Zustandsdiagnose bei mechanischen Wicklungsschäden mit der Übertragungsfunktion

J. Christian, R. Wimmer

Institut für Energieübertragung und
Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

1 Einleitung

Kurzschlüsse in Drehstromnetzen verursachen hohe Ströme in Transformatorwicklungen. Die dabei auftretenden mechanischen Kräfte können zu Verformungen und Verschiebungen in der Wicklung führen. Das Ausmaß eines Wicklungsschadens führt nicht immer zu einer unmittelbaren Beeinträchtigung des weiteren Betriebs. In manchen Fällen bleiben derartige Schäden zunächst unerkannt. Mechanisch vorgeschädigte Wicklungen erhöhen das Ausfallrisiko von Transformatoren bei künftig auftretenden Strombeanspruchungen /1/. Aus diesem Grund ist ein messtechnisches Verfahren zur Erkennung derartiger Schäden notwendig.

Gemäß den gültigen Normen ist die Bestimmung der Kurzschlussimpedanz bzw. der relativen Kurzschlussspannung die einzige, anerkannte Prüfmethode zur Detektion mechanischer Wicklungsschäden. Nach IEC 76-5 /2/ gilt eine Stoßkurzschlussprüfung bei Transformatoren als erfolgreich, wenn die vor und nach der Prüfung ermittelten Messwerte der Kurzschlussimpedanz weniger als 2 % voneinander abweichen. Detaillierte Betrachtungen an kurzschlussgeprüften Verteiltransformatoren weisen die unzureichende Empfindlichkeit von Untersuchungen bei 50 Hz bezüglich mechanischen Verformungen nach /3/, /4/. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die bei Verteiltransformatoren gewonnenen Erkenntnisse auf große Leistungstransformatoren übertragen lassen. Entsprechende mathematische Modellrechnungen zeigen auch für große Transformatoren eine fehlende Sensitivität der 50 Hz-Impedanz gegenüber Wicklungsverschiebungen auf /5/.

Mechanische Deformationen und Verschiebungen verändern die elektrischen und die magnetischen Feldverhältnisse der Wicklungsanordnung. Bei niedrigen Frequenzen (bis ca. 10 kHz) bestimmen zu einem wesentlichen Teil die magnetischen Verhältnisse das Übertragungsverhalten des Transformators. Für höhere Frequenzen (größer 100 kHz) sind zunehmend die elektrischen Felder für das transiente Verhalten verantwortlich. Aus diesem Grund liegt der Schluss nahe, das Messverfahren zur Detektion mechanischer Veränderungen auf höhere Frequenzen auszudehnen.

2 Grundlagen

2.1 Systeme

Ein System beschreibt das Verhalten von Eingangs- und Ausgangsgrößen eines komplexen Netzwerks (Fig. 2.1).

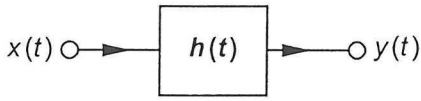


Fig. 2.1: Systembeschreibung durch Impulsantwort

Eine derartige Abstraktion eines Netzwerks auf ein Systemübertragungsverhalten kann durch die Impulsantwort $h(t)$ vollständig beschrieben werden. Das System reagiert bei einer Anregung $x(t)$ mit dem Antwortsignal $y(t)$ gemäß:

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) \cdot x(\tau)\, d\tau \tag{2.1}$$

Gemäß dem Faltungssatz der Laplace-Transformation errechnet sich das Antwortsignal aus dem Produkt der transformierten Impulsantwort und dem Eingangssignal:

$$\underline{Y}(s) = \mathcal{L}\{h(t) * x(t)\} = \underline{H}(s) \cdot \underline{X}(s) \tag{2.2}$$

Für den Sonderfall $s = j\omega$ erhält man die fourier-transformierte Darstellung:

$$\underline{Y}(\omega) = \underline{H}(\omega) \cdot \underline{X}(\omega) \tag{2.3}$$

$\underline{H}(\omega)$ wird als Übertragungsfunktion (ÜF) des Systems bezeichnet.

2.2 Vierpole

Die Theorie der Vierpole bildet die theoretische Grundlage der Übertragungsfunktion als Diagnosemethode bei Transformatoren. Ein Transformator kann bezüglich seiner äußeren Klemmen als passives, lineares, kausales und zeitinvariantes System mit mindestens 2 verschiedenen Maschenströmen betrachtet werden. Das elektrische Verhalten eines Transformators kann als Netzwerk, bestehend aus Widerständen, Eigeninduktivitäten, Kapazitäten und Kopplungsinduktivitäten beschrieben werden (Fig. 2.2). Das lineare Systemverhalten ist bei Transformatoren nur dann gewährleistet, wenn keine Sättigung im magnetischen Kreis auftritt. Bei Messungen der Übertragungsfunktion mit Niederspannung treten sehr geringe Durchflutungen auf. Sättigungserscheinungen bei der Magnetisierung sind hierbei nicht zu erwarten.

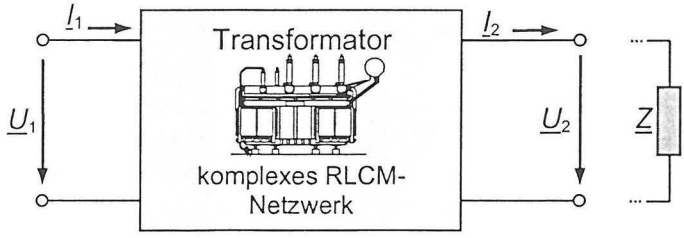


Fig. 2.2: Betrachtung eines Leistungstransformators als Vierpol

Neben der Leitwert- und Widerstandsmatrix ist in der Systemtheorie die Kettenmatrix die am häufigsten angewandte Beschreibung von Vierpolen.

Nach den Grundgleichungen für den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{a}_{11}\cdot\underline{U}_2 + \underline{a}_{12}\cdot\underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{a}_{21}\cdot\underline{U}_2 + \underline{a}_{22}\cdot\underline{I}_2 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} \end{pmatrix}}_{\text{Kettenmatrix}} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

ergibt sich die Kettenmatrix des Vierpols

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} \end{pmatrix} \tag{2.5}$$

Die Matrizenelemente $\underline{a}_{ij}$ sind komplex, frequenzabhängig und beschreiben das System vollständig.

Ein direkter Zusammenhang zwischen den Matrizenelementen $\underline{a}_{ij}$ und möglichen Übertragungsfunktionen des Vierpols besteht nur für die Elemente $\underline{a}_{11}$ und $\underline{a}_{22}$:

Leerlaufspannungsübersetzung:

$$\underline{a}_{11} = \left.\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{I}_2 = 0} \tag{2.6}$$

Kurzschlussstromverhältnis:

$$\underline{a}_{22} = \left.\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2}\right|_{\underline{U}_2 = 0} \tag{2.7}$$

Experimentell lassen sich häufig nur mathematische Kombinationen aus den Kettenmatrixelementen als Übertragungsfunktion bestimmen. Ist der Zusammenhang zwischen dem Ausgangsstrom $\underline{I}_2$ und der Ausgangsspannung $\underline{U}_2$ durch die komplexe Impedanz $\underline{Z}$ gegeben, so erhält man nach (2.4) für die Spannungsübersetzung und die Eingangsadmittanz:

Spannungsübersetzung:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \underline{a}_{11} + \frac{\underline{a}_{12}}{\underline{Z}} \tag{2.8}$$

Eingangsadmittanz:

$$\frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1} = \frac{\underline{a}_{21}\cdot\underline{Z} + \underline{a}_{22}}{\underline{a}_{11}\cdot\underline{Z} + \underline{a}_{12}} \tag{2.9}$$

2.3 Genauigkeit von Messergebnissen

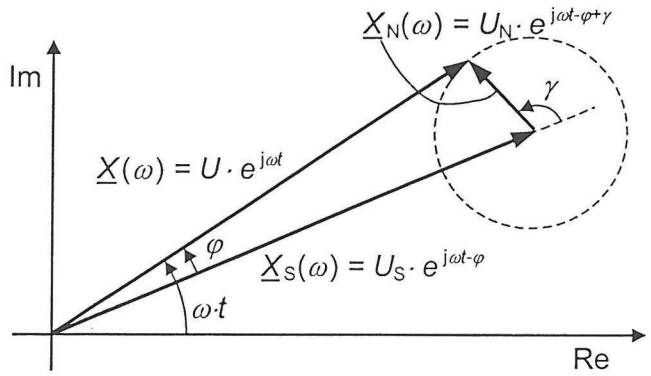


Fig. 2.3: Zeigerdiagramm für Zeitfunktionen in komplexer Darstellung: Überlagerung von Nutz- und Störsignal bei Messsignalen

Legt man für die Messsignale $\underline{X}(\omega)$ und $\underline{Y}(\omega)$ ein überlagertes Störsignal $\underline{X}_N(\omega)$ und $\underline{Y}_N(\omega)$ zu Grunde (Fig. 2.3), so kann für die Nutzsignale $\underline{X}_S(\omega)$ und $\underline{Y}_S(\omega)$ eine Abschätzung des Wertebereichs der resultierenden Übertragungsfunktion angegeben werden:

$$|\underline{TF}(\omega)|_{max} = \frac{|\underline{Y}_S(\omega)|_{max}}{|\underline{X}_S(\omega)|_{min}} = \frac{|\underline{Y}(\omega)| + |\underline{Y}_N(\omega)|}{|\underline{X}(\omega)| - |\underline{X}_N(\omega)|} \tag{2.10}$$

$$|\underline{TF}(\omega)|_{min} = \frac{|\underline{Y}_S(\omega)|_{min}}{|\underline{X}_S(\omega)|_{max}} = \frac{|\underline{Y}(\omega)| - |\underline{Y}_N(\omega)|}{|\underline{X}(\omega)| + |\underline{X}_N(\omega)|} \tag{2.11}$$

Die Frequenzfunktionen $|TF(\omega)|_{max}$ und $|TF(\omega)|_{min}$ begrenzen das Toleranzband der Übertragungsfunktion $\underline{TF}(\omega)$ /6/, (Fig. 2.4)

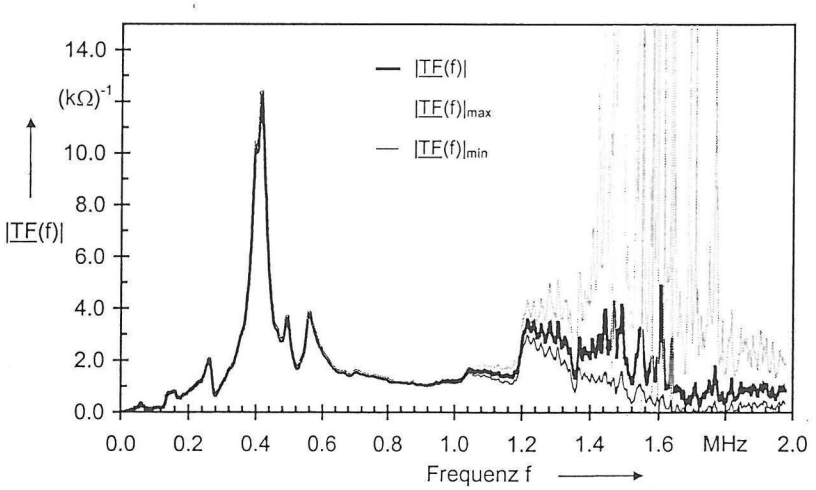


Fig. 2.4: Übertragungsfunktion mit dazugehörigen Toleranzbandgrenzen

3 Experimentelle Simulation axialer Verschiebungen

3.1 Messaufbau und Prüfanordnung

Als Versuchsobjekt zur Simulation dient ein eigens zu diesem Zweck konstruierter Wicklungsblock, welcher aus einer gestürzten, unverschachtelten Scheibenspulenwicklung mit 31 Doppelscheiben à 12 Windungen (OS) und einer Lagenwicklung mit 4 x 99 Windungen (US) besteht (Fig. 3.1).

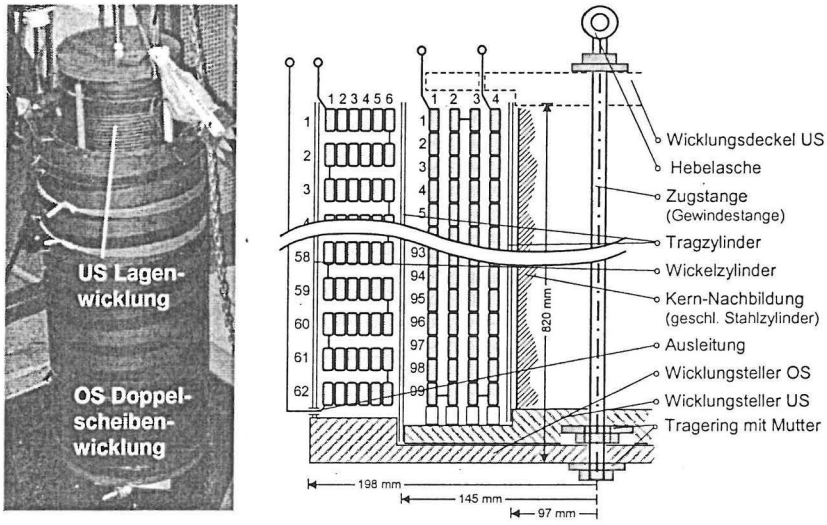


Fig. 3.1: Versuchswicklungsblock zur experimentellen Simulation axialer Verschiebungen von Wicklungsröhren

Die Leitungsquerschnitte sind so gewählt, dass sie den Abmessungen von Wicklungen mit einer Leistung von etwa 300 bis 400 kVA entsprechen. Aufgrund der Tatsache, dass der Isolationsaufbau der Scheibenwicklung für eine höhere Spannung ausgelegt ist als derjenige der Lagenwicklung, wird trotz des Windungszahlen-Verhältnisses von 374 zu 396 die innenliegende Lagenwicklung als "Unterspannungs-" und die außenliegende Scheibenspulenwicklung als "Oberspannungswicklung" bezeichnet. Die Konstruktion verzichtet auf eine Verspannung der beiden Röhren zueinander (Fig. 3.1). Eine Lagerung der Einzelröhren auf separaten Wicklungstellern ermöglicht ein freies Bewegen der Unterspannungswicklung gegenüber der Oberspannungswicklung.

Neben einer absoluten Abschätzung der Empfindlichkeitsgrenze soll zusätzlich geklärt werden, ob für die zu erwartende Sensitivität irgendwelche Präferenzen bei der Auswahl der Prüfschaltung existieren. Da an der Versuchswicklung sämtliche Wicklungsanfänge und -enden frei zugänglich sind, werden gezielt mehrere Prüfschaltungen mit einer Testreihe von verschiedenen Verschiebungshöhen beaufschlagt.

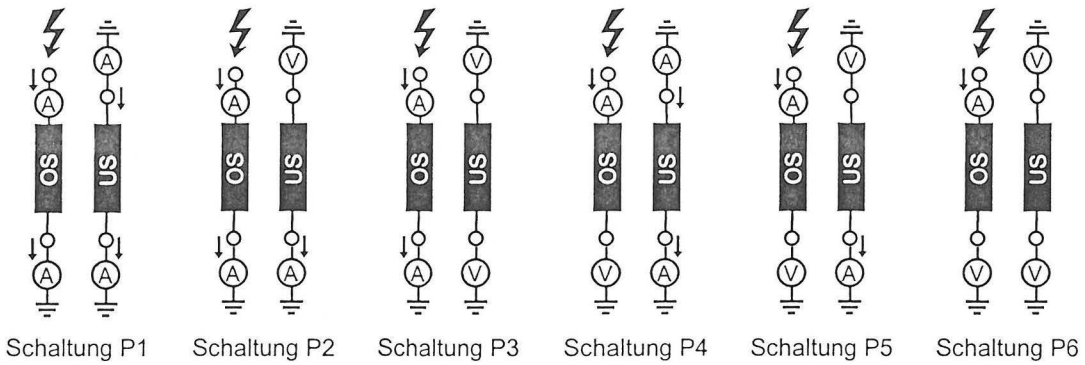


Fig. 3.2: Prüfschaltungen bei Stoß auf die OS zur experimentellen Simulation axialer Verschiebungen

Bei einem System mit frei zugänglichen Wicklungsanschlüssen lassen sich viele verschiedene Schaltungskonfigurationen realisieren. Für das aus Ober- und Unterspannungswicklung bestehende System sind 12 verschiedene, messtechnisch sinnvolle Permutationen möglich. Fig. 3.2 zeigt die möglichen Prüfschaltungen für den Fall einer Anregung der Oberspannungswicklung. Sämtliche Schaltungen lassen sich durch Vertauschung der Klemmen auch für eine Anregung der Unterspannungswicklung durchführen.

3.2 Empfindlichkeitsanalyse für verschiedene Prüfschaltungen

Die unter Fig. 3.2 gezeigte Anordnung enthält hinsichtlich der auszuwählenden Prüfschaltung viele Freiheitsgrade. Zur Analyse der Empfindlichkeit sollen zunächst diejenigen Antwortsignale gefunden werden, welche am empfindlichsten auf die Wicklungsverschiebungen in axialer Richtung reagieren. Fig. 3.3 zeigt eine Auswahl von Ergebnissen für verschiedene Prüfschaltungsvarianten.

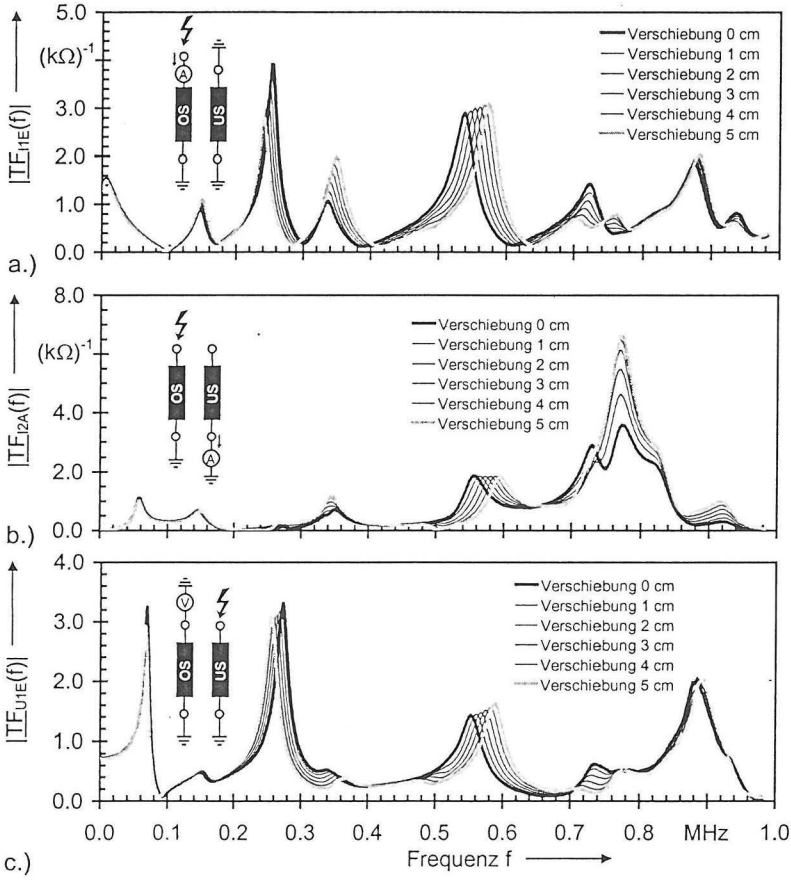


Fig. 3.3: Empfindlichkeit verschiedener Prüfschaltungen gegenüber axialer Verschiebung

a.) Kurzschluss-Eingangsadmittanz OS

b.) ÜF Ausgangsstrom US (Stoß OS)

c.) ÜF übertragene Spannung OS (Stoß US)

Verschiebungen zwischen Wicklungsröhren beeinflussen die magnetischen und elektrischen Feldverhältnisse der untersuchten Anordnung und damit deren Eigenschwingungsverhalten. Bei der Empfindlichkeitsanalyse gilt daher den Pol- und Minima-Verschiebungen ein besonderes Interesse. Unterschiede in den Dämpfungswerten bei identischer Resonanzfrequenz sind oft schwer zu deuten und können teilweise nicht zweifelsfrei von eventuellen Ungenauigkeiten der Messung getrennt werden. Die vermeintlich hohe Empfindlichkeit der Untersuchung nach Fig. 3.3 b im Bereich von 700-900 kHz wird daher nicht naher analysiert.

Am offensichtlichsten ist der Effekt der axialen Wicklungsbewegung in der Verschiebung der Resonanz bei 550 kHz zu erkennen. Obwohl die Prüfschaltungen und die Art der Antwortsignale sehr unterschiedlich sind tritt diese Resonanz bei nahezu allen ermittelten Übertragungsfunktionen auf. Die absolute Veränderung dieser Eigenfrequenz infolge der Verschie-

bung ist bei allen betreffenden Antwortsignalen identisch. Für die Erkennung axialer Verschiebungen besteht daher keine Präferenz für die Auswahl einer 'empfindlichsten Prüfschaltung'. Solange ein Antwortsignal die empfindlichste Resonanz oder das empfindlichste Minima (hier: Resonanz bei 550 kHz) in ihrer Frequenzcharakteristik aufweist, besitzt dieses Signal die maximal erreichbare Empfindlichkeit.

3.3 Abschätzung der absoluten Empfindlichkeit

Am Beispiel der Eingangsadmittanz der Kurzschluss-Schaltung P1 erfolgt eine Abschätzung der absoluten Empfindlichkeit gegenüber axialen Verschiebungen für die Anordnung nach Fig. 3.1. Unter Beachtung der Messgenauigkeit wird das Ausmaß der Verschiebung ermittelt, bei welchem sich ein signifikanter Unterschied bei den Übertragungsfunktionen einstellt (Fig. 3.4).

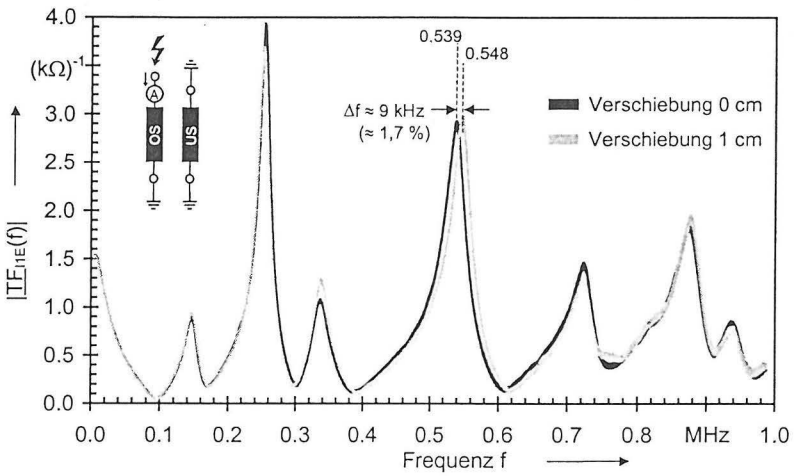


Fig. 3.4: Empfindlichkeitsabschätzung für die Eingangsadmittanz bei Prüfschaltung P1 und axialer Verschiebung zweier Wicklungsröhren: Toleranzbänder bei Ausgangslage und 1 cm Anhebung der US-Wicklung

Von einer signifikanten Abweichung beider Messkurven kann ausgegangen werden, wenn keine vollständige Überlappung der Toleranzbänder auftritt /6/. Die Gegenüberstellung der Wertebänder für die Übertragungsfunktionen vor und nach der Anhebung der inneren Wicklungsröhre um 1 cm zeigt deutliche Unterschiede (Fig. 3.4). Während die Resonanzen bei 340 kHz, 720 kHz sowie das Minima bei 760 kHz lediglich unterschiedliche Beträge der Übertragungsfunktion aufweisen, ist bei der Resonanz um 540 kHz eine deutlich erkennbare Polverschiebung festzustellen. Der Anstieg der Resonanzfrequenz beträgt etwa 1,7 % und ist damit auch unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit eindeutig nachgewiesen. Es ist bei der gezeigten Anordnung daher spätestens ab einer Verschiebung von 1 cm mit einer zuverlässigen Erkennung der Veränderung zu rechnen. Dies entspricht einer Empfindlichkeitsgrenze von etwa 1,2 % der axialen Wicklungshöhe.

4 Experimentelle Simulation radialer Deformationen

4.1 Messaufbau und Prüfanordnung

Die Erzeugung kontrollierter Verformungen wird an einem Wicklungsblock eines 10/0,4 kV, 1,2 MVA-Verteiltransformators durchgeführt (Fig. 4.1). Entsprechend der unter Fig. 3.1 gezeigten Konstruktion ist die Unterspannungswicklung frei gegenüber der OS-Scheibenwicklung beweglich. Eine spezielle Rahmenkonstruktion ermöglicht eine schadensfreie Fixierung der Wicklungsröhren und die Erzeugung kontrollierter radialer Verformungen (Fig. 4.1 b). Die abgerundete Form des Stempels verhindert eine Beschädigung der Papierisolation.

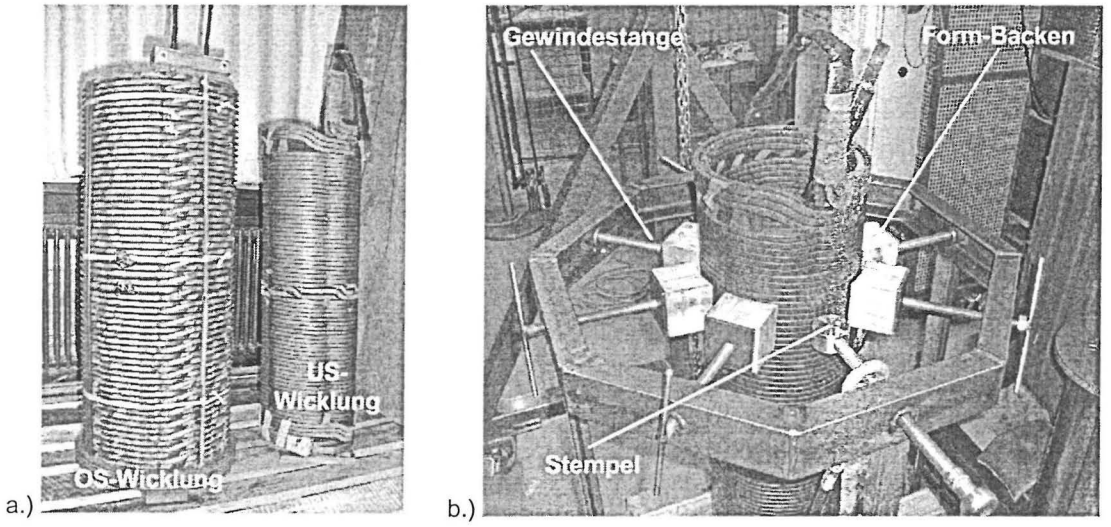


Fig. 4.1: Versuchsobjekte und Versuchsanordnung zur experimentellen Simulation radialer Deformationen: (400 kVA, 10 kV, 0,4 kV)

a.) Wicklungsblock mit verstürzter OS-Scheibenspulenwicklung (11 x 60 Windungen) und einlagiger US-Wicklung (3 x 4 parallel, 22 Windungen)

b.) Oktagonaler Spannrahmen zur Erzeugung definierter Verformungen

Die Auswahl möglicher Prüfschaltungen wird im vorliegenden Fall in erster Linie durch messtechnische Randbedingungen bestimmt. Die geringe Eingangsimpedanz der inneren Wicklung ermöglicht keine direkte Anregung der US-Wicklung bei geerdetem Wicklungsende (Fig. 4.2: Schaltung P12). Im Gegensatz zur geöffneten US-Wicklung bei P2 ergibt sich bei der Kurzschluss-Schaltung nach P1 eine deutlich größere Belastung im niedrigen Frequenzbereich. Die spektrale Breite des anregenden Signals wird dadurch ungünstig beeinflusst.

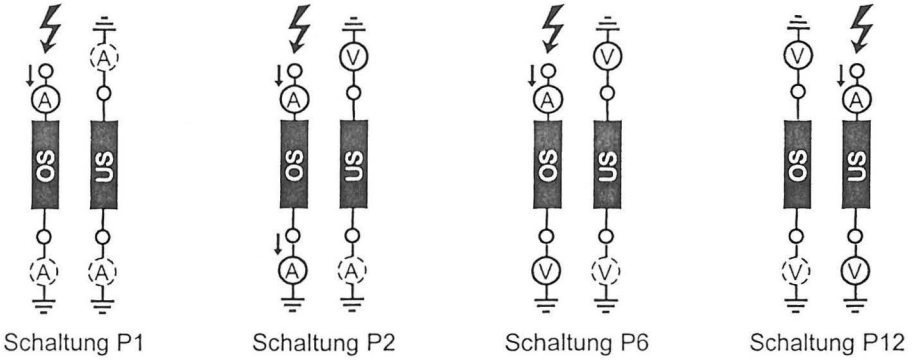


Fig. 4.2: Realisierte Prüfschaltungen und aufgezeichnete Antwortsignale zur experimentellen Simulation radialer Deformationen

4.2 Empfindlichkeitsanalyse für verschiedene Prüfschaltungen

Zur systematischen Analyse des Einflusses von radialen Verformungen auf die Übertragungsfunktion erfolgt eine sukzessive Steigerung des Grades der Deformation. Der Schweregrad der Verformung wird nach der radialen Tiefe, der axialen Ausdehnung und der Anzahl der betroffenen Teilungen spezifiziert. Die Anordnung nach Fig. 4.1 b ermöglicht eine Drehung der Wicklung innerhalb des Druckrahmens in 90 °-Schritten. Entlang des Umfangs sind daher an 4 Teilungen radiale Pressungen möglich (Tabelle 4.1). Für jeden Grad der Deformation erfolgt eine Messung der Übertragungsfunktionen bei verschiedenen Prüfschaltungen in einem ölgefüllten Kessel.

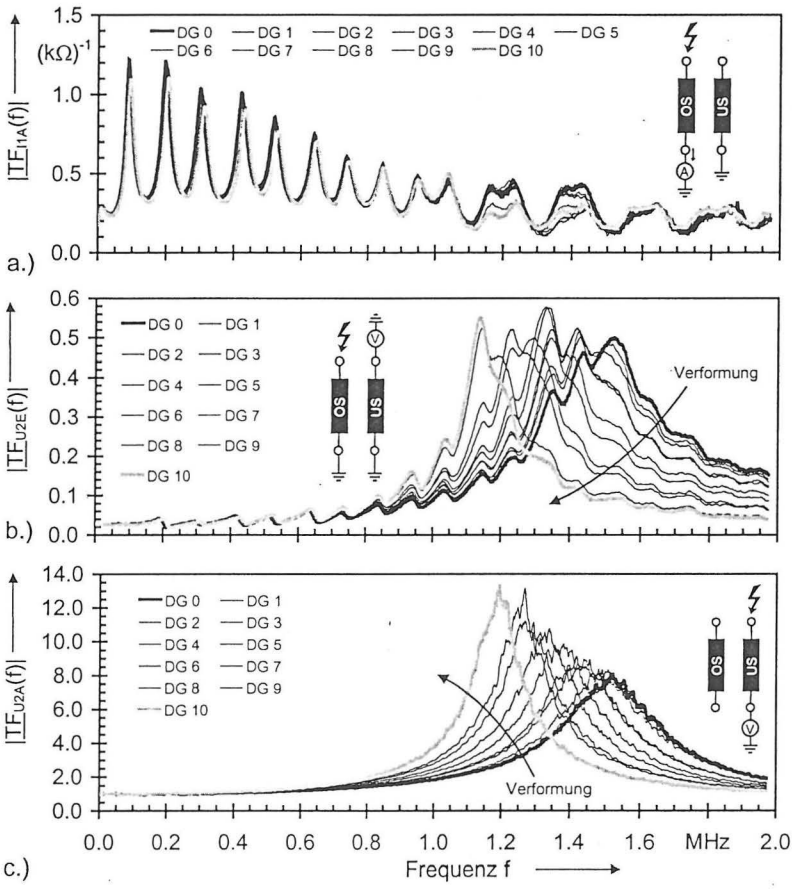


Fig. 4.3: Experimentelle Simulation radialer Deformationen an der US-Wicklung eines 400 kVA-Versuchswicklungsblocks bei verschiedenen Graden der Verformung:

a.) ÜF Erdstrom OS-Wicklung (Stoß OS)

b.) ÜF übertr. Spannung der US (Stoß OS)

c.) ÜF Spannung an US-Ende (Stoß US)

Fig. 4.3 zeigt die Ergebnisse einer Auswahl von Prüfschaltungen für die Schadensstufen 0 bis 10. Am sensitivsten reagiert die Resonanz bei 1,5 MHz auf die Effekte der radialen Verformung. Diese Polstelle ist nur bei Messsignalen, welche direkt an der beschädigten Unterspannungswicklung abgegriffen werden, festzustellen. Die quantitative Abschätzung der absoluten Empfindlichkeit für radiale Verformungen erfolgt daher an der übertragenen Spannung der Prüfschaltung P2.

Grad (DG)	rad. Tiefe	relative, axiale Ausdehnung der Verformung			
0	-	-	-	-	-
1	1 cm (3,5 % ∅)	10 %	-	-	-
2		30 %	-	-	-
3		60 %	-	-	-
4		100 %	-	-	-
5		100 %	50 %	-	-
6		100 %	100 %	-	-
7		100 %	100 %	50 %	-
8		100 %	100 %	100 %	-
9		100 %	100 %	100 %	50 %
10		100 %	100 %	100 %	100 %

Tabelle 4.1:

Beschädigungsgrade bei der Simulation radialer Verformungen an der Unterspannungsröhre

4.3 Abschätzung der absoluten Empfindlichkeit

Zur Abschätzung der Sensitivitätsgrenze wird eine Genauigkeitsanalyse für die übertragene Spannung nach Schaltung P2 mit den ermittelten Toleranzbereichen vollzogen (Fig. 4.4).

Für die Übertragungsfunktion der auf die US-Wicklung übertragenen Spannung ergibt sich bereits für die erste Stufe der Deformation ein signifikanter Unterschied ab ca. 1,2 MHz. Zur Steigerung der Messgenauigkeit für Frequenzen größer 1 MHz kommen Stoßspannungen mit Anstiegszeiten kleiner 100 ns zum Einsatz. Bei Wicklungsblöcken kleinerer Leistung ist diese verbesserte Genauigkeit von besonderer Bedeutung. Die Eigenfrequenzen dieser Wicklungen sind oft um ein Vielfaches größer als die von großen Leistungstransformatoren. Um Veränderungen der Eigenschwingungsverhältnisse zu detektieren, muss für den betreffenden Frequenzbereich eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden.

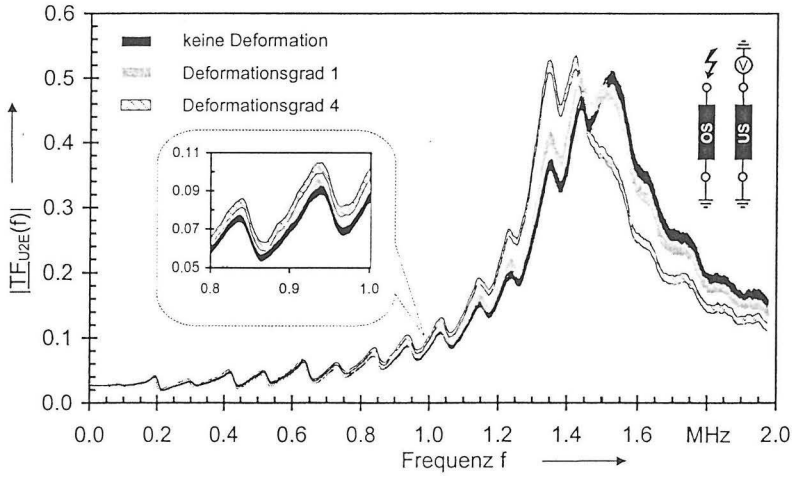


Fig. 4.4: Empfindlichkeitsabschätzung für die übertragene Spannung bei Prüfschaltung P2:

Toleranzbänder bei Ausgangszustand, Deformationsgrad 1 und Deformationsgrad 4

Wird der untersuchte Frequenzbereich auf 1 MHz eingeschränkt, kann bei der ÜF nach Fig. 4.4 frühestens ab Deformationsstufe 4 eine eindeutige Änderung detektiert werden.

5 Zusammenfassung

Die experimentellen Nachbildungen von mechanischen Veränderungen an Versuchswicklungen weisen für axiale Verschiebungen keine Präferenz hinsichtlich einer Prüfschaltung mit maximaler Empfindlichkeit nach. Die Auswirkungen der Wicklungsanhebung auf die einzelnen Eigenfrequenzen der Anordnung sind sehr unterschiedlich. Für eine maximale Messempfindlichkeit muss daher eines derjenigen Antwortsignale ausgewählt werden, deren Spektren die sensitivste Systemresonanz enthalten. Die unter Laborbedingungen ermittelte, absolute Empfindlichkeit beträgt für die untersuchte Anordnung etwa 1,2 % der Wicklungshöhe und liegt im Bereich praktisch relevanter Wicklungsverwerfungen.

Für die Detektion radialer Deformationen zeigen diejenigen Antwortsignale die größte Empfindlichkeit, welche direkt an der beschädigten Wicklung abgegriffen werden. Dies gilt sowohl für den Wicklungsstrom als auch für die abgegriffenen Spannungen an den Wicklungsenden. Das geringste Ausmaß einer Verformung, welche noch zweifelsfrei bei der erzielten Messgenauigkeit detektiert wird, besitzt eine radiale Tiefe von 3,5 % (bezogen auf den Durchmesser der Wicklung) über einer axialen Ausdehnung von 10 % der Wicklungshöhe an einer Teilung.

Auf Grund bisheriger Erfahrungen mit realen Wicklungsschäden, welche keine direkte Beeinträchtigung des 50 Hz-Nennbetriebs zur Folge hatten, kann davon ausgegangen werden, dass mit einer ähnlich hohen Messgenauigkeit bei Vor-Ort-Untersuchungen derartige Wicklungsverformungen detektiert werden können.

Literatur

/1/	Feser, K. Christian, J. Neumann, C. Leibfried, T. Loppacher, M.	The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers after Transport, Short Circuit or 30 Years of Service, CIGRÉ Session, Paris, 2000, paper 12/33-04
/2/	International Electrotechnical Commission	Standard 60076-5 Power Transformers Part 5: Ability to withstand short circuit, 1979
/3/	Kreutzer, J.	Entwicklungsschwerpunkte bei Verteiltransformatoren, Bulletin SEV/VSE 76(1985)9, 1985, S. 503-508
/4/	Waters, M. Stalewski, A. Farr, J. C. Whitaker, J. D.	Short Circuit Testing of Power Transformers and the Detection and Location of Damage, CIGRÉ Session, Paris, 1968, paper 12-05
/5/	Moreau, O. Guillot, Y. Barre, B.	FRA Diagnostic Method: Simulation Applied to Feasibility Study and Efficiency Improvement, IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, 1999, Proc. Vol. 2, pp. 1059-1064
/6/	Leibfried, T.	Die Analyse der Übertragungsfunktion als Methode zur Überwachung des Isolationszustandes von Großtransformatoren, Dissertation, Universität Stuttgart, 1996