

Coûts des pertes beaucoup trop élevés pour tous les transformateurs de distribution : le remplacement des "vétérans" parmi les transformateurs est payant

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 12

PDF erstellt am: **26.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-901958>

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.

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

Le remplacement des «vétérans» parmi les transformateurs est payant

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?

■ Edi Borer

Introduction

Les transformateurs sont utilisés depuis plus d'un siècle. Selon toute évidence, ils resteront une composante importante de la transmission et de la distribution de l'énergie électrique pendant encore un certain temps.

Les transformateurs ont toujours eu un rendement d'exploitation élevé (environ 98% dès l'année 1932 pour prendre un exemple), de sorte que l'on pourrait supposer qu'aucune amélioration n'est plus possible dans ce domaine. Malgré cela, le transformateur a été continuellement affiné et optimisé au cours des dernières décennies, comme le décrit l'article ci-après. La période des 30 à 40 dernières années sera observée avec une attention toute particulière, car des transformateurs de cette époque sont toujours en service à l'heure actuelle, comme l'a révélé une étude de marché réalisée par Trafosuisse en 1997. L'exploitation de tels «vé-

térans» est-elle cependant encore défendable aujourd'hui, aussi bien selon des critères économiques qu'écologiques?

Des améliorations techniques marquantes dans le domaine de la minimisation des pertes

Des pertes à vide inférieures de deux tiers (pertes fer)

Dans la période considérée, les pertes fer ont pu être massivement abaissées (voir la figure 1). A titre d'exemple, nous en apporterons la preuve avec un transformateur de distribution de 400 kVA, 16 000 V/400 V («transformateur normalisé») (tableau I/figure 1).

Qu'est-ce qui a rendu possible ces améliorations considérables? Elles ont

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

Tableau I Pertes à vide
(source: archives Rauscher & Stoecklin).

été réalisées d'une part dans le domaine métallurgique (abaissement des pertes d'hystérésis), notamment avec l'introduction de tôles magnétiques à grains orientés, laminées à froid, le traitement au laser ou au plasma de la surface de tôle, ainsi qu'avec l'utilisation de la méthode Step-lap aux jonctions colonne/culasse.

D'autre part, il a également été possible d'abaisser la part des pertes par courant de Foucault parasites dans les pertes fer et ce grâce à la réduction progressive de l'épaisseur des tôles de 0,35 mm à 0,23 mm, ce qui a toutefois entraîné l'augmentation du temps de production par noyau d'environ 30%.

Grâce à toutes ces mesures, les pertes fer d'un transformateur de distribution moderne ne représentent plus qu'un tiers environ des valeurs d'un transformateur de 1950.

Des pertes en charge diminuées de moitié (pertes cuivre)

Les pertes en charge ont également pu être considérablement réduites, même si cette réduction n'est pas aussi marquante que celle des pertes fer (voir la figure 2). Les améliorations dans ce domaine reposent sur de meilleurs facteurs de remplis-

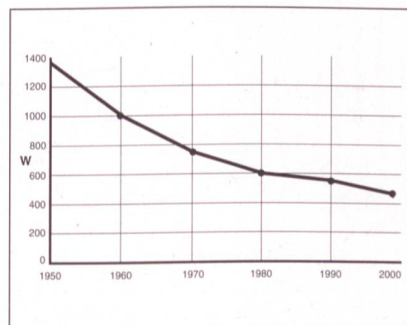


Figure 1 Pertes à vide d'un transformateur normalisé 400 kVA, 16/0,4 kV.

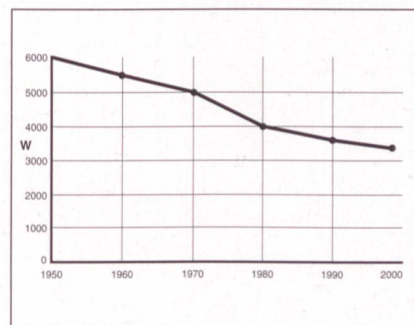


Figure 2 Pertes en charge d'un transformateur normalisé 400 kVA, 16/0,4 kV.

Adresse de l'auteur

Edi Borer
Secrétaire Trafosuisse-Trafoswiss
«Haus der Wirtschaft»
Postfach
4410 Liestal

sage dans les enroulements (fil émaillé à la place d'un conducteur isolé en papier), sur l'introduction d'enroulements en bande côté basse-tension, mais surtout sur une conception utilisant des densités de courant moins élevées, grâce à des valeurs de capitalisation en continue augmentation.

Pour ces raisons, les pertes en charge d'un transformateur de distribution d'aujourd'hui ne représentent plus que la moitié environ de celles enregistrées en 1950.

Transformateurs silencieux

Pendant les années d'après-guerre, le bruit des transformateurs n'était pas à l'ordre du jour. Cette situation n'a commencé à changer qu'avec la prise de conscience accrue de l'environnement dans la société, vers la fin des années 70, ce qui a également incité les fabricants de transformateurs à prendre des mesures correspondantes, afin de réduire le niveau de bruit de leurs produits. Le tableau II montre l'évolution dans ce domaine, grâce à l'exemple d'une valeur de mesure

1960	58 dB (A)
1970	50 dB (A)
1980	46 dB (A)
1990	43 dB (A)
1998	38 dB (A)

Tableau II L'évolution du niveau de bruit (source: Archives Rauscher & Stoecklin AG).

moyenne (niveau de pression acoustique) d'un transformateur 400 kVA à 30 cm de distance.

Un transformateur de distribution moderne produit donc en moyenne un bruit inférieur de près de 20 dB (A) à celui de son prédécesseur vieux d'environ 40 ans. Il faut savoir que 10 dB(A) correspondent à peu près à une réduction de moitié de la sensation de bruit subjective. En conséquence, l'oreille humaine ne perçoit pratiquement plus un bruit de 38 dB (A) pendant la journée.

Une cure «d'amaigrissement»

Le progrès technique s'exprime cependant aussi par les dimensions d'un transformateur. Pour une puissance identique et parallèlement à la réduction considérable des pertes évoquée, les dimensions extérieures ont également pu être nettement diminuées, au cours de la même période (tableau 3). L'avantage est évident, puisque le volume du transformateur exerce une influence directe sur les coûts de construction des stations de

	1972	1998
Longueur	1710 mm	1460 mm
Largeur	1020 mm	960 mm
Hauteur	2015 mm	1735 mm
Volume	3,514 m ³	2,43 m ³

Tableau III Les dimensions extérieures ont pu être nettement diminuées (transformateur 1000 kVA/16 000 V/400 V; source: Archives ABB Sécheron SA).

«Le prix au kilo»

A cet égard, nous nous permettrons d'évoquer une petite anecdote: au cours des années d'après-guerre, vers le début des années 50, l'industrie des transformateurs se basait sur cette règle approximative: «le prix au kilo d'un transformateur devrait si possible correspondre au prix d'un kilo de viande de veau...». Cette formule correspondait alors assez bien à la réalité. Quelle n'est pas l'évolution favorable prise par le prix des transformateurs depuis cette date, qui s'élève aujourd'hui à quelque 8 francs par kilo. Pour ce prix on obtient au mieux un kilo de cervelas.

transformation (voir également les figures 3 et 4). Prenons un exemple (transformateur 1000 kVA, 16 000 V/400 V, tableau III).

Un transformateur de distribution moderne a donc en moyenne un volume inférieur d'environ 30% par rapport à un transformateur du début des années 70.

Des améliorations économiques considérables

Des prix de vente plus élevés dans l'absolu...

Le prix des transformateurs de distribution a augmenté de près de 70% en valeur absolue au cours des 35 dernières années, mais au regard du renchérissement selon l'indice national des prix à la

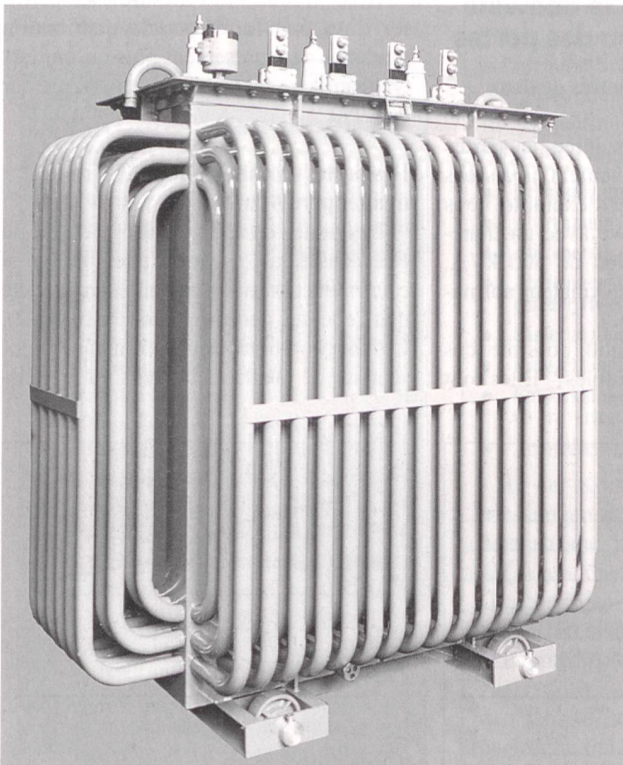


Figure 3 Transformateur de distribution 1000 kVA de l'année 1958 (photographie: Rauscher & Stoecklin).

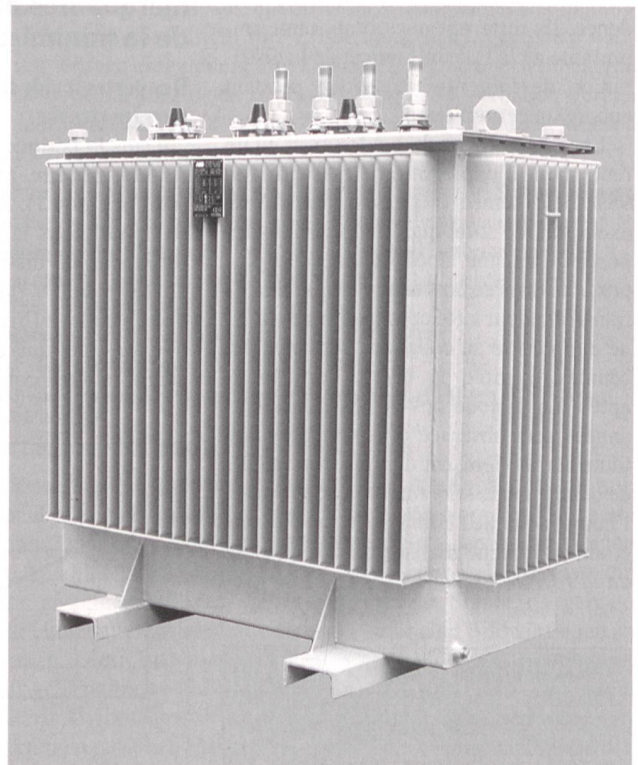


Figure 4 Transformateur de distribution 1000 kVA de l'année 1998 (photographie: ABB Sécheron SA).

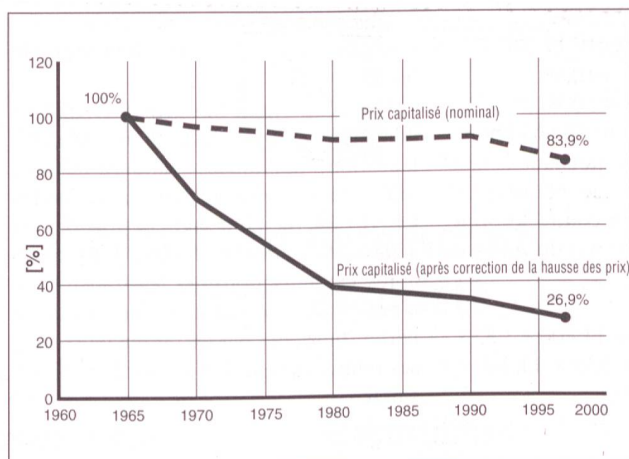


Figure 5 L'évolution du prix de vente d'un transformateur normalisé de 400 kVA entre 1965 et 1997 représentée sous une forme nominale et après correction de la hausse des prix (base: indice national des prix à la consommation).

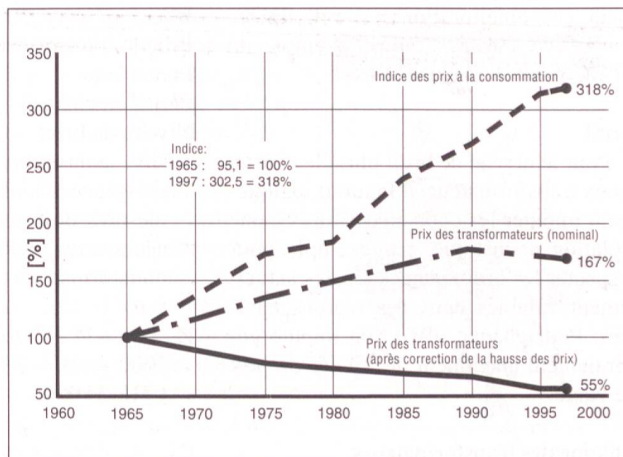


Figure 6 L'évolution du prix capitalisé d'un transformateur normalisé de 400 kVA entre 1965 et 1997 représentée sous une forme nominale et après correction de la hausse des prix (base: indice national des prix à la consommation).
Supposition: pertes fer CHF 12 000.-/kW, pertes en charge CHF 3700.-/kW.

consommation, il est toutefois devenu nettement «meilleur marché». A titre d'exemple, considérons l'évolution du prix d'un transformateur de distribution de 400 kVA entre 1965 et aujourd'hui (tableau IV).

Cette hausse des prix semble importante de prime abord (environ 2% par an). Elle doit toutefois être relativisée et comparée avec la hausse des prix au cours de la même période: l'indice national des prix à la consommation est passé entre 1965 et 1997 d'un facteur de 3,18.

... mais inférieurs de plus de deux tiers dans la réalité

En tenant compte de la hausse des prix, le prix effectif actuel des transformateurs n'a donc pas augmenté en réalité par rapport à 1965, il a au contraire diminué de plus de deux tiers (voir la figure 5).

Si le prix des transformateurs avait, en revanche, augmenté à l'instar de l'indice national des prix à la consommation, il faudrait aujourd'hui déboursier quelque CHF 26 700.- pour un transformateur de distribution de 400 kVA!

Les raisons qui font qu'il n'en va pas ainsi résident principalement dans les efforts considérables des fabricants suisses de transformateurs qui ont rationalisé

leurs processus et séquences de production, parvenant ainsi à accroître considérablement leur productivité.

Si l'on calculait en outre l'évolution des coûts d'après la formule courante d'adaptation VSM, il faudrait même payer CHF 33 500.-, de nos jours, pour un transformateur de distribution de 400 kVA.

Prix capitalisé: 75% plus bas qu'il y a 30 ans

Comme on le sait, les pertes de transformateur sont capitalisées en Suisse, ce qui signifie que lors de l'achat d'un transformateur, les sociétés d'électricité tiennent compte non seulement du prix de vente proposé d'un transformateur, mais aussi du prix capitalisé, qui se compose du prix du transformateur et des coûts des pertes. Les valeurs pour la capitalisation des pertes se situent aujourd'hui entre CHF 9000.- et CHF 15 000.- par kW de pertes fer et entre CHF 2000.- et CHF 5000.- par kW de pertes cuivre (voir les exemples de calcul 1 + 2).

Exemple de calcul 1: transformateur de 400 kVA, année de construction 1965

Prix	CHF 8400.-
Pertes fer	1000 W
Pertes cuivre	5300 W
<i>Capitalisation</i>	
Pertes fer	CHF 12 000.-/kW
Pertes cuivre	CHF 3 000.-/kW

Prix capitalisé

$$P_{\text{cap}} = 8400 + 1,0 \times 12\,000 + 5,3 \times 3000 = \text{CHF } 38\,300.-$$

Exemple de calcul 2: transformateur de 400 kVA, année de construction 1998

Prix	CHF 14 000.-
Pertes fer	445 W
Pertes cuivre	3270 W

Capitalisation

Pertes fer	CHF 12 000.-/kW
Pertes cuivre	CHF 3000.-/kW

Prix capitalisé

$$P_{\text{cap}} = 14\,000 + 0,445 \times 12\,000 + 3,27 \times 3000 = \text{CHF } 29\,150.-$$

Si l'on considère l'évolution du prix capitalisé du transformateur (absolu), le transformateur est aujourd'hui moins cher d'environ 20%, voire, après correction de la hausse des prix, d'environ 75% qu'en 1965 (voir la figure 6).

Prix des transformateurs dans une comparaison globale de tous les paramètres de capitalisation

Si l'on compare les coûts d'un ancien transformateur avec ceux d'un transformateur moderne, on le fait généralement en tenant compte des pertes (voir les exemples 1 et 2 dans la section précédente):

$$1965: P_{\text{cap}} = \text{CHF } 36\,300.-$$

$$1998: P_{\text{cap}} = \text{CHF } 29\,150.-$$

Les autres paramètres précédemment cités de la capitalisation sont toutefois négligés dans la plupart des cas. Ci-après, nous tenterons de «capitaliser» égale-

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

Tableau IV L'évolution des prix pour un transformateur de distribution de 400 kVA (sources: prix des transformateurs: prix de vente réalisés par BBC/ABB Sécheron).

Transformateurs

ment ces améliorations, c.-à-d. de les convertir en francs (voir l'exemple de calcul 3).

Bruit

Pour le niveau de bruit plus élevé d'un vieux transformateur, il faudrait logiquement imputer les coûts nécessaires à une isolation acoustique, par exemple pour respecter les ordonnances légales actuellement valables dans des régions habitées. Pour chaque dB(A) on impute généralement une valeur de 3 à 4% du prix de vente.

Volume des transformateurs

Des transformateurs plus grands nécessitent également des cellules de transformation ou stations de transformation plus grandes. Cette nécessité se répercute directement sur les coûts de construction, sachant qu'il faut estimer dans ce calcul le prix du cubage à environ CHF 600.-/m³ pour les complexes industriels.

Exemple de calcul 3

Dans une station de transformation existante dans une zone habitée, la capitalisation totale est calculée pour les trois variantes suivantes:

- A) un nouveau transformateur de distribution avec un niveau de perte habituel en Suisse ou
- B) un nouveau transformateur selon CENELEC Norme 428.1S1 (1992), pertes C-C' ou
- C) un transformateur existant de l'année 1965, qui sera préalablement révisé.

Dans ce cas, quelle serait toutefois la variante la plus rentable?

Hypothèse: la capitalisation se base sur une durée d'amortissement de 20 ans.

Taux d'intérêt: 4,5%, prix de l'énergie: CHF 0,1/kWh, demi-charge.

Par calcul, on obtient alors une capitalisation des pertes fer de CHF 11 400.- et des pertes en charge de CHF 2900.- par kW. Dans les variantes A, B et C, cela se traduit par le calcul suivant :

A)	
Prix du transform.	CHF 14 000.-
Pertes fer	445 W
Pertes en charge	3270 W
Niveau de bruit	38 dB (A) (aucune mesure de protection contre le bruit nécessaire)

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

B)	
Prix du transformateur	CHF 11 200.-
Pertes fer	610 W
Pertes en charge	3850 W
Niveau de bruit	50 dB (A) (pression acoustique correspondant à une puissance acoustique de 60 dB (A), mesures de protection contre le bruit nécessaires (3,5%/dB (A)) du prix du transformateur)

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

C)	
Prix du transform.	CHF 0.-
Frais de révision	CHF 4000.-
Pertes fer	1000 W
Pertes en charge	5300 W
Niveau de bruit	54 dB (A), mesures de protection contre le bruit nécessaires (3,5%/dB (A) du prix théorique)

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

Les transformateurs modernes possèdent une rentabilité de 20 à 30% meilleure

Dans ces conditions, l'utilisation d'un transformateur de distribution moderne (A) avec les (faibles) pertes habituelles en Suisse serait plus rentable que les deux autres variantes. Ceci serait d'ailleurs

valable, même sans tenir compte des coûts des mesures de protection contre le bruit.

De façon tout à fait générale, on peut donc dire qu'avec les valeurs de capitalisation appliquées aujourd'hui en Suisse, les transformateurs avec pertes CENELEC (et même avec pertes selon la série C-C') sont beaucoup plus chers après capitalisation que les transformateurs de distribution modernes à faibles pertes, fabriqués par les producteurs suisses réunis au sein de l'association Trafo-suisse.

Le remplacement des vieux transformateurs est payant

Les paramètres et calculs présentés pour les transformateurs fabriqués au cours des 30 à 50 dernières années et qui sont toujours utilisés montrent clairement que l'exploitation de transformateurs aussi vieux est le plus souvent non rentable, compte tenu du coût élevé de leurs pertes, abstraction faite des niveaux de bruit beaucoup plus élevés.

De même, les avantages en matière de coûts de la réduction des volumes des transformateurs de distribution modernes, ainsi que leurs risques de défaillance plus faibles n'ont pas encore été pris en compte dans les réflexions chiffrées (en francs) portant sur un remplacement éventuel.

Bilan: le remplacement des «vétérans» parmi les transformateurs est plus que payant.

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 Transformatoren-Hersteller – von einem verbesserten Preis-Leistungs-Verhältnis: Einerseits konnten die Transformatoren-Verluste spektakulär abgesenkt werden, andererseits liegt aber auch der kapitalisierte Preis heute nominal etwa 20 Prozent 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?