

Erfahrungen mit der Auswertung der Übertragungsfunktion bei der Vor-Ort-Prüfung von Transformatoren

J. Christian

Institut für Energieübertragung und
Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

U. Sundermann

RWE Energie AG, Essen

1 Einleitung

Der freie Markt für Energieerzeugung und -verteilung erzwingt eine optimierte Ausnutzung elektrischer Betriebsmittel. Dies ist in der Regel durch höhere Auslastungen und größere Lebensdauern zu erreichen. Trotz Steigerung der Effizienz soll weiterhin eine möglichst hohe Ausfallsicherheit gewährleistet werden.

Die Aufgabe moderner Diagnosemethoden ist es, durch eine möglichst exakte Zustandsbestimmung die optimale Ausnutzung bei Transformatoren im Hinblick auf die übertragbare Leistung und die Betriebsdauer zu ermöglichen, ohne die Betriebssicherheit unzulässig zu beeinflussen.

Für die Zustandsbeurteilung von Transformatoren gibt es kein universelles Messverfahren. Die Zusammenfassung der Ergebnisse unterschiedlichster Messmethoden ergibt letztlich die Möglichkeit einer Gesamteinschätzung, /1/.

Um mechanische Veränderungen in Transformatorwicklungen, wie sie beispielsweise durch Kurzschlüsse verursacht werden können, festzustellen, wird die Auswertung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion diskutiert, /2/,/3/. Hierbei erfolgt eine Bestimmung der Frequenzgänge über einen vorgegebenen Spektralbereich und damit der Charakteristika des Transformators. Zur Bewertung der Ergebnisse müssen diese referenziert werden. Da vergleichbare Messungen früherer Zeitpunkte oft nicht vorliegen, ist es notwendig, alternative Vergleichsmöglichkeiten zu finden. Neben einem Vergleich unter baugleichen Versuchsobjekten besteht außerdem die Möglichkeit zur Gegenüberstellung von Ergebnissen separat geprüfter Wicklungsschenkel eines Transformators.

2 Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung in der Vor-Ort-Zustandsdiagnostik

2.1 Theorie des Verfahrens

Nach den Gesetzen der Systemtheorie geht man von einer Beschreibung eines Transformators als komplexes, passives, lineares und zeitinvariantes Netzwerk aus. Der Transformator stellt ein System mit einem Eingang und mehreren Ausgängen dar. Fig. 2.1 veranschaulicht die Betrachtungsweise eines Transformators als komplexes RLC-Netzwerk.

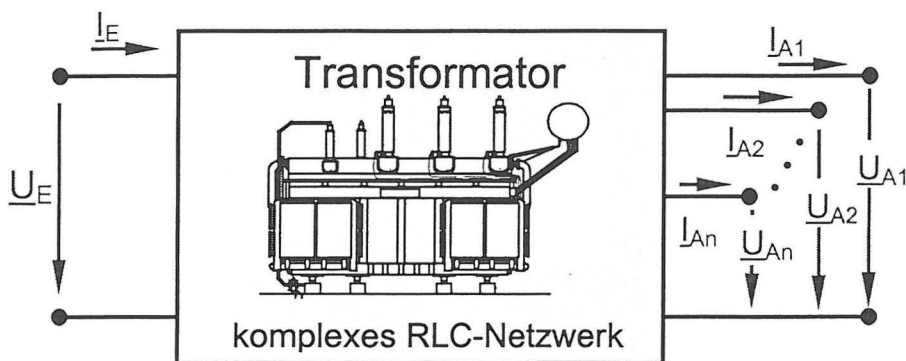


Fig. 2.1
Betrachtung des
Transformators als
komplexes RLC-
Netzwerk

Eine erregende Eingangsgröße hat verschiedene Systemantworten zur Folge. Entsprechend der Anzahl definierter Ausgangsgrößen lassen sich eine Reihe von Übertragungsfunktionen berechnen:

$$\underline{TF}_E(f) = \frac{\underline{I}_E(f)}{\underline{U}_E(f)}$$
$$\underline{TF}_{Au,v}(f) = \frac{\underline{U}_{A,v}(f)}{\underline{U}_E(f)} \quad \underline{TF}_{Ai,v}(f) = \frac{\underline{I}_{A,v}(f)}{\underline{U}_E(f)} \quad (2.1)$$

Die einzelnen Übertragungsfunktionen besitzen hinsichtlich der zu detektierenden Effekte im Transformator eine sehr unterschiedliche Empfindlichkeit.

2.2 Anwendung in der Vor-Ort-Zustandsdiagnostik

Eine Verlängerung der Nutzungsdauer und eine höhere Auslastung der elektrischen Betriebsmittel kann zu einem erhöhten Ausfallrisiko führen. Um ein solches Risiko abzuschätzen oder verringern zu können, sind Zustandsdiagnosen notwendig.

Im Rahmen einer verbesserten Zustandsdiagnose wird die Übertragungsfunktion als Methode zur Erkennung mechanischer Veränderungen in Transformatorwicklungen diskutiert. Tritt beispielsweise bei einem Transformator der Verdacht eines Schadens infolge unsachgemäßer Reparaturarbeiten oder eines Kurzschlusses auf, so besteht die Möglichkeit, den Transformator außer Betrieb zu nehmen und die Übertragungsfunktion zu bestimmen, [2]/[3]. Messungen im Zeitbereich mit Niederspannung bei verschiedenen Prüfschaltungen und Stufenschalterstellungen dauern wenige Stunden, so dass die Ausfallzeit maximal einen Tag beträgt, [4]/[5]. Fig. 2.2 zeigt den automatisierten Aufbau einer Übertragungsfunktionsmessung mit Niederspannung. Stoßgenerator und digitales Messsystem sind fest in einem Fahrzeug integriert. Der Messwagen steht in unmittelbarer Nähe zum abgeklemmten Transformator. Mit Hilfe entsprechender Adapter und Koaxialkabeln entsteht eine direkte Verbindung zwischen den Trafoklemmen, dem

Transientenrekorder und dem Stoßgenerator. Die Dauer der Montagearbeiten beträgt etwa eine Stunde.

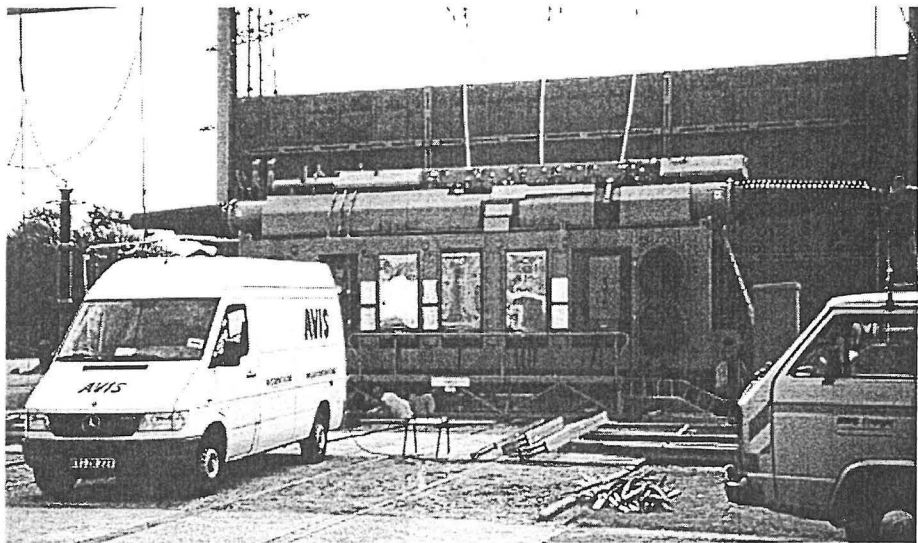


Fig. 2.2
Vor-Ort-Messung
der Übertragungs-
funktion an einem
200 MVA- Trans-
formator mit
mobiler Mess-
einrichtung

Die Übertragungsfunktion stellt in erster Linie eine vergleichende Diagnosemethode dar. Erfolgt eine aktuelle Messung an einem Transformator, muß diese auf bestehende Ergebnisse referenziert werden. Fig. 2.3 zeigt die Vorgehensweise.

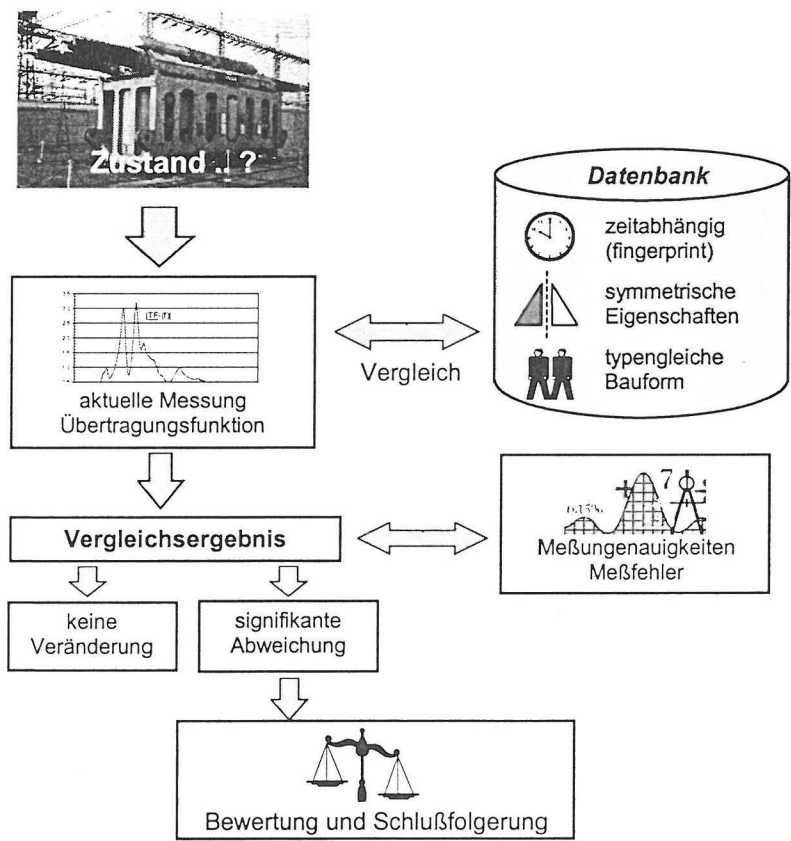


Fig. 2.3:
Vor-Ort-Zustands-
diagnose bei
Leistungstransfor-
matoren mit der
Übertragungs-
funktion

Für die Vergleiche von Messergebnissen lassen sich drei verschiedene Typen klassifizieren. Bei zeitabhängigen Vergleichen wird die aktuelle Messung Ergebnissen aus früheren Zeitpunkten gegenüber gestellt, /2/,/5/. Derartige Aufzeichnungen aus früheren Tagen sind oftmals nicht verfügbar, oder es lassen sich die damals vorherrschenden Untersuchungsbedingungen nicht mehr exakt rekonstruieren. Zeitbasierte Vergleiche sind daher nur bei ausgewählten Objekten möglich.

Mechanische Veränderungen treten in der Regel nicht gleichzeitig und im selben Maße an allen Wicklungsschenkeln auf. Erfolgt beispielsweise eine zyklische Vertauschung der Prüfschaltung an den Phasen U, V und W eines Drei-Phasen-Trafos, so können die Ergebnisse der einzelnen Wicklungsschenkel miteinander verglichen werden. Je nach Konstruktion des Aktivteils ist die Gleichartigkeit der 3 Wicklungsschenkel in teilweise sehr unterschiedlichem Ausmaß aus den Ergebnissen der Übertragungsfunktion ersichtlich. Eine Vergleichsmöglichkeit zur Detektion eventueller mechanischer Änderungen ist daher nicht immer gegeben.

Eine dritte Vergleichsmöglichkeit besteht in der Referenzierung von Transformatoren des selben Typs. Typengleiche Objekte ergeben in den meisten Fällen gut übereinstimmende Meßergebnisse. Dies gilt insbesondere dann, wenn Hersteller und Baujahr bei allen Objekten gleich sind, /2/.

3 Praktische Realisierbarkeit von Vergleichsarten bei Übertragungsfunktionen

3.1 Zeitabhängiger Vergleich

Die zuverlässigste Vergleichsmethode für gemessene Übertragungsfunktionen stellt die Referenzierung zu früheren Messergebnissen am selben Objekt dar. Voraussetzung hierfür ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Diese ist nur dann gegeben, wenn sich Prüfschaltungen, Prüfmethodik und Prüfgeräte noch zweifelsfrei rekonstruieren lassen. Darüber hinaus muss die Messtechnik so ausgewählt sein, dass der Einfluss minimaler, aber nicht vermeidbarer Unsicherheiten im Messaufbau hinsichtlich dem Messergebnis sehr klein ist. Der praktischen Ausführung von Messkabelanschlüssen, Erdverbindungen und Signalauskopplungen kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu.

Fig. 3.1 zeigt den zeitabhängigen Vergleich von Übertragungsfunktionen an einem Leistungstransformator. Zwischen Referenzmessung und aktueller Untersuchung liegt eine Zeitspanne von etwa einem halben Jahr.

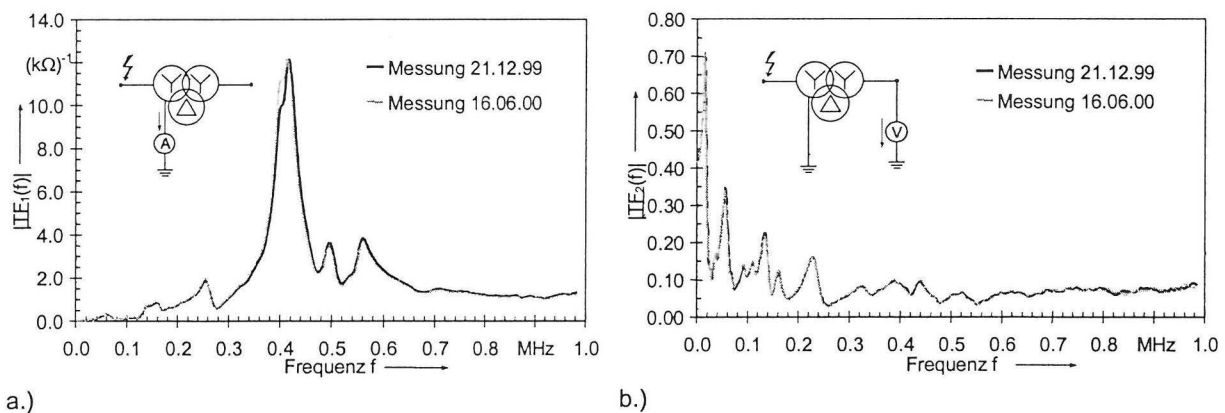


Fig. 3.1: Zeitabhängiger Vergleich bei einem 200 MVA-Leistungstransformator
a.) Übertragungsfunktion aus Sternpunktstrom (220 kV)
b.) Übertragungsfunktion aus übertragener Spannung (110 kV)

Die zu beiden Terminen ermittelten Übertragungsfunktionen der übertragenen Spannungen (Fig. 3.1 b) sind identisch. Die Resonanzfrequenzen und Dämpfungswerte weisen im betrachteten Frequenzbereich keinerlei Abweichungen auf. Das Ergebnis der Sternpunktstromübertragungsfunktion ist ebenfalls gut reproduziert. Dämpfungswerte, Übertragungsminima und -maxima sind identisch. Lediglich bei der Hauptresonanzfrequenz von 400 kHz zeigen die Kennlinien kleinere Unterschiede in der Dämpfungscharakteristik. Das Ergebnis

unter Fig. 3.1 a gibt unter anderem die Problematik der Auswertung von Stromsignalen unter Vor-Ort-Bedingungen wieder. Zur Auskopplung von Stromsignalen eines Prüfkreises ist es aus praktischen Gründen gelegentlich notwendig, zusätzliche Signalleiterstücke in den Prüfkreis einzubringen. Sind diese Leiterabschnitte ungeschirmt, hat deren Anordnung unter Umständen Einfluss auf das Messergebnis. Für die Anbindung einer Rogowski-Spule zur Erfassung des Sternpunktstroms gegen Erde kommt im vorliegenden Fall ein etwa 3 m langes, ungeschirmtes Leitungsstück zum Einsatz. Die Lage des Leitungsstücks bezüglich Kessel und Masseleitung ändert die elektrische und magnetische Kopplung und hat somit Einfluss auf das Messergebnis.

Die unter Fig. 3.1 a zu beobachteten Abweichungen sind teilweise auf diesen Effekt zurückzuführen.

3.2 Konstruktionsbasierter Vergleich

Nur in sehr seltenen Fällen sind Referenzmessungen früherer Tage verfügbar, /5/. Gründe hierfür sind unter anderem nicht vorhandene Messmittel zur Bestimmung der Übertragungsfunktion in der Vergangenheit. Darüber hinaus besteht aus Sicht der Betreiber selten die Notwendigkeit von Referenzmessungen im Neuzustand.

Neben dem zeitbasierten Vergleich von Übertragungsfunktionen ist es außerdem möglich, die konstruktiven Eigenschaften eines Mehrschenkel-Transformators zu Vergleichszwecken zu nutzen. Gezielte Prüfschaltungen erlauben eine separate Untersuchung einzelner Wicklungsschenkel, deren Ergebnisse gegenüber gestellt werden können. Diese Vergleichbarkeit für separat untersuchte Schenkel hängt neben den konstruktiven Eigenschaften insbesondere auch von der Schaltgruppe ab.

Fig. 3.2 zeigt einen derartigen Vergleich an einem 200 MVA-Leistungstransformator für die Übertragungsfunktionen des Sternpunktstroms der gestoßenen Wicklung und für die auf die nicht gestoßene Wicklung übertragene Spannung des untersuchten Wicklungsschenkels.

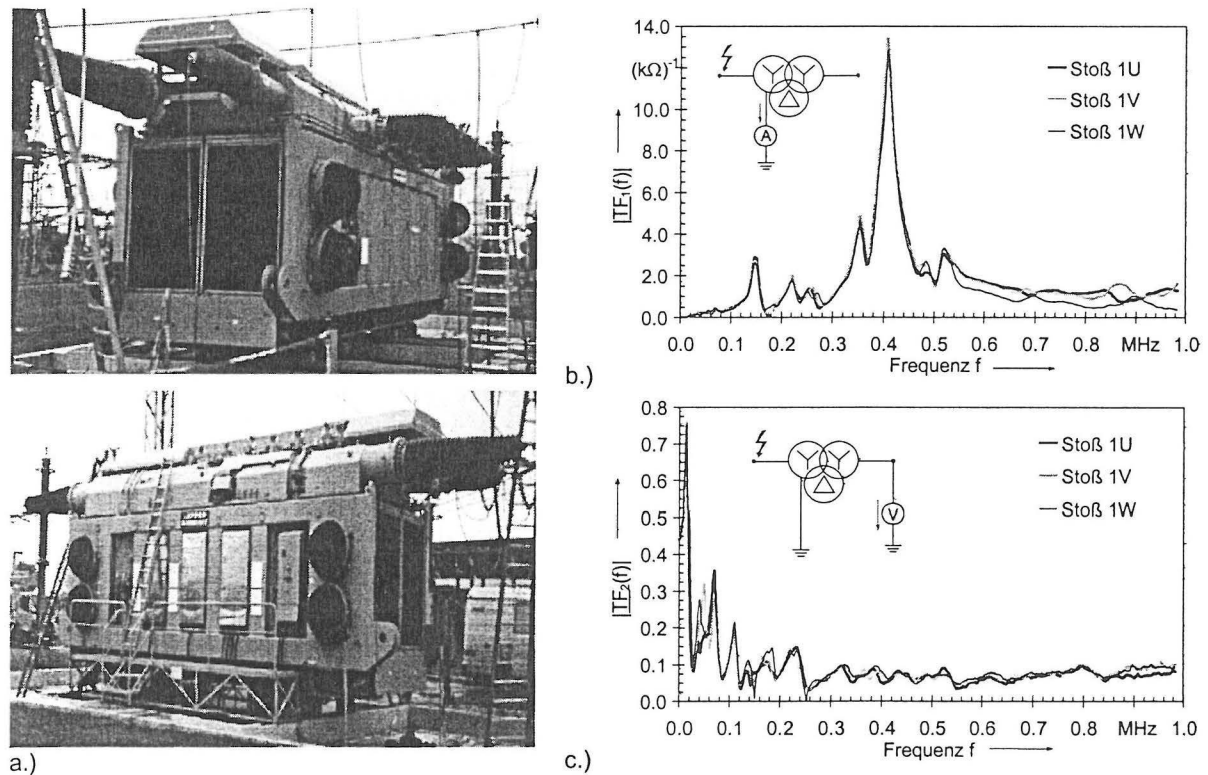
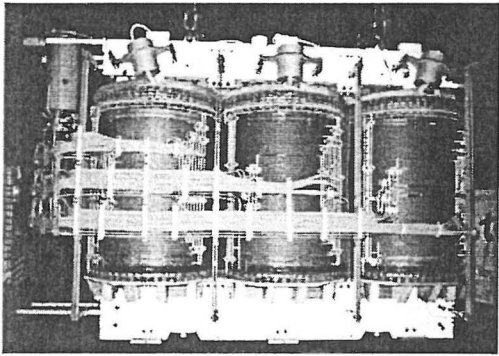
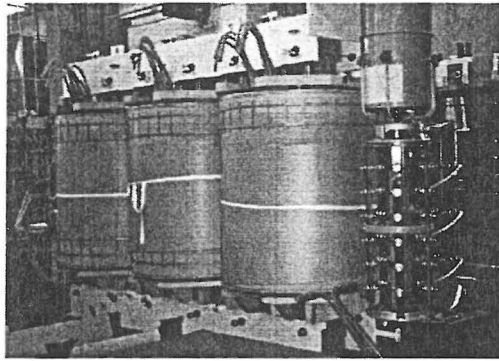


Fig. 3.2: Konstruktionsbasierter Vergleich an einem 200 MVA-Leistungstransformator

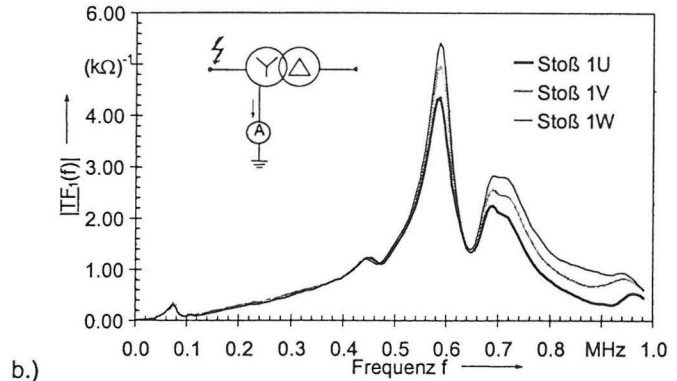
- a.) Lepper 220/110/10 kV, YNyd5, 200 MVA, Baujahr 1975
- b.) Übertragungsfunktion von Sternpunktstrom 220 kV-Wicklung
- c.) Übertragungsfunktion von übertr. Spannung 110 kV-Wicklung

Die ermittelten Maxima und Minima der aus dem Sternpunktstrom resultierenden Übertragungsfunktion sind bei den Wicklungsschenkeln U, V und W identisch. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Messgenauigkeit lassen sich im vorliegenden Fall für Frequenzen über 600 kHz keine zuverlässigen Aussagen treffen. Im Bereich um 50 und 150 kHz weist das Spannungsübertragungsverhalten zwischen der 220 kV- und der 110 kV-Wicklung keine vollständige Übereinstimmung auf, Fig. 3.2 c. Ursache hierfür sind konstruktive Eigenheiten des Aktivteils.

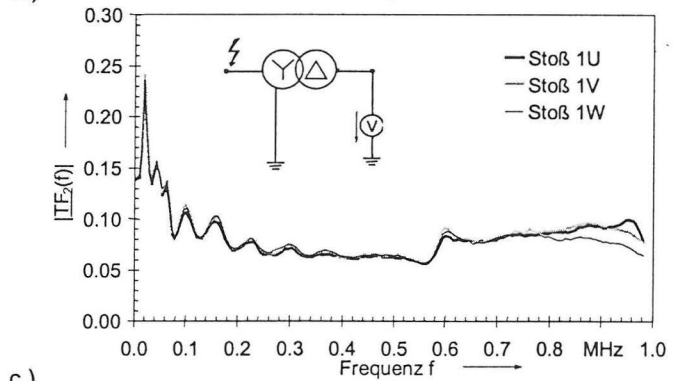
Ähnliche Ergebnisse lassen sich an einem 125 MVA-Umspanner beobachten, Fig. 3.3:



a.)



b.)



c.)

Fig. 3.3: Konstruktionsbasierter Vergleich an einem 125 MVA-Kuppelumspanner

- a.) Aktivteil Siemens: 240 kV/53 kV; YNd11; 125 MA; Baujahr 1997
- b.) Übertragungsfunktion von Sternpunktstrom 240 kV-Wicklung
- c.) Übertragungsfunktion von übertr. Spannung 53 kV-Wicklung

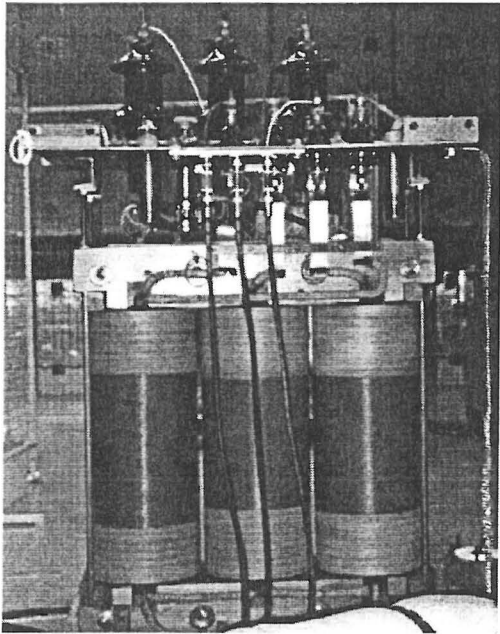
Die Wicklungsschenkel U, V und W besitzen für den Sternpunktstrom und für die übertragene Spannung identische Resonanzfrequenzen. Die Dämpfungsraten weisen beim Sternpunktstrom (Fig. 3.3 b) systematische Unterschiede auf. Unter der Berücksichtigung des konstruktiven Aufbaus des Aktivteils (Fig. 3.3 a) wird deutlich, dass aufgrund unterschiedlicher Leitungsführung bei den Schenkeln U, V und W nicht zwingend identische Übertragungsverhalten zu erwarten sind. Dies gilt sowohl für Resonanzfrequenzen als auch für Dämpfungen.

Der Verlauf der Spannungsübertragungsfunktion zeigt die Genauigkeitsgrenze der Messung auf. Diese liegt im Bereich von 700 kHz.

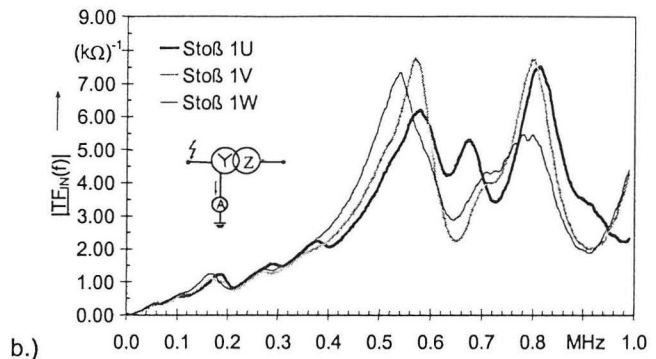
Neben Leistungstransformatoren gewinnt auch die Zustandsüberwachung bei Verteiltransformatoren zunehmend an Bedeutung. Transformatoren des 400 Volt-Versorgungsnetzes unterliegen teilweise großen Lastschwankungen. Im Vergleich zu Transformatoren des Hoch- und Mittelspannungsnetzes ist bei Verteiltransformatoren der Umfang an Informationen aus Betriebs- und Störschreibern nicht groß genug, um eine ausreichende Dokumentation des Betriebs- und Belastungszustands zu erhalten. Für Betreiber von Niederspannungsnetzen ist es daher oft schwierig, eine Zustandsabschätzung von Transformatoren einzelner Verteilstationen abzugeben. Aufgrund der vergleichsweisen

geringen Kapitalbildung solcher Transformatoren ist der finanzielle Aufwand eventueller Diagnoseverfahren in Grenzen zu halten. Aus diesem Grund erfolgen vergleichsweise wenig Untersuchungen zur Zustandsberurteilung an Verteiltransformatoren.

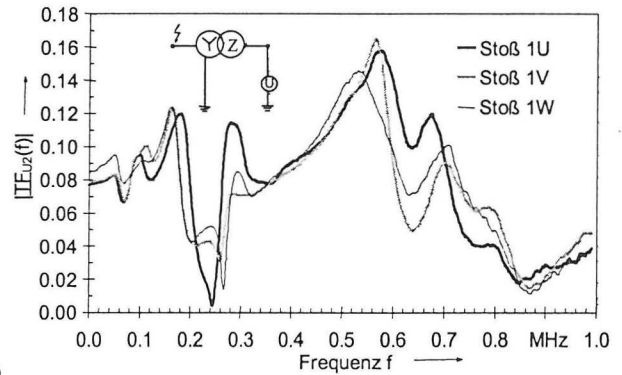
Ob der Vergleich der Übertragungsfunktionen der separat geprüften Schenkel eines Verteiltransformators eine derart mögliche Diagnosemethode darstellt, zeigen die Ergebnisse unter Fig. 3.4.



a.)



b.)



c.)

Fig. 3.4: Konstruktionsbasierter Vergleich an einem 150-kVA-Verteiltransformator

- a.) Aktivteil Kentler: 10 kV/400 V; Yz5; 150 kVA; Baujahr 1958
- b.) Übertragungsfunktion von Sternpunktstrom 10 kV-Wicklung
- c.) Übertragungsfunktion von übertr. Spannung 400 V-Wicklung

Die Übertragungsfunktionen aus Sternpunktstrom und übertragene Spannung weisen bei den Phasen U, V und W zwar ähnliche Charakteristika, aber keine Übereinstimmung hinsichtlich Resonanzen und Nullstellen auf. Die 'Ähnlichkeit' der Kennlinien ist nicht ausreichend um eventuelle Veränderungen im Transformator durch einen Vergleich der getrennt untersuchten Wicklungsschenkel detektieren zu können. Die eingeschränkte Übereinstimmung der Kennlinien der Phasen U, V und W ist auf die Kombination der Stern-Dreieck-Verkettung der Zick-Zack-Schaltung zurückzuführen.

3.3 Typenbasierter Vergleich

In großen Versorgungsgebieten mit einem hohen Grad der Vernetzung sind oft mehrere Transformatoren des selben Typs und Herstellers im Einsatz. Dieser Umstand kann ebenfalls zur Beurteilung von Transferfunktionsmessungen genutzt werden. Aktuelle Messungen werden mit Referenzmessungen anderer Transformatoren gleichen Typs und Herstellers verglichen. Wie stark die zu erwartenden Streuungen in den Ergebnissen sind und in wie weit diese von Fertigungsunterschieden beeinflusst werden, soll im Rahmen einer Reihenuntersuchung an 30 typengleichen Transformatoren eines Herstellers untersucht werden.

Der zugrunde liegende Zeitraum der Fertigung beträgt 8 Jahre. Die erste Fertigung fand im Jahr 1968 statt. Im Laufe des Fertigungszeitraums erfolgten insgesamt 3 Änderungen in der Wicklungsspezifikation, so dass innerhalb der betrachteten Reihe von 4 verschiedenen Wicklungsdesigns ausgegangen werden muss. Darüber hinaus wurden an einzelnen Objekten Reparatur- und Änderungsarbeiten durchgeführt.

Fig. 3.5 gibt einen vergleichenden Überblick zu den Messergebnissen von zwei der vier verschiedenen Wicklungskonstruktionen.

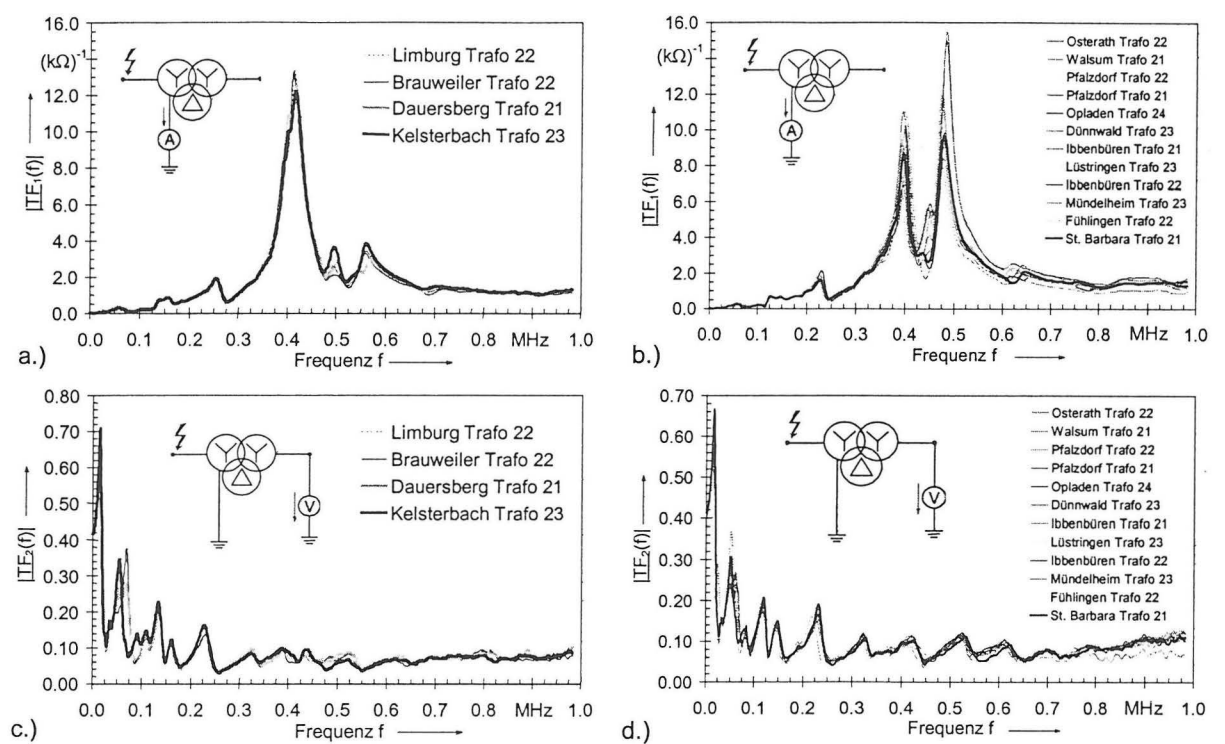


Fig. 3.5: Typenbasierter Vergleich an einer Serie von Leistungstransformatoren (Lepper 200 MVA)

- a.) Übertragungsfunktion aus Sternpunktstrom Wicklungstyp 'B'
- b.) Übertragungsfunktion aus Sternpunktstrom Wicklungstyp 'D'
- c.) Übertragungsfunktion aus übertr. Spannung Wicklungstyp 'B'
- d.) Übertragungsfunktion aus übertr. Spannung Wicklungstyp 'D'

Obwohl sich die elektrischen Eckdaten des Transformators über den betrachteten Fertigungszeitraum nicht verändert haben, weist der Sternpunktstrom des Wicklungstyps 'B' eine deutlich unterschiedliche Übertragungscharakteristik im Vergleich zu Wicklungstyp 'D' auf. Weniger ausgeprägt sind die Abweichungen bei der Spannungsübertragung. Die Teiluntersuchung zeigt sehr deutlich, dass nur Objekte mit identischem Design gegenüber gestellt werden können. Ein Vergleich unter Transformatoren des selben Typs hat daher äußerst differenziert zu erfolgen. Liegen keine genaueren Informationen zur Konstruktion vor, sind die Vergleiche von Einzelmessungen nur unter Vorbehalt zu betrachten. Eventuelle gemessene Unterschiede könnten durch unterschiedliche Designs der Aktivteile verursacht sein.

Der Vergleich der Ergebnisse für Transformatoren mit identischem Wicklungsaufbau (Fig. 3.5) gibt eine Abschätzung für die zu erwartenden Streuungen der Ergebnisse beim typenbasierten Vergleich. Während die Übertragungsfunktionen des Sternpunktstroms für Wicklungstyp 'B' sehr gute Übereinstimmungen bei Resonanzen und Dämpfungen aufweisen (Fig. 3.5 a), zeigen sich Unterschiede im Bereich der 50 kHz-Spannungsübertragungsresonanz, Fig. 3.5 c. Während die Trafos in Limburg und Brauweiler identisches Verhalten zeigen, sind bei Dauersberg und Kelsterbach sichtbare Unterschiede zu verzeichnen. Die quantitative Abschätzung des Messfehlers bei der Ermittlung der Spannungsübertragungsfunktion gibt Aufschluss darüber, dass die Transformatoren in dem Frequenzbereich um

50 kHz ein nachweislich unterschiedliches Verhalten besitzen. Während im Fall Dauersberg eine dokumentierte Änderung an der 220 kV-Wicklung stattfand und dies eine mögliche Ursache der Abweichung zu den Ergebnissen von Limburg und Brauweiler verkörpert, gibt es für die Ergebnisse aus Kelsterbach zunächst keine plausible Erklärung. Ein Unterschied zu den Messungen in Limburg, Brauweiler und Dauersberg liegt in der Tatsache, dass die Anschlusskabel des Eigenbedarfs der 10 kV-Wicklung während der Messung nicht direkt am Trafo abgetrennt werden konnten und damit das Kabel zwischen Trafo und dem 200 m entfernten Trennschalter als kapazitive Belastung wirkte.

Bei Messmethoden mit statistisch verteilten Ergebnisstreuungen sind Abschätzungen zu Bandbreite der Ergebnisverteilung erst ab einer bestimmten Anzahl von Einzelereignissen möglich. Die Zusammenstellung der 12 Einzelmessungen des Wicklungstyps 'D' (Fig. 3.5 b,d), ergibt eine quantitative und qualitative Abschätzung über die zu erwartenden Streuungen bei breit angelegten Reihenuntersuchungen. Während die Dämpfungswerte der Resonanzen beim Sternpunktstrom sehr unterschiedlich sein können, weisen die Resonanzfrequenzen Schwankungen von lediglich $\pm 5\%$ des Mittelwerts auf, Fig. 3.5 b. Ein deutlich schmaleres Streuband ergibt sich bei der übertragenen Spannung, Fig. 3.5 d. Hier weichen nur einzelne Messkurven vom eng gefassten Werteband der Spannungsübertragungsfunktionen ab. Ziel einer breit angelegten Reihenuntersuchung ist es, aus der Gesamtheit aller Ergebnisse eine gemittelte Referenzkurve mit dazugehörigem Vertrauensband zu generieren. Verläuft eine Messkurve im Vertrauensbereich der Referenzkurve, so sind im Vergleich zu den anderen Objekten mit der Wahrscheinlichkeit des Vertrauensbands keine Veränderungen im Transformator vorhanden.

4 Empfindlichkeitsanalyse an realen Schadensfällen

Zur Abschätzung der Empfindlichkeit der Übertragungsfunktion hinsichtlich mechanischen Veränderungen sind zahlreiche Untersuchungen mit schrittweise modifizierten Graden der Beschädigungen an Trafowicklungen notwendig. Solche Grundlagenuntersuchungen sind in der Regel nur unter Laborbedingungen mit ausreichender Sorgfalt zu erreichen, /5/. Experimentell erzeugte Verformungen an Trafowicklungen geben nur teilweise die Charakteristik von im Betrieb entstandenen Wicklungsschäden wieder. Um die Plausibilität der im Labor erhaltenen Ergebnisse zu prüfen, ist es notwendig auch reale Fehlerfälle zu untersuchen. Reale Schadensfälle treten nicht mit ausreichender Anzahl auf, um mit diesen Testergebnissen die Zusammenhänge zwischen den Unterschieden in den Kennlinien der Übertragungsfunktionen und der Schadenscharakteristik der Wicklung empirisch zu erarbeiten. Diese Messungen dienen vorzugsweise zur Verifikation von Laboruntersuchungen und mathematischen Simulationsergebnissen.

Fig. 4.1 zeigt ein Beispiel für die Untersuchung eines realen Schadensfalls an einem 133 MVA-Einphasentransformator. Nach vorläufiger Ursachenforschung hat ein Fehler im Aktivteil zu einem Überstrom in den 10 kV-Wicklungen geführt, wodurch eine der beiden Unterspannungswicklungen beschädigt wurde. Während der Aufbau der 400 kV-Wicklung komplett unversehrt geblieben ist, weist die unter Fig. 4.1 b gezeigte 10 kV-Wicklung im oberen Viertel starke axiale Verwerfungen und radiale Deformationen auf.

Der Untersuchung liegen die unter Fig. 4.2 aufgezeigten Prüfschaltungsvarianten zugrunde. Ziel der Untersuchung ist es, den Zusammenhang zwischen einer im intakten Zustand gemessenen Übertragungsfunktion und der einer beschädigten Wicklung herzustellen. Unter der Voraussetzung, dass eine der beiden 10 kV-Wicklungen unversehrt geblieben ist, kann eine derartige Gegenüberstellung anhand der getrennt untersuchten Wicklungsschenkel des unter Fig. 4.1 gezeigten Einphasentransformators erfolgen. Darüber hinaus soll mit Hilfe

eines Empfindlichkeitsvergleichs die am besten geeignete Prüfschaltung herausgefunden werden.

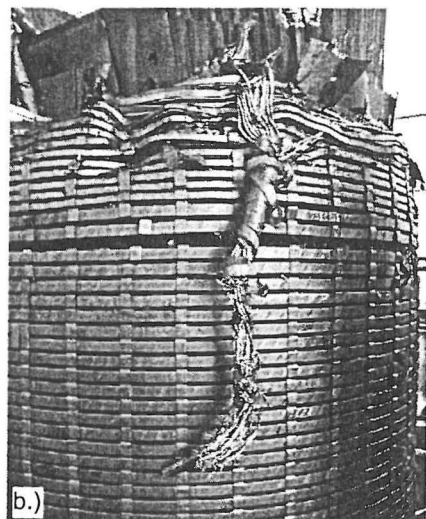
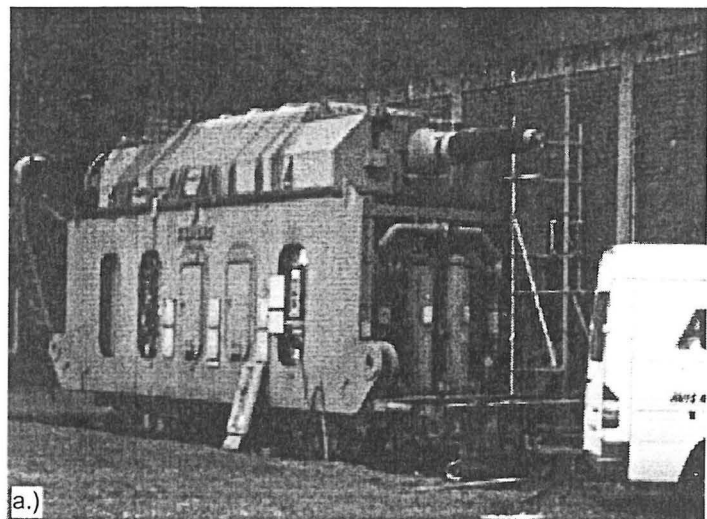


Fig. 4.1: Vor-Ort-Untersuchung an einem 150 MVA, 400 kV/2x10 kV – Einphasentransformator

- a.) Vor-Ort-Messung KW Frimmersdorf 24.05.00
- b.) freigelegte, beschädigte 10 kV-Wicklung

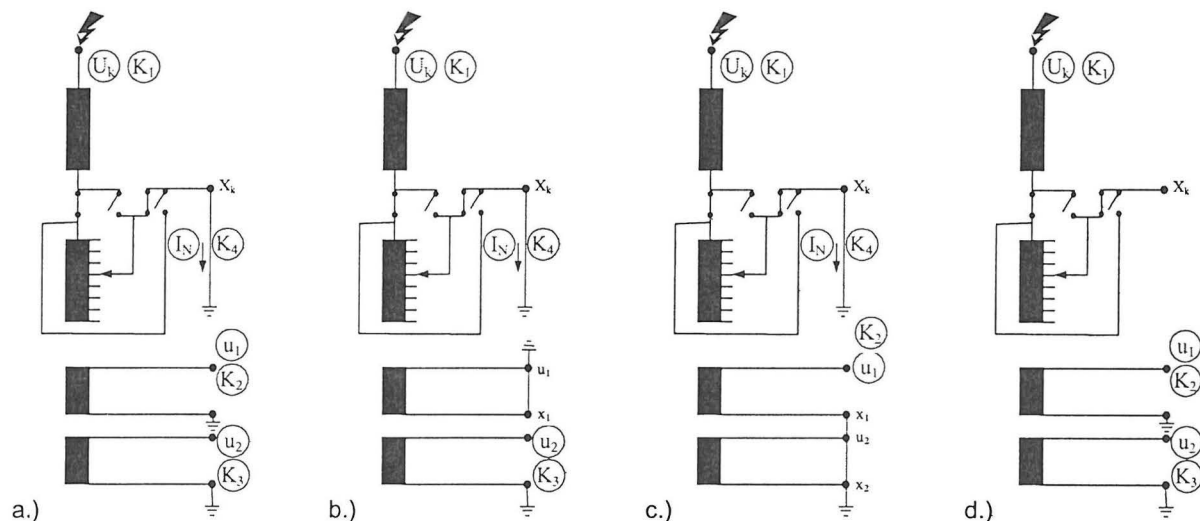


Fig. 4.2: Prüfschaltungen beim konstruktionsbasierten Vergleich an einem 2-Schenkel-Einphasen-transformator

- a.) Schaltung 1: identische Konfiguration beider Unterspannungswicklungen ($TF_1 = u_1/U_k$; $TF_2 = u_2/U_k$)
- b.) Schaltung 2: Impedanz bei Kurzschluss u_1 ($TF = u_2/U_k$)
- c.) Schaltung 3: Impedanz bei Kurzschluss u_2 ($TF = u_1/U_k$)
- d.) Schaltung 4: Spannungstransfer bei isoliertem OS-Wicklungsende ($TF_1 = u_1/U_k$; $TF_2 = u_2/U_k$)

Fig. 4.3 dokumentiert die Ergebnisse der unterschiedlichen Prüfschaltungen.

Die deutlichsten Unterschiede beim Vergleich der beiden Schenkel treten bei Prüfschaltung 1 und 4 auf. Während sich bei Schaltung 1 eine wesentliche Änderung der Frequenzcharakteristik lediglich im Bereich von 650 bis 800 kHz einstellt, Fig. 4.3 b, zeigt Schaltung 4 über den gesamten Messbereich unterschiedliche Resonanzcharakteristika und Dämpfungswerte, Fig 4.3 d. Die Auswertung des Erdstroms der gestoßenen 400 kV-Wicklung (Schaltung 2 und 3) zeigt im Vergleich zu den anderen Schaltungen eine unzureichende Empfindlichkeit gegenüber dem nicht unerheblichen Wicklungsschaden. Es muss mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass nur ein in der

defekten Wicklung fließender Strom eine ausreichende Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Veränderungen besitzt.

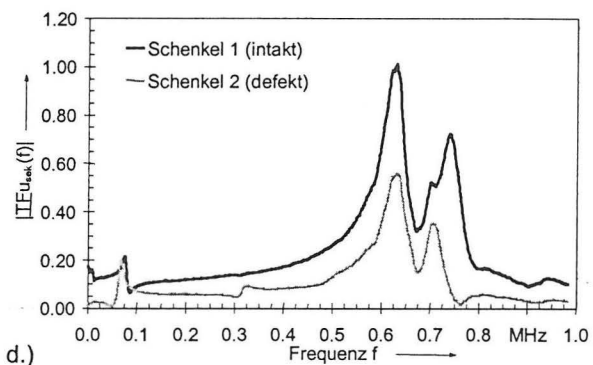
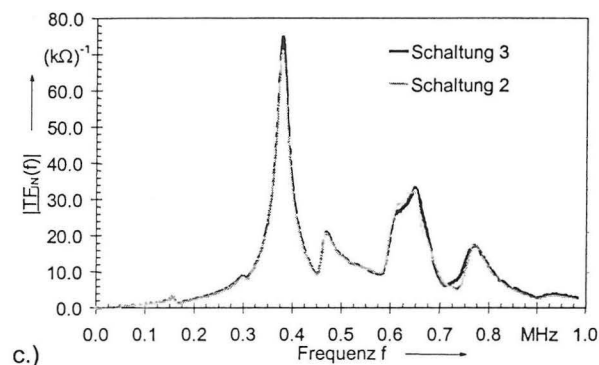
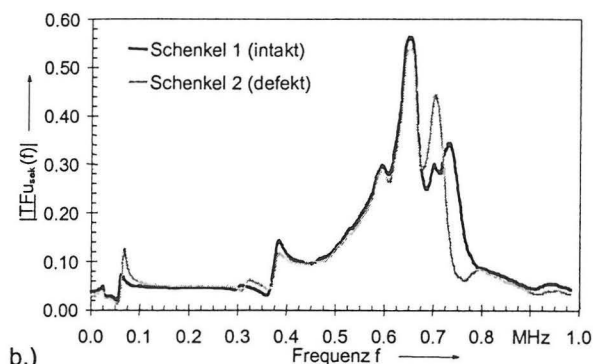
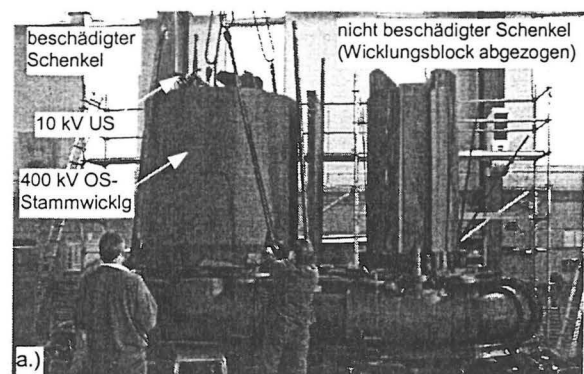


Fig. 4.3: Empfindlichkeitsanalyse für realen Schadensfall durch konstruktionsbasierten Vergleich an einem 2-Schenkel-Einphasentransformator

- Demontage des Aktivteils zur Begutachtung des Schadensumfangs
- Übertragungsfunktionen für übertragene Spannungen der 10 kV-Wicklungen nach Schaltung 1
- Übertragungsfunktionen für Erdstrom 400 kV-Wicklung nach Schaltung 2 und 3
- Übertragungsfunktionen für übertragene Spannungen der 10 kV-Wicklungen nach Schaltung 4

Unter der Voraussetzung, dass bei einem schadensfreien Aktivteil und Stoß auf die 400 kV-Wicklung das Spannungsübertragungsverhalten für die Anschlüsse u_1 und u_2 identisch ist, kann der Schaden durch das beschriebene Prüfverfahren mit hoher Wahrscheinlichkeit detektiert werden. Eine Zuordnung des Schadens zu einem bestimmten Schenkel ist nur mit Hilfe einer Referenzuntersuchung aus früherer Zeit oder eines typengleichen, unbeschädigten Transformators möglich.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Übertragungsfunktion ist eine vergleichende Methode zur Detektion von Veränderungen in Transformatoraktivteilen. Bei entsprechender Sorgfalt in der praktischen Durchführung können Überwachungszeiträume von mehreren Jahren realisiert werden, /6/. Voraussetzung ist eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Einzeluntersuchungen nach längeren Zeiträumen.

Für die Referenzierung aktueller Messungen stehen drei verschiedene Vergleichsarten zur Diskussion. Die vielversprechendste und zuverlässigste Methode ist der zeitbasierte Vergleich mittels Referenzmessungen aus früherer Zeit. Diese Anwendung erfordert allerdings vorab eine Datenbasis an Referenzuntersuchungen, welche zum einen zusätzliche Kosten verursachen und darüber hinaus zum Zeitpunkt der Referenzmessung noch keinen wesentlichen Informationsgehalt besitzen. Soll eine sofortige Zustandsbeurteilung erfolgen, muss ein typenbasierter oder konstruktionsbasierter Vergleich erfolgen. Die Ausnutzung der

Mehrschenkligkeit von Transformatoren zu Vergleichszwecken für Übertragungsfunktionen hängt von konstruktiven Eigenheiten des Aktivteils und der Schaltgruppe des Transformators ab. Während bei klassischen Kuppelumspannern mit Schaltgruppe YN_{yn}d5 eine gute Übereinstimmung der einzelnen Schenkel beobachtet werden kann, ist diese Vergleichsart bei Verteiltransformatoren der Schaltgruppe Yz5 ungeeignet. Je nach Aufbau des Aktivteils ist bei den einzelnen Schenkeln mit unterschiedlichen Signaldämpfungsraten zu rechnen. Bei einem Vergleich sollte sich die Betrachtung in erster Linie auf die Kenngrößen eines gemessenen Frequenzganges, d.h. auf die Resonanz- und die Nullstellen beschränken.

Sind in einem Versorgungsnetz mehrere Transformatoren identischer Bauart in Betrieb, so kann ein Vergleich der Übertragungsfunktionen untereinander erfolgen.

Fertigungstoleranzen, Reparaturen und Modifikationen am Aktivteil führen zu Ergebnisstreuungen. Aus einer Menge an Einzelmessungen ist durch statistische Mittelung die Referenzkennlinie und ein Vertrauensband zu ermitteln. Dieses Vertrauensband erlaubt die Beurteilung, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einem bestimmten Einzelergebnis eine wirkliche Veränderung am oder im Transformator vorliegt.

Nach bisherigen Erkenntnissen ist die Empfindlichkeit der Methode ausreichend, um einen Großteil der real vorkommenden Schäden infolge zu großer Strombelastung zu detektieren. Der unter Fig. 4.1 dargestellte Schaden ergibt deutlich sichtbare Veränderungen in der Transferfunktionscharakteristik. Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass mit geeigneten Prüfschaltungen auch geringere Schäden festgestellt werden können. Das dargestellte Beispiel markiert nicht die Empfindlichkeitsgrenze der Methode.

Literatur

- | | | |
|-----|-----------------------------------|---|
| /1/ | Fuhr, J.
Aschwanden, T. | Moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren Bulletin SEV/VSE 15/99, 1999 |
| /2/ | Christian, J.
Leibfried, T. | Die Übertragungsfunktion als Methode zur Beurteilung der Stoßkurzschlußprüfung und Vor-Ort-Isolationsdiagnose Elektrizitätswirtschaft 07/99, Jg. 98, 22.03.1999 |
| /3/ | Leibfried, T.
Kirchenmayer, E. | Stoßkurzschlussprüfung eines 125 MVA-Transformators Elektrizitätswirtschaft Jg. 97 (1998), Heft 10 |
| /4/ | Rahimpour, E.
Christian, J. | Modellierung der Transformatorwicklung zur Berechnung der Übertragungsfunktion für die Diagnose von Transformatoren Elektrische Berlin 54 (2000) 1-2 |
| /5/ | Christian, J.
Sundermann, U. | Beurteilung des Zustandes von Transformatoren mit der Übertragungsfunktion Micafil Symposium, Stuttgart, 1998 |
| /6/ | Leibfried, T. | Die Analyse der Übertragungsfunktion als Methode zur Überwachung des Isolationszustandes von Großtransformatoren Dissertation, Universität Stuttgart, 1996 |