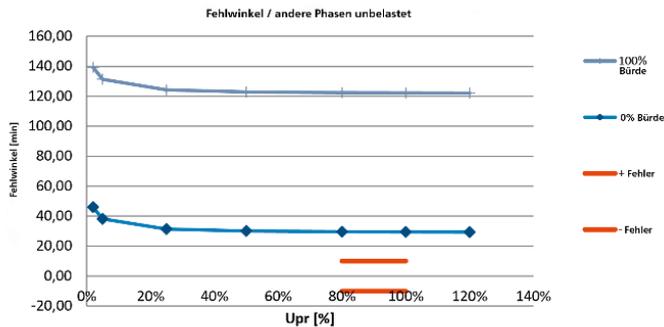


Figure 12: Fehlwinkel des fehlerhaften kapazitiven Spannungswandlers

10 Analyse der dielektrischen Antwort

Ein hoher Wassergehalt in der Öl-Papier-Isolierung von Messwandlern kann zu einem Versagen der Isolation und in der Folge sogar zu einer kompletten Zerstörung des Betriebsmittels führen. Daher ist es wichtig, den Wassergehalt in der Isolierung von Messwandlern bestimmen zu können. Dies stellt sich allerdings als sehr anspruchsvolle Aufgabe heraus, da eine Messung hier im Gegensatz zu Leistungstransformatoren recht schwierig ist. So ist beispielsweise die Entnahme einer Ölprobe recht schwierig, da nur ein sehr geringes Ölvolumen vorhanden ist und es dazu oftmals keinen einfachen Zugang gibt.

In den letzten Jahren hat sich die Analyse der dielektrischen Antwort für die Bestimmung der Feuchte im festen Teil von Papierisolationen etabliert. Die Bestimmung erfolgt hierbei durch Messung des Verlustfaktors und der Kapazität über einen großen Frequenzbereich.

Diese Messung der dielektrischen Antwort über einen weiten Frequenzbereich hinweg (z.B. 100 µHz bis 5 kHz) liefert Informationen zum Isolationszustand und bei Öl-Papier-Isolierungen auch zum Wassergehalt im festen Teil der Isolierung.

Für die Bestimmung des Wassergehaltes wird die gemessene dielektrische Kennlinie mit einer modellierten Kennlinie verglichen (Abbildung 14).

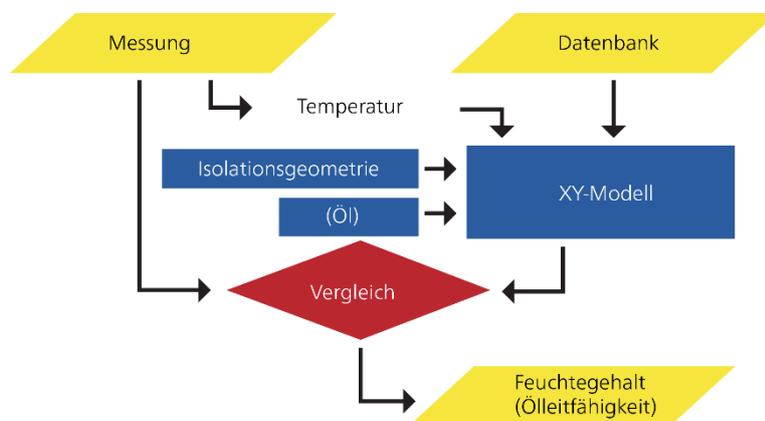


Figure 13: Berechnung des Wassergehaltes auf Basis des XY-Modells

Die Modellierung der Kennlinie erfolgt mittels einer Datenbank, die Daten von Papier mit unterschiedlichen Wassergehalten und Temperaturen enthält. Mit Hilfe des sogenannten X-Y-Modells [9] wird der Feuchtegehalt aus der dielektrischen Antwort unter Berücksichtigung der Isolationsgeometrie, der Temperatur und des Öls ermittelt. Ein Software-Algorithmus passt die anhand der Datenbank modellierte Kennlinie an die gemessene Kennlinie der realen Isolation an und liefert automatisch den Wassergehalt der Isolation sowie die Ölleitfähigkeit.

Der entsprechende Prüfaufbau für Stromwandler hängt davon ab, ob der Stromwandler eine Schirmelektrode besitzt und ob diese zugänglich ist. Manchmal ist dies im Datenblatt des Stromwandlers dokumentiert. Sollten dort keine Informationen zur Schirmelektrode vorhanden sein, wenden Sie sich an den Hersteller. Die Abbildungen 15 bis 17 zeigen Empfehlungen für den in solchen Fällen zu verwendenden Prüfaufbau [10].

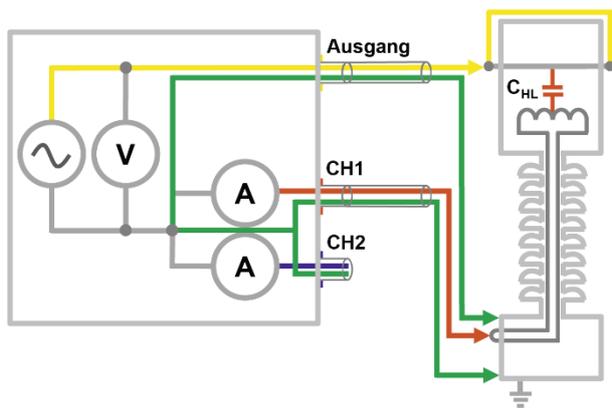


Figure 14: Prüfaufbau für einen Stromwandler, bei dem die Schirmelektrode zugänglich ist. Gemessene Isolation: Hochspannungsseite gegen Erde; Guard an Erde

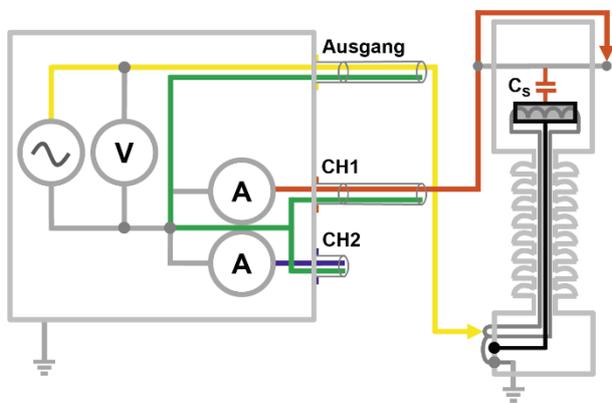


Figure 15: Prüfaufbau für einen Stromwandler, bei dem die Schirmelektrode nicht zugänglich ist. Gemessene Isolation: Hochspannungsseite gegen Erde; ohne Guard

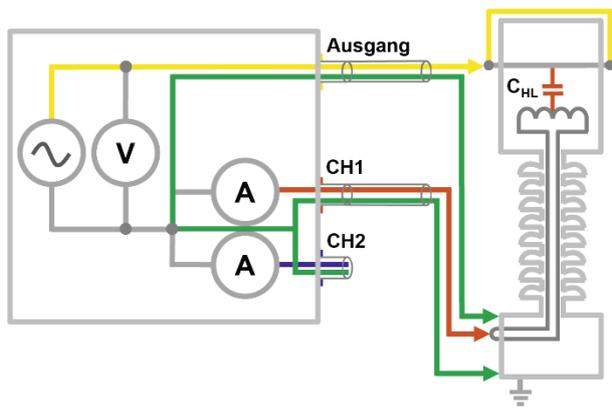


Figure 16: Prüfaufbau für einen Stromwandler ohne Schirmelektrode. Gemessene Isolation: Hochspannungsseite gegen Sekundärwicklung; Guard an Erde

10.1 Fallstudie IV: Prüfung der Isolation eines Messwandlers

Es wurden zwei kombinierte Messwandler untersucht, da die Ölprobe eines der Wandler eine hohe Wasserstoffkonzentration aufwies. Die Konzentration betrug 699 ppm. Es war kein Methan enthalten. Daher war es nicht sehr wahrscheinlich, dass die hohe H₂-Konzentration durch Teilentladungsaktivität verursacht worden war.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Messwerte für die dielektrischen Eigenschaften. Stromwandler 2 ist der Wandler mit der erhöhten H₂-Konzentration.

Table 3: Messergebnisse für die dielektrischen Eigenschaften

	Stromwandler 1	Stromwandler. 2
Tan(δ) bei 50 Hz	0,28 %	0,29 %
Leitfähigkeit des Öls	23 fs/m	22 fs/m
Feuchtegehalt	1,6 %	1,8 %
C_10 mHz/C_50 Hz	1,02	1,03

Das Verhältnis der gemessenen komplexen Kapazität bei 10 mHz und 50 Hz liefert weitere Informationen zum Isolationszustand von Messwandlern. Feldstudien haben ergeben, dass das kapazitive Verhältnis für eine intakte und trockene Isolation unter 1,05 liegen sollte [11]. Der Vorteil des kapazitiven Verhältnisses ist, dass dieser Parameter nicht von der Geometrie der Isolation abhängig ist.

Die ermittelten dielektrischen Parameter lieferten bei beiden Messwandlern keine Hinweise auf eine erhöhte Feuchtigkeit im Wandler mit der hohen Wasserstoffkonzentration. Die sehr hohe H₂-Konzentration war sehr wahrscheinlich durch Streugase verursacht. Eine Anfrage beim Hersteller der Wandler bezüglich der Streugase ergab, dass die hohen H₂-Werte durch eine chemische Reaktion eines bestimmten Reinigers mit den Materialien im Inneren des Wandlers verursacht sein könnten. Der geprüfte Wandler ist daher immer noch in Betrieb.

11 Teilentladungsmessungen

Teilentladungen sind lokale dielektrische Durchschläge in einem kleinen Teil eines festen oder flüssigen elektrischen Isolationssystem . Durch Teilentladungen wird die Isolation zwischen Leitern nur teilweise überbrückt [12]. Teilentladungsaktivität führt mit der Zeit zu einer Zerstörung des Isolationsmaterials und kann so schließlich zu einem vollständigen elektrischen Durchschlag in der Isolation führen.

Für Teilentladungsmessungen wird eine Prüfschaltung aufgebaut, die die kurzgeschlossene Kapazität über den Koppelkondensator wieder nachlädt. Der bei diesem Nachladevorgang fließende Strom kann gemessen werden und dem Entladungspegel zugewiesen werden. Die Messung von Teilentladungen erfolgt in pC gemäß IEEE C57.13TM-2016 [13] oder gemäß IEC 60270.

Abbildung 18 zeigt einen Aufbau für eine Teilentladungsmessung gemäß IEC 60270 [12]. Dieser umfasst eine Impedanz zur Entkopplung des Prüf- vom Erzeugungskreis, einen Koppelkondensator und eine am Teilentladungsmessgerät angebrachte Messimpedanz (Ankopplungsvierpol).

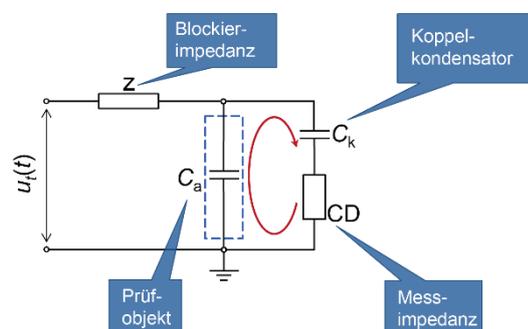


Figure 17: Aufbau für eine Teilentladungsmessung gemäß IEC 60270

Messwandler für Mittelspannungsanwendungen (1 kV bis 75 kV) besitzen typischerweise eine Gießharzisolierung. Durch thermische oder mechanische Belastungen oder Fehler bei der Herstellung können in solchen Isolationen Hohlräume oder Risse entstehen. Übersteigt nun die elektrische Feldstärke in der Isolation die Durchschlagsfestigkeit des Gases in einem solchen Hohlraum, so findet innerhalb dieses Hohlraumes ein Durchschlag statt und das elektrische Feld im Hohlraum erlischt. Die dabei entladene Energie wird durch den Koppelkondensator wieder nachgeladen. Mit Hilfe der mit dem Koppelkondensator verbundenen Messimpedanz kann der beim Nachladevorgang fließende Strom gemessen werden. Der Nachladeprozess selbst ist abhängig von der Spannungsquelle, was Anforderungen an die Größe der Koppelkapazität stellt. Derartige innere Teilentladungen treten oftmals nahe des Nulldurchgangs der anliegenden Spannung auf (Abbildungen 19 und 20).

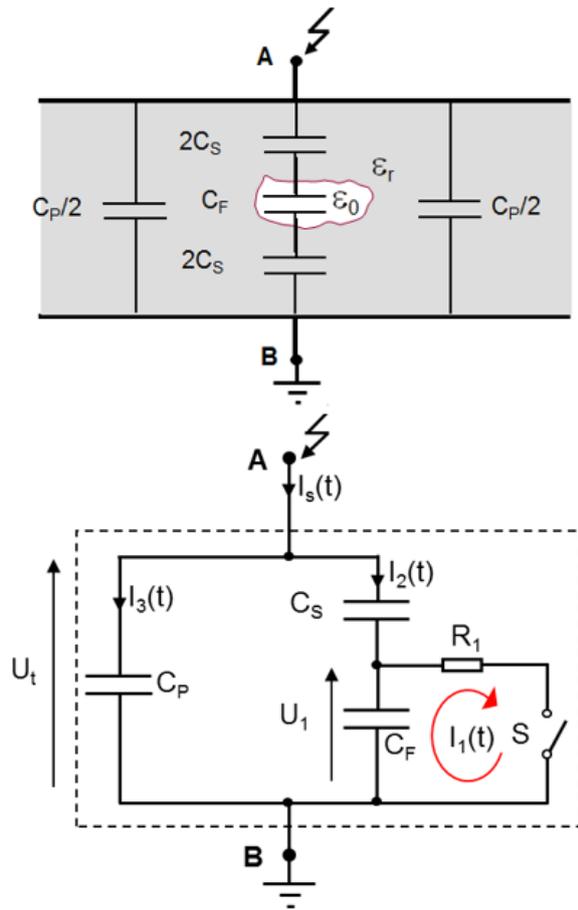


Figure 18: Veranschaulichung des Nachladevorgangs und der TE Impulse am Beispiel einer Hohlraumladung

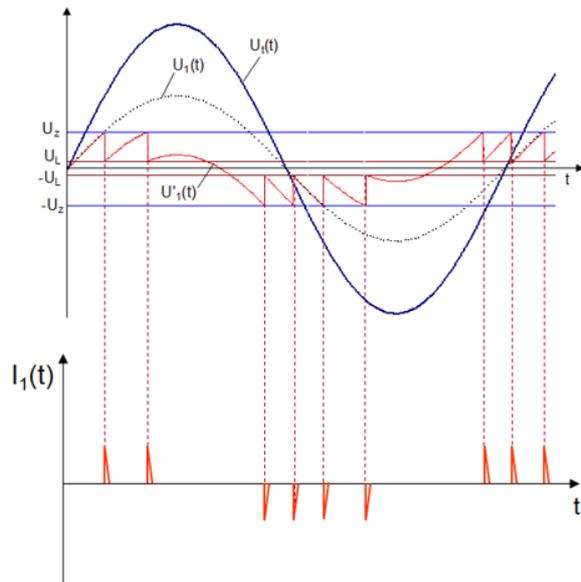


Figure 19: Veranschaulichung des Nachladevorgangs am Beispiel einer Hohlraumladung

Abbildung 20 zeigt ein typisches phasenaufgelöstes TE-Muster (PRPD) für eine Hohlraumladung im festen Teil der Isolation eines Wandlers für Mittelspannungsanwendungen. Das Bild stellt ein Histogramm

aller über eine Zeit von 1 Minute und 36 Sekunden erfassten Entladungen dar. Gemäß IEC 61869-1 [14] und abhängig von der Prüfspannung sollte der Entladungspegel 50 pC nicht übersteigen. In diesem Fall wurden Entladungen bis zu einigen nC gemessen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Teilentladungen im Bereich des Nulldurchgangs starten.

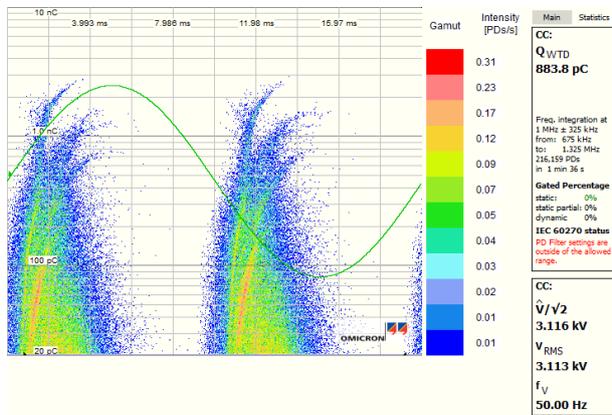


Figure 20: PRPD-Muster von Hohlraumentladungen

12 Fazit

Als Werkzeug für die Zustandsbeurteilung von Messwandlern stehen unterschiedliche Diagnosemessverfahren zur Verfügung. Ihre Ergebnisse liefern jeweils wertvolle Informationen über mögliche Fehler an bestimmten Teilen von Messwandlern (Tabelle 1). Durch Kombinieren der Messergebnisse der diversen Diagnoseprüfungen kann ein umfassendes Bild über den Zustand von Messwandlern gewonnen werden. Dies ermöglicht eine Erkennung von Fehlern, bevor sich diese zu gravierenden Defekten ausweiten und so zu Gefahren für Personen und kostspieligen Schäden an umliegenden Betriebsmitteln oder Netzausfällen führen können.

Es wird jedoch deutlich, dass es nicht die eine allgemeine Diagnoselösung gibt und die Zustandsdiagnose häufig unterschiedliche Messverfahren benötigt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Dieser Artikel soll dabei helfen, bei Problemfällen das richtige Werkzeug für den entsprechenden Zweck zu finden.

Literaturverzeichnis

- [1] IEC 60044-1 Edition 1.2 / 2003-02 "Instrument Transformers, Part 1: Current Transformers", Reference number CEI/IEC 60044-1:1996+A1:2000+A2:2002
- [2] M. Freiburg, F. Predl, A new approach for on-site calibration of voltage transformers, Part I and Part II, ITMF 2013
- [3] M. Freiburg, Messung und Modellierung des Magnetisierungsverhaltens induktiver Spannungswandler, ETG-Fachtagung 2014 in Berlin
- [4] IEC 61869-2 Edition 1.0 / 2012-09, "Instrument Transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers"
- [5] IEC 60044-6 First Edition / 1992-03 "Instrument transformers, Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance" Reference number CEI/IEC 44-6:1992
- [6] S. Raetzke, M. Koch, M. Krueger, A. Talib, Condition assessment of instrument transformers using dielectric response analysis, CIGRÈ 2012, Paris
- [7] A. Kùchler, Hochspannungstechnik, Heidelberg 2009
- [8] Trench Instruction Manual Coupling Capacitor Voltage Transformers, Bulletin 20 95 05, Revision 03, 02/2012
- [9] M. Koch. "Reliable Moisture Determination in Power Transformers" (Doktorarbeit, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart, Sierke Verlag Göttingen, Deutschland, 2008)
- [10] DIRANA Application Note: Measuring and analyzing the dielectric response of current transformers
- [11] M. Anglhuber, Isolationsdiagnose an Messwandlern mit dielektrischer Antwortmessung, Diagnosewoche 2015 in Österreich
- [12] IEC 60270 Third Edition / 2000-12 "High-voltage test technique – Partial discharge measurement" Reference number CEI/IEC 60270:2000
- [13] IEEE Std C57.13™-2016, IEEE "Standard Requirements for Instrument Transformers", New York
- [14] IEC 61869-1 Edition 1.0 / 2007-10, "Instrument Transformers - Part 1: General requirements"
- [15] IEEE "Standard Requirements for Instrument Transformers" IEEE Std C57.13™-2008

Autoren



Florian Predl fing 2007 bei OMICRON in Österreich als Anwendungingenieur im Engineering Services-Team an. Sein Schwerpunkt war die moderne Diagnose von Messwandlern. Er leistete außerdem für Benutzer auf der ganzen Welt technischen Support für OMICRON-Produkte. Seit 2013 ist Florian beim OMICRON-Team in Australien und arbeitet dort derzeit als Field Application Engineer. Bevor er zu OMICRON kam, besuchte er die Höhere Technische Lehranstalt (HTL) in Rankweil (Österreich) und machte dort 2007 seinen Abschluss mit dem Schwerpunkt Hochfrequenztechnologie. Seine Abschlussarbeit befasste sich mit der Erweiterung des Anwendungsbereiches von RFID-Systemen für Unternehmensanwendungen durch Verwendung von Hochfrequenzverstärkern.



Dr. Michael Freiburg arbeitet derzeit als Produktmanager bei OMICRON electronics in Österreich und ist zuständig für die Prüfung von Messwandlern und Diagnosegeräte. Davor arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Dortmund (Deutschland). Seine Forschungsinteressen gelten der Diagnose von Hochspannungseinrichtungen und der Werkstoffkunde. Während seines Studiums lag sein Schwerpunkt zunächst bei der Automatisierungs- und Steuerungstechnik, bevor er sich in Aufbaustudiengängen mit der Energietechnik befasste. Er erhielt 2010 sein Ingenieurdiplom und promovierte 2014 in der Hochspannungstechnik.



Dr. Martin Anghuber erhielt 2007 sein Ingenieurdiplom an der TU München. Von 2007 bis 2011 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TU München in Deutschland und erforschte die Verwendung von Polymer-Nanokompositen als Isolationsmaterial in Hochspannungsbetriebsmitteln. 2012 erhielt er seinen Dr. Ing. (Ph.D.E.E.). 2012 begann er bei OMICRON als Anwendungstechniker und arbeitet derzeit als Produktmanager im Bereich dielektrische Diagnoseverfahren für Transformatoren. Außerdem ist er Mitglied des VDE und des IEEE.