

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Dipl.-Ing. Hartmut Brendel Consultant



Hartmut Brendel wurde 1952 in Halle/Saale geboren. Nach dem Abitur und einer gleichzeitigen Facharbeiterausbildung zum Betriebsschlosser studierte er theoretische Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Ilmenau und beendete das Studium als Diplomingenieur.

Hartmut Brendel war mehr als dreißig Jahre als Ingenieur im Trafobau angestellt. Dies wurde nur 1990 mehrjährig unterbrochen durch eine Tätigkeit als Geschäftsführer von zwei Elektroinstallationsfirmen. Während seiner Beschäftigung im Transformatorenbau war Herr Brendel als Berechner, Konstrukteur, Technologe, Leiter der Konstruktion und Technologie und zuletzt als Leiter technische Entwicklung im Bereich Engineering Solutions in Halle tätig. Nebenberuflich lehrte er zeitweise an Fachschulen technische Mechanik und Festigkeitslehre, Konstruktion und Technologie.

Hartmut Brendel ist in 14 europäischen Patenten und mehr als 50 internationalen Einzelpatenten oder Patentanmeldungen als Erfinder benannt. Er hat die ABB Ende 2013 verlassen und ist seitdem als Berater für Transformatoren und Hochspannungsanwendungen tätig.



Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Advanced Retrofit – die Verbesserung von Öltransformatoren bei der Instandsetzung mit innovativen Konstruktionslösungen

Dipl. Ing. Hartmut Brendel Berater für Transformatoren und Hochspannungsanwendungen

Abstract

Based on a distinct definition of retrofit approaches and solutions will be presented on how oil-power-transformers can be repaired in an innovative way such that they operate reliably for a second life cycle. Using the space in the core window more effectively and saving space in the area between active part and vessel there are possibilities to increase power, voltage and current and to decrease the losses from an extensive repair. This method will be called *advanced retrofit* in the following. It allows for economic effects in new dimensions. To solve design problems engineers will have to use advanced methods of 3D-calculation for mechanical, thermic, magnetic and electric fields.

Einleitung

Der Begriff „Retrofit“ kommt aus dem Englischen und bedeutet nach [1] soviel wie „Nachrüstung, Umbau, Sanierung, Ertüchtigung“. Leider existiert offensichtlich keine deutsche Definition des Begriffs. Dabei beschreiben die Begriffe „Sanierung“ und „Ertüchtigung“ im Zusammenhang am besten den Sachverhalt bei technischen Anlagen und Maschinen. Sanierung wird im Technischen auch als Instandsetzung bezeichnet, die ihrerseits wiederum Bestandteil der Instandhaltung ist. Die Instandhaltung wird in der DIN 31051 [2] definiert als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“. Die Instandsetzung wird durch die DIN 31051 in vier Grundbereiche unterteilt

- Wartung
- Inspektion
- Instandsetzung
- Verbesserung

Dabei macht die Norm zur Ausgestaltung der Instandhaltung keine Angaben.

Ulrich Aha hat in seiner Dissertation „Optimierung von Instandhaltungsstrategien bei unscharfen Eingangsdaten“ [3] mathematische Modelle zur Kostenbewertung von Instandhaltungsstrategien mit Instandhaltungsoptimierung am Beispiel von

Kraftwerken entwickelt, die sich durchaus auch auf Transformatoren anpassen lassen. Er definiert dabei die Begriffe

- Instandsetzung als Maßnahme zur Rückführung einer Komponente oder Anlage in den funktionsfähigen Zustand ohne Verbesserungen
- Verbesserung als Kombination der technischen und administrativen Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Komponente oder Anlage, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern

Außerdem definiert er zusätzlich den Begriff der

- Befundinstandsetzung als eine Instandsetzung von Komponenten und Anlagen mit einer Zuverlässigkeitserhöhung in einem solchen Maß, dass für die Zeit bis zur nächsten Instandsetzungsmaßnahme vorhersehbare Ausfälle vermieden werden.

Vergleicht man diese Begriffe mit den gängigen Interpretationen des Begriffs „Retrofit“, so ergibt sich eine mögliche deutsche Definition als Kombination aus Befundinstandsetzung und Verbesserung, allerdings auf rein technischer Basis.

Während in der vorbeugenden Instandhaltung von Anlagen der Begriff „Retrofit“ schon sehr lange verwendet wird, ist die Anwendung des Begriffes auf die Instandsetzung von Transformatoren erst einige Jahre alt. So haben bereits 1994 G. Beckmann und D. Marx in Ihrer Arbeit „Instandhaltung von Anlagen“ [4] die sogenannte „Badewannenkurve“ für die Ausfallraten von Maschinen und Anlagen über die Zeitdauer ihres Einsatzes als Grundlage einer vorbeugenden Instandhaltung definiert. Dabei werden sogenannte Frühfehler, verursacht durch Kinderkrankheiten der Konstruktion oder Fertigungsmängel mit Zufallsfehlern und Abnutzungs- bzw. Alterungsfehlern überlagert. Die ersten beiden Fehlerarten sind durch eine vorbeugende Instandhaltung kaum zu beeinflussen.



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Die weiteren Ausführungen zum Retrofit von Transformatoren basieren auf der nachfolgenden Begriffsdefinition.

Definition Retrofit von Transformatoren

Basierend auf den vorgenannten Aussagen und in Anlehnung an die DIN 31051 wird das Retrofit von Transformatoren wie folgt definiert:

Retrofit von Transformatoren ist die umfassende Instandsetzung und Verbesserung derselben ohne Änderung der Leistungsdaten mit dem Ziel der Wiederherstellung bzw. Steigerung der Zuverlässigkeit in einem solchen Maße, dass vorhersehbare Ausfälle für einen zweiten Lebenszyklus des Transformators vermieden werden.

Die Dauer eines zweiten Lebenszyklus hängt vom Typ des Transformators ab. Sie kann bei Industrietransformatoren mit 10-15 Jahren durchaus ökonomisch sinnvoll sein, für Verteiltransformatoren sind weitere 30 Jahre Lebensdauer im zweiten Lebenszyklus nach einem Retrofit anzustreben. Generell sollte sich die 2. Lebensdauer an der ursprünglich geplanten Lebensdauer des Trafos orientieren.

Aus dieser Begriffsdefinition lässt sich der notwendige Leistungsumfang für das erfolgreiche Retrofit von Öl-Leistungstransformatoren direkt ableiten.

Leistungsumfang des Retrofit von Öl-Leistungstransformatoren

Die spannungsführenden Komponenten von Öl-Leistungstransformatoren werden nach dem Stand der Technik mit Stoffen auf Zellulosebasis isoliert. Diese unterliegen einem irreversiblen Prozess der Alterung, die häufig die Ursache von Ausfällen des Transformators in der 3. Phase des ersten Lebenszyklus sind. Retrofit nach der vorgenannten Definition bedeutet daher zwingend den Ersatz dieser Isolationen. Im Gegensatz zu anderen Maschinen, bei denen gealterte oder verschlissene Bauteile, wie zum Beispiel Lager oder Buchsen meist einzeln austauschbar sind, sind die Isolierstoffe im Trafo meist so gebunden, dass ihre Erneuerung nur durch den Austausch der gesamten Baugruppe realisierbar ist. Im Einzelnen lässt sich dabei folgender Leistungsumfang für das erfolgreiche Retrofit eines Öl-Leistungstransformators ableiten.

Leistungsumfang für das Retrofit von Öl-Leistungstransformatoren

Folgende Baugruppen sind zwingend zu erneuern:

- alle Wicklungen einschließlich ihrer Randfeldisolationen;
- obere und untere Presskonstruktion, soweit sie aus alternden Isolierstoffen besteht und sich im elektrischen Randfeld befindet;
- Alle weiteren Isolationen zwischen Trafokern und Wicklungen,
- Schalter und Umsteller müssen erneuert oder so saniert werden, dass sie isolationstechnisch mit neuen Bauteilen gleichzusetzten sind;

In folgenden Baugruppen müssen Isolierteile nach Befund (Verschmutzung, Alterung) erneuert bzw. teilweise erneuert werden:

- Isolierteile im Trafokern;
- Isolation der Ableitungen;
- Leisten und Befestigungsteile der Ableitungen;
- Abstützungen der oberen und unteren Pressteile, wenn sie sich weitgehend außerhalb des elektrischen Randfeldes der Wicklungen befinden,
- Tragkonstruktionen aus Isolierstoff für Anbauteile wie Stufenschalter oder Umsteller.

Folgende Baugruppen können befundabhängig nach einer Überholung (Reinigung, Trocknung, Ausbesserung kleiner Schäden) wiederverwendet werden:

- Trafokern nach umfassender Diagnose und Ausschluss sich entwickelnder Kernbrände und Heißstellen sowie Untersuchung des Zustandes eingebauter Kernisolationen
- Lüfter und Kühler nach Reinigung und Überholung;
- Elektroinstallation, soweit wie sie dem Stand der Technik entspricht.
- Trafokessel und Deckel bzw. Wanne und Haube sowie Ausdehnungsgefäe und Rohrleitungen einschließlich Schutz- und Überwachung, wenn sie den modernen Forderungen nach Vakuumfestigkeit entsprechen;



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Zusätzlich zu den o.g. Maßnahmen der Wiederherstellung der vollen Lebensdauer gehören die eingangs in der DIN 31051 genannten Verbesserungen wie die Beseitigung erkannter Konstruktionsmängel und Schwachstellen. Das kann beispielsweise die Substitution unzuverlässiger Steckverbindungen oder die Beseitigung von Mängeln und Engpässen in der Kühlung von Kern und Wicklungen sein. Für Letzteres gibt es dabei eine einfache Lösung, indem Wicklungen einschließlich ihrer Randfeldisolation nach dem neuesten Kenntnisstand neu berechnet, gefertigt und eingebaut werden.

Wenn bei dem Retrofit eines Öl-Leistungstransformators auf der Grundlage einer gründlichen Befundung und Diagnose die o. g. Grundsätze eingehalten werden, kann anschließend der sichere Betrieb dieses Transformators in einem zweiten Lebenszyklus gewährleistet werden.

Betriebswirtschaftliche Betrachtung des Retrofit

Die Entscheidung zwischen Retrofit oder Neuananschaffung ist immer eine Einzelfallentscheidung.

Die jeweils betriebswirtschaftlich sinnvollere Alternative wird nach Johannes Ritter [6] mit Hilfe eines Business-Case in drei Schritten analysiert:

1. Strukturierung des Projektes mit einer Einflussmap. Ein wichtiger Punkt dabei ist der Vergleich der Lebenszykluskosten.
Johannes Ritter kommt dabei zu dem Ergebnis, dass in der Regel die Lebenszykluskosten eines Retrofit (30 Jahre) niedriger sind als die eines neuen Transformators. Diese liegen nach Ritter für große Verteiltransformatoren beim neuen Transformator zwischen ca. 1,8 und 2,4 Millionen Euro, beim Retrofit nur zwischen 1,5 und 2 Millionen Euro.
2. Erstellung eines Finanzmodells auf der Basis von Intervallschätzungen mit minimalem, wahrscheinlichen und maximalem Ausfallrisiko, welches die Schwächen von Punktschätzungen des Ausfallrisikos vermeidet.
3. Risiko- und Sensitivitätsanalyse mit statistischer Validierung der Ergebnisse des Finanzmodells.

Die Ergebnisse von Johannes Ritter zeigen, dass eine Investition in Retrofit in der Regel betriebswirtschaftlich sinnvoller ist als die Neuananschaffung eines Transformators.

Nachdem die betriebswirtschaftliche Effektivität des Retrofit nachgewiesen wurde, sollen nachfolgend Beispiele für das Retrofit von Öl-Leistungstransformatoren mit Verbesserungen unter Beibehaltung ihrer Leistungsdaten mit innovativen Konstruktionslösungen vorgestellt werden.

Beispiellösungen für innovatives Retrofit

1. Beispiel

Retrofit eines 266MVA-Einphasentrafos (Kraftwerkstrafo, Hersteller SIEMENS) mit Design Insulation Level 700kV, Umbau der HV-Ausleitung von einer Steckkontakt- zu einer Schraubkontaktlösung.

Hauptproblem dieses Retrofit war der Ersatz der alten Ausleitung mit Steckanschluss durch eine neue Spezialausleitung mit Schraubanschluss und T-Stück. Außerdem mussten neben neuen Wicklungen, angepasst an die spezielle Kühltechnologie von SIEMENS für Kern und Wicklungen, neue kriechwegfeste Halter für sehr kurze Distanzen, Abstützungen und eine effektive Isolation der Jocheisen entwickelt werden.



Abbildung 2: 266MVA-Trafo nach Öffnung

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess



Abbildung 3: Alte HV-Ausleitung, 266MVA-Trafo



Abbildung 4: Alte Isolation der Jocheisenkante

1. Problemlösung: Ertüchtigung der gerade neu entwickelten 400kV-**HaPuflex**-Ausleitung (630kVDIL) für Um 550kV (700kV DIL), Entwicklung einer Spezialversion mit T-Stück

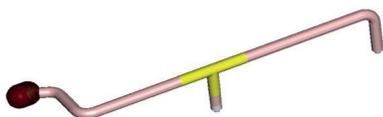


Abbildung 5: **HaPuflex**550 [7] [8] [9] mit T-Stück

2. Problemlösung: Berechnung und Beherrschung der Feldstärken an der Jocheisenrundung in mehreren Teilschritten:

- 2.1. Berechnung der elektrischen Feldstärken auf der Basis eines dreidimensionalen Pro-Modells mit dem ABB internen 3D-Feldberechnungsprogramm POLOPT (boundary method)

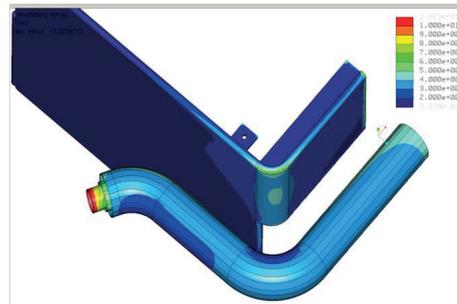


Abbildung 6: 3D-Feldberechnung Jocheisen

Spätestens seit der Veröffentlichung der Kurven für die Einsatzfeldstärken von Entladungen in Abhängigkeit von Spaltweiten im Öl durch H.P. Moser in seinem Buch „Transformerboard“ 1979 [10] lässt sich herleiten, dass die Feldstärke an blanken Elektroden im Öl bei Abständen >100mm zum HV-Potential 2 kV/mm nicht überschreiten sollte. Die errechneten Feldstärken an Jocheisen liegen aber bei Prüfspannung 700kV zwischen 4kV/mm - 5 kV/mm. Dies ist nur noch mit einer direkt anliegenden Isolation sicher zu beherrschen. Wie aus Abbildung 4 zu erkennen ist, erfüllen aber konventionelle Isolationen aus 2mm Pressspan diese Bedingung trotz Stabilisierung durch Leisten nicht, da sie sich bei der Trocknung im Vakuum und während des Alterungsprozesses verformen.

- 2.2. Lösung des Isolationsproblems am Jocheisen durch Entwicklung eines mechanisch stabilen und sich bei Trocknung nicht veränderndem Komposit-Materials aus Pressspanplatten mit dazwischen geklebtem trapezförmigem Pressspan als Isolation mit 2 Barrieren „**HaPuwell**“ [11] welches sich nach dem Prinzip von Nut und Feder mit Zwischenstücken aus dünnerem **HaPuwell** zu vielen Isolationsvarianten kombinieren lässt.

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

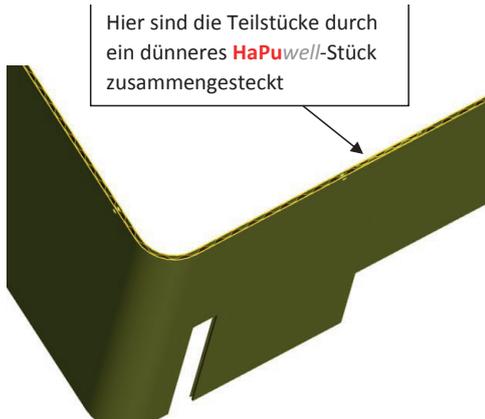


Abbildung 7: Jochisolation aus zusammenge-
steckten **HaPuwell** -Stücken verschiedener
Ausformung

3. Problemlösung: Entwicklung eines
kriechwegfesten Halters für das hori-
zontale Ausleitungsrohr, Optimierung
des Halters mittels 3D-POLOPT-
Kriechwegberechnung

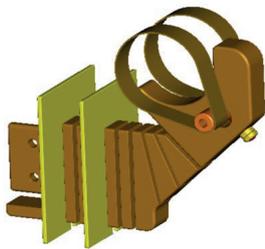


Abbildung 8: auf kürzeste Entfernungen
kriechwegfester Halter **HaPufix horizontal** [12]

4. Problemlösung: Entwicklung eines
kriechwegfesten Halters mit geringer
vertikaler Feldverdrängung



Abbildung 9: Halter zur vertikalen Abstützung
HaPufix vertical [13] mit großer Kriechweglänge
und geringer vertikaler Feldverdrängung
durch 50% -tigem vertikalen Anteil an Öl.

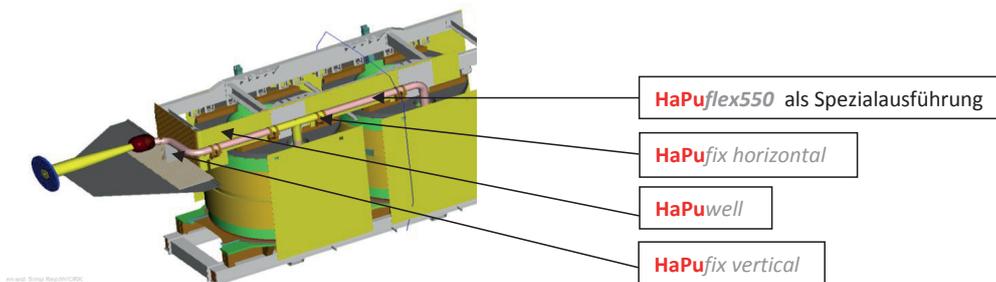


Abbildung 10: komplette Problemlösung als
Retrofit des Aktivteils mit **HaPusystem**



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Dieses erfolgreiche und innovative Retrofit hatte als Ergebnis nicht nur einen sehr hochspannungsfesten, wieder 30 Jahre einsetzbaren Transformator, Isolationsabstände wurden dabei um mehr als die Hälfte geringer ausgeführt, als bisher in Werksstandards festgelegt, sondern die entwickelten Komponenten wurden als Erfindungen registriert. Mittlerweile

sind dafür 6 europäische Patente erteilt sowie weitere 36 internationale Patente bzw. Patentanmeldungen registriert. Die entwickelten Komponenten waren auch die ersten Schritte für die Erweiterung der **HaPuflex**-Ausleitungen zu einem umfassenden kompletten Ausleitungssystem, dem **HaPusystem**.

Overview HaPusystem (31.12.2013)

rated voltage	230kV	550kV	800kV	1200kV
Assembly				
HaPuflex-exits	HaPuflex 230-3000	HaPuflex 550	HaPuflex 800 in 2 Versionen	HaPuflex 1200
layout-control for exits		✓	✓	
HaPufix, horizontal	✓	✓	✓	✓
HaPufix, vertikal	✓	✓	✓	✓
HaPubridge, horizontal	✓	✓	✓	✓
HaPubridge, vertical	✓	✓	✓	✓
HaPurib	✓	✓	✓	✓
HaPushield	✓	✓	✓	✓
HaPusafe	✓	✓	✓	✓
HaPuwell	✓	✓	✓	✓
standard-solutions	✓	✓	✓	✓
special-solutions		<i>T-piece</i>	<i>2. shield at winding</i>	

Abbildung11: Übersicht über das **HaPusystem**

Heute umfasst das **HaPusystem** typgeprüfte Ausleitungen für alle weltweit gebräuchlichen Hochspannungen von Um= 220kV AC bis 1200kVAC mit allen zugehörigen Komponenten für die Fixierung der Ausleitungen einseitig als **HaPufix horizontal**, **HaPufix vertical**, oder zweiseitig als Brücken, **HaPubridge horizontal**, **HaPubridge vertical** und ihre komplette Abschirmung gegen Domkanten durch spezielle Schirmringe **HaPusafe** und gegen scharfe Gefäßkanten **HaPushield** mit als Elektroden geformten Schirmblechen, isoliert durch aufgespanntes **HaPuwell** sowie die Fixierung der Brücken im Kessel oder Dom mit speziellen besonders kriechwegfesten Leisten **HaPurib**.

Die Entwicklung ist damit keinesfalls abgeschlossen, aber den Ingenieuren stehen so wirkungsvolle Werkzeuge für die Lösung von Hochspannungsproblemen beim Retrofit von Öl-Leistungstransformatoren zur Verfügung.

Inzwischen ist der Begriff „**HaPuflex**“™ durch den Hersteller der Komponenten des **HaPusystem**, die PUCARO Elektro-Isolierstoffe GmbH, als weltweites Warenzeichen geschützt.

2. Beispiel

Retrofit eines einphasigen, geregelten 400kV-Trafos mit Haupttrafo und Regeltrafo in einem Kessel, verbunden durch Ableitungen mit nicht mehr verfügbaren, unzuverlässigen Steckkontakten. Der Haupttrafo sollte dabei unter Wiederverwendung seines Trafokerns mit neuen Wicklungen und Ableitungen versehen werden, der Zusatztrafo zur Regelung musste durch ein komplett neues, jetzt größeres Aktivteil ersetzt werden. Dabei ergab sich die Problematik der Steckkontakte und eine sehr enge Durchleitung der Verbindung zum ebenfalls sanierten Stufenschalter mit Um= 220kV, d.h. einem DIL von 395kV vorbei am scharfkantigen, jetzt noch größeren Kern des Regeltrafos mit nur 300mm Platz. Im folgenden Bild ist die Lösung des Problems aufgezeigt.

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

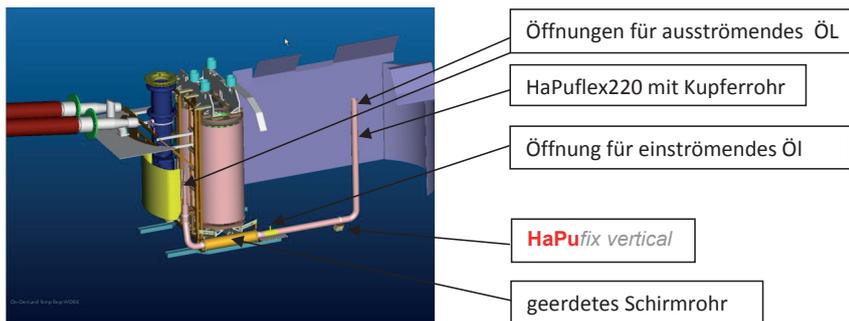


Abbildung 12: Neue Verbindung von Haupt- und Zusatztransformator mit **HaPuflex220**-Ausleitung (Haupttrafo nicht dargestellt!)

Die Substitution der Steckkontakte des alten Trafos erfolgte dabei durch eine Verbindung vom Stufenschalter zum hier nicht dargestellten Haupttrafo über von oben zugängliche Schraubkontakte durch eine speziell entwickelte 220kV-Version der **HaPuflex**-Ausleitung mit dickwandigem, stromtragenden Kupferrohr von 80mm Durchmesser anstelle des dünnwandigen Schirmrohrs aus Aluminium der anderen **HaPuflex550**-Ausleitung. Dieses ist an seinem tiefsten Punkt mit einer speziell isolierten Einströmöffnung für Öl ausgeführt und wird damit von innen gekühlt, indem das Öl nach dem Schornsteinprinzip an Öffnungen an den beiden oberen vertikalen Enden wieder ausströmt. Die Vorbeileitung der Hochspannung mit 395 kV-DIL im Abstand von ca. 150mm an den geerdeten und scharfen Kanten des Kerns des Zusatztrafos wird durch ein zweigeteiltes, geerdetes und beidseitig mit Nassstoff isoliertes Schirmrohr mit nur 260mm Innendurchmesser realisiert. Das Kupferrohr der Ausleitung wird in diesem Bereich durch eine Isolation mit 2 gewickelten Barrieren analog der **HaPuflex550**-Ausleitung gegen das Erdpotential des Schirmrohrs isoliert. Das Randfeld am Schirmrohr wird beidseitig durch besonders geformte Elektroden abgesichert. Die **HaPuflex220**-Ausleitung muss nur im Bereich der höchsten Feldstärken mit 2 Barrieren isoliert werden, in den geringer belasteten Bereichen werden eine oder beide Barrieren weggelassen und nur die Nassstoffisolation des Ausleitungsrohres gewährleistet die elektrische Festigkeit. Das spart Aufwand und Kosten. Es ermöglicht die Anordnung von Anschlussstücken mit hoher Stromtragfähigkeit zur Verschraubung der Ableitung in diesen Bereichen. Das Ausleitungsrohr wird im gezeigten Beispiel an seinem Ende im Bereich des Haupttransformators durch eine Abstüt-

zung mittels **HaPufix vertical** mit 50% Ölanteil in vertikaler Richtung zum Kesselboden mechanisch so abgefangen, dass keine zu hohen elektrischen Feldstärken in den Ölkanälen der Ausleitung zwischen den Barrieren durch Feldverdrängung infolge höherer Permittivität entstehen, wie das beim Einsatz massiver Pressspanabstützungen der Fall wäre.

Mit diesen ausgewählten Beispielen wird nachgewiesen, dass auch schwierigste Probleme beim Retrofit von Öl-Leistungstransformatoren innovativ gelöst werden können, wenn die entsprechenden Ideen durch interdisziplinäre Entwicklungsteams umgesetzt werden. Allerdings wäre die Entwicklung und Fertigung so komplizierter Isolierteile, wie sie in den Beispielen gezeigt werden, ohne die aktive Mitwirkung der Ingenieure und Techniker der PUCARO Elektro-Isolierstoffe GmbH als Miterfinder und Lieferanten des notwendigen technologischen know-how der Isolierstoffherstellung nicht möglich gewesen (**Halle + Pucaro = HaPu**).

Advanced Retrofit

Das bisher behandelte Retrofit erfolgte auf der Grundlage unveränderter Leistungsdaten des Transformators. Wenn schon dieses „einfache“ Retrofit betriebswirtschaftlich lohnend ist, so könnte man die ökonomischen Effekte noch weiter steigern, wenn es gelingen würde, die Leistungsdaten von großen Öl-Leistungstransformatoren beim Retrofit zu verbessern. Im Folgenden sollen dafür Beispiele gezeigt werden. Diese Art von Retrofit habe ich „Advanced Retrofit“ genannt.

Definition Advanced Retrofit:



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Advanced Retrofit von Transformatoren ist die umfassende Instandsetzung derselben unter Verbesserung ihrer Leistungsdaten mit dem Ziel der Wiederherstellung bzw. Steigerung der Zuverlässigkeit in einem solchen Maße, dass vorhersehbare Ausfälle für einen zweiten Lebenszyklus des Transformators vermieden werden.

Auch hier gilt die Zielstellung, den zweiten Lebenszyklus mit der gleichen Länge wie den ersten zu gewährleisten, d. h. beispielsweise bei Verteiltransformatoren weitere 30 Jahre Lebensdauer.

Verbesserung der Leistungsdaten des Transformators können dabei sein:

- Erhöhung von Nennspannungen;
- Erhöhung von Nennströmen;
- Vergrößerung der Nennleistung;
- Veränderung der Kurzschlussspannung für bessere Netzanpassung;
- Verringerung der Verluste;

oder Kombinationen aus den o.g. einzelnen Zielstellungen. Es sind aber auch komplexere Lösungen realisierbar wie zum Beispiel

- Veränderungen der Schaltgruppe;
- Einbau zusätzlicher Wicklungen;
- Veränderungen des Regelbereiches

und viele anderen Kombinationen machbar.

Damit wird die Möglichkeit eröffnet, Trafos die an einer Stelle nicht mehr gebraucht werden, für neue Einsatzorte und Nutzungsmöglichkeiten im Rahmen eines Retrofit umzugestalten. Das erweitert das Spektrum für Retrofit-Lösungen erheblich und bietet ganz neue ökonomisch effektive Chancen für Netzbetreiber, Kraftwerksbetreiber und industrielle Anwendungen.

Lösungsansätze für Advanced Retrofit

Da Retrofit wirtschaftlich nur sinnvoll ist, wenn kostenintensive Baugruppen wie z. B. Kerne und Kessel wiederverwendet werden, können daraus auch die möglichen Lösungsspielräume für Advanced Retrofit abgeleitet werden. Bei der Wiederverwendung des Kerns ist das Kernfenster, welches die Wicklungen mit ihrer Randfeldisolation und die Pressteile aufnehmen muss, unveränderbar definiert.

Gleiches gilt für Isolationsabstände in wiederverwendeten Gefäßen wie Kessel und Deckel.

Sie sind gegeben und können nicht verändert werden.

Die aufgelisteten Varianten der Verbesserung von Leistungsdaten haben alle eine Gemeinsamkeit, sie benötigen mehr Wickelraum für vergrößerte Wicklungen im Kernfenster und eine bessere Ausnutzung der Räume im Bereich zwischen Aktivteil und den Wänden der Gefäße. Da diese Distanzen aber insgesamt unveränderbar sind, setzt das Advanced Retrofit zwangsläufig den Einsatz neuer innovativer Lösungen voraus. Mit den althergebrachten Entwurfsverfahren, Regeln und Werkstandards können solche Lösungen nicht entwickelt werden. Erst die Überwindung der in den Transformatorenwerken traditionell üblichen Trennung zwischen Berechnung, Konstruktion und Technologie, verbunden mit dem Willen zur Innovation und dem umfassenden Einsatz moderner, erst seit einigen Jahren an den Arbeitsplätzen der Ingenieure zur Verfügung stehender Softwarewerkzeuge zur dreidimensionalen mechanischen, thermischen, magnetischen und elektrischen Feldberechnung, schaffen die Voraussetzungen für innovative Problemlösungen.

Dabei gibt es für die bessere Raumausnutzung im Kernfenster zwei Lösungsansätze:

1. Verbesserungen im Kernfenster

1.1. Die Verringerung isolationstechnisch notwendiger axialer Distanzen der Randfelder zugunsten des effektiven Wickelraumes durch aktive Feldformung

1.2. Die Verringerung des anteilig benötigten axialen Raumes für die Presskonstruktionen ebenfalls zugunsten des effektiven Wickelraumes

Für die bessere Nutzung der Räume zwischen Aktivteil und Gefäßen gibt es gleichfalls zwei Lösungsansätze:

2. Verbesserungen zwischen Aktivteil und Gefäß

2.1. Großflächige Isolation der Gefäßwände und Kernpresseisen

2.2. Verbesserte Isolation der Ableitungen

Im Folgenden werden für alle o.g. Punkte Beispiele vorgestellt.

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Beispiele für innovative Lösungen

1. Beispiel zu Punkt 1.1

In Ostdeutschland vorhandene 220kV-Transformatoren mit 250 MVA Nennleistung wurden in größerer Menge verschrottet. Aufgabe war, die Texturkerne dieser Transformatoren zu bergen und trotz zu geringer Abmessungen im Kernfenster für die Fertigung von 400kV-Regeltrafos wiederzuverwenden. Das Problem wurde durch umfangreiche Feldformungen am oberen Presseisen auf der Basis dreidimensionaler mechanischer und elektrischer Feldberechnungen gelöst.

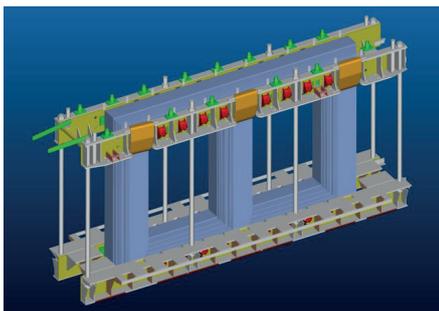


Abbildung 13: modellierter Trafokern mit umgebauten oberen Presseisen

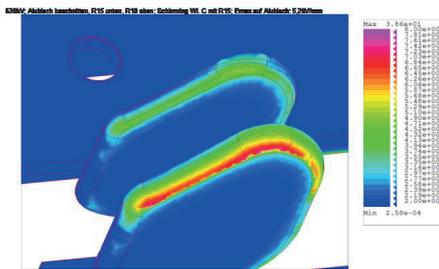


Abbildung 14: 3D-Feldberechnung für die Isolation der umgebauten AL-Presssteile

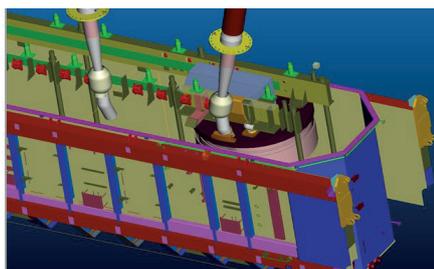


Abbildung 15: 3D-Modell des Trafos mit HV-Ausleitung und Schirmblechen



Abbildung 16: Feldformung im Bereich der HV-Ausleitung (HaPuflex550) im oberen Randfeld



Abbildung 17: fertiger 250MVA-Regeltransformator mit $U_m = 400\text{kV}$ im Prüffeld

Durch die individuelle Optimierung des oberen elektrischen Randfeldes konnten Isolationsabstände verwirklicht werden, die bei ca. 50% der internen Werksstandards lagen. Auch für die Regelableitungen wurden innovative Lösungen mit Durchleitung eines Teils derselben im unteren Jochaufbau gefunden. Dieser Trafotyp wurde als Erfolgsmodell mehrfach mit gebrauchtem Kern gefertigt.

Der erste praktische Einsatz der dreidimensionalen Berechnung elektrischer Felder bei diesem Transformator erbrachte gemeinsam mit einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit aller beteiligten Ingenieure sehr schnell den Nachweis der Effektivität dieser neuen Methoden.

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

1. Beispiel zu Punkt 1.2

Aufgabe war das Retrofit eines 400kV-Regeltransformators mit 600MVA Nennleistung, ein altes DDR-Fabrikat der TRO Berlin. Dabei sollte die Induktion im Kern zur sicheren Wiederverwendung desselben abgesenkt werden, was eine geringe Senkung der Leerlaufverluste nach sich ziehen sollte. Der zur Verfügung stehende axiale Wickelraum im Kernfenster reichte nicht aus, um die neuen Wicklungen mit mehr Windungen aufzubauen.

Lösung: Verringerung der Dicke der oberen Pressringe zugunsten des Raumes für die Wicklungen durch direkt eingefräste Klötze.

Wenn man also die Klötze in einen Pressring einfräst, statt sie nur lose als Scheibe mit Klötzen darunter zu legen, kann man die Biegefestigkeit des Pressrings erheblich erhöhen, bzw. diesen bei Beibehaltung seiner alten Biegefestigkeit in der Höhe um mehrere Zentimeter verringern. Entsprechend wurden die oberen Pressringe aus einem Stück gefertigt:

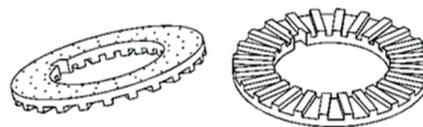


Abbildung 18: Pressringe mit angefrästen Klötzen [14].

Durch diese Lösung konnten die Druckringe axial mehrere Zentimeter dünner gefertigt werden als der vorherige Aufbau aus einzelnen Ringen plus Klotzscheibe. Beim Einbau erwies sich an Hand ihrer kaum sichtbaren Durchbiegung bei der Aktivteilpressung, dass die neuen Pressringe trotzdem biegefestere waren als die Originalkonstruktion. So wurde der notwendige Wickelraum für die um mehrere Windungen vergrößerten Wicklungen gewonnen. Die Induktion im Kern wurde abgesenkt und die Leerlaufverluste wurden geringfügig verringert.

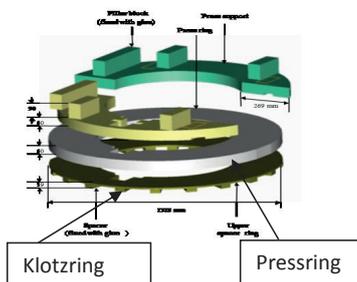
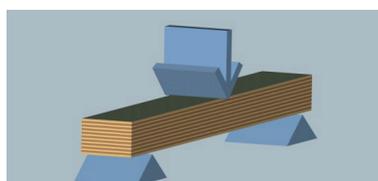


Abbildung 16: prinzipieller Aufbau der oberen Wicklungspressung mit traditioneller Trennung von Pressring aus Pressspann (für höhere Spannungen) und oberem Klotzring (common spacer ring) aus Pressspannscheibe mit Pressspannklötzen zur radialen Ölausleitung aus den Wicklungen

2. Beispiel zu Punkt 1.2

Aufgabe war das Retrofit eines 70MVA-Trafos mit Leistungserhöhung auf 90MVA. Auch hier musste der Wickelraum vergrößert werden. Dazu wurden die Pressringe mit angefrästen Klötzen weiterentwickelt, indem der Querschnitt der eingefrästen Ölkanäle so verändert wurde, dass ein besserer mechanischer Kraftfluss erfolgte bei gleichzeitiger Sicherstellung des Ölflusses durch neue Konstruktionsalgorithmen.



Section modulus of supports:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad h=2 \Rightarrow 4b/6$$

$$h=2 \Rightarrow 4b/6 + 4b/6 = 8b/6$$

$$h=4 \Rightarrow 16b/6$$

ABB

Abbildung 17: Das Widerstandsmoment gegen Biegung von zwei losen Balken auf zwei Auflagern wird verdoppelt, wenn man sie zusammenklebt oder aus einem Stück fertigt.

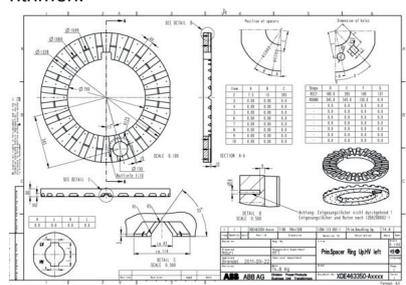


Abbildung 19: Verbesserte Pressringe mit schräg ausgefrästen Ölkanälen



**TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT
CONFERENCE**

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Dabei wurden erstmalig auch die unteren Pressplatten mit eingefrästen Klötzen eingebaut.

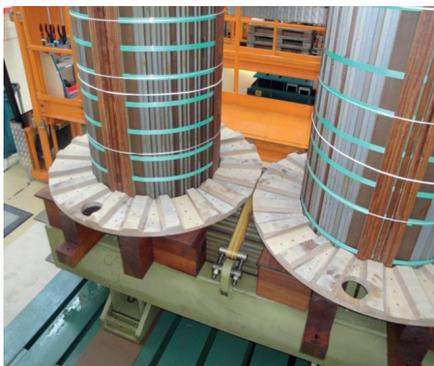


Abbildung 20: weiterentwickelte Pressringe am Unterjoch

Damit konnte die Leistungserhöhung von 70MVA auf 90MVA erfolgreich umgesetzt werden. Eine bei der Endprüfung durchgeführte Wärmefahrt erbrachte geringfügig zu niedrige Temperaturen, was auf Leistungsreserven hinweist und die Konstruktion bestätigt.

Beispiel zu Punkt 2.1

Bei dem Retrofit eines 500MVA-Regeltrafos mit 400kV waren die Regelableitungen ursprünglich unten neben den Jocheisen kompakt in der Wanne montiert. Eine thermische Nachrechnung ergab, dass diese Ableitungen bei längerem Betrieb mit Nennleistung Heißpunkte entwickeln und es zu Wärmedurchschlägen kommen kann. Deshalb wurde das neue Regelschaltgerüst konventionell zwischen Wicklungen und Kesselwand angeordnet. Eine Nachrechnung ergab aber zu hohe Feldstärken an der Kesselwand. Der Transformator wurde deshalb an der Kesselwand gegenüber den Ableitungen komplett über eine Länge von mehr als 6m mit einer zusammengesteckten Wand aus **HaPuwell** isoliert.



HaPuwell

Abbildung 21: Kesselwand mit **HaPuwell**-Isolation

Durch diese stabile, sich im Trocknungsprozess nicht verformende Isolation aus zusammengesteckten **HaPuwell**-Platten ist eine erhebliche Vergrößerung der Feldstärken im Öl an der Kesselwand möglich.

Beispiel zu Punkt 2.2

Beim Retrofit eines 500MVA-Transformators mit 400kV Nennspannung kam es infolge einer Überlagerung des elektrischen Feldes der Wicklung, verursacht durch den Spannungsabfall derselben von Mitte 630 kV DIL zu den Enden mit ca. 400kV DIL, mit dem Feld zwischen den Phasen der Ableitung zu so hohen tangentialen Feldstärken, dass es zu einem Überschlag durch Gleitentladung kam.



Überschlag

Abbildung 22: Überschlag am Schaltgerüst

Durch die engen Platzverhältnisse im Trafo wurde keine sichere konventionelle Lösung des Problems gefunden. Die Lösung erfolgte durch die Entwicklung, Erprobung und den Einbau eines völlig neuartigen Isolierkanals aus drei 1mm Pressspanbarrieren mit dazwischen geklebtem Wellboard. Zunächst wurde die PUCARO Elektro-Isolierstoffe GmbH in Roigheim mit Versuchen zur Eignung verschiedener Materialien und der Ermittlung möglicher Biegeradien beauftragt. Miterfinder, Klaus Herkert, ermittelte kurzfristig die Daten und entwickelte Fertigungswerkzeuge. Auf der Grundlage derselben wurde ein U-Kanal konstruiert, der **HaPuchannel** [15].

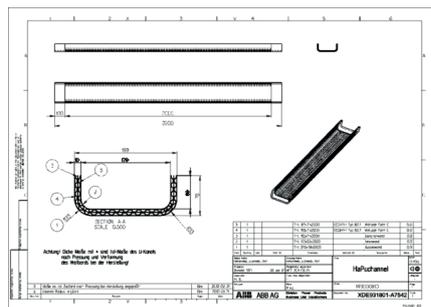


Abbildung 23: **HaPuchannel** ohne Einbauten



Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

Mit einem Versuchsaufbau wurden der Kanal und die konstruierten Einbauten zur Fixierung der Leiterseile und der Absicherung ihrer Öl-kühlung erfolgreich getestet.



Abbildung 24: Testaufbau für **HaPuchannel**

Anschließend wurde das Schaltgerüst des Transformators mittels Einbau von vorkonfektionierten, zusammensteckbaren Kanälen in-standgesetzt.

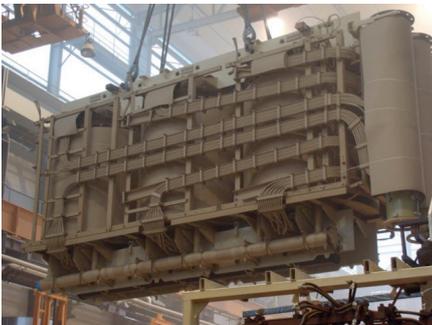


Abbildung 25: mit **HaPuchannel** neu aufgebautes Schaltgerüst.

Das in der obigen Abbildung gezeigte Schaltgerüste, ausgeführt mit **HaPuchannel** konnte mit einer bisher unbekanntem Geschwindigkeit montiert werden. Die Produktivität bei der Montage des Regelschaltgerüsts wurde schon bei der ersten Anwendung nahezu verdoppelt.

Schaltgerüste, ausgeführt mit **HaPuchannel** sind gekennzeichnet durch

- eine extreme mechanische Festigkeit;
- eine hohe Festigkeit gegen Gleitentladungen durch ihre U-Form;
- eine sehr hohe Festigkeit gegen Teilentladungen und Durchschläge hin zu den Wicklungen durch ihre Struktur mit drei Barrieren;

- eine daraus resultierend Verringerung der notwendigen Abstände zwischen den Ableitungen verschiedener Phasen und zwischen den Ableitungen und Wicklungen;
- eine drastische Verringerung der Anzahl benötigter Tragleisten auf Grund ihrer selbsttragenden Eigenschaften;
- einer hohen thermischen Belastbarkeit durch eingebaute Ölkanäle;
- eine effektive Materialausnutzung durch an verschiedenen Objekten einsetzbare, vorkonfektionierte Kanäle;
- eine hohe Produktivität bei der Schaltgerüstmontage.

Zusammenfassung

Auf der Grundlage von Definitionen der Begriffe *Retrofit* und *Advanced Retrofit* wurden Wege und innovative Beispiellösungen aufgezeigt, wie zukünftig Öl-Leistungstransformatoren nicht nur einem effektiven Retrofit unter Beibehaltung ihrer Leistungsdaten unterzogen werden können, mit den aufgezeigten Lösungen zur effektiveren Nutzung des Fensters im Trafokern und besseren Ausnutzung der Räume zwischen Aktivteil und Gefäß sind auch Methoden entwickelt, die ein Advanced Retrofit derselben in einem weit größerem Umfang als bisher ermöglichen. Die Verbesserung von Leistungsdaten auf diesem Wege eröffnet für die Trafonutzer ganz neue, betriebswirtschaftlich noch effektivere Varianten zur Weiterverwendung von Öl-Leistungstransformatoren aller Art in einem zweiten Lebenszyklus.

Gleichzeitig können diese Lösungen auch im Neubau von Transformatoren angewendet werden. Pressringe mit angefrästen Klötzen und Ableitungen mit **HaPuchannel** werden bereits heute im Neubau eingesetzt.

Literaturverzeichnis

- [1] leo.org *online Wörterbuch* englisch-deutsch, Stand August 2014
- [2] DIN31051, Normenausschuss: *Grundlagen der Instandhaltung*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2012
- [3] Ulrich Aha, *Optimierung von Instandhaltungsstrategien bei unscharfen Eingangsdaten*, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, elektro-



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Transformer Retrofit Plus - Möglichkeiten der Designverbesserung im Reparaturprozess

- technik und Wirtschaftsingenieurwesen der brandenburgischen Technischen Universität Cottbus (BTU Cottbus) 2013
- [4] Beckmann, G.; Marx, D.: *Instandhaltung von Anlagen*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig, 1994
 - [5] Siemens AG Nürnberg, *Repair & Retrofit- neues Leben für alte Transformatoren*, Werbeschrift, Internet
 - [6] Johannes Ritter, *Zustandsbasierte Instandhaltung von Transformatoren – Retrofit versus Neuanschaffung* e-m-w, Zeitschrift für Energie, Markt, Wettbewerb Nr.6, Dezember 2011
 - [7] H. Brendel, *Ausleitungsohr*; Europäische Patentschrift EP 2 287 864 B1; 04.04.2012 Patentblatt 2014/14
 - [8] H. Brendel, M. Starke, R. Büchner, J. Braatz, K. Herkert, *Durchführung für Hochspannungsausleitungen in Öltransformatoren*; Europäische Patentschrift EP 2 442 319 B1; 05.12.2012 Patentblatt 2012/49
 - [9] H. Brendel, M. Starke, R. Büchner, J. Braatz, K. Herkert, *Durchführung für Hochspannungsausleitungen in Öltransformatoren*; Europäische Patentschrift EP 2 442 321 B1; 05.12.2012 Patentblatt 2012/49
 - [10] H. P. Moser; *Transformerboard*; H. Weidmann AG, Rapperswil 1979
 - [11] H. Brendel; *Öltransformatorenisoliationsmodul*; Europäische Patentschrift EP 2 442 322 B1; 05.12.2012 Patentblatt 2012/49
 - [12] H. Brendel, ; Halter für Hochspannungsausleitungen in Öltransformatoren; Europäische Patentschrift EP 2 445 071 B1; 01.01.2014 Patentblatt 2014/01
 - [13] H. Brendel, ; *Öltransformatorenisoliationsmodul*; Europäische Patentschrift EP 2 442 323 B1; 28.08.2013 Patentblatt 2013/35
 - [14] H. Brendel, A. Gustafsson, E. Wedin, J. Engström, E. Forsberg, L. Schmidt, *Oil transformer*, Europäische Patentschrift EP 2 602 800 B1; 26.02.2014 Bulletin 2014/09
 - [15] H. Brendel, M. Starke, M. Hübner, R. Büchner, K. Herkert, I. Li-Pira; *Neues Schaltgerüst für Öl-Leistungstransformatoren mit HaPuchannel*, europäische Patentanmeldung ep13003094.3

Dipl. Ing. Hartmut Brendel

Berater für Transformatoren und Hochspannungsanwendungen

Am Heiderand 26

06120 Halle/Saale

Tel.: 0345 1205157; 015772090445

E-Mail: hartmut.brendel@web.de