

Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren durch die Analyse der Übertragungsfunktion

T. Leibfried

A. Kachler

Transformatorenwerk Nürnberg

Siemens AG

1. Einleitung

Die Fouriertransformierte der Impulsantwort eines **linearen und zeitinvarianten Systems** wird als **Übertragungsfunktion** oder Frequenzgang dieses Systems bezeichnet. Diese Übertragungsfunktion kann aus dem Eingangs- oder Anregungssignal und dem zugehörigen Antwortsignal des Systems berechnet werden. Übertragungsfunktionen werden in der Transformatoren-Prüftechnik seit Jahrzehnten bei verschiedenen Prüfverfahren aus Meßdaten bestimmt und als Mittel der Qualitätskontrolle und zur Ermittlung bestimmter Eigenschaften des Prüfobjektes ausgewertet.

Die Kenntnis der in der Wicklung auftretenden Spannungsbeanspruchungen ist für die ausreichende Dimensionierung der Isolation und damit für die erfolgreiche Stoßspannungsprüfung im Rahmen der Abnahmeprüfung und den sicheren Betrieb des Transformators im Netz von entscheidender Bedeutung. Durch eine **Stoßspannungsverteilungsmessung** können lokale und partielle Spannungsbeanspruchungen längs von Wicklungen und zwischen Wicklungsverbindungen ermittelt werden. Dazu wird die jeweilige Wicklung mit Spannungsimpulsen von einigen 100 V beaufschlagt. Am offenen Aktivteil des Transformators können dann die interessierenden Teilspannungen kapazitätsarm und aufgrund der niedrigen Spannungspegel problemlos abgegriffen werden. Die dabei gemessenen Beanspruchungen lassen sich mit guter Näherung an die späteren Verhältnisse unter Öl auf den Pegel der Stoßspannung hochrechnen.

Frequenzgangmessungen dienen zur Feststellung der Resonanzfrequenzen von Transformatorwicklungen, üblicherweise im Bereich bis zu einigen 100 kHz. Die Messung erfolgt durch einen Netzwerkanalysator, mit dem die Wicklung mit einer sinusförmigen Spannung von einigen Volt angeregt wird. Das Antwortsignal wird gemessen und der Frequenzgang wird direkt nach Betrag und Phase bestimmt und angezeigt.

Zum Nachweis der **mechanischen Festigkeit** des konstruktiven Aufbaus von Transformatorwicklungen können Stoßkurzschlußprüfungen an Modellwicklungen oder an ausgeführten Transformatoren als Sonderprüfung durchgeführt werden. Wegen der hohen Kosten solcher Prüfungen und wegen der ausgereiften Verfahren des rechnerischen Nachweises werden sie nur in seltenen Fällen als Sonderprüfung auf ausdrücklichen Wunsch des Kunden durchgeführt. Zur Feststellung von Wicklungsdeformationen werden vor und nach jedem Prüfkurzschluß Messungen der Schwingungseigenschaften am Transformator durchgeführt. Eine hierbei seit längerer Zeit angewandte Methode ist die **"Low Voltage Impulse" (LVI)-**

Diagnose. Dazu wird der Transformator vor und nach dem Prüfkurzschluß mit einem Niederspannungsimpuls angeregt. Ein Vergleich der vor und nach der Prüfung aufgezeichneten Antwortsignale liefert eine Aussage über eventuell erfolgte mechanische Veränderungen im Wicklungsaufbau. Eine weitere Möglichkeit stellt die Frequenzganganalyse ("**Frequency Response Analysis**", **FRA**) dar. Der Frequenzgang wird dabei vor und nach jeden Prüfkurzschluß entweder direkt im Frequenzbereich durch einen Netzwerkanalysator oder im Zeitbereich mit Hilfe der schnellen Fouriertransformation (FFT) bestimmt.

Zum Nachweis der dielektrischen Festigkeit werden neben den Wechselspannungsprüfungen die Schalt- und **Blitzstoßspannungsprüfungen** durchgeführt [1], [2], [3]. Die Blitzstoßspannungsprüfung dient dem Nachweis der Festigkeit der Wicklungskonstruktion und des Wicklungsaufbaus gegen transiente Überspannungen, die beim Betrieb des Transformators durch Schalthandlungen oder Blitzeinschläge in das Energieversorgungsnetz auftreten können. Der Transformator wird dazu mit genormten Hochspannungsimpulsen beaufschlagt. Gemäß IEC 76-3 besteht eine Prüfsequenz bei Anwendung abgeschnittener Stöße aus einem Vollstoß mit reduziertem Pegel (z. B. 50 %), einem Vollstoß mit 100 % des Prüfpegels, einem abgeschnittenen Stoß mit reduziertem Pegel, zwei abgeschnittenen Stößen mit vollen Prüfpegel und schließlich zwei 100-%-Vollstößen. Während der Prüfung wird neben der Stoßspannung mindestens ein Stromsignal erfaßt und aufgezeichnet. Bevorzugt handelt es sich dabei um einen kapazitiv auf ein anderes Wicklungssystem übertragenen Strom. In Einzelfällen werden bis zu drei Stromsignale registriert, unter Einschluß des erdseitigen Stromes der gestoßenen Wicklung. Dieser Strom wird in der Prüftechnik als 'Stoßstrom' bezeichnet.

Die Beurteilung der Blitzstoßspannungsprüfung erfolgt durch den visuellen Vergleich der Zeitverläufe der Stoßspannung und des Stoßstromes. Falls keine nichtlinearen Elemente (z. B. ZnO-Elements zur Spannungsbegrenzung) im Transformator von Einfluß sind, müssen die Spannungs- und Stromverläufe des reduzierten Vollstoßes und des ersten 100-%-Vollstoßes exakt übereinstimmen. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Zeitverläufe der Meßgrößen Stoßspannung und Stoßstrom aus den vor und nach den abgeschnittenen Stößen durchgeführten Vollstößen übereinstimmen. Erfahrene Prüfengeieure können durch den visuellen Vergleich der Zeitverläufe auch kleinste Unregelmäßigkeiten entdecken, die auf einen Fehler im Transformator schließen lassen. Die durch Zündunregelmäßigkeiten des Stoßgenerators verursachten geringen Abweichungen in der Spannungsimpulsform können stärkere Abweichungen in den Stromsignalen zur Folge haben. Daraus resultieren nicht selten lange und kontroverse Diskussionen zwischen dem Kunden und dem Hersteller [4]. Bei abgeschnittenen Stoßspannungen ist ein Vergleich der Zeitverläufe wegen des stets vorhandenen Jitters der Abschneidezeit und der dadurch verursachten Unterschiede in den Meßsignalen nach der Abschneidung nur bei Einsatz von präzise arbeitenden mehrfach getriggerten Abschneidefunkenstrecken möglich.

Dieses bislang angewandte Verfahren zur Beurteilung der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren kann durch eine seit etwa 15 Jahren diskutierte Methode - der **Analyse der Übertragungsfunktion** aus Stoßstrom und Stoßspannung - ergänzt werden [5]. Die in digitalisierter Form vorliegenden Signale werden dabei mit Hilfe der FFT vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert. Eine anschließende Division der so bestimmten Spektren führt dann zur Übertragungsfunktion. Die Systemübertragungsfunktion eines linearen und zeitinvarianten elektrischen Netzwerkes beschreibt das Netzwerk vollständig und ist daher theore-

tisch unabhängig vom Eingangssignal. Für Blitzstoßvorgänge können Transformatoren als linear betrachtet werden. Veränderungen der Form der anregenden Stoßspannung haben also - zumindest theoretisch - keinen Einfluß auf die Übertragungsfunktion. Malewski [6] beschreibt Methoden der digitalen Signalverarbeitung zur Berechnung der Übertragungsfunktion aus den bei der Stoßspannungsprüfung an Transformatoren gemessenen Signalen. Veränderungen der Übertragungsfunktion infolge interner Transformatordefekte werden am Beispiel einer Wicklung mit eingebauten Fehlerstellen untersucht. Die Übertragungsfunktion der Wicklung mit Fehlerstellen zeigt eine Neubildung von Resonanzen, abhängig vom Fehlerort. Aber auch bei defektfreiem Prüfobjekt führt der Vergleich von Übertragungsfunktionen aus vollen und abgeschnittenen Stoßspannungen zu nennenswerten Abweichungen, insbesondere bei höheren Frequenzen.

Malewski und Gockenbach [6] schlagen ein RLC-Kettenleiternetzwerk als Ersatzschaltung für Transformatorwicklungen zur Erklärung der Veränderungen der Übertragungsfunktion bei Durchschlägen der Isolation und bei Teilentladungen innerhalb des Prüflings vor. Demgemäß weisen auch kleinere Verschiebungen der Resonanzfrequenzen auf einen Durchschlag hin, da kein anderer Mechanismus die Resonanzfrequenzen einer Wicklung bei Steigerung der Stoßspannung verändern kann. In Versuchen wurde beobachtet, daß sich Teilentladungen durch eine Reduktion der Polhöhen äußern. Teilentladungen zwischen Wicklungen oder zwischen Wicklung und Kessel werden vereinfachend durch zusätzliche hochohmige Widerstände in der RLC-Kettenleiterschaltung modelliert, wodurch die Reduktion der Polhöhen der Übertragungsfunktion beim Auftreten von Teilentladungen erklärt wird.

Malewski et al [7] fassen die in 5 Jahren angefallene Erfahrung mit der Anwendung der Übertragungsfunktion in Verbindung mit digitalen Meßsystemen bei der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren zusammen. Es werden einige Beispiele von Fehlern in Transformatoren vorgestellt, bei denen es zu einer Neubildung von Resonanzen in der Übertragungsfunktion kommt. Weiterhin wird gezeigt, daß ein Überschlag in einem Widerstand des Stoßgenerators zwar die Impulsform der Stoßspannung ändert, nicht jedoch die aus Stoßspannung und Stoßstrom berechnete Übertragungsfunktion des Prüfobjektes.

2. Stoßausmessungen an Transformatoren und Wicklungen

Die Spannungsverteilung in Wicklungen bei Schalt- und Blitzstoßbeanspruchung werden heute prinzipiell gerechnet. Berechnungsverfahren zur Bestimmung der transienten Spannungen in Wicklungen sind sehr weit entwickelt und liefern für die Auslegung zuverlässige Ergebnisse. Auf Wunsch von Kunden oder zur Überprüfung neu konstruierter Wicklungen und Wicklungsaufbauten werden Stoßspannungsausmessungen am Aktivteil oder am fertigen Transformator vorgenommen. Dazu wird am Wicklungseingang eine Stoßspannung (U_1) mit einem Scheitelwert von einigen 100 Volt gegen Erde eingespeist und die Spannungen (U_2) an den Anzapfungen längs der Wicklung oder an anderen nichtgestoßenen Klemmen gemessen. Damit erhält man über eine Berechnung hinaus letzte Sicherheit über die richtige Bemessung der Wicklungsisolation.

Bild 1 zeigt den Aufbau zur Stoßspannungsausmessung. Ein Repetitionsstoßgenerator (RSG) erzeugt periodisch Stoßspannungen. Dabei kommen üblicherweise entweder volle Blitzstoßspannungen der Wellenform $1,2/50\text{ }\mu\text{s}$, d. h. mit einer Rückenhalbwertszeit von $50\text{ }\mu\text{s}$ und einer Stirnzeit von $1,2\text{ }\mu\text{s}$ oder abgeschnittene Stoßspannungen mit einer Abschneidezeit im Bereich zwischen $2\text{ }\mu\text{s}$ und $6\text{ }\mu\text{s}$ zum Einsatz. Es werden die Impulsspannung und eine oder mehrere Spannungen an den Wicklungsanzapfungen oder den Klemmen von Wicklungen erfaßt. Ein digitales Speicheroszilloskop (DSO) digitalisiert die analogen Signale, die dann von einem Computer (PC) verarbeitet, gespeichert und visulaisiert werden. Ein Drucker (DR) dient zur Ausgabe des fertigen Prüfprotokolls.

Grundsätzlich kann zwischen zwei Meßaufbauten unterschieden werden. Bei der Stoßspannungsverteilungsmessung von Wicklungen oder Messugen am offenen Aktivteil eines Transformators liegen Abstände von nur wenigen Metern zwischen Versuchsobjekt und Meßaufbau vor. Die Spannung wird durch Tastköpfe abgegriffen, um die kapazitive Belastung der Meßstelle an der Wicklung möglichst gering zu halten und damit eine Verfälschung der Messung zu minimieren. Bei Messungen an fertigen Transformatoren sind die Abstände zwischen Prüfobjekt und Meßsystem so groß, daß die Meßleitungen bereits zu einem nennenswerten Einfluß auf die Messungen führen. Um dennoch zuverlässige Meßergebnisse zu erzielen, kann eine Lichtwellenleiterverbindung zur Signalübertragung zum Einsatz kommen (Bild 1b). Elektrooptische Wandler (EO) setzen die elektrischen Signale in Lichtsignale um, die in einen Lichtwellenleiter (LWL) eingekoppelt werden. Am Ende der Übertragungsstrecke wird das Lichtsignal wieder in ein elektrisches Signal durch einen opto-elektrischen Wandler (OE) umgesetzt. Auf diese Weise können Probleme durch einen räumlich ausgedehnten Versuchsaufbau weitestgehend vermieden werden. Bei Messungen an fertigen Transformatoren sind innere Spannungsbeanspruchungen nur noch teilweise zugänglich, z. B. über die Lastschalterkontakte. Spannungsbeanspruchungen an Stammwicklungen sind nicht mehr meßbar. Außerdem ist zu beachten, daß sich bei Messungen am prüffertigen Transformator die Resonanzfrequenzen gegenüber der Messung am offenen Aktivteil aufgrund der dort fehlenden Ölisolierung um ca. 20% ändern

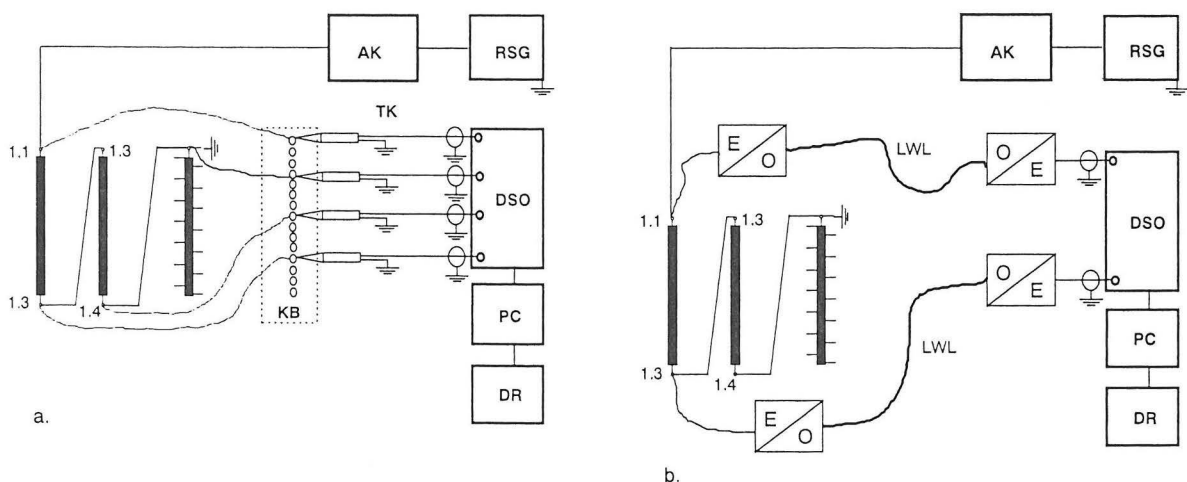


Bild 1 Versuchsaufbau zur Stoßspannungsverteilungsmessung von Transformatoren und Wicklungen
a. Messung mit Tastköpfen (potentialgebunden)
b. optoelektronische Signalübertragung (potentialgetrennt)

Bild 2 zeigt die Prinzipschaltung eines 300-MVA-Netztransformators (400 kV/120 kV/30 kV) bei der Messung sowie einige Meßergebnisse. Am fertig montierten Transformator sind die Stufenwicklungsbeanspruchungen nur noch über die Lastschalterkontakte beschränkt zugänglich; Messungen innerer Spannungsbeanspruchungen müssen deshalb am Aktivteil durchgeführt werden. Dargestellt sind die an Phase 1U gegen Erde angelegte Impulsspannung mit einem Scheitelwert von etwa 100 V, die Spannung an Phase 2U gegen Erde sowie die Spannung zwischen den Phasen 3U und 3W. Im vorliegenden Fall ergibt sich eine Spannungsbeanspruchung an den Klemmen des Mittelspannungssystems (System 2) von ca. 12 % und ca. 4 % an den Klemmen des Tertiärsystems (System 3) bei Einspeisung von Blitzstoßspannungen (1,2/50 μ s) an der Oberspannungsseite (System 1). In gleicher Weise werden nun auch innere Beanspruchungen, z. B. an den Anzapfungen der Stufenwicklung gemessen und entsprechend bewertet.

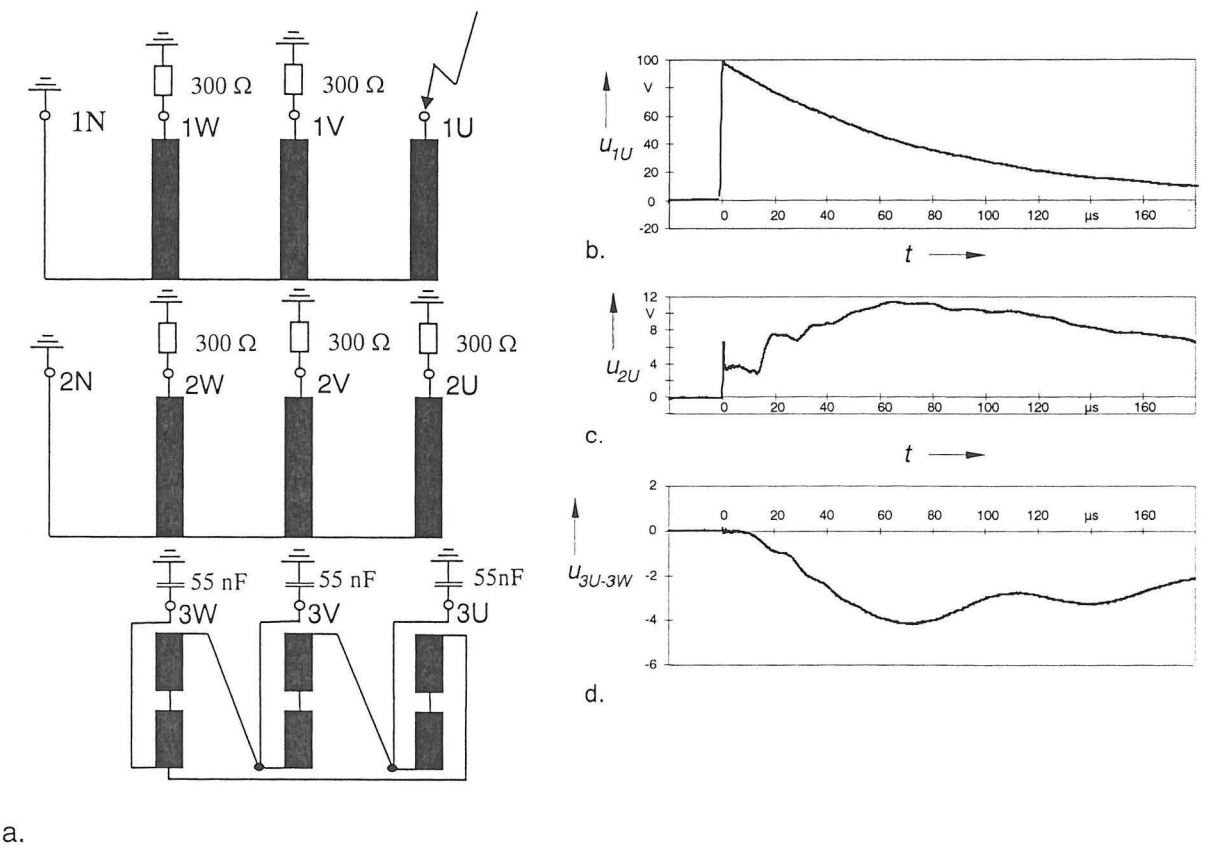


Bild 2. Versuchsaufbau zur Stoßspannungsverteilungsmessung von Transformatoren und Wicklungen
a. Prinzipschaltung des Transformators bei der Stoßspannungsmessung
b. Stoßspannung an 1U gegen Erde
c. auf 2U gegen Erde übertragene Spannung
d. auf 3U gegen 3W übertragene Spannung

Aus den Signalen wie sie bei der Stoßausmessung eines Transformators aufgezeichnet werden, lassen sich auch Übertragungsfunktionen bestimmen. Dies können beispielsweise die Übertragungsfunktionen aus der anregenden und der übertragenen Spannung an jeder Phase sein. Diese Übertragungsfunktionen können dann als Fingerprint für spätere Messungen im Betrieb des Transformators dienen.

3. Frequenzgangmessungen

Die Messung der Eingangsimpedanz einer Wicklung aus der anliegenden Spannung und dem in die Wicklung fließenden Strom liefert wichtige Informationen über das Schwingungsverhalten der Wicklung. Hier wird zur Messung ein Netzwerkanalysator verwendet, der eine sinusförmige Spannung mit variabler Frequenz liefert. Der Strom wird üblicherweise als Spannungsabfall an einem Shunt gemessen.

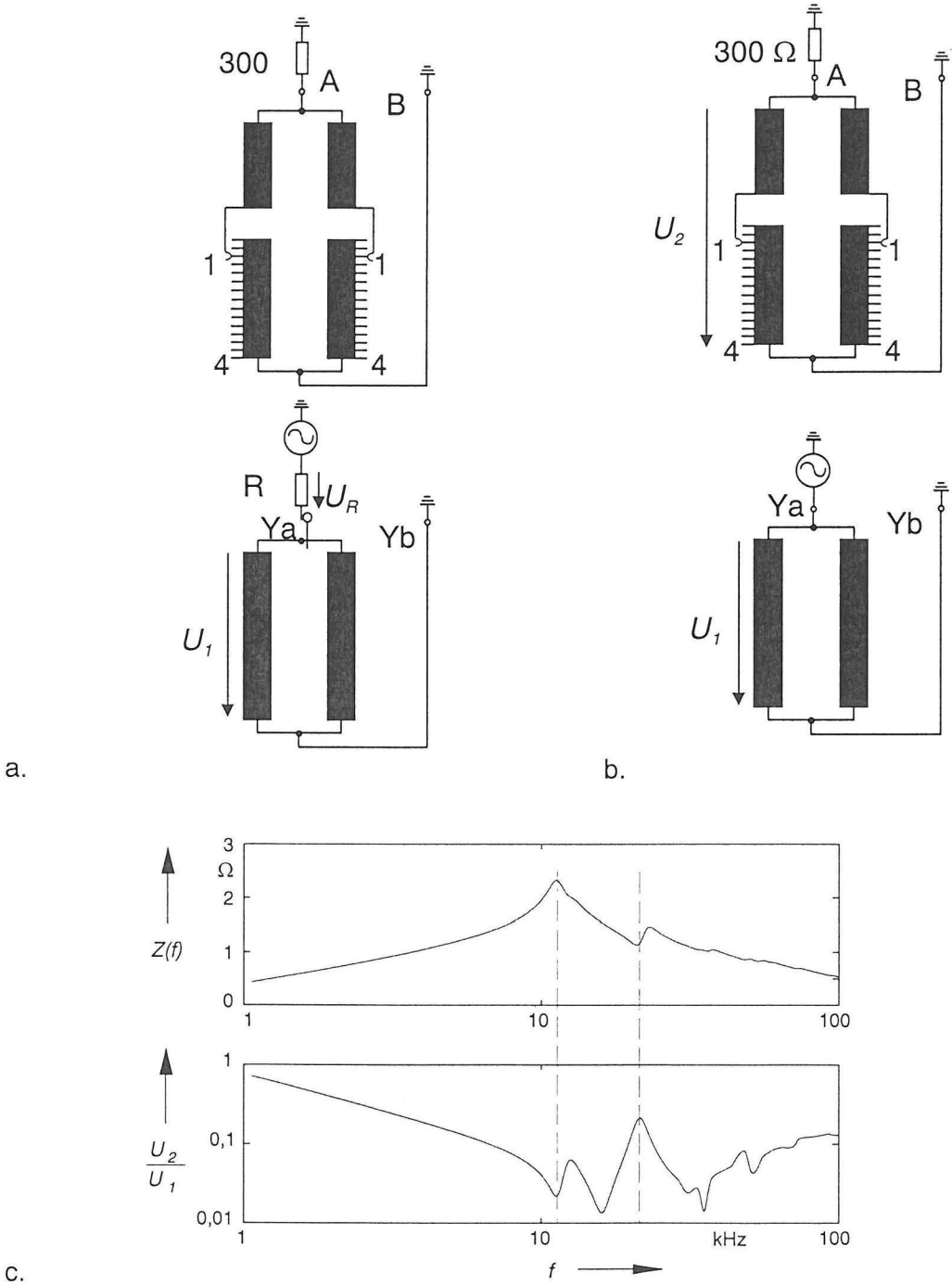


Bild 3. Messung der Eingangsimpedanz und der übertragenen Spannung an einem 283-MVA-HGÜ-Transformator
a. Prinzipschaltbild zur Messung der Eingangsimpedanz
b. Prinzipschaltbild zur Messung der übertragenen Spannung
c. Eingangsimpedanz und Übertragungsverhältnis U_2/U_1

Man unterscheidet Reihen- und Parallelresonanzen. Parallelresonanzfrequenzen in Transformatoren äußern sich durch ein Maximum der Eingangsimpedanz. Diese sind unkritisch für innere Spannungsbeanspruchungen. Der Transformator verhält sich an seinen Klemmen wie ein in Resonanz befindlicher Parallelschwingkreis. Die Minima in den Frequenzgangkurven der Eingangsimpedanz weisen auf die sehr kritischen Reihenresonanzfrequenzen hin. Bei Reihenresonanzfrequenzen können bis ca. 100-fache Spannungsüberhöhungen bezogen auf die 50-Hz-Beanspruchung auftreten. Bild 3 zeigt das Prinzipschaltbild zur Messung der Eingangsimpedanz und der übertragenen Spannung von der Ventilwicklung auf die Netzwicklung eines 283-MVA-HGÜ-Transformators. Deutlich ist die Resonanzstelle in der übertragenen Spannung an der Stelle minimaler Eingangsimpedanz erkennbar. Umgekehrt zeigt die Stelle maximaler Eingangsimpedanz ein Minimum im Frequenzgang der übertragenen Spannung.

Bei Leistungstransformatoren > 100 MVA liegen die Wicklungsresonanzen abhängig von der jeweiligen Wicklungskonzeption etwa in folgenden Bereichen:

	Stammwicklung	Stufenwicklung
US	10 ... 30 kHz	-
MS	10 ... 40 kHz	40 ... 100 kHz
OS	15 ... 60 kHz	30 ... 100 kHz

Bei ineinandergewickelten und verschachtelten Spulenwicklungen können die Resonanzfrequenzen zwischen einzelnen Spulen einige 100 kHz und zwischen Leitern ca. 1 MHz betragen.

Die Frequenzganganalyse kann aber noch weit mehr Informationen über innere Spannungsbeanspruchungen in Wicklungen liefern. Bild 4 zeigt dies am Beispiel eines Maschinentransformators [8], bestehend aus der Unterspannungswicklung (US), der Oberspannungswicklung (OS) mit Mitteneingang und der aus zwei Teilen aufgebauten Stufenwicklung (ST).

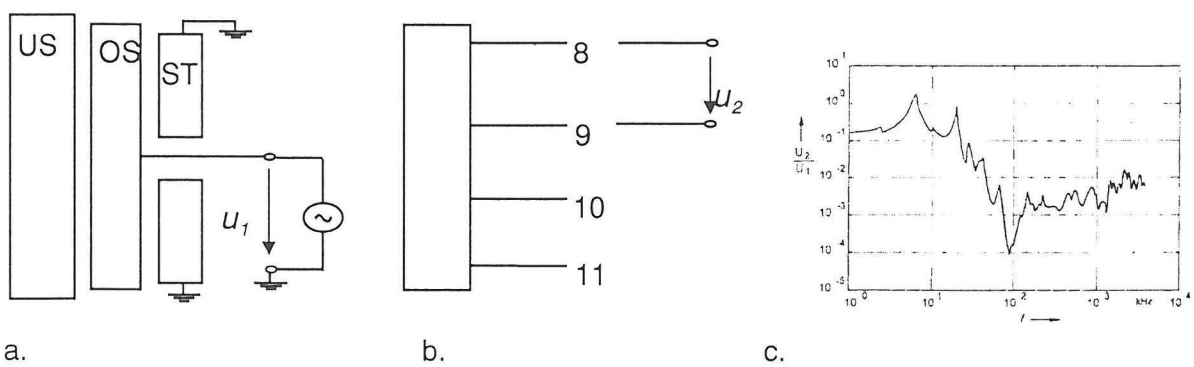


Bild 4. Prinzipschaltbild zur Messung der Schwingungseigenschaften eines Maschinentransformators
a. Wicklungsaufbau
b. Ausschnitt der Stufenwicklung
c. Übertragungsfunktion U_2/U_1

Zur Frequenzgangmessung wird eine sinusförmige Spannung (u_1) mit variabler Frequenz an der Oberspannungsklemme einer Phase gegen Erde eingespeist. Um beispielsweise das Schwingungsverhalten der außenliegenden Stufenwicklung zu ermitteln wird neben der anregenden Sinusspannung u_1 die Spannung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anzapfungen (u_2) gemessen. Ein Vektoranalysator (Netzwerkanalysator) bildet dann den Quotienten nach Betrag und Phase aus den beiden Spannungen. Aus der Messung kann der sogenannte Überspannungsfaktor für jede Resonanz (f_{res}) gemäß

$$k_{Ü} = \frac{\left. \frac{U_2}{U_1} \right|_{f=f_{res}}}{\left. \frac{U_2}{U_1} \right|_{f=f_0=50 \text{ Hz}}}$$

ermittelt werden. Der Wert von $K_{Ü}$ gibt an, um welchen Faktor die Spannung zwischen zwei Wicklungsanzapfungen bei einer Resonanzfrequenz f_{res} gegenüber der Spannung bei Betriebsfrequenz erhöht ist.

4. Nachweis der dynamischen Kurzschlußfestigkeit

Nach den derzeit gültigen Normen gilt die Stoßkurzschlußprüfung von Leistungstransformatoren als bestanden, wenn sich die Kurzschlußimpedanz des Transformators um nicht mehr als 2 % des ursprünglichen Wertes ändert. Als zusätzliche Methode zur Detektion mechanischer Änderungen im Wicklungsaufbau ist die Analyse der Frequenzganges bzw. der Übertragungsfunktion des Transformators in der Diskussion.

An einem 125-MVA-Transformator (240 kV/53 kV) wurden vor und nach der Stoßkurzschlußprüfung Messungen der Übertragungsfunktion in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart vorgenommen [9]. Dazu wurden Niederspannungsimpulse bis ca. 800 V mit einem Impulsgenerator erzeugt und überspannungsseitig in den Transformator eingespeist (Bild 5). Gemessen und digital aufgezeichnet wurden die Impulsspannung, die übertragene Spannung auf der Unterspannungsseite an allen drei Phasen und der Strom vom Sternpunkt gegen Erde. Anschließend wurde mit Hilfe der numerischen Fouriertransformation (FFT, Fast Fourier Transform) das Spektrum der Signale im Frequenzbereich berechnet. Aus dem Quotienten von Anregungssignal $x(t)$ und Systemantwort $y(t)$ ergibt sich eine Übertragungsfunktion, deren Betrag auch als Frequenzgang bezeichnet wird.

Das Analyseverfahren besteht darin, Übertragungsfunktionen aus Messungen vor und nach der Stoßkurzschlußprüfung miteinander zu vergleichen. Ergeben sich Abweichungen, so deutet dies - zumindest theoretisch - auf Veränderungen im Transformator hin. Die Messungen haben allerdings gezeigt, daß eine ganze Reihe von Einflüssen außerhalb des Transformators wirksam sind, die eine Interpretation der Meßergebnisse erschweren. Dies soll an zwei Beispielen demonstriert werden. Bild 5b zeigt den Vergleich der Übertragungsfunktionen aus der an 1W angelegten Spannung und dem Sternpunktstrom aus Messungen vor und nach der Kurzschlußprüfung. Im unteren Frequenzbereich bis ca. 450 kHz ergeben sich kei-

ne Abweichungen, wohl aber im Frequenzbereich jenseits dieser Grenze. Bild 5c zeigt den Vergleich der Übertragungsfunktionen aus zwei Messungen, die nach der Prüfung durchgeführt wurden. Es wurde lediglich die Lage der Leitung vom Sternpunkt der Transformators zur Erdanbindung geändert. Direkt am Erdungspunkt wurde diese Leitung durch eine Rogowskispule zur Strommessung geführt. Das Resultat dieser Modifikation des Meßaufbaus sind Abweichungen der Übertragungsfunktionen im Bereich jenseits einiger 100 kHz, wie sie prinzipiell auch Bild 5b zeigt.

Ein wichtiger Einflußfaktor auf die Ergebnisse der Frequenzgangmessung ist also die Zuführung der Signale zum Meßwandler - in diesem Falle die Rogowskispule zur Strommessung - und zum Speicheroszilloskop. Versuche haben gezeigt, daß auch bei der Spannungsmessung die Leitungsführung einen Einfluß auf das Meßergebnis hat. Der Meßaufbau zur Frequenzgangmessung muß während der Stoßkurzschlußprüfung zwangsläufig abgebaut sein. Insbesondere die Leitungsführung läßt sich auch mit großem Aufwand nicht mehr exakt identisch wiederherstellen. Ziel weiterer Entwicklungen ist es deshalb, Methoden und Verfahren zu finden, die Einflüsse des Meßaufbaus auf die Meßergebnisse soweit zu minimieren, daß sie eine Interpretation nicht mehr stören. Ein weiterer wichtiger Schritt für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist die Definition von Akzeptanz- oder Ablehnungskriterien. Es muß geklärt werden, welche Abweichungen der Übertragungsfunktionen noch zulässig sind, und welche Differenzen mit Sicherheit auf Veränderungen im Wicklungsaufbau des untersuchten Transformators schließen lassen.

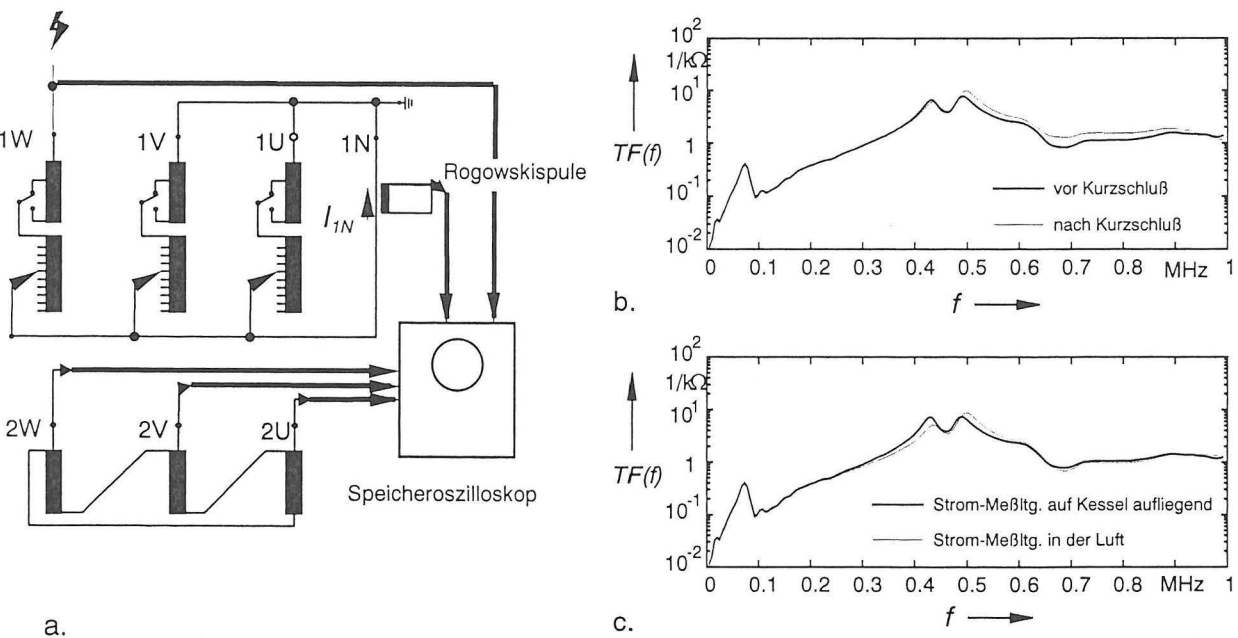


Bild 5. a. Prinzipschaltbild des Meßaufbaus zur Frequenzgangmessung an dem 125-MVA-Transformator
 Übertragungsfunktionen aus dem Sternpunktstrom und der anregenden Spannung an 1W
 b. vor und nach der Prüfung
 c. nach der Prüfung und leichter Modifikation der Signalleitungsführung

5. Erkennung von Transportschäden

Die Analyse der Übertragungsfunktion eignet sich prinzipiell auch zur Detektion von Transportschäden, d. h. mechanischen Veränderungen im Aktivteil bzw. Wicklungsaufbau von Transformatoren durch unsachgemäßen Transport. Voraussetzung dafür ist, daß Übertragungsfunktionen aus Messungen im Prüffeld des Herstellers und aus Messungen Vor Ort vergleichbar sind. Um dies zu überprüfen, wurden sowohl im Prüffeld als auch direkt nach der Montage eines 350-MVA-Transformators Vor Ort Niederspannungsimpulse nacheinander an allen drei Klemmen der Oberspannungsseite eingespeist [10]. Gemessen wurden die anregende Spannung an 1V, der Sternpunktstrom (1N) und die übertragende Spannung auf die Mittelspannungsseite (2V). Bild 6 zeigt den Vergleich der aus Messungen im Prüffeld und Vor Ort bestimmten Übertragungsfunktionen aus dem Sternpunktstrom und der übertragenen Spannung auf die 110-kV-Seite bei Einspeisung an 1V.

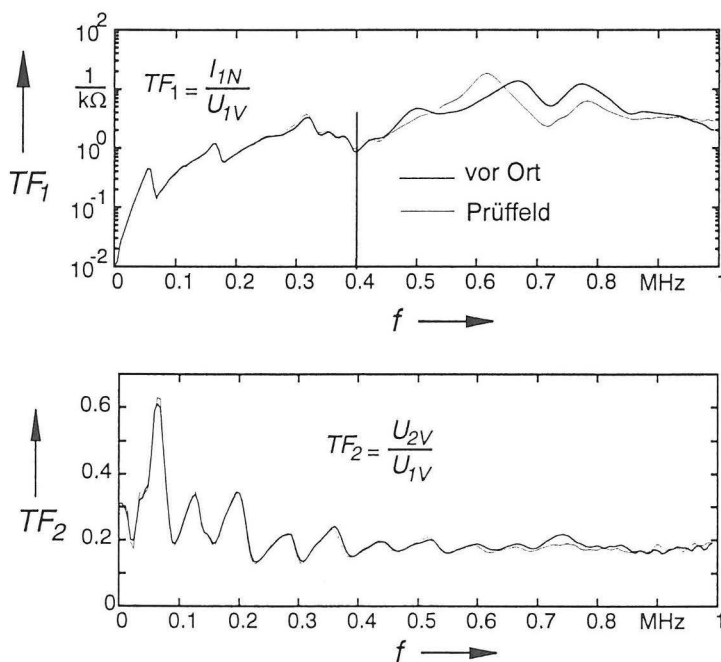


Bild 6. Vergleich verschiedener Übertragungsfunktionen eines 350-MVA-Transformators aus Messungen Vor Ort und im Prüffeld

Bei der Übertragungsfunktion aus dem Sternpunktstrom und der anregenden Spannung (TF_1 , Bild 6) ergibt sich eine gute Übereinstimmung aus Prüffeld- und Vor-Ort-Messungen bis ca. 400 kHz. Die sich bei höheren Frequenzen ergebenden Abweichungen lassen sich auf den Einfluß der unterschiedlichen Erdungsbedingungen zurückführen. Vor Ort ist der Transformator außer an den dafür vorgesehenen Erdungspunkten an vielen weiteren Stellen geerdet, z. B. über die Kabelschirme von Versorgungs- und Steuerungskabeln. Selbst bei sehr großem Aufwand ist es in der Praxis nicht möglich, die Erdungsverhältnisse, die im Prüffeld vorherrschen, Vor Ort identisch auszuführen. Die Übertragungsfunktionen aus der übertragenen Spannung und der Anregung an 1V (TF_2 , Bild 6) zeigen über den gesamten Frequenzbereich eine sehr gute Übereinstimmung. Unterschiedliche Erdungsverhältnisse wirken sich auf diese Übertragungsfunktion nur schwach aus.

Die in Bild 6 dargestellte Messung zeigt, daß eine Detektion von Transportschäden durch den Vergleich von Übertragungsfunktionen aus Prüffeldmessungen und Vor-Ort-Messungen realisierbar ist, wobei der Vergleich von Übertragungsfunktionen aus dem Sternpunktstrom auf den Frequenzbereich bis einige 100 kHz beschränkt bleiben muß.

6. Anwendung der Übertragungsfunktion bei der Stoßspannungsprüfung

6.1 Allgemeines

Die Analyse der Übertragungsfunktion (Transferfunktionsanalyse) wird als zusätzliches Verfahren zur Bewertung der Stoßspannungsprüfung im Transformatorenwerk Nürnberg seit ca. 10 Jahren untersucht.

In den letzten Jahren wurden Rechnerprogramme zur Bestimmung der Spannungsbeanspruchungen in Wicklungen, zwischen Wicklungen und von Wicklungen gegen Erde ständig weiterentwickelt und perfektioniert. Schäden im Prüffeld bei der Stoßspannungsprüfung sind aufgrund der verbesserten Genauigkeit dieser Rechnerprogramme sehr selten geworden. Eine systematische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Veränderung der Übertragungsfunktion und dem Fehler mit dem Ziel einen „Fehlerkatalog“ aufzubauen ist deshalb ein schwieriges und langwieriges Unterfangen. Hinzu kommt, daß Stoßspannungsschäden mit einem Zusammenbruch der Stoßspannung kaum sinnvoller Eingang in diesen Fehlerkatalog finden können. Ein solcher Fehler kann klar auch durch den Vergleich der Zeitverläufe von Stoßspannung und Stoßstrom erkannt werden. Ein sinnvoller Einsatz der Übertragungsfunktion ist nur bei „kleineren“ Stoßspannungsschäden gegeben, bei denen im wesentlichen eine Abweichung des Stoßstromes vorliegt.

Transformatorwicklungen können vereinfacht durch einen Kettenleiter, bestehend aus Induktivitäten, Widerständen, Serienkapazitäten zwischen Wicklungselementen sowie Kapazitäten von Wicklungselementen gegen Erde modelliert werden. Basierend auf dieser Modellvorstellung kann eine Teilentladung durch einen ohmschen Widerstand zwischen Wicklungen oder von der Wicklung gegen Erde nachgebildet werden. In dem Widerstand wird Energie in Wärme umgesetzt. Elektrisch gesehen bedeutet der ohmsche Widerstand eine zusätzliche Schwingkreisdämpfung. Teilentladungen während des Stoßvorganges haben demgemäß Abflachungen der Polhöhe zur Folge. Durchschläge der Isolation haben eine starke Änderung der kapazitiven und induktiven Verhältnisse in der Wicklung zur Folge. Dies führt zu einer Verschiebung oder zu einer Neubildung von Resonanzstellen. Gerade die Abflachung von Polen der Übertragungsfunktion als Folge von Teilentladungen konnte in der Praxis nicht als allgemeingültig bestätigt werden. Untersuchungen mit künstlichen Fehlerstellen zeigten jedoch grundsätzlich eine Veränderung der Polhöhen der Übertragungsfunktion, während die Resonanzfrequenzen selbst unverändert blieben. Es hat sich dabei gezeigt, daß nur sehr starke Teilentladungen zu einer Veränderung der Übertragungsfunktion führen.

Zur akustischen Ortung der Teilentladungsstelle bei der Stoßspannungsprüfung werden die von Vorentladungen erzeugten Schallwellen mit Mikrofonen erfaßt, die an der Kesselwand

befestigt sind. Die Zeit zwischen der Stoßspannung und dem Auftreffen der Schallwelle am Mikrophon an der Kesselwand erlaubt die Lokalisierung der Fehlerstelle. Die Prüfpraxis zeigt jedoch, daß derartige Vorentladungen zu keiner deutlichen Änderung der Übertragungsfunktion führen.

6.2 Fehler im Meßkreis

Dennoch gibt es eine Reihe von Fällen, bei denen die Übertragungsfunktion erfolgreich eingesetzt wurde. Bild 7 zeigt den Vergleich von Übertragungsfunktionen aus den Aufzeichnungen von Stoßspannung und Stoßstrom bei der Prüfung eines 300MVA/230 kV Transformators. Zunächst wurde aufgrund der Differenzen im Wicklungsstrom ein Defekt im Transformator befürchtet. Die Übertragungsfunktion zeigt jedoch keine Änderung der Resonanzfrequenzen. Dies deutete darauf hin, daß es sich hier um ein Problem im Meßkreis handeln dürfte. Eine genauere Untersuchung zeigte, daß es an einer Leiter Überschläge zur Transportplattform gab. Damit ergab sich ein zweiter Erdungspfad. Die Gestalt der Übertragungsfunktionen in Bild 7a ist unverändert, Änderungen zeigen lediglich die Polhöhen. Dies läßt auf ein Abfließen eines Stromes, nicht jedoch auf einen Defekt im Inneren des Transformators schießen. Hier kann die Analyse der Übertragungsfunktion helfen, schneller der Ursache für eine Abweichung auf die Spur zu kommen. Nachdem die Leiter entfernt war, ergab sich keine Veränderungen der Zeitverläufe von Stoßspannung und Stoßstrom sowie der Übertragungsfunktionen mehr.

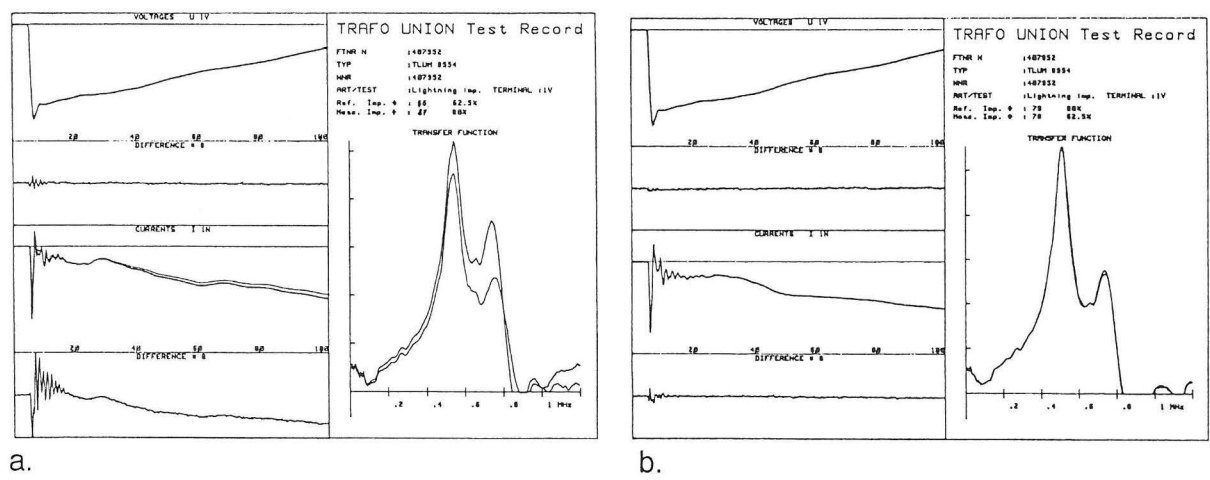


Bild 7. Analyse der Übertragungsfunktion während der Stoßspannungsprüfung an einem 300-MVA-Transformator

a. mit Fehlerindikation, verursacht durch eine Entladung im Meßkreis

b. ohne Fehlerindikation, nach Beseitigung der Fehlerstelle

6.3 Fehler in Transformatoren bei der Stoßspannungsprüfung

Bild 8 zeigt die Aufzeichnungen der Blitzstoßspannung, der Stoßstromes vom OS-Sternpunkt (i_{OS}) gegen Erde, den Strom der MS- (i_{MS}) und US-Wicklung (i_{US}) gegen Erde bei der Stoßspannungsprüfung der Phase 1U eines 300-MVA-Transformators (400 kV / 115,5 kV / 31,5 kV). Nach ca. 45 μ s kam es zu einem internen Durchschlag. Der Durchschlag trat in der

Stufenwicklung auf. Deshalb ist die Änderung des Stromes von OS-Sternpunkt gegen Erde deutlich stärker als die Änderung der anderen Ströme. Der Durchschlag ist an der Änderung der Zeitverläufe klar erkennbar. Bild 9 zeigt die Übertragungsfunktion aus Stoßspannung und den Stoßströmen. Auch die drei Übertragungsfunktionen aus der Stoßspannung, dem Sternpunkt gegen Erde (i_{OS}), dem Strom der MS-Wicklung gegen Erde (i_{MS}) und dem Strom der US-Wicklung gegen Erde (i_{US}) zeigen eine deutliche Fehlerindikation. Die Oszillation in der Übertragungsfunktion ist typisch bei einem internen Durchschlag und wurde auch schon bei anderen Fällen eines internen Durchschlages bei der Stoßspannungsprüfung beobachtet.

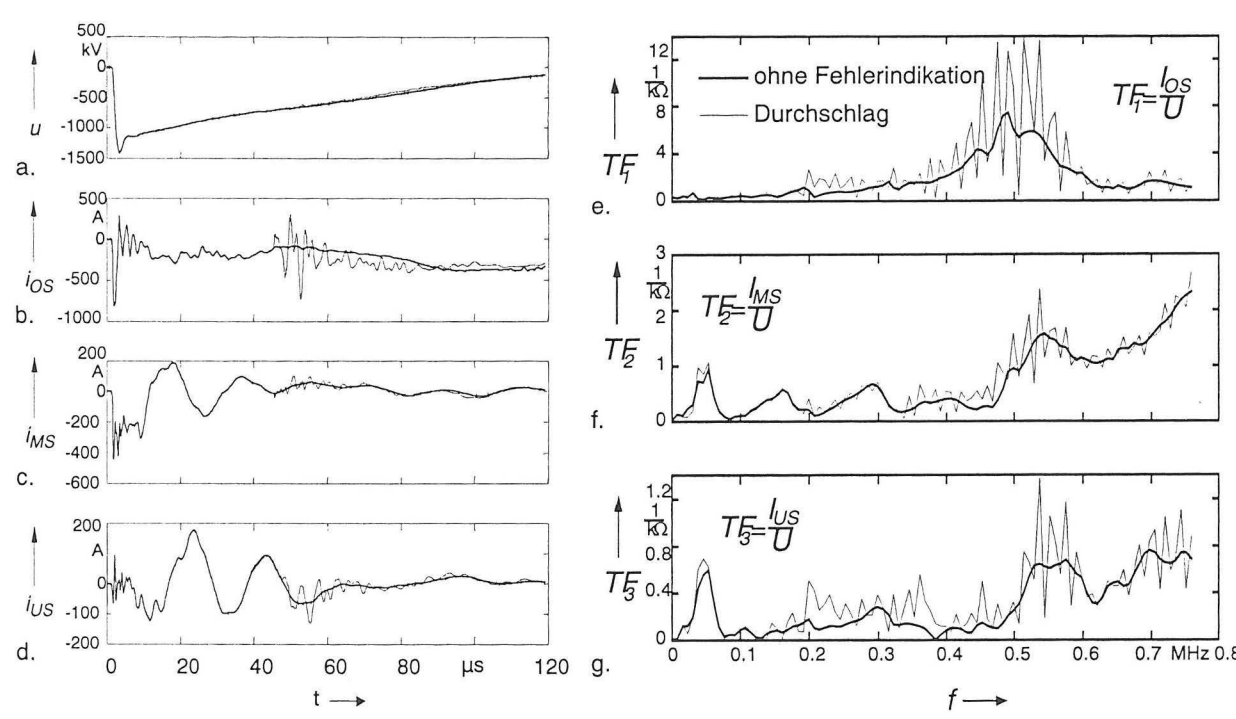


Bild 8. Aufzeichnungen der Stoßspannungsprüfung eines 300-MVA-Transformators mit und ohne Fehlerindikation und Vergleich der Übertragungsfunktionen mit und ohne Fehlerindikation

- a. Stoßspannung
- b. Sternpunktstrom von der OS-Wicklung gegen Erde
- c. Strom des MS-Systems gegen Erde
- d. Strom des US-Systems gegen Erde
- e. Übertragungsfunktion aus Stoßspannung und Sternpunktstrom gegen Erde
- f. Übertragungsfunktion aus Stoßspannung und Strom des MS-Systems gegen Erde
- g. Übertragungsfunktion aus Stoßspannung und Strom des US-Systems gegen Erde

6.4 Empfindlichkeit der Übertragungsfunktionsanalyse

Gemäß der vereinfachten Theorie zur Analyse der Übertragungsfunktion äußern sich Teilentladungen im Transformator durch Polabflachungen. Im folgenden wird über die Empfindlichkeit der Übertragungsfunktion bezüglich Teilentladungen berichtet. In Bild 10 ist die Schaltung bei der Stoßprüfung dargestellt. Der Oberspannungsanschluß der gestoßenen Phase ist über einen Widerstand einsprechend der Netzimpedanz geerdet, die Anschlüsse

der nichtgestoßenen Phasen sind direkt geerdet und die Anschlüsse der Tertiärwicklung sind miteinander verbunden und für die Erfassung des kapazitiv auf die Tertiärwicklung übertragenen Stromes, des sogenannten Sondenstromes, über einen Strommeßshunt geerdet.

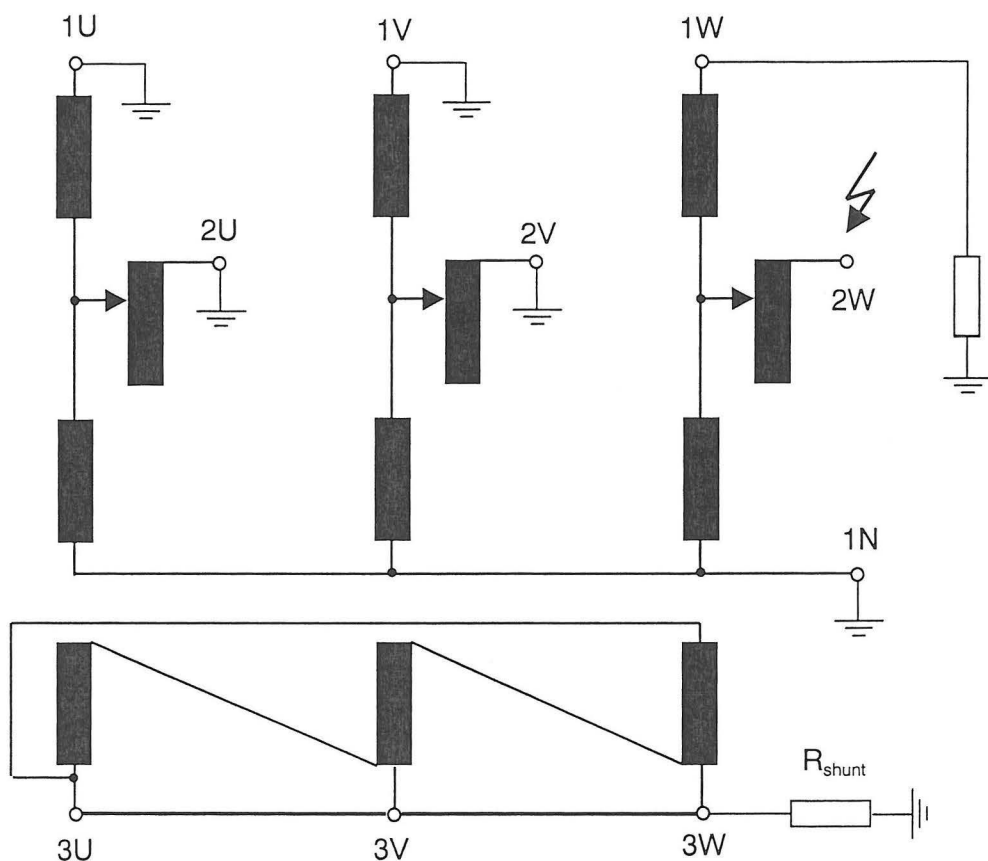


Bild 10. Vereinfachtes Prinzipschaltbild bei der Stoßspannungsprüfung eines 125-MVA Dreiphasenspartransformators

Bild 11 zeigt die Aufzeichnungen der Blitzstoßspannung und des in die Tertiärwicklung übertragenen Sondenstromes bei der Stoßspannungsprüfung der US-Wicklung eines 125-MVA-Spartransformators. Bei der Prüfung der Phase 2W kam es beim 3. Vollwellenstoß zu einem Durchschlag. Die Spannung ist dabei ebenfalls eingebrochen. Um die Fehlerstelle zu orten, wurden Mikrophone am Kessel des Transformators angebracht. Die Triggerung des zur Aufzeichnung der Mikrophonsignale verwendeten Speicheroszilloskops erfolgt durch das Stoßspannungssignal. Dabei reicht ein Drahtstück als Antenne aus, um ein Signal im Moment des Zündens des Stoßgenerators zu erhalten. Die akustische Ortung erfolgt mit reduziertem Pegel, und zwar so, daß man nur Vorentladung erhält und es nicht zum vollständigen Durchschlag kommt. Die am Kessel angebrachten hochempfindlichen Mikrophone messen dazu die Laufzeit der durch die Vorentladung ausgelösten Schalldruckwellen vom Augenblick der Stoßspannung bis zum Auftreffen auf der Kesselwand. Mit Hilfe der Laufzeiten zwischen Triggerung und Mikrophonsignal kann man durch geometrische Triangulation den Ort der Entladung und damit der Fehlerstelle ermitteln.

Im vorliegenden Fall wurde ebenfalls eine Stoßspannungsortung vorgenommen. Bild 10a-f zeigt den Vergleich zweier 80-%-Stöße. Einer davon wurde vor dem Durchschlag auf-

gezeichnet, der andere während der Stoßortung, d. h. nach dem Durchschlag. Bei dem zur Stoßortung verwendeten Impuls ergaben sich Mikrophonsignale, d. h. es kam zu einer Vorentladung, welche durch die Mikrophone akustisch erfaßt werden konnte. Der Vergleich der Stoßspannungen (Bild 11a und vergrößert dargestellt Bild 11c) ergibt keine Indikation für die Vorentladung. Es ist allgemein bekannt, daß der Verlauf der aufgegebenen Stoßspannung wesentlich weniger empfindlich hinsichtlich innerer Fehler ist, als die Stoßströme (Wicklung- und/oder Sondenstrom). Im Strom sind Abweichungen erkennbar, die durch Zoomen der Kurven noch klarer werden (Bild 11b und vergrößert dargestellt Bild 11d). Zur besseren Erkennbarkeit der Abweichungen zwischen den Strömen der 80-%-Stöße ist in Bild 11e die Differenz der Ströme dargestellt.

Die Übertragungsfunktionen aus den 80-%-Stößen mit und ohne Vorentladung zeigen geringfügige Abweichungen (Bild 11f). Es ist klar, daß die Übertragungsfunktion höchstens auch nur die in den Zeitverläufen vorhandenen Abweichungen zum Vorschein bringen kann. Diese sind im vorliegenden Fall gering, aber noch erkennbar. Weitere Untersuchungen müssen folgen, um die Möglichkeiten und Grenzen der Analyse der Übertragungsfunktion zur Erkennung von Vorentladungen auszuloten.

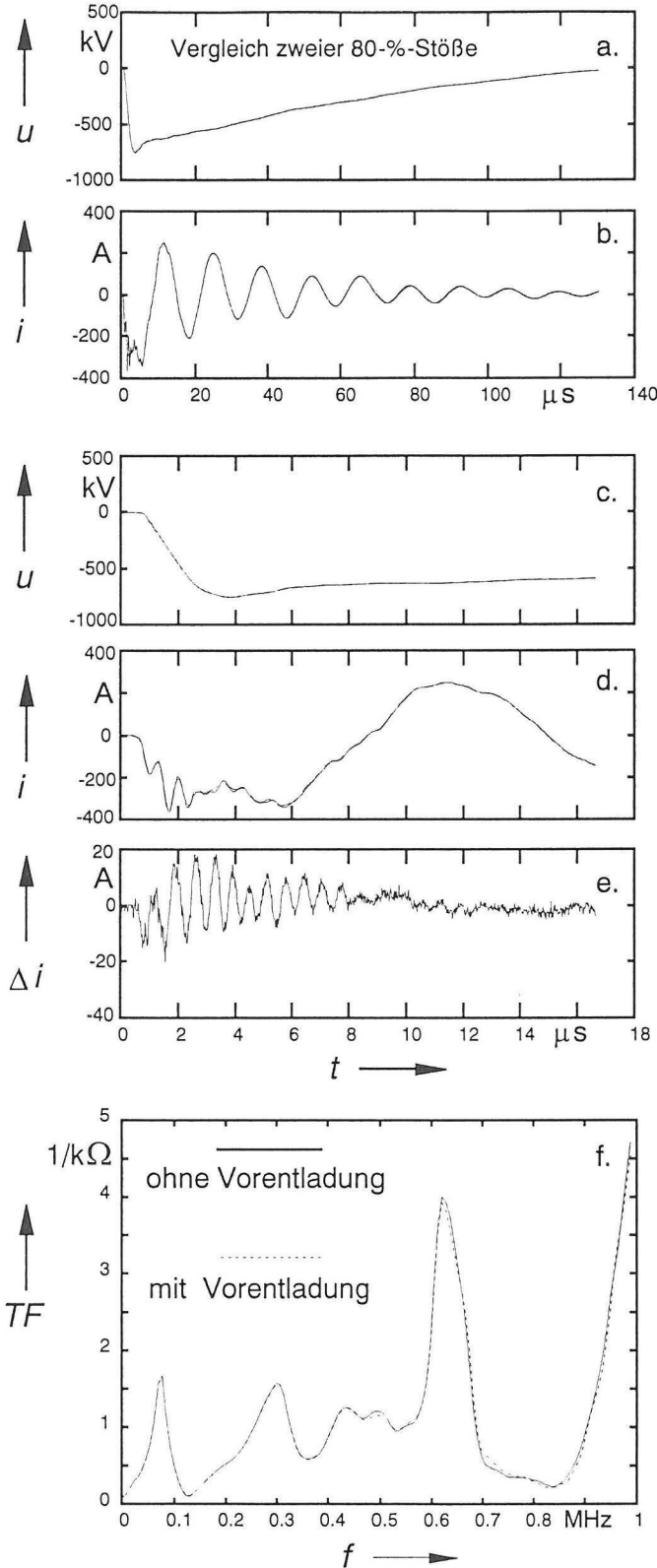


Bild 11. Vergleich zweier 80%-Stöße, davon einer mit akustisch erfaßter Vorentladung
a. Stoßspannung
b. Strom der Tertiärwicklung gegen Erde
c. Stoßspannung (Ausschnitt)
d. Strom der Tertiärwicklung gegen Erde (Ausschnitt)
e. Differenz der Ströme der beiden Stöße
f. Übertragungsfunktionen

7. Analyse der Übertragungsfunktion als Methode zur Betriebsüberwachung von Leistungstransformatoren

Für den zukünftigen Einsatz der Übertragungsfunktion zur Betriebsüberwachung von Leistungstransformatoren kommen zwei wichtige technische Aspekte in Betracht:

- Überwachung der dynamischen Integrität
- Überwachung der dielektrischen Integrität

Beide Verfahren basieren auf der Erfassung der geometrischen und/oder elektrischen Veränderung des schwingungsfähigen Gebildes „Transformator“.

Vor Ort können Übertragungsfunktionen prinzipiell auf zwei verschiedene Arten meßtechnisch bestimmt werden (Bild 12). Bild 12a zeigt die Anregung mit einer transienten Spannung. Hier gibt es die Möglichkeit, den Transformator vom Netz freizuschalten. Dann wird mit einem Impulsgenerator z. B. überspannungsseitig ein Impuls eingespeist. Unterspannungsseitig kann der Transformator entweder im Kurzschluß oder im Leerlauf betrieben werden. Es gibt jedoch Hinweise dafür, daß die im Kurzschluß bestimmte Übertragungsfunktion aus Sternpunktstrom gegen Erde und anregender Spannung sehr empfindlich auf innere Veränderungen ist. Bei im Leerlauf betriebenem Transformator kann zusätzlich noch die übertragene Spannung gemessen werden. Selbstverständlich kann die Einspeisung auch unterspannungsseitig erfolgen. Derzeitige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet haben u. a. zum Ziel, die Empfindlichkeit verschiedener Varianten und deren Randbedingungen zu ermitteln [11].

Eine elegante und weniger aufwendige Möglichkeit ist es, Schaltvorgänge im Energieübertragungsnetz auszuführen und daraus die Übertragungsfunktion zu berechnen [12], [13]. Diese kann dann mit einer vorhergehenden Messung oder gar mit einer Messung im Prüffeld des Herstellers verglichen werden. Der letztgenannte Vergleich unterliegt den in Kapitel 5 erwähnten Einschränkungen. Bild 13 zeigt ein Beispiel für die an einem 200-MVA-Transformator aufgezeichneten Schaltspannungen. Aus den transienten Signalanteilen der Schaltspannung an Phase 1W und des Sternpunktstromes gegen Erde als Antwortsignal – durch die Ovale in Bild 13b gekennzeichnet – wurde die Übertragungsfunktion aus Messungen vom September 1994 und vom September 1995 berechnet. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der beiden Übertragungsfunktionen. Auch hier stellt sich jedoch die Frage nach zulässigen Abweichungen und welche Änderungen in der Übertragungsfunktion auf welche Veränderungen im Transformator schließen lassen.

Prinzipiell könnte man das Verfahren auch online anwenden. Dazu muß ein Aufzeichnungssystem Vor Ort installiert werden, das die „quasi zufälligen“ durch Schaltvorgänge im Energieübertragungsnetz hervorgerufenen Schaltspannungen aufzeichnet [10]. Hierbei gibt es jedoch eine Reihe von Hindernissen. Für eine Vergleichbarkeit von Übertragungsfunktionen müssen identische Meßbedingungen vorherrschen. Dies bedeutet im Einzelnen: identische Stufenschalterstellung sowie identische Netzkonfiguration an der Unterspannungsseite bei Anregung der Oberspannungsseite (und umgekehrt). Außerdem müssen die einzelnen Anregungsvorgänge zeitlich klar voneinander trennbar sein. Abhängig von der Anlagenkonfiguration hat man jedoch auch oft Fälle, bei denen die transiente Anregung am Transformator

an allen drei Phasen einer Spannungsebene gleichzeitig erfolgt. Dies ist dann der Fall, wenn es sich um einen Schaltvorgang handelt, der sehr weit vom Transformator entfernt stattfindet. Aufgrund der kapazitiven Kopplung der (Frei)Leitungen ergibt sich selbst bei typischerweise nacheinander ablaufenden Schaltvorgängen des entsprechenden Leistungsschalters nach einigen km eine Überkopplung auf die anderen Phasen. Das Antwortsignal setzt sich dann aus Anteilen aller Anregungen zusammen. Da das Ausmaß der Kopplung vom Ort der Schaltheandlung abhängt, ist eine spätere Trennung praktisch nicht mehr möglich. Eine weitere Schwierigkeit der Online-Methode ist deren Zufälligkeitscharakter. Man muß solange warten, bis es zu einem geeigneten Schaltvorgang kommt. Hier hängt es dann wieder von der Schaltheufigkeit im Energieübertragungsnetz ab, ob sich die Installation eines Online-Systems überhaupt lohnen würde. Aus den genannten Gründen ist das Online-Verfahren nur an einem Transformator in Erwägung zu ziehen, der direkt und sehr häufig zu- und abgeschaltet werden muß, oder aber unter klar definierten Netzkonfigurationen geschaltet wird.

Eine andere Methode, die Übertragungsfunktion eines Transformators zu bestimmen, ist in Bild 12b dargestellt. Auch diese Methode arbeitet Offline, d. h. der Transformator muß vom Netz freigeschaltet werden. Anstatt einen Impuls einzuspeisen erfolgt hier die Anregung mit einer Sinusspannung variabler Frequenz (FRA-Methode). Ein handelsüblicher Netzwerkanalysator verfügt über die notwendigen Eigenschaften. Prinzipiell sind beide Verfahren gleichwertig. Die Ausgangsspannung des Netzwerkanalysators beträgt jedoch zumeist nur einige Volt. Die Systemantwortsignale des Transformators liegen dann oft nur im mV-Bereich. Damit ist die Beeinflussung der Messung durch Störsignale prinzipiell größer, als bei der Impuls-Methode.

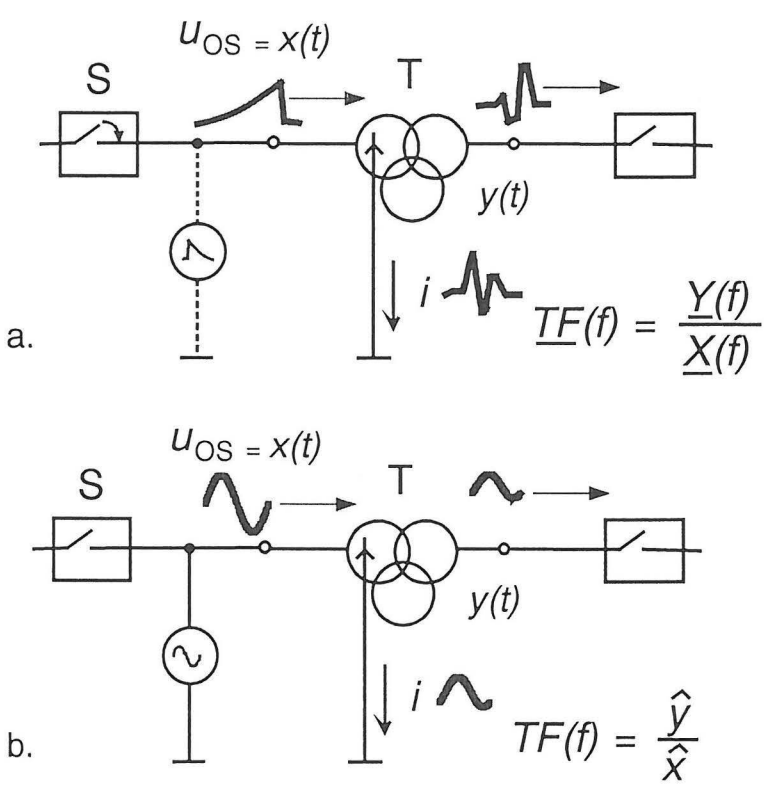


Bild 12. Meßtechnische Bestimmung der Übertragungsfunktion an Transformatoren Vor Ort
a. durch eine Impulsspannung als Anregungssignal
b. durch eine sinusförmige Spannung (Netzwerkanalysator)

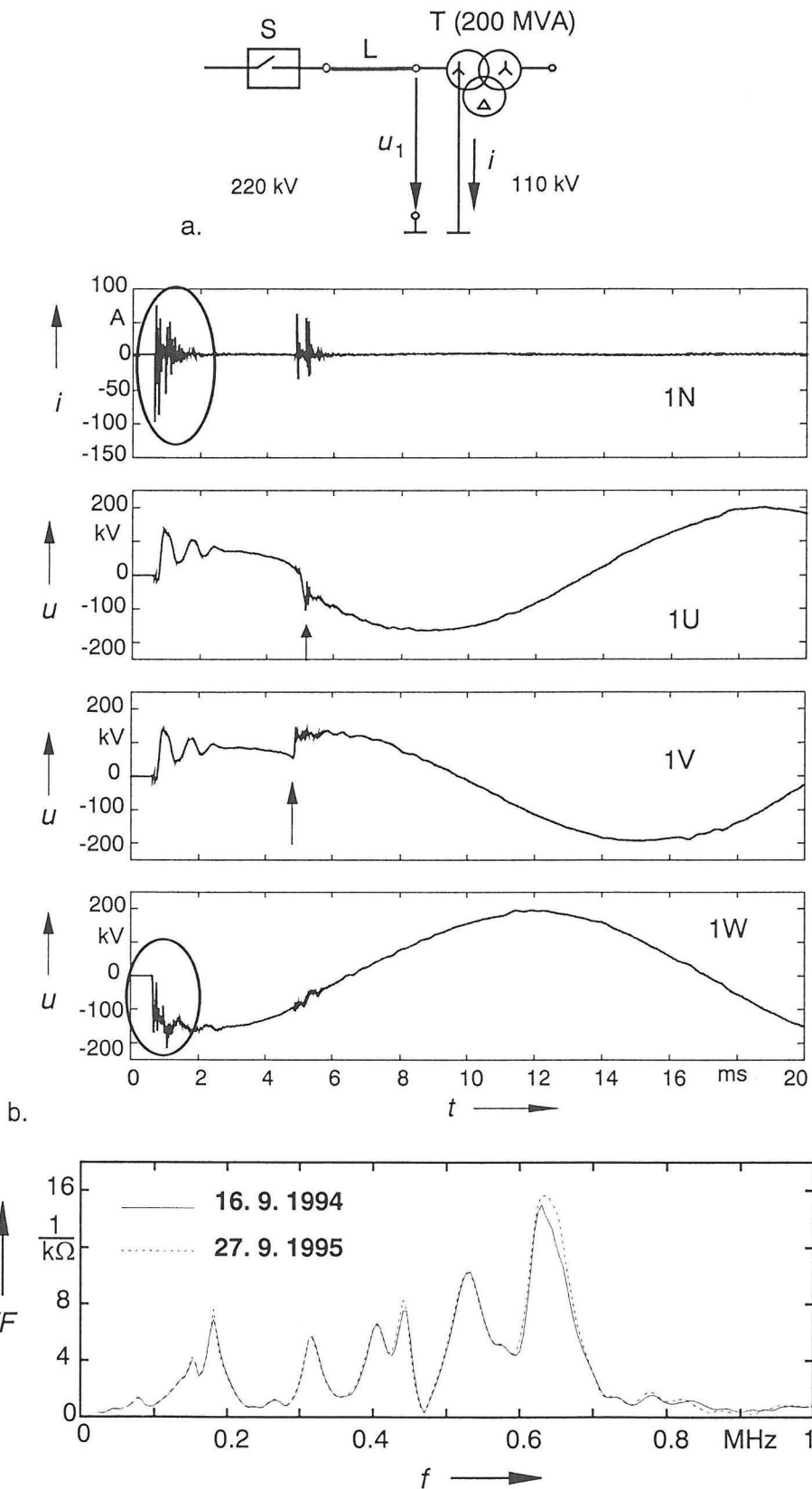


Bild 13. Meßtechnische Bestimmung der Übertragungsfunktion eines 200-MVA-Transformators durch die in Bild 12a dargestellte Methode (Anregung durch Schaltvorgänge)

- Prinzipschaltbild der Anlage
- Aufzeichnungen der Schaltspannungen an 1U, 1V und 1W sowie des Sternpunktstromes gegen Erde
- Vergleich der Übertragungsfunktionen aus Messungen vom Sept. 1994 und Sept. 1995

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die Analyse der Übertragungsfunktion ist ein wichtiges Verfahren in der Meß-, Prüf- und Diagnosetechnik von Leistungstransformatoren und birgt – wie an einigen Beispielen gezeigt – noch ein hohes Potenzial. Die Aufgabe der meßtechnischen Bestimmung der Übertragungsfunktion eines Leistungstransformators im Prüffeld als auch Vor Ort ist heute gelöst. Für die Anwendung zur Erkennung von Transportbeschädigungen und zur Erkennung mechanischer Veränderungen im Wicklungsaufbau nach Einwirkungen von Kurzschlußbeanspruchungen wie z. B. bei der Stoßkurzschlußprüfung oder der Überprüfung eines Transformators im Netz müssen jedoch noch Kriterien für die zulässigen Abweichungen und jene Abweichungen geschaffen werden, die auf einen Fehler hindeuten. Ohne die Kenntnis der Gut/Schlecht-Kriterien, d. h. der „Toleranzen“, läßt sich das Verfahren für sich allein nicht sinnvoll einsetzen. Die meßtechnische Praxis zeigt, daß Abweichungen zwischen zwei Übertragungsfunktionen aus den verschiedensten Ursachen stets in einem bestimmten Ausmaß auftreten können. Derzeit werden diese Themen im Rahmen von Grundsatzarbeiten untersucht. Dies ist jedoch ein langwieriger Prozeß, da geeignete Untersuchungsobjekte selten zur Verfügung stehen.

Die in [11] publizierten Untersuchungen zeigen, daß selbst bei unbekannter Ausgangsmessung eine Aussage über den Zustand eines Transformators möglich ist, wenn man die Übertragungsfunktionen der drei Phasen baugleicher Transformatoren vergleicht. Aber wie in [11] gezeigt, kommt es auch hier zu Abweichungen zwischen an sich baugleichen Transformatoren. Ursache könnten u. a. Fertigungstoleranzen sein. Auch hier stellt sich die Frage nach einem Gut/Schlecht-Kriterium. Zu dessen Entwicklung bleibt nur der Weg über Versuche an Wicklungen und Wicklungsaufbauten von Leistungstransformatoren, wenn man sich nicht von vorn herein die Lösung des Problems der Übertragbarkeit der Untersuchungen von kleinen Modellanordnungen auf „reale“ Transformatoren aufbürden will. Ein möglicher Weg sind Untersuchungen an Transformatoren, die vom Betreiber ohnehin verschrottet werden.

In der Stoßspannungsprüftechnik spielt die Analyse der Übertragungsfunktion auch ca. 15 Jahre nach der ersten wegweisenden Veröffentlichung noch eine eher untergeordnete Rolle. Sie stellt ein weiteres Verfahren zur Fehlererkennung dar. Ein Vorteil des Verfahrens bietet sich hinsichtlich der Diskriminierung von Fehlern im Prüfkreis oder am Prüfling. Mit dem konventionellen Verfahren, dem Vergleich der aufgezeichneten Spannungs- und Stromverläufe im Zeitbereich hat man in der Prüftechnik seit Jahrzehnten Erfahrungen gesammelt. Diese Erfahrung fehlt bei der Interpretation der Übertragungsfunktion noch weitgehend. Mathematische Modelle, die das Schwingungsverhalten eines Transformators sehr genau und bis zu einigen 100 kHz beschreiben, können hier ein wichtiges Hilfsmittel sein. Mit ihnen ließen sich Fehler und deren Auswirkung auf die Übertragungsfunktion simulieren. Will man hier auf praktische Fälle, d. h. Defekte bei der Stoßspannungsprüfung warten, so wird auch dies ein langwieriger Prozeß, da Fehler bei der Stoßspannungsprüfung in technisch kompetenten Transformatoren-Fabriken heute eher die Ausnahme sind.

9. Literatur

- [1] IEC 60076-3, Power transformers - Part 3: Insulation levels and dielectric tests, VDE-Verlag, 1980
- [2] VDE 0532, Teil 13: Transformatoren und Drosselspulen: Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfungen von Transformatoren und Drosselspulen, VDE-Verlag, 1984
- [3] IEC 722, Guide to the lightning impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors, International Electrotechnical Commission, 1982
- [4] Maier, R.; Kachler, A.: "Neues Verfahren zur Beurteilung der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren", Elektrizitätswirtschaft, Jg. 89 (1990), Heft 18
- [5] Malewski, R.; Poulin, B.: "Impulse Testing of Power Transformers using the Transfer Function Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988
- [6] Malewski, R.; Gockenbach, E.: „Neue Möglichkeiten der Beurteilung von Stoßspannungsprüfungen an Transformatoren durch Verwendung eines digitalen Meßsystems, etz-Archiv, Bd. 11 (1989), Heft 6
- [7] Malewski, R.; Gockenbach, E.; Maier, R.; Fellmann, K.H.; Claudi, A.: "Five Years of Monitoring the Impulse Test of Power Transformers with digital Recorders and the Transfer Function Method", International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE), 1992, Bd. I
- [8] Leibfried, T.: „Messungen transienter Schaltspannungen im 500-kV-Netz an einem Leistungstransformator“, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 98 (1999), Heft 15
- [9] Leibfried, T.; Kirchenmayer, E.; Knorr, W.: „Stoßkurzschlußprüfung eines 125-MVA-Transformators“, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97 (1998), Heft 10
- [10] Leibfried, T.; Feser, K.; Miksa, T.: „On-line-Überwachung eines 350-MVA-Transformators durch die Analyse der Übertragungsfunktion“, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96 (1997), Heft 10
- [11] Feser, K.; Christian, J.; Neumann, C.; Sundermann, U.; Loppacher, M.; Kachler, A.; Leibfried, T.: „The Transfer Function Method for Detection of winding displacements on Power Transformers after Transport, Short Circuit or 30 Years of Service“, CIGRE paper No. 12/33-04, International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE), 2000
- [12] Malewski, R.; Douville, J.; Lavallee L.: "Measurement of switching transients in 735 kV-substations and assessment of their severity for transformer insulation". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, Oktober 1988
- [13] Leibfried, T.; Feser, K.: "Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, Oktober 1999