

FRA – Ein neuer Standard zur Wicklungsdiagnose

Maximilian Heindl
Universität Stuttgart
heindl@ieh.uni-stuttgart.de
Germany

René Wimmer, Jochen Christian
Siemens AG
rene_martin.wimmer@siemens.com
Germany

KURZFASSUNG

Hohe Ströme infolge von Kurzschlüssen verursachen hohe mechanische Kräfte in Transformatorwicklungen und können Verformungen und Verschiebungen der Wicklung hervorrufen. Wicklungsschäden führen nicht unbedingt zu einem sofortigen Ausfall eines Transformators, jedoch wird sein Ausfallrisiko durch eine Vorschädigung beträchtlich erhöht. Neben der Messung der Kurzschlussspannung als einzige bisher per Norm anerkannte Prüfmethode zur Detektion von Wicklungsschäden hat die Messung und der Vergleich der frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen (Frequency Response Analysis, FRA) in zunehmendem Maße an Bedeutung gewonnen.

Auf Grund der Tatsache, dass kleine mechanische Wicklungsschäden keine erheblichen Veränderungen des Kurvenverlaufs der FRA ergeben, ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der FRA als Diagnoseverfahren. Der Einfluss des Messaufbaus auf das Messergebnis ist unvermeidlich und betrifft die Zeit- und Frequenzbereichsmessung in gleichem Maße. Reproduzierbare Messungen können durch die Verwendung von geschirmten Leitungen und eines geeigneten Erdungskonzepts gewährleistet werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der FRA hinsichtlich ihrer Interpretation. Bisher existieren nur wenige Ansätze zur objektiven Beurteilung von Frequenzgang-Messungen. Der Schlüssel zur objektiven Beurteilung einer Veränderung der Übertragungsfunktion wird darin gesehen, dass der Zusammenhang zwischen den physikalischen Effekten verursacht durch mechanische und elektrische Veränderungen an Wicklungen und dem Kurvenverlauf des Frequenzgangs hergestellt werden muss.

Zukünftig könnten FRA-Messungen dabei helfen, Hochfrequenz-Modelle von Großtransformatoren zu erstellen, die zur Simulation transienter Vorgänge in Hochspannungsnetzen eingesetzt werden können.

1 EINLEITUNG

Nach der derzeit gültigen Norm ist die Messung der relativen Kurzschlussspannung (U_K -Messung) die einzig anerkannte Methode, die zur Detektion von Wicklungsschäden herangezogen werden kann. In der Vergangenheit hat sich jedoch gezeigt, dass die U_K -Messung eine nur unzureichende Sensibilität gegenüber mechanischen Wicklungsverwerfungen besitzt, weshalb der Vergleich der frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen (Frequency Response Analysis, FRA) in zunehmendem Maße an Bedeutung gewonnen hat.

Das elektrische Übertragungsverhalten eines Transformators wird durch ein komplexes Netzwerk bestehend aus dem ohmschen Widerstand, der Eigen- und der Selbstinduktivität der Wicklungen sowie den Kapazitäten zwischen Wicklungen, Kern und Kessel, bestimmt. Er kann als passives, kausales, zeitinvariantes und im interessierenden Wertebereich lineares System und daher bezüglich zweier massebezogener Klemmen als elektrischer Vierpol betrachtet werden. Abbildung 1 zeigt die Darstellung eines Transformators als Mehrtor-Netzwerk.

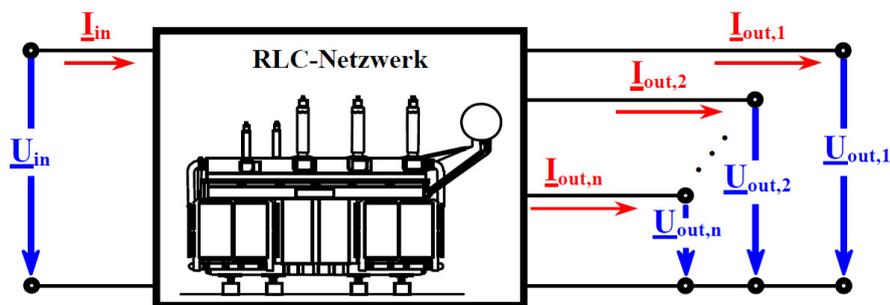


Abbildung 1: Leistungstransformator als Vielpol-Netzwerk

Die Zustandsbeurteilung der Wicklung erfolgt bei der FRA durch einen Vergleich mit einer Referenzkurve (meistens die Spannungsübertragungsfunktion $\underline{U}_{out,i}(f)/\underline{U}_{out,in}(f)$), die idealerweise vor der ersten Inbetriebnahme des Transformators gemessen werden sollte. Auf Grund der Tatsache, dass kleine mechanische Wicklungsschäden keine erheblichen Veränderungen der Frequenzgangkurve ergeben, ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eine essentielle Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der FRA als Diagnoseverfahren.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über messtechnische Verfahren und erläutert die Anforderungen an die Messtechnik, um reproduzierbar Messungen der Übertragungsfunktion zu gewährleisten. Im Weiteren werden Ansätze zur Interpretation von FRA-Messungen dargelegt.

2 MESSTECHNISCHE VERFAHREN UND ANFORDERUNGEN

Grundsätzlich existieren zwei verschiedene Messmethoden für die Ermittlung der Übertragungsfunktion:

1. Die Übertragungsfunktionsmessung im Frequenzbereich (Sweep FRA oder SFRA)
2. Die Übertragungsfunktionsmessung im Zeitbereich (Impulse FRA oder IFRA)

Bei der IFRA wird der Transformator mit einer breitbandigen Impulsspannung angeregt. Entsprechend der Impulsantwort des Transformators ist am Ausgang ein Antwortsignal zu messen. Beide Signale werden zeitsimultan mit einem Transientenrekorder erfasst und unter Verwendung der FFT (Fast Fourier Transformation) numerisch in den Frequenzbereich transformiert. Nach Fensterung der aufgenommenen Signale und die anschließende Quotientenbildung zwischen dem fouriertransformierten Ausgangs- und Eingangssignal wird die Übertragungsfunktion berechnet. Sowohl die Signalerfassung als auch die -verarbeitung bestehen aus mehreren Schritten und bieten dabei zahlreiche Variationen wie Auflösung der Analog-Digital-Wandler, verwendete Filter, Aufnahmedauer, Abtastrate, Fenster-

funktion etc. Dies hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis der FRA. Voraussetzung für reproduzierbare Messungen ist deshalb, dass alle Schritte zur Übertragungsfunktionsbestimmung gleich ausgeführt werden. Ein Nachteil der Zeitbereichsmessung ist, dass das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-noise ratio, SNR) mit ansteigender Frequenz sinkt. Dies ist natürlicherweise in der Signalform des Anregungsimpulses begründet, welche, betrachtet man seine Fouriertransformierte, mit zunehmender Frequenz monoton immer weniger Signalenergie enthält. Kompensiert werden kann die Rauschproblematik mit der Methode der arithmetischen Mittelung über viele einzelne Messergebnisse. Hierbei steigt jedoch die Komplexität und der Berechnungsaufwand und damit die Gefahr von Fehlerquellen weiter an.

In den letzten Jahren hat sich die SFRA deshalb immer weiter durchgesetzt. Bei diesem Verfahren wird die Übertragungsfunktion direkt im Frequenzbereich nach dem Prinzip eines Netzwerkanalysators gemessen (Abbildung 2). Die Anregung des Transformators mit einem sinusförmigen Signal ruft ein ebenfalls sinusförmiges Antwortsignal hervor. Die beiden Signale unterscheiden sich jedoch in Amplitudenhöhe und Phasenlage. Das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung zwischen Aus- und Eingangssignal ergeben den Wert der Betrags- und Phasenfunktion bei der entsprechenden Frequenz. Durch Anregung des Transformators mit einer Signalquelle variabler Frequenz kann die frequenzabhängige Übertragungsfunktion auf diese Weise nach Betrag und Phase ermittelt werden.

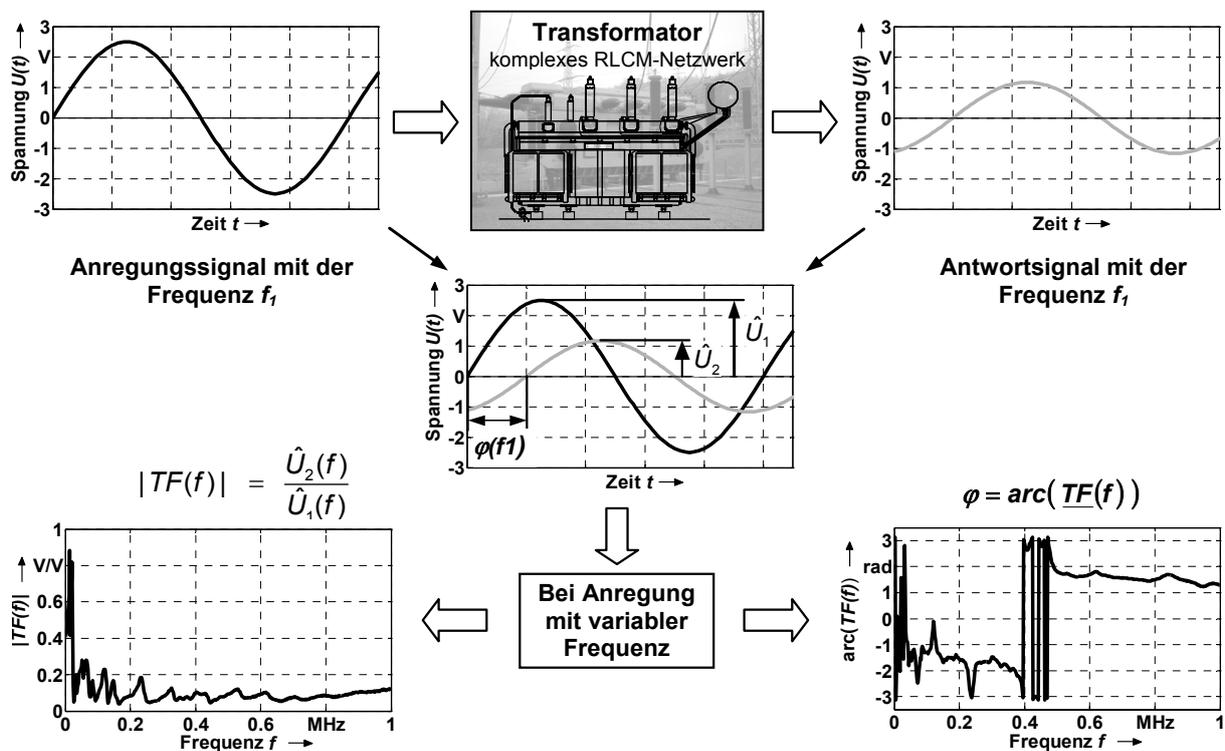


Abbildung 2: Prinzip der Übertragungsfunktionsbestimmung im Frequenzbereich

Die SFRA hat gegenüber der IFRA den Vorteil, dass die Anregung mit einer konstanten Amplitude über einen einstellbaren Frequenzbereich erfolgt. Damit erfolgt die Anregung über den betrachteten Frequenzbereich mit einem konstanten SNR und demzufolge nimmt die Genauigkeit der Signale mit zunehmender Frequenz nicht ab. Die Fehler, die bei der SFRA gemacht werden können, sind aufgrund der direkten Ermittlung der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich vergleichsweise gering. Freiheitsgrade bei der Messung sind im Wesentlichen die Anzahl von Frequenzpunkten im interessierenden Frequenzbereich, deren Verteilung (logarithmisch oder linear) sowie die gewählte Empfängerbandbreite des Messgeräts. Der Einfluss dieser Messparameter auf das Ergebnis der SFRA ist jedoch

weit geringer als bei der IFRA. Konkrete Empfehlungen aus Sicht des praktischen Anwenders für Anforderungen an die Messgeräte, die die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich betimmen, sind:

- Einstellbarer Frequenzbereich $< 50 \text{ Hz} \dots \geq 2 \text{ MHz}$
- Dynamikbereich $\leq -80 \text{ dB} \dots < 10 \text{ dB}$
- ≥ 1600 Frequenzpunkte im zu vermessenden Frequenzbereich
- Einstellbare Verteilung der Messpunkte
- Dynamische Empfängerbandbreite $\leq 30 \text{ Hz} \dots \geq 300 \text{ Hz}$
- Feste Terminierung der Messleitungen im Messgerät (50Ω -System)

Diese empfohlenen Werte sind nicht als harte Grenzwerte zu verstehen, geben jedoch eine Orientierung bezüglich der notwendigen Eigenschaften eines Messsystems. Beispielsweise wird ein Auflösungsvermögen von nur 800 logarithmisch verteilten Frequenzpunkten für einen Messbereich von 20 Hz bis 2 MHz als nicht ausreichend betrachtet. Die empfohlenen Anforderungen werden heute bereits von den meisten am Markt befindlichen Messgeräten erfüllt.

3 MESSKONZEPT FÜR REPRODUZIERBARE FRA-MESSUNGEN

Gemäß der Theorie darf sich das Übertragungsverhalten (und damit der Kurvenverlauf des Betrags- und Phasenfrequenzgangs) des Transformators nur dann ändern, wenn sich sein elektrisches Netzwerk aufgrund eines Schadens an der Leitungsführung, Wicklung, am Kern oder am Stufenschalter ändert. Bei der Bestimmung der Übertragungsfunktion wird allerdings das gesamte elektrisch wirksame Netzwerk ab dem Signalaufzeichnungsgerät erfasst. Somit wird nicht nur das Frequenzverhalten des Transformators, sondern auch das Frequenzverhalten des Messaufbaus erfasst [1]. Deshalb sind die vom Messaufbau hervorgerufenen Einflüsse gering und vor allem konstant zu halten. Hierbei werden speziell an Anschlusstechnik, Leitungen und Erdungskonzept bestimmte Anforderungen gestellt, um eine hohe Reproduzierbarkeit der Frequenzgangmessung zu gewährleisten. Die Störempfindlichkeit und die Beeinflussung des Messergebnisses durch den Messaufbau hängt stark vom verwendeten Erdungskonzept ab. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Frequenzgangmessungen nur dann von der geometrischen Anordnung der Leitung unabhängig werden, wenn die Schirme der Koaxialleitung am Prüfobjekt geerdet werden [2]. Abbildung 3 zeigt schematisch das für Messungen empfohlene Erdungskonzept. Die transformatorseitige Kontaktierung der Kabelschirme geschieht durch Erdungsbänder. Aufgrund der Feldverhältnisse in einem Umspannwerk sowie zum Schutz des Messgerätes sollte auf die zusätzliche Erdung am Messgerät nicht verzichtet und die Leitungsschirme daher beidseitig geerdet werden [2].

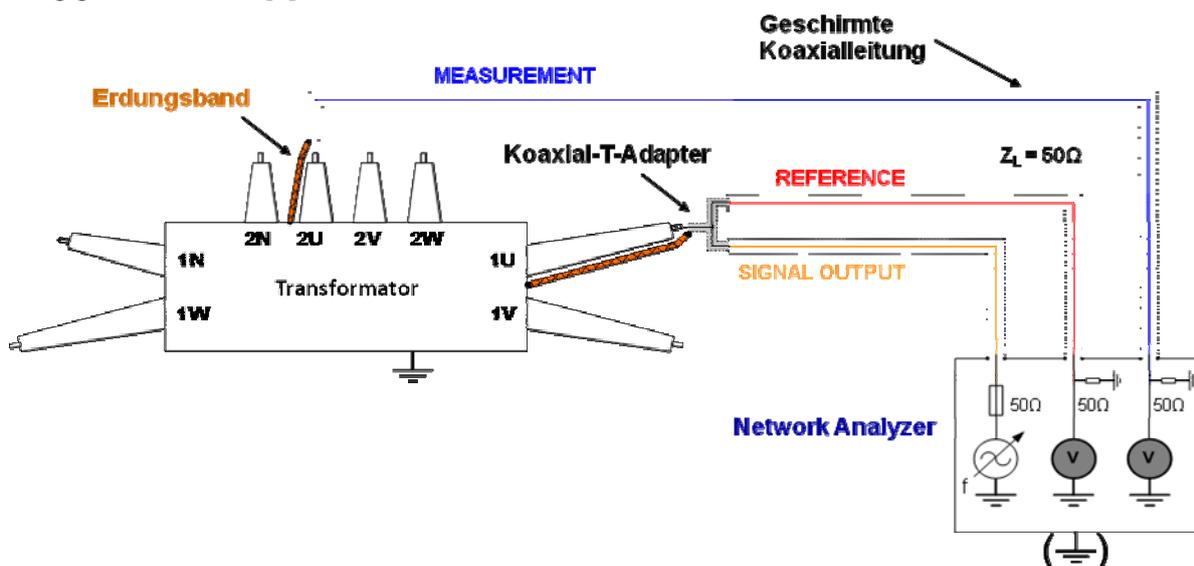


Abbildung 3: *Empfohlenes Erdungskonzept, Erdung der Kabelschirme (optional beidseitig). Bei der transformatorseitigen Schirmerdung kommen Erdungsbänder zum Einsatz.*

Der kritischste Punkt bei diesem Konzept ist die transformatorseitige Schirm-Erdung der Messleitungen. Die Distanz zwischen Transformator клемme und Transformator kessel, die je nach Länge der Hochspannungsdurchführung mehrere Meter betragen kann, ist für den bei der Messung relevanten Frequenzbereich bis 2 MHz möglichst niederohmig auszuführen. Insbesondere der Skin Effekt führt dazu, dass der Widerstand und die Induktivität der Erdungsleitung mit zunehmender Frequenz größer werden. Um den entgegenzuwirken sollten möglichst Erdungsleitungen mit großer Oberfläche eingesetzt werden. Diese Forderung werden bei der Verwendung breiter Erdungsbänder aus Kupfer- oder Aluminium-Geflecht erfüllt. Abbildung 4 zeigt zwei Beispiele für die transformatorseitige Anschluss-technik.

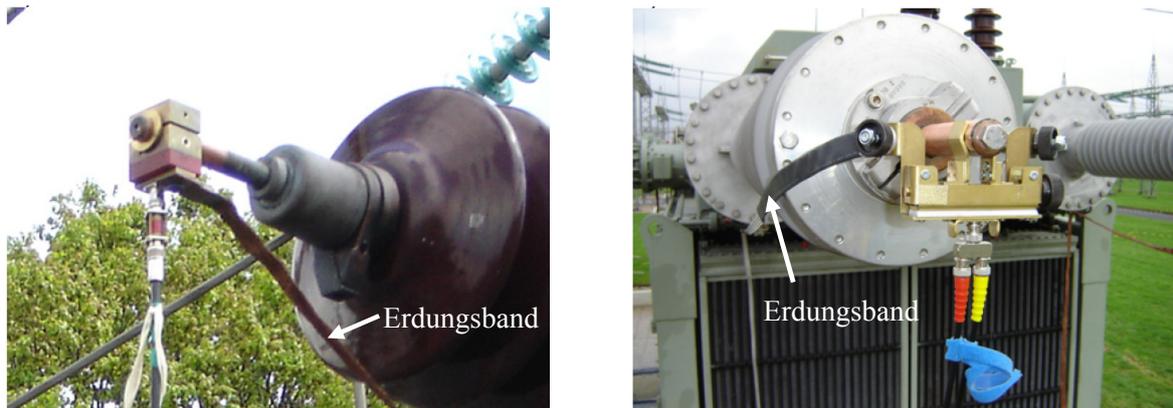


Abbildung 4: Anschluss-technik an Transformator клемmen;
 Links: Schraubbarer, massiver Messingadapter;
 Rechts: BNC-Klemmen-Adapter mit einstellbarer Bolzenumklammerung

Eine Empfehlung zur Führung der Erdungsverbindung vom Transformator-Kessel zur Anschluss- клемme zeigt Abbildung 5. Um Störeinkopplungen in den Messkreis zu minimieren und die Reproduzierbarkeit einer Messung zu gewährleisten, sollten Erdungsbänder straff in möglichst geringem Abstand entlang der Durchführung geführt werden. Damit wird der Flächeninhalt A minimiert, welcher proportional zur Empfindlichkeit gegenüber induktiv in den Messkreis einkoppelnden Störern ist [4],[5].

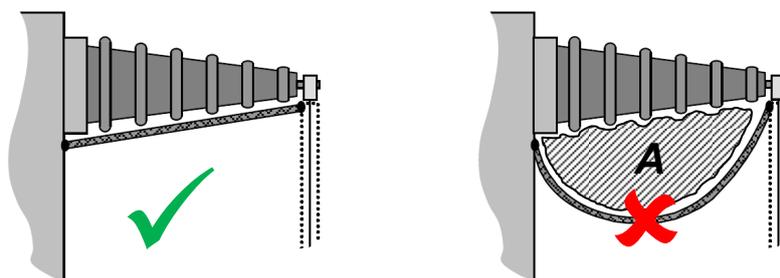


Abbildung 5: Führung der Erdungsbänder entlang von Durchführungen
 Links: Empfohlene Vorgehensweise
 Rechts: Zu vermeidende Vorgehensweise; Flächeninhalt A als Maß für die lokale Störempfindlichkeit des Messkreises

Die Auswirkungen unterschiedlicher Erdungsbandführungen auf die Reproduzierbarkeit wurden auf experimentellem Weg untersucht. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Veränderung der Übertragungsfunktion durch unterschiedliche Erdungsbandführungen. Erkennbar ist, dass sich die Empfindlichkeit der Übertragungsfunktion gegenüber der Anschlusstechnik im Frequenzbereich oberhalb 500 kHz auswirkt. Leitungsinduktivitäten und -kapazitäten der Messkabel führen zusammen mit der Transformatorimpedanz zu einer Verschiebung der Resonanzüberhöhung.

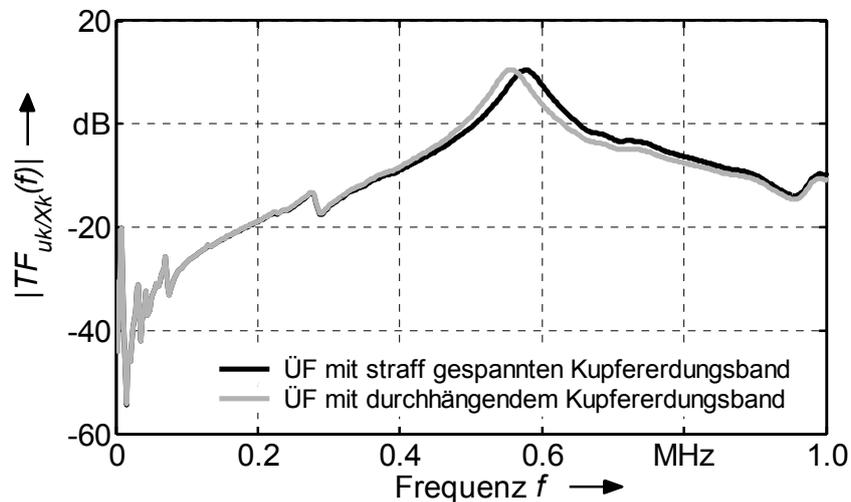


Abbildung 6: Einfluss der Erdungsbandführung auf die Spannungsübertragungsfunktion

Dieses Beispiel verdeutlicht anschaulich, dass die Beeinflussung des Messergebnisses durch den Messkreis selbst unvermeidlich ist und deshalb bei allen Wiederholungsmessungen konstant gehalten werden muss. Eine schlechte Reproduzierbarkeit bedingt durch die Messtechnik schadet der Glaubwürdigkeit der FRA als Diagnosemethode selbst, da Fehlinterpretationen möglich sind.

Der Einfluss der Kabellänge spielt bei Verwendung von Abschlusswiderständen entsprechend dem Wellenwiderstand der Messkabel (Empfehlung $Z_L = 50 \text{ Ohm}$) eine vernachlässigbare Rolle, siehe Abbildung 7.

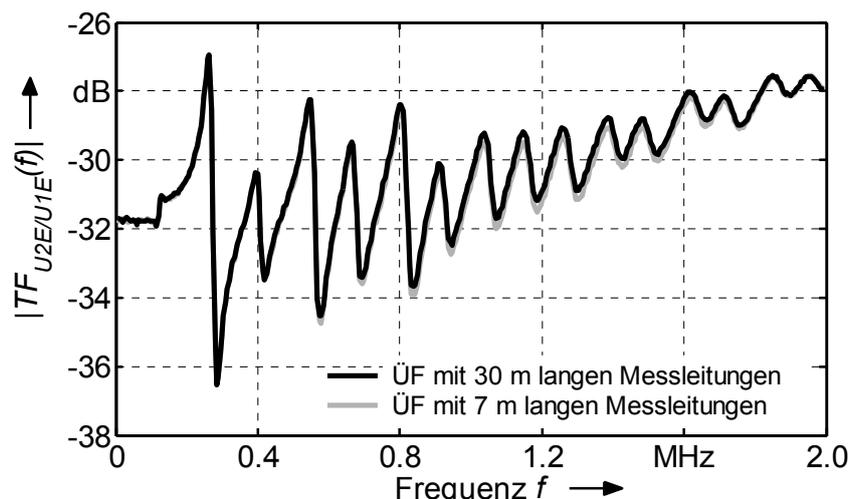


Abbildung 7: Einfluss der Kabellänge auf die Spannungs-Übertragungsfunktion bei angepasster Eingangsbeschaltung des Messgeräts (50 Ohm)

Unterschiede zwischen den Kurven bilden sich erst im Frequenzbereich oberhalb 800 kHz aus und sind selbst dort vergleichsweise gering.

4 INTERPRETATION VON FRA-MESSUNGEN

4.1 Frequenzganganalyse

Nach wie vor gibt es einigen Nachholbedarf bei der Interpretation von Abweichungen zwischen Übertragungsfunktionen. Ein visueller Vergleich der Kurven des Betragsfrequenzgangs $|TF(f)|$ durch Experten ist bisher Stand der Technik. Algorithmen zur automatisierten Interpretation sind nur in Ansätzen vorhanden [3]. Deren Anwendung in Verbindung mit gemessenen Daten aus der Praxis wirft jedoch Unzulänglichkeiten auf, womit bestätigt wird, dass die Interpretation durch Experten bisher noch nicht ersetzbar ist. Diese Einschätzung wurde abschließend durch die Cigré Working Group A2.26 bestätigt. In Ihrem abschließenden Bericht stellt die Working group weiter fest, dass zusätzlicher Bedarf an Forschung notwendig ist, bevor Empfehlungen für ein standardisiertes, objektives Vorgehen bei der Interpretation möglich sein wird [4].

Die Herausforderung an zukünftige Bewertungslogiken ist, die für Fehler charakteristischen Veränderungen der Frequenzgänge zu erfassen. In engeren Frequenzgrenzen gefasste Dämpfungsunterschiede, Verschiebungen von Resonanzen, Entstehen zusätzlicher Resonanzen oder deren Verschwinden in Bezug auf die Referenzkurve sind klare Anzeichen für elektrische oder mechanische Veränderungen am Aktivteil eines Transformators. Zukünftiges Ziel ist es, bestimmte Fehlertypen (Deformationen an Wicklungen, Kernschäden, Schäden an Ausleitungen) aufgrund charakteristischer Veränderungen von Transferfunktionen tatsächlich zu erkennen. Grundsätzlich existieren hierfür mehrere Möglichkeiten. Hierbei sind Methoden zu nennen, die eine Bewertung aufgrund der reinen Unterschiede zwischen einer Test- und einer Referenzkurve durchführen. Weitgehend unberücksichtigt bleibt hier die Art der Übertragungsfunktion sowie die dem Kurvenverlauf zugrundeliegenden physikalischen Gegebenheiten (Geometrie und elektrische Eigenschaften). Ein Beispiel für einen solchen Algorithmus ist der in der VR China eingesetzte Algorithmus nach Standard DL/T 911-2004 [5], welcher den Betragsfrequenzgang in drei Frequenzbereiche unterteilt und innerhalb jedes Abschnitts den Korrelationsfaktor zwischen Referenz- und Testkurve berechnet. Der Korrelationsfaktor ist eine integrale Maßzahl für die Ähnlichkeit zweier Kurven. Schwellenwerte entscheiden über die Beurteilung, ob ein Fehlerfall vorliegt oder nicht.

Ein weiterentwickelter Ansatz, der die Kurvenauswertung in Zusammenhang mit den physikalisch zugrundeliegenden Eigenschaften stellt, wird in Abbildung 8 gezeigt. Dargestellt ist ein typischer Kurvenverlauf des Betragsfrequenzgangs $|U_2/U_1|$, bei der am jeweiligen Ende einer OS-Wicklung das Antwortsignal gemessen wird. Der Frequenzgang ist an charakteristischen Frequenzstellen in mehrere Frequenzbänder unterteilt. Hierbei ist zu beachten, dass die dargestellten Bereichsgrenzen nicht als starr vorgegeben zu betrachten sind, sondern sie können je nach Transformator variieren.

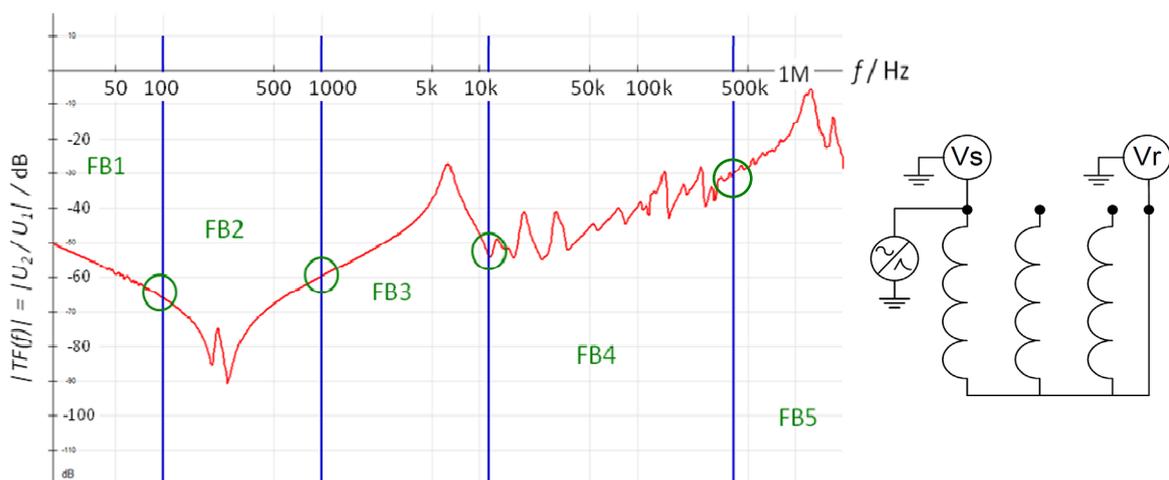


Abbildung 8: Typischer Verlauf der betragsmäßigen Spannungsübertragungsfunktion eines Großtransformators (OS-Wicklung in Sternschaltung) mit charakteristischen Frequenzbändern

In Abbildung 8 repräsentiert der Frequenzbereich FB1 das induktive Verhalten, welches durch die Hauptfeldinduktivität hervorgerufen wird, während die Resonanzen in den Bereichen FB2 und FB3 das Frequenzverhalten der Schwingkreise aus Streuinduktivität und Serien- bzw. Erdkapazität der Wicklungen widerspiegeln [7]. Die gegenseitige Kopplung einzelner Windungen sowie gesamter Wicklungsröhren wird in dem Frequenzbereich FB4 beschrieben. In FB5 werden sowohl die Kopplungen von FB4 als auch das Frequenzverhalten der Ausleitung und Messkabel dargestellt. Mit zunehmender Frequenz wirkt sich dabei der Frequenzgang der Ausleitung und des Messaufbaus immer stärker auf die Übertragungsfunktion des Gesamtsystems aus. Damit ist klar, dass die Auswirkungen des Kerns sich ausschließlich im Frequenzbereich unterhalb 10 kHz wieder finden lassen. So können unterschiedliche Magnetisierungszustände zu Veränderungen des Frequenzgangs in diesem Bereich führen. Allerdings ändert sich bei unterschiedlichen Magnetisierungszuständen nicht die grundsätzliche Kurvenform. Im Falle von Kernschäden ergeben sich gravierende Abweichungen in der Kurvenform und diese sind somit detektierbar [4]. Dies muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Erkenntnisse über die Empfindlichkeit der Spannungsübertragungsfunktion gegenüber bestimmten Wicklungsdeformationsarten im Frequenzbereich $> 10 \text{ kHz} \dots \approx 1 \text{ MHz}$ sind hauptsächlich durch einzelne experimentelle Untersuchungen oder Simulationen gewonnen worden. Inwieweit jedoch verschiedene Fehlerarten (Radiale Deformation, Tilting, Spiralling etc.) anhand der von ihnen verursachten Veränderungen im Frequenzgang unterscheidbar sind, ist Gegenstand der Forschung.

4.2 Weitergehende Anwendungsmöglichkeiten

Eine Anwendungsmöglichkeit, die über die Fehlerdetektion durch die FRA hinausgeht, soll durch die folgende Abbildung 9 verdeutlicht werden. Die durch die Messung der Übertragungsfunktion gewonnenen Daten können auf einfache Art und Weise dazu genutzt werden, die erdbezogene Impedanz des Transformators durch eine äquivalente elektrische Ersatzschaltung zu bestimmen.

Durch das „Vector Fitting“ genannte Verfahren [7] kann eine gemessene, numerisch vorliegende Übertragungsfunktion in ein analytisches Modell überführt werden [8]. Die Beschreibung der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich geschieht durch eine gebrochen-rationale Funktion. Im Ergebnis ist die Information der Resonanzcharakteristik der Transferfunktion mathematisch formuliert. Durch Aufspaltung der analytischen Funktion kann ein elektrisches lineares Netzwerk synthetisiert werden, welches in seinem elektrischen Verhalten identisch mit dem gemessenen Transformator ist.

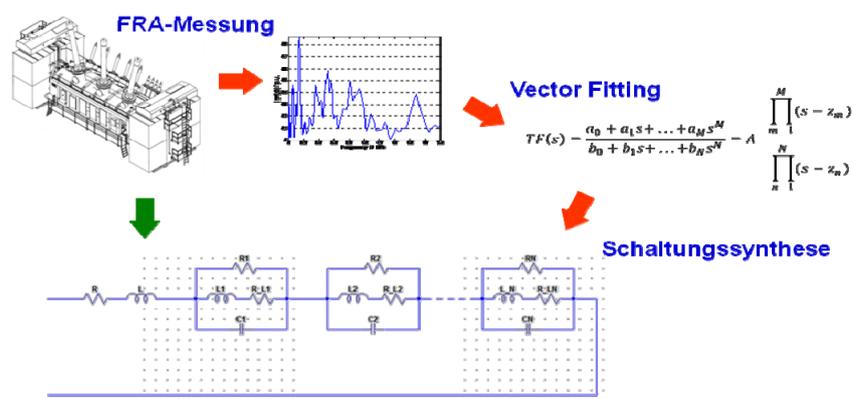


Abbildung 9: Synthese eines elektrischen Äquivalenzmodells eines Transformators

Die Anwendungen dieser Methode liegen in der Simulation von transienten Ausgleichsvorgängen in Hochspannungsnetzen und können beispielsweise bei der Berechnung von Netzerweiterungen hilfreich sein.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die FRA ist dabei, sich als Diagnoseverfahren für Wicklungsverwerfungen zu etablieren. Dadurch, dass dieses Diagnoseverfahren keine absolute Messmethode ist und immer mit einer Referenzmessung verglichen werden muss, ist die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eine wichtige Voraussetzung. Diese Reproduzierbarkeit ist aber nur dann möglich, wenn der Messaufbau und die Messprozedur standardisiert sind. Die in diesem Beitrag vorgestellten Empfehlungen bezüglich des Messaufbaus finden sich in weiten Teilen in dem von der Cigré Working Group A2.26 verfassten abschließenden Report wieder [4]. Aufgrund ihrer gegenüber der Zeitbereichsmessung reduzierten Komplexität ist der Frequenzgangmessung im Frequenzbereich (SFRA) der Vorzug zu geben. Die beschriebenen Mindestanforderungen an Messgeräte sind Empfehlungen und werden schon heute von den meisten Herstellern weitestgehend erfüllt.

Nachholbedarf besteht bei der FRA als Diagnosemethode weiterhin auf dem Gebiet der Interpretation von Messergebnissen. Bisher fehlen objektive Kriterien zur Beurteilung. Der Schlüssel zu einer objektiven Beurteilung einer Veränderung der Übertragungsfunktion wird darin gesehen, dass der Zusammenhang zwischen den physikalischen Effekten verursacht durch mechanische und elektrische Veränderungen an Wicklungen und dem Kurvenverlauf des Frequenzgangs eines Transformators hergestellt werden muss. Weitergehende Forschungsarbeiten werden zeigen, ob durch unterschiedliche Fehlerarten hervorgerufenen Veränderungen des Frequenzgangs aus systemtheoretischer Sicht eine eindeutige Eingrenzung des jeweiligen Fehlers zulassen.

Die skizzierte Methode zur Synthese eines elektrischen Äquivalenz-Netzwerks stellt eine weitergehende Verwendungsmöglichkeit der FRA dar, die zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen könnte. Anwendungen werden bei Simulation transienter Vorgänge in Hochspannungsnetzen gesehen.

LITERATUR

- [1] E. Hanique: "A Transfer Function is a Reliable Tool for Comparison of Full and Chopped Lightning Impulse Tests", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, Jul. 1994, pp. 1261-1266
- [2] J. Christian: "Erkennung mechanischer Wicklungsschäden in Transformatoren mit der Übertragungsfunktion", Dissertation, Universität Stuttgart, Shaker Verlag 2002, ISBN 3-8322-0480-6
- [3] R. Wimmer, S. Tenbohlen, M. Heindl, A. Kraetge, et al: "Development of Algorithms to Assess the FRA", 15th Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), Ljubljana, 2007, Paper T7-523
- [4] Picher, P.; Lapworth, J.; Noonan, T.; Christian, J. et al: "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis", Cigre Report 342, 2008, ISBN 978-2-85873-030-8
- [5] R. Wimmer, M. Krüger: "Erhöhung der Reproduzierbarkeit von FRA-Messungen durch Standardisierung", Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006, pp.45-66, Stuttgart 2006, ISBN 3-00-018361-2
- [6] The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China: "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers", Std. DL/T911-2004, ICS27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 1st, 2005
- [7] Juan L. Velásquez, Miguel A. Sanz-Bobib et al: "Knowledge Bases for the Interpretation of the Frequency Response Analysis of Power Transformers", Congreso Internacional en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, ALTAE 2009, Medellín, Colombia. 23-27 Noviembre 2009
- [8] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, July 1999
- [9] M. Heindl, S. Tenbohlen et al: "Algorithmische Bestimmung der Pol-Nullstellen-Darstellung von Transferfunktionen bei Leistungstransformatoren zur Bewertung von FRA-Messungen", ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.29