

Zustandsbewertung und Diagnose von Leistungstransformatoren: Diagnose von mechanischen Verformungen am Aktivteil

Mechanische Verformungen bzw. Fehler am Aktivteil eines Transformators können während der Lebensdauer eines Transformators auftreten. Diese haben die Besonderheit, dass sie i.d.R. im Gegensatz zu einem Windungsschluss nicht zur Schutzauslösung führen. Sie stellen allerdings eine Schwachstelle des Transformators dar, die möglicherweise zu einem ernsthaften Fehler führen können. Die Auswirkungen einer Verformung können je nach Größe, Art und Ort der Beschädigung, mehr oder weniger signifikante Symptome erzeugen. Im schlimmsten Fall sorgt die Beschädigung für keine äußerlich sichtbaren Auffälligkeiten und erst nach einer Zeit oder bei einem erneuten Zuschalten kommt es zu einem Totalausfall.

Ursachen für mechanische Beschädigungen

Auslöser für mechanische Fehler können schon direkt zu Beginn der Lebensdauer bei der Fertigung auftreten. Eine nicht ausreichend festangezogene Klemmstruktur kann erhebliche Beeinträchtigungen im Einschaltvorgang hervorrufen, da die Wicklung durch den Einschaltstrom bewegt und verformt werden kann. Ebenso kann es bei dem Transport eines Transformators zu Zwischenfällen kommen, die eine Verformung des Aktivteils verursachen. Während des regulären Betriebes können Vibrationen zu einer Lockerung der Verspannung führen oder hohe Kurzschlussströme zu einer Verformung einzelner Leiter oder sogar der gesamten Wicklung.

Typische Fehlerbilder

Zur besseren Einordnung der einzelnen Fehlerbilder teilt man diese vorerst in drei Kategorien ein.

Die erste Kategorie betreffen einzelne Leitungen, wie Windungen oder Zuleitungen, welche verbogen sein können. Einzelne Halterungen zur Befestigung von Zuleitungen können durch die bei hohen Kurzschlussströmen auftretenden Kräfte verbogen werden.



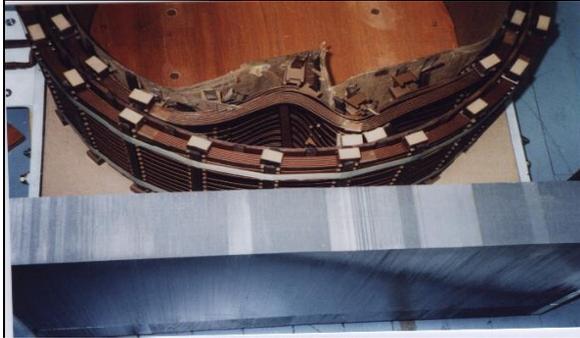
a) Zuleitungen zum Stufenschalter



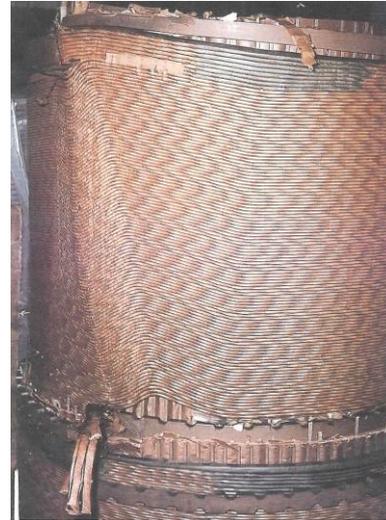
b) Ausleitung

Abbildung 1: Verformung an einzelnen Leitern

In die zweite Kategorie fallen Verformungen der gesamten Wicklungen (axiale oder radiale Verformungen / Verschiebungen, sowie Buckling). Diese Verschiebungen haben häufig auch eine Zerstörung der gesamten Klemmstruktur zur Folge.



a) Buckling



b) Axiale Verformung und Buckling

Abbildung 2: Verformungen der gesamten Wicklung

Zu der dritten und letzten Kategorie zählt die Kerndeformation, bei der zusätzlich zur Wicklung der gesamte Kern beschädigt ist. In diesem Fall kann nur noch eine Neubeschaffung oder aufwendige Reparatur Abhilfe schaffen



Abbildung 3: Kerndeformation

Bei Fehlern der ersten Kategorie sind Auswirkungen auf den Betrieb in den meisten Fällen nicht feststellbar, sondern erst wenn es im Zuge der verformten Leitungen zu Windungs- oder Kurzschlüssen, sonstigen Isolationsfehlern oder Heißstellen kommt. Das zeigt sich dann in Schutzauslösungen oder Gas-Analysen. Dennoch können aus diesen vermeintlich harmlosen Problemen schnell Größere entstehen, zum Beispiel sobald es zu einem erneuten Ereignis kommt, welches dann zu den gerade beschriebenen elektrischen Problemen führt.

Die Fehler der Kategorie 2 können aufgrund der deutlichen Veränderung der Wicklungsstruktur zu massiven Auswirkungen im Betrieb, wie Übersetzungs- und Phasenwinkelfehler führen. Hier ist ein weiterer Betrieb nicht zu empfehlen. Sollte es zu einer Beschädigung der Klemmstruktur gekommen sein, ist es zudem möglich, dass es durch Vibrationen im Betrieb zu einer Verschlimmerung des Zustandes kommt.

Sollte der ganze Kern deformiert sein, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Klemmstruktur ebenfalls beschädigt. Auch hier kann es bei einem Weiterbetrieb des Transformators zu einem Totalausfall kommen.

Mögliche Messmethoden zur Fehlerdetektion

Unsere hauseigene Diagnosematrix zeigt sehr übersichtlich, welche elektrischen Verfahren für die jeweiligen Fehlerarten geeignet ist. Hier ist eindeutig zu sehen, dass es sich zum einen um wenige elektrische Verfahren handelt und zum anderen auch um eher selten angewandte Messmethoden. Eine dreiphasige Kurzschlussimpedanzmessung gehört zum Standard bei den Inbetriebnahme Prüfungen im Werk. Für eine bessere Detektion würde sich jedoch eine SFRA Messung ([Elektrische Messungen](#)) sowohl im Leerlauf als auch im Kurzschluss anbieten. Diese Messung ist besonders aussagekräftig, wenn im Vorfeld direkt im Werk oder noch besser zusätzlich bei der Inbetriebnahme auf der Anlage eine Fingerprintmessung durchgeführt wurde. Der reine Vergleich der Phasen untereinander kann nur im begrenzten Maße Aufschluss auf mögliche Fehler des Aktivteils geben. Eine weitere Möglichkeit wäre der Vergleich mit einem baugleichen Geschwistertransformator, wobei es hier auch Abweichungen geben kann.

Mittels der einphasigen frequenzabhängigen Kurzschlussimpedanz kann man ebenfalls mechanische Verformungen insbesondere im Bereich der Wicklungen und der einzelnen Windungen erkennen. Diese Messung gehört ebenfalls zu den eher selten bereits im Werk durchgeführten Messungen, daher bietet sich hier zu allererst ein Vergleich der Phasen untereinander an.

Phase	R_k [Ω]	X_k [Ω]	Z_k [Ω]	Abw. Z_k Mittelw. [%]	Z_{k_Ist} [%]	Z_{k_Soll} [%]	Abw. [%]
U	0,950	43,884	43,894	-2,69	15,12	14,1	7,21
V	0,961	44,583	44,593	-1,14			
W	1,042	46,824	46,836	3,83			
Mittelw.	0,984	45,097	45,108				

Abbildung 6: Ergebnisse der dreiphasigen Kurzschlussimpedanz OS-MS bei Fallbeispiel 1

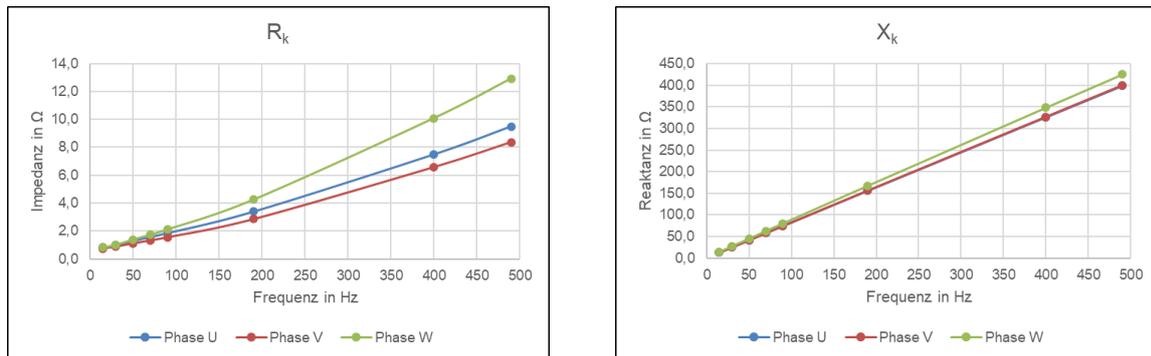


Abbildung 7: Grafische Darstellung der frequenzabhängigen Impedanz und Reaktanz (OS-MS) FB1

Sowohl bei dem Widerstand, als auch der Reaktanz sind im Vergleich der Phasen untereinander bei der Messung Oberspannungsseite zu Mittelspannungsseite deutliche Abweichungen nach oben bei der Phase W zu erkennen. Aus diesen Abweichungen lässt sich sehr eindeutig auf mechanische Verformungen im Bereich des Schenkels W schließen. Die Messung der Oberspannungsseite zur Unterspannungsseite zeigt allerdings keine Abweichungen. Daher ist der Fehler insbesondere auf die Phase W der Mittelspannungen zu verorten.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Beschädigungen, welche bei der Post-Mortem Untersuchung festgestellt worden sind.



Abbildung 8: Verformte MS-Wicklung Phase W

Vor dem Ausbau der Wicklung war schon deutlich zu sehen, dass die MS-Wicklung der Phase W in axialer Richtung verschoben war. Nach dem Ausbau wurde das gesamte Ausmaß der verformten Wicklung sichtbar.



Abbildung 9: Ausgebauete verformte MS-Wicklung der Phase W

Die Ergebnisse der Post-Mortem Analyse bestätigen die Messergebnisse und zeigen, dass es die richtige Entscheidung war, den Transformator nicht mehr in Betrieb zu nehmen.

Fallbeispiel 2:

In dem zweiten Fallbeispiel wird eine Diagnosemessung an einem 400/220/30 kV Netzkuppler vorgestellt.

Ausgangssituation war eine Abschaltung des Netzkupplers nach einem Kurzschluss zweier Außenleiter auf der Unterspannungsseite. Die durchgeführten Öluntersuchungen zeigten keine Hinweise auf thermische Ereignisse innerhalb des Transformators.

In der nachfolgende Tabelle sind die durchgeführten Maßnahmen und die dazugehörigen Ergebnisse dargestellt.

Durchgeführte Messungen	Bewertung	Anmerkungen
Übersetzungsverhältnis Primär–Sekundär		Auffällig
Übersetzungsverhältnis Primär–Tertiär		Auffällig
Wicklungswiderstand Primärwicklung		Unauffällig
Wicklungswiderstand Sekundärwicklung		Unauffällig
Wicklungswiderstand Tertiärwicklung		Auffällig
Kurzschlussimpedanz Prim-Sek.		Auffällig
Kurzschlussimpedanz Prim – Tert.		Auffällig
SFRA-Prüfung		Auffällig
Isolationswiderstände		Unauffällig

Abbildung 10: Tabellarische Zusammenfassung der Messergebnisse Fallbeispiel 1

Als einzige Messungen sind die Widerstandsmessung auf der OS und MS Seite, sowie die Isolationsmessungen ohne Auffälligkeiten. Bei allen anderen Messungen konnten zum Teil starke Abweichungen zwischen den Phasen sowie zu Grenzwerten festgestellt werden.

Aus den ermittelten Übersetzungsverhältnissen und der Phasenwinkel lässt sich der Fehler auf dem Schenkel U vermuten. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist die Unterspannungswicklung verschoben. Die Abweichungen bei der Übersetzungsmessung OS zu US zeigen hohe Abweichungen mit bis zu 12 %.

Die anschließend ermittelten Wicklungswiderstände zeigen auf der Tertiärseite eine leichte Erhöhung, ebenfalls bei der Phase 3U

Zur weitergehenden Diagnose wurden hier wie im Fallbeispiel 1 die einphasigen frequenzabhängigen Kurzschlussimpedanzen gemessen. Die Ergebnisse zeigen über alle Stufen hinweg eine starke Abweichung auf dem Schenkel U des Transformators.

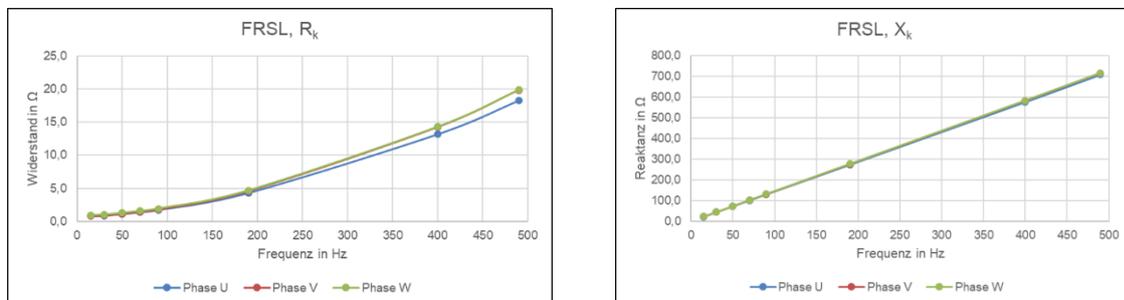


Abbildung 11: Grafische Darstellung der frequenzabhängigen Impedanz und Reaktanz (OS-MS) FB2

Die Messergebnisse zeigen, dass die Abweichungen bei Messung OS-US größer als bei der Messung OS-MS ausfallen. Diese sind hier sogar deutlich bei der Reaktanz zu sehen.

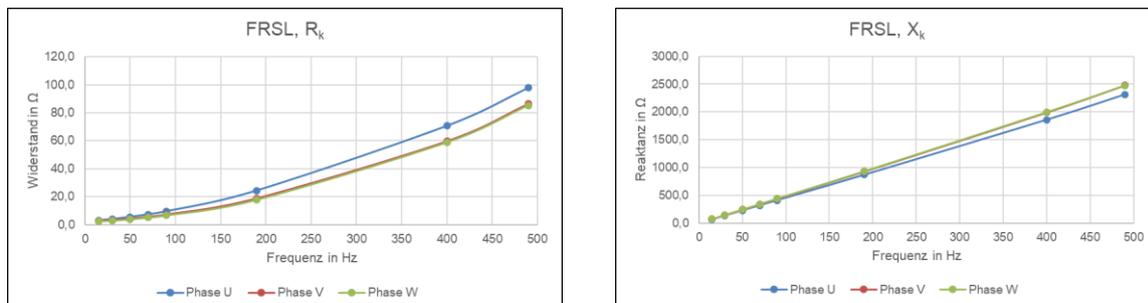


Abbildung 12: Grafische Darstellung der frequenzabhängigen Impedanz und Reaktanz (OS-US) FB1

Abschließend wurde noch eine SFRA-Messung durchgeführt, welche ebenfalls, auch ohne vorliegenden Fingerprint, im Phasenvergleich eine sehr eindeutige Auffälligkeit auf dem Schenkel U zeigt. Die Abweichungen beschränken sich bei der Leerlaufmessung auf den Frequenzbereich bis 2 kHz und deuten darauf hin, dass es keine Verformungen innerhalb der Wicklungen selbst, sondern eine allgemeine Verschiebung der Wicklungen untereinander gibt. Das konnte bei allen Leerlaufmessungen an jeder Spannungsebene festgestellt werden.

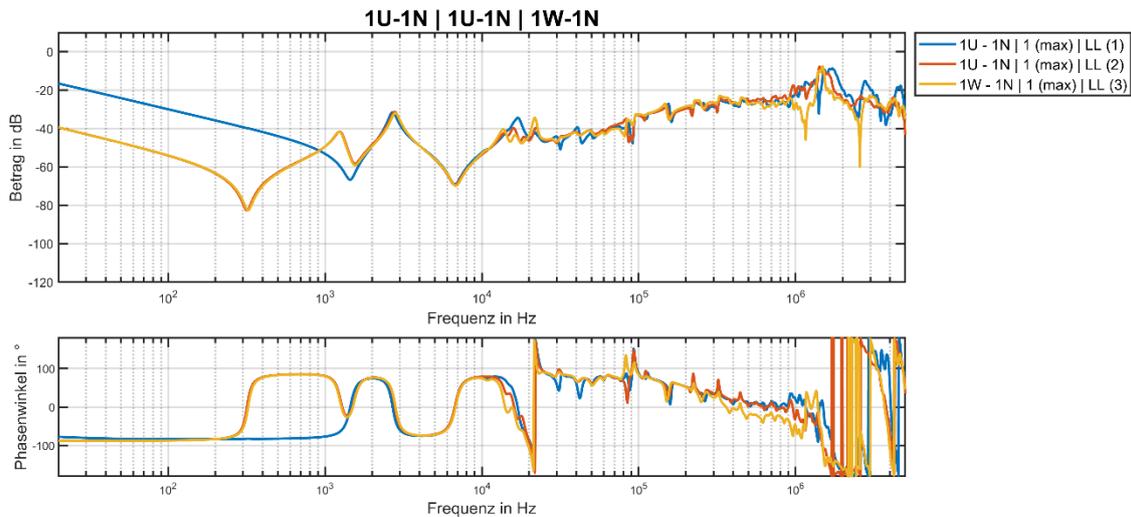


Abbildung 13: Phasenvergleich SFRA OS-Seite Stufe 1

Aus der Kombination dieser Messergebnisse lässt sich schließen, dass es auf dem Schenkel U durch den Kurzschluss zweier Außenleiter zu einer massiven Verformung und Verschiebung der Wicklung gekommen ist. Aufgrund des erhöhten Widerstandes bei der Phase 3U ist davon auszugehen, dass es hier um Züge des hohen Kurzschlussstromes zu einer Karbonisierung gekommen ist.

Stand heute gab es noch keine Post-Mortem Analyse. Wir hoffen, dass wir nach einer detaillierten Analyse das genaue Abbild des Schadens begutachten können.

Zusammenfassung

Die Detektion von mechanischen Fehlern kann sich teilweise etwas schwierig gestalten, insbesondere wenn der Transformator elektrische einwandfrei funktioniert. Dennoch können durch ein erneutes Zuschalten nach einer Abschaltung oder durch einen Fehler größere Beschädigungen bis zu einem Totalausfall auftreten. Die Durchführung geeigneter Diagnosemessungen ist daher unabdingbar.

Die Ergebnisse der Fallbeispiele zeigen, dass es auch ohne zuvor durchgeführte Fingerprintmessung im Vergleich der Phasen untereinander möglich ist, mechanische Verformungen zu detektieren. Hier zeigen insbesondere die Messung der einphasigen Kurzschlussimpedanz und die SFRA sehr großes Potential. Dennoch ist es empfehlenswert, wenn möglich Fingerprintmessung durchführen zu lassen. Nicht nur im Neuzustand, sondern auch wenn der Transformator schon länger in Betrieb ist, kann es sinnvoll sein, eine ausführliche Zustandsbewertung durchführen zu lassen und zeitgleich eine Grundlage für später Vergleiche damit zu schaffen.

Gerne beraten wir Sie bei der geeigneten Auswahl von Messungen zur Zustandsbewertung und Störungsdiagnosen.



Autor



Philip Wischtukat
Hubert Göbel GmbH
p.wischtukat@hgmes.de
Siemensstraße 42
59199 Bönen, Deutschland