
Elektrische Interferenzen bei der Übertragungsfunktionsanalyse – wie man unerwünschte Störungen vermeidet

Abstrakt

Noch immer gehören Leistungstransformatoren zu den teuersten und zugleich wichtigsten Komponenten im Stromnetz. Die zuverlässige Zustandsbeurteilung gewinnt daher angesichts der fortschreitenden Alterung des Transformatorbestands zunehmend an Relevanz. Die Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) hat sich als bedeutendes Prüfverfahren etabliert und liefert umfangreiche Informationen über den mechanischen und elektrischen Zustand des Aktivteils von Leistungstransformatoren. Durch einen Abgleich zwischen gemessenen Daten mit Referenzmessungen lassen sich elektrische sowie geometrische Änderungen im Magnetkern, in der Wicklungsanordnung und in der Klemmstruktur ermitteln. Im Vergleich zu traditionellen Diagnoseverfahren ist die Übertragungsfunktionsanalyse ein sehr sensitives Verfahren. Externe elektrische Interferenzen sind daher eher als kritisch anzusehen, da diese die Vergleichbarkeit einschränken würden und letztlich zu einer Fehlinterpretation der Messergebnisse führen könnten. Zur Unterstützung der Schmalband- und Breitbandrauschunterdrückung können software- und hardwarebasierte Techniken herangezogen werden. Dieser Artikel erörtert die theoretischen Aspekte von unterschiedlichen Störquellen und Verfahren zur Störunterdrückung. Verschiedene Fallstudien zeigen die Wirksamkeit für Messungen auch unter schwierigen Bedingungen.

1 Einleitung

Spätestens seit Einführung der Norm IEC 60076-18 (Ed. 1.0) im Jahr 2012 hat sich die Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) auf dem Markt als eines der häufigsten elektrischen Prüfverfahren an Leistungstransformatoren etabliert. Als nicht-invasives Diagnoseverfahren im Niederspannungsbereich liefert sie umfangreiche Informationen über den mechanischen und elektrischen Zustand des Aktivteils von Leistungstransformatoren. Transportbedingte Erschütterungen, seismische Aktivitäten, Stromausfälle etc. können Probleme in Wicklungen, in Kontakten oder im Transformator Kern nach sich ziehen. Das SFRA-Verfahren ist nachweislich die sensitivste Methode zur Erkennung solcher mechanischen und elektrischen Defekte.

Übertragungsfunktionsanalysen erfolgen in der Regel im Niederspannungsbereich zwischen 0,1 V und 10 V – zuweilen auch unter extrem ungünstigen Bedingungen. Es besteht daher die Gefahr, dass die Prüfergebnisse durch Rauschsignale verzerrt werden. Eine fehlerhafte Auswertung kann dann dazu führen, dass unnötige Wartungsmaßnahmen oder Reparaturen eingeleitet werden. Dieser Artikel soll eine verständliche Erklärung zu den Auswirkungen von Rauschsignalen auf Übertragungsfunktionsanalysen bieten. Auch Anwendern, die keine

speziellen Experten auf dem Gebiet sind, soll nachvollziehbar erläutert werden, wie es möglich ist, zwischen Kurvenabweichungen, die auf mechanische oder elektrische Probleme zurückzuführen sind, und Störeinflüssen durch Rauschsignale zu unterscheiden.

2 Die SFRA-Methode (Sweep Frequency Response Analysis)

Bei der FRA-Messung (Frequency Response Analysis, zu Deutsch: Analyse der Übertragungsfunktion) wird unterschieden zwischen der Impulse Frequency Response Analysis (IFRA) und der Sweep Frequency Response Analysis (SFRA). Bei beiden Verfahren wird die Übertragungsfunktionsanalyse eines Leistungstransformators mit einer bestehenden Referenzmessung abgeglichen. Wie der Name vermuten lässt, misst die IFRA einen Impuls im Zeitbereich, während die SFRA den Frequenzgang mit gleitender Frequenz analysiert. Das IFRA-Verfahren ist allerdings störanfälliger, weswegen sich auch die Übertragungsfunktionsanalyse durchgesetzt hat. Dieser Artikel beschränkt sich auf die Techniken für letzteres Verfahren.

Bei Leistungstransformatoren handelt es sich im Grunde um komplexe elektrische Netze aus Kapazität, Induktivität und Widerständen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Jedes elektrische Netz verfügt über seine ganz eigene charakteristische Übertragungsfunktion. Abweichungen zwischen einer aktuellen und einer Referenzmessung weisen daher auf Veränderungen der Komponenten innerhalb des Transformators hin. Diese Abweichungen können direkt bestimmten Abschnitten des Frequenzbereichs zugeordnet werden und lassen sich so voneinander unterscheiden.

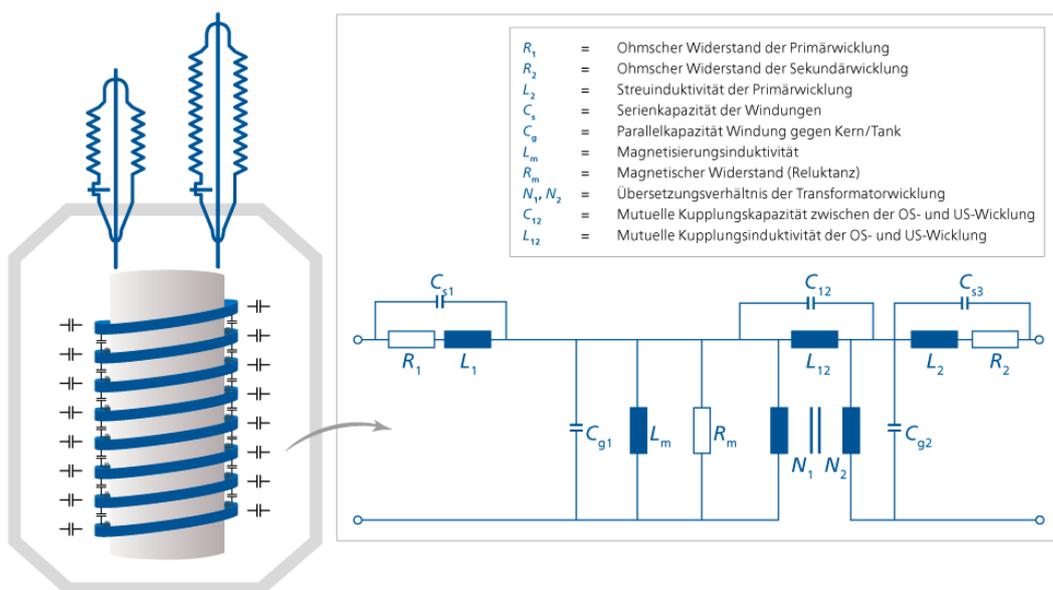


Abbildung 1: Vereinfachtes R-L-C-Ersatzschaltbild eines Leistungstransformators

Bei der Übertragungsfunktionsanalyse wird ein sinusförmiges Niederspannungssignal im Bereich zwischen 0,1 V und 10 V an einem Wicklungsende eingespeist, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Zur exakten Bestimmung der Amplitudenhöhe, der Phasenlage und der Frequenz des eingespeisten Signals wird ein Referenzmesskanal (U_1) mit demselben Einspeisepunkt verbunden. Parallel dazu wird das Antwortsignal am anderen Ende der Wicklung gemessen (U_2). Anhand der Gleichung (1) lässt sich die Übertragungsfunktion $H(f)$ errechnen. Da beim SFRA-Verfahren Messungen direkt im Frequenzbereich erfolgen, müssen keine weiteren Daten zur Analyse herangezogen werden.

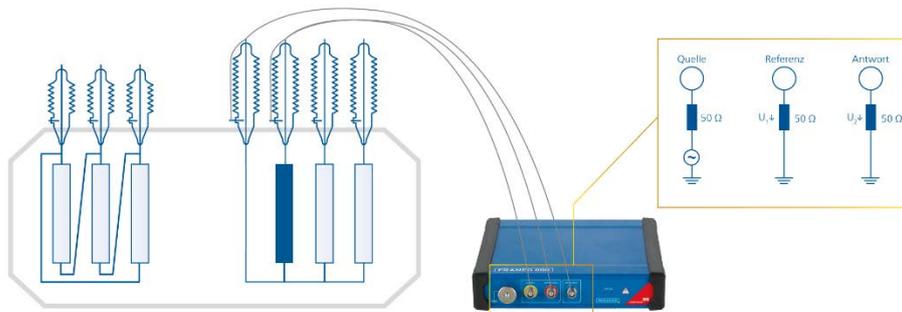


Abbildung 2: Typischer Aufbau zur Messung der Übertragungsfunktion

Die Messergebnisse werden in Form eines Bode-Diagramms dargestellt. Berechnet wird die Übertragungsfunktion $H(f)$ hier anhand von Formel 1. Wert k , der über das SFRA-Prüfsystem gemessen wird, wird durch Formel 2 definiert. Phase φ , die sich ebenfalls aus der Übertragungsfunktionsanalyse ergibt, wird durch Formel 3 definiert.

Übertragungsfunktionsanalysen erfolgen in der Regel im Frequenzbereich von 20 Hz bis 2 MHz und bei einer Ausgangsspannung von 0,1 bis 10 V. In diesem Frequenzbereich ist die SFRA-Methode das zuverlässigste und effizienteste Prüfverfahren zur Erkennung von mechanischen und bestimmten elektrischen Fehlern im Aktivteil von Leistungstransformatoren. Weitere Diagnosemessungen, wie Streureaktanz-, Erregerstrom- oder Wicklungswiderstandsprüfungen, können zur Bestätigung der identifizierten Fehler herangezogen werden.

Mit Übertragungsfunktionsanalysen lassen sich folgende Defekte und Probleme basierend auf Vergleichsmethoden ermitteln:

- Axiale und radiale Wicklungsdeformationen
- Verschiebungen zwischen Ober- und Unterspannungswicklungen
- Teilweise Wicklungszusammenbrüche
- Wicklungsschlüsse und -unterbrechungen
- Fehlerhafte Kernerden oder Schirmungen
- Kernverschiebungen
- Brüche von Pressrahmen
- Problematische interne Verbindungen

Bei einwandfreien Transformatoren stimmt die Messkurve im gesamten Frequenzbereich mit der Referenzkurve der Übertragungsfunktionsanalyse überein. Als Referenzkurve dient dabei ein „Fingerprint“: Dieser kann aus einer früheren Messung oder einer Messung eines Schwestertransformators mit identischen Spezifikationen stammen. Ein phasenbasierter Vergleich erfordert mehr Erfahrung, da Abweichungen möglicherweise auf das Design des Transformators statt auf mechanische Schäden zurückzuführen sind. Sind Defekte beispielsweise die Folgen von außergewöhnlich großer mechanischer Krafteinwirkung, transportbedingten Erschütterungen, seismischen Aktivitäten oder Stromausfällen, die sich in hohen Kurzschlussströmen bemerkbar machen können, zeigen sich in der Kurve für bestimmte Frequenzbereiche Abweichungen (Abbildung 3). Da es sich um eine Vergleichsanalyse handelt, dürfen Stör- oder Rauschsignale die Größenordnung und Phase der Übertragungsfunktionsanalyse nicht maßgeblich beeinflussen. Dieser Aspekt wird im Detail in den folgenden Abschnitten erläutert.

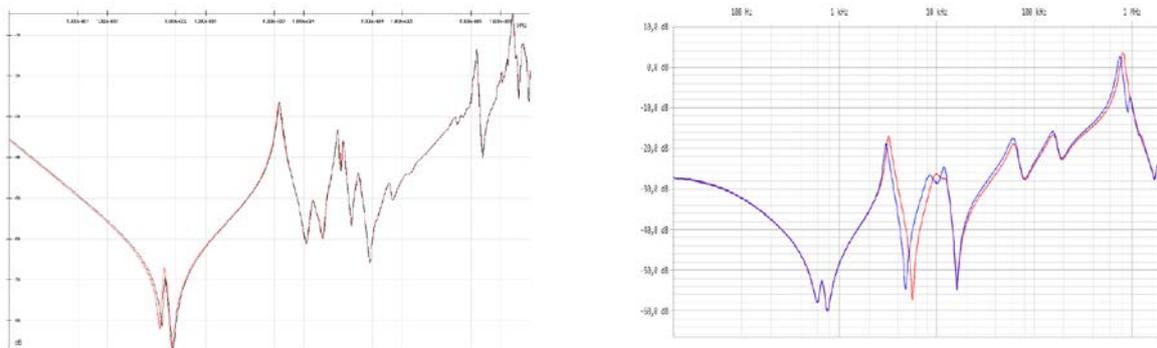


Abbildung 3: Typische Übertragungsfunktionsanalysen von Leistungstransformatoren
 links: Messkurve ist nahezu identisch mit zeitbasierter Referenz
 rechts: Messkurve zeigt signifikante Abweichungen gegenüber zeitbasierter Referenz

| | | |
|-----------|--|---|
| Formel 1: | $H(f) = \frac{U_2(f)}{U_1(f)} = \frac{50 \Omega}{50 \Omega + Z_{\text{test}}}$ | R_M = Magnetischer Widerstand L_M = Hauptinduktivität des Transformators N = Wicklungsanzahl l = Länge A = Flächenquerschnitt bezogen auf die Geometrie des magnetischen Kerns B = Magnetischer Flussdichte H = Magnetische Feldstärke μ = Magnetische Permeabilität |
| Formel 2: | $k = 20 \log \frac{U_2}{U_1}$ | |
| Formel 3: | $\varphi = \tan^{-1} \frac{\angle U_2}{\angle U_1}$ | |
| Formel 4: | $L_M = \frac{N^2}{R_M}$ | |
| Formel 5: | $R_M = \frac{\Theta}{\varphi} = \frac{N * I}{\mu * (N * I) * A} = \frac{l}{\mu * A}$ | |
| Formel 6: | $\mu = \frac{B}{H}$ | |

3 Mögliche Störquellen

Insbesondere im Bereich von Umspannwerken kommt es zu unterschiedlichen Rauschsignalen, die Übertragungsfunktionsanalysen beeinflussen können. Die Störquellen können vereinfacht nach Schmalband- und Breitbandrauschen unterschieden werden.

3.1 Schmalbandrauschen

Beim Schmalbandrauschen handelt es sich in der Regel um ein Netzfrequenz-Rauschsignal mit seinen harmonischen Schwingungen. Letztere sind ein Vielfaches der Netzfrequenz, die im Elektrizitätsnetz insgesamt vorhanden ist.

Allgemein beeinflusst das Schmalbandrauschen die Messkurve im Frequenzbereich zwischen 30 Hz und 100 Hz. Oberhalb von 300 Hz ist kaum noch mit Auswirkungen durch Schmalbandrauschen zu rechnen. Auch in Anlagen mit starker Oberschwingungsbelastung kann es zu Schmalbandrauschen kommen. Die Auswirkungen des Rauschsignals sind im Bereich von 3 Hz bis 100 Hz signifikant. Im harmonischen Frequenzbereich sind sie geringer, aber noch immer vorhanden. Glücklicherweise sind die Auswirkungen der Rauschsignale auf Messungen in einer Umgebung mit hoher elektromagnetischer Feldstärke beschränkt, wie beispielsweise Umspannanlagen mit einer Nennspannung von mehr als 380 kV.

Die Art des Betriebsmittels bzw. die Größe der Transformatorwicklung beeinflusst die Ergebnisse der Übertragungsfunktionsanalyse entscheidend: Mit steigender Induktion nimmt auch die Signaldämpfung zu, so dass sich die Empfindlichkeit des Antwortsignals gegenüber dem Störrauschen erhöht. Auswirkungen durch Rauschsignale treten nur in sehr niedrigen Frequenzbereichen auf, in denen die lineare Magnetisierungsinduktivität die Übertragungsfunktionsanalyse überlagert und somit einfach als Störung erkannt werden kann.

Schmalbandrauschen beeinflusst in der Regel nicht die mechanische Zustandsbeurteilung für den Aktivteil eines Leistungstransformators, da die ersten Resonanzpunkte typischerweise erst oberhalb von 130 Hz liegen. Über Analysen im niedrigen Frequenzbereich lassen sich allerdings elektrische Defekte von Leistungstransformatoren, wie Kurzschlüsse zwischen Wicklungen, offene Stromkreise oder kurzgeschlossene Kernbleche, feststellen, die aber auf Grund ihrer Charakteristik klar von Störsignalen unterschieden werden können. In Abbildung 4 ist beispielhaft eine SFRA-Messkurve für 500-kV-Wicklungen eines Leistungstransformators dargestellt, bei dem die oben genannten Effekte beobachtet werden können.

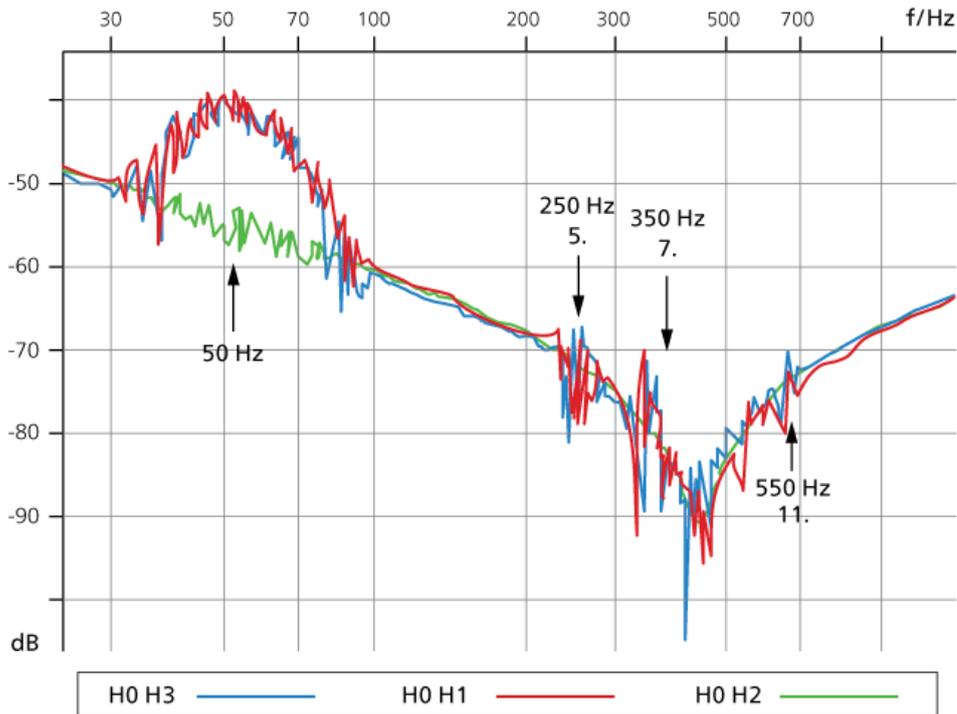


Abbildung 4: Übertragungsfunktion von drei Phasen von 500-kV-Wicklungen mit Schmalbandrauschen bei Netzfrequenz und den zugehörigen harmonischen Schwingungen

3.2 Breitbandrauschen

Bei Übertragungsfunktionsanalysen besteht stets ein Grundrauschen, das die Ergebnisse aus der SFRA-Prüfung beeinflusst. Dieses spezifische, interne Rauschen wird als Breitbandrauschen bezeichnet. Verursacht wird dieses Rauschen vom angeschlossenen SFRA-Prüfgerät. Wie hoch der Rauschpegel ist, hängt vom Dynamikbereich des jeweils eingesetzten Systems ab.

Die Signaltheorie definiert das Grundrauschen als das Signal, das sich aus der Summe aller Rauschquellen und unerwünschten Signalen innerhalb eines Messsystems ergibt. Es dient als Indikator für das Minimum der messbaren Signalstärke. Das Grundrauschen eines SFRA-Prüfgerät definiert sich durch seinen Dynamikbereich. Gemäß der Norm IEC 60076-18 werden als spezifische Mindestsystemanforderungen Werte zwischen -90 dB und +10 dB für den Dynamikbereich angegeben. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte und den in den letzten Jahren gewonnenen Erkenntnissen ist es empfehlenswert, den Dynamikbereich als absoluten Wert des negativen Messbereichs plus 20 dB zu berechnen. Dies ist grafisch in Abbildung 5 dargestellt.

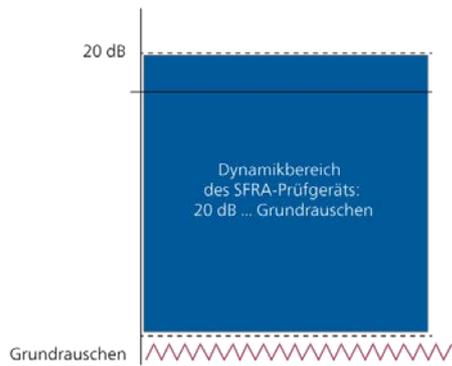


Abbildung 5: Schematische Darstellung von Grundrauschen und Dynamikbereich

Anders als beim Schmalbandrauschen gelten die Auswirkungen, die auf Breitbandrauschen zurückzuführen sind, als höchst kritisch. Diese Art von Störgeräuschen ist häufig in SFRA Messkurven von Leistungstransformatoren mit einer hohen Magnetisierungsinduktivität, bei Transformatoren mit primärseitigen Dreieckswicklungen oder in kapazitiven Messungen zwischen den Wicklungen zu beobachten. Grundrauschen kann die Ergebnisbeurteilung extrem erschweren, da mehrere Resonanzpunkte, also wichtige Betriebsmittelinformationen, von dieser Art von Störgeräuschen beeinflusst werden können.

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für den Einfluss von Grundrauschen: Ein Leistungstransformator mit Dreieckswicklung wurde mit einem SFRA-System bei einem Grundrauschpegel von -80 dB gemessen. In diesem Beispiel wird deutlich, dass die Übertragungsfunktionsanalyse im Bereich unterhalb von -80 dB durch das Grundrauschen stark beeinflusst wird. Dies ist auf den beschränkten Dynamikbereich des eingesetzten SFRA-Prüfgeräts zurückzuführen. Es empfiehlt sich daher ein SFRA-Prüfgerät mit einem Dynamikbereich von mehr als 100 dB. Der Dynamikbereich moderner SFRA-Prüfgeräte liegt beispielsweise im Bereich von bis zu 150 dB.

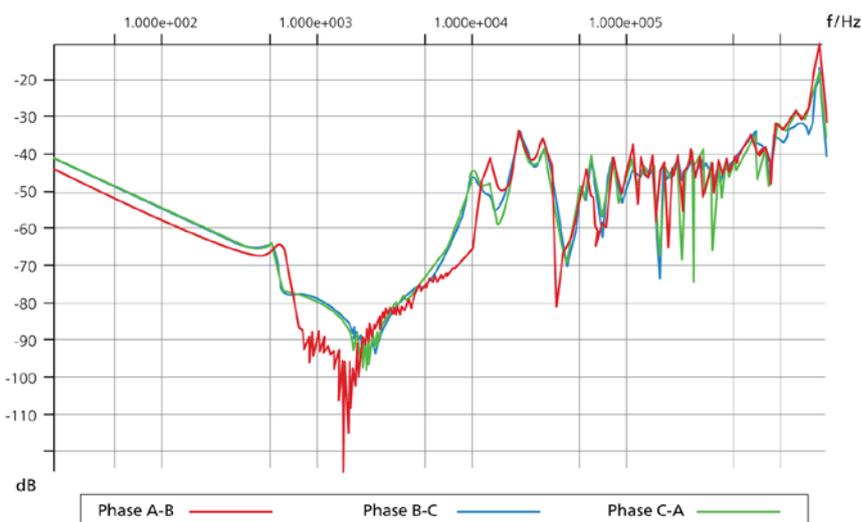


Abbildung 6: Beispiel für die Auswirkungen von Grundrauschen in SFRA Messungen bei Dreieckswicklungen

4 Techniken zur Rauschunterdrückung

Um den Einfluss externer Störern in SFRA-Messkurven zu minimieren, stehen mehrere Methoden zur Verfügung. Diese Verfahren können in zwei Gruppen unterteilt werden: hardwarebasierte und softwarebasierte Techniken.

4.1 Hardwarebasierte Techniken

Zur Minimierung von Rauschsignalen bei Messungen bieten sich für SFRA-Systeme verschiedene hardwarebasierte Möglichkeiten an, wie bestimmte Anschlusstechniken, Eingangsfiler und eine anpassbare Ausgangsspannung.

4.1.1 Zuverlässige Anschlusstechnik

Die richtige Anschlusstechnik kann dazu beitragen, den Einfluss externer Störungen zu reduzieren. Die IEC 60076-18-Norm beschreibt detailliert das Verfahren, das für einen ordnungsgemäßen und reproduzierbaren Messaufbau empfohlen wird.

Für einen optimalen Rauschabstand empfiehlt die Norm bei Übertragungsfunktionsanalysen doppelt geschirmte Koaxialkabel zu verwenden, die durch breite, flache Aluminiumlitzen geerdet sind. Dieses Erdungskonzept bietet eine große Oberfläche, geringstmögliche Induktivität und minimale Anfälligkeit für Schmalbandrauschen. Um verfälschte Ergebnisse der Übertragungsfunktionsanalyse durch das Erdungssystem auszuschließen, sind die Erdungsbänder, z.B. ein Geflecht aus Aluminiumlitzen, möglichst eng entlang der Durchführungen zu legen (Stichwort „kürzest mögliches Erdungskonzept“), wie in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Nur mithilfe dieser Anschlusstechnik lässt sich eine optimale Reproduzierbarkeit sicherstellen. Das gilt insbesondere im Hochfrequenzbereich, oberhalb von 500 kHz.



Abbildung 7: Anschlussbeispiel nach dem Prinzip „kürzest möglicher Erdungsbänder“

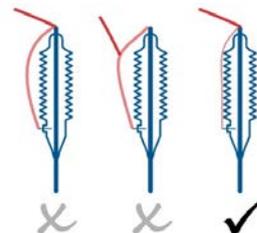


Abbildung 8: Empfohlenes Erdungskonzept gemäß IEC 60076-18

Im Vergleich zu anderen Anschlusstechniken mit einfachen Kabeln lässt sich mit einer Aluminiumlitze der Einfluss von Rauschsignalen deutlich minimieren, wie in Abbildung 9 dargestellt.

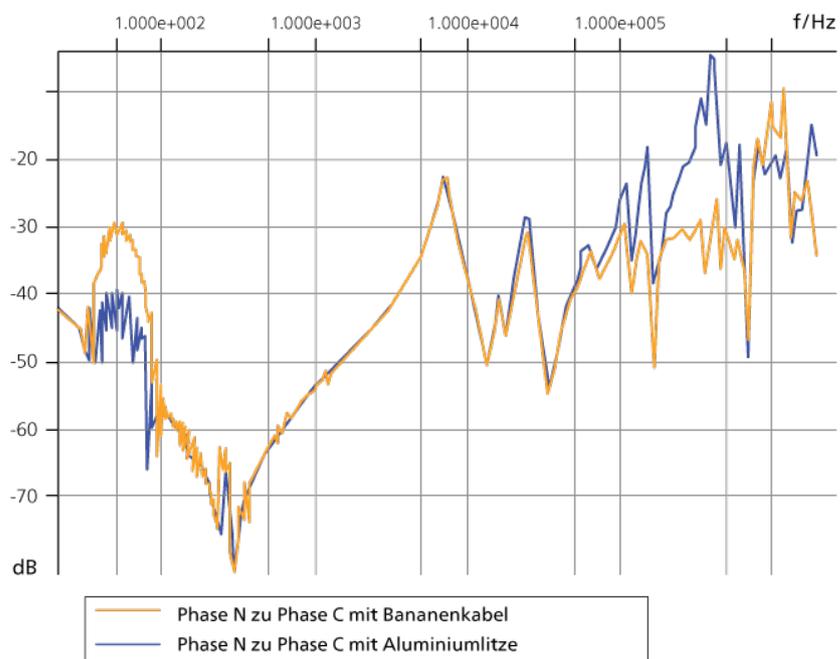


Abbildung 9: Vergleich zweier unterschiedlicher Anschlusstechniken:
Bananenkabel (4 mm) vs. Aluminiumlitze

Die besten Ergebnisse werden durch den Anschluss zweier Aluminiumlitzen im Winkel von 180° zwischen den mittleren Leitern erzielt. Störungen durch externe Rauschsignale werden dabei elektromagnetisch ausgeschaltet. Allerdings wird in der Norm das Anschlussverfahren unter Verwendung zweier Aluminiumlitzen nicht berücksichtigt, so dass hier nicht näher darauf eingegangen werden soll.

4.1.2 Erweiterte Eingangsfiler

Die meisten SFRA-Prüfgeräte sind mit Eingangsfiltren ausgestattet, die in der Lage sind, Schmalbandrauschsignale bis zu einem gewissen Pegel zu unterdrücken. Diese Rauschunterdrückung lässt sich durch die Anpassung der Messbandbreite steuern. Die Einstellung der Bandbreite ist stets ein Kompromiss zwischen der möglichen Rauschunterdrückung und der erforderlichen Messdauer. Die optimale Einstellung lässt sich auch durch die automatische Anpassung der Empfängerbandbreite als Funktion der Signaldämpfung erzielen. Die minimale Auflösungsbandbreite basierend auf IEC 60076-18 erfordert für Messungen unterhalb von 100 Hz eine maximale Bandbreitenauflösung von 10 Hz. Für Messungen oberhalb von 100 Hz sollte sie weniger als 10 % der Messfrequenz oder die Hälfte des Intervalls zwischen angrenzenden Messfrequenzen betragen. Um die gesamte Messdauer

zu reduzieren ohne Messergebnisse zu verzerren, verfügen komplexere SFRA-Geräte über intelligente Bandbreitenalgorithmen.

Solche SFRA-Geräte wählen während der Messung automatisch die ideale Bandbreite aus. Dabei erfolgt zuerst eine Breitbandmessung, um die kritischen Frequenzbereiche zu identifizieren. Anschließend folgt in den identifizierten/störungsbehafteten Bereichen eine auf den Schmalbandbereich beschränkte Messung. Dabei werden die wichtigsten Anforderungen gemäß IEC berücksichtigt. Dieses Konzept ist vereinfacht grafisch in Abbildung 10 dargestellt. Soll eine Messung bei Frequenz „ f “ erfolgen, misst das SFRA-Gerät nur die Signale, deren Frequenzen innerhalb des Bandbreitenbereichs liegen. Jegliche Störungen für Frequenzen außerhalb des Bandbreitenbereichs werden nicht bei der Messung berücksichtigt. Damit lässt sich die Rauschunterdrückung insgesamt einfach durch Verringerung der Empfängerbandbreite optimieren.

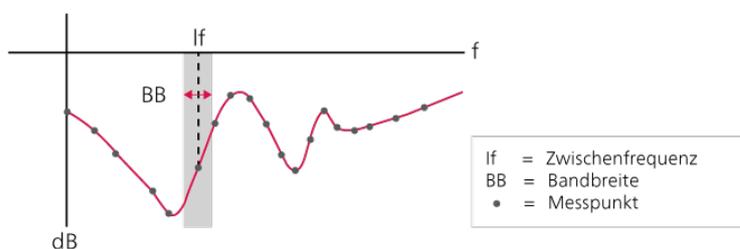


Abbildung 10: Schema des adaptiven Bandbreitenkonzepts

4.1.3 Anpassbare Ausgangsspannung

Die Messung der Übertragungsfunktion $H(f)$ erfolgt unabhängig von der Ausgangsspannung des SFRA-Prüfgeräts, da eine Leistungstransformatorwicklung als lineares System betrachtet werden kann. Die Ausgangsspannung korreliert allerdings direkt mit dem Rauschabstand. Insbesondere bei Netzfrequenz (50/60 Hz) kann eine höhere Ausgangsspannung dazu beitragen, die Störfestigkeit gegenüber Schmalbandrauschen zu verbessern.

Im linearen System wird die Übertragungsfunktionsanalyse außerdem im niedrigen Frequenzbereich von der Magnetisierungsinduktivität des Kerns überlagert. Sie hängt also von der Spannung ab. Erklären lässt sich dieser Effekt damit, dass die Magnetisierungsinduktivität abhängig von der angelegten Prüfspannung und der Anzahl der Wicklungen ist, wie über die vereinfachten Formeln 4, 5 und 6 beschrieben.

Im Allgemeinen ändert die angelegte Prüfspannung am SFRA-Prüfsystem die magnetische Permeabilität μ entsprechend der Hystereseurve des jeweiligen Kernmaterials. Die Folge ist eine Änderung in der Reluktanz und damit auch eine veränderte Kerninduktivität. Die Diagramme unten in Abbildung 11 zeigen den Einfluss unterschiedlicher Ausgangsspannungen und die damit einhergehenden Änderungen der SFRA-Kurven (links) sowie die erhöhte Störfestigkeit gegenüber Schmalbandrauschen bei einer höheren Ausgangsspannung (rechts).

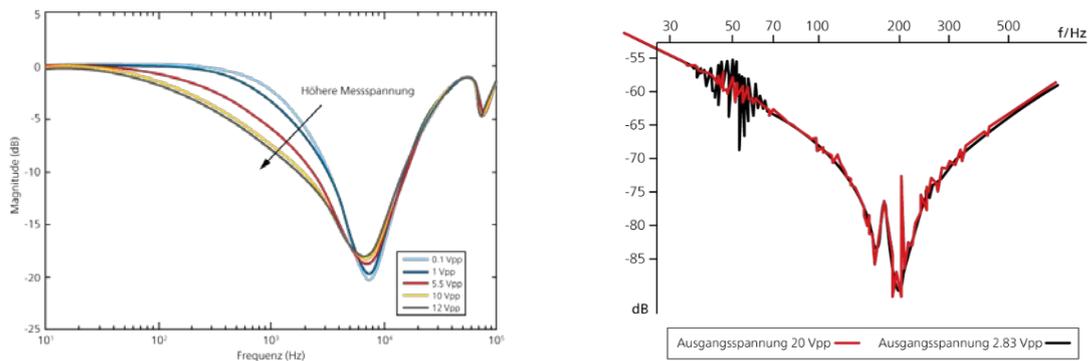


Abbildung 11: Auswirkungen unterschiedlicher Ausgangsspannungen

links: Auswirkung unterschiedlicher Ausgangsspannungen
auf die Magnetisierungsinduktivität L_m

rechts: Auswirkung der Schmalbandrauschunterdrückung bei
unterschiedlichen Ausgangsspannungen

4.2 Softwarebasierte Techniken

Softwarebasierte Methoden basieren vor allem auf der Datenverarbeitung nach der Messung, wie Glättungsalgorithmen oder Mittelungsfiler.

Die softwarebasierten Methoden umfassen Filtertechniken, die Rauschsignale in bestehenden SFRA-Kurven mittels Signalbearbeitungsverfahren eliminieren. Andere softwarebasierte Techniken basieren auf Abweichungsanalysen. Sie wurden entwickelt, um nicht-lineare Verzerrungen und Rauschsignale in Übertragungsfunktionsanalysen zu erkennen und zu quantifizieren.

Zu weiteren Verfahren zählen etwa die Wavelet-Transformation, die vor allem zur Rauschunterdrückung in Zeitbereichsmessungen eingesetzt wird, oder Kalman-Filter. Außerdem können unterschiedliche einfache Algorithmen, wie Mittelungsfiler, gleitende Durchschnittsfiler, exponentiell gewichtete gleitende Durchschnittsfiler etc., zur Korrektur verzerrter SFRA-Messkurven herangezogen werden. Einige SFRA-Systeme besitzen bereits standardmäßig softwarebasierte Signalbearbeitungstools zur Optimierung der Messdaten. Abbildung 12 zeigt eine durch Schmalbandrauschen verzerrte Messkurve nach dem Abgleich durch einen Mittelungsfiler.

Mit Filtertechniken lässt sich die Auswertung von SFRA-Messkurven insgesamt qualitativ verbessern. Solche Tools werden häufig von SFRA-Experten eingesetzt, da sich so Resonanzen einfach ausschalten lassen, die wiederum zu einer fehlerhaften Zustandsbeurteilung des

Betriebsmittels führen könnten. Dafür müssen allerdings auch die ursprünglichen Messkurven verfügbar sein, also die Kurven ohne Signalbearbeitung.

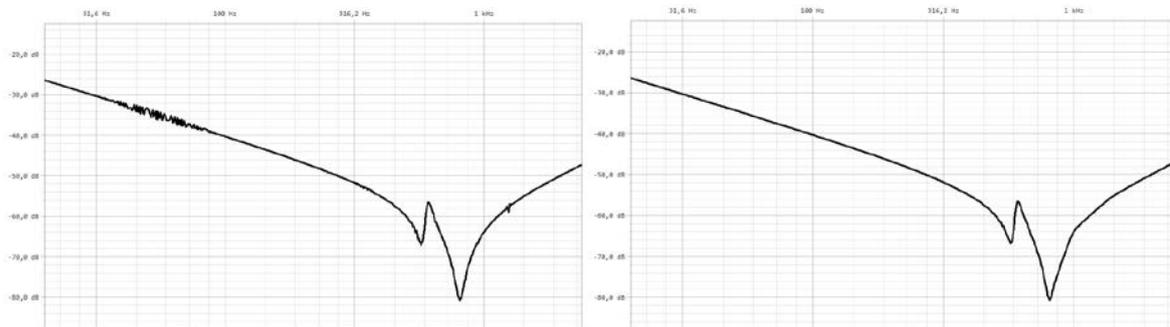


Abbildung 12: Vergleich der SFRA-Kurve
links: vor Anwendung von Softwarefilter
rechts: nach Anwendung von Softwarefilter.

5 Fallstudien

An einem dreiphasigen Leistungstransformator mit 70 MVA wurde eine Übertragungsfunktionsanalyse durchgeführt. Die Nennspannung an der Primärwicklung beträgt 240 kV und an der Sekundärwicklung 10,5 kVA. Zweck der Messung war es vor allem, einen korrekten „Fingerprint“ für zukünftige Diagnosen zu erhalten. Eine mechanische Zustandsbeurteilung ist daher für diese Fallstudie nicht relevant.

Die Messung erfolgte vor Ort neben einer aktiv betriebenen 240-kV-Freileitung. Es wurden zwei unterschiedliche SFRA-Geräte mit verschiedenen Algorithmen zur Anpassung der Empfängerbandbreite eingesetzt, mit denen die Funktionalitäten zur Rauschunterdrückung überprüft werden sollten (Abbildung 13). Wie bereits in diesem Artikel beschrieben, kann Schmalband- und Breitbandrauschen mehrere Resonanzpunkte beeinflussen, an denen wichtige Daten zu Betriebsmitteln abgenommen werden können. Dadurch kann es vor allem für weniger erfahrene Bediener stellenweise sehr schwierig sein, die jeweiligen SFRA-Ergebnisse korrekt zu beurteilen.

Die SFRA-Kurven von Phase U der 240-kV-Wicklung zeigen, dass die mit SFRA-Gerät 1 ermittelte SFRA-Kurve durch das Schmalbandrauschsignal bei 50 Hz und deren Harmonische gestört wird. Die Messdauer betrug aufgrund der statischen Algorithmen für die automatische Bandbreitenanpassung (beginnend bei 20 Hz bis 2 MHz) insgesamt 56 Sekunden. Es wurde festgestellt, dass der von der Parallelkapazität (C_g) und der Magnetisierungsinduktivität (L_m) erzeugte sekundäre Resonanzpunkt leichte Verzerrungen aufwies (Abbildung 13, Bild links).

Für die zweite Messung wurde ein modernes SFRA-Gerät mit verbesserter hardwarebasierter Rauschunterdrückung eingesetzt. Dieses wird im Folgenden als SFRA-Gerät 2 bezeichnet. Durch die intelligente Anpassung der Bandbreite kam es im niedrigen Frequenzbereich zu keinerlei Verzerrung der Messkurven durch externe Rauschsignale.

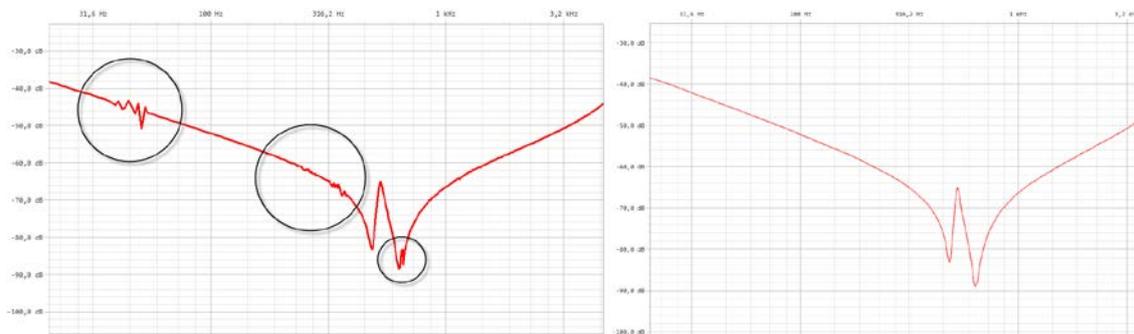


Abbildung 13: „End-to-End“-Messung an den Hochspannungswicklungen
 links: Messung mit SFRA-Gerät 1
 rechts: Messung mit SFRA-Gerät 2

Insbesondere bei kapazitiven Messungen zwischen den Wicklungen kann es durch Grundrauschen und Netzfrequenz-Rauschsignale aufgrund des geringeren Rauschabstands zu einer erheblichen Beeinflussung der Messkurven kommen. Mit einem höheren Dynamikbereich, einer höheren Ausgangsspannung und einer intelligenten Anpassung der Empfängerbandbreiten kann daher eine grundsätzliche Verbesserung der Messergebnisse realisiert werden. Die Ergebnisse der kapazitiven Messung zwischen den Wicklungen sind in Abbildung 14 dargestellt. Für SFRA-Gerät 1 ist eine starke Verzerrung durch Schmalbandrauschen erkennbar. Im Vergleich dazu ist bei der Ergebniskurve von SFRA-Gerät 2 durch die intelligente Anpassung der Empfängerbandbreite kaum eine Verzerrung zu verzeichnen.

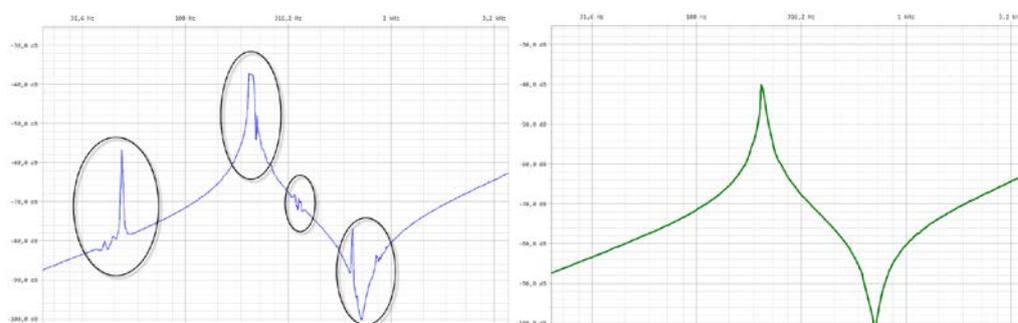


Abbildung 14: Kapazitive Messung zwischen den Wicklungen
 links: Messung mit SFRA-Gerät 1
 rechts: Messung mit SFRA-Gerät 2

Alternativ lassen sich die Auswirkungen des Schmalbandrauschsignals auch mit einer „End-to-End“-Kurzschlussmessung abschwächen. Die Niederspannungsseite wird bei dieser Messung kurzgeschlossen. Basierend auf diesem Verfahren wird die Wicklungsimpedanz von den spezifischen Kerncharakteristika, insbesondere im Bereich der Netzfrequenz, abgekoppelt. Einfach ausgedrückt: Die Transformator-Magnetisierungsinduktivität L_m wird ausgeschaltet; es wird nur die Streureaktanz im niedrigen Frequenzbereich gemessen. Leider lässt diese Methode keine weitere Beurteilung des elektrischen Zustands in diesem Bereich zu – der größte Nachteil dieses Verfahrens. Diese Messung sollte daher zusätzlich zur empfohlenen „End-to-End“-Messung im offenen Stromkreis erfolgen. Wie in Abbildung 15 dargestellt, zeigen beide Messergebnisse keine Verzerrung für die Nennfrequenz und die zugehörigen Harmonischen.

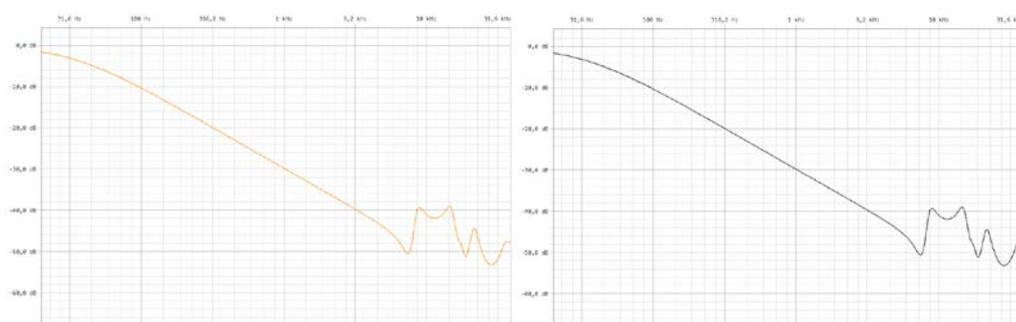


Abbildung 15: „End-to-End“-Kurzschlussmessung an Hochspannungs-Wicklung
 links: Messung mit SFRA-Gerät 1
 rechts: Messung mit SFRA-Gerät 2

6 Zusammenfassung

Rauschen aus der Umgebung von Anlagen kann stets einen Störfaktor für Übertragungsfunktionsanalysen darstellen. Solche Störsignale lassen sich in Schmalband- und Breitbandrauschen unterteilen. Zur effektiven Abschwächung des Einflusses von Rauschsignalen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die in hardwarebasierte Techniken und softwarebasierte Verfahren unterschieden werden können.

Vor allem der gerätespezifische Dynamikbereich beeinflusst in hohem Maße die Auswertung der Messergebnisse. Die gängigsten Techniken zur qualitativen Verbesserung der SFRA-Messkurven sind eine adaptive Ausgangsspannung sowie eine intelligente Anpassung der Empfängerbandbreite. Softwarebasierte Lösungen wie Glättungsalgorithmen oder Mittelungsfiler funktionieren unabhängig von der Hardware. Sie können auch nach der eigentlichen Messung nur zur Ergebnisanalyse eingesetzt werden.

Für weniger erfahrene Anwender ist es bei verzerrten Messkurven der Frequenzantwort unter Umständen sehr schwierig, den mechanischen Zustand des Leistungstransformators korrekt zu beurteilen. Durch eine Kombination der aufgeführten hardware- und softwarebasierten Techniken können die Ergebniskurven in den meisten Fällen ohne signifikanten Einfluss von Rauschsignalen richtig analysiert werden. Die Fallstudien zeigen, wie sich die Auswirkungen von Störsignalen in niedrigen Frequenzbereich durch eine intelligente Anpassung der Empfängerbandbreite und eine Erhöhung der Ausgangsspannung effektiv reduzieren lassen. Für eine korrekte Reproduzierbarkeit der Frequenzantwort bei niedrigen Frequenzen wird empfohlen, für die Messung dieselbe Ausgangsspannung anzulegen wie bei der Referenzmessung.

Mit modernen SFRA-Prüfgeräten und einer geeigneten Software sind also auch unter ungünstigen Bedingungen zuverlässige Messungen der Frequenzantwort möglich. Außerdem unterstützen sie eine verbesserte Zustandsbeurteilung für Leistungstransformatoren.

7 Referenzen

- The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, „Frequency Response Analysis of Winding Deformation of Power Transformers“, China 2005, DL 911/2004
- Cigré WG A2/26, „Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)“, Brochure 342, Paris 2008
- Cigré WG A2/26, „Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)“, Electra N°228, Paris 2006
- TC 14 – Power transformers, IEC 60076 – 18 „Measurement of frequency response“, 2012
- IEEE Std C57.149, „IEEE Std 62-1995“ – 2012
- J. Christian, K. Feser, Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, Januar 2004, pp.214-220
- T. Leibfried, K. Feser, Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, Oktober 1999, S.1333-1341
- S. Tenbohlen, R. Wimmer, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger, J. Christian, The influence of grounding and connection technique on the repeatability of FRA-results, Proceedings of the XVth International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljubljana, Slowenien, August 27-31 2007
- Feser K., J. Christian, C. Neumann, U. Sundermann, T. Leibfried, A. Kachler and M. Loppacher, „The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers After Transport, Short Circuit or 30 Years of Service“. CIGRE paper 12/33-04, 2000
- Juan L. Velásquez, et al., „Noise in FRA Measurements: Sources, Effects and Suppression“, OMICRON DMPT Workshop 2009
- S. Ryder, S. Tenbohlen, A comparison of the swept frequency and impulse response methods for making frequency response analysis measurements, Doble Conference, 2003

Autoren



Michael Rädler erlangte seinen Titel als Dipl. Ing. (FH) im Bereich Wirtschaftsingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Mittweida, Deutschland. Nach seiner Graduierung an der Höheren Technischen Lehranstalt in Bregenz, Österreich, im Jahr 2007 begann er seine berufliche Laufbahn bei OMICRON electronics als Anwendungstechniker, schwerpunktmäßig im Bereich von Leistungstransformatoren. Seit September 2013 ist er als Produktmanager für das OMICRON Multifunktionssystem für Primärprüfverfahren zur Anlageninbetriebnahme und -wartung (CPC100) tätig. Er hat mehrere Artikel zu elektrischen Messverfahren an Leistungstransformatoren veröffentlicht, ist Mitglied des Cigré und ist in der SFRA-Arbeitsgruppe aktiv.



Stephanie Uhrig (geborene Rätzke) schloss sich OMICRON electronics im Jahr 2010 als Produktmanagerin an und ist seitdem für unterschiedliche Systeme für Prüfverfahren an Leistungstransformatoren verantwortlich. Derzeit liegt ihr Schwerpunkt im Bereich der Frequenzantwort-Analysegeräte (FRANEO 800). Stephanie Uhrig studierte an der Technischen Universität München Elektrotechnik und Energietechnik und absolvierte ihr Studium 2003 als Dipl.-Ing. Anschließend war sie für das Hochspannungstechnik-Labor der Universität tätig, wo sie 2009 ihre Promotion im Fachgebiet Materialien für Hochspannungstechnik abschloss.



Juan L. Velásquez Contreras wurde in Venezuela geboren. Er absolvierte im Jahr 2002 sein Studium der Elektrotechnik an der Nationalen Polytechnischen Universität UNEXPO in Venezuela. Im Anschluss übernahm er eine Position als Instandhaltungs- und Projekttechniker im Bereich Hochspannungsbetriebsmittel bei CVG Venalum in Venezuela. 2006 schloss er sich dem Technologietransferzentrum CITCEA in Spanien an. Als Projekttechniker war er dort mit der Implementierung von Zustandsüberwachungssystemen für Leistungstransformatoren betraut. Für OMICRON electronics war er von 2008 bis 2011 als Produktmanager für Diagnosesysteme tätig. Im Jahr 2011 erlangte er an der Polytechnischen Universität Katalonien in Barcelona, Spanien den akademischen Grad PhD auf dem Gebiet des Betriebsmittelmanagements für Leistungstransformatoren. Anschließend war er von 2011 bis 2016 als HVDC-Techniker der Amprion GmbH tätig, bevor er im August 2016 als Entwicklungs- und Servicetechniker zur Hubert Göbel GmbH wechselte.

OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 140 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Servicezentren auf allen Kontinenten bieten zudem ein breites Anwendungswissen und erstklassigen Kundensupport. All dies, zusammen mit einem starken Netz von Vertriebspartnern, ließ OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden.

Mehr Informationen, eine Übersicht der verfügbaren Literatur und detaillierte Kontaktinformationen unserer weltweiten Niederlassungen finden Sie auf unserer Website.