

# Leistungstransformatoren – Neue Trends bei Design, Produktion und Betriebsüberwachung

Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen\*

AREVA Schorch Transformatoren GmbH, Mönchengladbach

## 1 Einführung

Transformatoren bildeten eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung elektrischer Energie und damit für die technisch industrielle Entwicklung des letzten Jahrhunderts. Basierend auf dem Induktionsgesetz von Faraday und Henry erfand 1889 Dolivo-Dobrovolsky den Drehstromtransformator mit magnetischer Verkettung der drei Strangflüsse. Der prinzipielle Aufbau des Leistungstransformators mit den Komponenten Kern, Wicklung und Isolationsaufbau hat sich seit dieser Zeit nicht verändert. Aufgrund der großen Anzahl von unterschiedlichen Anwendungsformen in der Kette der Energieübertragung und –verteilung ist jedoch kein anderes Betriebsmittel durch so viele unterschiedliche Parameter bestimmt. Die großen Leistungs- und Spannungsbereiche erforderten einen starken Entwicklungsprozeß beim Design und den eingesetzten Materialien. Die ökonomischen und ökologischen Anforderungen an Leistungstransformatoren sind in den letzten Jahrzehnten ebenfalls gewachsen, so daß sich die Entwicklungstätigkeiten nun auf niedrigere Verluste und höhere Zuverlässigkeit konzentrieren. Insbesondere Meßverfahren zur Zustandserfassung und Diagnose werden derzeit von Herstellern und Betreibern intensiv diskutiert. Zusätzlich führte der starke Kostendruck zur Optimierung der Fertigungsinfrastruktur sowie der Neuorganisation des Design- und Produktionsprozesses. Die Marktanforderungen der letzten Jahre nach niedrigeren Preisen bei gleichbleibend hoher Qualität, kurzen Lieferzeiten und hoher Termintreue sind gleichwertige Treiber der derzeitigen Entwicklungsaktivitäten.

## 2 Technologie und Design

### 2.1 Weiterentwicklung des Kernmaterials

Das oben genannte Leistungswachstum der Transformatoren konnte durch eine Verbesserung der eingesetzten Materialien erfolgen. Beispielhaft seien hier die Entwicklungsschritte des Kernmaterials angeführt.

---

\* stefan.tenbohlen@areva-td.com

Der Eisenkern führt im Leerlauf den magnetische Hauptfluß des Transformators. Kleiner Kernquerschnitt und geringe Windungszahl bedeuten zunächst wenig Materialverbrauch, ergeben aber eine hohe Flußdichte und einen großen Leerlaufstrom. Beschränkungen hinsichtlich der Leerlaufverluste oder der Geräuschemission verlangen demgegenüber jedoch eine Senkung der Induktion und damit eine erhöhtes Kerngewicht. So ist die Auslegung des Transformators immer ein Optimierungsprozess zwischen niedrigem Transportgewicht und niedrigen Verlusten. Als Werkstoff wird kornorientiertes, kaltgewalztes Blech verwendet, das eine magnetische Vorzugsrichtung in Walzrichtung besitzt.

Die Verluste im Eisenblech setzen sich im wesentlichen aus Hysterese- und Wirbelstromanteilen zusammen. Die Hystereseverluste nehmen mit dem Grad der Kornorientierung ab. Niedrigere Wirbelstromverluste werden durch geringere Blechdicken und einen höheren Siliziumgehalt erreicht. So wurden die Fertigungsdicken schrittweise von 0,35mm auf 0,23mm reduziert (Bild 1). Allerdings hat die Verlustverringering durch Veränderung dieser Parameter ihre Grenzen. Zum einen wächst mit abnehmender Blechdicke der Aufwand für das Schneiden und Legen der Bleche, zum anderen werden die Bleche spröder und sind nicht mehr kaltwalzbar. Die Entwicklung sogenannter Hi-B Bleche

brachte durch eine weiter verschärfte Kornorientierung und eine spezielle Oberflächenbeschichtung eine weitere Optimierung hinsichtlich der spezifischen Verluste und der Magnetostraktion, die für die Geräuschemission verantwortlich ist. Eine Verkleinerung des Abstands der magnetischen Bezirkswände führt zur Herabsetzung der Wirbelstromverluste im Blech. Dies kann durch mechanisches Anritzen der Blechoberfläche durch einen Laser erfolgen (gelasertes Blech). In den nächsten Jahren könnten weitere Verbesserungen durch Wirkungsgraderhöhung bei der Domänenverfeinerung mittels optimierter Beschichtung und der Vermeidung oberflächennaher Kristallbaufehler erzielt werden.

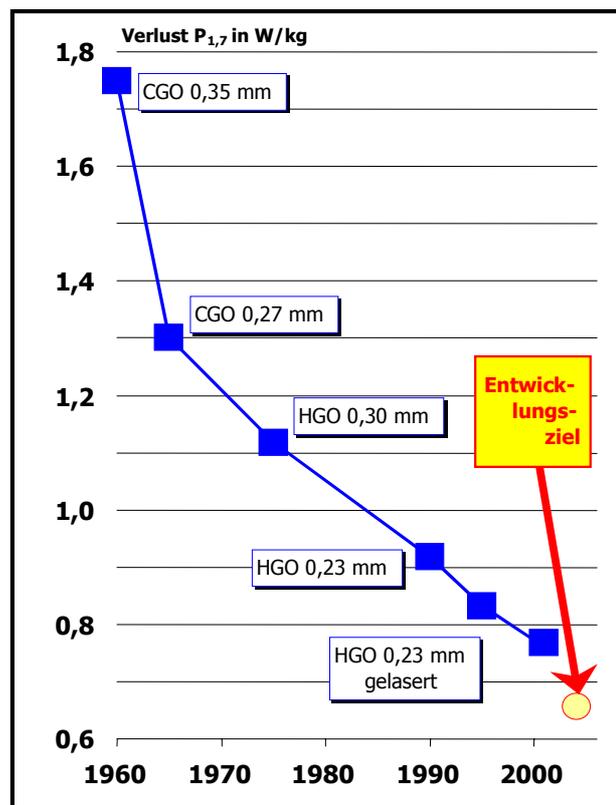


Bild 1: Entwicklung der spezifischen Verluste des Kernmaterials (Quelle: Thyssen-Krupp Electrical Steel)

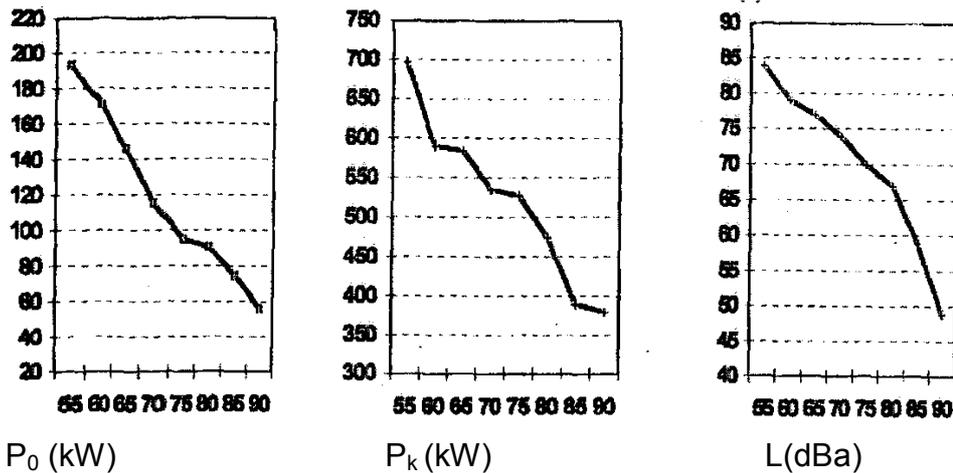


Bild 2: Technologischer Fortschritt beim Kernmaterial [1]

Bild 2 zeigt den Einfluß des technologischen Fortschritts auf die Eigenschaften eines 200MVA/220kV Transformators [1]. Dies ist nicht nur ein Ergebnis der oben genannten Materialverbesserung sondern auch durch eine optimierte Formgebung und Schichttechnik (Step Lap) des Kerns. So wurden durch diese Maßnahmen neben den Leerlaufverlusten auch andere Parameter des Transformators (z. B. Abmessungen, Gewicht, Kühlung) beeinflusst. Insbesondere die Geräuschemissionen sind in den letzten Jahren aus ökologischen Gründen ein wichtiges Auslegungskriterium, das durch Kernmaterial und Induktion stark beeinflusst wird.

In jüngster Zeit wurde versucht, amorphe Metalle einzusetzen, die wegen des Fehlens jeglicher Kristallstrukturen die zur Drehung der Magnetisierungsvektoren notwendige Energie nicht benötigen und damit weiter verringerte Leerlaufverluste haben. Allerdings konnte sich dieses Material im Leistungstransformatorenbau bisher nicht durchsetzen, da die Materialkosten z. Z. sehr hoch sind und die Verarbeitung schwierig ist. Gleichwohl sind Anwendungen bei Sondertransformatoren durchaus bekannt.

## 2.2 Verbesserte Berechnungsverfahren

Durch die Erhöhung der Rechnerleistung konnte der Zeitaufwand für umfangreiche Berechnungen erheblich reduziert werden, so daß die elektrische Auslegung eines Transformators mit erheblich geringeren Toleranzen erfolgen kann. Als Beispiel soll hier die Auslegung der Isolation einer Feinstufenwicklung angeführt werden. Ein gebräuchliches Verfahren war und ist, den sogenannten Längsgradienten zu verwenden. Dieser wird aus dem Quotienten von Potentialdifferenz zwischen erstem und letztem Draht geteilt durch den lichten Abstand dieser Drähte berechnet. Bei korrekter Auslegung darf dabei ein bestimmter Grenzwert nicht überschritten werden. Demgegenüber kann heutzutage die Spannungsverteilung bei transienter Spannungsbeanspruchung innerhalb der Feinstufenwicklung sehr genau bestimmt wer-

den. Für diese Berechnung werden die Wicklungen in ein feines Netz von Kapazitäten und gekoppelten Induktivitäten überführt. Die Aufstellung des Ersatznetzwerkes, die Wahl der Gitterpunkte werden vom verwendeten Programm automatisch vorgenommen. Die Berechnung selber liefert z.B. die magnetischen Felder, Streufeldverluste, axiale- und radiale Kurzschlußkräfte und die Stoßspannungsbeanspruchung innerhalb der Wicklungen. Um eine kurze Bearbeitungszeit zu gewährleisten, besitzt das Programm einen hohen Eingabekomfort, eine kurze Rechenzeit und eine informative Graphikausgabe. Dadurch wird der Einsatz nicht nur bei Neuentwicklungen, sondern auch in der routinemäßigen Auftragsbearbeitung zu einem wertvollen Hilfsmittel für den Berechner.

Mit Kenntnis der Stoßspannungsbeanspruchung der einzelnen Wicklungsteile wiederum erfolgt die Berechnung des elektrischen Feldes auf Basis eines finiten Elementprogrammes. Das Ergebnis einer entsprechenden Feldberechnung für den Bereich zwischen zwei Feinstufendrähten ist in Bild 3 dargestellt. Anhand der Farbskala können auch kleine feldkritische Bereiche leicht erkannt und durch entsprechende konstruktive Maßnahmen vermieden werden. Es kann somit einerseits eine materialsparendere und kompaktere Bauweise und andererseits eine bezüglich der elektrischen Festigkeit optimierte Anordnung entwickelt werden.

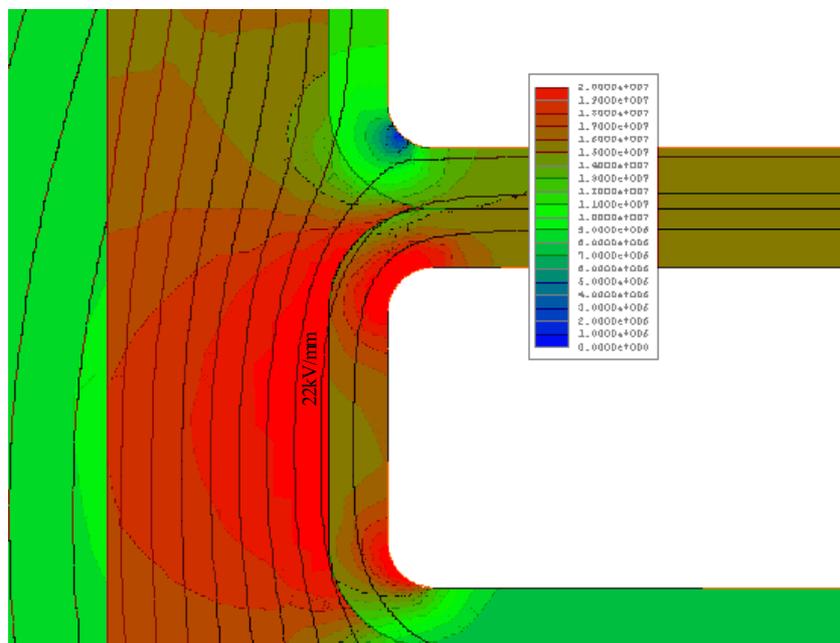


Bild 3: Betrag der elektrischen Feldstärke zwischen zwei Leitern einer Feinstufenwicklung bei Stoßspannungsbeanspruchung

### 2.3 Standardisierung

Für einen technisch und wirtschaftlich optimierten Leistungstransformator hat die Konzeption von standardisierten Baureihen eine große Bedeutung. So ist das Design der verschiedenen Baugruppen des Transformators hinsichtlich eines kurzen und

einfachen Fertigungsprozesses optimiert und standardisiert worden (Design to cost). Gleichzeitig sind bei der Festlegung des Standards die Kundenanforderungen bei bestimmten Baureihen zu berücksichtigen gewesen (Customizing). Auf Basis der geschaffenen Standards sind Softwaretools zur automatischen Zeichnungsgenerierung mittels 2D- und 3D-Autocad Programmen geschaffen worden, um den Designprozeß nennenswert verkürzen zu können. Nach Eingabe der von der elektrischen Auslegung erstellten Aktivteildaten werden die Zeichnungen und Stücklisten für Wicklung, Kern und Kessel weitestgehend automatisch erzeugt. Dadurch wird nicht nur die Konstruktionszeit stark verkürzt, sondern auch Zeichnungsänderungen und -fehler reduziert. Ein standardisiertes Design erleichtert weiterhin die Austauschbarkeit der Zeichnungen und Fertigungsunterlagen zwischen den unterschiedlichen Fabriken eines Herstellers.

Weiter sind die auf Basis dieser Standards konstruierten Transformatoren

## **2.4 Hermetikabschluß von Leistungstransformatoren**

Die Nutzungsdauer von Leistungstransformatoren wird allgemein durch die Lebensdauer des Öl-Papier-Isolationssystems beschrieben, da bei Verlust der mechanischen Stabilität des Isolierpapiers das Risiko eines dielektrischen Versagens und damit eines vollständigen Ausfalls besteht. Neben dem seit Montsinger bekannten Einflußfaktor Temperatur wurden Feuchtigkeit und Sauerstoffgehalt als wichtige Katalysatoren für den Alterungsprozess erkannt [2,3].

Das Isolieröl sättigt sich durch den Kontakt mit der Umgebungsluft im Ausdehner des Transformators mit Sauerstoff. Trotz Trockenvorlage nimmt das Öl zusätzlich Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Um diese Prozesse zu unterbinden und dadurch Depolymerisationsprozesse mit der zusätzlichen Wasserbildung zu vermindern, kann der Transformator hermetisch gegen die äußere Umgebung abgeschottet werden. Im Bereich der Verteilungstransformatoren wird dieses Verfahren seit langem erfolgreich eingesetzt. Das sich auf Grund von Temperaturschwankungen ändernde Ölvolumen wird dabei vom Transformator-kessel selber aufgenommen. Dazu ist der Kessel als sogenannter Wellwandkessel ausgeführt.

Bei Leistungstransformatoren ist auf Grund des wesentlich größeren sich verändernden Ölvolumens eine solche Konstruktion nicht möglich. Ferner muß der Kessel bei diesen Transformatoren vakuumfest ausgelegt werden. Um trotzdem eine Volumenänderung des Isolieröls ohne konventionellen Ausdehner zu ermöglichen, wurde ein Dehnradiator entwickelt und patentiert. Durch ein spezielles Schweißverfahren ist der Radiator in der Lage, neben der Kühlfunktion auch die Aufgabe des Dehngefäßes zu übernehmen, ohne dabei seine mechanische Festigkeit zu verlieren. Die Dauerfestigkeit dieser Schweißkonstruktion wurde an Hand von Langzeitversuchen

in Anlehnung an die Norm für Verteilungstransformatoren HD 428.1 "Requirements and tests concerning pressurized tanks" nachgewiesen. Die Norm schreibt vor, daß das sich dehrende Element mindestens 2000 Voll-Lastspiele ohne eine mechanische Beschädigung überstehen muß.

Zur Anpassung der Spannung des Transformators an die Netzverhältnisse wird ein Stufenschalter eingesetzt. Bei konventionellen Stufenschaltern entstehen während der Schalthandlung Gase. Aus diesem Grund wird das Lastschaltergefäß normalerweise mit einem getrennten Ausdehnungsgefäß verbunden. Um das hermetische Konzept idealerweise vollständig auszunutzen, kann für den Einsatz im Hermetiktransformator ein wartungsfreier Stufenschalter mit Vakuumschaltröhren eingesetzt werden, bei dem keine Schaltgase entstehen. Als Ausdehnungsgefäß für den Schalter wird ebenfalls ein hermetisch geschlossener Dehnradiator eingesetzt. Sowohl Stufenschaltergefäß als auch Transformator-kessel sind mit je einem Buchholzrelais zur Detektion von Gasen und einem Überdruckventil ausgerüstet, um bei einem Fehlerfall den Transformator zu schützen. Bild 4 zeigt den ersten hermetisch geschlossenen Transformators mit einer Nennleistung von 80 MVA bei einer Nennspannung von 110 kV.



Bild 4: Hermetisch geschlossener Leistungstransformator 80 MVA / 110 kV

Zur kontinuierlichen Erfassung des Betriebszustandes wurden hier sowohl Hermetiktransformator als auch Stufenschalter mit dem MONITORINGSYSTEM MS 1000 überwacht. Bei der Auswahl der eingesetzten Sensorik wurde besonderer Wert auf die Druck- und Temperaturverhältnisse im Inneren von Transformator-kessel und Lastschaltergefäß gelegt. Die mit verschiedenen Hermetiktransformatoren gesammelten Betriebserfahrungen zeigen deutlich die Vorteile dieses neuen Transformator-typs auf. Hermetisch geschlossene Leistungstransformatoren bieten neben dem Wegfall

des konventionellen Ausdehners und der verlangsamten Alterung des Öl-Papier-Isolationssystems den Vorteil weitestgehend wartungsfrei zu sein. Die Kontrolle der sonst benötigten Luftentfeuchter und der Austausch der Trocknungsvorlage entfällt.

### **3 Produktion**

Die Einführung einer prozessorientierten Organisation in der Fertigung machte die Schwachstellen der Infrastruktur deutlich und führte zu gravierenden Änderungen der klassischen Funktionen wie z. B. Arbeitsplanung, Zeitwirtschaft, Einkauf/Beschaffung oder Qualitätsprüfungen. Diese wurden z. T. dezentralisiert und der Verantwortungsbereich näher an und in die Wertschöpfungskette verlegt. Der geplante Auftragsprozess beginnt nicht erst mit der Fertigung, sondern mit dem Auftragseingang und durchläuft die elektrische und mechanische Auslegung genauso wie die Materialwirtschaft und Produktion mit vereinbarten Zielen von Durchlaufzeiten und Termintreue. Der optimale Materialfluß ist für die Transformatorenproduktion von entscheidender Bedeutung. Durch die Dezentralisierung des Materialflusses wurden logistische Verbesserungen umgesetzt. Beispiele sind direkt in den Fertigungsprozess integrierte Kanbansysteme und die starke Reduzierung des zentralen Lagers und dessen Bestände. Die Optimierung der Fertigungsprozesse mit dem Ziel der Reduktion von Aufwand und Durchlaufzeit wird in enger Zusammenarbeit von Fertigungstechnik, Produktentwicklung und ausführenden Produktionsmitarbeitern durchgeführt. Ergebnisse sind u.a. moderne und hochvariable Montagebühnen, computergesteuerte Wickelmaschinen und die Erhöhung der Hauptnutzungszeit von kapitalintensiven Anlagen. Der Wandel von einer Einzelteilmontage hin zu kompletten Systemen, wie z. B. vormontierte Isolationsaufbauten für Wicklungen, kann hier genannt werden. Der interne Transport des Transformators auf Luftkissenflächen erlaubt ein Höchstmaß an Flexibilität und Schnelligkeit. Besonderes Augenmerk muß auf die Sauberkeit der Fertigungsflächen gelegt werden. Die prozessorientierte Organisation wird durch ein verstärktes Ideenmanagement unterstützt, welches alle Mitarbeiter auffordert, kontinuierliche Verbesserungen ihres Arbeitsprozesses zu ermitteln und umzusetzen.

### **4 Betriebsüberwachung und Diagnose**

Standen früher Betriebssicherheit und Verfügbarkeit in der Stromversorgung im Vordergrund, stellen sich nun im Zuge der Liberalisierung für die Betreiber zusätzliche Forderungen. Dies betrifft auch den Bereich der Leistungstransformatoren. So ist einerseits die zuverlässige Energieversorgung bei einem drastisch reduzierten Instandhaltungsaufwand zu gewährleisten und andererseits aufgrund der Überalterung der in Betrieb befindlichen Transformatoren, die Frage nach deren Restnutzungs-

dauer zu beantworten. Hier sind Techniken gefragt, die eine möglichst hohe und kontrollierte Ausschöpfung der Restnutzungsdauer der Geräte ermöglichen und im Bedarfsfall Hinweise geben, durch gezielte Eingriffe die Nutzungsdauer zu verlängern (Life-Management). Zur Erhöhung der Verfügbarkeit sollen diese Diagnose-techniken frühzeitig einen sich anbahnenden Fehler anzeigen, um durch geeignete Instandsetzungsmaßnahmen den Ausfall des Betriebsmittels zu vermeiden.

Vor-Ort-Diagnoseverfahren, die die dazu notwendigen Informationen liefern, werden in on- und offline Methoden unterschieden. Online Monitoringsysteme arbeiten kontinuierlich an dem am Netz befindlichen Transformator und erlauben dadurch die permanente Erfassung des Betriebszustandes. Offline Diagnoseverfahren werden in bestimmten Zeitintervallen oder bei Bedarf, also wenn der Transformator schon fehlerverdächtig ist, angewandt. Neben den konventionellen Methoden, wie z. B. Gas-in-Öl Analyse und Verlustfaktor – Messung der Durchführungen, kommen in den letzten Jahren verstärkt neue Methoden, wie z. B. Teilentladungsmessung oder Bestimmung der Übertragungsfunktion, bei der Vor-Ort-Diagnose zum Einsatz [4, 5].

Beim online Monitoring werden verschiedene charakteristische Betriebsgrößen des Transformators aufgezeichnet und ausgewertet. Die Messungen von Spannungen, Laststrom, Temperaturen, Öl- und Stufenschalterkenngrößen ergeben präzise und kontinuierlich Aufschluß über den Zustand des Transformators [6]. Diese intelligente Zustandsüberwachung erkennt nicht nur Fehler, bevor sie zu echten Problemen werden, sondern bewertet auch, wie stark ein Transformator altert.

Ein modernes Monitoringsystem beschränkt sich nicht nur auf die Überwachung eines Transformators, sondern kann auch den gesamten Bestand einer Schaltanlage erfassen. Durch den Einsatz industrieller Feldbustechnik in Verbindung mit flexibler Prozessleittechnik läßt sich insbesondere bei der Nachrüstung eines Monitoringsystems in der Schaltanlage der Aufwand für Verdrahtung und Montage deutlich reduzieren. Der Zugriff auf das Monitoringsystem kann bei Verbindung mit dem Telefonnetz über ein Modem erfolgen, so daß die Ferndiagnose kein Problem darstellt. Um die erforderlichen Information allen Nutzern innerhalb eines EVU's bereitzustellen, besteht die Möglichkeit, das Monitoringsystem in das Intranet des Energieversorgungsunternehmens einzubinden. Die Visualisierung kann dann über den schon auf allen Arbeitsplätzen standardmäßig installierten Webbrowser (z. B. Internet Explorer) ohne zusätzliche produkt- oder herstellerepezifische Programme erfolgen. So kann der Nutzer alle wichtigen Betriebsdaten des Transformators auf einem Blick ablesen oder durch Mausklick auf die entsprechenden Buttons über den Zustand jeder einzelnen Baugruppe des Transformators (z. B. Aktivteil, Durchführung oder Stufenschalter) detailliert informiert werden.

Die steigende Bedeutung von online Monitoringsystemen wird auch in der Zuwachsrate der Anzahl der installierten Systeme deutlich. Wurde in der Anfangsphase das

MONITORINGSYSTEM MS 2000 an eher unwichtigen Netzkupplungstransformatoren installiert, um Betriebserfahrungen zu sammeln, sind mittlerweile Transformatoren an strategisch wichtigen Punkten, wie Kern- und Pumpspeicherkraftwerken, mit dem System ausgerüstet. So wurden z. B. alle Transformatoren eines Kernkraftwerkes mit einer ihrer Wichtigkeit entsprechenden Anzahl von Sensoren ausgerüstet. Die Wirksamkeit des online Monitoring wurde durch das frühzeitige Aufdecken zahlreicher Probleme, wie z.B. Heißpunkte im Ausleitungsbereich, Teilausfall einer Kühlanlage, defektes Relais in der Steuerung des Motorantriebs oder Ölleckage an einer 400 kV Durchführung bewiesen.

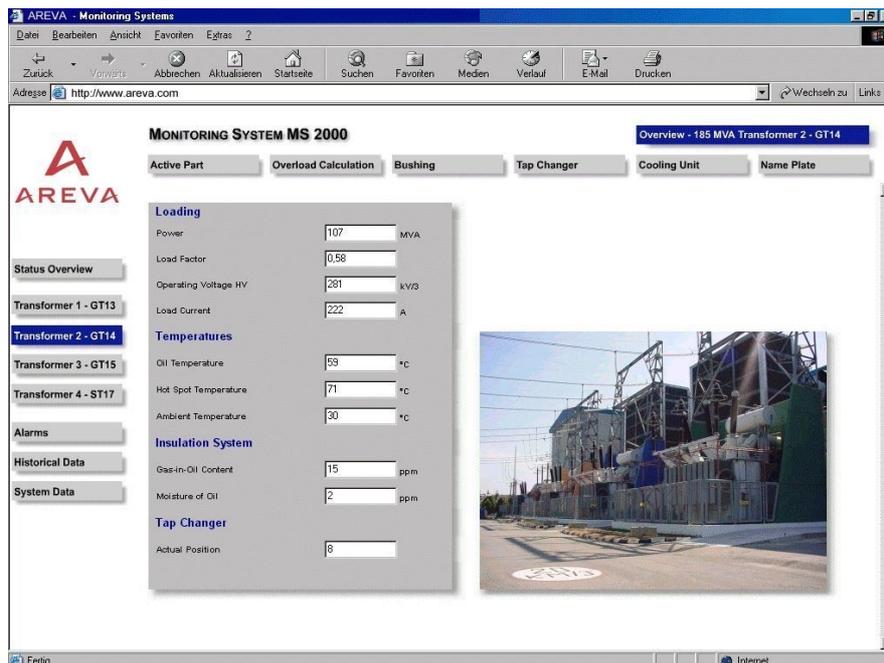


Bild 5: Visualisierung des Betriebszustandes eines Maschinentransformators

## 5 Schrifttum

- [1] R. Baehr: „*Transformer Technology State-of-the-Art and Trends of Future Development*“, Electra No.196, October 2001
- [2] W. Lampe et al.: „*The Oxygen-free Transformer Reduced Ageing by Continuous Degassing*“, CIGRE, paper 12-05, Paris, 1976.
- [3] D.H. Shroff et al.: „*A Review of Paper Aging in Power Transformers*“, IEE PROCEEDINGS, Vol.132, Pt C, No 6, NOVEMBER 1985
- [4] Tenbohlen, S.; et al.: „*Enhanced Diagnosis of Power Transformers Using On- and Off-line Methods*“, Cigre 2000, Paris
- [5] Gockenbach, E.; et al.: „*Kombinierte Verfahren zur Zustandserkennung der Isolierung von Leistungstransformatoren*“, ETG-Fachtagung, 1999, München
- [6] Tenbohlen, S.; et al.: „*Experience-Based Evaluation of Benefits of On-line Monitoring Systems for Power Transformers*“, Cigre 2002, Paris