

Unwirtschaftliche hohe Verlustkosten bei alten Verteiltransformatoren : Ersatz von Transformatoren-"Veteranen" macht sich bezahlt

Autor(en): **Borer, Edi**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **90 (1999)**

Heft 4

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-901918>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Unwirtschaftliche hohe Verlustkosten bei alten Verteiltransformatoren: Ersatz von Transformatoren-«Veteranen» macht sich bezahlt

In den letzten Jahrzehnten profitierten die Betreiber von Verteiltransformatoren – dank laufender Optimierungsanstrengungen durch die Transformatorenhersteller – von einem verbesserten Preis-Leistungs-Verhältnis: Einerseits konnten die Transformatorverluste spektakulär abgesenkt werden, andererseits liegt aber auch der kapitalisierte Preis heute nominal etwa 20% tiefer als noch vor etwa 40 Jahren. Der Betrieb 30- bis 40jähriger Verteiltransformatoren – wie dies in der Schweiz heute vielfach noch üblich ist, wie eine Umfrage von Trafosuisse bei den Betreibern ergeben hat – ist demnach in den allermeisten Fällen unökonomisch. Wie aber wird die Wirtschaftlichkeit alter Transformatoren bewertet?

■ Edi Borer

Ständig weiter ausgefeilt

Transformatoren sind seit über einem Jahrhundert im Gebrauch. Sie werden – zumindest wie es heute aussieht – sicher noch einige Zeit ein wichtiger Baustein der elektrischen Energieübertragung und -verteilung bleiben.

Transformatoren hatten immer schon einen hohen Wirkungsgrad (beispielsweise bereits im Jahre 1932 rund 98%), so dass eigentlich angenommen werden könnte, in diesem Bereich wären praktisch keine Verbesserungen mehr möglich. Trotzdem ist der Transformator in den letzten Jahrzehnten ständig weiter ausgefeilt und optimiert worden, wie im nachfolgenden Artikel beschrieben wird. Dabei wird besonders die Zeitspanne der letzten 30 bis 40 Jahre betrachtet, da Transformatoren aus diesem Zeitab-

schnitt derzeit noch sehr oft im Einsatz stehen, wie eine Marktuntersuchung von Trafosuisse im Jahre 1997 deutlich aufgezeigt hat. Ist aber der Betrieb solcher «Veteranen» heute sowohl ökonomisch als auch ökologisch noch zu vertreten?

Markante technische Verbesserungen in der Verlustminimierung

Um zwei Drittel tiefere Leerlaufverluste (Eisenverluste)

Im betrachteten Zeitraum konnten die Eisenverluste massiv abgesenkt werden. Als Beispiel soll dies an einem 400-kVA-Verteiltransformator 16 000 V/400 V («Normtransformator») gezeigt werden (Bild 1, Tabelle I):

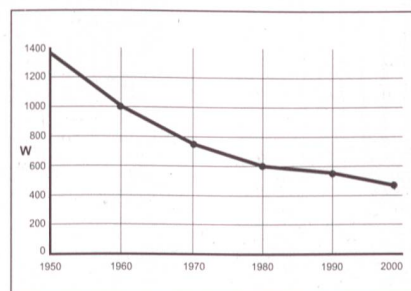


Bild 1 Leerlaufverluste Normtransformator 400 kVA 16/0,4 kV.

1950	1350 W
1960	1000 W
1970	750 W
1980	600 W
1990	550 W
1998	450 W

Tabelle I Entwicklung der Leerlaufverluste (Quelle: Archiv Rauscher & Stoecklin AG).

Wie kam es zu diesen enormen Verbesserungen? Sie wurden einerseits auf metallurgischem Gebiet (Absenkung der Hysteresis-Verluste) erzielt. Dazu gehört die Einführung von kaltgewalzten kornorientierten Magnetblechen), die Laser- bzw. Plasma-Behandlung der Blechoberfläche sowie die Verwendung der Step-lap-Schichtung an den Schnittstellen Säule/Joch.

Andererseits konnte auch der Wirbelstromverlustanteil der Eisenverluste abgesenkt werden, und zwar durch Reduktion der Blechdicke von 0,35 mm schrittweise auf 0,23 mm, wodurch allerdings die Produktionszeit pro Kern um etwa 30% angestiegen ist.

Durch alle diese Massnahmen erreichen die Eisenverluste eines modernen Verteiltransformators nur noch etwa ein Drittel der Werte eines Transformators von 1950.

Halbierte Lastverluste (Kupferverluste)

Auch die Lastverluste konnten erheblich reduziert werden, wenn auch nicht ganz so frappant wie bei den Eisenverlusten (Bild 2). Die Verbesserungen in diesem Bereich basieren auf besseren Füllfaktoren in den Wicklungen (Lack-

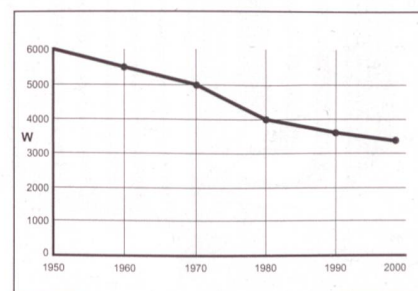


Bild 2 Wicklungsverluste Normtransformator 400 kVA 16/0,4 kV.

Adresse des Autors

Edi Borer
Sekretär Verband Trafosuisse–Trafoswiss
«Haus der Wirtschaft»
Postfach
4410 Liestal

Transformatoren

draht statt papierisolierter Leiter), auf der Einführung von Bandwicklungen auf der Unterspannungsseite, besonders aber auf der Auslegung mit tieferen Stromdichten infolge ständig steigender Kapitalisatonswerte.

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

«Flüster»-Transformatoren

In den Nachkriegsjahren war das Geräusch eines Transformators kein Thema. Dies veränderte sich erst mit dem erhöhten Umweltbewusstsein der Gesellschaft gegen Ende der 70er Jahre. Dies veranlasste auch die Hersteller von Transformatoren, entsprechende Massnahmen zu ergreifen, um den Geräuschpegel ihrer Produkte zu reduzieren. Tabelle II zeigt die Entwicklung auf diesem Gebiet am Beispiel eines Durchschnittswertes (Schalldruckpegel) eines 400-kVA-Transformators in 30 cm Abstand.

1960	58 dBA
1970	50 dBA
1980	46 dBA
1990	43 dBA
1998	38 dBA

Tabelle II Entwicklung des Geräuschpegels von Transformatoren
(Quelle: Archiv Rauscher & Stoecklin AG).

Ein moderner Verteiltransformator hat also im Durchschnitt ein bis zu 20 dBA tieferes Geräusch als noch sein etwa 40 Jahre älterer Vorgänger. Dabei entsprechen 10 dBA etwa einer Halbierung des subjektiven Lärmempfindens. Demnach werden 38 dBA vom menschlichen Ohr bei Tage kaum mehr wahrgenommen.

«Schlankheitskur»

Der technologische Fortschritt ist aber auch bei den Abmessungen eines Transformators unübersehbar: Bei gleicher Leistung und bei den genannten stark reduzierten Verlusten konnten im betrachteten Zeitraum gleichzeitig auch die Aussenabmessungen erheblich reduziert werden (Tabelle III). Der Vorteil liegt auf der Hand, da das Transformatorvolumen einen direkten Einfluss auf die Baukosten von Trafostationen hat (Bilder 3 und 4).

Ein moderner Verteiltransformator hat also im Schnitt ein Volumen, das etwa 30% geringer ist als das eines Transformators aus den frühen 70er Jahren.

	1972	1998
Länge	1710 mm	1460 mm
Breite	1020 mm	960 mm
Höhe	2015 mm	1735 mm
Volumen	3,514 m ³	2,43 m ³

Tabelle III Beispiel für Transformatorvolumen (1000-kVA-Transformator 16 000 V/400 V;
Quelle: Archiv ABB Sécheron SA).

Der «Kilopreis»

Im Zusammenhang mit der Preisentwicklung sei eine kleine Anekdote erlaubt: In den Nachkriegsjahren, etwa Anfang der fünfziger Jahre, galt in der Transformatorenindustrie die Faustformel: «Der Kilopreis eines Transformators sollte möglichst dem Preis eines Kilos Kalbfleisch entsprechen...». Dies hat damals recht gut der Realität entsprochen. In welche günstige Richtung hat sich doch der Transformatorpreis entwickelt, der heute bei etwa 8 Franken pro Kilo liegt. Dafür erhält man bestenfalls ein Kilo Cervelats in Aktion...

Erhebliche ökonomische Verbesserungen

Verkaufspreise absolut gestiegen...

Der Preis von Verteiltransformatoren ist in den letzten 35 Jahren in absoluten Frankenbeträgen um knapp 70% gestiegen – verglichen mit der laufenden Teuerung (Landesindex der Konsumentenpreise) jedoch erheblich «günstiger» geworden. Als Beispiel diene die Preisentwicklung eines 400-kVA-Verteiltransformators zwischen 1965 und heute (Tabelle IV).

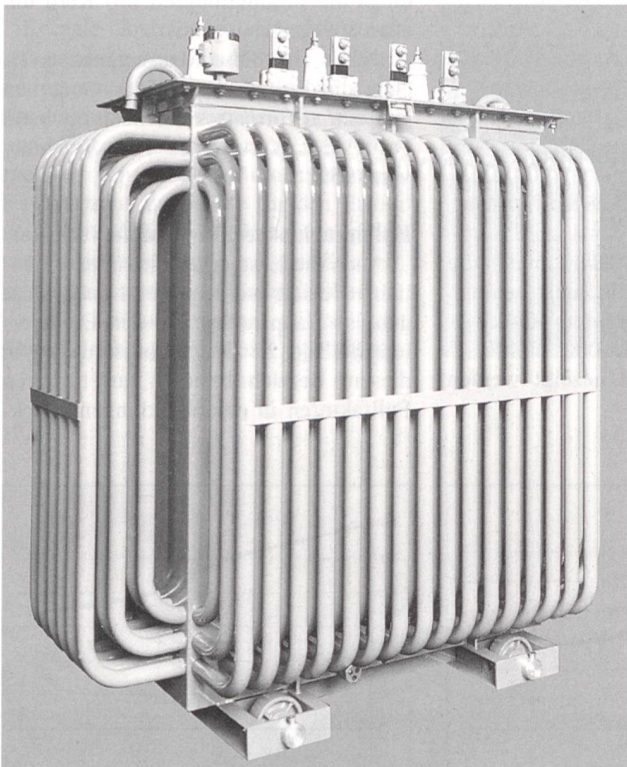


Bild 3 Verteiltransformator 1000 kVA aus dem Jahre 1958
(Foto Rauscher & Stoecklin AG).

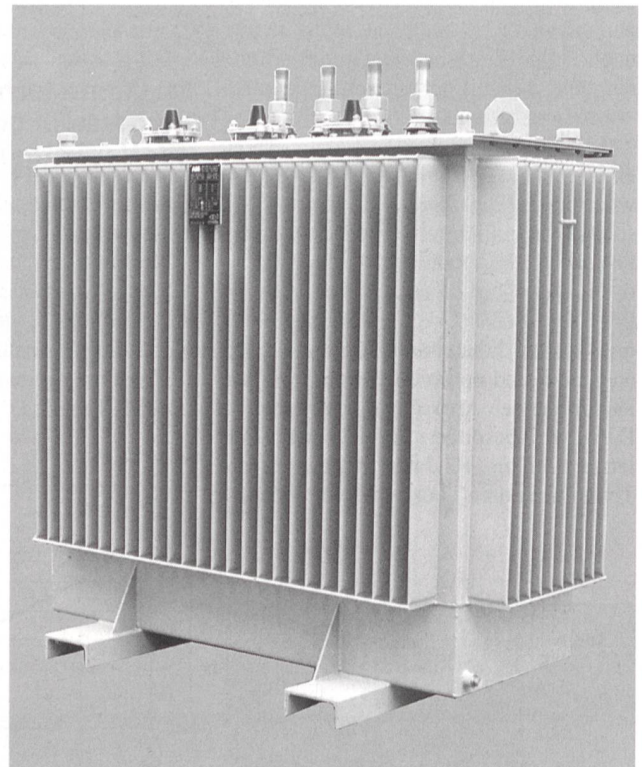


Bild 4 Moderner Verteiltransformator 1000 kVA, Baujahr 1998
(Foto ABB Sécheron SA).

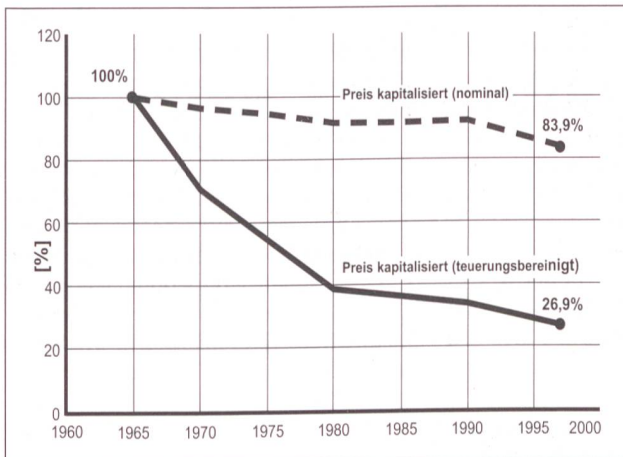


Bild 5 Die Entwicklung des Verkaufspreises eines 400-kVA-«Normtransformators» von 1965 bis 1997: nominal und teuerungsbereinigt dargestellt (Basis: Landesindex der Konsumentenpreise).

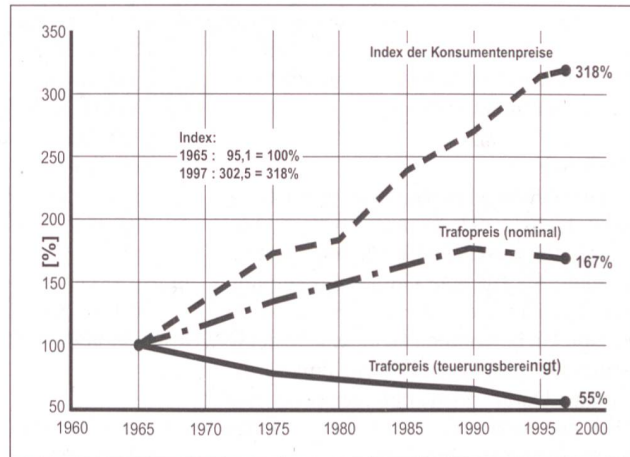


Bild 6 Die Entwicklung des kapitalisierten Preises eines 400-kVA-«Normtransformators» von 1965 bis 1997: nominal und teuerungsbereinigt dargestellt (Basis: Landesindex der Konsumentenpreise). Annahme: Eisenverluste 12 000 Fr./kW, Lastverluste: 3700 Fr./kW.

Diese Preissteigerung erscheint im ersten Moment eher gross (rund 2% pro Jahr). Sie muss aber relativiert und korrekterweise mit der im selben Zeitraum erfolgten Teuerung verglichen werden: Der Landesindex der Konsumentenpreise stieg von 1965 bis 1997 um den Faktor 3,18 an.

... aber real um über zwei Drittel gesunken

Unter Berücksichtigung der Teuerung ist der heutige effektive Preis von Transformatoren im Vergleich zu 1965 also real nicht gestiegen, sondern um über zwei Drittel gesunken (Bild 5).

Wäre hingegen der Transformatorpreis analog dem Landesindex der Konsumentenpreise gestiegen, müsste man heute für einen 400-kVA-Verteiltransformator sage und schreibe Fr. 26 700.– bezahlen (!).

Wieso dies nicht der Fall ist, erklärt sich hauptsächlich aus den enormen Anstrengungen der schweizerischen Transformatorhersteller, die ihre Prozesse und Produktionsabläufe rationalisiert und damit ihre Produktivität erheblich gesteigert haben.

Würde man im übrigen die Kostenentwicklung nach der gängigen VSM-Gleitpreisformel berechnen, so müsste man heute für einen 400-kVA-Verteiltransformator sogar Fr. 33 500.– bezahlen.

Kapitalisierter Preis: 75 Prozent tiefer als vor 30 Jahren

Bekanntlich werden in der Schweiz die Transformatorenverluste kapitalisiert, das heisst: Beim Einkauf eines Transformators berücksichtigen die meisten EW nicht nur den offerierten Verkaufspreis eines Transformators, sondern den sogenannten kapitalisierten Preis, der sich aus Transformatorenpreis und Verlustkosten zusammensetzt. Die Werte für die Verlustkapitalisierung liegen heute zwischen etwa Fr. 9000.– bis 15 000.– pro kW Eisenverluste sowie zwischen etwa Fr. 2000.– bis 5000.– pro kW Kupferverluste (siehe Berechnungsbeispiele 1 + 2).

Berechnungsbeispiel 1: 400-kVA-Transformator, Baujahr 1965

Preis	Fr. 8400.–
Eisenverluste	1000 W
Kupferverluste	5300 W
Kapitalisierung:	
Eisenverluste	12 000 Fr./kW
Kupferverluste	3000 Fr./kW

Kapitalisierter Preis:
 $P_{kap} = 8400 + 1,0 \times 12\,000 + 5,3 \times 3000$
 = Fr. 36 300.–

Berechnungsbeispiel 2: 400-kVA-Transformator, Baujahr 1998

Preis	Fr. 14 000.–
Eisenverluste	445 W
Kupferverluste	3270 W

Kapitalisierung:	
Eisenverluste	12 000 Fr./kW
Kupferverluste	3000 Fr./kW

Kapitalisierter Preis:
 $P_{kap} = 14\,000 + 0,445 \times 12\,000 + 3,27 \times 3000$
 = Fr. 29 150.–

Wenn man die Entwicklung des kapitalisierten Transformatorpreises (absolut) betrachtet, ist der Transformator heute also um etwa **20%, teuerungsbereinigt sogar um etwa 75% billiger als noch 1965** (siehe Bild 6).

Transformatorenpreise im Gesamtvergleich aller Kapitalisierungsparameter

Wenn man die Kosten eines alten Transformators mit denjenigen eines modernen vergleicht, geschieht dies meist nur unter Berücksichtigung der Verluste (siehe Beispiele 1 und 2 im vorangehenden Abschnitt):

1965 $P_{kap} =$ Fr. 36 300.–
 1998 $P_{kap} =$ Fr. 29 150.–

Die anderen – vorher erwähnten – Parameter der Kapitalisierung werden aber in den meisten Fällen vernachlässigt. Im

1965	Fr.	8 400.–	(100%)
1970	Fr.	9 700.–	(115%)
1975	Fr.	11 300.–	(134%)
1985	Fr.	13 600.–	(162%)
1990	Fr.	14 800.–	(176%)
1995	Fr.	14 400.–	(171%)
1998	Fr.	14 000.–	(167%)

Tabelle IV Preisentwicklung eines 400-kVA-Verteiltransformators (Quellen: Transformatorenpreise: erzielte Verkaufspreise bei BBC/ABB Sécheron).

Transformatoren

folgenden soll versucht werden, auch diese Verbesserungen zu «kapitalisieren», also in Frankenwerte umzurechnen (siehe Berechnungsbeispiel 3).

Geräusch

Für den höheren Geräuschpegel eines alten Transformators müssten korrekterweise die Kosten in Rechnung gestellt werden, die für eine Geräuschdämmung aufgewendet werden müssen, um zum Beispiel in bewohnten Gebieten die heute geltenden gesetzlich Vorschriften einzuhalten. Dafür wird üblicherweise pro dBA ein Wert von etwa 3% bis 4% des Verkaufspreises eingesetzt.

Transformatorvolumen

Grössere Transformatoren benötigen entsprechend grössere Transformatorzellen bzw. Transformatorstationen. Dies macht sich direkt in den Baukosten bemerkbar, wobei bei diesen Überlegungen mit einem Kubaturpreis für Industriebauten von etwa 600 Fr./m³ gerechnet wird.

Berechnungsbeispiel 3

In eine bestehende Transformatorstation in einer bewohnten Zone wird die Gesamtkapitalisierung für folgende drei Varianten berechnet:

- A) ein neuer Verteiltransformator mit einem in der Schweiz üblichen Verlustniveau oder
- B) ein neuer Transformator gemäss Cenelec-Norm HD 428.1S1 (1992), Verluste C-C' oder
- C) ein existierender Transformator aus dem Jahre 1965, der vorgängig noch revidiert wird.

Welche Variante wäre in diesem Fall nun aber die wirtschaftlichste?

Annahme: Die Kapitalisierung basiert auf einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren, Zinsfuss: 4,5%, Energiepreis: 0,1 Fr./kWh, Halblast.

Daraus errechnet sich eine Kapitalisierung der Eisenverluste von Fr. 11 400.– und der Lastverluste von Fr. 2900.– pro kW. Dies ergibt bei den Varianten A, B und C folgende Berechnung:

- A) Transformatorpreis Fr. 14 000.–
Eisenverluste 445 W
Lastverluste 3270 W
Geräuschpegel 38 dB (keine
Lärmschutzmassnahmen notwendig)

$$P_{\text{kap/total}} = 14\,000 + 0,445 \times 11\,400 + 3,27 \times 2900 + 0 = \text{Fr. } 28\,560.- \text{ (100\%)}$$

- B) Transformatorpreis Fr. 11 200.–
Eisenverluste 610 W
Lastverluste 3850 W
Geräuschpegel 50 dBA
(Schalldruck entsprechend 60 dBA Schalleistung) Lärmschutzmassnahmen erforderlich (3,5%/dBA vom Transformatorpreis)

$$P_{\text{kap/total}} = 11\,200 + 0,61 \times 11\,400 + 3,85 \times 2900 + (50 - 38) \times 0,035 \times 11\,200 = \text{Fr. } 34\,020.- \text{ (119\%)}$$

- C) Transformatorpreis Fr. 0, jedoch Revision, um weiteren Betrieb für die nächsten 20 Jahre zu ermöglichen
Revisionskosten Fr. 4000.–
Eisenverluste 1000 W
Lastverluste 5300 W
Geräuschpegel 54 dBA
Lärmschutzmassnahmen notwendig (3,5%/dB vom theoretischen Preis)

$$P_{\text{kap/total}} = 4000 + 1,0 \times 11\,400 + 5,3 \times 2900 + (54 - 38) \times 0,035 \times (8400 + 4000) = \text{Fr. } 37\,710.- \text{ (132\%)}$$

Moderne Transformatoren sind 20 bis 30 Prozent wirtschaftlicher

Bei diesen Bedingungen wäre der Einsatz eines modernen Verteiltransformators (A) mit den in der Schweiz üblichen (tiefen) Verlusten ökonomischer als die

beiden anderen Varianten. Übrigens gälte dies auch ohne Berücksichtigung der Kosten für Geräuschschutzmassnahmen.

Ganz allgemein lässt sich somit sagen, dass bei den heute angewendeten Kapitalisierungswerten in der Schweiz die Transformatoren mit Cenelec-Verlusten – und selbst mit Verlusten gemäss Reihe C-C' – kapitalisiert merklich teurer sind als moderne verlustarme Verteiltransformatoren der schweizerischen Produzenten im Dachverband Trafosuisse.

Ersatz alter Transformatoren macht sich bezahlt

Die dargestellten Parameter und Berechnungen für die Transformatoren, die in den letzten 30 bis 50 Jahren gebaut worden sind und noch immer im Einsatz stehen, zeigen deutlich auf, dass der Betrieb derart alter Transformatoren infolge ihrer hohen Verlustkosten in den meisten Fällen unökonomisch ist – von den wesentlich höheren Geräuschpegeln einmal abgesehen.

Ebenso sind damit die Kostenvorteile durch die reduzierten Volumen moderner Verteiltransformatoren sowie ihre geringeren Ausfallrisiken zahlenmässig (in Franken) noch nicht in die Überlegungen eines allfälligen Ersatzes einbezogen.

Fazit: Der Ersatz von Transformatoren-«Veteranen» macht sich mehr als bezahlt.

Le remplacement des «vétérans» parmi les transformateurs est payant

Coûts des pertes beaucoup trop élevés pour tous les transformateurs de distribution

Au cours des dernières décennies, les exploitants de transformateurs de distribution ont profité d'un meilleur rapport prix/performance, grâce aux efforts d'optimisation constants des fabricants de transformateurs: d'une part les pertes des transformateurs ont pu être abaissées de façon spectaculaire, d'autre part le prix capitalisé est aujourd'hui d'un montant nominal inférieur d'environ 20% à ce qu'il était il y a environ 40 ans. L'exploitation de transformateurs de distribution vieux de 30 à 40 ans (pratique encore courante de nos jours en Suisse, comme l'a révélé une enquête de Trafosuisse auprès des exploitants) est donc la plupart du temps peu rentable. Comment la rentabilité des anciens transformateurs est-elle toutefois évaluée?