

# Automatisierte Prüfsysteme für Verteiltransformatoren DiTAS

**Dipl.-Ing. Raoul D. Harkenthal**

Entwicklungsingenieur Leistungselektronik,  
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, Dresden

**Dipl.-Ing. (FH) Thomas Steiner**

Technischer Leiter,  
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, Dresden

*Verteiltransformatoren werden als Bindeglied zwischen regionalen Mittelspannungsnetzen und lokalen Niederspannungsnetzen weltweit in sehr hohen Stückzahlen eingesetzt. Zur Qualitätssicherung müssen bei der Herstellung die geforderten elektrischen Eigenschaften durch umfangreiche Prüfabläufe bei jedem Verteiltransformator nachgewiesen werden. Der vorliegende Aufsatz gibt einen Überblick über die Funktionsweise der zur automatisierten Prüfung von Verteiltransformatoren notwendigen Prüf- und Messtechnik. Es werden außerdem verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, wie durch die Optimierung des Zusammenspiels automatischer Umschalteneinrichtungen, intelligenter Anlagensteuerung und weitgehend intuitiv gestalteter Prüfabläufe eine Verkürzung der benötigten Prüfzeit erreicht werden kann.*

Die elektrische Energieverteilung ist in mehrere gekoppelte Netze mit unterschiedlichen Spannungsebenen aufgeteilt. Dazu gehören das Höchstspannungsnetz (> 110 kV), das Hochspannungsnetz (110 kV), das Mittelspannungsnetz (< 36 kV) und die lokalen Niederspannungsnetze (400 V). Die Übertragung der elektrischen Energie und die Spannungsanpassung zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen geschehen durch Transformatoren.

Für die generelle elektrische Versorgung von Gebäuden und industriellen Verbrauchern mit Niederspannung aus dem Mittelspannungsnetz werden Verteiltransformatoren eingesetzt. Sie werden auch dort verwendet, wo elektrische Energie aus Kleinkraftwerken, wie Windparks oder Solarkraftwerken, direkt in das Mittelspannungsnetz eingespeist werden soll.

Im Gegensatz zu Großtransformatoren werden Verteiltransformatoren in sehr viel größeren Stückzahlen weltweit produziert und eingesetzt. Aus diesem Grund unterscheiden sich aus wirtschaftlicher Sicht die Anforderungen an die Produktion und die elektrische Prüfung deutlich, da der Zeitbedarf jedes einzelnen Produktionsschritts ein entsprechender Kostenfaktor ist. Die Hersteller sind deshalb bestrebt, die einzelnen Zeiten auf das technisch mögliche Minimum zu reduzieren. Da jeder einzelne Verteiltransformator vor der Auslieferung an den Kunden einer intensiven elektrischen Prüfung unterzogen werden muss, muss auch das eingesetzte Prüfsystem die Prüfungen innerhalb der kürzest möglichen Zeit durchführen können, um den Produktionsprozess nicht zu verlangsamen.

## **Stückprüfung von Verteiltransformatoren**

Die nach der Herstellung an jedem Verteiltransformator durchzuführenden Stückprüfungen dienen neben der Qualitätssicherung auch dem Nachweis, dass die vom Kunden gestellten Anforderungen an die elektrischen Parameter tatsächlich erfüllt werden. Eine erweiterte Prüfung findet im Rahmen der Typprüfung statt, bevor ein neuentwickelter Transformatorentyp in die Serienproduktion überführt wird. Diese Prüfung findet einmalig an einem Transformator statt, der repräsentativ für die nachfolgende Produktionsserie ist, um nachzuweisen, dass alle erforderlichen Eigenschaften erfüllt werden.

Empfehlungen für die Durchführung von Stück- und Typprüfungen werden ausführlich in unterschiedlichen nationalen und internationalen Standards gegeben.

Dazu zählen beispielsweise die VDE, IEC und IEEE (IEC 60076, VDE 0532 Teil 3, DIN EN 60076-3).

Die wichtigsten elektrischen Prüfungen von Verteiltransformatoren lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen:

- allgemeine Betriebsparameter
- Lastverhalten
- Isolationsprüfung.

Die erste Gruppe der Tests umfasst unter anderem Messungen der allgemeinen Eigenschaften des Transformators wie Übersetzungsverhältnis, Vektorgruppe, DC-Wicklungswiderstand und Isolationswiderstand. Diese Messungen werden mit weitgehend standardisierten Prüfgeräten durchgeführt, die nur eine geringe elektrische Prüfleistung benötigen. Die Messung von Leerlaufstrom und Leerlaufverlusten (Eisenverluste) benötigt dagegen eine höhere Prüfleistung und geschieht in der Regel durch Einspeisung einer Prüfspannung in Höhe der Nennspannung auf der Niederspannungsseite. Aufgrund der geringen Ströme werden dabei kaum Verluste in den Wicklungen erzeugt, so dass praktisch nur die tatsächlich im Magnetkreis entstehenden Verluste ermittelt werden.

Die zweite Gruppe – Lastverhalten – umfasst unter anderem die Messungen der Lastverluste und die im Rahmen einer Typprüfung durchgeführte „Wärmefahrt“ zur Bestimmung des Temperaturanstiegs bei Nennlast.

Transformatorprüfungen bei Nennstrom werden typischerweise in der Kurzschlusschaltung durchgeführt. Dazu wird der zu prüfende Transformator auf der Niederspannungsseite kurzgeschlossen. Auf der Oberspannungsseite wird eine Prüfspannung eingespeist, die so eingestellt wird, dass der Nennstrom erreicht wird. Die benötigte Prüfscheinleistung beträgt in dieser Schaltung nur einen Bruchteil der Nennleistung des Prüflings und wird hauptsächlich durch die Höhe der Kurzschlussspannung bestimmt, die typischerweise im Bereich von 4 bis 8 Prozent liegt. Bei großen Verteiltransformatoren kann die Prüfscheinleistung dennoch bis zu 400 kVA betragen, die von der Prüfanlage bereitgestellt werden muss.

Im Kurzschlussstest werden aufgrund der geringen Prüfspannungen fast ausschließlich die Verluste in den Wicklungen bestimmt. Da die auftretenden Verluste in Form von Wirkleistung nur einen geringen Teil der gesamten Prüfscheinleistung ausmachen, wird zu deren Messung ein präzises Leistungsmessgerät mit sehr geringem Phasenfehler zwischen Strom- und Spannungsmesskanal benötigt. Da die Kosten für die entstehende Verlustleistung von Verteiltransformatoren während ihrer gesamten Betriebszeit ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor sind, werden hier entsprechend hohe Anforderungen von den Kunden an die Transformatorenhersteller bezüglich der Messunsicherheit gestellt.

Die dritte Gruppe der elektrischen Prüfungen dient dem Nachweis des Isolationsvermögens der Wicklungen untereinander und gegen geerdete Teile. Der Nachweis geschieht durch Beanspruchung mit erhöhten Prüfspannungen, die bei Verteiltransformatoren typischerweise im Bereich bis zur doppelten Nennspannung liegen. Die Isolationsfestigkeit zwischen den Wicklungslagen einer Wicklung und zwischen den benachbarten Einzeldrähten wird durch Einspeisung einer Prüfspannung im Bereich von 800 bis 2.000 V auf der Niederspannungsseite des Prüflings mit der Induzierte-Spannungs-Prüfung geprüft. Die für den Isolationsstest benötigte hohe Spannung in der Hochspannungswicklung wird dabei vom Prüfling selbst erzeugt. Auch kleinste Unregelmäßigkeiten in der Isolierung, beispielsweise Lufteinschlüsse oder leitfähige Fremdkörper, können vor einem Durchschlag der Isolation durch das Auftreten von Teilentladungen erkannt werden.

Teilentladungen (TE) im Inneren des Transformators verursachen viele sehr kurze, hochfrequente Stromimpulse in den Zuleitungen, die eine charakteristische Anordnung zur Phasenlage der Prüfspannung aufweisen. Diese Stromimpulse werden mit externen Koppelkondensatoren aus der Prüfspannung ausgekoppelt und durch spezialisierte TE-Messtechnik ausgewertet. Um die Stromimpulse auch bei geringer Intensität der Teilentladungen sicher erfassen zu können, darf die Prüfspannung nur einen sehr geringen Anteil hochfrequenter Störungen enthalten. Dies wird durch eine Filterung der Prüfspannung mit TE-Tiefpassfiltern mit hoher Dämpfung und einem optimierten Erdungskonzept der Prüfanlage erreicht.

Um eine magnetische Sättigung des Blechpakets während der Prüfung mit induzierter Spannung zu vermeiden, muss die Frequenz der eingespeisten Prüfspannung mindestens im Verhältnis von Prüfspannung zu Nennspannung erhöht werden. In der Vergangenheit wurden dafür mechanisch gekoppelte Motor-Generator-Sätze verwendet, die einstellbare Spannungen mit entsprechend hohen Frequenzen liefern konnten. In modernen Prüfanlagen werden statische Frequenzumrichter verwendet, die eine Spannungsumformung ohne bewegliche Teile ermöglichen.

Die Isolierungen zwischen Nieder- und Hochspannungswicklungen und gegen geerdete Teile werden durch Anlegen einer extern erzeugten einphasigen Prüfspannung an die jeweilige Wicklung geprüft. Bei dieser Prüfung wird eine hohe Prüfspannung im Bereich 70 bis 100 kV benötigt, die durch einen separaten Hochspannungstransformator bereitgestellt wird.

## **Aufbau des Prüfsystems**

Zur Durchführung der Stückprüfungen an Verteiltransformatoren wird eine leistungsstarke Wechselspannungsquelle benötigt, die eine variable Spannung mit einstellbarer Frequenz mit der für die Prüfung erforderlichen elektrischen Scheinleistung bereitstellen kann. Eine von der Netzspannung abweichende Frequenz ist vor allem bei der Induzierte-Spannungs-Prüfung notwendig, bei der die Frequenz bis zur doppelten Nennfrequenz des zu prüfenden Transformators und darüber hinaus gesteigert wird.

Aber auch für die Prüfung von Verteiltransformatoren für den Export in Gegenden mit von der lokalen Versorgung abweichenden Netzfrequenz (50/60 Hz) wird diese Einstellmöglichkeit benötigt. Der für die Durchführung der einzelnen Prüfungen benötigte Spannungsbereich liegt etwa zwischen der Nennspannung des Transformators auf der Niederspannungsseite (für die Leerlaufprüfung) und reicht bis zu 5 kV für die Kurzschlussverlustmessung und die Wärmefahrt, bei denen auf der Oberspannungsseite eingespeist wird.

Ein möglicher Aufbau eines Systems für die Prüfung von Verteiltransformatoren ist in *Bild 1* skizziert. Mit dieser Struktur kann neben den oben beschriebenen Standardprüfungen bei ausreichender Dimensionierung

der Anlagenteile auch die im Rahmen der Typprüfung notwendige Wärmefahrt durchgeführt werden. Zentrale Quelle für die Prüfanlage ist ein statischer Frequenzumrichter (1) in Verbindung mit internen Filterstufen. Dieser liefert eine dreiphasige Wechselspannung, deren Amplitude und Frequenz in einem breiten Bereich einstellbar sind.

Um eine möglichst hohe Ausnutzung der Leistungsfähigkeit des Frequenzumrichters zu erreichen, wird zur Spannungsanpassung an die erforderliche Prüfspannung ein Anpasstransformator (2) mit mehreren Übersetzungsstufen verwendet. Die einzelnen Stufen werden im spannungslosen Zustand durch motorgetriebene Mittelspannungsschütze umgeschaltet.

Zur Entlastung des Frequenzumrichters wird der größte Teil der bei den Prüfungen benötigten induktiven Blindleistung durch eine kapazitive Kompensation (4) bereitgestellt. Durch die Kompensation muss der statische Frequenzumrichter nur noch die verbleibende nicht kompensierte Blindleistung und die in der Prüfanlage und dem Prüfling (7) auftretenden Wärmeverluste decken. Durch dieses Verfahren können Frequenzumrichter mit relativ niedrigeren Nennleistungen eingesetzt werden, um die Investitionskosten gering zu halten.

Die am Prüfling (7) anliegende Spannung, die Prüfströme und vor allem die im Prüfling umgesetzte Wirkleistung werden mit einem Verlustleistungs-Messsystem (3) bestimmt. Dieses System besteht aus je drei Spannungs- und Stromsensoren und einer zentralen Auswerteeinheit zur Aufbereitung und Übertragung der Messdaten. Aufgrund des geringen Leistungsfaktors des Prüflings hängt die Messgenauigkeit der Verlustleistungsmessung sehr stark von der Genauigkeit der Erfassung der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung ab. Um eine größtmögliche Genauigkeit der Messung zu erreichen, werden die Amplituden- und Winkelfehler der einzelnen Spannungs- und Stromsensoren und der dazugehörigen Auswerteeinheiten einzeln ausgemessen und im Gerät gespeichert. Während des Messvorgangs werden diese gespeicherten Daten zur ständigen Korrektur der Messdaten der Einzelsensoren genutzt, und es wird dadurch eine äußerst genaue Bestimmung der Verlustleistung ermöglicht. Für Prüfungen mit angelegter Spannung auf der Oberspannungsseite des zu prüfenden Verteiltransformators wird ein zusätzlicher Hochspannungstransformator (5) verwendet. Dieser wird ebenfalls aus dem statischen Frequenzumrichter gespeist und liefert eine Prüfspannung von maximal 70 bis 100 kV. Die genaue Spannungshöhe und der Prüfstrom werden mit einem eigenständigen Messsystem (6) erfasst. Da bei dieser Art von Prüfungen keine Leistung gemessen wird, sind die Genauigkeitsansprüche an dieses Messsystem etwas geringer.

Die Isolierung der Niederspannungsseite wird typischerweise durch Angelegte-Spannungs-Prüfung mit geringeren Spannungen, die von einer separaten Wicklung des Anpasstransformators (2) bereitgestellt werden, geprüft. Die Spannungshöhe und der Prüfstrom werden in diesem Fall mit dem Verlustleistungsmesssystem (3) bestimmt.

## Frequenzumrichter in Prüfsystemen

Statische Frequenzumrichter werden seit vielen Jahren in Prüfsystemen für die Transformatorenprüfung erfolgreich eingesetzt und haben die bis dahin verwendeten Motor-Generator-Sätze weitgehend verdrängt. Die Frequenzumrichter haben viele Vorteile, wozu neben einem geringeren Wartungsaufwand vor allem die umfangreichen und sehr schnellen Steuerungs- und Schutzfunktionen zählen. Ein großer Vorteil besteht in der kontinuierlichen und unabhängigen Einstellung von Amplitude und Frequenz in einem weiten Bereich.

Es besteht außerdem die Möglichkeit, etwaige Verzerrungen der Spannungsform, die durch nichtlineare Stromaufnahme der Prüflinge entstehen können, aktiv auszuregeln. Die kurze Reaktionszeit des Frequenzumrichters, die nur wenige Mikrosekunden beträgt, führt außerdem beim Versagen der Prüflingsisolation im Fehlerfall zu einer Minimierung der in der Fehlerstelle umgesetzten Lichtbogenenergie.

In *Bild 2* ist der schematische Aufbau eines statischen Frequenzumrichters dargestellt. Die vereinfachten zeitlichen Spannungsverläufe der einzelnen Komponenten sind jeweils oben im Bild zu sehen. Ein gesteuerter Netzgleichrichter (1) wird aus dem dreiphasigen Niederspannungsnetz gespeist und stellt eine geregelte Gleichspannung bereit, die durch Zwischenkreiskondensatoren (2) gepuffert wird. Die Sollwertgrößen, zu denen neben Strom- und Spannungswerten auch Grenzen und Regelparameter gehören, werden durch die Anlagensteuerung (8) der Prüfanlage vorgegeben.

Die interne Steuerung des Frequenzumrichters (7) berechnet aus den vorhandenen Soll- und Istwerten mit Modulationsverfahren ein hochfrequentes Pulsmuster mit dem die einzelnen Halbleiterschalter der drei Phasen des Wechselrichters (3) gesteuert werden. Ein mehrstufiger Tiefpassfilter (4) formt aus der Folge

hochfrequenter Spannungsimpulse des Wechselrichters eine sinusförmige Spannung, die nur noch einen sehr geringen Anteil hochfrequenter Oberschwingungen hat.

Im einfachsten Fall wird die Spannung direkt am Ausgang des Tiefpassfilters gemessen (5) und an die zentrale Steuerung des Frequenzumrichters übermittelt. Bei Abweichungen der gemessenen Amplitude, der Phasenlage oder der Spannungsform von den vorgegebenen Sollwerten passt die interne Steuerung das Pulsmuster an, um die Abweichungen auszuregulieren. Alternativ kann für eine Verbesserung der Regeleigenschaften auch die Spannung vom Prüfling direkt auf den Wechselrichter zurückgeführt werden (6).

Bei der Prüfung von Transformatoren ist es außerdem wichtig, dass keine Gleichspannungsanteile in der Ausgangsspannung enthalten sind. Diese würden durch eine starke Vormagnetisierung des Eisenkerns zu Sättigungserscheinungen mit sehr hohen unsymmetrischen Leerlaufströmen führen. Für die Anwendung in Prüfsystemen benötigt die Steuerung der Frequenzumrichter Regler, die für eine absolut gleichspannungsfreie Ausgangsspannung sorgen.

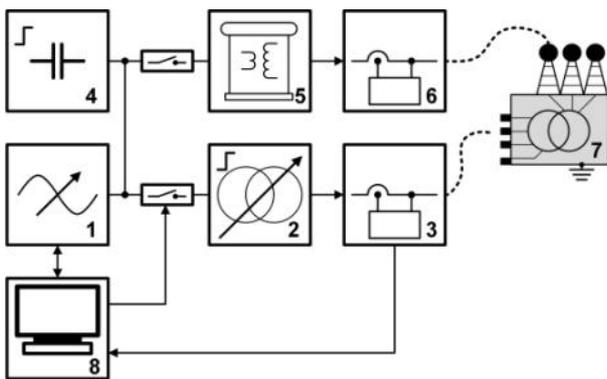


Bild 1. Aufbau eines Systems für die Prüfung von Verteiltransformatoren

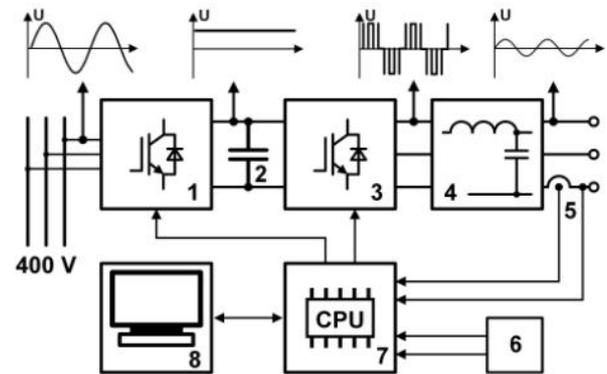


Bild 2. Schematischer Aufbau eines statischen Frequenzumrichters

Bei Leerlaufprüfungen von Transformatoren kann es dennoch zu einer Verzerrung des aufgenommenen Stroms kommen. Dies tritt vor allem bei Übererregung auf, wenn das Blechpaket des Kerns in der Nähe der magnetischen Sättigung betrieben wird. In *Bild 3* ist dieses Verhalten vereinfacht dargestellt. Der in den nichtlinearen Prüfling (4) fließende Prüfstrom (8) weicht deutlich von der Sinusform ab. Die Steuerung des Frequenzumrichters (1) regelt in diesem Fall die Ausgangsspannung direkt am Wechselrichter und stellt dort einen sauberen sinusförmigen Spannungsverlauf ein (6).

Zwischen Frequenzumrichter und Prüfling befindet sich ein zusätzlicher Anpasstransformator, der eine bestimmte Impedanz  $Z = R + jX$  hat. Der Spannungsabfall über dieser Impedanz kann in dieser Schaltungsvariante nicht ausgeregelt werden und führt deshalb zu einer Verzerrung der Prüfspannung (7) am Ausgang der Prüfanlage. Um diese Verzerrung zu vermindern, wird das als direkte Hochspannungsregelung bezeichnete Verfahren verwendet, wie es in *Bild 4* vereinfacht dargestellt ist.

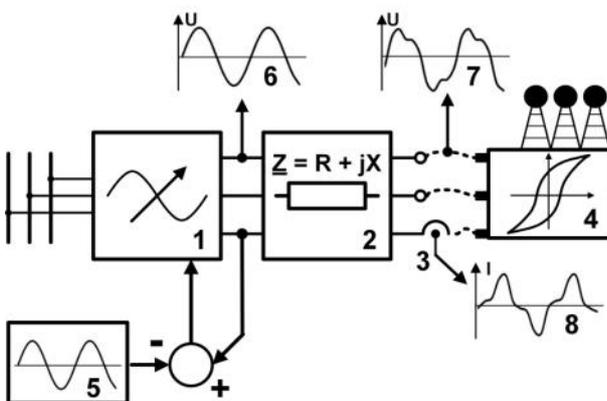


Bild 3. Verzerrung des Stroms beim Betrieb in der magnetischen Sättigung

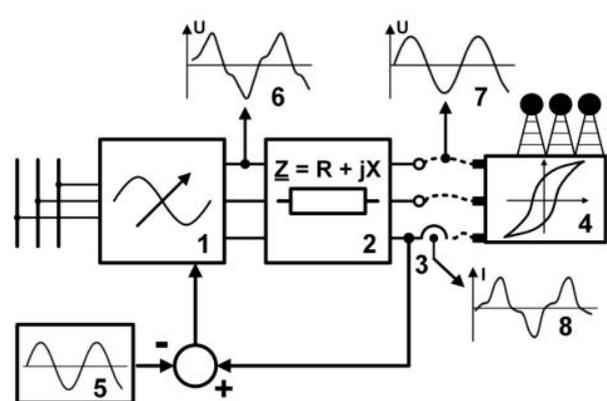


Bild 4. Verminderung der Verzerrung durch direkte Hochspannungsregelung

Hier wird die Prüfspannung (3) direkt als Istwert für den internen Regler des Frequenzumrichters (1) verwendet. Durch den Vergleich mit der Führungsgröße (5) wird der Frequenzumrichter eine Spannungsform (6) erzeugen, die den Spannungsabfall über der Impedanz  $Z$  des Anpasstransformators kompensiert. Auf diese Weise hat die Prüfspannung am Ausgang der Prüfanlage trotz des nichtlinearen Stroms eine nur geringe Verzerrung (7). Neben der hier dargestellten Ausregelung von Verzerrungen der Kurvenform lässt sich durch die direkte Hochspannungsregelung auch der Phasenwinkel der drei einzelnen Phasen bei unsymmetrischer Belastung durch den Prüfling ausregeln. Darüber hinaus wird die Prüfspannung bei diesem Regelverfahren genau und weitgehend lastunabhängig eingestellt.

## Zeitbedarf für Stückprüfungen

Der Zeitbedarf zur Durchführung einer vollständigen Stückprüfung eines Verteiltransformators setzt sich vor allem aus folgenden Zeiten zusammen:

- Summe der einzelnen Prüfzeiten
- Rüstzeit der Anlage
- Dauer der Umkonfigurierung der Prüfanlage und der Prüflingsanschlüsse zwischen den Prüfungen
- Dauer für die Dokumentation der Messergebnisse.

Die Summe der Prüfzeiten lässt sich kaum beeinflussen, da der Prüfablauf und die Dauer weitgehend durch internationale Normen standardisiert sind.

Bei der Prüfung mit angelegter Spannung verkürzen einige Hersteller allerdings die effektive Prüfdauer je Transformator durch gleichzeitiges Anlegen der Prüfspannung an mehrere, parallel geschaltete Transformatoren. Dieses Verfahren birgt allerdings das Risiko, dass eine Schwächung der Isolierung eines Prüflings, die sich durch einen Anstieg des Prüfstroms zeigen würde, eventuell übersehen wird. Sollte eine Isolierung allerdings mit einem vollständigen Durchschlag versagen, würde dies durch den plötzlichen starken Anstieg des Prüfstroms und dem Zusammenbruch der Prüfspannung erkannt werden.

Größere Einsparpotenziale hinsichtlich des Zeitbedarfs liegen vor allem in einer Verkürzung der anfänglichen Rüstzeit der Anlage und in der Verkürzung der Umschaltzeit zwischen den Einzelprüfungen. Eine bedeutende Verkürzung lässt sich hierbei durch eine Automatisierung der Umschaltvorgänge mit motorbetriebenen Hochspannungsschaltern erreichen. Im Folgenden soll ein Vergleich zwischen der Prüfung mit manueller Umkontaktierung des Prüflings und der Prüfung mit automatisierter Umschaltung gezogen werden. Der Zeitbedarf für die verschiedenen Vorprüfungen, wie Isolationswiderstand, DC-Wicklungswiderstand und Vektorgruppe, wird hier nicht betrachtet. Diese Vorprüfungen können zur Zeitersparnis in einem separaten Vorprüfplatz durchgeführt werden.

## Prüfung mit manueller Kontaktierung

Bei der Durchführung von Stückprüfungen in einem Transformatorenprüffeld mit manueller Umkontaktierung des Prüflings sind vor jeder neuen Prüfung mindestens folgende Schritte notwendig:

- Freischalten des Prüffelds
- Betreten des abgesperrten Sicherheitsbereichs
- Treffen von Schutzmaßnahmen gegen elektrische Gefährdung (Erden und Kurzschließen)
- Lösen der zu ändernden Prüflingskontaktierungen
- Herstellen der neuen Prüflingsanschlüsse
- Entfernung der Schutzmaßnahmen (Erdungsstange)
- Verschließen des Sicherheitsbereichs
- Einschalten des Prüffelds

Zur Abschätzung der Zahl der notwendigen Umkontaktierungsvorgänge sind in *Bild 5* die typischen Anschlussvarianten für die Durchführung der einzelnen Stückprüfungen zusammengefasst. Es kann immer nur eine Anschlussvariante davon; nie mehrere gleichzeitig genutzt werden.

Oben in *Bild 5* sind die notwendigen Anschlüsse für die Angelegte-Spannungs-Prüfung (7) auf der Oberspannungsseite des Prüflings (6) dargestellt. Hierbei werden alle drei Phasen der Oberspannungsseite gemeinsam mit dem entsprechenden Hochspannungstransformator (5) verbunden. Die Anschlüsse der Niederspannungsseite werden für diesen Test kurzgeschlossen und geerdet.

Für die Angelegte-Spannungs-Prüfung der Niederspannungsseite werden deutlich geringere Spannungen benötigt, die direkt aus dem Anpasstransformator (2) der Prüfanlage entnommen werden können. Hierzu

wird der Prüfling mit der Niederspannungsseite dreiphasig an die Prüfanlage angeschlossen (9) und die Oberspannungsseite (10) wird kurzgeschlossen und geerdet. Ein automatischer Schalter innerhalb der Prüfanlage verbindet in diesem Fall die drei Prüflingsanschlüsse mit der einphasigen Prüfspannung.

Nach dem Entfernen der Verbindungen der Oberspannungsseite (10) lässt sich die Induzierte-Spannungs-Prüfung durchführen. Dazu wird auf der Niederspannungsseite des Transformators eine Spannung von etwa doppelter Nennspannung und mindestens doppelter Nennfrequenz eingespeist. Danach lässt sich ohne Änderung der Verschaltung eine Leerlaufprüfung durchführen. Dabei werden der Leerlaufstrom und die Verluste des geblechten Eisenkerns bestimmt. Um eventuelle Verfälschungen des Messergebnisses durch vorhandene Vormagnetisierungen zu vermeiden, wird die Leerlaufprüfung meist mit einer gegenüber der Nennspannung erhöhten Spannung begonnen und auf die Nennspannung gesenkt. Leerlaufprüfungen finden bei Nennfrequenz des Prüflings statt.

Zur Bestimmung der Lastverluste mit der Kurzschlussverlustmessung ist eine weitere Umkontaktierung des Prüflings notwendig (8). Die Einspeisung der Prüfspannung findet auf der Oberspannungsseite statt. Die Phasenanschlüsse der Niederspannungsseite werden mit einer möglichst kurzen flexiblen Verbindung mit großem Querschnitt kurzgeschlossen, da diese Prüfung mit Nennstrom des zu prüfenden Transformators durchgeführt wird. Die auf der Oberspannungsseite gemessene Verlustleistung umfasst sowohl die Verluste im Transformator selbst als auch die Verluste in der Kurzschlussbrücke und in den Übergangswiderständen. Aus diesem Grund ist eine zuverlässige Kontaktierung auf der Niederspannungsseite mit geringen Übergangswiderständen besonders wichtig. Diese Anforderung lässt sich in der Regel nur durch entsprechend hohe Anpresskräfte realisieren, die zu einem ausreichend hohen Kontaktdruck führen. Insgesamt muss das Prüffeld bei dieser Abfolge fünfmal betreten werden und die dreiphasigen Prüflingsanschlüsse müssen siebenmal verbunden und wieder gelöst werden.

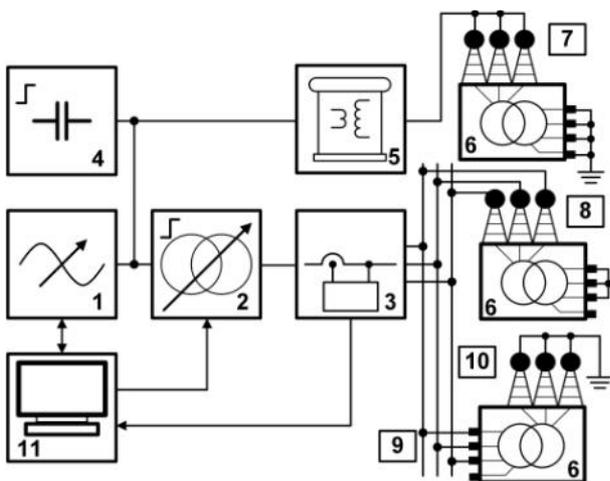


Bild 5. Typische Anschlussvarianten im Verlauf der Stückprüfung an Transformatoren

### Prüfung mit automatischer Umschaltung

Durch die Ausstattung des Transformatorenprüffelds mit motorgetriebenen Hochspannungsschaltern, die eine automatische Umschaltung der Prüfschaltung ermöglichen, lässt sich der Aufwand der vom Prüfpersonal durchzuführenden Schritte deutlich reduzieren. Sind die Verbindungen zwischen der Ober- und Unterspannungsseite mit der Prüfanlage erst einmal hergestellt, muss das Prüffeld während der Durchführung der einzelnen Prüfungen nicht mehr betreten werden. Demzufolge entfallen neben dem Aufwand der Umkontaktierung auch die Maßnahmen zum Schutz gegen elektrische Gefährdung und die notwendige mehrmalige Freischaltung der Prüfanlage.

Eine mögliche Schaltung zur Automatisierung ist in *Bild 6* zu sehen. Alle Anschlüsse des zu prüfenden Verteiltransformators (10) werden mit flexiblen Leitungen an die Prüfanlage angeschlossen. Typischerweise befinden sich die im *Bild 6* dargestellten Schalter oberhalb des Prüfraums, um einerseits den Platzbedarf der Prüfanlage zu verringern, aber vor allem auch, um die Länge der Anschlussleitungen so gering wie möglich zu halten. Die Wechselrichteranlage (2), die sowohl die notwendigen Filterstufen als auch die kapazitive Blindleistungskompensation umfasst, wird auch hier wahlweise zur Speisung eines Anpasstransformators (1) oder des zusätzlichen Hochspannungstransformators (3) genutzt. Diese Verbindungen werden durch Niederspannungsschütze automatisch hergestellt.

Mit den dargestellten sechs motorbetriebenen Schaltern (4) bis (9) lassen sich alle genannten Prüfschaltungen ohne manuellen Eingriff herstellen. Die notwendigen Schalterstellungen für die einzelnen Prüfungen sind in *Tafel 1* nach der Anordnung der Schalter auf der Ober- und Unterspannungsseite getrennt aufgeführt.

Die Spannungsbeanspruchung der Schalter (5), (6) und (7) auf der Oberspannungsseite liegt bei der Prüfung eines Verteiltransformators für das 36-kV-Mittelspannungsnetz typischerweise bei rund 70 kV Leiter-Erde-Spannung für die Angelegte-Spannungs-Prüfung und bei 72 kV Leiter-Leiter-Spannung für die Induzierte-Spannungs-Prüfung. Die Beanspruchung der restlichen Schalter (4), (8) und (9) liegt bei maximal 5 kV. Da alle Umschaltvorgänge ausschließlich spannungsfrei geschehen und keine Löschung von Schaltlichtbögen notwendig ist, bieten sich besonders motorbetriebene offene Trennschalter – also aus technischer und wirtschaftlicher Sicht günstige Schaltelemente – an. Allerdings garantieren die Kontaktsysteme von Standardtrennschaltern, wie sie in der allgemeinen Elektroenergieversorgung eingesetzt werden, zu wenige Schaltspiele: im Bereich von nur 1.000 bis 2.000 Schaltvorgängen. Ein automatisiertes Transformatorenprüffeld ist aber darauf ausgelegt, bis zu 10.000 Transformatoren im Jahr zu prüfen. Um den Wartungsaufwand der Trennschalter zu reduzieren, kommen Spezialtrenner mit einer Lebensdauer von > 100.000 Schaltspielen zum Einsatz. Bei diesen Trennschaltern werden abriebarme Kombinationen von Kontaktmaterialien eingesetzt.

Für die mechanische Zuverlässigkeit werden besonders hochwertige Antriebselemente und Lagerungen eingesetzt. Im Gegensatz zur manuellen Umkonfektionierung der Prüflingsanschlüsse durch das Prüfpersonal ist der Zeitbedarf zur Herstellung einer neuen Prüfschaltung nur noch von der Umschaltzeit motorbetriebener Trennschalter begrenzt. Diese liegt je nach der Spannungsklasse des Schalters zwischen 5 und 10 s.

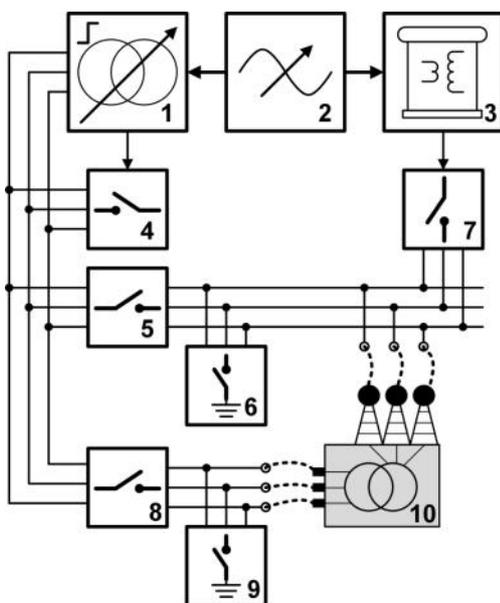


Bild 6. Schaltung zur Automatisierung der Stückprüfung an Transformatoren

| Schalterstellungen      |                         |                      |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Test HS                 | Schalter geschlossen NS | Schalter geschlossen |
| Hochspannung angelegt   | 7                       | 9                    |
| Niederspannung angelegt | 6                       | 4 + 8                |
| induzierte Spannung     | -                       | 8                    |
| Keine Last              | -                       | 8                    |
| Kurzschlussverlust      | 5                       | 9                    |

Tafel 1. Schalterstellungen für die einzelnen Prüfungen nach *Bild 6*

## Steuerungsebenen der Prüfanlage

Neben der Beschleunigung des Prüfablaufs durch automatische Umschaltvorrichtungen kann eine optimierte Gestaltung der Anlagensteuerung – vor allem durch das effiziente Zusammenführen der Messdaten und die automatisierte Erstellung der Prüfprotokolle – ebenfalls zu einer Zeitersparnis führen. Wird darüber hinaus eine Anbindung der internen Datenverwaltung des Prüfsystems an das ERP-System des Transformatorenherstellers realisiert, kann der Prüfprozess vollständig in die Geschäftsprozesse des Herstellers integriert werden. So kann beispielsweise die herstellereigene Dokumentenverwaltung genutzt werden, um die Transformatordaten zu verwalten, Prüfanweisungen zu erstellen und die Prüfergebnisse entsprechend abzulegen. Durch eine zentrale Auswertung der Prüfergebnisse der produzierten Transformatoren ergeben sich außerdem viele Möglichkeiten zur Qualitätssicherung.

Das Steuerungssystem lässt sich in mehrere hierarchisch unterteilte Ebenen gliedern. Diese sind in *Bild 7* vereinfacht dargestellt und mit den Buchstaben A, B und C bezeichnet. Jede übergeordnete Ebene zeichnet

sich durch einen erweiterten Abstraktionsgrad und eine größere Entfernung zur eigentlichen Hardware der Prüfanlage aus.

Die niedrigste Steuerungsebene (A) besteht aus der anlageninternen SPS-Steuerung (3), die in Verbindung mit einer grafischen Benutzeroberfläche (4) zur direkten Steuerung der Prüfanlage (1) dient. Das Prüfpersonal (5) muss in dieser Steuerungsebene alle für die Prüfung relevanten elektrischen Parameter manuell eingeben. Die notwendigen internen Einstellungen der Anlage werden daraufhin von der SPS automatisch vorgenommen. Die Einstellung und Auswertung der Verlustleistungsmessung (2) und der Hochspannungsmessung finden ebenfalls auf dieser Ebene statt. Durch die unmittelbare Nähe zur Anlagenhardware lassen sich auch Spezialprüfungen durchführen, die von den standardisierten Stückprüfungen abweichen. Die gewonnenen Messergebnisse können zur Weiterverarbeitung in einem Rohdatenformat von der SPS gespeichert und ausgegeben werden.

Durch ein erweitertes Steuerungssystem (B), das auf einer spezialisierten PC-Software (6) und einer anlagenspezifischen Datenbank (8) beruht, reduzieren sich die für eine Prüfung notwendigen manuellen Eingaben am Prüfsystem auf die Angabe der Seriennummer des zu prüfenden Transformators. Die genaue Prüfanweisung, in der alle für die Prüfung relevanten Daten enthalten sind, wird vom eigentlichen Prüfprozess getrennt vorab erstellt und in der Datenbank gespeichert. Alle anfallenden Messergebnisse, auch solche aus der Vorprüfung des Transformators, werden ebenfalls in dieser Datenbank abgelegt und können anhand der Seriennummer eindeutig dem geprüften Transformator zugeordnet werden. Nach dem Abschluss aller Prüfungen können die zusammengeführten Daten in einem gemeinsamen Prüfprotokoll (7) aufbereitet und abgelegt werden.

Die höchste Abstraktionsstufe (C) wird erreicht, wenn die anlagenspezifische Datenverwaltung über ein Koppelmodul (9) mit dem ERP-System (10) des Herstellers direkt verbunden wird. Allerdings ist ein solches Koppelmodul mit hohen Investitionen und personellem Aufwand für die Installation und regelmäßige Wartung verbunden, um einen reibungslosen Datenaustausch auch bei den nicht zu vermeidenden Anpassungen beider Systeme zu ermöglichen. Dennoch bietet eine vollständige Integration den großen Vorteil, dass der gesamte Produktionszyklus des hergestellten Verteiltransformators mit allen Prüfanweisungen, Messdaten und Protokollen zentral durch ein System verwaltet werden kann. Dadurch lassen sich sämtliche Vorgänge, die mit der Qualität des Transformators in Zusammenhang stehen, jederzeit sicher nachvollziehen.

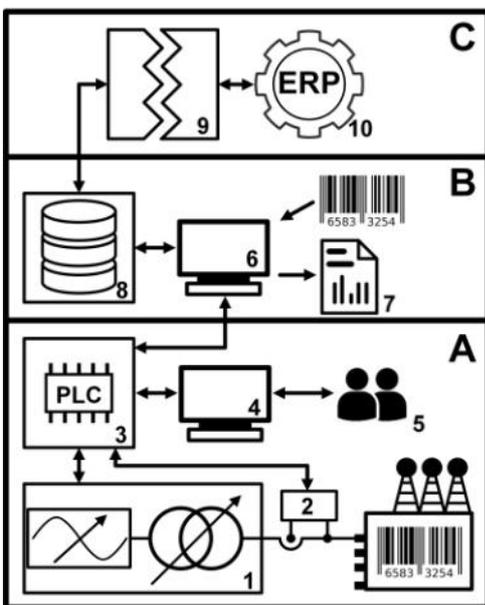


Bild 7. Hierarchisch unterteilte Ebenen eines Prüfsystems



Bild 8. Werksprüfung eines DITAS mit Hebebühne bei HIGHVOLT vor Auslieferung an den Kunden

### Weltweiter Einsatz unter realen Produktionsbedingungen

Das modulare Konzept des Prüfsystems DITAS erlaubt es, Herstellern und Energieversorgern innerhalb kurzer Projektlaufzeiten maßgeschneiderte und kostenoptimale Lösungen für die Prüfung von Verteiltransformatoren zur Verfügung zu stellen.

Es sind derzeit bereits sieben DiTAS-Systeme weltweit in Betrieb und die Kunden zeigen sich sehr zufrieden mit der Produktneuheit aus dem Hause HIGHVOLT. Insbesondere die von HIGHVOLT durchgeführte Integration des komplexen Prüfsystems in die bestehenden Räumlichkeiten beim Kunden und die benutzerfreundliche Bedienung werden immer wieder positiv hervorgehoben.

Um die je nach Nennleistung sehr unterschiedlich großen Prüflinge schnell und unkompliziert an das Prüfsystem anschließen zu können, wurden bei einer Konfiguration Teile des Prüfsystems auf eine in der Höhe einstellbare Hebebühne (Bild 8) montiert. Im Zusammenspiel mit der automatisierten Umschaltung werden für die vollständige Hochspannungsprüfung eines Verteiltransformators dadurch weniger als 15 Minuten benötigt. Damit konnte der Durchsatz des Prüffeldes im Ein-Schicht-Betrieb auf bis zu 7.000 Prüfungen pro Jahr gesteigert werden. Im Vierschichtbetrieb wäre ein solches Prüfsystem sogar in der Lage, jährlich bis zu 20.000 vollständige Stückprüfungen durchzuführen.

Der Beweis ist somit erbracht, dass durch die Einführung der automatisierten Prüfung im Zusammenspiel mit einer hochentwickelten Steuerung eine deutliche Effizienzsteigerung des Prüffeldes bei gleichbleibend hoher Qualität der Produkte erreicht werden kann. HIGHVOLT leistet so einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätssicherung bei seinen Kunden.

#### Literatur

- [1] Abts, H. J.: Verteil-Transformatoren/ Distribution-Transformers. Hüthig Verlag, 2006
- [2] Carlson, A.; Fuhr, J.; Schemel, G.; Wegscheider, F.: Testing of Power Transformers. Pro Print GmbH. 2003
- [3] IEC 60076-1: Power Transformers – Part 1: General. Second Edition 2000-03
- [4] IEC 60076-3: Power Transformers – Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests and External Clearances in Air. Second Edition, 2000-03
- [5] Nowak, R.: Automatisierung eines Prüffeldes für Verteiltransformatoren. 2014
- [6] Thiede, A.; Steiner, T.; Pietsch, R.: New Approach of Testing Power Transformers by Means of Static Frequency Converters. Cigré 2010, Session Paper D1-201

#### Autoren:



Dipl.-Ing. Raoul D. Harkenthal nahm nach seinem Studium der Elektrotechnik an der TU-Dresden zunächst eine Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der OSRAM GmbH auf und war später verantwortlich für die Entwicklung von Stromrichtertechnik bei der ENASYS GmbH. Seit 2013 arbeitet er als Projektleiter für die Entwicklung von Prüfsystemen für Verteil-Transformatoren bei der HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH.



Dipl.-Ing. Thomas Steiner war nach Abschluss seines Studiums an der FH Coburg als Software-Entwickler und Leiter des DKD-Kalibrierlabors bei der Dr. STRAUSS GmbH beschäftigt. 2005 übernahm er die Leitung des Teams Messtechnik und seit April 2007 ist er Technischer Leiter der HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH. Darüber hinaus ist er Mitglied in zahlreichen nationalen und internationalen Gremien, wie der DKE K 124, in den Arbeitskreisen IEC 61083-1, -2 und -3, ist deutscher Sprecher des IEC TC 42 sowie Mitglied im MT 07 und MT 16.

#### Kontakt:

HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH  
Marie-Curie-Straße 10  
01139 Dresden  
Deutschland  
sales@highvolt.de  
<http://www.highvolt.de>