Austausch oder Instandhaltung von Transformatoren nach 30jährigem Betrieb ?

G. Schemel, ABB Genève

1. Einleitung :

Das Thema « Austausch oder Instandhaltung alter Transformatoren » ist heute - im Zeitalter der Liberalisierung der Energiemärkte - mehr denn je aktuell. Es existieren darüber zahlreiche Publikationen ; auch anlässlich des letzten SC12 CIGRE-Colloquiums in Dublin (Juni 2001) wurde dieser Punkt unter dem Titel « Economics of Transformer Management » ausführlich behandelt. Lit [2]... [9]

Der Vortrag ist keine Zusammenfassung all dieser vorliegenden Berichte und Theorien, sondern möchte einige Punkte hervorheben bzw. ergänzen. Beispielsweise den wesentliche Einfluss des Energiepreises auf die Entscheidung « Austausch oder Instandhaltung », oder auch die Problematik des erhöhten Ausfallrisikos beim Weiterbetrieb alter Einheiten.

Alle Überlegungen beziehen sich übrigens auf die Problematik Austausch oder Weiterbetrieb vor einem allfälligen Fehler des alten Transformators. Wenn der alte Transformator bereits ausgefallen ist gelten etwas andere Überlegungen, insbesonders muss die Zeitspanne bis ein Ersatztransformator zur Stelle ist (Reparatur oder Neutransformator) berücksichtigt werden.

2. Problematik : Austausch oder Weiterbetrieb von alten Transformatoren die älter als 30 Jahre sind ?

2.1 Vorteile und Nachteile

Den Vorteilen eines Austausches, wie :

- geringere Transformatorverluste, dadurch tiefere Betriebskosten (Verlustkosten)
- höhere Betriebsicherheit durch geringeres Ausfallrisiko
- ökologische Vorteile (z.B. tieferer Geräuschpegel)

steht der Nachteil eines

- wesentlich höheren Finanzeinsatzes

gegenüber, da die Beschaffung eines Neutransformators normalerweise um einiges teurer ist, als eine Revision bzw. Instandhaltung oder ein Refurbishment bei Weiterbetrieb.

2.2 Gewähltes Kriterium für einen Austausch bzw. den Weiterbetrieb : Jahresbetriebskosten

Ein Austausch ist nur dann wirtschaftlich, wenn - unter Berücksichtigung aller Parameter (und hier gehört beispielsweise das Ausfallsrisiko beim Weiterbetrieb einer alten Einheit dazu) – die Jahresbetriebskosten bei der Anschaffung eines Neutransformators tiefer , oder gleich hoch , liegen, als bei Weiterbetrieb des alten Transformators.

Für eine vereinfachte Jahreskosten-Abschätzung müssen demnach die oben erwähnten Vorteile bzw. Nachteile eines Austausches oder eines Weiterbetriebes zahlenmässig erfassbar sein.

Definition : (vereinfachte) Jahresbetriebskosten :

Jahresbetriebskosten = Verlustkosten + Kapitalkosten + Risikokosten bei Ausfall

2.2.1 Einflussfaktor 1 : Tranformatorverluste

Transformatorverluste heute und von damals :

Eisenverluste :

In den letzten Jahrzehnten konnten die Eisenverluste massiv abgesenkt werden. Als Beispiel soll dies an einem 400 kVA-Verteiltransformator 16'000 V / 400V («Normtransformator») gezeigt werden (Tabelle 1):

Tabelle 1 : Entwicklung der Eisenverluste seit 1950 bis heute

1950	1350 W
1960	1000 W
1970	750 W
1980	600 W
1990	550 W
2000	445 W

(Quelle: Archiv Rauscher & Stoecklin / TRAFOSUISSE

Wie kam es zu diesen enormen Verbesserungen?

Die Verbesserungen wurden einerseits auf metallurgischem Gebiet (Absenkung der Hysteresis-Verluste) erzielt: dazu gehört die Einführung von kaltgewalzten,

kornorientierten Magnetblechen (ca 1955), die Oberflächen -Laser- bzw. Plasmabehandlung der Bleche (1985), sowie die Verwendung der Step-lap Schichtung an den Schnittstellen Säule/Joch (1989).
Andererseits konnte auch der Wirbelstromverlust-Anteil der Eisenverluste abgesenkt werden und zwar durch Reduktion der Blechdicke von 0.35 - 0.3 mm, schrittweise auf 0.27 mm (1968) und später sogar auf 0.23 mm (1989), wodurch allerdings die Produktionszeit pro Kern anstieg.
Durch all diese Massnahmen sind die Eisenverluste eines modernen Verteiltransformators nur etwa ein Drittel der Werte eines Transformators aus dem Jahre 1950.

Analoges gilt auch für Leistungstransformatoren ; beispielsweise hatte ein 25 MVA Reguliertransformator 60/16 kV in den Jahren zwischen 1955 -1960 noch 30 - 40 kW Eisenverluste, heute liegt dieser Wert – zumindestens in der Schweiz - bei etwa 11 – 15 kW.

Lastverluste (Kupferverluste):

Ähnliches, allerdings begreiflicherweise nicht ganz so spektakulär, geschah auch mit den Lastverlusten (Kupferverlusten)

Die Verbesserungen auf diesem Gebiet basieren auf bessere Füllfaktoren in den Wicklungen (Lackdraht statt papierisolierter Leiter, ca 1960), aber besonders auch auf die Auslegung mit tieferen Stromdichten, infolge ständig steigender Kapitalisationswerte.

Aus diesen Gründen sind die Lastverluste eines Verteiltransformators von heute beinahe nur etwa halb so hoch, wie jene aus dem Jahre 1950.

Nachstehend die analogen Werte für Leistungstransformatoren 25 MVA mit Lastregulierung 60/16 kV :

1970 : ca 125 - 135 kW
2000 : ca 80 - 100 kW

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass moderne Transformatoren etwa 35 - 40 Prozent tiefere Totalverluste aufweisen, als ihre « Vorfahren » 30 bis 40 Jahre vorher :

Beispiel :
Leistungstranformator : 25 MVA : 60/16 kV
1970 : 25 kW + 125 kW = 150 kW (100%)
2000 : 11 kW + 80 kW = 91kW (61%)

Verteiltransformator : 400 kVA : 16 /0.42 kV
1970 : 0.75 kW + 5.0 kW = 5.75 kW (100%)
2000 : 0.445 kW + 3.27 kW = 3.715 kW (64%)

2.2.2 Einflussfaktor 2 : Betriebs-Verlustkosten

Die (jährlichen) Betriebs-Verlustkosten sind das Produkt von den Jahresverlusten [kWh] mal dem Energiepreis [CHF/kWh] oder [€/kWh]

Es ist auffällig, dass fast alle Autoren, die dieses Thema behandeln, bei der Abschätzung der Betriebsverlustkosten sehr tiefer Energiepreise einsetzen . Dies erscheint problematisch, da zwar heute infolge der Deregulierung in vielen Ländern sehr tiefe Energiepreise herrschen ; aber wie lange noch ?

Es ist natürlich schwierig über die zukünftige Energiepreis-Entwicklung in Europa Voraussagen zu machen ; die Fachleute erwarten aber nach kurzer Zeit, (in der der Preis eventuell noch schwach sinkt), ab 2005 einen merkbaren Anstieg der Strompreise, und zwar für alle Kategorien : Hochspannung, Mittelspannung und Niederspannung. Siehe Figur 1. Lit. [1]

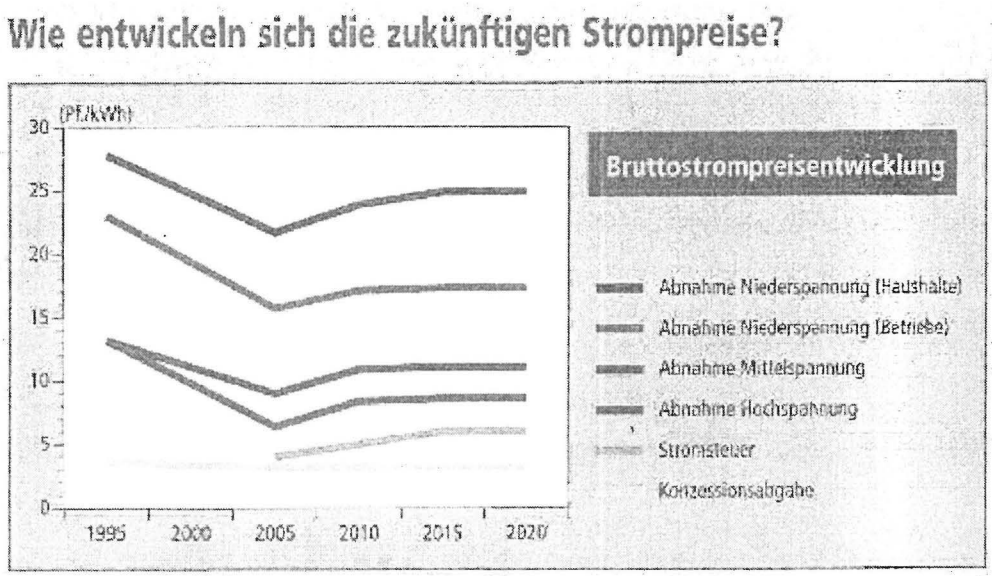


Fig 1 : Voraussage für eine Strompreisentwicklung in Deutschland gemäss Lit [1]

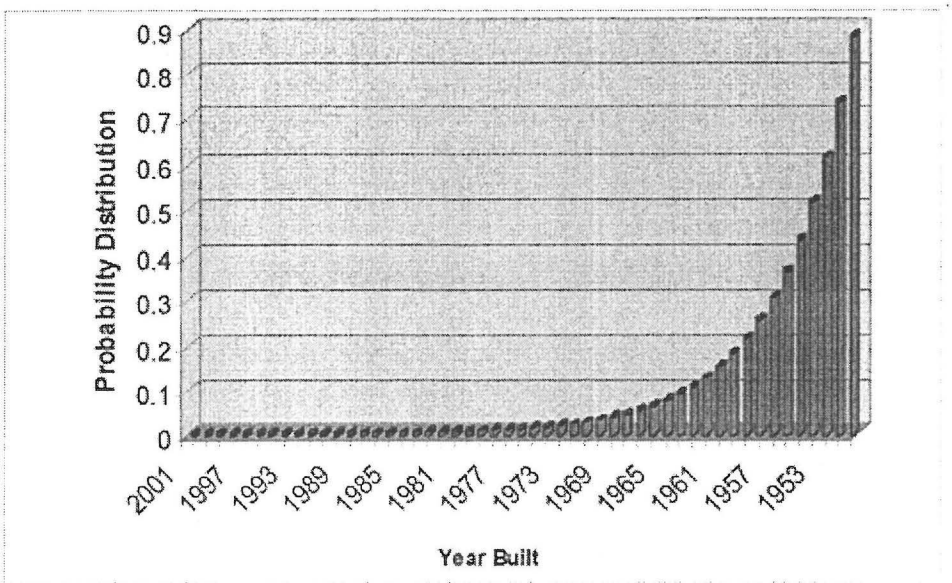
Hier ist bei Jahreskosten-Berechnungen, die ja mittelfristig Gültigkeit haben sollten, höchste Aufmerksamkeit nötig : wird nämlich fälschlich ein zu tiefer Energiepreis eingesetzt, wird ein Weiterbetrieb des alten Transformators favorisiert , wiewohl dieser tatsächlich unwirtschaftlich wäre. Umgekehrt führt ein in der Rechnung irrtümlich zu hoch angenommener Energiepreis, zu einem unwirtschaftlichen Austausch.....

Dies ist gut aus dem Beispiel in Abschnitt 3 ersichtlich, in welchem die totalen Jahresbetriebskosten eines 52 MVA Maschinentransformator bei Weiterbetrieb (plus Revision) einer Neuanschaffung gegenübergestellt sind und zwar in Abhängigkeit des Energiepreises mit den Revisionkosten (in Prozent des Neuanschaffungspreises) als Parameter. (Fig. 5)

2.2.3 Einflussfaktor 3 : Betriebsicherheit

Es wird allgemein angenommen, dass die Ausfalls-Fehlerrate zunächst etwa 25 Jahre (gemäss Lit [2] und Lit [9]) konstant bleibt, gemäss Lit [3] sogar 35 - 40 Jahre, und danach rasant ansteigt.

Fig. 2 : Beispiel für die Fehlerrate in Abhängigkeit der Zeit gemäss Lit [9]

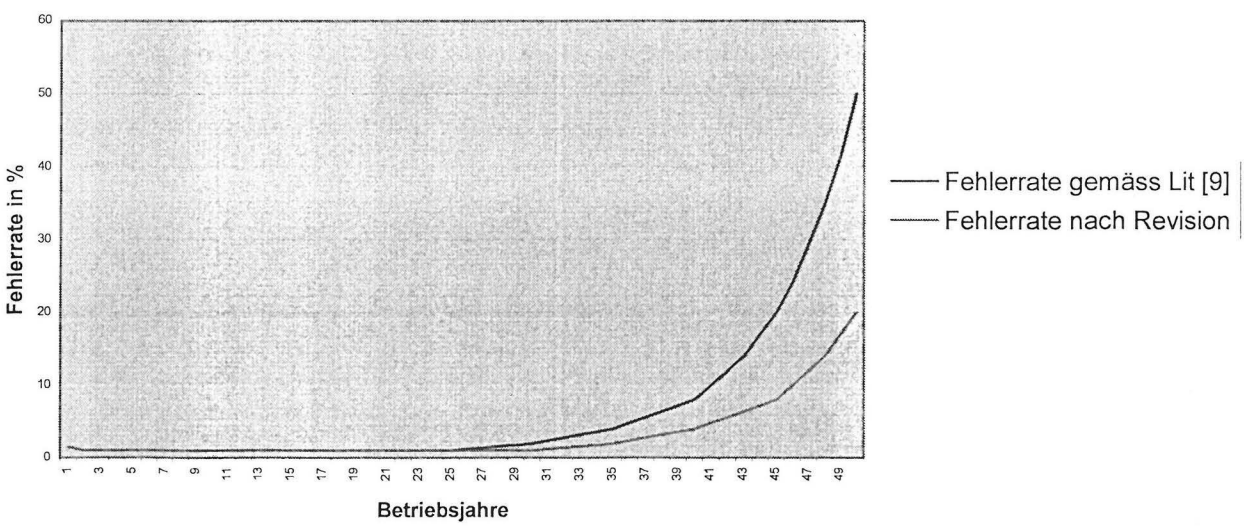


Für das nachfolgende Beispiel wurde im Prinzip mit dieser Fehlerrate gerechnet, jedoch wurde die Kurve willkürlich um 5 Jahre nach rechts (Richtung längerer Lebensdauer) verschoben, um der Verbesserung des Transformators (Lebensdauerverlängerung) infolge der Revision Rechnung zu tragen ; siehe Fig. 3.

Fig. 3 : Fehlerrate in Funktion der Zeit

Kurve blau (oben): Fehlerrate <u>ohne</u> Revision gemäss Lit [9]
Kurve rot (unten): Fehlerrate <u>nach</u> Revision/Instandhaltung (« Verschiebung » um ca 5 Jahre nach rechts)

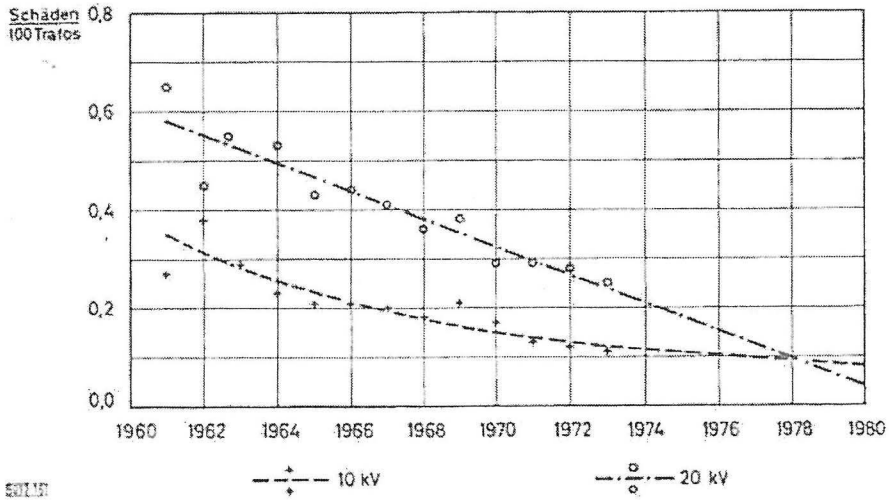
Fehlerrate in Abhängigkeit der Betriebsjahre



Im Beispiel wurden sowohl die statistischen Kosten für einen 2-tägigen Betriebsausfall (ein Reservetransformator wurde als vorhanden angenommen), als auch für eine Reparatur in der Höhe von 1/3 des Neupreises in Rechnung gestellt.

Für die Fehlerrate von Verteiltransformatoren gibt es übrigens eine zuverlässige deutsche Statisitik , die immerhin auf etwa 160'000 Verteiltransformatoren beruht, aber schon fast 25 Jahre alt ist ; aus dieser geht klar hervor, dass die Fehlerrate bereits vom Moment der Inbetriebsetzung an, stetig ansteigt ; sie liegt für Transformatoren mit 20 kV Nennspannung nach 10 Jahren bei 0.4%, nach 20 Jahren bereits bei 0.7%. Siehe Lit [10]

Fig. 4 : Fehlerrate in Abhängigkeit der Zeit bei Verteiltransformatoren gemäss Lit [10]



Für Leistungstransformatoren könnte dies ähnlich sein ; jedoch liegen hier keine Statisitiken vor, die dies belegen, ev. auch aufgrund zuwenig erfasster Einheiten.

2.2.4 Einflussfaktor 4 : Ökologische Aspekte

Hier geht es insbesonders über Geräusch-Emissionen :

In den Nachkriegsjahren war das Geräusch eines Transformators absolut kein Thema. Dies veränderte sich erst mit dem erhöhtem Umweltbewusstsein der Gesellschaft zu Beginn der Siebziger-Jahre. Dies veranlasste auch die Hersteller von Transformatoren entsprechende Massnahmen zu ergreifen, um den Geräuschpegel ihrer Produkte zu reduzieren.

Tabelle 2 zeigt die Entwicklung auf diesem Gebiet.

Tabelle 2 : Beispiel: Durchschnitts-Messwerte (Schalldruckpegel) eines 400 kVA Verteil-Transformators in 30 cm Abstand

1960	58 dB
1970	50 dB
1980	46 dB
1990	43 dB
2000	38 dB

Quelle: Archiv Rauscher & Stoecklin/TRAFOSUISSE

Ähnliches gilt auch bei Leistungstransformatoren, hier liegt die Pegelabsenkung in derselben Grössenordung (15 – 20 dB). Dies ist nicht nur auch technologische Verbesserungen zurückzuführen, sondern auch auf die Tatsache, dass seit den 80er Jahren in den meisten Ländern staatliche Geräuschschutz-Verordnungen existieren (in der Schweiz seit 1986), die die zulässigen Grenzwerte festlegen.

Es kann daher passieren, dass Transformatoren ausgetauscht oder sogar komplett ersetzt werden müssen, weil sie den gesetzlichen Vorschriften nicht mehr entsprechen.

Für Verteiltransformatoren gibt es sogar Kriterien, wie man höhere Geräuschpegel « kapitalisiert », siehe Lit [11]

Für den höheren Geräuschpegel eines alten Transformators werden korrekterweise die Kosten in Rechnung gestellt werden, die für eine Geräuschdämmung aufgewendet werden müssen, um z.B. in bewohnten Gebieten, die heute geltenden gesetzlichen Vorschriften einzuhalten.
Dafür wird üblicherweise ein Wert von etwa 3% bis 4% des Transformatorpreises pro dB eingesetzt.

Im Beispiel in Abschnitt 3 wurde der höhere Geräuschpegel des alten Transformators aber nicht bewertet.

2.2.5 Einflussfaktor 5 : Finanzeinsatz (Kapitalkosten)

2.2.5.1 Allgemeines

Abgesehen von den eigentlichen Kosten für eine Neuanschaffung bzw. für eine Revision bzw. ein Refurbishment, wobei die Transportkosten und eventuelle Entsorgungskosten nicht vergessen werden sollten, spielen die Abschreibungsdauer für eine Neuanschaffung bzw. für eine Revision, sowie der Zinsfuss eine wichtige Rolle.

Für das Beispiel wurde jeweils mit einem Zinsfuss von 5 % gerechnet, bei einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren für die Neuanschaffung und von 15 Jahren für die Revisionskosten.

2.2.5.2 Neutransformator

Die Transformatorpreise sind - sowohl für Leistungstransformatoren als auch für Verteiltransformatoren - heute total « im Keller », siehe auch Lit.[4], dies hat nicht nur mit der Öffnung der Märkte zu tun, sondern auch mit einer weltweiten Überkapazität auf diesem Gebiet. Es ist übrigens kaum anzunehmen, dass sich die Transformator-Preise in nächster Zeit ändern werden. Für eine Jahrekostenberechnung (Wirtschaftlichkeitsberechnung) empfielt es sich einen möglichst aktuellen Preis einzusetzen.

2.2.5.3 Revisionskosten / Instandhaltungskosten

Diese hängen ganz wesentlich vom Zustand des Transformators ab, wobei nicht zu vergessen ist, dass auch die Diagnose, die immer einer Revision zur Instandsetzung vorangehen sollte, seine Kosten hat ; z.B. Gas-in-Oel-Analyse (DGA), Furananalyse (HPLC Analytik) , FRA (Transferfunktion), Polarisationseffekte (RVM/PDC), TE Messung etc.
Für strategisch wichtige Transformatoren ist eine kontinuierliche Überwachung (On-line Monitoring) von Vorteil . Die Kosten pro Transformator liegen bei einer kompletten Überwachung (Ströme, Temperaturen, Gasgehalt, Feuchtigkeit) in der Grössenordung von CHF 100'000.-, eine "Sparausführung" ist schon ab 25'000.- CHF erhältlich. Bei der Überwachung mehrerer Transformatoren in einer Station verringert sich dieser Preis.
In der Schweiz werden derzeit 25 Transformatoren auf diese Weise überwacht , wobei alle Daten via Modem auch ABB Sécheron übermittelt werden.

Für das Beispiel wurde die Berechnung für verschieden hohe Revisionskosten und Diagnosekosten gemacht und zwar als Prozentsatz vom Neuanschaffungspreis (12.5%, 25% und 50%) .

3. Beispiel einer vereinfachten Jahreskosten-Rechnung für einen Maschinen-Transformator 52 MVA, 220/15 kV

Folgende Parameter wurden berücksichtigt.

- Verluste (bestehender Transformaror, Neutransformator) und die daraus entstehenden Verlustkosten bei verschiedenen Strompreisen in CHF/kWh
- Kosten der Neuanschaffung (abhängig vom Strompreis bzw. Kapitalisierung)
- Kosten der Revision/Instandhaltung (12.5 / 25 / 50 % vom Neupreis)
- Ausfallsrisiko bei Weiterbetrieb des alten Transformators

Zusätzliche Annahmen :

Abschreibungsdauer Neutransformator :	20 Jahre
Abschreibungsdauer Revision :	15 Jahre
Zinsfuss :	5 %
Mittlere Jahresbelastung des Transformators :	45 %
Jährliche Betriebsstunden :	8760 h

Weitere Angaben im Anhang

Das Ergebnis dieser vereinfachten Jahreskostenrechnung für einen Neutransformator bzw. für den Weiterbetrieb des alten Transformators für sein 31. bis 45. Betriebsjahr (unter Berücksichtigung der erhöhten Ausfallrate gemäss Fig 3.) ist aus Fig. 5 ersichtlich

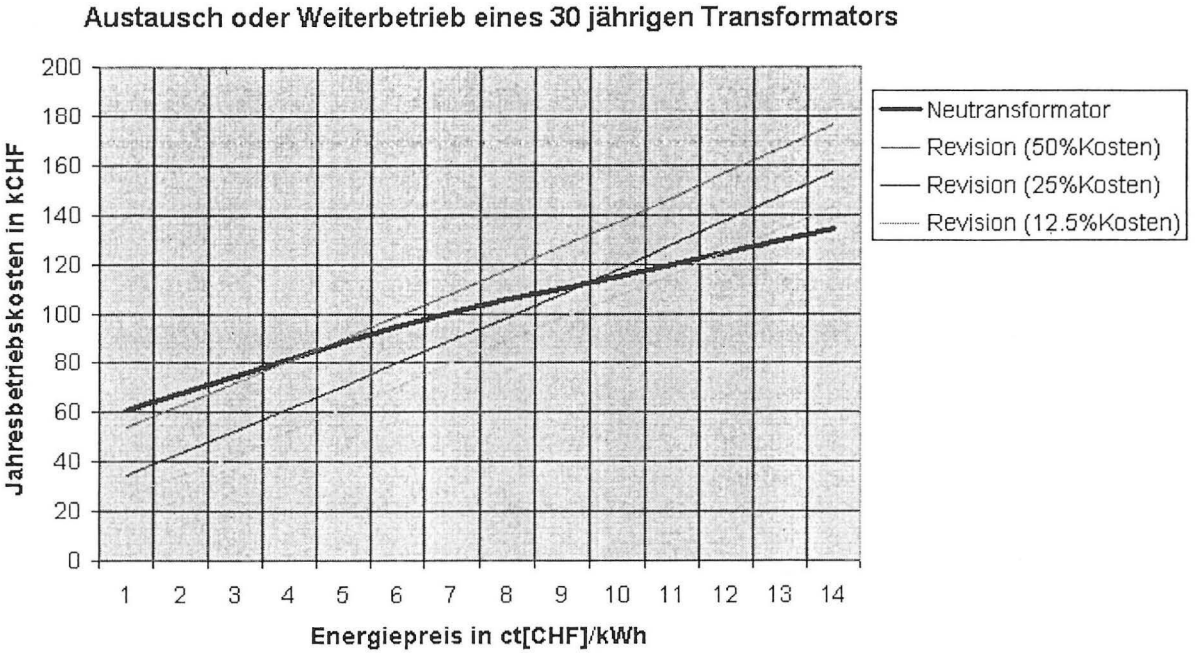


Fig. 5 Jahreskosten für einen Neutransformator bzw. eine Revision in Abhängigkeit des Energiepreises für eine 52 MVA Maschinentransformator

Das Bild zeigt deutlich, dass erst bei einem Energiepreis grösser etwa 0.05 CHF/kWh entsprechend etwa 0.035 €/kWh und bei relativen hohen Revisionskosten (50% der Neukosten) ein Austausch wirtschaftlicher wäre. Bei tiefen Revisionskosten ist ein Austausch erst bei einem Energiepreis von etwa 0.12 CHF/kWh (entsprechend 0.08 €/kWh) wirtschaftlich.

Bitte zu beachten, dass Fig. 5 nicht allgemein gültig ist. Es handelt sich um ein Beispiel für einen Mittel-Leistungstranformator und soll nur Zusammenhänge verdeutlichen.

4. Zusammenfassung:

Auf die Frage, ob für die Betreiber 30-jähriger Leistungstransformatoren ein Austausch oder eine Instandhaltung vorteilhafter ist, kann keine allgemeine gültige Antwort gegeben werden ; jeder Fall muss einzeln, unter Berücksichtigung der speziellen Rahmenbedingungen, untersucht werden. (siehe Beispiel im Anhang)

Man kann aber davon ausgehen, dass bei Leistungstransformatoren in den meisten Fällen ein Weiterbetrieb (nach Revision zur Instandhaltung) wirtschaftlicher ist. Bei Verteiltransformatoren hingegen ist - infolge des höheren Energiepreises auf der Mittelspannungsebene – fast immer ein Austausch ökonomischer.

Anhang : Berechnung der Jahres-Betriebskosten bei einem Energiepreis von 0.046 CHF/kWh

Neutransformator : 52 MVA, P_{Fe} = 35 kW, P_{Cu} = 140 kW, Belastung 45%, 8760 Jahresbetriebstunden, Anschaffungspreis : 800'000 CHF
Energiepreis : 0.046 CHF/kWh
Abschreibungsdauer N = 20 Jahre, Zinsfuss z = 5 %, woraus sich ein Annuitätenfaktor K von 12.5 ergibt
$K=(\alpha^N - 1)/ [\alpha^N(\alpha - 1)]$ und $\alpha = 1 + (z/100) = 1.05$

Ursprünglicher Transformator (etwa 30 Jahre alt)
52 MVA, P_{Fe} = 60 kW, P_{Cu} = 190 kW, Belastung 45%, 8760 Jahresbetriebstunden, Buchwert 1.- CHF (ganz abgeschrieben)
Energiepreis : 0.046 CHF/kWh
Revisionskosten
a) 12.5% des Neuwertes : 800'000x0.125 = 100'000CHF
b) 25 % des Neuwertes : 800'000x0.25 = 200'000 CHF
c) 50 % des Neuwertes : 800'000x 0.50 = 400'000 CHF
Abschreibungsdauer N = 15 Jahre, Zinsfuss z = 5 %, woraus sich ein Annuitätenfaktor K von 10.4 ergibt
$K=(\alpha^N - 1)/ [\alpha^N(\alpha - 1)]$ und $\alpha = 1 + (z/100) = 1.05$

a) Neutransformator :

Verlustkosten Eisenverluste : 8760x35x0.046 =	14'103 CHF
Verlustkosten Kupferverluste : $8760x0.45^2$ x140x0.046=	11'424 CHF
Totale Verlustkosten :	25'527 CHF
Kapitalkosten : 800'000 / 12.5 =	64'000 CHF
Totale Jahresbetriebskosten Neutransformator :	**89'527 CHF**

b) Revision und Weiterbetrieb :

Verlustkosten Eisenverluste : 8760x60x0.046 =	24'278 CHF
Verlustkosten Kupferverluste : $8760x0.45^2$ x190x0.046=	15'503 CHF
Totale Verlustkosten :	39'781 CHF
Kapitalkosten a): 100'000 / 10.4 =	9'615 CHF
Totalkosten mit Revisionskosten a)	49'396 CHF
Statistische Risikokosten :	
Folgeschaden : Betriebsausfall 2 Tage*, mittlere Ausfallswahrscheinlichkeit 4 % (Fig. 3) :	
52'000x0.45x2x24x0.046 x0.04=	2'067 CHF
Reparatur 30% vom Neupreis : (800'000/3) x 0.04 =	10'667 CHF
Totale Jahresbetriebskosten, Weiterbetrieb nach Revision Kosten a)	**62'130 CHF**
Totale Jahrebetriebskosten, Weiterbetrieb nach Revision Kosten b) (analog gerechnet)	**71'745 CHF**
Totale Jahrebetriebskosten, Weiterbetrieb nach Revision Kosten c) (analog gerechnet)	**90'977 CHF**

* Reservetransformator vorhanden, der in 48 Stunden einsatzbereit ist

Literatur:

Lit [1] Wie entwickeln sich die zukünftigen Strompreise? Bulletin SEV/VSE 10/01

Lit [2] C. Bengtsson, J-O. Persson, M. Svenson: Replacement- and Refurbishment Strategies for Transformer Populations, CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [3] T.S. Molinski : Minimizing the Life Cycle Costs of Power Transformers CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [4] L.Bergonzi, O.Monzani: Economical Evcaluartion of the Option Repair / Refurbishment versus Purchase of new Transformers. A few Cases in Italy. CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [5] K.Ryen, L.E.Lundgaard, O. Rogne, P.E.Lund: A novel Methode for Assessing the Economic Risk in Managing Power Transformers in Norway. CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [6] F.Olivier: Selected Strategy for the Maintenance of Electricité de Franc's Hydro Generation „Assets" in the Field of Transformers, CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [7] M. Thaden: Economics of Transformer Management; Observations of Trends Influencing USA Utilities, CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [8] P. Austin: Transformer Economic Issues in Australia & New Zealand, CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [9] P.Boman: Wanted: Transformer, Reliable Actor for Production with Cast of Thousands, CIGRE 2001 Colloquium Dublin SC 12.20

Lit [10] F.Ruter: Verfahren und Erfahrungen bei der Betriebsüberwachung von Verteilungstransformatoren, etz-a Bd 98 (1978) H. 3, Seite 237

Lit [11] E.Borer: Ersatz von Transformator- „Veteranen" macht sich bezahlt, Bulletin SEV/VSE 4/99