

**TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT  
CONFERENCE**

**Leistungstransformatoren - neue Methode zur Bewertung  
der Wicklungspressung bei eingebautem Aktivteil**

**Dr.- Ing. Klaus Scheil**  
**ABB Transformatoren, Werk Halle**



Geboren und Schulbildung in Merseburg.

Nach Studium und Promotion (Fachrichtung elektrische Netze) bis 1986 beim Regionalen Energieversorger beschäftigt, zuletzt als Technischer Leiter der EV Halle.

Nach einer Werkserweiterung im Traforeparatur-Werk Halle (das zum regionalen Energieversorger/ ab 01.01.1991 dann zum ABB Konzern gehörte/gehört) ab 1986 zunächst Prüffeldleiter, später in Personalunion auch Qualitätsleiter.

Ab 2009 an gleicher Stelle Leiter des Befundteams. Damit zuständig für die Untersuchung von Reparaturobjekten im Werk bezüglich vorhandener Schädigungen aber auch Untersuchungen an Transformatoren bei Schadensfällen vor Ort.

**Sebastian Schreiter**  
**ABB Transformatoren, Werk Halle**

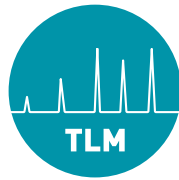


Sebastian Schreiter studierte Elektrotechnik und Informationstechnik in Leipzig und Hagen.

Seit Abschluss seines Studium arbeitet er bei der ABB AG am Transformatoren Service Standort in Halle.

Dort ist er im Bereich Zustandsbewertung und Diagnose tätig. Neben der Zustandsbeurteilung von Leistungstransformatoren über die gesamte Lebenszeit hinweg ist er im Befundprozess des Werkes für Fehlersuche an zu-reparierenden Transformatoren eingebunden. Weiterhin arbeitet er an Konzernweiten Forschungsaufgaben des globalen Engineering Solutions Teams im Bereich der Transformatoren-Diagnose und Service mit.





## Leistungstransformatoren - neue Methode zur Bewertung der Wicklungspressung bei eingebautem Aktivteil

### Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

### Leistungstransformatoren- neue Methode zur Bewertung der Wicklungspressung bei eingebautem Aktivteil

Klaus Scheil, Sebastian Schreiter

ABB AG, Geschäftsbereich Transformatoren, Werk Halle

#### Einführung

Für den sicheren und störungsfreien Betrieb von Leistungstransformatoren wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Diagnose-Verfahren entwickelt. Ihre konsequente Anwendung –auch online- führte dazu, dass eine erhebliche Anzahl schwerwiegender Transformatorschäden vermieden werden konnte, weil beginnende Schädigungen rechtzeitig erkannt wurden [1, 2]. Andererseits gab und gibt es Schadensfälle, die zu erheblichen Zerstörungen an Transformatoren führten, über deren Grundursache keine völlige Klarheit herrscht und die sich zuvor oft durch die bekannten Diagnoseverfahren nicht angekündigt hatten. So die Erfahrung der Autoren aus ihrer langjährigen Arbeit bei der Untersuchung einer Vielzahl unterschiedlicher Transformatorenschäden sowohl im Werk wie auch vor Ort. Anhand von Anhaltspunkten tauchte dabei immer wieder die Vermutung auf, dass zu geringe Wicklungspressung mit den vorgefundenen Schäden, etwa Windungsschlüssen mit resultierender Zerstörung von Wicklungen, im Zusammenhang stehen kann.

Vierorts, auch in ABB Forschungseinrichtungen, wurden, basierend auf den Erkenntnissen zur möglichen Schadensursache ‚zu geringe Wicklungspressung‘ [3], in den letzten Jahrzehnten Anstrengungen unternommen, Verfahren zu entwickeln zur Bewertung der Pressung von Transformatorenwicklungen [4-6]. Es ist nicht bekannt, dass sich eines dieser Verfahren in der Praxis der Transformatorendiagnose durchgesetzt hat. Das hat sicher unterschiedliche Gründe, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll.

Im weiteren Vortrag wird anhand von erzielten Messergebnissen an Transformatoren und an Transformatoren- Aktivteilen ein praxisorientiertes Verfahren vorgestellt, das geeignet erscheint, Wicklungspressungen zu bewerten und speziell lockere Wicklungen zu identifizieren.

#### Beschreibung des Verfahrens WCE (Winding Clamping Estimation)

Eine eingebaute und gepresste Transformator-Wicklung kann vereinfacht als ein Federsystem mit einem Freiheitsgrad und zwei festen Enden angesehen werden. Für die Eigenfrequenz  $f_0$  dieses Systems gilt die Gleichung

$$f_0 = \frac{1}{2} \pi * \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (1)$$

wobei  $m$ - die Masse der Wicklung und  $c$ - ihre Steifigkeit ist.

Es ist plausibel, dass bei höherer Presskraft die Steifigkeit des Systems zunehmen kann und damit auch seine Eigenfrequenz. Umgedreht kann bei geringerer Presskraft  $f_0$  abnehmen.

Appliziert man nun entsprechend Bild 1 einen mechanischen Impuls, beispielsweise mittels Gummihammer, auf die Kesselwand (oder beim ausgebauten Aktivteil auf einen Pressbalken) regt dieser die Bestandteile des Transformators zum Schwingen an, darunter auch die Transformatorwicklungen. Durch den im Eisenkern vorhandenen Restmagnetismus wird in den Wicklungen eine Spannung  $u = f(t)$  induziert, die gemessen werden kann.

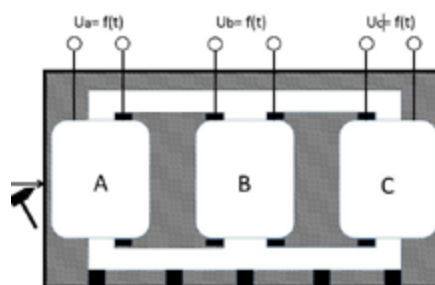
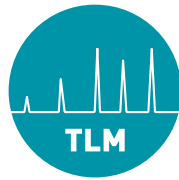


Bild 1: Prinzip- Darstellung zur Realisierung des WCE-Verfahrens an einem exemplarischen, 3phasigen Transformator.

In den Bildern 2&3 wird gezeigt wie ein realer Messaufbau aussieht am Beispiel der WCE-Messungen an einem 75MVA- Ofentrafo, mit einer OS- Nennspannung von 20kV. Auf dem Tisch ist das Oszilloskop zu erkennen mit den angeschlossenen Messkabeln von den OS-Durchführungen. Das Oszilloskop wiederum ist über ein USB- Kabel mit dem Rechner verbunden. Auf dem Tisch liegt auch ein Gummihammer, mit dem die mechanischen Impulse auf die Kesselwand appliziert werden. Bild 4 zeigt somit aufgenommene induzierte Spannungen  $u=f(t)$ .



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT  
CONFERENCE

# Leistungstransformatoren - neue Methode zur Bewertung der Wicklungspressung bei eingebautem Aktivteil

## Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

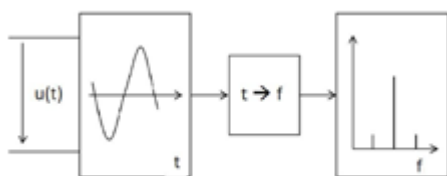


**Bilder 2&3:** Messungen entsprechend WCE- Verfahren an einem 75MVA- Ofentrafo während der Eingangsprüfung im Werk



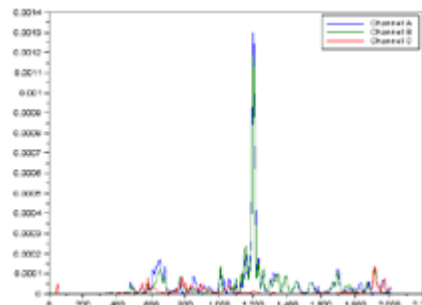
**Bild 4:** Beispiel von aufgenommenen OS- Spannungen  $1u_u(t)$ /blau,  $1u_v(t)$ /grün,  $1u_w(t)$ /rot an diesem Dreiphasen- Ofentrafo.

Die somit aufgezeichneten Kurven werden anschließend, wie im Bild 5 dargestellt, vom Zeit- in



**Bild 5:** Nach der Messung erfolgt die Transformation der Spannungen  $u=f(t)$  in den Frequenzbereich

den Frequenzbereich transformiert. Das kann mittels FFT (Fast Fourier Transformation) oder PSD (Power Spectral Density/Leistungsdichtespektrum) erfolgen. Das Resultat einer solchen Umwandlung in das PSD- Spektrum kann dem folgenden Bild 6 entnommen werden:



**Bild 6:** PSD- Spektren der induzierten Spannungen der OS- Wicklungen (Stufe 15) des beschriebenen 75MVA- Ofentrafos. Die Spektren für 1U (blau) und 1V (grün) weisen bei 1200Hz jeweils ein klares Maximum (fo) auf. Das von 1W (rot) dagegen nicht.

Diese und weitere WCE- Spektren ließen erwarten, dass die Stammwicklung W über keine Presskraft mehr verfügt. Das bestätigte sich später nach Ausbau des Aktivteils durch Messungen mittels hydraulischer Aufnehmer und durch Inaugenscheinnahme (s. Bild 7).



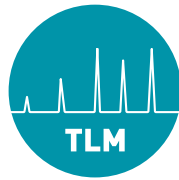
**Bild 7:** Die OS- Stammwicklung W (die mittlere Wicklung, außen befindet sich die US) verfügte über keinerlei Presskraft mehr. Das Wicklungsende/ ihre oberste Winding konnten sich erkennbar nach links/ im Uhrzeigersinn verschieben.

Durch die erkennbare Verschiebung von Wicklungsende und oberster Winding kam es zum Windingsschluss zwischen oberster und zweiter Winding. Der Transformator löste dadurch beim Kunden im Betrieb ohne Vorankündigung aus.

### Mögliche Fragen zum WCE- Verfahren und die Antworten

- **Spielt die Stelle der Impulsapplikation auf die Kesselwand oder die Pressbalken (bei Messungen am Aktivteil) eine Rolle?**

Prinzipiell nein, wie WCE- Messungen an einer ganzen Reihe von Transformatoren und Transformatorenaktivteilen zeigen (insgesamt an mehr als 20 Objekten im Werk wie auch vor Ort). Allerdings wurden/werden Impulse mittels Gummihammer immer auf mehrere Stellen rings



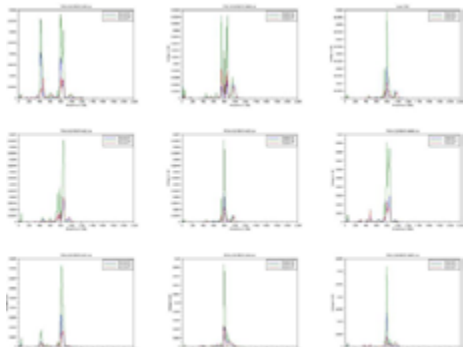
## TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

# Leistungstransformatoren - neue Methode zur Bewertung der Wicklungspressung bei eingebautem Aktivteil

### Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

um einen Transformator oder ein ausgebautes Aktivteil appliziert. Bild 8 zeigt die WCE- Spektren der 120kV- Wicklungen, die nach Hammerschlag auf 8 unterschiedlichen Stellen des Aktivteils eines neuen 400MVA- (400kV/120kV/33kV) Trafos vor der Ofentrocknung gemessen wurden. Das neunte Bild (rechts oben) ist der Mittelwert der übrigen acht. Die Wicklungen waren alle gepresst (Presskraft bekannt) um das Oberjoch zuvor einschichten zu können.

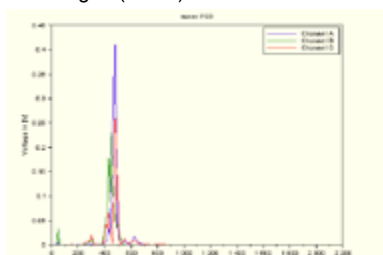


**Bild 8:** WCE- Spektren, gemessen an den 120kV(MS)-Wicklungen des beschriebenen 400MVA- Trafoaktivteils vor der Ofentrocknung.

Die Spektren weisen alle bei ca. 800Hz Maxima aus. Die Höhe der induzierten Spannungen hängt natürlich von der Stärke des mechanischen Impulses ab. Deshalb schwankt die Amplitudenhöhe bei  $f_0$  um bis zu einer Größenordnung. Auf den Bildern mit kleineren  $f_0$ -Amplituden erscheinen deshalb Störeinflüsse relativ größer (beispielsweise im Bild links oben).

- **Unterscheiden sich die  $f_0$  unterschiedlicher Wicklungen auf dem gleichen Aktivteil?**

Das dem so sein kann zeigt das WCE- Spektrum in Bild 9 der 400kV- Wicklungen dieses 400MVA- Trafoaktivteils. Die Messbedingungen (gepresst, Aktivteil vor der Ofentrocknung) sind die gleichen wie zuvor bei der WCE- Messung an den MS- Wicklungen (Bild 8).

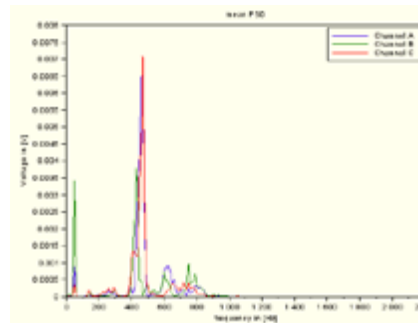


**Bild 9:** WCE- Spektren der 400kV- Wicklungen (St 01).

Die Maxima liegen bei den OS- Wicklungen A und C bei ca. 480Hz, bei der Wicklung B bei ca. 440Hz, was sich deutlich von den 800Hz der MS- Wicklungen unterscheidet.

- **Ändern sich mit unterschiedlicher Wicklungspresskraft die  $f_0$  der WCE- Spektren tatsächlich?**

Die folgenden Messergebnisse, durchgeführt wiederum an den 120kV(MS)- Wicklungen des genannten 400MVA- Trafoaktivteils, diesmal jedoch nach der Ofentrocknung, jedoch noch vor dem Nachspannen, zeigen folgendes Resultat (Bild 10):



**Bild 10:** WCE- Spektren, gemessen an den 120kV(MS)-Wicklungen des beschriebenen 400MVA- Trafoaktivteils unmittelbar nach der Ofentrocknung, vor dem Nachspannen.

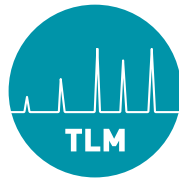
Die  $f_0$  von zuvor ca. 800Hz sind jetzt deutlich niedriger, sie liegen im Bereich von 410...440Hz. Die zuvor bestehende Pressung wurde erheblich verringert, nachdem das in den Wicklungen vorhandene Wasser durch den Trocknungsprozess entfernt worden war.

#### Messungen vor Ort

Bisher wurden im Rahmen der Entwicklung des Verfahrens noch 2014 WCE- Messungen an zwei Transformatoren vor Ort durchgeführt: an einem 1phasen 75MVA- Transformator 220/25kV sowie einem 600MVA- Blocktransformator 20/400kV.

Die Messergebnisse an dem 1Phasentrafo waren nicht zufrieden stellend (hohe Störeinflüsse 50Hz bei Messungen sowohl auf der OS wie der US-Seite) bedingt, möglicher Weise, durch zu niedrigen Restmagnetismus des Kerns.

Vor den WCE- Messungen an dem 600MVA- Trafo war durch Einstieg festgestellt worden, dass es Probleme mit der Pressung gibt (Bilder 11&12). Händisch war danach das verschobene Teil der Pressung (Bild 12) gerichtet wie auch lockere Pressschrauben (nicht nur an Säule W, wie im Bild 11 zu sehen) nachgezogen worden. Die Höhe der Wicklungspresskräfte war danach nicht bekannt.



## TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

# Leistungstransformatoren - neue Methode zur Bewertung der Wicklungspressung bei eingebautem Aktivteil

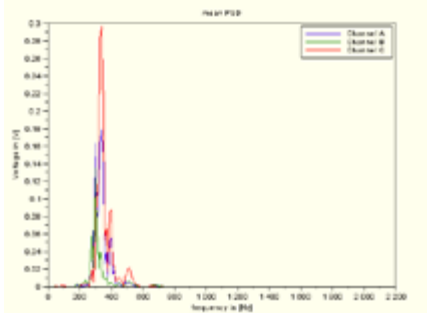
### Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)



**Bilder 11&12:** Lockere Pressteller an Säule W und verschobenes Teil der Wicklungspressung.

Anschließend wurden an dem noch eingerüsteten Transformator WCE- Messungen durchgeführt.



**Bild 13:** WCE- Spektren, gemessen an den 400kV(OS)-Wicklungen, St.01 des beschriebenen 600MVA-Transformators.

Die  $f_0$  liegen bei 1U und 1W bei ca. 330Hz, bei 1V nur bei ca. 280Hz. Auf mehreren Einzelbildern (vor allem bei denen mit hohen Amplituden) ist erkennbar, dass auf 1V kaum eine klare  $f_0$  zu erkennen ist. Die Pressung von 1V ist ganz offensichtlich geringer als auf den beiden anderen Phasen und sie wird nicht weit vom Status 'locker' entfernt sein. Mangels WCE- Vergleichsbildern bei bekannter, ausreichender Pressung lässt sich bezüglich Status der Pressung von 1U und 1W keine abschließende Schlussfolgerung ziehen.

#### Aktuelle Möglichkeiten des WCE- Verfahrens

Mit dem WCE- Messverfahren ist es möglich, speziell bei 3phasen- Transformatoren lockere Wicklungen von gepressten zu unterscheiden, für alle Spannungssysteme (OS, US, gegebenfalls MS). Das vor Ort, bei voll aufgerüsteten Transformatoren. Bei Vorhandensein von WCE- Spektren bei bekannter Wicklungspressung lässt sich durch Vergleich abschätzen, ob und gegebenenfalls um wieviel die Wicklungspressung nachgegeben hat.

*Das Verfahren wurde als Patent angemeldet.*

#### Literaturverzeichnis

[1] ABB, Service Handbook for Transformers, 2. Auflage, 2007

[2] S. Kornhuber, P. Werle, O. Kouzmine, Öldiagnose an praktischen Beispielen- Wie?/Was?/Warum?, Tagungsband TLM 2013, Hannover, S. 65-71

[3] Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D., Review of condition assessment of power transformers in service, Electrical Insulation Magazine, IEEE Nov.-Dec. 2002 18(6)

[4] T. Wass, O. Kouzmine, T. Bengtsson, Winding clamping force assessment by vibration analysis: Results current pulse excitation method, (unveröffentlichter ABB Technical Report SECRC/PT/TR-2008/004)

[5] Patent der Russischen Föderation RU 2117955 C1, Russisches föderales Nuklearzentrum- Russisches wissenschaftliches Forschungsinstitut für technische Physik, Veröffentlicht am 20.08.1998 (russ.)

[6] Shao Yuying, Guan Hong, Zhang Yu, Jin Zhijiang, Rao Zhushi, A Vibration Method for Identifying the Looseness of Windings for Large Power Transformers, 4<sup>th</sup> Conference ICSPS, Singapore, 2012

#### Zusammenfassung

Die verbleibende Wicklungspressung ist eine wichtige Kenngröße bei der Bewertung des Zustands und eines möglichen Ausfallrisikos von Leistungstransformatoren. Diese konnte jedoch bislang ohne direkte Messungen am Aktivteil messtechnisch nicht untersucht werden. In diesem Beitrag wird ein neues Verfahren zur Bewertung der verbleibenden Wicklungspressung vorgestellt und anhand realer Messwerte erläutert, das vor Ort ohne Zugang zum Aktivteil realisierbar ist.

#### Autorenanschrift

ABB AG, GB Transformatoren

Dr. Klaus Scheil  
Leiter Befundteam

Sebastian Schreiter  
Ingenieur für Diagnose

Trafoweg 4, D- 06112 Halle

Tel.: +49 345 5686 275

Fax: +49 345 5686 104

E-Mail: [klaus.scheil@de.abb.com](mailto:klaus.scheil@de.abb.com)

