

Kapitel 2

Motivation und Ziel der Arbeit

Grundlage dieser Arbeit sind diagnostische Messungen an über 100 Leistungstransformatoren mit Bemessungsleistungen zwischen 30 und 1100 MVA in Kraftwerken und Umspannwerken verschiedener deutscher Energieversorgungsunternehmen und den dort gesammelten Erfahrungen zur Vor-Ort-Messtechnik. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über Alter und elektrische Parameter der untersuchten Population.

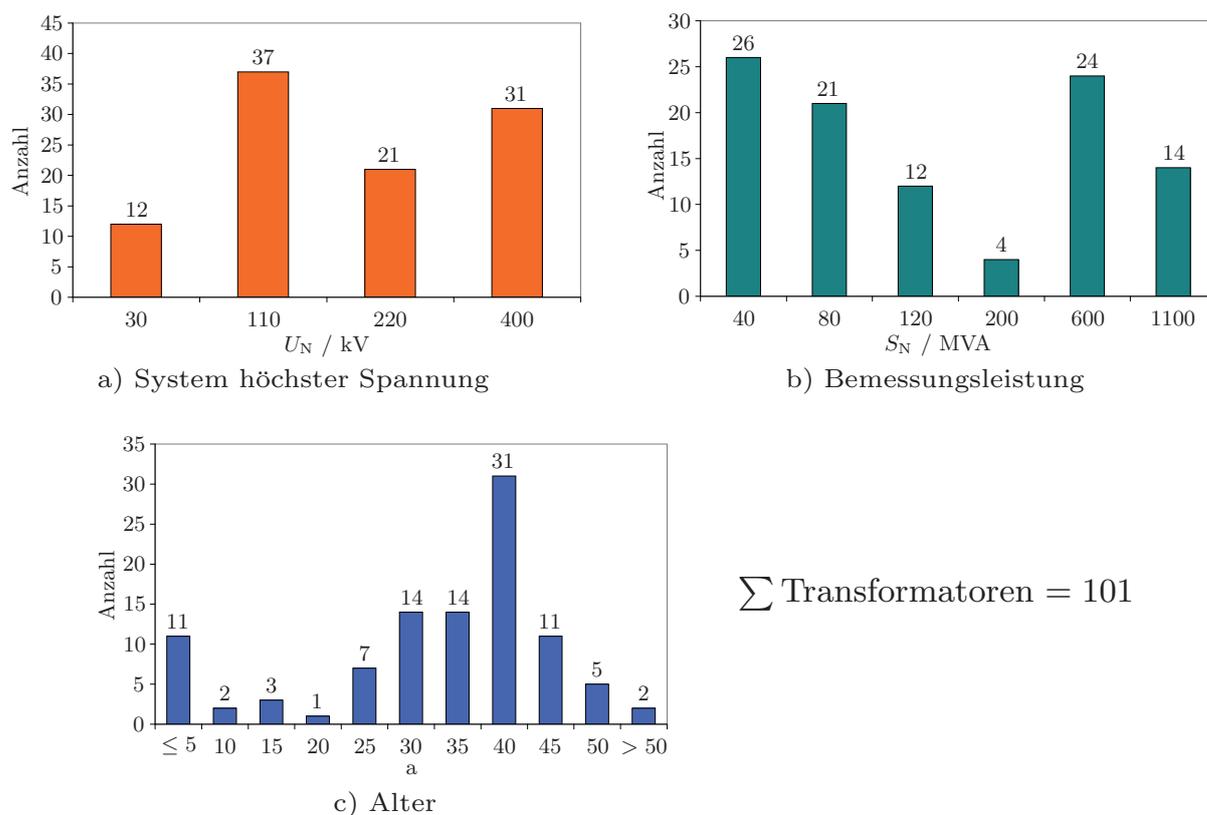


Abb. 2.1: Untersuchte Transformatoren

Es werden zur Vor-Ort-Diagnose eines Leistungstransformators geeignete Verfahren vorgestellt, die mit beschränktem Materialaufwand innerhalb kurzer Zeit durchgeführt werden können.

Der Messung der Übertragungsfunktion wird aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften und Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Hierbei handelt es sich um ein empfindliches Verfahren zur Erkennung mechanischer Schäden am Aktivteil des Transformators. Aufgrund der Komplexität von Transformatoren und der Nichtverfügbarkeit von Konstruktionsunterlagen ist eine präzise Modellierung der gemessenen Übertragungsfunktion über einen breiten Frequenzbereich mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Man ist daher zur Erkennung von Veränderungen auf vergleichende Messungen angewiesen. Das Ziel muss daher eine sichere Wiederholbarkeit der Messung sein.

Während bei den meisten Diagnoseverfahren der Messaufbau einen nur geringen Einfluss auf das Ergebnis hat, wird die gemessene Übertragungsfunktion wesentlich durch den gewählten Aufbau beeinflusst. Die Einflussfaktoren, welche sich aus dem Aufbau und dem Messobjekt selbst ergeben, sind zu untersuchen.

Neben der rein subjektiven Bewertung durch grafischen Vergleich existieren verschiedene mathematische Bewertungsverfahren, die eine zuverlässige Erkennung von mechanischen Schäden auch durch unerfahrene Anwender ermöglichen sollen. Die Empfindlichkeit und Leistungsfähigkeit dieser Verfahren wird anhand fehlerfreier und durch den Messaufbau fehlerbehafteter Messungen untersucht.

Die Außerbetriebnahme eines Netzkuppeltransformators schränkt in Abhängigkeit von der Netztopologie die Versorgungssicherheit ein. In Kraftwerken, wo die Diagnose eines Maschinentransformators oder eines Eigenbedarfstransformators das vollständige Abschalten des betreffenden Blocks bedeutet, führt dies zu erheblichen Einnahmeausfällen, welche die eigentlichen Kosten für die diagnostische Maßnahme häufig deutlich überschreiten. Daher liegt es im Interesse des Anlagenbetreibers, die zur Diagnose benötigte Zeit möglichst kurz zu halten.

Zur vollständigen Zustandserfassung eines Leistungstransformators sind abhängig von der Ausgangssituation und den zu untersuchenden Teilkomponenten der Anlage verschiedene Messverfahren notwendig. Jedes zu einer spezifischen Messung verwendete Gerät verfügt über eine separate, auf die Messung zugeschnittene Verkabelung. So wird bei Vor-Ort-Messungen neben der reinen Messzeit eine erhebliche Zeit mit Umbauten der Prüfeinrichtungen verbracht. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Reduktion der notwendigen Umbauzeit bei der Diagnose.

Kapitel 3

Leistungstransformatoren

3.1 Betrieb und Aufbau

Der Einsatz von Hoch- und Höchstspannungsnetzen ermöglicht den wirtschaftlichen Transport elektrischer Energie über weite Strecken. Während die 110-kV-Netze der regionalen Verteilung elektrischer Energie dienen, wird das europäische Verbundnetz mit überlagerten 220-kV- und 400-kV-Ebenen betrieben. In Kraftwerken dienen Maschinentransformatoren dem Heraufsetzen der vom Generator bereitgestellten Mittelspannung auf das Spannungsniveau der Übertragungsnetze. Nahe dem Verbraucher wird die Spannung stufenweise über Netzkuppeltransformatoren bis auf Mittel- oder Niederspannung reduziert und die Energie in die lokalen Verteilnetze eingespeist.

Im europäischen Verbundnetz sind Maschinentransformatoren mit Bemessungsleistungen bis zu 1100 MVA zur Anbindung großer Kraftwerksblöcke im Einsatz. Höhere Leistungen werden durch die Parallelschaltung von Transformatoren erreicht. Netzkuppeltransformatoren sind in Drehstromausführung mit Durchgangsleistungen bis zu 600 MVA üblich [Mik79]. Neben den dreiphasigen Transformatoren mit einem gemeinsamen Aktivteil und Kessel sind im deutschen Höchstspannungsnetz auch einphasige Spartransformatoren gebräuchlich, die zu einer Drehstrombank geschaltet werden. Diese Einheiten erreichen Durchgangsleistungen bis 1000 MVA [Fis09].

Leistungstransformatoren mit Bemessungsleistungen ab etwa 40 MVA werden ausschließlich mit Öl-Papier-Isoliersystemen in Kesselbauform gefertigt. Für kleinere Leistungen oder Spezialanwendungen bis in den Mittelspannungsbereich existieren wartungsfreie Gießharz- oder Trockentransformatoren, die hier nicht berücksichtigt werden.

3.1.1 Allgemeiner Aufbau

Ein Leistungstransformator besteht aus mehreren grundlegenden Komponenten: Dem Kessel, dem Aktivteil, den Durchführungen, dem Ölausdehnungsgefäß und der Kühlanlage. Weiterhin verfügt der Transformator über Steuer- und Überwachungseinrichtungen, welche die Anbindung an die Stationsleittechnik darstellen.

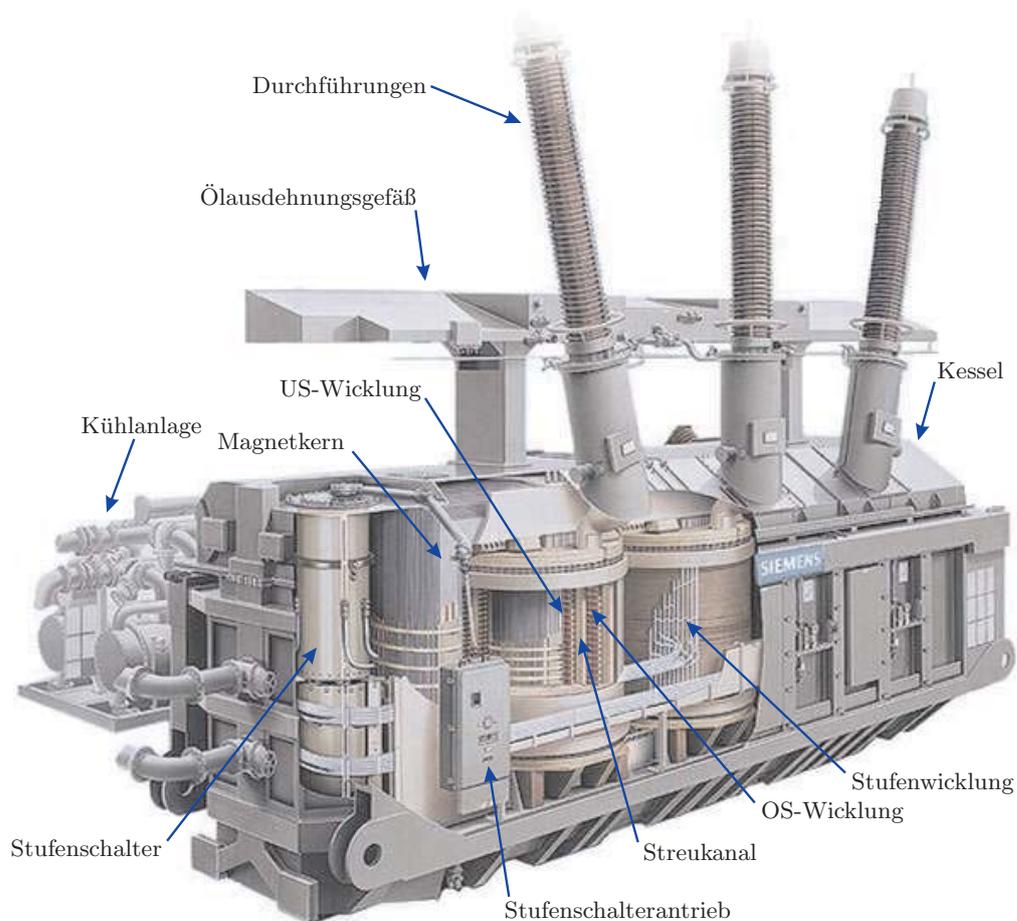


Abb. 3.1: Schnittbild durch einen Maschinentransformator (850 MVA, 420/27 kV)

Das Kernelement jedes Transformators bildet der Aktivteil, der aus den elektrischen und magnetischen Komponenten und einer mechanischen Tragkonstruktion besteht. Abbildung 3.1 zeigt das Schnittbild mit dem Aktivteil eines dreiphasigen Maschinentransformators in Kernbauweise. Die Wicklungen der Ober- und Unterspannung befinden sich zylindrisch angeordnet und durch den Streukanal elektrisch isoliert auf den Schenkeln des Magnetkerns. Viele Transformatoren enthalten eine Wicklung mit Anzapfungen, die Stufenwicklung. Diese Anzapfungen sind mit dem Stufenschalter verbunden, mit dem schrittweise in einem gewissen Bereich das Übersetzungsverhältnis unter Last verändert werden kann [Sch06].

Die Kühlanlage dient der Kühlung und Umwälzung des Öls und wird bei großen Bemessungsleistungen vom eigentlichen Transformator abgesetzt betrieben. Das Öl, bei Großtransformatoren wird aufgrund der Alterungsstabilität Mineralöl verwendet, dient der Ableitung von Verlustwärme im Kessel und als elektrischer Isolator. In den vergangenen Jahren wurden auch erfolgreich Hermetiktransformatoren mit natürlicher Esterflüssigkeit mit Bemessungsleistungen bis 40 MVA gebaut und in Betrieb genommen [HHB08].

Um eine Übersicht über den Aufbau eines Leistungstransformator zu erhalten, wird in den folgenden Abschnitten auf den Aufbau des Kessel, des Magnetkerns, der Wicklungen und des Stufenschalters eingegangen.

3.1.2 Kessel und Ölausdehnungsgefäß

Der aus Stahl geschweißte Kessel bildet das Gehäuse des Transformators und ist Träger für sämtliche Baugruppen. Der vakuumfeste Kessel ist vollständig mit Isolieröl gefüllt, das Aktivteil befindet sich zur Gänze unter Öl.

Das Volumen der im Transformator enthaltenen Ölfüllung ist temperaturabhängig. Der Kessel kann aufgrund seiner Funktion dieser Volumenänderung nicht nachkommen, daher steht ein Ölausdehnungsgefäß mit dem Ölraum in Verbindung. Dieses Gefäß verfügt über ein über eine Trockeneinrichtung mit der Umgebungsluft verbundenes Luftpolster und nimmt die Volumenänderungen des Öls auf. Jedoch kommt es über diesen Luftkontakt zum Feuchtigkeits- und Sauerstoffeintrag in das Öl, was die Alterung des gesamten Isolationssystems beschleunigt [HML08]. Daher sind die Ölausdehner jüngerer Transformatoren mit einem dehnbaren Gummisack ausgestattet, der Öl und Luft trennt.

Um den Wartungsaufwand weiter zu reduzieren und die Lebensdauer des Transformators zu verlängern, können Transformatoren bis Bemessungsleistungen von ca. 120 MVA in Hermetikausführung ohne Ölausdehner hergestellt werden. Da der Ölraum vollständig abgeschlossen ist, kann keine die Alterung beschleunigende Feuchtigkeit in das Isolationssystem eingetragen werden. Die Funktion des Ölausdehners übernehmen dehnfähige Ölradiatoren. Kombiniert werden Hermetiktransformatoren zur Reduktion der Wartungsintervalle mit Stufenschaltern mit Vakuumchaltkammern, bei dieser Ausführung entstehen im Gegensatz zu herkömmlichen Stufenschaltern mit ölgefülltem Lastschaltergefäß keine Schaltgase und keine Ölverunreinigung [Arg05].

Über das Isolieröl wird die im Aktivteil entstehende Verlustwärme abgeführt. Das Öl gelangt über natürliche Konvektion oder über Pumpen in externe Kühlanlagen oder in Ölradiatoren, die an den Außenseiten des Transformators befestigt sind oder abgesetzt betrieben werden. An den Radiatoren sind an großen Transformatoren zur effektiven Kühlung regelbare Lüfter montiert.

Der Kessel ist auch Träger für die Durchführungsdome, die je nach Bauform und Spannungsebene seitlich oder oben am Kessel angebracht sind. Die Dome nehmen wiederum die Hochspannungsdurchführungen auf. Anstelle der Freiluftdurchführungen sind auch Kabelanschlüsse oder SF₆-Durchführungen erhältlich.

3.1.3 Wicklungen

Volltransformatoren verfügen über mindestens zwei getrennte Wicklungssysteme, Oberspannung (OS) und Unterspannung (US). Ist die Übersetzung veränderbar, verfügen Hochspannungstransformatoren über eine mit dem Stufenschalter über Anzapfungen verbundene Stufenwicklung.

Netzkuppltransformatoren verfügen zusätzlich über ein im Dreieck geschaltetes Mittelspannungs-Tertiärsystem zum Ausgleich unsymmetrischer Belastungen im Drehstromsystem und zur Auskopplung des Eigenbedarfs von Umspannwerken.

Beim Wicklungsaufbau lässt sich zwischen Scheiben- und Lagenwicklung unterscheiden. Lagenwicklungen aus konzentrisch übereinander angeordneten Zylinderspulen eignen sich durch ihren kompakten Aufbau für hohe Ströme mit großen Leiterquerschnitten, sind jedoch nur für niedrige Spannungen geeignet. Für hohe Spannungen wird der Wicklungszylinder aus einzelnen Wicklungsscheiben zusammen gesetzt, um eine gleichmäßige Potentialverteilung entlang des Zylinders zu erreichen [Küc66].

Zur Reduktion von Verlusten werden die Wicklungen aus Drilleitern aufgebaut. Dies sind aus mehreren parallel geschalteten, miteinander verdrillten lackisolierten Kupferflachleitern bestehende Leiterbündel mit Rechteckprofil und Papierumwicklung. Die Verwendung von gegeneinander isolierten Einzelleitern reduziert die durch Wirbelströme verursachte Stromverdrängung im Leiter. Durch die Verdrillung der Einzelleiter erreicht man eine gleichmäßige radiale Positionierung der Leiter über die Wicklungslänge [Lud27].

Das durch den Wicklungsaufbau gespülte Öl nimmt die in den Kupferleitern entstehende Verlustwärme auf. Bei mehrlagigen Wicklungen werden durch geeignete Distanzstücke aus Isoliermaterial Kühlkanäle zwischen den Lagen gebildet, die bei Lagenwicklungen gleichzeitig die elektrische Isolation der Einzelzylinder gegeneinander übernehmen.

Um den im Kurzschlussfall wirksamen hohen Kräften zu widerstehen, werden die Wicklungszylinder nach der Montage auf dem Schenkel in den Pressrahmen eingespannt und verpresst.