

# Praktische Aspekte bei der Messung der Übertragungsfunktion an Leistungstransformatoren

Christian Homagk, Thomas Leibfried

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

## Kurzfassung

Dieser Beitrag diskutiert die Auswirkungen bei Abweichungen im Aufbau der Messanordnung zur Bestimmung der Übertragungsfunktion an Leistungstransformatoren, ein von der CIGRE WG A2.26 intensiv bearbeitetes Thema. Hinzu kommt die Wahl einer sinnvollen oberen Frequenzgrenze, jenseits derer FRA-Messungen (Frequency Response Analysis) durch den Einfluss der Abweichungen im Messaufbau keinen Sinn mehr machen. Anhand realer Messungen wird der zeit-, konstruktions- und typenbasierte Vergleich untersucht.

## Einleitung

Die Ermittlung der Übertragungsfunktion ist eine empfindliche Diagnosetechnik zur Feststellung von mechanischen Veränderungen am Aktivteil von Leistungstransformatoren. Kommt es infolge von Netzkurzschlüssen oder Transporten zu Deformationen an den Transformatorwicklungen, verändert sich deren Übertragungsfunktion.

Manche Autoren technischer Beiträge zu diesem Thema (z.B. [1]) schlagen vor, den Frequenzbereich der Übertragungsfunktion auf mindestens 10 MHz auszudehnen und weisen Abweichungen in der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich ab 1 MHz bis in hohe Frequenzbereiche bei mechanischer Verformung einer Transformatorwicklung nach.

## Die SFRA-Methode

Zur Ermittlung der Übertragungsfunktion, wird bei dem hier vorgestellten SFRA-Verfahren (Sweep Frequency Response Analysis) an einem Anschluss eines freigeschalteten und vom Netz getrennten Leistungstransformators ein frequenzveränderliches Sinussignal bekannter Spannung eingespeist und mittels eines Sensors an einem anderen Anschluss das Signal ausgekoppelt und gemessen. So lässt sich die Übertragungsfunktion eines Leistungstransformators im Frequenzbereich in Betrag und Phase zwischen zwei Anschlüssen ermitteln.

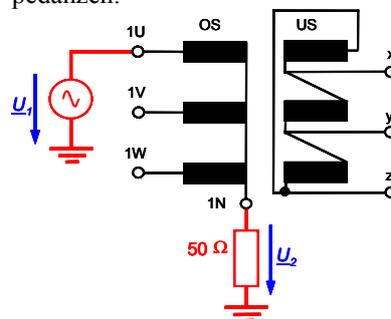
## Durchführung von Messungen

Zur Ermittlung der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich wird das Testobjekt mit einer sinusförmigen Spannung angeregt. Das ebenfalls sinusförmige Antwortsignal gleicher Frequenz unterscheidet sich

in Amplitude und Phase. Durch Variation der Signalfrequenz lässt sich die Übertragungsfunktion

$$\underline{H}(f) = \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \quad (1)$$

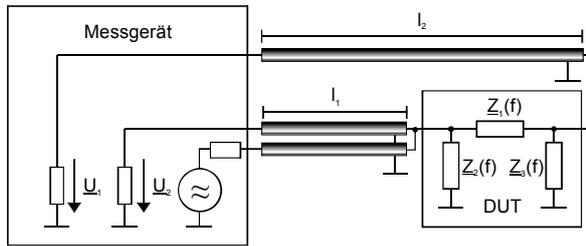
im gewünschten Frequenzbereich ermitteln [2]. **Bild 1** zeigt das prinzipielle Ersatzschaltbild bei Messung zwischen 1U und 1N an einem Transformator YNd5, **Bild 2** illustriert die praktische Realisierung an einem Prüfobjekt mit komplexen, frequenzabhängigen Impedanzen.



**Bild 1:** Ersatzschaltbild der SFRA-Messung

Der geerdete Kessel des Transformators muss mit dem Erdungssystem des Messgeräts verbunden werden. Es hat sich gezeigt, dass die Verbindung zwischen Kessel und Messanschluss wesentlichen Einfluss auf die Übertragungsfunktion hat. Um eine gute Reproduzierbarkeit von FRA-Messungen zu gewährleisten, muss die Vorgabe einer Erdungsstrategie integraler Bestandteil der Messprozedur sein. Gleichzeitig muss der Messaufbau auch bei sehr großen Leistungstransformatoren realisierbar sein. Im Rahmen von umfangreichen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass ein breites, feinadriges Aluminiumgeflechtband zur Verbindung der Messerdnen mit dem Kessel einen akzeptablen Kompromiss zwischen Kosten, Gewicht und Nutzen darstellt. Der wesentliche Unterschied zwischen Geflechtbändern und herkömmlichen Kabeln ist neben der Reduktion der Induktivität des Lei-

ters der deutlich reduzierte, frequenzabhängige Skin-effekt. Der Effekt der Stromverdrängung ließ sich bereits bei Messfrequenzen von 50 kHz nachweisen.



**Bild 2:** Realisierung des Messkreises

Neben den verwendeten Erdungsmaterialien muss dem Benutzer auch eine Aufbaustrategie vorgegeben werden, welche die möglichen Freiheitsgrade minimiert. Die Verlegung der Erdung unmittelbar entlang der Freiluftdurchführung des Transformators und eine Verbindung mit dem Transformatorkegel unmittelbar am Fußpunkt der Durchführung führen hier zu guten Ergebnissen. Bei der Verbindung mit dem Kessel muss Wert auf eine großflächige Kontaktierung des Erdungsbandes mit einem blanken Teil am Fußpunkt der Durchführung gelegt werden. Bei der Behandlung der restlichen Erdungsbandlänge nach der Verbindung mit dem Kessel (z.B. Aufrollen oder Abwickeln) konnte bei korrekter Kontaktierung kein Einfluss auf die Übertragungsfunktion festgestellt werden. **Bild 3** zeigt den Anschluss des Messkopfes am Bolzen der Durchführung und die Verlegung des Erdungsbandes entlang einer 400 kV-Durchführung.

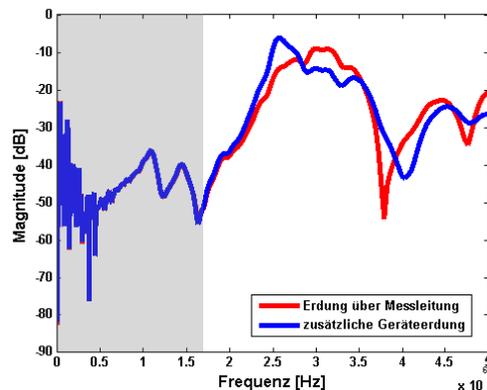


**Bild 3:** Ankopplung des Messsystems und Anschluss der Messerde an eine 400kV-Durchführung

Bei dem von den Autoren verwendeten Meßsystem ist die Schutz Erde des Geräts nicht mit der Messerde verbunden, d.h. im verwendeten Aufbau ist das Messgerät über die Schirme der beiden Signalleitungen mit dem geerdeten Transformator verbunden. Bei einer Vielzahl von Messungen in Kraftwerken und Umspannstationen mit umgebenden, sich in Betrieb be-

findenden Anlagenteilen konnte bisher keine Störeinkopplungen festgestellt werden.

Um den Einfluss einer veränderten Erdkonfiguration zu untersuchen, wurde bei einer Messung an einem Einphasen-Netzkuppltransformator (110/132 kV, 50 MVA) neben der üblichen Erdung über die beiden Signalkabel das Messgerät mittels einer 1m langen Laborleitung an einen Erdungsanschluss des Transformatorkegels angeschlossen. Hier zeigte sich ein identischer Verlauf der Übertragungsfunktion bis etwa 1,6 MHz, bei höheren Frequenzen zeigen sich signifikante Abweichungen sowohl im Betrag der Übertragungsfunktion wie auch in der Lage der Resonanzstellen, siehe **Bild 4**.



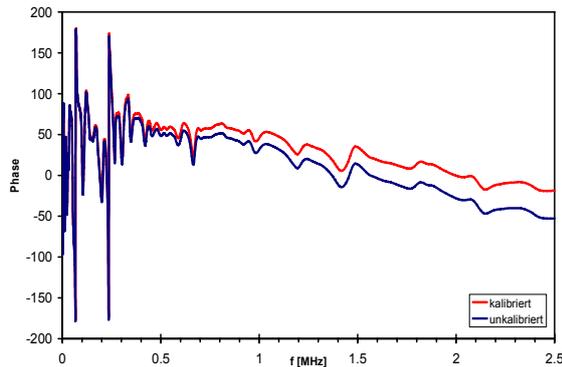
**Bild 4:** Abweichung durch unterschiedliche Erdung

Um auch nach längerer Zeit die Wiederholbarkeit einer FRA-Messung mit einem möglichst identischen Messaufbau zu gewährleisten, ist bei der Dokumentation besonders sorgfältig vorzugehen: Die verwendeten Anschluss- und Erdungspunkte sind bei Messungen der Übertragungsfunktion eindeutig zu dokumentieren. Zweckmäßigerweise geschieht dies über Photographien. Die Art und Abmessungen der verwendeten Erdungsleitungen sind im Messbericht aufzuführen.

## Kalibrierung

Da auch das Messsystem und die Zuleitungen mit dem gewählten Erdungssystem einen spezifischen Frequenzgang aufweisen, ist es nötig, eine Kalibrierungsmessung durchzuführen. Mit der so ermittelten Übertragungsfunktion des Messaufbaus lässt sich aus der gemessenen Gesamtübertragungsfunktion von Messgerät, Zuleitungen und Testobjekt die Übertragungsfunktion des Leistungstransformators errechnen. **Bild 5** zeigt die Abweichungen bei der Messung der Übertragungsfunktion mit und ohne Kalibrierung bei Leitungslängen von  $l_1=7$  m und  $l_2=15$  m. Während die Dämpfung der Übertragungsstrecke unter 1 dB bleibt, kommt es zu einer signifikanten Phasendrehung, da

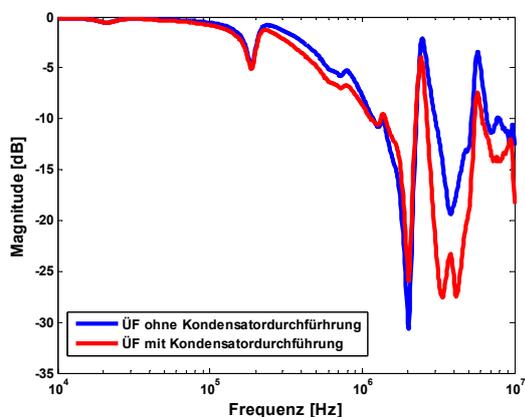
die Messkabel bei hohen Frequenzen nicht mehr als elektrisch kurz betrachtet werden können.



**Bild 5:** Phasenverlauf mit und ohne Kalibrierung

## Einfluss von Kondensatordurchführungen

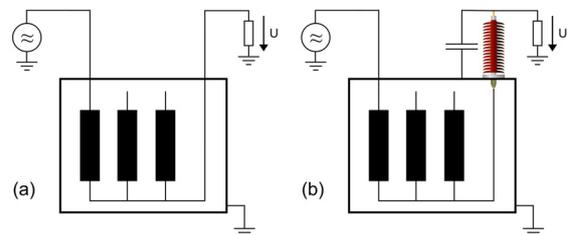
Kapazitiv gesteuerte Durchführungen stellen aufgrund ihrer geschichteten leitfähigen Beläge eine Serienschaltung von Kondensatoren dar und zeigen zwischen dem Hochspannungsanschluss und dem mit dem Transformator kessel verbundenem Fußpunkt im Wesentlichen Hochpassverhalten. Um den Einfluss einer Durchführung zu untersuchen wurde an einem Verteiltransformator (20/0,4 kV 800 kVA) die Übertragungsfunktion der Unterspannungswicklung 2U-2N bestimmt. Anschließend wurde die Messung mit gleichen Parametern wiederholt, das zu messende Signal wurde jedoch über eine 123 kV-Kondensatordurchführung geführt und an der Spitze der Durchführung abgegriffen (**Bild 7**). Die Durchführung war durch ein kurzes Stück Aluminiumgeflechtband mit dem Transformator kessel verbunden. Der Messanschluss der Durchführung war geerdet. **Bild 6** zeigt, dass bereits ab 200 kHz Abweichungen im Verlauf der Übertragungsfunktion auftreten.



**Bild 6:** Einfluss einer 123kV-Kondensatordurchführung auf die Übertragungsfunktion

## Anschlussbehandlung

Insbesondere bei Transformatoren mit hohen Nennspannungen und großen Leistungen ist aufgrund der Ausmaße der Verkabelungsaufwand bestimmend für die Dauer der Messung. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, nicht verwendete Wicklungssysteme zu erden oder kurzzuschließen. Wird die Messung wiederholt, muss mit dem identischen Messaufbau gearbeitet werden. Bei einer Reproduktion der Messung kumulieren sich bei mehreren Verkabelungsschritten kleinere Abweichungen im Messaufbau, was u. U. zu einer Abweichung der Übertragungsfunktion führt. Unter dem Aspekt einer guten Gewährleistung der Reproduzierbarkeit wurde bei Messungen der Autoren an Leistungstransformatoren darauf verzichtet, bei der Messung nicht genutzte Anschlüsse zu erden oder kurzzuschließen und die Zahl und Länge der verwendeten Kabel wurde möglichst gering gehalten.



**Bild 7:** Messung der Übertragungsfunktion mit (b) und ohne (a) Kondensatordurchführung

Kommt es bei zeitlich aufeinander folgenden Messungen an einem Transformator mit identischer Messkonfiguration zu Abweichungen, kommen neben einer tatsächlichen Änderung des mechanischen Aufbaus des Wicklungssystems auch weitere Aspekte in Betracht, die für eine Abweichung der Übertragungsfunktion in Frage kommen könnten:

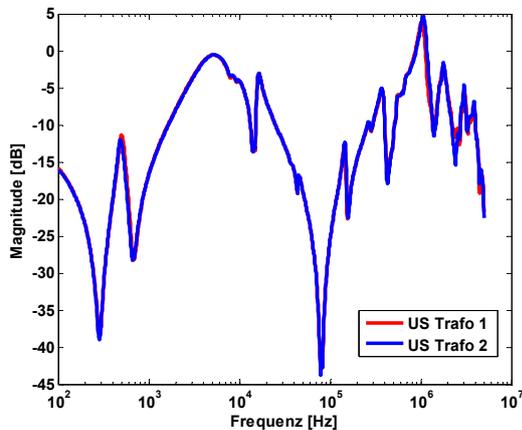
- durch den Messaufbau verursachte Abweichungen
- Veränderung des Übertragungsverhaltens der im Signalweg enthaltenen Hochspannungsdurchführungen
- Veränderung des Übertragungsverhaltens des Stufenschalters

Über die Auswirkungen von Veränderungen an Stufenschalter und Durchführungen auf die Übertragungsfunktion liegen derzeit noch keine Erkenntnisse vor, sind jedoch prinzipiell nicht auszuschließen.

## Vergleichsmethoden

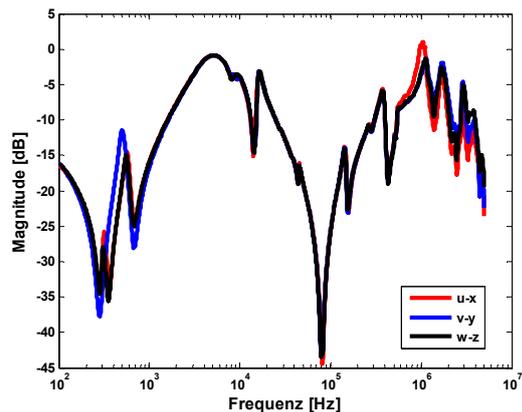
Sind an einem Standort zwei Transformatoren parallel geschaltet, kommen häufig augenscheinlich baugleiche Transformatoren zum Einsatz. Hier kann bei aufeinander folgenden Seriennummern mit hoher Wahr-

scheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass der Aktivteil mechanisch identisch aufgebaut ist. Vergleicht man die Übertragungsfunktion einer Phase eines Transformators mit der identischen Phase des anderen Transformators, treten unter der Annahme, dass kein Defekt vorliegt, die Einflüsse der fertigungstechnischen Toleranzen zu Tage (**Bild 8**).



**Bild 8:** Übertragungsfunktion einer US-Wicklung, baugleiche Maschinentransformatoren, Nennleistung 273 MVA

Der Vergleich der Phasen einer Spannungsebene am gleichen Leistungstransformator untereinander führt im Allgemeinen zu schlechteren Ergebnissen und lässt sich aufgrund der unsymmetrischen Anordnung der Wicklungen im Kessel nur auf einen deutlich eingeschränkteren Frequenzbereich anwenden. **Bild 9** zeigt die Abweichungen der Übertragungsfunktionen der drei Oberspannungswicklungen eines Maschinentransformators (400/15 kV, 273 MVA).



**Bild 9:** Übertragungsfunktionen der OS-Wicklungen eines 273 MVA Maschinentransformators

### Vergleich mit der Kohärenzfunktion

Um zwei Übertragungsfunktionen auf ihre Ähnlichkeit zu untersuchen, gibt es verschiedene Möglichkei-

ten, z.B. Bildung der Differenzfunktion oder der Kohärenzfunktion [3],[4]. Die Kohärenzfunktion liefert eine Aussage über die Ähnlichkeit zweier Funktionen und ist definiert als

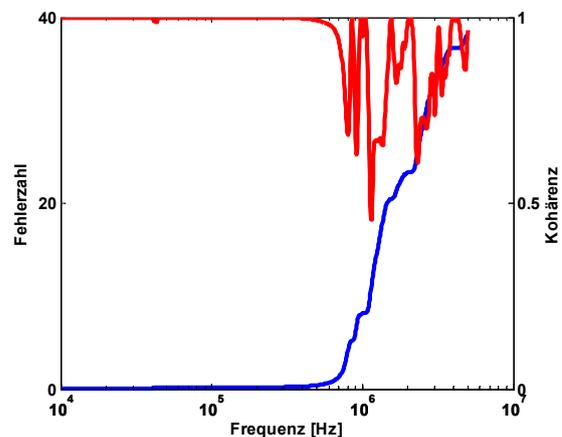
$$\gamma^2_{XY}(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f) \cdot G_{YY}(f)} \quad (2)$$

Sie liefert Werte zwischen 0 (keine Korrelation) und 1 (vollständige Korrelation beider Signale). Bereits kleine Abweichungen in Betrag und Phase der Funktionen voneinander führen zu einer Abweichung des Korrelationskoeffizienten vom Wert 1.

Normiert man die Kohärenzfunktion auf den Wert 0 und summiert über die Frequenz, ergibt sich eine monoton steigende Funktion, die eine Aussage der gesamten Abweichung der Übertragungsfunktionen voneinander bis zur Frequenz  $f_1$  liefert:

$$FZ(f_1) = \sum_{k=f_0}^{f_1} 1 - \gamma^2_{XY}(k) \quad (3)$$

Unter der Annahme, dass beim Vergleich zweier Übertragungsfunktionen kein Defekt vorliegt, lässt sich ein willkürlicher Schwellwert  $FZ_{\text{grenz}}$  definieren und die Frequenz  $f_{\text{grenz}}$  ermitteln, bis zu der die Übertragungsfunktionen als vergleichbar betrachtet werden. Der Wert  $f_{\text{grenz}}$  charakterisiert diejenige Frequenz, bis zu der zwei Übertragungsfunktionen um das tolerierte Maß  $FZ_{\text{grenz}}$  voneinander abweichen. So ist eine vergleichende Aussage über die Qualität der im Folgenden vorgestellten Vergleichsmethoden möglich. **Bild 10** zeigt den Verlauf von Kohärenz und Fehlerzahl von zwei nicht identischen Übertragungsfunktionen.



**Bild 10:** Kohärenz und Fehlerzahl

In **Tabelle 1** sind Transformatoren unterschiedlicher Nennleistung und Bauart aufgeführt. Folgende Vergleiche wurden durchgeführt:

- „Wicklung“: Die Übertragungsfunktionen zweier Wicklungssysteme einer Spannungsebene am gleichen Transformator werden verglichen

- „baugleich“: Die Übertragungsfunktionen eines Wicklungssystems zweier baugleicher Transformatoren werden verglichen
- „Zeit“: Die Messung wird am selben Trafo mit dem gleichen Aufbau wiederholt

Da in dieser Untersuchung die Frequenzobergrenze der verglichenen Übertragungsfunktion ermittelt werden soll, wurde die untere Auswertefrequenz auf 7 kHz definiert, um zeitvariante Einflüsse des Transformator Kerns auszublenden [6]. Die Fehlerzahl wurde zu  $FZ_{\text{grenz}}=1,5$  gewählt.

Transformator	Wicklung	Vergleich	$f_{\text{grenz}}$
1100 MVA Maschinentransformator	OS	Wicklung	742 kHz
	US	Wicklung	1,29 MHz
	OS	baugleich	2,10 MHz
	US	baugleich	4,50 MHz
273 MVA Maschinentransformator	OS	Wicklung	704 kHz
	US	Wicklung	1,18 MHz
	OS	baugleich	1,56 MHz
	US	baugleich	5,00 Mhz
40 MVA 1~ Maschinentransformator	OS	Wicklung	13,58 kHz
	OS	baugleich	349 kHz
	US	baugleich	5,00 MHz
	OS	Zeit	5,00 MHz
	US	Zeit	5,00 MHz

**Tabelle 1:** Frequenzgrenzen beim Vergleich, Transformatoren unterschiedlicher Baugröße

Die Untersuchungen zeigen, dass die Übertragungsfunktionen identischer Phasen baugleicher Transformatoren eine höhere Ähnlichkeit zeigen als die verschiedenen Phasen eines Transformators. Offensichtlich haben Fertigungstoleranzen einen geringeren Einfluss auf die Übertragungsfunktion als die unterschiedliche Länge und Lage der Wicklungsausleitungen und die allgemeine Unsymmetrie der Wicklungsanordnung im Kessel. Gleichzeitig lässt sich bei Transformatoren mit zunehmender Größe bis zur gleichen Abweichung ein weiterer Frequenzbereich auswerten. Ein Vergleich der Übertragungsfunktionen der Phasen einer Spannungsebene ist durch die unterschiedliche Position im Kessel und die unterschiedliche Verlegung der Ausleitungen auf einen geringeren Frequenzbereich beschränkt.

## Zusammenfassung

Mit dem hier vorgestellten Aufbau lassen sich Übertragungsfunktionen an Leistungstransformatoren bis

in den Bereich von 5 MHz sicher reproduzierbar messen. Voraussetzung ist jedoch, dass unter den exakt gleichen Bedingungen gemessen wird wie bei einer vorhergehenden Messung. Während der Einfluss der Wicklungs- und Öltemperatur auf die Übertragungsfunktion vergleichsweise gering ist [5], hat die Erdungsbehandlung des Messsystems deutlichen Einfluss auf die Messung.

Der Vergleich baugleicher Transformatoren ist über einen weiteren Frequenzbereich möglich als der Vergleich zwischen den Wicklungen eines Spannungssystems. Da fertigungsbedingte Toleranzen sich bei den bisher untersuchten Transformatoren bereits im Frequenzbereich von 1 bis 2 MHz auswirken, dürfte eine an einem Transformator reproduzierbare Frequenzobergrenze von 5 MHz ausreichen, um Veränderungen am Wicklungsaufbau zu detektieren. Die Gefahr einer Fehlinterpretation durch Abweichungen der Übertragungsfunktion, die durch den Messaufbau verursacht wird, steigt im Bereich über 2 MHz deutlich an.

## Literatur:

- [1] Wang, M., Vandermaar A.J., Srivastava K. D.: Improved Detection of Power Transformer Winding Movement by Extending the FRA High Frequency Range. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005
- [2] Feser K., Christian J., Neumann C., Sundermann U., T. Liebfried, et.al, "The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers After Transport, Short Circuit or 30 Years of Service", CIGRE Paris, paper no. 12/33-04, 2000
- [3] Rickmann J., Britton J., Gockenbach E., Coffeen L., „Neues Verfahren zur Erkennung von Wicklungsdeformationen in Leistungstransformatoren“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, 2004
- [4] Liebfried T., „Die Analyse der Übertragungsfunktion als Methode zur Überwachung des Isolationszustandes von Großtransformatoren“, Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [5] Christian J., „Erkennung mechanischer Wicklungsschäden in Transformatoren mit der Übertragungsfunktion“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [6] M. Nothaft: "Untersuchung der Resonanzvorgänge in Wicklungen von Hochspannungsleistungstransformatoren mittels eines detaillierten Modells“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994