Anforderungen an eine moderne Fertigung und Prüfung von Leistungstransformatoren

1. Entwicklungstendenzen bei der Herstellung von Leistungstransformatoren in den letzten Jahrzehnten:

Bis hinein in die 70-er Jahre wurde die Weiterentwicklung von Leistungstransformatoren im Hinblick auf höhere Spannungsebenen und Einheitenleistungen kontinuierlich weitergetrieben. Dabei bestanden die technischen Herausforderungen in der Beherrschung von

- Spannungsfestigkeit (transient, resonanzfrequent)
- Kurzschlußfestigkeit
- Teilentladungsfreiheit (Betriebssicherheit)
- Transportierbarkeit (Kompaktheit)
- Geräuschen.

Diese Tendenzen mußten zwangsweise zum Stillstand kommen bzw. sich beruhigen. Rückblickend auf die letzten zwei Jahrzehnte ist festzustellen, daß die Herstellung von

- Mittelleistungstransformatoren (31.5 MVA bis 40 MVA)
- Netzkupplungstransformatoren (200 MVA bis ca. 300 MVA)
- Maschinentransformatoren (100 bis ca. 1000 MVA)
- Sondertransformatoren (für die Industrie)

aus technischer Sicht (Machbarkeit) für die noch existierenden Transformatorhersteller keine besonderen Herausforderungen mehr darstellen: Leistungstransformatoren sind ausgereifte Produkte, deren Eigenschaften sich sehr genau beschreiben lassen.

Demgegenüber forderte die Fertigungstechnik dramatische Weiterentwicklungen um der veränderten Marktsiutation gerecht zu werden. Merkmale des heutigen Marktes sind:

- sicheres Beherrschen der Qualität
- Kostendruck
- extrem kurze Lieferzeiten
- taggenaues Einhalten der Liefertermine
- Durchführung umfangreicher (nicht eingeplanter) Reparaturen und Refurbishment
- Durchführung umfangreicher Reparaturen und Überholungen vor Ort.

Über die Bedeutung dieser Situation im Hinblick auf Auslegung, Fertigung und Prüfung von Transformatoren wird im folgenden berichtet.

2. Fertigung und Prüfung von Leistungstransformatoren

Technische Auslegung

Im In- und Ausland sind in den letzten Jahrzehnten Kundenspezifikationen entstanden, die zum Zeitpunkt der Auftragsvergabe den zu liefernden Leistungstransformator detailliert beschreiben.

Das Umsetzen der verschiedensten Kundenspezifikationen in die Organisationsstruktur eines Transformatorherstellers gehört heute zu den wichtigsten Engineering- und Logistik-Aufgaben und ist von entscheidender Bedeutung für eine termingerechte Auslieferung des Transformators. Abweichungen von den in der Fabrik festgeschriebenen (Fertigungs-) Prozessen sind in der Regel aus Qualitätsgründen nicht zulässig.

Die technische Auslegung eines Transformators beginnt in den Berechnungs- und Konstruktionsabteilungen.

Hinsichtlich der Betriebsgrößen (Kurzschluß- und Leerlaufverluste, Geräusche, Erwärmung) existieren einfache Berechungsverfahren und Auswertungen vieler Messungen an bereits gebauten und ausgelieferten Transformatoren. Dieser Datenbestand bildet gemeinsam mit den IT-Tools die Grundlage für viele Neuauslegungen.

Die Wechsespannungsfestigkeit eines Transformators ist beherrschbar, da die Wechselspannungsverteilung im Aktivteil mit geringem Aufwand eindeutig bestimmt werden kann.

Zur Beherrschung von transienten Vorgängen (insbesondere bei der Beanspruchung des Aktivteils mit Stoßspannungen) wurden umfangreiche Berechnungsverfahren entwickelt. Schon bei der Auslegung werden genau die bei der Stoßspannungsprüfung zur Anwendung kommenden Schaltungen berücksichtigt. Vor Beginn der Auslegung wählt der Prüfingenieur aus einem Katalog die möglichen Schaltungen für die Stoßspannungsprüfung aus. Parameter dieser Schaltungen werden bei der Auslegung in Rechnerprogramme eingegeben, um die innere Beanspruchung der Wicklungen zu berücksichtigen.

Beispiel:

Die technischen Daten eines zu prüfenden Transformators sind:

- Leistung: 40 MVA,
- Spannungen: 110 kV +/- 16 % / 21 kV
- Schaltgruppe: Yyn
- Wicklungsaufbau: Unterspannungswicklung: Lagenwicklung (4 Lagen)
  Oberspannungsstammwicklung: Spulenwicklung
  Oberspannungsregelwicklung: einlagige Grobstufe
  einlagige Feinstufe, Stufen ineinandergewickelt

Für die Stoßspannungsprüfung schlägt der Prüfingenieur für den Stoß auf den Oberspannungs-Phasenanschluß (Stufenschalterstellung Minus) folgende Schaltung vor:

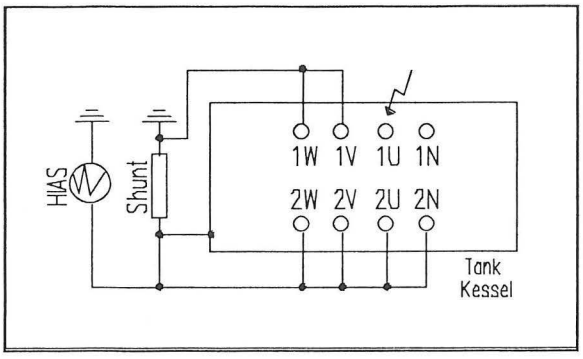

Bild 1: Schaltbild für die Stoßspannungsprüfung des Oberspannungs-Phasenanschlusses

Der Berechnungsingenieur überprüft die Auslegung des Transformators durch Berechnung der inneren Beanspruchung der Wicklungen bei der Stoßspannungsprüfung:

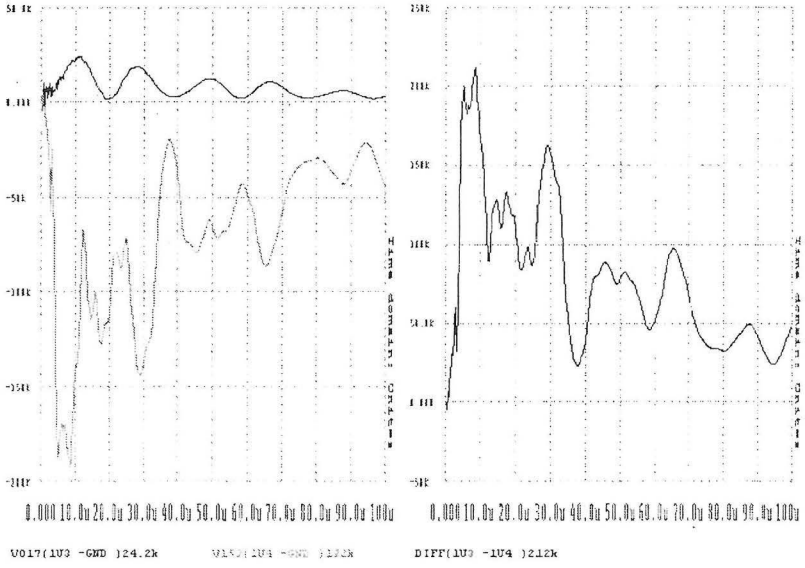

Bild 2a: Zeitlicher Verlauf der Spannungen bei der Stoßspannungsprüfung:
Linkes Bild, obere Kurve: Spannung Ende Stammwicklung gegen Erde
Linkes Bild, untere Kurve: Spannung Ende Grobstufe gegen Erde
Rechtes Bild: Spannung zwischen den Ende Stammwicklung und Ende Grobstufe

In früherer Zeit waren dem Berechnungsingenieur lediglich die Stoßspannungsbeanspruchungen an ausgesuchten Stellen des Aktivteils bekannt. Diese wurden durch Messungen mit Stoßspannungen von ca. 500 Volt ermittelt werden konnte (Bild 2a). Heute kann der zeitliche Verlauf der Spannungen am gesamten Aktivteil für jede beliebige Auslegungsvariante rechnerisch ermittelt werden (Bild 2b).

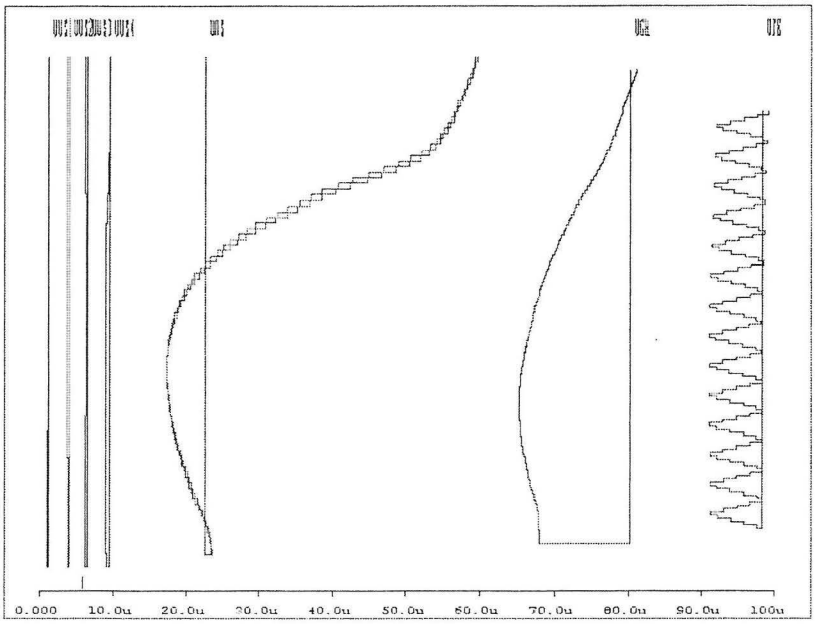

Bild 2b: Spannungsverteilung bei der Stoßspannungsprüfung eines Oberspannungs-Phasenanschlusses in Minus-Stellung nach ca. 7 Mikrosekunden

In der Vergangenheit war die technische Machbarkeit im Hinblick auf die Beherrschung der Spannungsbeanspruchungen bestimmend für die Auslegung. Dieses Kriterium kann heute ohne Schwierigkeiten praktisch immer eingehalten werden. Bestimmend für die Auslegung ist heute die für die Realisierung vorgegebene Zeit in den Fertigungsabteilungen.

Beschaffung der Materialien/Komponenten

Durch die Fertigungsverflachung bei der Herstellung von Transformatoren hat die Logistik an Bedeutung gewonnen. Hierzu gehören:

- Grobplanung der Berechnung, Konstruktion, Fertigung
- Beschaffung der Materialen
- Materialfluß usw.

Durchführungen, Stufenschalter und Wickelkupfer müssen zum frühest möglichen Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung festgelegt und bestellt werden, in der Regel vor, spätestens aber unmittelbar nach Abschluß der technischen Auslegung des Aktivteils. Bei besonderen Anforderungen an die Durchführungen und den Stufenschalter sind häufig deren Lieferzeiten bestimmend für die Lieferzeit des gesamten Transformators.

Die folgende Grafik stellt die Planung eines Leistungstransformators dar. Die Beschaffung von Bauteilen und Fertigungsmaterialien verlängert die Durchlaufzeit bei der Herstellung von Leistungstransformatoren um ca 33 %.

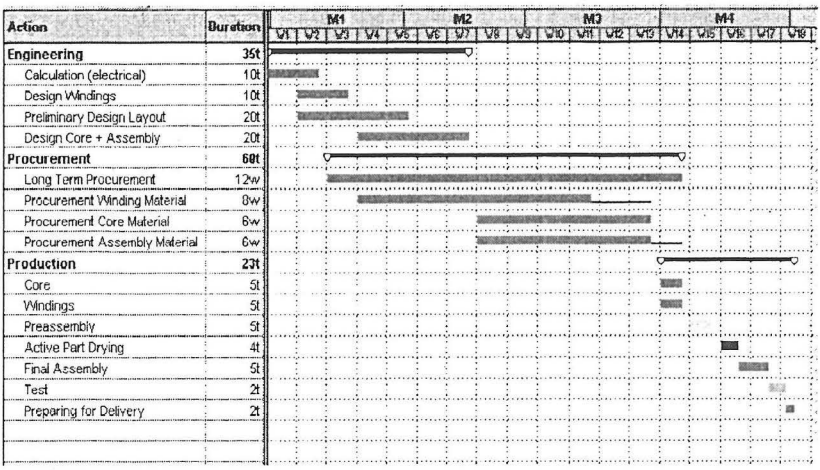

Bild 3: Beispiel für eine Fertigungsplanung eines Leistungstransformators

Fertigung

Die Fertigung von Neutransformatoren beginnt in der Regel mit dem gleichzeitigen Fertigen von Kernen und Wicklungen.

Generell wird für die Fertigung gefordert:

- Reduzierung des eingesetzten Kapitals
- Reduzierung der Overheads
- Reduzierung der Rüstzeiten (bei Fertigungseinrichtungen), z. B. durch Standardisierung
- Reduzierung der Fertigungszeiten

Kern

Obwohl viele verschiedene Blechsorten angeboten werden, beschränkt sich ein Hersteller aus Standardisierungsgründen auf den Einsatz weniger verschiedener Sorten (Dicken z. B. 0.23/0.27/0.30 mm). Kernbleche werden in Breiten von ca. 1000 mm gefertigt. Es ist üblich, daß Transformatorhersteller zugeschnittene Blechbreiten beziehen. Das sogenannte Längsteilen von Blechen entfällt damit beim Hersteller. Die benötigten Blechbreiten werden taggenau bezogen.

Grundlegend neue Blechsorten mit verbesserten Eigenschaften haben sich nicht durchgesetzt. Nach wie vor bestimmt die technisch realisierte Induktion von ca. 1.2 bis 1.8 Tesla die Eigenschaften des Transformatorkernes.
Mit nahezu jeder Blechqualität können die geforderten Leerlaufverluste und Leerlaufgeräusche realisiert werden.
Das Verbesserungspotential beim Hersteller besteht zur Zeit aus Varianten des Kernschittes (beim Querteilen, Varianten bei der Überlappung der Kernbleche) sowie aus Konstruktionsänderungen,

welche die großen, mehrere 10 bis einige 100 Tonnen schweren Kerne, besser handhabbar macht. Davon abhängig wird in Zukunft auch der Einsatz von automatischen Kernlegevorrichtungen sein.

Wicklungen

Die Verkürzung der Wickelzeiten gehört zu den wesentlichsten Merkmalen einer modernen Fertigung.

Dazu haben beigetragen:

- Neue Wickeltechniken in Kombination mit neuen Wickelmaschinen
- Vereinfachungen (nach Überprüfungen durch neue Berechnungsverfahren)
- Reduzierung der Isolationsmaterialen (Preßspan)
- Baukastensysteme beim Preßspan-Isolationsaufbau anstatt transformatorspezifische Isolationsanordnungen
- Vereinfachungen/Fremdbezug von Wicklungsausleitungen
- Umstrukturierung sämtlicher Fertigungseinrichtungen im Hinblick auf optimierte fabrikinterne Abläufe

Ähnlich wie bei Kernen ist das Verbesserungspotential mit den zur Zeit eingesetzten Materialien und Techniken weitestgehend ausgeschöpft. Weitere Automatisierungen erscheinen zur Zeit nicht sinnvoll.

Montage

Unter der Montage des Aktivteils versteht man:

- das Auffahren der Wicklungen auf den Kern
- das Einschachteln des Joches
- das Verschalten der Wicklungen (insbesondere der Anzapfungen der Oberspannungswicklungen)
- (das Montieren des Transformatordeckels)

Durch Anwendung einiger neuer, prozeßorientierter Fertigungseinrichtungen als auch durch Änderung von Prozeßabläufen (neue Verbindungstechniken, montagefreundliche Konstruktion, neue Techniken zur Verkürzung der Nachspannzeiten) wurde die Montagezeit des Transformators verkürzt.
Den wesentlichsten Beitrag lieferten Veränderungen beim Trocknen und Imprägnieren.

Trocknen/Imprägnieren

Die Physik bestimmt inzwischen die kürzeste Trocknungszeit, d. h. die technologischen Möglichkeiten zur Trocknung der Isolation sind weitesgehend ausgereizt.

Anforderungen an die Trocknung sind bei modernen Transformatoren einfacher. Gründe dafür sind:

- Die Trocknungszeit des Aktivteils wird wesentlich beeinflußt (d. h. verkürzt) durch die Vortrocknung der Wicklungen.
- Die Zeit zwischen Vortrocknung der Wickungen und der Hauptrocknung ist dramatisch gesunken.

- Der Papieranteil im Transformator ist stark gesunken (keine Aktivteile mit sog. Weichpapieraufbau)
- Es wird in der Regel nur einheitlich dickes (besser „dünnes") Preßspan eingesetzt.

Gleichzeitig ist eine Qualitätssicherung durch Messung des Trockungsgrades möglich geworden. Dadurch konnte die zeitintensive Feinvakuumphase verkürzt werden.

Anforderungen an Imprägnierung und Standzeit sind ebenfalls gesunken.
Aktivteile werden nach dem Trocknen und Nachspannen der Wicklungen in kürzest möglicher Zeit eingebaut. Die Aktivteiltemperatur sinkt dabei nur unwesentlich ab. Die Feuchtigkeitsaufnahme ist vernachlässigbar. Durch diese Prozeßbeschleunigung kann die Vakuumphase nach Aktivteileinbau von einigen Tagen auf einige Stunden verkürzt werden. Durch den geringeren Isolationsanteil im Aktivteil kann ebenfalls eine geringere Imprägnierungszeit realisiert werden.

Während die Prozesse Aktivteiltrocknung, Nachspannen, Vakuum nach Aktivteileinbau, Ölfüllung und Imprägn ierung an Mittelleistungstransformatoren früher ca. zwei bis drei Wochen beanspruchten werden heute für diese Prozesse 3 bis 5 Tage eingeplant.

Prüfung

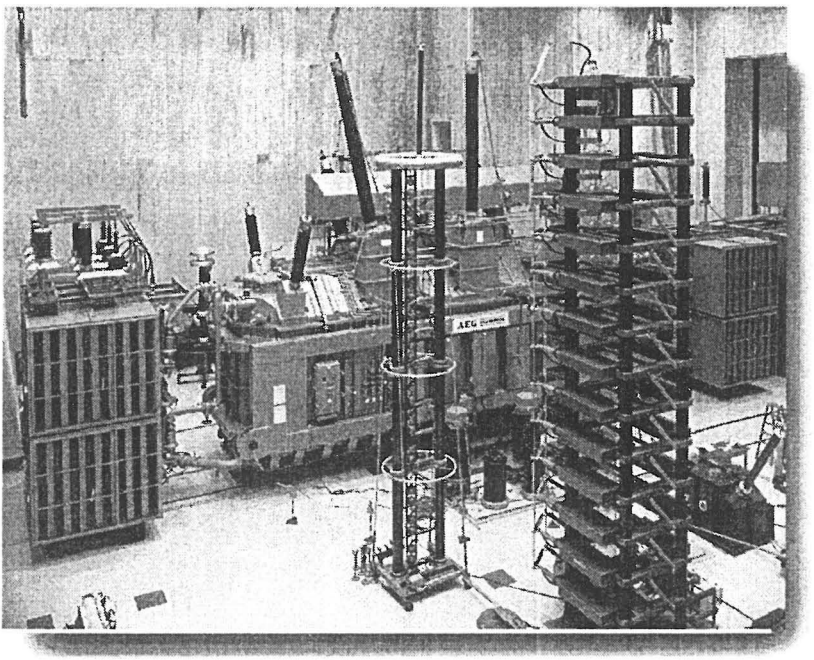

Bild 4: Elektrische Endprüfung eines Leistungstransformators

Bedeutung:

Die elektrische Endprüfung ist nach wie vor die einzige Möglichkeit, die Auslegung zu überprüfen und die Fertigung zu überwachen.

Anforderungen an das Prüffeld / die Prüfeinrichtungen:

- Ein produktionsorientiertes Prüffeld ist hinsichlich seiner personellen und technischen Kapazität ausgelastet, wenn die einzelnen Fertigungskapazitäten ausgelastet sind.
- Entwicklungsmessungen (Reihenuntersuchungen an neuen Materialien, Prüfen von Isolationsanordnungen) werden häufig in externen Laboratorien durchgeführt (Zusammenarbeit mit Hochschulen).
- Meßsysteme werden komplett angeschafft, nicht selbst entwickelt. Sie werden in der Regel unmittelbar eingesetzt.
- Prüfmittelüberwachung ist von großer Bedeutung, allerdings ist eine Akkreditierung für produktionsorientierte Prüffelder nicht sinnvoll.
- Die vorbeugende Wartung und Instandhaltung der Prüftransformatoren und –generatoren ist von größter Bedeutung. Nur dadurch ist die Verfügbarkeit der Prüffeldkapazitäten sichergestellt.
- Bei der Prüffeldbelegung werden keine Stillstandszeiten für Wartung und Instandhaltung eingeplant.
- Eine Automatisierung bei der Prüfung von Leistungstransformatoren ist nicht absehbar.

Sogenannte „kleine Messungen" dürfen das Prüffeld nicht mehr blockieren. Zu den „kleinen Messungen" gehören:

- Übersetzungsmessungen
- Widerstandsmessungen
- Messung von Isolationswiderständen
- Überprüfung der Ausrüstung (Schutz und Überwachung)
- Mechanische Überprüfung.

Solche Messungen werden möglichst bereits während der Endmontage durchgeführt.

Nach wie vor werden folgende Stückprüfungen im Prüffeld durchgeführt:

- Kurzschlußmessungen
- Leerlaufmessungen
- Geräuschmessungen (im Leerlauf und im Kurzschluß)
- Stoßspannungsprüfungen
- Fremdspannungsprüfungen
- induzierte Spannungsprüfungen (einschließlich Teilentladungsmessungen)

Typprüfung im Sinne der geltenden Vorschriften ist praktisch nur noch die Erwärmungsmessung.

Folgende Tendenzen zeichnen sich ab:

- Die Dauer der elektrischen Endprüfungen hat sich stark verkürzt. Werksmessungen dienen häufig nur noch dazu, die Funktion der Prüfkreise (z. B. hinsichlich der induktiven oder kapazitiven Kompensation des Prüflings) auszutesten.
- Es werden vermehrt Transformatoren mit Kabelanschluß gefragt, dadurch steigt der Prüfaufwand, ferner sind Prüffelder gezwungen, umfangreiche Ausrüstung vorzuhalten (Kabelanschlußarmaturen, Dome, Prüfdurchführungen).
- Bei Prüfschäden ist die eindeutige und schnellst mögliche Lokalisation der Fehlerstelle wichtig.

3. Ausblick

Bei den zur Verfügung stehenden Materialien (Kernbleche, Wickelkupfer, Isolation auf Zellulosebasis, Mineralöl) sind vorerst keine wesentlichen Weiterentwicklungen zu erwarten:

Der Hersteller von Leistungstransformatoren wird weiterhin versuchen,

- Leerlauf- und Lastverluste
- das Geräuschverhalten
- die Kühlung

zu optimieren.

Hinsichtlich der Fertigung wurde durch Einsatz moderner Einrichtungen die Durchlaufzeit (Auftragseingang – Aufstellung auf dem Fundament) dramatisch verkürzt. Dies war möglich dadurch, daß bei der Auslegung die optimale Machbarkeit in den Vordergrund gestellt wurde unter der Vorausetzung einer uneingeschränkten Sicherheit gegenüber den Beanspruchungen bei den elektrischen Endprüfungen – und Messungen.

Verkürzungen der Durchlaufzeit in der Berechnung und Konstruktion können noch geschaffen werden durch Standardisierung der Transformatoren (kundenseitig) und Standardisierung von Baugruppen (seitens des Herstellers).
Verkürzungen in der Beschaffung von Baugruppen (Kessel, Wickelkupfer, Durchführungen, Kernbleche, Stufenschalter) hängen vom Lieferanten ab.
Wesentliche Verkürzungen bei der Durchlaufzeit in der eigentlichen Fertigung sind in Zukunft nicht mehr zu erwarten.

Demgegenüber werden nun Entwicklungen seitens der Hersteller durchgeführt, um vor Ort Reparaturen und andere Maßnahmen durchzuführen, welche bisher als unmöglich galten.
Dabei wird das Abwägen von erhöhtem technischen Risiko und den Kosten im Vordergrund stehen.

Gründe/Motivationen dafür sind:

Der überwiegende Teil der Serviceaktivitäten (Zustandsbeurteilung von alten Transformatoren, Diagnosen, Reparaturen nach Ausfall des Transformators) können ausschließlich von kompetenten Transformatorherstellern durchgeführt werden.

Die Auslastung der Fabriken der Hersteller fordert für das außerplanmäßige Einschieben von Reparaturen (Störungen der Prozesse, Schieflast) größeren Aufwand.

Bei den Vor-Ort-Aktivtitäten steht zur Zeit eher die technische Machbarkeit im Vordergrund. Kosten und Zeit spielen eine untergeordnete Rolle, da sie in der Regel unter denen einer Werksreparatur liegen (Grund: die enorm hohen Aufwendungen für Demontage und Transport).

Es ist davon auszugehen, das in Zukunft umfangreiche Revisons- und Reparaturarbeiten wie:

- Wicklungsreparatur/Tausch
- Stufenschalterrevisionen (Wähler/Wender)
- Aktivteiltrocknung

vor Ort kein technisches Problem mehr darstellen.