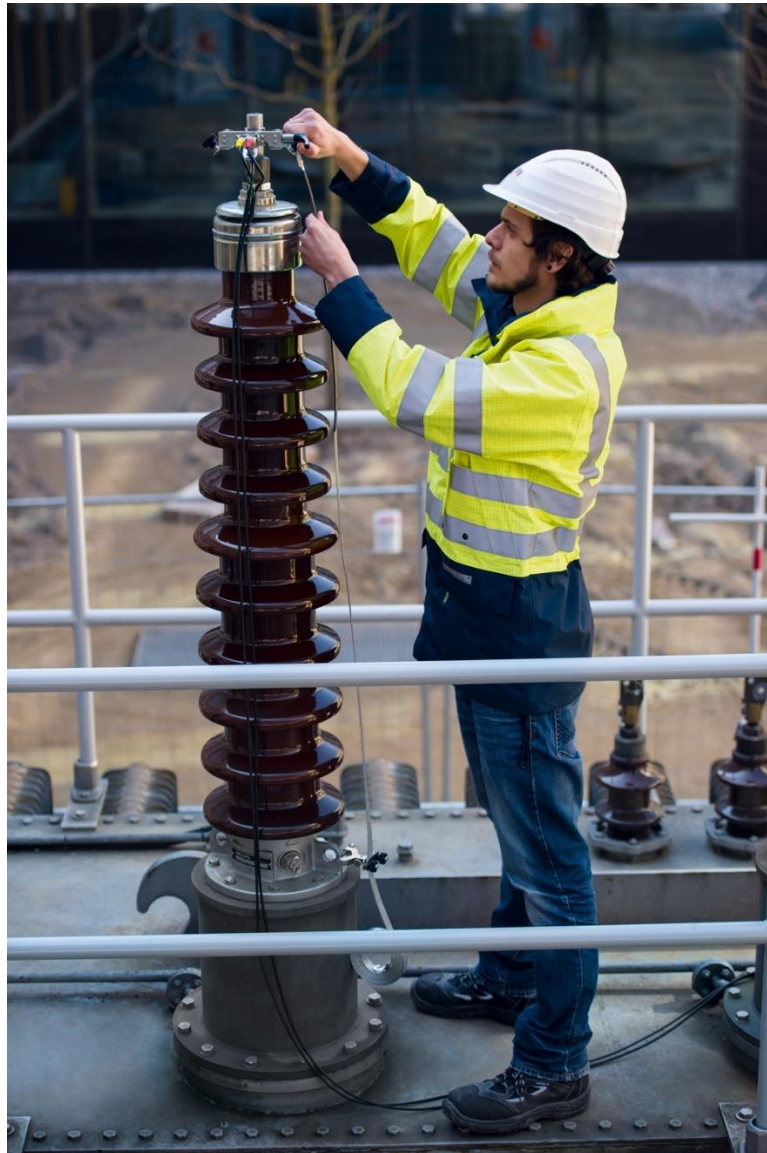




Zuverlässige und reproduzierbare Messungen der Übertragungsfunktion (SFRA) an Leistungstransformatoren

Prof. Dr. Stephanie Uhrig, Hochschule für Angewandte Wissenschaften München
Michael Rädler, OMICRON electronics GmbH

Übersicht

Die Sweep Frequency Response Analysis (SFRA, Analyse der Übertragungsfunktion) ist ein Standardverfahren für die Bewertung der mechanischen und elektrischen Integrität von Leistungstransformatoren. Die hohe Sensitivität der Methode hilft bei der Ermittlung und Bewertung von Defekten, allerdings zeigt die Praxis, dass Anwender oftmals Schwierigkeiten beim Erreichen einer hohen Reproduzierbarkeit haben. Dieser Artikel stellt die verschiedenen Einflussfaktoren sowie Möglichkeiten zur Optimierung der Reproduzierbarkeit von SFRA-Messungen anhand von Fallstudien vor.

1 Einführung

Die Sweep Frequency Response Analysis (SFRA, Analyse der Übertragungsfunktion) wurde für die Prüfung der Integrität des Aktivteils von Leistungstransformatoren eingeführt. Nach der Fertigung werden Leistungstransformatoren zu ihrem Bestimmungsort geliefert, wobei oftmals lange Strecken mit unterschiedlichen Transportmitteln, z. B. auf dem Seeweg, mit der Bahn oder dem Lkw, zurückgelegt werden müssen. Während des Transports und beim Verladen von einem zum anderem Transportmittel kann der Transformator mechanischen Erschütterungen ausgesetzt sein. Diese Erschütterungen können auch durch Erdbeben oder mechanische Einwirkungen aufgrund von Kurzschlusskräften nach einem Kurzschluss im Netz verursacht werden. All diese Faktoren können zu Verformungen oder partiellen Verschiebungen im Aktivteil führen. Gängige Diagnosemessungen, wie die Messung des Übersetzungsverhältnisses inklusive der Magnetisierungsströme, die Messung der Kurzschlussimpedanz bei Nennfrequenz sowie die Ermittlung der Streuverluste über die Frequenz können aufgrund ihrer geringen Sensitivität Nachteile beim Erkennen und Nachweisen mechanischer Verformungen haben. Ein Beispiel: Eine mechanisch verformte Wicklung hat normalerweise keinen Einfluss auf das Übersetzungsverhältnis und den Isolationswiderstand, ebenso kann sie nur schwer in Kapazitätsänderungen erkannt werden. Verglichen mit diesen Messungen ist die SFRA das sensitivste Verfahren für eine zuverlässige Kern- und Wicklungsdiagnose [1]. Dieser Artikel stellt die verschiedenen Einflussfaktoren sowie Möglichkeiten zur Optimierung der Reproduzierbarkeit von SFRA-Messungen anhand von Fallstudien vor.

2 Grundlage des SFRA-Verfahrens

Das SFRA-Verfahren umfasst eine hochgradig wiederhol- und reproduzierbare Messung der Übertragungsfunktion eines Leistungstransformators und anschließendem Vergleich mit einer vorhandenen Referenzmessung, auch bekannt als Fingerabdruck [3], [4]. Grundsätzlich werden für die Bewertung der gemessenen SFRA-Kurven folgende drei Vorgehensweisen verwendet:

- Zeitbasierter Vergleich einer aktuellen SFRA-Messung mit früheren Messergebnissen desselben Transformators
- Typbasierter Vergleich der SFRA-Messung mit den Messergebnissen eines anderen, baugleichen Transformators
- Phasenbasierter Vergleich der SFRA-Messung einer Phase mit den anderen Messkurven desselben Transformators

Die gängigste und beste Vorgehensweise ist der zeitbasierte Vergleich, jedoch steht in den meisten Fällen kein Fingerabdruck oder Referenzmessung zur Verfügung. Ein einfacher Vergleich der SFRA-Kurven mit anderen Phasen oder ein typbasierter Vergleich kann allerdings ebenfalls zu einer erfolgreichen Bewertung der Messergebnisse führen. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass auch bei vorliegendem Fingerabdruck der Vergleich sehr sorgfältig durchgeführt werden muss, da Abweichungen mitunter nicht durch Deformationen, sondern durch unterschiedliche Messbedingungen oder Messfehler verursacht werden [8]. Um solche irreführenden Faktoren weitestgehend zu vermeiden, wird in diesem Artikel der zeitbasierte Vergleich als Standardvorgehensweise empfohlen.

2.1 Messung der Übertragungsfunktion

Der Aktivteil eines Leistungstransformators besteht vereinfacht betrachtet aus Wicklung, Kern, Isolation und Anschlussverbindungen und bildet ein komplexes elektrisches RLC-Netzwerk gemäß Abbildung 1. Dieses Netzwerk hat einzigartige Eigenschaften, die über die Übertragungsfunktion dargestellt werden können: Ein sinusförmiges Niederspannungssignal mit variabler Frequenz mit zum Beispiel 10 V wird an einem Anschluss angelegt und am anderen Anschluss wird die Antwort (U_2) gemessen (Abbildung 2). Für die Messung von Amplitude, Phase und Frequenz des eingespeisten Signals wird ein Referenzmesskanal (U_1) an derselben Einspeisestelle wie die Quelle angeschlossen [2]. Die Übertragungsfunktion beinhaltet die Amplitude, das Verhältnis und die Phasendifferenz zwischen den beiden Anschlüssen.

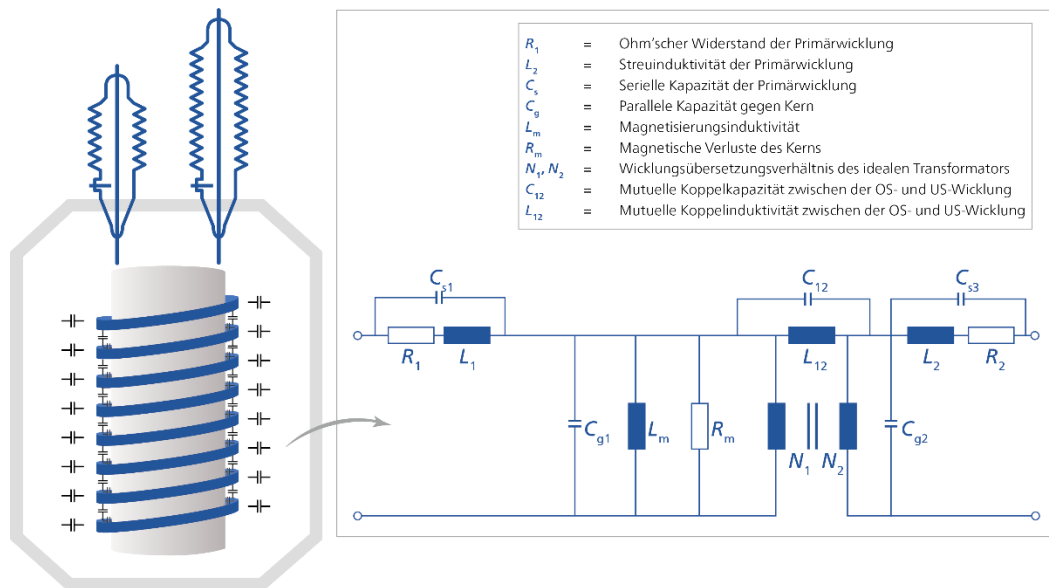


Abbildung 1: Vereinfachtes elektrisches RLC-Ersatzschaltbild eines Leistungstransformators

Die Übertragungsfunktion kann auf unterschiedliche Weise gemessen werden, um mehr Informationen für eine erweiterte Bewertung zu erhalten. Der gängigste Ansatz ist die Leerlaufmessung. Bei dieser Messung wird die Übertragungsfunktion zwischen zwei Anschlüssen mit demselben Spannungslevel gemessen und alle übrigen Anschlüsse offengelassen. Bei der Kurzschlussmessung werden wiederum die Anschlüsse eines der beiden Spannungslevels – wie der Name schon sagt – kurzgeschlossen, zum Beispiel die Unterspannungswicklung bei Messung der Oberspannungswicklungen. Eine kapazitive Wicklungsmessung beschreibt eine Prüfung zwischen zwei Wicklungen am selben Transformatorschenkel, zum Beispiel der Ober- und Unterspannungswicklung, während alle übrigen Anschlüsse offen sind. Eine induktive Wicklungsmessung wird ebenfalls zwischen zwei Wicklungen am selben Transformatorschenkel durchgeführt, wobei die Messklemmen an jedem Wicklungsanschluss befestigt werden und das andere Ende der Wicklung mit der Erde verbunden ist.

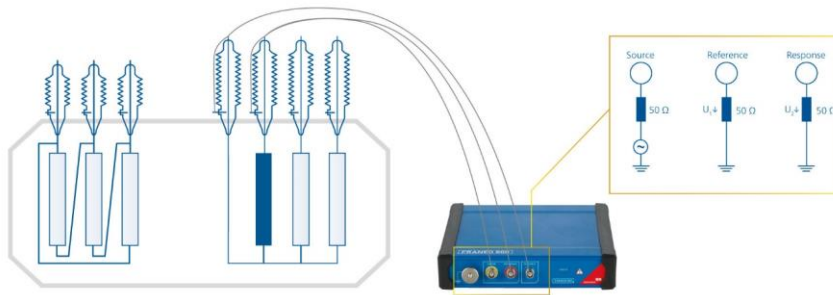


Abbildung 2: Typischer Prüfaufbau für eine Sweep Frequency Response Analysis

2.2 Analyseverfahren für SFRA-Messungen

Abhängig von ihren Haupteinflussfaktoren zeigen sich die möglichen Fehlerfälle in unterschiedlichen Frequenzbereichen stärker. Ein Beispiel: Kernphänomene beeinflussen üblicherweise den niedrigen Frequenzbereich, während sich Anschlussprobleme im sehr hohen Frequenzbereich über 1 MHz zeigen [1]. Die Erfahrung zeigt, dass verschiedene Faktoren hinsichtlich dem Prüfaufbau, wie z. B. die Empfehlung möglichst kurze Erdungsbänder zu verwenden, bei Nichteinhaltung Auswirkungen auf die Übertragungsfunktion selbst bei 500 kHz haben können. Allerdings ist es schwierig, eine allgemeingültige Tabelle zu erstellen, aus der die Wechselbeziehung von Frequenzbereich und Transformator-Eigenschaften hervorgeht. Es gibt einfach zu viele Faktoren, die den Frequenzbereich beeinflussen (z. B. MVA-Bemessungsdaten, Wicklungstyp, Spannungslevel usw.). Grundlegende Bezugswerte findet man in der CIGRE-Broschüre. Es können unterschiedliche Analysewerkzeuge basierend auf mathematischen Indizes [5] oder Kennlinienänderungen in den gemessenen Kurven verwendet werden [6].

Für jede Analyse benötigt man einen Fingerabdruck bzw. Referenzmessung. Sofern verfügbar, sollte immer ein Vergleich mit einer früheren Messung desselben Transformators mit derselben Konfiguration durchgeführt werden [7], d. h. ein sogenannter zeitbasierter Vergleich. Diese Referenzmessung kann zum Beispiel während Inbetriebnahmeprüfungen oder detaillierten Prüfungen vor Ort durchgeführt werden. Liegt keine Referenzmessung von diesem Transformator vor, kann die Übertragungsfunktion alternativ mit der eines baugleichen Transformators verglichen werden. Baugleiche Betriebsmittel haben eine sehr ähnliche, aber nicht identische Übertragungsfunktion, siehe Abbildung 3. Deshalb sind kleine Abweichungen akzeptabel und deuten nicht zwangsläufig auf ein Problem hin.

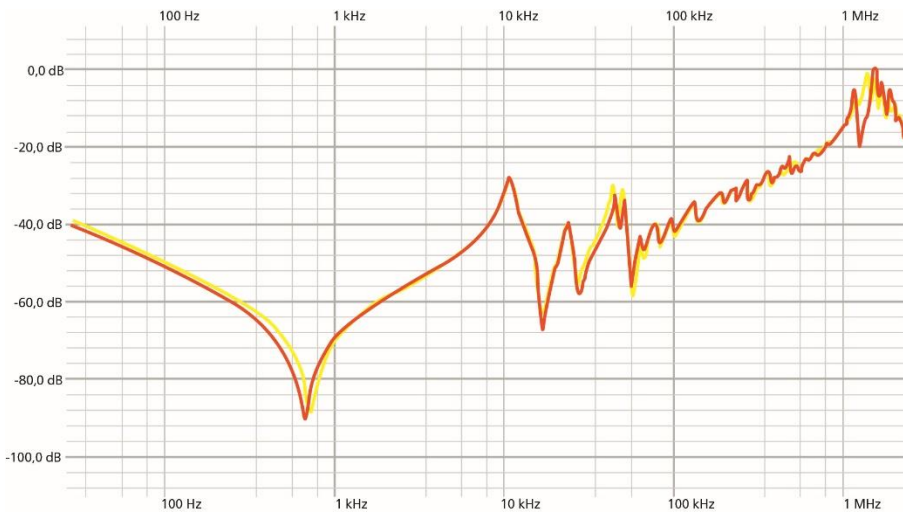


Abbildung 3: Gemessene Übertragungsfunktion in einer Leerlaufprüfung an baugleichen Transformatoren (200 MVA, 230 kV, Scheibenwicklung)

Für den Fall, dass auch keine Messkurven baugleicher Transformatoren vorliegen, können Phasenvergleiche durchgeführt werden. Ein guter Vergleich ist nur für ein symmetrisches Design möglich, was bei gängigen Designs nicht wirklich gegeben ist. Auch größere Abweichungen können durch bauliche Unterschiede zwischen den Phasen bedingt sein, weswegen für Phasenvergleiche das größte Maß an Erfahrung erforderlich ist. Typischerweise liegt die größte Abweichung an der mittleren Phase vor, während sich die anderen beiden Phasen mit angemessener Ähnlichkeit überlagern. Die Hauptabweichungen zwischen der mittleren Phase und den Außenphasen treten üblicherweise bei niedrigeren Frequenzen auf. Sie werden hauptsächlich vom Kern aufgrund dessen unterschiedlichen Flussverläufen beeinflusst.

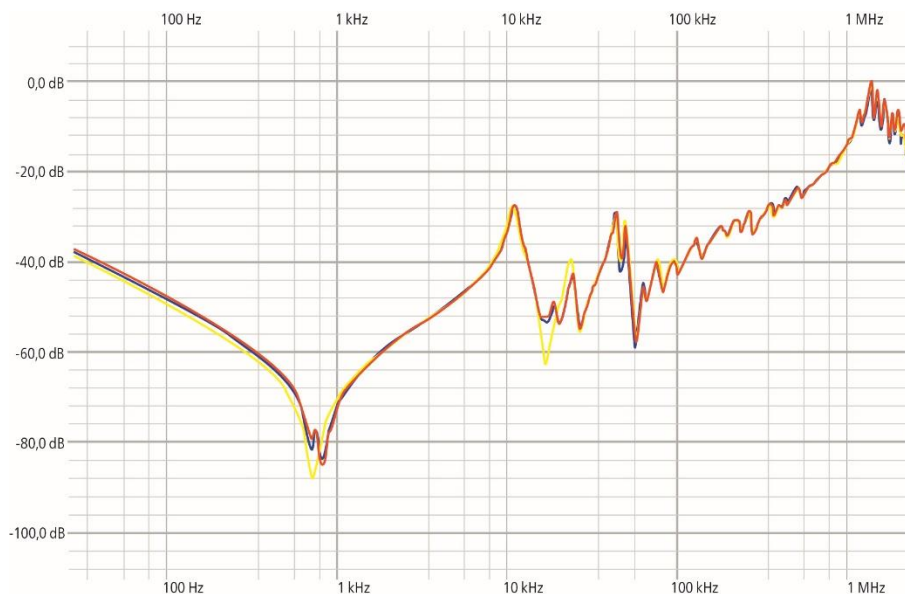


Abbildung 4: Vergleich der Messkurven, gemessen an drei Phasen desselben Transformators (200 MVA, 230 kV, Scheibenwicklung)

3 Relevanz der Anschlusstechnik

Die SFRA-Messung ist ein sehr sensibles Verfahren, das für die Erfassung selbst kleinster Änderungen im elektrischen Netzwerk eines Leistungstransformators eingesetzt wird. Der Vorteil dieser hohen Sensitivität kann manchmal auch einen Nachteil für die Wiederholbarkeit und Störempfindlichkeit darstellen. Deshalb ist die Anschlusstechnik für das Erreichen einer hohen Reproduzierbarkeit, insbesondere im hochfrequenten Bereich über 500 kHz [1], von großer Bedeutung [9].

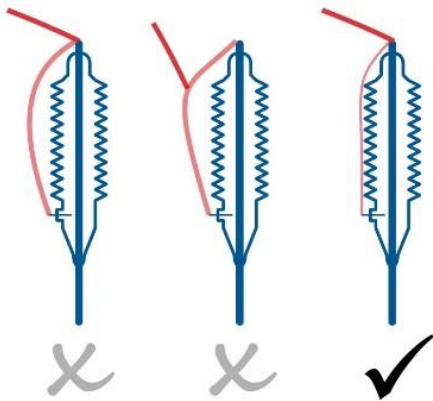


Abbildung 5: Darstellung des empfohlenen Prüfaufbaus gemäß IEC 60076-18



Abbildung 6: Beispiel für den Anschluss mit möglichst kurzen Erdungsbändern – Messkabel (in Schwarz) werden an die Durchführungsklemme sowie das Erdungsband an den Anschluss und Durchführungsflansch angeschlossen

Die IEC 60076-18-Norm beschreibt detailliert die empfohlene Vorgehensweise für einen ordnungsgemäßen und reproduzierbaren Prüfaufbau (Abbildung 5). Es wird empfohlen, zweifach geschirmte Koaxialkabel zu benutzen, die an die Durchführungsklemme angeschlossen werden. Von diesem Anschluss sollte eine niederinduktive Erdverbindung zum Flansch oder Kessel erstellt werden. Verwendet werden sollten hierfür vorzugsweise flache, breite Aluminiumbänder und kein einfacher Draht. Wie in [9] erklärt, haben die Aluminiumbänder eine breite Oberfläche, eine niedrige Induktivität und die geflochtene Struktur reduziert den Skin-Effekt ab 80 kHz erheblich. Damit bieten Aluminiumbänder eine bessere Leitfähigkeit bei hohen Frequenzen, was verglichen zu einfachen Drähten wiederum zu einer besseren Störunterdrückung gegen Erde führt.

Die Länge der Erdung hat ebenfalls Auswirkungen auf die Übertragungsfunktion. Für eine hohe Reproduzierbarkeit wird empfohlen, die kürzestmögliche Länge zu verwenden, indem die Aluminiumbänder eng an der Durchführung entlang wie in Abbildung 6 geführt werden.

Neben der eigentlichen Anschlusstechnik muss ein guter elektrischer Kontakt zwischen dem Anschluss bzw. Flansch und der verwendeten Messklemme hergestellt werden. Um den Kontaktwiderstand auf Minimum zu reduzieren hilft es, den Anschlusspunkt zu reinigen und Lackschichten zu entfernen. Moderne SFRA-Geräte bieten eine Erdschleifenprüfung, mit der gute Verbindungen mit niedrigem Kontaktwiderstand gegen Erde sichergestellt werden können.

4 Einflussfaktoren für die Übertragungsfunktion

Wie eingangs beschrieben, ist es für ein vergleichendes Verfahren wie der SFRA-Prüfung entscheidend, Einflussfaktoren für den Prüfaufbau oder externe Faktoren sicher auszuschließen. Diese Einflussfaktoren werden nachfolgend im Detail beschrieben. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass als SFRA-Prüfgerät OMICRONs FRANEO 800 für die beschriebenen Fallstudien eingesetzt und eine Leerlaufmessung an unterschiedlichen Betriebsmitteln durchgeführt wurde.

4.1 Einflussfaktoren des Prüfaufbaus

Kurzschließen und Erden von Tertiärwicklungen und getrennten Sternpunktanschlüssen

Der Messtyp „Leerlauf“ oder „Kurzschluss“ bestimmt, ob die Anschlüsse des gegenüberliegenden Spannungslevels kurzgeschlossen werden müssen oder nicht. Das heißt, bei der Messung der Oberspannungsseite (OS) leitet sich daraus ab, ob die Anschlüsse auf Unterspannungsseite (US) kurzgeschlossen werden müssen oder nicht.

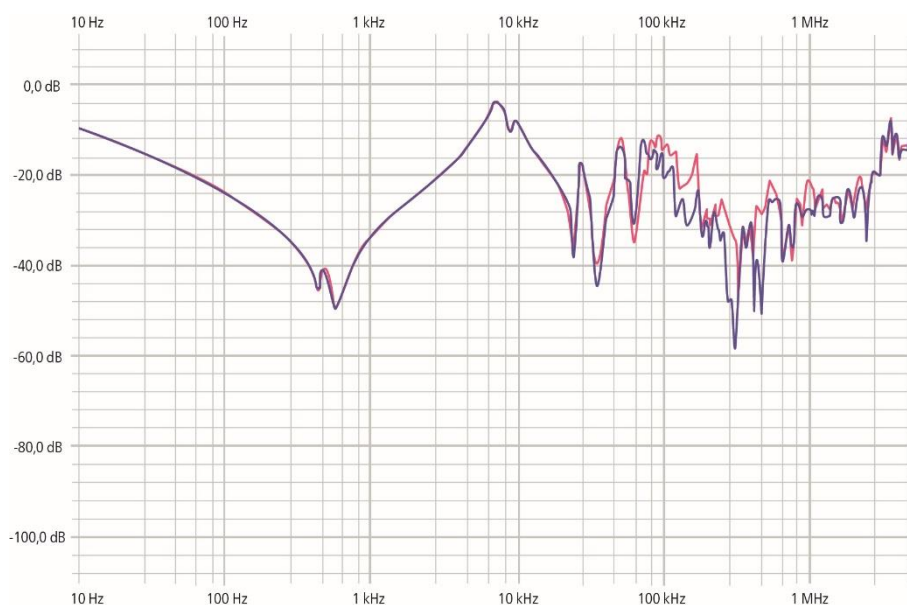


Abbildung 7: Einfluss der geerdeten (blau) und nicht geerdeten (rot) Tertiärwicklung an gemessenen US-Leerlaufkurven

Der Messtyp liefert keine Informationen darüber, wie mit den Sternpunktanschlüssen oder Tertiärwicklungen, die die gemessene Übertragungsfunktion ebenfalls stark beeinflussen, verfahren werden muss. Dazu gehören potentialfreie, geschlossene und geerdete Tertiärwicklungen, die zur Kompensation von Schiefasten im Netz eingesetzt werden. Abbildung 7 zeigt die Abweichungen zwischen den beiden Leerlaufmessungen an den US-Wicklungen mit geerdeter und nicht-geerdeter Tertiärwicklung. Die gemessene Übertragungsfunktion zeigt dabei unterschiedliche Abweichungen, insbesondere im Bereich der mutualen Kopplung (d.h. im Bereich, worin sich die Wicklungen gegenseitig beeinflussen). Grundsätzlich bleibt die Übertragungsfunktion von der Magnetisierungsinduktivität und der parallelen Kapazität unberührt. Deshalb wird empfohlen, alle übrigen Anschlüsse offen zu lassen und nicht zu erden, wie in der IEEE- und IEC-Norm beschrieben [3].

Messrichtung

Die Messrichtung, d. h. im Falle von sterngeschalteten Leistungstransformatoren von Phase zu Sternpunkt oder von Sternpunkt zu Phase, beeinflusst das hochfrequente Verhalten wesentlich – Abbildung 8 zeigt dies deutlich. Sofern nicht anders angegeben wird daher empfohlen, die Quelle und Referenzmesskanal an der Phasenklemme und den Messkanal an den Sternpunkt anzuschließen[3], [4].

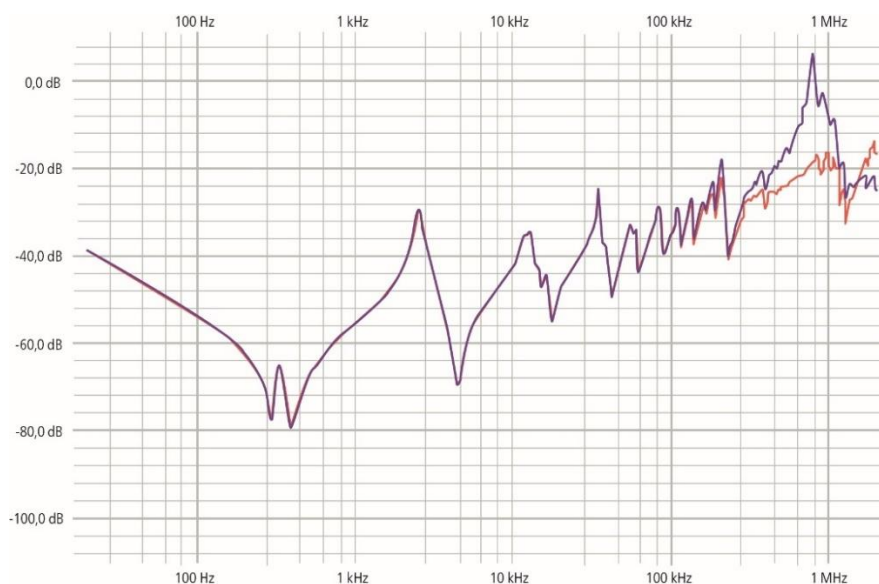


Abbildung 8: Einfluss der Messrichtung, Quelle zu Phase (blau) und Quelle zu Sternpunkt (rot)

Ausgangsspannung

Im niederfrequenten Bereich wird die Übertragungsfunktion durch die Magnetisierungsinduktivität des Kerns dominiert und hängt somit von der Ausgangsspannung des Prüfgeräts gemäß Abbildung 9 ab. Der restliche Verlauf der Messkurve wird nicht von der Ausgangsspannung beeinflusst, da die Transformatorwicklungen als lineares System betrachtet werden können und somit grundsätzlich unabhängig von der Ausgangsspannung sind.

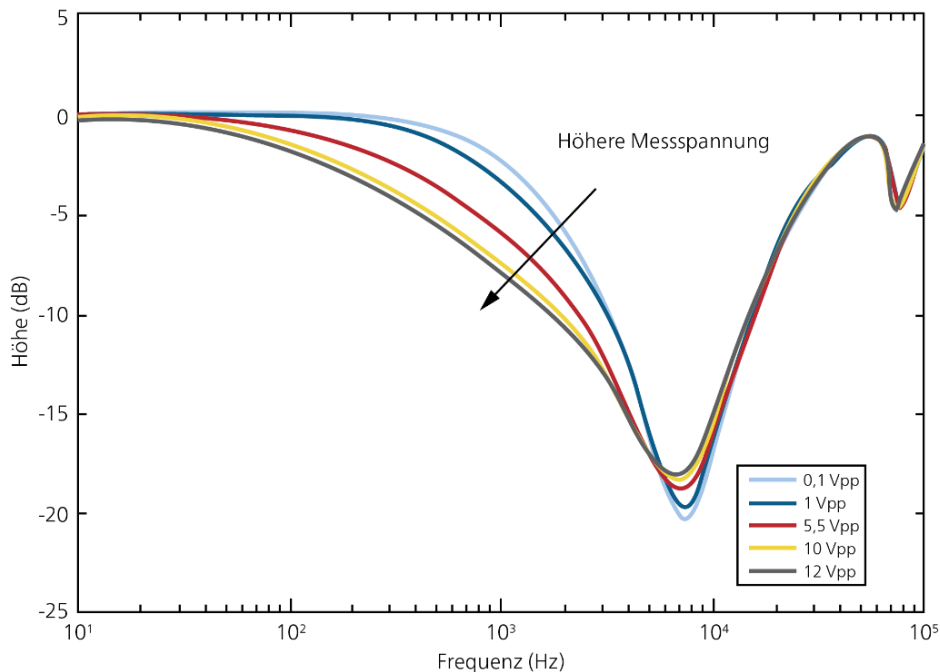


Abbildung 9: Einfluss der gewählten Ausgangsspannungen; Einfluss unterschiedlicher Ausgangsspannungen auf die Magnetisierungsinduktivität L_m

Erdungs- und Messverbindungen

In der IEC 60076-18-Norm werden unterschiedliche Vorgehensweisen für das Anschließen von Mess- und Erdungsverbindungen beschrieben [4]. Das gängigste Verfahren ist der Einsatz speziell entwickelter Messklemmen, die das zweifach geschirmte BNC-Kabel mit der Messklemme verbindet, und von Aluminiumbändern zur Erdung des Schirms zwischen der Klemme und dem Durchführungsflansch.

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, reduziert ein Aluminiumband anstelle eines einfachen Drahts Störeinflüsse erheblich, insbesondere im Bereich der Netzfrequenz und deren Harmonischen. Darüber hinaus ist die Länge der Erdungsverbindung für den nieder- und hochfrequenten Bereich von entscheidender Bedeutung, siehe Abbildung 10. Bei Verwendung von Verbindungen mit fester Länge beeinflusst die Verbindungsposition die Übertragungsfunktion. Flexibel anpassbare Erdungsverbindungen getreu dem Prinzip der kürzestmöglichen Verbindung zu Erde bieten daher das höchste Maß an Reproduzierbarkeit.



Abbildung 10: Einfluss unterschiedlicher Anschlussstechniken; geringster Störeinfluss und höchste Wiederholbarkeit mit kürzestmöglichem Erdungsband (blau), Drahtverbindung (grün) und Erdungsband mit größerer Schleife (rot)

Stufenschalterposition und Durchführungen

In Übereinstimmung mit den geltenden Normen müssen SFRA-Prüfungen mit derselben Transformatorkonfiguration, einschließlich Durchführungen und Stufenschalterposition, durchgeführt werden. Manchmal werden im Rahmen der Werkabnahmeprüfungen Prüfdurchführungen verwendet und die endgültigen Durchführungen erst vor Ort montiert. Vergleicht man dann die im Werk gemessene Übertragungsfunktion mit der vor Ort gemessenen Übertragungsfunktion, treten Abweichungen typischerweise im hochfrequenten Bereich auf. Eine Änderung der Stufenschalterposition führt zu kontinuierlichen Änderungen des Kurvenverlaufs über einen breiten Frequenzbereich, siehe Abbildung 11. Es wird daher empfohlen, Messungen für jede relevante Phase an der niedrigsten, höchsten und mittleren Position des Stufenschalters durchzuführen und dabei kontinuierlich immer in Richtung der niedrigeren Spannungen zu schalten [3], [4].

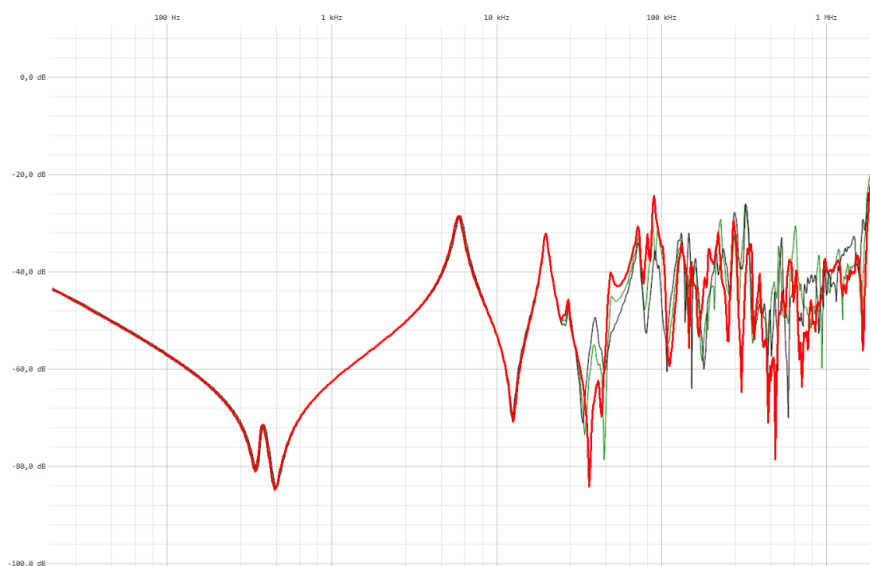


Abbildung 11: Einfluss der Stufenschalterposition (Stufe 1: rot, Stufe 2: grün, Stufe 3: schwarz) auf die Frequenzantwort eines Leistungstransformators.

Kontakt zwischen der Durchführungsklemme und der Erdungsverbindung

Einer der typischsten Anschlussfehler ist ein ungewollter Kontakt zwischen der Erdungsverbindung und der Durchführungsklemme. Ein solcher Fehler beeinflusst die Übertragungsfunktion hauptsächlich in den höheren Frequenzen, siehe Abbildung 12. Zur Vermeidung dieses Kurzschlusses wird empfohlen, eine isolierende Abdeckung für die Aluminiumbänder zu verwenden.

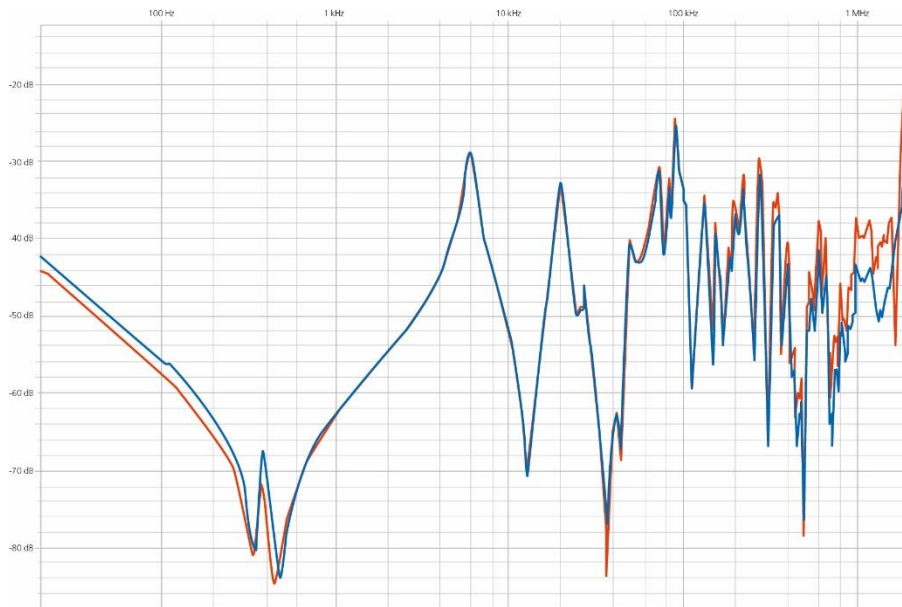


Abbildung 12: Frequenzantwort gemessen an der OS-Seite in einer Leerlaufprüfung; richtig angeschlossen (rot) und kurzgeschlossen zwischen Anschluss und Erde an der Referenz (blau)

4.2 Sonstige Einflussfaktoren

Restmagnetismus

Der Restmagnetismus ist ein häufig auftretendes Phänomen, das durch vorangegangene Messungen verursacht wird, z. B. durch die Messung des Wicklungswiderstandes mittels einer Gleichstromquelle. Eine Entmagnetisierung des Kerns vor Durchführung von SFRA-Prüfungen kann diesen Einfluss verhindern. Der Einfluss zeigt sich insbesondere im sehr niederfrequenten Bereich gemäß Abbildung 13, wo sich die Kernresonanz nach rechts verschoben hat. Die anderen Abschnitte der SFRA-Kurve sind von diesem Phänomen nicht betroffen. Deshalb kann der Restmagnetismus einfach identifiziert werden und hat gewöhnlicherweise keinen Einfluss auf die weitere Analyse.

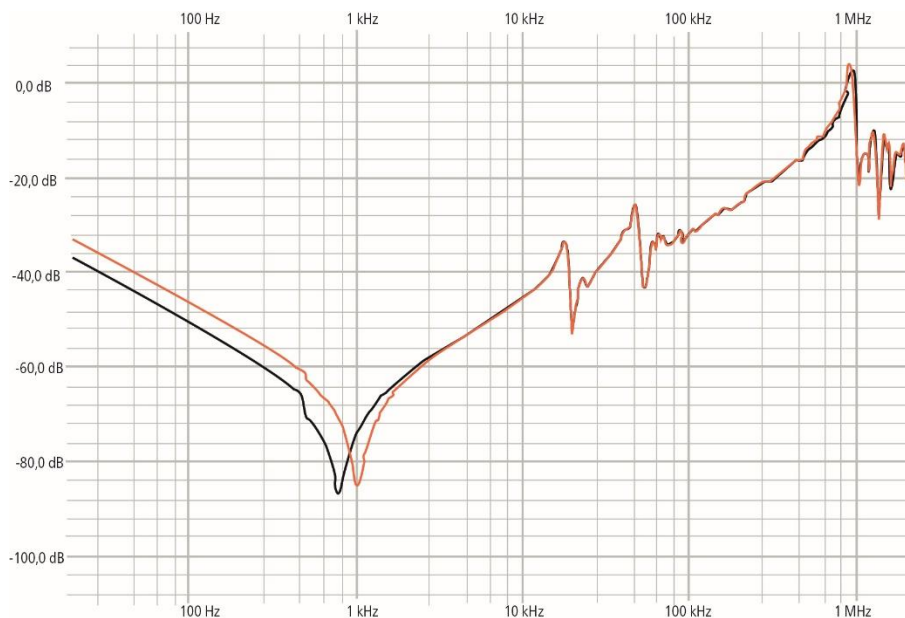


Abbildung 13: Übertragungsfunktion eines Leistungstransformators in einer Leerlaufprüfung vor (rot) und nach (schwarz) der Entmagnetisierung.

Isolierflüssigkeit

Ein Leistungstransformator sollte immer mit derselben Konfiguration wie vor Ort gemessen werden. Dazu gehört auch die Isolierflüssigkeit, da sie die Übertragungsfunktion erheblich beeinflusst. Beim Vergleich von SFRA-Messungen eines ungefüllten und ölgefüllten Leistungstransformators, wie in Abbildung 14 gezeigt, kann eine systematische Verschiebung der charakteristischen Frequenzen beobachtet werden. Dies wird durch die unterschiedlichen Dielektrika (Luft/Gas mit $\epsilon_{r,\text{Gas}} = 1$ und Öl mit $\epsilon_{r,\text{Öl}} = 2,2$) verursacht und entspricht in etwa dem theoretischen Wert, der aus der Quadratwurzel der relativen Permittivität von Mineralöl berechnet werden kann [11].

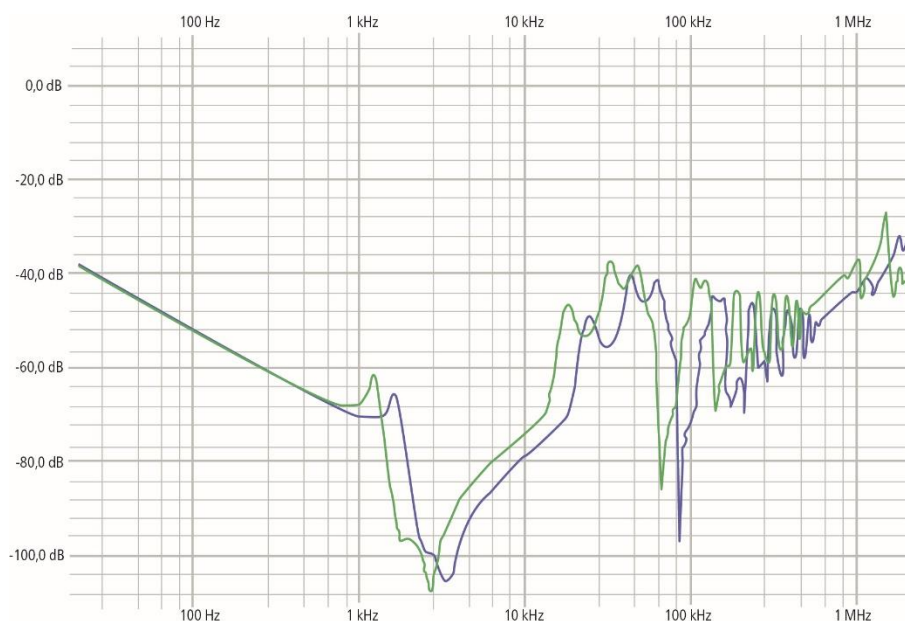


Abbildung 14: Gemessene OS-Spuren mit ölgefülltem (grün) und ungefülltem (blau) Kessel

Temperatur

Umgebungsbedingungen, wie z. B. die Temperatur, können die gemessenen Übertragungsfunktion beeinflussen. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die thermischen Koeffizienten für die Verschiebung der Resonanzpunkte mit der Temperatur sehr klein sind [12]. Folglich kann die Verschiebung im typischen Temperaturbereich zwischen 15 °C (59 °F) und 70 °C (185 °F) vernachlässigt werden.

Fazit

Im Artikel wurde auf die Bedeutung einer geeigneten Anschlusstechnik verwiesen, zusätzlich wurden die Vorteile der in der IEC 60076-18-Norm vorgeschlagenen Anschlusstechnik im Vergleich zu anderen Techniken erläutert. Die Verwendung von Erdungsbändern anstelle einfacher Drähte reduziert den Einfluss von schmalbandigen Störern rund um Netzfrequenz und deren Harmonischen, und erhöht außerdem die Reproduzierbarkeit, insbesondere im hochfrequenten Bereich über 500 kHz

Es wurden außerdem die verschiedenen Einflussfaktoren für die Übertragungsfunktion aufgeführt und anhand von Beispielen deren Auswirkungen auf den Kurvenverlauf gezeigt und erläutert. Einflussfaktoren sind zum Beispiel der Prüfaufbau, wie Kurzschließen oder Erden von Tertiärwicklungen, die Messrichtung, Ausgangsspannung, Anschlusstechnik oder Stufenschalterposition. Zuletzt wurden weitere Einflussfaktoren und deren Auswirkungen vorgestellt wie Restmagnetismus, die Abhängigkeit von der Isolierflüssigkeit sowie von Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Literaturverzeichnis

- [1] Cigré WG A2/26, „Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)“, Brochure 342, Paris 2008
- [2] 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.
- [3] IEEE Std C57.149, „IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers“, 2013
- [4] IEC 60076-18 „Leistungstransformatoren – Teil 18: Messung des Frequenzübertragungsverhaltens“, 2012
- [5] NCEPRI, „Application Guideline for Transformer Winding Distortion Test Technology“, China 1999
- [6] Cigré WG A2/26, „Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)“, Electra N°228, Paris 2006
- [7] 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, S. 214 - 220.
- [8] Juan L. Velásquez, et al., „Noise in FRA Measurements: Sources, Effects and Suppression,“ OMICRON DMPT Workshop 2009.
- [9] 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, Universität Ljubljana, Ljubljana, Slowenien, 27. - 31. August 2007.
- [10] R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, M. Michael Krüger: „Richtlinien für den Messaufbau für eine hohe Reproduzierbarkeit der FRA-Messergebnisse“, ETG Fachtagung Diagnostik elektrotechnischer Betriebsmittel, Kassel, Deutschland, 19. - 20. September 2006
- [11] J. Christian, R. Wimmer: „Comparability of transfer function results“, European Transactions on Electrical Power 2006, issue 16, Seiten 137 - 146
- [12] R. Wimmer, K. Feser, J. Christian: „Reproducibility of Transfer Function Results“, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Niederlande, 25. - 29. August 2003

Biografien



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.



Prof. Dr. Stephanie Uhrig (geborene Ratzke) ist Professorin für Energietechnik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften München. Von 2010 bis 2017 war sie Produktmanagerin für OMICRON electronics, Österreich, wo sie sich auf die Messung der dielektrischen Eigenschaften und die Analyse der Übertragungsfunktion spezialisierte. Ihre Abschlüsse als Dipl.-Ing. und Dr.-Ing. erhielt sie 2003 und 2009 von der Technischen Universität München (TUM), Deutschland.

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 160 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.