Deutsches Kupferinstitut

Verteil-transformatoren

Sonderdruck s. 182

Herausgeber:

Deutsches Kupferinstitut
Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen

Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Telefon: (02 11) 4 79 63 00
Telefax: (02 11) 4 79 63 10
info@kupferinstitut.de
www.kupferinstitut.de

Erschienen in:

Elektrotechnik ET
Nrn. 1, 3, 4, 5, 6, und 8/2005
AZ Fachverlage AG, CH-5001 Aarau
www.elektrotechnik.ch

Auflage 02/2007

Verteiltransformatoren

Warum überhaupt Transformatoren in Versorgungsnetzen?

Unsere weit vermaschten Höchstspannungsnetze mit 400 kV von Portugal bis Schweden sind ohne Transformatoren nicht denkbar. Die Transformatoren sorgen dafür, dass bei höchstem Wirkungsgrad die Spannung von einem Kraftwerk auf bis zu 400 kV hinauf und nach einer langen Übertragungsleitung wieder hinunter bis auf 400/230 V transformiert wird. In diesem fünfteiligen Beitrag werden Eigenschaften und Eigenheiten von Transformatoren eingehend beleuchtet.

Stefan Fassbinder

Ohne grosse Kenntnisse der Elektrotechnik und im Speziellen der Übertragungstechnik fragt sich der Laie, weshalb nicht einfach das ganze Netz mit 400/230 V aufbauen? Da könnte man sich doch die Transformatoren sparen? Und überhaupt, wäre es nicht viel klüger, die Energie dort zu produzieren, wo sie gebraucht wird?

Um die Spannungsfälle in Strom-Verteilungsnetzen in praktikablen Grenzen zu halten, müssen grosse Leistungen über weite Strecken bei möglichst hohen Spannungen übertragen werden. Dadurch fällt der Spannungsfall absolut in Volt gemessen klein aus. Es kommt hinzu, dass der Strom im gleichen Mass fällt wie die Spannung heraufgesetzt wird. Ein Beispiel dazu: Ein Spannungsfall von 3 V ist in einem Auto-Bordnetz von 12 V Nennspannung ein herber Verlust, während er in einer Niederspannungs-Verteilung von 230/400 V niemanden besonders aufregt. Zumindest wird kein Verbraucher dadurch in seiner Funktion beeinträchtigt. In Hochspannungsnetzen würden dieselben 3 V gleich in der Unmessbarkeit verschwinden. Weil der Stromverbrauch im Auto in den letzten Jahren gestiegen ist und noch weiter ansteigen wird, wird das Auto der Zukunft eine Versorgung von 42 V (Generatorspannung) haben. In Zukunft werden nämlich viele jetzt noch pneumatisch, hydraulisch oder mechanisch von der Kurbelwelle betätigte Neben- und Hilfstriebe elektrisch angetrieben und damit steigt natürlich die elektrische Leistung stark an.[1] Während einer Übergangsphase wird es im Auto beide Spannungsebenen geben, gekuppelt über DC-DC-Wandler. So entsteht selbst in dem räumlich sehr begrenzten Netz eines Autos der Ansatz einer Struktur wie in öffentlichen und industriellen Wechsel- und Drehstromnetzen, von denen hier die Rede sein soll.

Die Frage müsste indes viel weiter vorne ansetzen und also lauten: Warum sind denn so lange Transport-

[1] Schleuter, Dr. Willibert; Kreipp, Alfons-Martin; Zuber, Manfred: *«Das 42-V-Energienetz: Systembetrachtung und Entwicklungsprozess»*, Vortragsskript der Audi AG, Ingolstadt, 26./27. 6. 2001.

1

2

Bild 1 32-achsiger Tiefladewagen zum Bahntransport von Grenzleistungs-Transformatoren. (Quelle: www.lokomotive-online.de/Eingang/Sonderfahrzeuge/Uaai/uaai.html)

Bild 2 So wird der Grosstrafo aufgenommen, hier am Beispiel des «kleinen» 24-Achsers gezeigt. (Quelle: www.lokomotive-online.de/Eingang/Sonderfahrzeuge/Uaai/uaai.html)

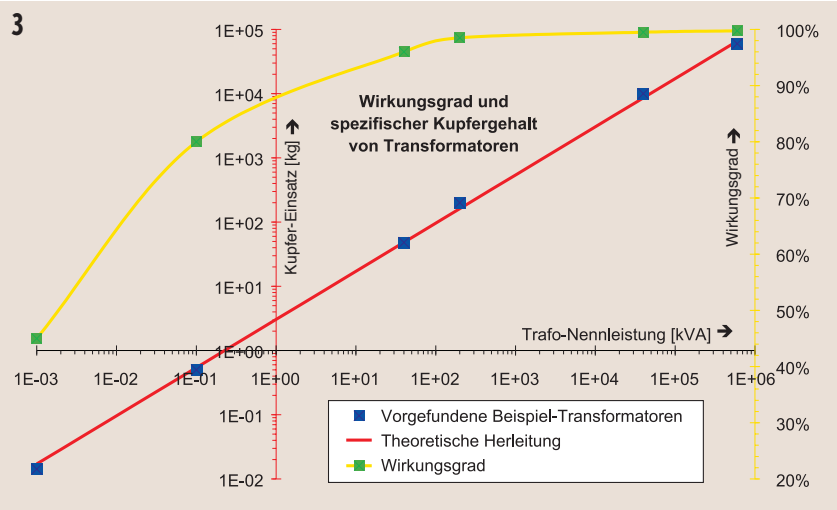


Bild 3 Grafische Darstellung des Kupfergehalts (blau) und der Wirkungsgrade (grün) der Beispiel-Transformatoren aus Tabelle 1 sowie theoretischer Kupfergehalt aus der Formel (rot).

Bild 4 Transformatoren im öffentlichen Versorgungsnetz. Gelb: Stationstrafo, rot: Maschinentrafo, blau: Netzkuppler, grün: Verteiltrafo.

Bild 5 Auch im Bahnstromnetz durchläuft die elektrische Energie drei Transformationsstufen vom Generator bis zu den Antriebsmotoren

Tabelle 1 Leistungsdichten und Wirkungsgrade in der Praxis vorgefundener Beispiel-Transformatoren von kleinsten bis zu grössten Leistungen..

wege erforderlich? Fordern nicht bestimmte politische Gruppen die dezentrale, verbrauchernahe Erzeugung der elektrischen Energie? Und ist dies nicht tatsächlich der technisch und wirtschaftlich vorteilhaftere Weg? Also «erforderlich» ist schon einmal übertrieben. Selbstverständlich geht es auch anders, wie der derzeitige Trend zur Kraft-Wärme-Kopplung, Windkraftnutzung und Errichtung selbst kleinster Wasserkraftwerke zeigt. Nichtsdestoweniger, obwohl hierdurch gleichzeitig der Bau langer Leitungswege und die darin auftretenden Verluste eingespart werden, ist dies der teurere Weg. Die Frage stellt sich, warum?

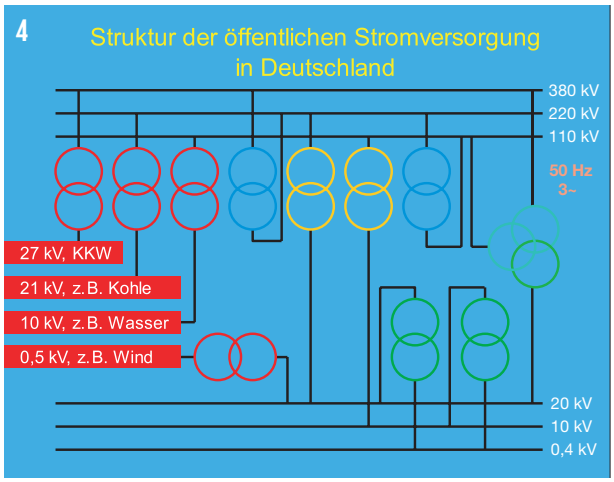
Stellen wir uns einen Trafo mit bestimmten Abmessungen vor, denn um die soll es hier gehen. Nun soll die Grösse dieses Trafos in jede Dimension verdoppelt werden, Länge, Breite und Höhe. Der Aufbau bleibt gleich. Alle Flächen wachsen dann im Quadrat zur Vergrösserung der Abmasse auf das Vierfache. Das gilt für die Oberfläche, die zur Abfuhr der Verlustwärme zur Verfügung steht, für die Leiterquerschnitte und die Eisenquerschnitte als wichtige Auslegungsgrössen. Alle Volumina hingegen wachsen mit der dritten Potenz zur Vergrösserung der Abmessungen. Dies macht, bezogen auf die einfache Vergrösserung von Länge, Breite und Höhe das Achtfache aus.

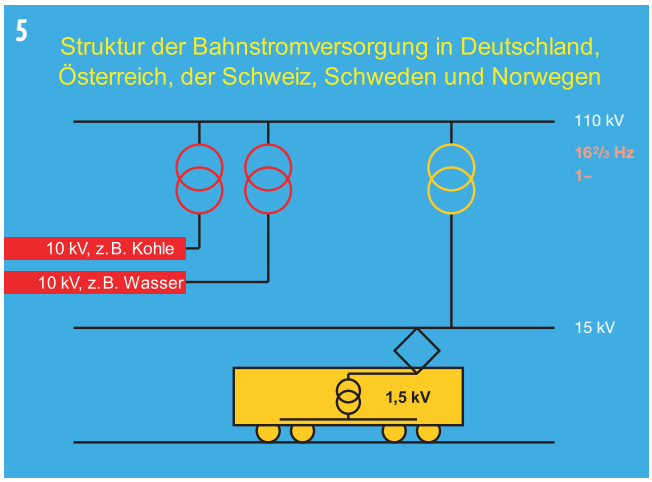
Unveränderte Stromdichten in den Leitern vorausgesetzt, steigt also deren Strom-Belastbarkeit mit den Querschnitten ebenfalls auf das Vierfache, analog zur kühlenden Oberfläche. Tatsächlich liegt die Stromdichte aller Transformatoren von 10 VA bis 1 GVA ganz grob im Bereich um 3 A/mm² (Kupfer) bzw. 2 A/mm² (Aluminium). Als Vergleich: Bei der elektrischen Hausinstallation haben wir maximal rund 10 A/mm². Jedoch wird der Draht durch unsere Verdopplung der Abmasse nicht nur viermal so dick, sondern auch doppelt so lang. Wie gesagt, Verachtfachung von Volumen und Gewicht, hier des Kupfers bzw. Aluminiums. Jedes Kilogramm eines bestimmten Leiterwerkstoffs erzeugt jedoch bei gleicher Stromdichte die gleiche Verlustwärme, also die achtfache im doppelt so breiten, doppelt so langen, doppelt so hohen und achtmal so schweren Trafo. Dieses Mehr an Verlustleistung pro Kühlfläche, denn die Kühlfläche vervierfacht sich nur, wie alle Flächen, haben wir eben vernachlässigt. In der Praxis wird dieser Effekt ausgeglichen, indem zu grösseren Baugrössen hin zunächst die Flüssigkühlung eingeführt und dann die Oberfläche immer mehr künstlich vergrössert wird (Kühlart ONAN: Oil natural circulation, air natural circulation). Ab etwa 40 MVA tritt dann Zwangskühlung durch Blasen von aussen hinzu (Kühlart ONAF: Oil natural circulation, air forced). Ab etwa 400 MVA muss auch der innere Kühlkreislauf durch Ölpumpen unterstützt werden (Kühlart OFAF: Oil forced, air forced). Oberhalb ungefähr 800 MVA reicht einfaches Umwälzen des Öls auch nicht mehr; es muss schon in gezieltem Strahl in die Ölkanäle der Wicklungen gerichtet werden (Kühlart ODAF: Oil directed, air forced).

Und jetzt kommts: Die Vervierfachung des Kernquerschnitts erlaubt eine Vervierfachung der Spannung. Das ergibt, multipliziert mit dem vierfachen Strom im vierfachen Leiterquerschnitt, die sechzehnfache Nennleistung beim achtfachen Gewicht. Diese theoretisch herleitbare Korrelation findet man ganz grob auch in der Praxis vor (Tabelle 1): Steigt die Bauleistung um 4 Zehnerpotenzen, so steigt die Baugrösse, also Masse und Volumen, nur um 3 (sprich jede Dimension lediglich um eine) – und somit natürlich auch der Material-Verbrauch, die Herstellungs- und Errichtungskosten entsprechender Betriebsmittel und Anlagen. Betrachten wir beispielsweise den grössten Trafo, der zurzeit mit einer Leistung von 1100 MVA gebaut wird. Man könnte aus technischer und physikalischer Sicht auch noch grössere Einheiten

1

Vorgefundene Beispiel-Transformatoren	S [kVA]	Cu [kg]	S/Cu [kVA/kg]	$S/Cu^{4/3}$ [$kVA/kg^{4/3}$]	Strom-dichte [A/mm²]	Wirkungs-grad
Kleinsttrafo	0,001	0,014	0,070	0,291	7,000	45,00%
Kleintrafo	0,100	0,500	0,200	0,252	3,000	80,00%
Industrietrafo	40,000	48,200	0,830	0,228	3,397	96,00%
Verteiltrafo	200,000	200,000	1,000	0,171		98,50%
Stationstrafo	40000,000	10000,000	4,000	0,186	3,000	99,50%
Maschinentrafo	600000,000	60000,000	10,000	0,255		99,75%
Geometrisches Mittel	—	—	—	0,227	—	—





herstellen, doch scheitert es dann am einzig möglichen Bahntransport (Bild 1 und 2). Dafür ist jetzt schon ein 32-achsiger Spezial-Tiefladewagen erforderlich. Schliesslich bringt ein solches Ungetüm etwa 460 t auf die Waage und somit auf den Wagen, davon 60 t Kupfer und 60 t Öl. Letzteres wird separat in einem Kesselwagen untergebracht, um die Achslast in erträglichen Grenzen zu halten.

Könnte man nun diese Daten des grössten Transformators einfach linear auf einen Kleintrafo mit 60 g Kupfer übertragen, was am ehesten der Kerngrösse EI48[2] entspräche, könnte dieser kleine Transformator 1100 VA übertragen; tatsächlich bringt es diese Baugrösse nur auf rund 11 VA. Übrigens gilt eine entsprechende Korrelation für Motoren und Generatoren. Das ist aber nicht der einzige Grund, weshalb die Erzeugung von elektrischer Energie in Grosskraftwerken der Gigawattklasse und das Verteilen des Stroms im Umkreis von 100 km wirtschaftlicher ist, als diejenige von vielen Kleinkraftwerken. Der Personalaufwand für den Betrieb weniger Grosskraftwerke ist eindeutig günstiger als derjenige für viele Kleinkraftwerke, die in bedarfsgerechten Häppchen direkt vor Ort auf der Niederspannungsebene Energie ins Netz einspeisen. Wenn aber in Grosskraftwerken Energie erzeugt und diese über weite Strecken verteilt wird, macht dies den Einsatz von Transformatoren erforderlich. Wobei sich jedoch das europaweite Verbundnetz und seine Transformatoren durch eine etwaige rein dezentrale Erzeugung keineswegs erübrigen würden, wie viele Laien glauben. Es wäre lediglich geringer belastet, aber zum Ausgleich der örtlich oft sporadisch stark schwankenden Last und gerade zur Aufnahme und Verteilung des unkalkulierbaren Angebots von Sonnen- und Windkraft mehr denn je unentbehrlich.

Dies hat einen weiteren Aspekt: Wenn jedes Kilogramm Kupfer in einer grossen Maschine mehr oder weniger die gleiche Verlustleistung verursacht wie in einer kleinen Maschine, dann sind auch die Wirkungsgrade grosser Einheiten besser als die der kleinen, wie auch Tabelle 1 und Bild 3 zeigen. Anders gesagt: wenn in einem Grosskraftwerks-Generator ein Kilogramm Kupfer anteilig für eine Ausgangsleistung von 10 kVA zuständig ist, im Fahrraddynamo jedoch nur 100 VA auf ein Kilogramm kommen, so hilft letztlich der Transformator beim Sparen, obwohl er selbst wieder Verluste verursacht, doch die sind sehr gering, wie man sieht. Der Transformator ermöglicht aber den Einsatz sehr grosser statt kleiner Generatoren. Generatoren haben auch gute Wirkungsgrade, und zwar die grösseren wiederum deutlich bessere als die kleinen. Die Erregerleistung der Generatoren und die mechanischen Verluste lassen diese jedoch deutlich schlechter aussehen als einen Transformator entsprechender Baugrösse. Selbst wenn grosse Kraftwerke die Energie über bis zu fünf Transformationsstufen (Bild 4 und 5) in weiter Umgebung liefern müssen, ist ihr Gesamtwirkungsgrad besser als derjenige von kleinen Kraftwerken nahe bei den Verbrauchern.

Ausblick

Wenn jedoch künftig mehr regenerative Energie eingesetzt werden soll, kommt man um die dezentrale Erzeugung und Einspeisung nicht umhin. Dann kommen zwar weniger Transformatoren zum Einsatz, doch trotzdem leiden die Regenerativen an einem Kostennachteil, der aus beschriebenen physikalischen Tatsachen entsteht. Daher können sie bislang nur dort so recht Fuss fassen, wo sie subventioniert werden. Doch warten wir es ab, irgendwann – und manche Quellen nennen recht kurze Zeiträume – werden fossile Brennstoffe knapp, und die Preise steigen. Das Uran reicht auch nicht viel länger als Kohle, Gas und Öl, wenn die Brütertechnologie nicht wieder ausgegraben wird. Auf einmal möchten alle regenerative Energie haben, aber dann nicht mehr aus Idealismus, sondern aus Preisgründen. Doch nur unter Einsatz mehr roten Metalls je gewonnener Kilowattstunde und je kVA Anschlussleistung wird die Nutzung der «grünen» Energien möglich. Was zu beweisen war.

---

[2] Fassbinder, Stefan: *«Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren»*, Bulletin SEV/VSE 3–17/2002.

Aufbau und Produktion konventioneller und Sondertransformatoren

Transformatoren – ewig gleich und damit altbacken! Von wegen: Diese vermeintlich angestaubte Materie hat auch unterhalb einer Oberspannung von 750 kV ihre spannenden Seiten! Der Bau und die anwendungsspezifische Optimierung dieses vom Prinzip her einfachen Bauteils erfordern sehr viel Detailwissen und lange Erfahrung. Nur so können Maschinen mit Wirkungsgraden bis 99,75% entstehen. Auch wer selbst keine Transformatoren baut, sondern «nur» die optimale Kaufentscheidung treffen muss, benötigt eine Menge Basiswissen über deren Wesen.

Kessel und Öl

In der EU sind rund 2 Millionen Öl-Verteiltransformatoren bis 250 kVA und weitere 1,6 Millionen über 250 kVA im Einsatz.[3] Dazu kommen etwa 400 000 Giessharztransformatoren (Bild 6). Der Öltransformator ist damit die Standard-Ausführung. Üblich sind heute Hermetikkessel mit Dehnwellen, bei denen sich also die Wellen hinreichend verformen können, um die Wärmeausdehnung des Öls aufzunehmen. So spart man sich ein Ausdehnungsgefäss mit Luft-Entfeuchter und auch einige Wartungsarbeiten, wie bei Grosstransformatoren mit angebauten Radiatoren noch erforderlich.[4] Der heutige Verteiltrafo ist zumeist ein wartungsfreies Betriebsmittel, und das nicht nur für seine geplante Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren, sondern in der Praxis werden meist eher 30 bis 40 Jahre erreicht. Manchmal, aber lange noch nicht oft genug (siehe Beitrag 4: Wirkungsgrad) werden sie dann wegen nicht mehr zeitgemässer technischer Daten ausser Betrieb genommen, obwohl sie noch immer nicht wirklich defekt sind (Bild 7).

Das Öl dient gleichzeitig als Kühl- und Isoliermittel. Schlagweiten und Kriechwege können gegenüber Luft auf etwa ein Fünftel reduziert werden, und der Aktivteil des Trafos, darunter versteht man die fertig montierte Einheit aus Kern und Wicklungen, hat relativ wenig Oberfläche zur Kühlung. Der Wärme-Übergang vom Aktivteil an ein flüssiges Medium ist aber etwa 20-mal besser als direkt an Luft. Die Oberfläche des Wellenkessels (Bild 8) lässt sich im Gegensatz zu der des Aktivteils beliebig vergrössern und schafft daher diesen letzten Engpass des Wärme-Übergangs an Luft besser. So ermöglicht der Ölkessel eine kompaktere Bauform.

Kern

Der Aktivteil besteht also aus Kern und Wicklungen. Beides sind erhebliche Kostenfaktoren beim Material, und lohnintensiv ist die Fertigung eines Transformators ohnehin. Die Wahl des richtigen Bleches und saubere Schichtung mit häufigem Versatz (alle 2 Bleche) und möglichst geringem Restluftspalt entscheiden über geringen Leerlaufstrom und Leerlauf-Verlust. Heute kommen durchweg kornorientierte, kalt gewalzte Bleche zum Einsatz (Tabelle 2), je dünner, desto weniger Wirbelstrom, aber für diese Bleche muss man ganz schön blechen. Womit eine Hypothese für die Herkunft dieses Ausdrucks gefunden wäre, aber das zu prüfen wollen wir den Sprachforschern überlassen.

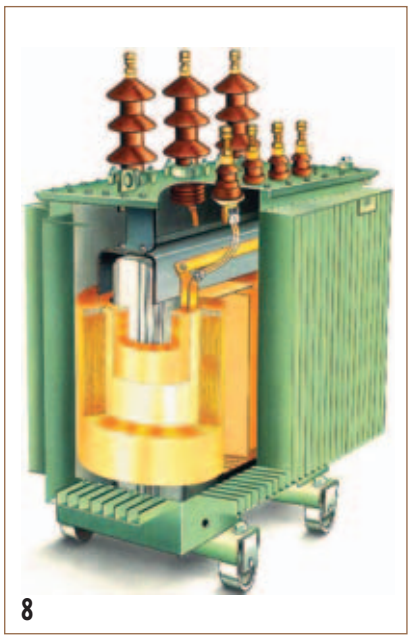
Der richtige Druck auf die Jochträger, die die Joche einspannen (Bild 9), entscheidet über minimale Geräuschpegel. Der grösstmögliche Druck ist nicht notwendigerweise der beste. Vor allem aber muss bei der Konstruktion darauf geachtet werden, keine Wirbelstromschleifen einzubauen. Schon bei Kleintransformatoren ab einer Baugrösse von etwa 1 kVA ist daher die einseitige Isolierung der Befestigungsschrauben üblich, obwohl besser

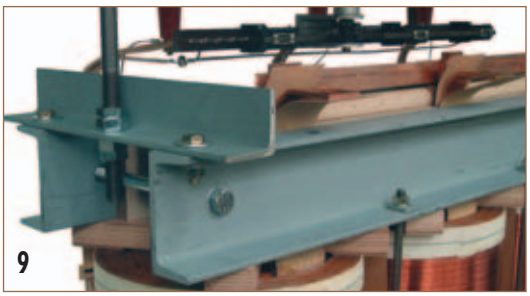
[3] «The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers», ECI, Brüssel, Thermie project STR/1678/98/BE, Dezember 1999, erhältlich im Deutschen Kupferinstitut, Düsseldorf.

[4] Janus, Rudolf: Transformatoren. Frankfurt, 1993.

Bild 6 Handelsüblicher Giessharztransformator.

Bild 7 Innenleben eines Verteiltransformators sichtbar gemacht, hier an einem Museumsstück (Stadtwerke Hannover).





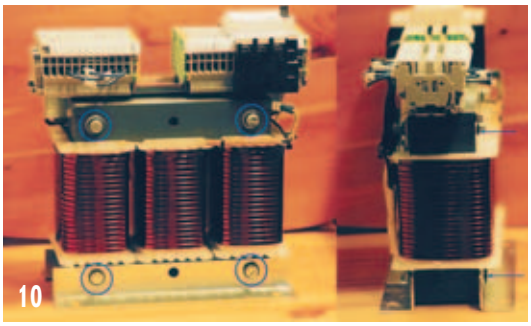


Bild 8 Der Standard seit etwa 1930: der Öltransformator, seit etwa 1965 mit Wellenkessel (Bild: Pauwels).

Bild 9 Jochpressung, Einspannung der Spulen (Bild: Rauscher & Stoecklin).

Bild 10 Ein Dreiphasen-Kleintrafo weist ganz ähnlichen Aufbau auf wie ein Verteiltrafo. Einseitige Isolierung der Jochpressbolzen ist Pflicht!

Bild 11 Die Jochträger sind hier noch aus Holz gefertigt. Gut zu sehen auch die Wicklungs-Ableitungen (Stadtwerke Hannover).

Tabelle 2 Entwicklung der Blechqualitäten.

schon unter 100 VA damit angefangen werden sollte, was leider kaum jemals erfolgt. Ein Dreiphasen-Kleintrafo (Bild 10) weist schon einen ganz ähnlichen Aufbau auf wie ein Verteiltrafo, nur runde Spulen erübrigen sich hier noch, aber die Jochträger sind ähnlich gestaltet, und einseitige Isolierung der Jochpressbolzen ist Pflicht! Umso wichtiger werden entsprechende Massnahmen bei den hier zur Diskussion stehenden Verteiltransformatoren, von den schon diskutierten Grosstransformatoren ganz zu schweigen.

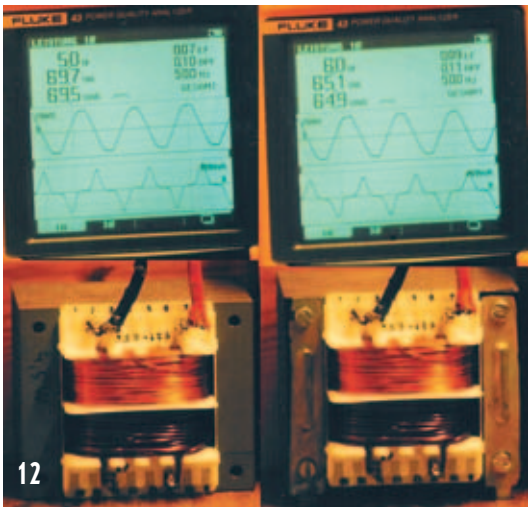
Bei den Jochträgern selbst war das kein Thema, als diese noch aus Holz gefertigt wurden (Bild 11), doch die vielfach auch bei Jochträgern aus Stahl noch angewendete Lochung der Jochbleche zum Einsetzen der Pressbolzen ist hierbei unumgänglich. Dabei müssen die Löcher gross genug sein, um auch noch eine Isolierhülse über den Bolzen schieben zu können, damit der Bolzen keine Stanzgrate der Bleche und höchstens einen Jochträger berührt, denn wenn es zu mehrfachen Kontakten kommt, ist praktisch eine Kurzschlusswicklung um einen entsprechenden Teil des Joches geschlossen. Der Querschnitt des Loches fehlt ausserdem teilweise beim Kernquerschnitt, und in dem Bolzen, der verständlicherweise nicht geblecht hergestellt werden kann, werden zusätzliche Wirbelströme induziert. Manchmal wählt man Bolzen aus Edelstahl, denn der ist eigenartigerweise selbst nicht ferromagnetisch, obwohl er vorwiegend aus ferromagnetischen Elementen wie Eisen und Nickel besteht. Somit zieht er die Magnetfelder nicht auf sich und erzeugt daher weniger Verluste durch Wirbelströme in seinem Inneren. Allerdings kann er das aus dem Kernblech herausgestanzte Eisen in keiner Weise ersetzen, was bei herkömmlichem Stahl zu einem gewissen Teil wohl der Fall ist.

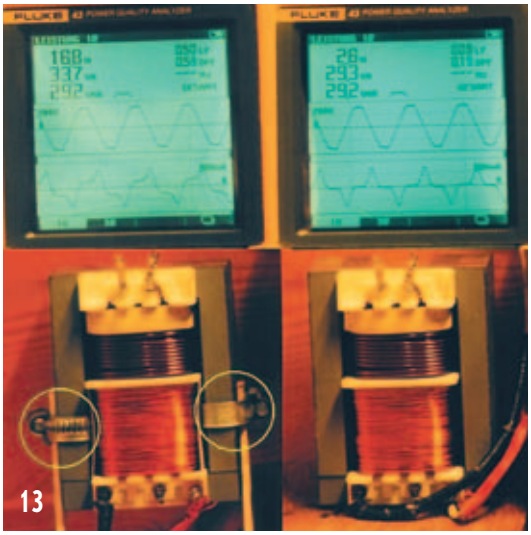
Diese beiden Effekte lassen sich durch einen Modellversuch an einem Kleintransformator zeigen (Bild 12): Nach Einsetzen der Bolzen in der für diese Grösse leider noch üblichen Art ohne Isolierbutzen fällt die Magnetisierungs-Blindleistung um etwa 7%, weil die Bolzen das in den Löchern fehlende Eisen teilweise ersetzen, doch die Leerlauf-Verlustleistung steigt aufgrund von Wirbelströmen in den Bolzen und vor allem wegen der erzeugten Schleifen um 20%!

Noch teurer als die Verwendung von Edelstahl, aber auch noch besser ist eine Konstruktion, die das Joch um-

2

Jahr	Material	Dicke mm	Verlust W/kg (50Hz)	bei Induktion T
1895	Eisendraht		6,00	1,0
1910	Warm gewalztes FeSi-Blech	0,35	2,00	1,5
1950	Kalt gewalzt, kornorientiert	0,35	1,00	1,5
1960	Kalt gewalzt, kornorientiert	0,30	0,90	1,5
1965	Kalt gewalzt, kornorientiert	0,27	0,84	1,5
1970	Kalt gewalztes HiB-Blech	0,30	0,80	1,5
1975	Amorphes Eisen	0,03	0,20	1,3
1980	Kalt gewalzt, kornorientiert	0,23	0,75	1,5
1980	Kalt gewalztes HiB	0,23	0,70	1,5
1983	Laser-behandeltes HiB-Blech	0,23	0,60	1,5
1985	Kalt gewalzt, kornorientiert	0,18	0,67	1,5
1987	Plasma-behandeltes HiB-Blech	0,23	0,60	1,5
1991	Chemisch gebeiztes HiB-Blech	0,23	0,60	1,5





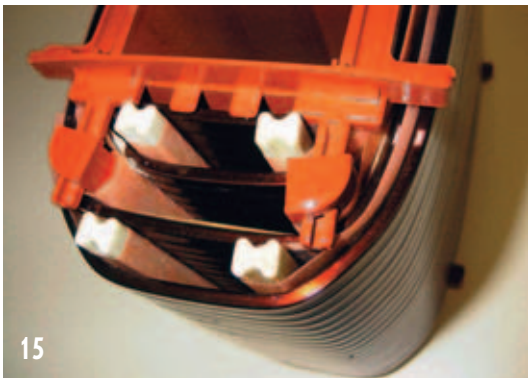


Bild 12 Bei Einphasen-Gerätetransformatoren sieht man es leider oft nicht so eng: Mit Abschlussblechen und entsprechenden Bolzen (rechts) ist die Magnetisierungs-Blindleistung zwar etwas geringer, aber die Leerlauf-Wirkleistung deutlich höher.

Bild 13 Wenig geniale Befestigung eines Kleintransformators: Die Leerlaufleistung steigt auf mehr als das Sechsfache des Wertes ganz ohne Befestigung. Die Leerlauf-Verlustleistung desselben Transformators rechts ohne Befestigung.

Bild 14 Fertigung einer Kupfer-Breitbandwicklung (Wieland Werke AG, Ulm).

Bild 15 Bei kleineren Transformatoren (hier z. B. 40 kVA) können die Spulen eckig um den eckigen Kern gewickelt werden (Bild: Riedel).

spannt (Bild 13), doch hier ist erst recht darauf zu achten, dass dieser Ring nicht elektrisch geschlossen ausgeführt wird, sonst entsteht eine Kurzschlusswicklung erster Güte. Eine Versuchskonstruktion an einem Einphasen-Kleintransformator, die so zwar auch niemand bauen würde, macht aber wiederum deutlich, welches Ausmass die Folgen annehmen würden.

Doch auch in elektrisch leitfähigen Teilen, die nicht innerhalb des Kerns, sondern lediglich in seiner unmittelbaren Nähe angeordnet sind, werden Wirbelströme induziert, besonders in ferromagnetischen Stoffen, die die Streufelder auf sich ziehen. Bei grösseren Transformatoren werden manchmal an der Innenseite des Kessels so genannte Flussfallen aus Kernblech angebracht, die die Streufelder auf sich ziehen sollen und durch die diese dann laufen sollten anstatt durch massive, nicht geblechte mechanische Stahlteile. Bei Trockentransformatoren kommen manchmal auch Spannbolzen und andere Schrauben aus Glashartgewebe zum Einsatz. In Öltransformatoren gibt es vereinzelt Schrauben und Muttern aus Kunstharz-Pressholz, einem hier viel verwendeten Werkstoff, doch für Wicklungsspannbolzen reicht dessen Festigkeit nicht.

Wicklungen

Bei Verteiltransformatoren wird für die Unterspannung wegen der geringen Windungszahlen und der hohen Querschnitte meist eine Breitbandwicklung gewählt, bei der also die fertige Spule ungefähr so lang ist wie das Band breit (Bild 14). Bei kleineren Baugrössen oder höheren Spannungen kommt auch eine Schmalbandwicklung in Betracht, die aus mehreren axial übereinander angeordneten Bandspulen besteht. Für die Oberspannungswicklung wird meist ebenfalls ein solcher gestufter Aufbau gewählt, jedoch bei kleineren Baugrössen aus Runddraht und bei grösseren aus Profildraht.

Die Spulen sind bei Kleintransformatoren zwar eckig (Bild 15) und können es bei Spezialbauformen im unteren Verteiltrafo-Segment auch noch sein, doch bei etwas grösseren Baugrössen werden sie elliptisch, und ab spätestens 1 MVA Bauleistung, je nach Hersteller auch schon weit darunter, werden sie von vornherein rund gefertigt, denn nach dem ersten Kurzschluss wären sie es ohnehin. Dafür sorgen die magnetischen Kräfte zwischen den Leitern, die bei Nennstrom keine Rolle spielen, aber mit dem Produkt aus den Strömen in Unter- und Oberspannungswicklung zunehmen. Die Stromrichtungen sind entgegengesetzt, und somit stossen sich die Spulen gegenseitig ab. Die äussere möchte nach aussen ausweichen, und da der Kreis bei gegebenem Umfang die grösstmögliche umfasste Fläche bietet, wird die äussere Spule spätestens jetzt rund, wenn sie es vorher noch nicht war, denn bei dieser Form hat sie den grösstmöglichen mittleren Abstand von der inneren Spule. Diese, meist die Unterspannungswicklung, wird gegen den Kern gedrückt, und besonders wenn es sich bis dato um eine Breitbandwicklung gehandelt hat, sieht diese nachher aus wie eine kupferne Verkleidung des Kerns. Deshalb sind die Spulen in axialer Richtung sehr stramm eingespannt, und eventuell vorhandene Anzapfungen in der Oberspannungswicklung, die einer Anpassung an abweichende Eingangsspannung z. B. im Bereich $2 \cdot \pm 2{,}5\%$ (5 Stufen inkl. Nennspannung) dienen, werden in der Mitte herausgeführt und nicht am Anfang oder am Ende. So bleibt die axiale Höhe des effektiv vom Strom durchflossenen Teils der Oberspannungsspule, also auch ihre relative Höhe zur Unterspannungsspule, nahezu gleich. Würde man oben oder unten einige Windungen wegschalten, träte im Kurzschlussfall eine erhebliche Kraft in axialer Richtung zwischen den Spulen

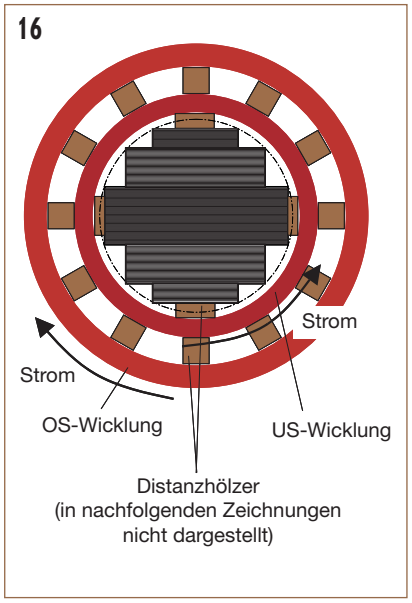


Bild 16 Bei grösseren Transformatoren wird der eckige Kern der runden Form der Spule halbwegs angepasst.

Bild 17 Prinzipieller Aufbau eines Aktivteils, hier die elegantere Variante mit ungelochten Jochen.

auf. Bei Veteranen, die nicht mehr die ursprüngliche mechanische Festigkeit aufweisen und deren Isolierstoffe auch schon altersschwach sind, ist dies oder ein Isolations-Durchschlag durch Blitzschlag dann oft das Ende. An Einsatzorten, an denen Jahrzehnte lang kein Kurzschluss und kein Blitzschlag auftritt, kann solch ein Transformator aber auch 60 Jahre lang in Betrieb bleiben, bis er aus wirtschaftlichen Gründen ausgetauscht wird.

Den eckigen Kern passt man den runden Spulen mehr oder weniger an, indem in bestimmten Breiten gestufte Bleche verwendet (Bild 16) werden. Die Joche haben genau den gleichen Querschnitt. Nur bei Grenzleistungstransformatoren wird die 5-Schenkel-Bauweise angewendet, um mit dem halben Jochquerschnitt auszukommen und so zur Beherrschung des Transport-Problems die Gesamthöhe etwas zu reduzieren. Eigentlich hat die 5-Schenkel-Bauform rechnerisch nur 4 Schenkel (3²/₂), denn auch die beiden äusseren Rückschlussschenkel müssen bei dieser Bauform nur den halben Fluss tragen. Ein Beispiel für den Sonderfall der 5-Schenkel-Bauweise beim Verteiltransformator folgt auf Seite 23 (Bild 36, Bild 37).

Den Aufbau des Aktivteils geben Bild 17 und 18 wieder, wobei der Aktivteil hier nicht so gross dargestellt werden kann, dass man den Versatz der Kernbleche sieht. Daher wird dieses Detail in Bild 18 vergrössert gezeigt. Normalerweise werden nämlich je 2, manchmal je 4 Bleche gegenüber den vorherigen 2 bzw. 4 Stück beim Schichten des Kerns um z. B. 15 mm versetzt, bei den Jochen nach links und rechts und bei den Schenkeln nach oben und unten. Ausserdem werden die unsymmetrischen Spitzen des Mittelschenkels mal nach links und mal nach rechts gelegt. So erzielt man einen Versatz der Stossstellen gegeneinander und dadurch einen besseren magnetischen Schluss.

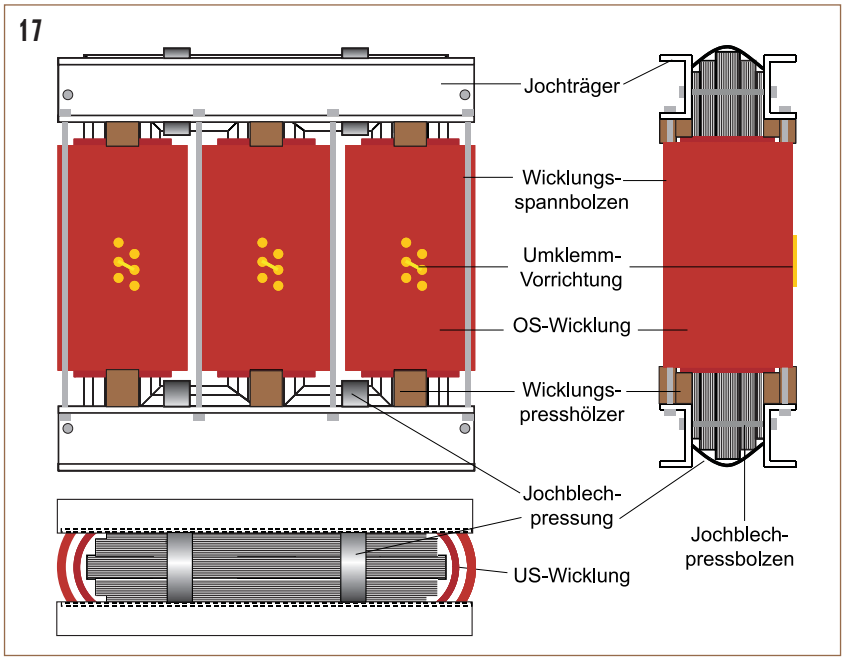
Sonderbauformen

Da das Öl im Hermetikkessel also 40 Jahre überdauern muss und sich während der gesamten Zeit jeglicher Kontrolle entzieht, muss es höchsten Qualitätsanforderungen gerecht werden. Leider bleibt es nichtsdestoweniger brennbar und leicht entzündlich. Deswegen wurde sein Einsatz vor einigen Jahrzehnten in Innenräumen und brandgefährdeten Anlagen verboten und durch PCB (polychlorierte Biphenyle) ersetzt, auch als Askarele oder Chlophene bekannt, eine Gruppe von Stoffen, die nicht oder kaum brennbar sind. Leider stellte sich dann spätestens nach dem Unglück von Seveso heraus, dass diese Stoffe zwar keinen Brand fördern, aber hochgiftige Dioxine bilden, wenn sie einem Brand ausgesetzt werden.

Auf der Suche nach Alternativen kam man auf die schwer entzündlichen, ungiftigen, synthetischen Silikonöle. Dies sind, grob gesagt, Kohlenwasserstoffe, bei denen man den Kohlenstoff durch das chemisch ähnliche Silizium ersetzt hat. Diese fanden aber wenig Verbreitung, zumindest nicht in den hier zur Debatte stehenden Grössenklassen. Statt dessen erfuhr der Trockentrafo wieder einen Aufschwung, jetzt weniger mit Lack und Papier, sondern zumeist als Giessharztransformator realisiert. Der kann je nach geforderter Schutzart völlig frei aufgestellt oder mit einem entsprechenden Gehäuse versehen werden.

Als Leiterwerkstoff kommt auch beim Verteiltrafo sowohl Kupfer als auch Aluminium in Betracht. Da es der kompakten Bauform dient, fällt die Wahl jedoch meist auf das an sich schon teurere Kupfer, von dem dann – nach Masse – auch noch mehr benötigt wird.[5] Am Ende siegt jedoch meist das geringere Volumen des Kupferleiters, der weniger Wickelraum benötigt und so zum vielleicht etwas schwereren, aber dennoch etwas kleineren Transformator führt. Nur beim

[5] Fassbinder, Stefan: «Elektrische Leiterwerkstoffe in der Praxis», «de» 23&24/2001 gig.



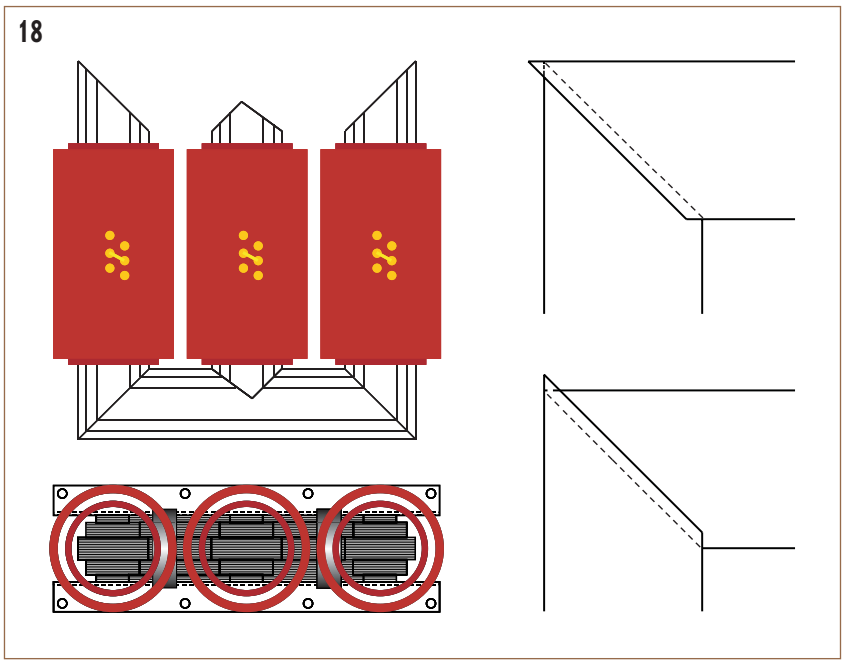


Bild 18 Jochträger und Wicklungsspannbolzen abmontiert und oberes Joch ausgeschachtelt, damit der innere Aufbau erkennbar wird.

Bild 19 Rohrharfenkessel, Schweiz, (Bild: Rauscher & Stoecklin) 1958, in Schwellenländern ohne Lohnkostenproblem auch heute noch vielfach gebaut.

Giessharztransformator verwendet man lieber Aluminium, weil es einen grösseren Wärme-Ausdehnungskoeffizienten hat, der näher bei den allgemein sehr hohen Ausdehnungskoeffizienten organischer Stoffe liegt und so sich thermische Spannungen innerhalb des harten Wicklungskörpers reduzieren.

Eine ganz besondere Sonderbauform wurde 1987 entwickelt. 25 Jahre zuvor hatte es einen ähnlichen Vorstoss schon einmal gegeben: gasgekühlte Transformatoren. Physiker denken hier sofort an Wasserstoff, da dieser über eine sehr hohe Wärmekapazität verfügt. Diese physikalische Grösse wird aber stets auf die Masse bezogen, und die ist bei Wasserstoff mit knapp einem Zehntel der Dichte von Luft sehr gering. Geht es um die erforderliche Umlaufgeschwindigkeit in einem Kühlkreislauf, ist aber eine hohe Wärmekapazität pro *Volumen* gefragt, denn der Strömungswiderstand wächst im Quadrat zum Volumenstrom in einem gegebenen System. So fiel die Wahl auf das als Isoliermittel in Schaltanlagen schon lange bekannte Schwefelhexafluorid (SF_6) mit der fünffachen Dichte von Luft und einer erheblich besseren Durchschlagsfestigkeit. Damit hatten dann die Ingenieure bei Durchschlagsversuchen an einem eigens gebauten, oben offenen Prüfbehälter (der sich mit SF6 füllen lässt wie mit Wasser, wenn man vorsichtig von unten füllt) auch ihren Spass am Schwimmen-lassen von Luftballons auf der unsichtbaren Gasfüllung. Einatmen dieses völlig ungiftigen und chemisch inerten und deswegen so isolationsfesten Gases führt zum umgekehrten Effekt wie die bekannte Helium-Piepsstimme – das nur am Rande. Die Selbstversuche machten aber deutlich, wie ungefährlich dieses Gas ist, da alle Beteiligten den Schabernack unbeschadet überstanden. Von entsprechenden Versuchen mit Wasserstoff muss dringend abgeraten werden, vor allem für Raucher. Ist die Wärmekapazität eines Kilogramms SF6 auch nur halb so gross wie die eines Kilogramms Luft, so ist dies aber immer noch das 2,5fache pro Liter und bedeutet, dass 40% der Umlaufgeschwindigkeit reichen, um die gleiche Kühlwirkung zu erzielen. Das reduziert die erforderliche Lüfterleistung auf etwa 32% derer für eine äquivalente Luft-Zwangskühlung. 2 Prototypen zu je 2 MVA mit Wellenkessel und innerer Zwangskühlung (also Kühlart GFAN, gas forced, air natural) wurden gebaut und in einem explosionsgefährdeten Bereich einer chemischen Fabrik in Betrieb genommen – genauer gesagt beim Hersteller des Gases, der diese Entwicklung verständlicherweise unterstützte.

Sowohl die Durchschlagsfestigkeit als auch der Kühleffekt lassen sich steigern, indem man das Gas durch Erhöhung des Drucks verdichtet. So folgte ein weiterer Versuchstyp mit einem handgeschweissten Rohrharfenkessel nach altväterlicher Sitte (Bild 19), für heutige Verhältnisse viel zu lohnintensiv, doch wenigstens konnte daran nachgemessen werden, dass die vorausberechnete Erwärmung ungefähr stimmte, und darum ging es. Der Transformator Kühlart GFAN leistete 630 kVA bei 3 bar Überdruck und vertretbarem Bauvolumen. Um ein wirtschaftlicheres Produktions-Verfahren kümmerte man sich anschliessend. Tatsächlich sollen diese Transformatoren sich recht gut als Etagen-Trafos für Hochhäuser nach Fernost verkaufen oder doch zumindest eine Zeit lang verkauft haben. Im Inland scheiterte eine weite Verbreitung an der hier zu Lande sehr strengen Druckbehälter-Verordnung. Prinzipiell aber funktionierte die Technik.

Betriebsverhalten von Verteiltransformatoren

Einige Parameter eines Transformators, die dieser an sich zwangsläufig mit in das Netz einbringt, sind aber nichtsdestoweniger in bestimmtem Masse für den Netzbetrieb erwünscht, wenn nicht notwendig. Nachfolgend wird beschrieben, wie man bei Herstellung und Auswahl eines Verteiltransformators das optimale Mass trifft.

In einem Verteiltransformator mit einer Kurzschlussspannung von 6% fallen bei Nennstrom 6% der Spannung an inneren Impedanzen ab. Somit bricht die Spannung bei Nennlast gegenüber der Leerlaufspannung bereits um 6% ein. Hinzu kommen die Spannungsfälle der Kabel und Leitungen hinter dem Trafo und des vorgelagerten Netzes, so dass mit einem Spannungsverlust von gut 10% gerechnet werden muss. Oh je! So viel? – Nein, zum Glück nicht wirklich. Lassen Sie uns etwas genauer beleuchten, was denn sonst mit dem Begriff Kurzschlussspannung gemeint ist.

Kurzschlussspannung

Das Betriebsverhalten eines Transformators wird zunächst einmal durch die Nennspannungen und die Nennleistung charakterisiert; das muss an dieser Stelle nicht vertieft werden. Als nächste wichtige Kenngrösse folgt die Kurzschlussspannung. Der Ausdruck wirkt vielleicht befremdlich auf Nichteingeweihte, denn per allgemeiner Definition ist die Spannung im Kurzschlussfall null. Per *spezifischer* Definition ist hier aber der *Kurzschluss* an der *Ausgangsseite* und die *Spannung* an der *Eingangsseite* gemeint: Schliesst man die Ausgangswicklung eines Trafos kurz und legt an die Eingangswicklung eine Spannung, die gerade hoch genug ist, um in der Ausgangswicklung den Nennstrom zu treiben, so nennt man diesen Wert Kurzschlussspannung (U_K), jedoch meist nicht in Volt, sondern in Prozent der Nennspannung angegeben (u_K). Bei Grosstransformatoren können Werte von 18% bis 22% erreicht werden. Bei Verteiltransformatoren dagegen sind die Nennwerte 4% für kleinere Einheiten (bis 630 kVA) und 6% für grössere Einheiten (ab 630 kVA) üblich. Bei der Grösse 630 kVA kommen beide Nennwerte, 4% und 6%, vor. Der tatsächliche Wert wird bei der Endprüfung gemessen und auf dem Leistungsschild angegeben (Bild 20). Die Abweichung ist jedoch meist ohne praktische Relevanz.

Die Kurzschlussspannung charakterisiert also den Spannungsfall im Trafo. Damit lässt sich recht einfach der Kurzschlussstrom I_K berechnen. Bei einem Transformator mit $u_K = 6\%$ beispielsweise beträgt er unter Vernachlässigung aller vorgelagerter Impedanzen

$$I_K = \frac{I_N}{u_K} = \frac{I_N}{6\%} \approx 16{,}7\, I_N$$

Bei $u_K = 6\%$ sind also 6% der Nenn-Eingangsspannung erforderlich, um in der kurzgeschlossenen Ausgangswicklung den Nennstrom zu treiben. Der Spannungsfall in einem Verteiltransformator von wenigstens mittlerer Grösse besteht aber nur zum kleineren Teil aus dem Wirkanteil u_R der ohmschen Wicklungswiderstände und zum weit grösseren aus dem reaktiven, induktiven Fall u_X. Dieser rührt aus der Streuinduktivität her, verursacht durch jenen Teil des magnetischen Flusses, der als Streufluss den Kern umgeht und jeweils nur eine Wicklung durchsetzt, nicht Ober- und Unterspannungswicklung gleichzeitig, sondern z. B. den Haupt-Streukanal zwischen der gewöhnlich aussen liegenden Oberspannungswicklung und der inneren Unterspannungswicklung (siehe Teil 2: Aufbau). Damit sind ganz nebenbei auch Einflüsse aus der Unlinearität des Eisens auf die Kurzschlussspannung ausgeschlossen. Man spricht bei u_X auch von der Streuspannung. Der Haupt-Streukanal dient erstens der Kühlung, zweitens der Isolierung und drittens eben der Einhaltung der so genannten Streureaktanz, also im Endeffekt einer definierten Kurzschlussspannung.

Nun addieren sich aber der induktive Spannungsfall u_X und der ohmsche Fall u_R quadratisch zum Gesamt-Spannungsfall u_K wie die Katheten in einem rechtwinkligen Dreieck zur Hypotenuse. Dabei, wie gesagt, ist u_R segensreicherweise meist der kleinere Teil, umso kleiner, je grösser der Trafo. Rechnen Sie nach: Wenn ein solcher Transformator in der Grössenklasse um 630 kVA bei Nennlast einen Wirkungsgrad von 98,5% hat, dann kann der ohmsche Spannungsfall an beiden Wicklungen zusammen höchstenfalls 1,5% der Nennspannung betragen. Praktisch ist es weniger, beispielsweise nur 1%, weil in diesen 1,5% nicht nur ohmsche Verluste der Wicklungen enthalten sind. Unser $u_K = 6\%$ besteht also aus $u_R = 1\%$ und $u_X = 5{,}91\%$ der Nennspannung.

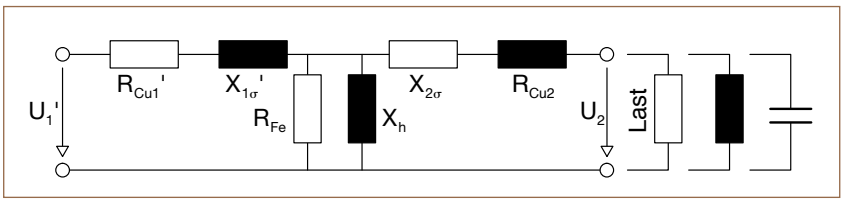
Bild 20 Der bei der Endprüfung gemessene Wert der Kurzschlussspannung wird stets auf dem Leistungsschild angegeben.

Ohmsche Last

Die Nennleistung eines Transformators bezieht sich aber stets auf ohmsche Last. Somit addiert sich nur der ohmsche Widerstand der Wicklung linear zur (Nenn-)Last, der induktive Widerstand der Streuinduktivität aber wiederum quadratisch. Also addiert sich zum Widerstand der Last nur 1% aus dem Wicklungswiderstand direkt, und die restlichen 5,91% haben wiederum nur denkbar wenig Einfluss auf den Gesamt-Spannungsfall von Trafo und Last. Wie viel, das wollen wir jetzt heraus bekommen.

Zur Veranschaulichung des Betriebsverhaltens dient das Ersatzschaltbild des Transformators (Bild 21). Darin wird so getan, als hätten Eingangs- und Ausgangswicklung glei-

21



che Windungszahlen. Da dies normalerweise nicht wirklich der Fall ist, werden die Werte einer Seite über das Verhältnis der Windungszahlen auf die andere Seite umgerechnet. So wird das Verhalten aus Sicht der jeweiligen Seite berechenbar. Geht es nur um den Betrag des Spannungsfalls bei Nennlast, so gilt vereinfacht:

$$U_2 = U_1' - I_{Last} \cdot \left(R_{Cu1}' + R_{Cu2} + \frac{(X_{1\sigma}' + X_{2\sigma})^2}{R_{Last}} \right)$$

wobei

U_2	Sekundärspannung,
$U_1' = \frac{n_2}{n_1} U_1$	auf Sekundärseite bezogene Primärspannung, die man mit sehr guter Näherung auch mit der sekundären Leerlaufspannung U_{20} gleichsetzen könnte,
$R_{Cu1}' = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_{Cu1}$	auf Sekundärseite bezogener Widerstand der Primärwicklung,
R_{Cu2}	Widerstand der Sekundärwicklung,
$X_{1\sigma}' = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 X_{1\sigma}$	auf Sekundärseite bezogene Streureaktanz der Primärwicklung,
$X_{2\sigma}$	Streureaktanz der Sekundärwicklung,
n_1	Primär-Windungszahl,
n_2	Sekundär-Windungszahl.

Darin stehen I_{Last} und R_{Last} natürlich in Beziehung zueinander:

$$R_{Last} = \frac{U_2}{I_{Last}}$$

und lassen sich also nicht unabhängig voneinander ändern.

Dabei blieben die Grössen
R_{Fe} Eisenwiderstand
X_H Hauptreaktanz
unberücksichtigt. Die Werte sind normalerweise (ausser bei Kleintransformatoren) so gross, dass die durch diese Elemente fliessenden Ströme zumindest für die Auswirkungen des Trafos auf die angeschlossenen Lasten (nicht für seine inneren Verluste; mehr dazu in der nächsten Folge) ohne Bedeutung sind. X_H ist die Reaktanz im Leerlauf (hier auch auf Sekundärspannung bezogen, als würde der Trafo von der Ausgangsseite her erregt, was prinzipiell vorkommen kann, z. B. bei der Messung für Bild 22). Da der Leerlaufstrom eines guten Verteiltransformators nur 0,5% des Nennstroms beträgt (Bild 22) und zu mehr als der Hälfte aus dem Magnetisierungsstrom besteht, heisst dies umgekehrt, dass X_H als Hauptursache des Leerlaufstroms dem Betrag nach mindestens 200 Mal so gross sein muss wie die Lastimpedanz. R_{Fe} ist ein fiktiver Widerstand, der die Eisenverluste repräsentiert, und ist in der Regel (bei gutem Eisen) dem Betrage nach noch erheblich grösser als X_H. Somit ist die Parallelimpedanz dieser beiden Elemente, die das Leerlaufverhalten bestimmen, deutlich über 100 Mal so hoch wie die Lastimpedanz. Die Kurzschlussimpedanz, also die effektive Summe aus $X_{1\sigma}'$, $X_{2\sigma}$, R_{Cu1}' und R_{Cu2}, die in Reihe zur Last liegt, ist dagegen per Definition bei 6% Kurzschlussspannung nur 0,06-mal so gross wie die Lastimpedanz. Die Kurzschlussimpedanz ist also um mehr als 100/0,06, also sagen wir fast 2000-mal kleiner als die Parallelimpedanz aus R_{Fe} und X_H. Daher können die durch R_{Fe} und X_H fliessenden Ströme für das Verhalten des Transformators gegenüber der Last, erst recht für das Verhalten im Kurzschluss, vernachlässigt werden, und die Streureaktanz lässt sich vereinfacht schreiben als:

$$X_\sigma = X_{1\sigma}' + X_{2\sigma} \approx 2X_{2\sigma}.$$

Entsprechend gilt vereinfacht für die ohmschen Anteile der Kurzschlussimpedanz:

$$R_K = R_1' + R_2 \approx 2R_2.$$

Damit lässt sich das Verhalten recht bequem und hinreichend genau berechnen. Zwar gibt Bild 21 die erhebliche Unlinearität des Eisens und die damit, wie in Bild 22 zu sehen war, in der Praxis stark verzerrte Kurvenform des Magnetisierungsstroms nicht wieder, doch da der Magnetisierungsstrom effektiv nur so gering ist, ist das Ersatzschaltbild praxistauglich. Ja, der Magnetisierungsstrom kann im Vergleich zum Nennstrom meist ganz vernachlässigt werden, wie oben geschehen.

Dann stellen sich die Spannungsfälle am belasteten Transformator so dar wie in Bild 23 gezeigt. Das Zeigerdiagramm ist wie eine Stroboskop-Aufnahme zu verstehen. Die einzelnen Spannungen lassen sich als Vektoren darstellen, die um den Nullpunkt (unten) kreisen, analog zur Erzeugung

22

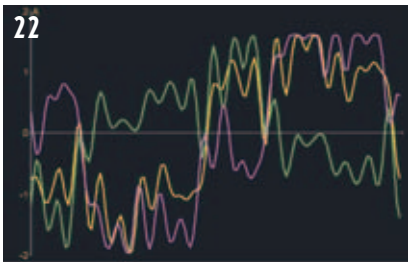
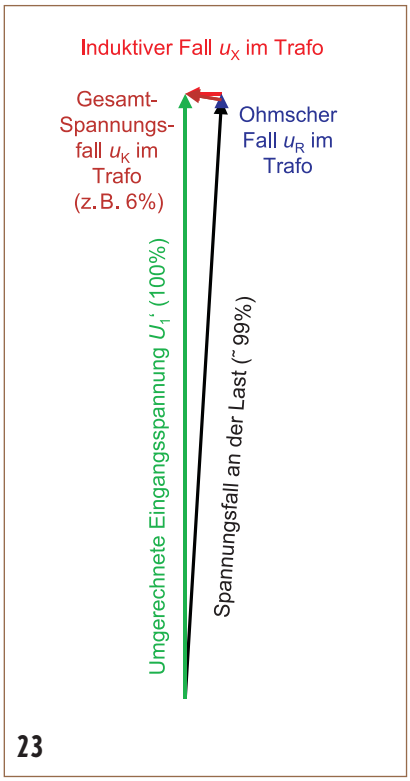


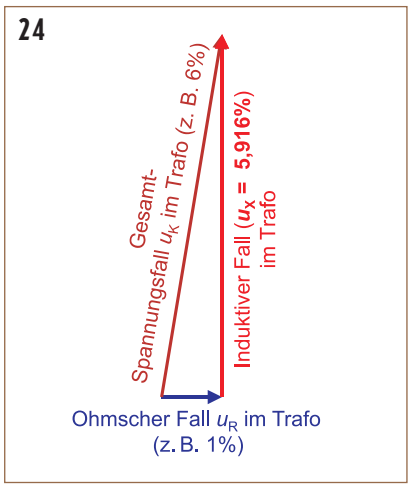
Bild 21 Allgemein gültiges einphasiges Ersatzschaltbild des Zweiwicklungs-Transformators.

Bild 22 Leerlaufströme eines hochwertigen Schweizer Verteiltransformators 630 kVA, hier von der Unterspannungsseite her (400 V) erregt. Die Ströme sind also relativ zum Nenn-Ausgangsstrom (909 A) zu sehen!

Bild 23 Vektorielle Aufteilung der Spannungsfälle am Transformator mit Nennlast (ohmsch).



23



der Wechselspannung in rotierenden Maschinen. Die Eingangsspannung (grün) dient als Referenz und wird immer im positiven Spannungsscheitel, also in senkrechter Lage des Spannungspfeils, belichtet. Die vektorielle Summe aller Spannungsfälle muss stets gleich der anliegenden Spannung sein, also muss die Aneinanderreihung der Spannungsfallpfeile, wenn sie von derselben Stelle ausgehen, auch an derselben Stelle ankommen wie der grüne Vektor der treibenden Spannung. Dann erkennt man: Am Ausgang dieses Transformators mit u_K = 6% und u_R = 1% stellen sich dem Betrage nach bei Nennlast

Bild 24 Darstellung der Spannungsfälle im Transformator allein, gegenüber der Wirklichkeit etwa um den Faktor 10 vergrössert dargestellt.

Bild 25 Induktive Belastung

Bild 26 Kapazitive Belastung

noch beinahe 99% der Leerlaufspannung ein und nicht etwa nur 94%. Nur die Phasenlage ist am Ausgang etwas anders als am Eingang, doch das ist der Last egal.

Die Spannungsfälle innerhalb des Trafos (das so genannte Kappsche Dreieck) sind in der Darstellung kaum erkennbar. Vor allem der ohmsche Anteil versinkt in der Unscheinbarkeit – zum Glück, denn er repräsentiert ohmschen Verlust. Wenn man diese Spannungsfälle sichtbar machen will, muss man sie einzeln, ohne die Eingangs- und Ausgangsspannung, vergrössert herauszeichnen (Bild 24).

Induktive Last

Anders sieht die Sache bei induktiver Last aus. Diese addiert sich linear, also voll, zum induktiven Fall im Trafo und quadratisch zu dem viel kleineren ohmschen Anteil. Die Berechnung der Ausgangsspannung sieht nun im Gegensatz zur ohmschen Last wie folgt aus:

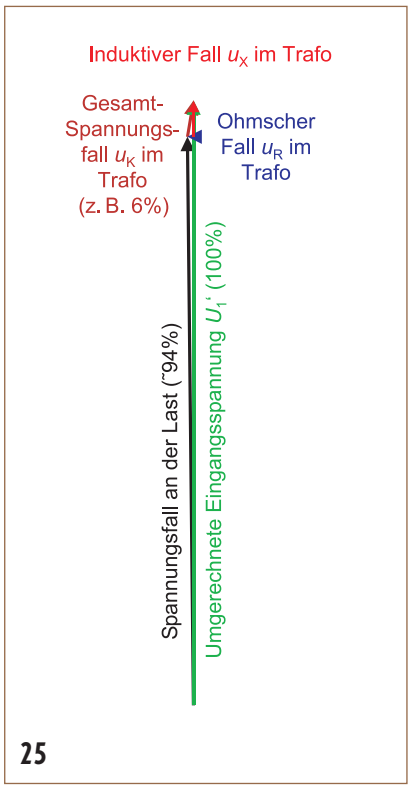
$$U_2 = U_1' - I_{Last}\left(X_{1\sigma}' + X_{2\sigma} + \frac{(R_{Cu1}' + R_{Cu2})^2}{R_{Last}}\right)$$

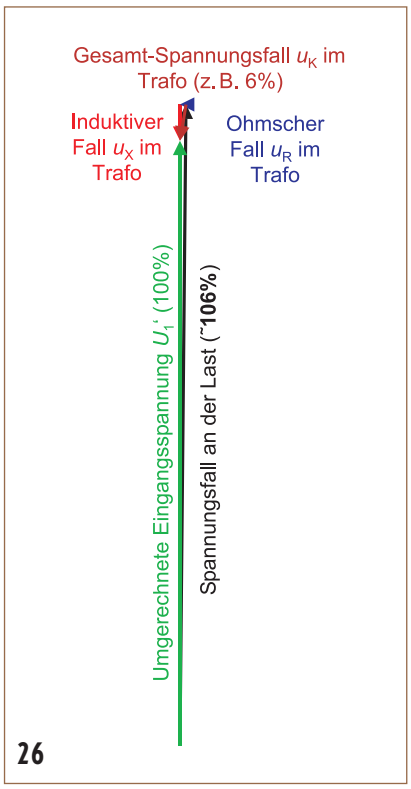
oder mit der getroffenen Vereinfachung:

$$U_2 = U_{20} - I_{Last}\left(X_\sigma + \frac{R_{Cu}^{\ 2}}{R_{Last}}\right)$$

Bei Nennstrom (zumindest dem Betrage nach, denn die Nennlast ist definitionsgemäss, wie gesagt, eine ohmsche Last) bricht die Ausgangsspannung daher tatsächlich um fast 6% ein (Bild 25). Dies bietet die Möglichkeit, durch Blindstrom-Kompensation parallel zur Last den Transformator zu entlasten, denn das ist gewöhnlich der Sinn der Kompensation. Es mindert den Kupferverlust, vor allem aber den Spannungsfall, da dieser vorwiegend induktiver Natur ist. Bei wechselnder induktiver Last muss die Kompensations-Anlage geregelt ausgeführt werden. Je schneller die Last wechselt, desto schneller muss der Regler arbeiten können. Mit solchen Anlagen lassen sich Flickerstörungen vermeiden, wie sie von schnell wechselnden, stark induktiven Lasten verursacht werden, etwa von Punktschweissmaschinen und von häufig geschalteten Drehstrom-Asynchronmotoren (ohne Stromrichter). Wer einmal neben einem Baukran (ohne solche Kompensations-Anlage) gewohnt hat, weiss, wovon hier die Rede ist.[6] Mittlerweile stehen auch mobile Einheiten gegen solche »mobilen Störer« zur Verfügung.[7]

Auf diese Art lässt sich auch feststellen, ob der Spannungsfall an der heimischen Steckdose stärker von der Streuinduktivität des Verteil-Transformators oder stärker vom ohmschen Widerstand der Leitungen her rührt: Ein Heizlüfter mit 9 A Strom-Aufnahme lässt beim Betrieb die Spannung an einer bestimmten Steckdose von 230,7 V auf 226,3 V fallen. Wird eine grosse induktive Last angeschlossen, die gut den vierfachen Strom aufnimmt (Bild 27), so ist der Span-





[6] Fassbinder, Stefan: *Netzstörungen durch passive und aktive Bauelemente,* VDE Verlag, Berlin / Offenbach 2002, S. 188.

[7] Bolliger, R.: *Wenn die Lichter flackern.* ET Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik 11/2003, S. 26.

27

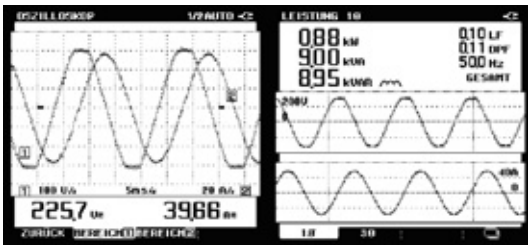


Bild 27 Grosse induktive Last an einer Haussteckdose.

Bild 28 Der Ausgangsstrom eines Transformators mit u_R = 1% und u_K = 6%, also $I_K \approx 16{,}7 \cdot I_N$, steigt bei 16,7-facher kapazitiver Überlast theoretisch auf 100 · I_N!

Bild 29 Derjenige Ausschnitt aus Bild 28 mit den tatsächlich in der Praxis vorkommenden Stromwerten.

nungsfall auch nicht grösser. Daraus darf gemäss den im letzten Abschnitt «Ohmsche Last» dargestellten Zeigerdiagrammen geschlossen werden, dass der ohmsche Widerstand den deutlich grösseren Anteil hat – jedenfalls bei *dieser* Leitung und *diesem* Trafo. Vorsicht jedoch bei diesem Versuch: Er stellt eine erhebliche Überlastung dar und muss daher auf kurze Zeit gegrenzt werden, sonst löst der 16-A-Leitungsschutzschalter aus, und der ist normalerweise für einen Leistungsfaktor-Bereich von 1 bis 0,6 ausgewiesen. Zum Abschalten einer praktisch rein induktiven Last ist er nicht notwendigerweise geeignet.

Kapazitive Last: Mit Vorsicht zu geniessen!

Aber richtig interessant wird es erst bei kapazitiver Belastung. Prinzipiell stellt das den schon erwähnten Fall der Erregung von der Ausgangsseite dar, also eine Kompensation der induktiven Magnetisierungs-Blindleistung durch die kapazitive Last. Wenn die Last so gering ist, dass es gerade eben zum Kompensieren reicht, wird erst einmal nur der Trafo erregt, aber das ist normal und muss so sein, von welcher Wicklung her auch immer. Mit zunehmender kapazitiver Last allerdings besteht auch für die Nutzer zunehmend Anlass zur Erregung, denn der Laststrom verursacht an der Streureaktanz einen um 90° voreilenden und an der kapazitiven Last einen um 90° nacheilenden Spannungsfall. Mit anderen Worten: Diese beiden Spannungsfälle haben entgegen gesetzte Vorzeichen und *subtrahieren* sich voneinander statt sich zu addieren. Bei 100% Eingangsspannung haben wir also knapp 6% Spannungsfall an den Streureaktanzen und folglich fast 106% der Leerlaufspannung an der Last – Überspannung also am Ausgang bei vollem Laststrom trotz Nennspannung am Eingang (Bild 26).

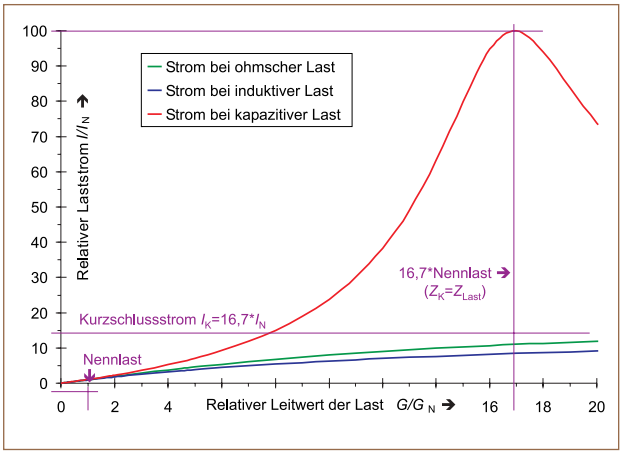
Da die Last, genauer gesagt ihre Impedanz, als konstant angenommen werden muss, erhöht sich der Strom entsprechend der höheren Spannung und erzeugt wieder mehr Spannungsfall im Trafo und also noch mehr Spannung am Ausgang. Am Ende pendelt sich die Spannung bei etwas über 106% statt knapp unter 106% ein, so geschehen, als ein Mittelspannungs-Kunde eines EVU auf der Mittelspannungsseite eine Kompensations-Anlage von 1400 kVAr angeschlossen haben wollte, denn dort wurde auch gemessen und gezählt. Es erwies sich aber als billiger, eine Niederspannungs-Anlage zu kaufen und über einen 1600-kVA-Transformator anzuschliessen. *Billiger* – nicht etwa kostengünstiger, um dies bei dieser Gelegenheit am Rande zu erwähnen, denn diese Methode erspart nur den Mehrpreis, den das EVU sonst für die Blindleistung in Rechnung gestellt hätte. Warum aber stellt das EVU den Blindstrom in Rechnung? Weil er das Netz belastet und Verluste verursacht. Das tut er in der Kunden-Anlage genau so, und daran ändert sich gar nichts, wenn man zentral eine einzige grosse Kompensations-Anlage errichtet und nicht dezentral viele kleine. Das gehört aber zum Thema Kompensation und nicht zu Transformatoren.

Beim Probelauf besagter Anlage stieg dann auch gleich die Strangspannung von 230 V auf 255 V an, denn dieser Transformator war mit dieser kapazitiven Last nahezu ausgelastet. Im vorliegenden Fall konnte das Problem gelöst werden, indem der Transformator eingangsseitig auf 22 kV umgeklemmt wurde, obwohl nur 20 kV anstanden. So konnte die Ausgangsspannung wieder ungefähr auf den Nennwert gesenkt werden. So und nur so konnte Über-Erregung des Transformators vermieden werden, denn der Erregerstrom kommt in diesem Fall von der Ausgangsseite her! Dies ist hier ausnahmsweise die Referenzseite.

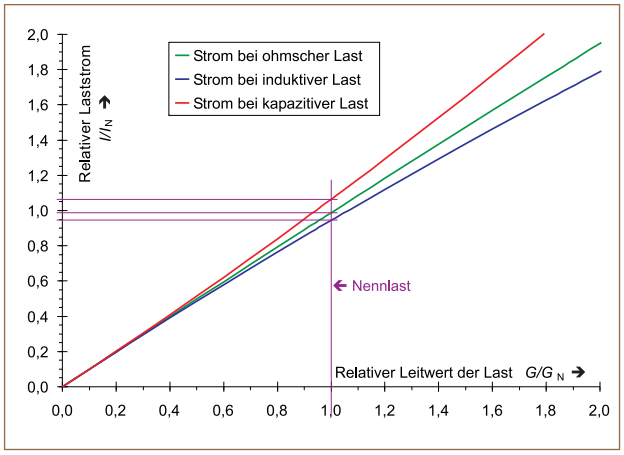
Bei starker Überlastung jedoch setzt irgendwann eine Eskalation ein. Strom-Überlast erzeugt Spannungs-Überlastung sowohl der Last als auch des Transformators, Überspannung an der Last erzeugt weitere Strom-Überlast und so fort. Die Zusammenschaltung aus Streureaktanz und kapazitiver Last bildet einen Schwingkreis. Dieser hat eine bestimmte Resonanzfrequenz f_0, die sich nach

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

28



29



berechnet. Bei dieser Frequenz sind die induktive Streureaktanz und die kapazitive Reaktanz der Last dem Betrage nach gleich gross mit umgekehrten Vorzeichen, heben sich also gegenseitig auf. Bei Nennstrom ist dies zwar nicht der Fall, sondern, um bei unserem Beispiel-Transformator mit $u_K = 6\%$ zu bleiben, dort ist die Reaktanz der Last noch etwa 16-mal so gross wie die innere Reaktanz des Trafos. Die Resonanzfrequenz liegt dann also bei

$$f_0 = \frac{50\ Hz}{\sqrt{16}} = 200\ Hz$$

Wenn in dieser Gegend aber eine Rundsteuerfrequenz liegt, werden die Rundsteuersignale durch den Reihensaugkreis aus der Streureaktanz des Transformators und der kapazitiven Last kurzgeschlossen und gehen so verloren, erreichen also die Niederspannungsebene gar nicht mehr. Bei einem Trafo mit $u_K = 4\%$ verschiebt sich der kritische Punkt nach 224 Hz. Wäre die kapazitive Last veränderlich, etwa durch einen Blindleistungsregler, würde sich auch dieser kritische Punkt ziemlich unkontrollierbar verändern.

Belastet man den Transformator nun mit 16-facher kapazitiver Überlast, rutscht die Resonanzfrequenz herab auf 50 Hz. In diesem Punkt würde die induktive Streureaktanz von der kapazitiven Lastreaktanz kompensiert und der Strom nur noch durch den Wicklungswiderstand begrenzt, und er stiege daher fast auf den *6-fachen Kurzschlussstrom bzw. 100-fachen Nennstrom!* In Bild 28 wird der tatsächliche Strom über dem Betrag des Leitwerts G der Last als Verhältnis zum Nenn-Leitwert

$$G_N = \frac{I_N}{U_N}$$

aufgetragen, abhängig vom Phasenwinkel der Last. Bei

$$G = \frac{G_N}{6\%} \approx 16{,}7\ G_N$$

ist die Impedanz der Last gleich der inneren Impedanz des Transformators. Das bedeutet aber keinesfalls immer, dass hier die Ausgangsspannung der halben Leerlaufspannung entspricht. Bei Weitem nicht, sonst hätten wir die Rechnung ohne den Phasenwinkel gemacht. Erst im Unendlichen, was dem Kurzschluss entspricht, treffen sich die Kurven der ohmschen, der induktiven und der kapazitiven Last wieder.

Zum Glück kommt eine solch grosse kapazitive Last in der Praxis nicht vor. Das Gedanken-Experiment zeigt aber, wie rasant die Entwicklung bei zunehmender kapazitiver Last in diese Richtung geht. Betrachtet man den für reale Betriebsströme in Frage kommenden Bereich vergrössert (Bild 29), so bestätigt sich das Gesagte: Bei (ohmscher) Nennlast stehen an den Klemmen noch 99% der Leerlaufspannung an, bei gleich grosser induktiver Last nur 94% und bei gleich grosser kapazitiver Last etwa 107%. Bei kapazitiver Last ist also Vorsicht geboten.

Eine momentane Überlastung eines Transformators mit kapazitiver Last kommt allerdings sehr wohl vor und wird mitunter ganz bewusst eingesetzt, um die Spannungs-Einbrüche und die daraus entstehenden Flickerstörungen ohmscher und ohmsch-induktiver Impulslasten zu eliminieren. Die entsprechende Kapazität wird zeitgleich mit der kritischen Last an den Trafo geschaltet, und die sich ergebende Spannungs-Überhöhung kompensiert den Spannungs-Einbruch, den die kritische Last allein verursacht hätte. Bei der Dimensionierung solcher Anlagen ist jedoch erst recht Vorsicht geboten. Obwohl der Spannungs-Einbruch durch Hinzuschalten der kapazitiven Last zur ohmschen, z. B. einer Punktschweissmaschine, verschwindet, ist der Gesamt-Laststrom doch grösser, belastet also den Transformator stärker als die störende Last allein. Nur wenn der Flicker von einer induktiven Last herrührt, wie etwa bei genanntem Baukran, ist es umgekehrt. Hier bietet die Kompensation wirklich eine Entlastung des Transformators. In beiden Fällen empfiehlt sich eine gemeinsame Ansteuerung der Last und der Entstör-Kompensation, um sie einmal so zu nennen, damit sie agiert statt reagiert und jegliche Reaktionszeit entfällt.

Schaltgruppen

Verteiltransformatoren sind normalerweise nach Schaltgruppe Dyn5 aufgebaut. Das bedeutet: Die Oberspannungswicklung ist im Dreieck und die Unterspannungswicklung ist im Stern verschaltet. Der Sternpunkt ist ausgeführt (als Anschluss für den Neutralleiter). Eingangs- und Ausgangsspannung haben eine Phasenverschiebung von 150° gegeneinander, das sind 5 · 30°. Eine Phasenverschiebung ist prinzipiell nur in 30°-Schritten möglich, daher die Kennzahl 5 für 150°. Zumindest ist dies so, solange man sich auf Zickzack-Schaltungen beschränkt, bei denen der im Dreieck und der im Stern verschaltete Teil der betreffenden Wicklung gleiche Spannungen haben. In der Vergangenheit machten andere Verhältnisse keinen Sinn, daher diese Art der Klassifizierung. Heute werden für Spezialzwecke durch ein Spannungs-Verhältnis von 1:3 auch 15°-Schritte erzeugt, ohne dass diese Varianten jedoch z. B. «Schaltgruppe 4½» genannt würden. Sie dienen zur Herstellung von mehr als 12-pulsigen Gleichrichterschaltungen, wie sie zur Verminderung der Oberschwingungs-Emission in Elektrolyse-Anlagen und sehr grossen Umrichter-Antrieben eingesetzt werden.

Ein Transformator, der beiderseitig im Stern verschaltet ist, ob nun mit ausgeführten Sternpunkten (YNyn) oder ohne (Yy), wird also in der Praxis nur als Gruppe Y(N)y(n)0 oder Y(N)y(n)6 auftreten, denn hierbei besteht nur eine einzige Möglichkeit der Variation: Man kann auf der einen oder anderen Seite entweder die drei Wicklungsanfänge zum Sternpunkt verbinden und die Enden als Aussenleiter-Anschlüsse ausführen oder umgekehrt, also jede einzelne Spule umpolen.

Die einzige? Nein. Man könnte auch die Aussenleiter umetikettieren und beispielsweise den eingangsseitigen Leiter L1 zum ausgangsseitigen Leiter L2 oder L3 definieren. So entstünde etwas, das man entweder als Schaltgruppe Y(N)y(n)4 bzw. Y(N)y(n)8 oder aber als Fehler bezeichnen könnte. Elektrofachleute werden wohl eher zur zweiten Möglichkeit neigen – sofern der «Fehler» überhaupt bemerkt wird. Warum sollte er? Erst wenn versucht wird, einen korrekt und einen falsch verschalteten Transformator ausgangsseitig parallel zu schalten, fällt der Fehler auf und die Anlage aus – aber richtig. Und zur vorsätzlichen

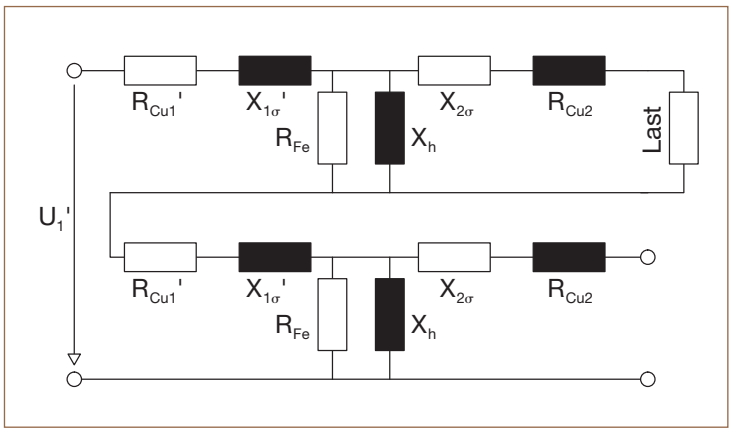


Bild 30 Ungefähr so muss man sich die einphasige Belastung eines Yyn-Transformators vorstellen: Die Last-Impedanz ist sehr viel kleiner als X_h und R_{Fe} und damit die Gesamt-Impedanz des oberen Kreises weit geringer als die des unteren.

Erzeugung dieser «Schaltgruppen» besteht gewöhnlich kein Anlass.

Manche Elektrofachleute bezeichnen den ausgeführten Sternpunkt auch als PEN-Anschluss. Das ist allerdings falsch! Der sorgsam isoliert aus einem Ölkessel herausgeführte Sternpunkt ist niemals, wie manchmal angenommen wird, innen mit dem Kessel verbunden. Als Kundenwunsch wäre das zwar denkbar, doch wäre dies heute mehr denn je ein sonderbarer Sonderwunsch eines sonderbaren Kunden. Der Einsatz dieses Transformators wäre beispielsweise beim normgemässen,[8] viel wichtiger noch zeitgemässen Aufbau eines mehrfach gespeisten Netzes bereits nicht mehr möglich.

Prinzipiell kämen auch Transformatoren einiger anderer Schaltgruppen zur Einspeisung in öffentliche Niederspannungsnetze in Betracht, doch die sind etwas teurer und brachten bisher keinen Vorteil gegenüber der Standard-Schaltgruppe Dyn5. Bisher nicht. Inzwischen sieht die elektrotechnische Landschaft etwas anders aus. Das wird später unter «Besondere Belastungen und besondere Lösungen» ab Seite 42 ein Thema sein.

Da die Mittelspannungsnetze gewöhnlich keinen Mittelpunktsleiter haben, kommt auf der Oberspannungsseite nur die Dreieckwicklung in Frage. Zwar könnte man die Wicklungen auch im Stern verschalten, zumal die an einer Spule anliegende Spannung dann um den Faktor √3 kleiner und entsprechend leichter zu beherrschen wäre. Aus eben diesem Grund werden alle Netzkuppler (Transformatoren zwischen Höchst- und Hochspannungsnetzen) in den Gruppen YNyn0 verschaltet, doch haben diese Netze auch stets einen Mittelpunktsleiter, und sei es nur, indem die Sternpunkte beider Seiten geerdet sind. Mittelspannungsnetze haben in der Regel keinen Mittelleiter, und wenn man ausgangsseitig einen belastbaren Sternpunkt haben möchte, um zwei verschiedene Wechselspannungen abgreifen zu können, dann wird bei einphasiger Belastung nur eine Unterspannungsspule von Strom durchflossen und erzeugt dort – *nur* auf diesem Schenkel – einen entsprechenden magnetischen Fluss. Der muss durch einen entsprechenden Gegenfluss der entsprechenden – und *nur* dieser – Oberspannungsspule kompensiert werden, denn das ist das Prinzip des Transformators. Dies ist aber nur möglich, wenn beide Enden der Eingangswicklung direkt an der Eingangsspannung liegen, was wiederum nur bei Dreieckwicklung oder angeschlossenem Sternpunkt der Fall ist. Man könnte näherungsweise die Dreieckschaltung mit einer Parallelschaltung und die Sternschaltung ohne Sternpunkt-Anschluss mit einer Reihenschaltung vergleichen, wie dies das abgewandelte Ersatzschaltbild in Bild 30 zeigt.

Dann liegt also im vorliegenden Fall wegen des offenen Sternpunkts am Eingang und der einphasigen Belastung am Ausgang eine Art Reihenschaltung einer belasteten mit einer unbelasteten Spule vor, und die unbelastete liegt als Drossel mit der sehr hohen Hauptreaktanz X_h dem Laststrom im Weg. Folglich fällt an dieser Spule fast die gesamte Spannung der Quasi-Reihenschaltung ab, wodurch der Kern übererregt wird und in die magnetische Sättigung gerät. Eisen- und Streuverluste steigen exorbitant an. Die Hauptreaktanz nimmt ab, jedoch nicht so viel, dass sie nicht doch noch eine erhebliche Verschiebung der Spannungen bewirken würde. Die Spannung an der Last bricht auf einen Bruchteil der Nennspannung zusammen, während an der unbelasteten Ausgangswicklung eine beträchtliche Überspannung entsteht. Ist diese Wicklung nun nicht gänzlich unbelastet, sondern speist eine relativ geringfügige Last, so bekommt diese es mit andauernder, beinahe √3-facher Überspannung zu tun. Zerstörung der Last und Brandschaden drohen. Daher sind die Schaltgruppen Yyn0 und Yyn6 generell nicht einsetzbar, wenn der einzige ausgeführte Sternpunkt, derjenige auf der Ausgangsseite, auch belastet werden soll. Deswegen werden die Eingangswicklungen von Verteiltransformatoren zumeist im Dreieck verschaltet.

Es sei denn, man hat ein TT-Netz von jener Art vorliegen, wie man es in Belgien noch häufig antrifft. Diese werden von einem Transformator gespeist, der zwar in der üblichen Schaltgruppe Dyn5 verschaltet ist, bei dem die Spannung am Ausgang aber nur 133/230 V beträgt. Hier liessen sich also ebenso gut die Schaltgruppen Yyn0 oder Yyn6 einsetzen, denn der unterspannungsseitige Sternpunkt ist zwar ausgeführt, aber nicht angeschlossen, wird also nicht belastet, sondern dient lediglich zu Mess- und Prüfzwecken wie Erdschluss-Überwachung. Die Spannung an der Wechselstrom-Steckdose ist diejenige zwischen zwei Aussenleitern, und so fliesst der Steckdosenstrom, der bei uns ein Einphasenstrom wäre, als Zweiphasenstrom nacheinander durch zwei Unterspannungsspulen und fordert einen entsprechenden Strom durch die beiden Oberspannungsspulen der betreffenden Schenkel. Dem steht auch bei oberspannungsseitiger Sternschaltung ohne Sternpunkt-Anschluss nichts im Wege. Bei einphasiger Belastung am Ausgang hingegen müsste der Strom der Oberspannungswicklung nach der belasteten noch eine unbelastete Spule durchfliessen, und die wirkt dann in der beschriebenen Weise als Drossel. Dies

[8] Vgl. Berichtigung zu EN 50174-2 (VDE 0800 Teil 174-2) vom Januar 2002 für die Ausgabe September 2001.

muss berücksichtigt werden, wenn man etwa den unterspannungsseitigen Sternpunkt erdet und meint, so die Fehlerschleifen-Impedanz nennenswert herabsetzen zu können, die im TT-System durch den Erdwiderstand ohnehin schon viel höher als in jeder Form des TN-Systems ist. Die hohe Schieflast-Impedanz des Transformators verhindert eine spürbare Reduktion.

Ein Spannungsprüfer leuchtet bei Berührung jedes aktiven Leiters einer Wechselstrom-Steckdose, wenn auch schwach, da die Spannung eines jeden aktiven Leiters gegen Erde nur ≈133 V beträgt. Anderenfalls liegt ein Erdschluss vor, der im TT-System selten, im IT-System nie zum Abschalten des Leitungsschutzes führt und daher ohne geeignete Überwachung leicht über lange Zeit unentdeckt bleiben kann. Der Stromkreis für den Spannungsprüfer schliesst sich im IT-System lediglich über die parasitären Koppelkapazitäten. Eine Allgebrauchs-Glühlampe würde in einem intakten Netz schon nicht mehr leuchten. Im TT-System würde es dafür – und für einen gefährlichen Körperstrom – aber noch reichen, zum Abschalten eines Überstrom-Schutzorgans jedoch meist nicht. Das ist das bekannte Problem des TT-Systems, das durch eine solche «belgische» Speisung noch ein wenig verschärft würde, wobei je nach Ausdehnung und Alter des Netzes sowie den möglichen kapazitiven Ableitströmen vor allem moderner Lasten ein gefährlicher Körperstrom auch im IT-System zu Stande kommen kann und eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung also in beiden Fällen notwendig wird. Ausserdem entfällt bei jeder der beiden Varianten die Möglichkeit zur Speisung von Wechsel- und Drehstromlasten für 400 V. Unsere Durchlauferhitzer für dreiphasigen 400-V-Anschluss z. B. würden in Teilen Belgiens nicht funktionieren (es sei denn, jemand wäre mit einem Drittel der Nennleistung zufrieden). Ein zum dreiphasigen Anschluss vorgesehener Elektroherd funktioniert dagegen sehr wohl. Diese Geräte sind normalerweise für derlei Netze vorgesehen und verfügen über eine entsprechende Umklemmvorrichtung am Klemmbrett, so dass in jedem Fall je 230 V an jeder der drei Gruppen von Lasten anliegen. Der Herd benötigt nicht wirklich 400 V. Beim Durchlauferhitzer funktioniert das nicht, weil die einzelnen Heizelemente gewöhnlich für 400 V, also für Dreieckschaltung, ausgelegt sind. Zwar könnte man prinzipiell auch Durchlauferhitzer für 230/400 V Dreieck/Stern konzipieren, doch ist es ein Unterschied, ob man 7,5 kW Anschlussleistung für einen Herd oder 27 kW für einen Durchlauferhitzer bereitzustellen hat. Letzteres wird aufwändig, wenn keine 400 V zur Verfügung stehen.

Absicherung

Verteiltransformatoren der öffentlichen Versorgung sind ausgangsseitig gewöhnlich nicht abgesichert. Die Eingangsseite ist mit HH-(Hochspannungs-Hochlast-)Sicherungen versehen. Diese dürfen jedoch im Bereich zwischen einfachem und dreifachem Nennstrom nicht betrieben werden, sonst überhitzen sie sich, schalten aber noch nicht ab. Ehe ein Zyniker den Einsatz solcher Elemente lächerlich macht und meint, den Grund dafür gefunden zu haben, warum sie sich Haha-Sicherungen nennen, müssen wir hierzu einiges klarstellen: In der Tat stellt diese Art der Absicherung einen Schutz bei Kurzschluss dar, aber nicht vor Überlast. Das reicht jedoch aus, denn eine sinnvolle Netzplanung mit aus langjähriger Erfahrung gewonnenen Parametern und unter Einbau reichlicher Reserven verhindert Überlastung hier zu Lande. So etwas kommt schlichtweg nicht vor. Anderen Ortes lebt man mit Überlast als Normalzustand. Transformatoren sind derbe Gesellen und lassen allerhand mit sich machen, doch was aus wirtschaftlicher Sicht hiervon zu halten ist, wird noch zu beleuchten sein. Wichtig ist, gegen den Fall des Kurzschlusses oder Lichtbogens am Ausgang und den – wenn auch seltenen – Fall eines inneren Fehlers abzusichern. Besonders Windungsschlüsse in den Breitband-Unterspannungswicklungen führen zu sehenswerten Schadensbildern: Lichtbogen-Einwirkung verdampft einen Teil des Öls oder zersetzt es in gasförmige Bestandteile. Durch die Druckwelle bekommt der Kessel dicke Backen. Gerade wie die Spulen im Kurzschlussfall strebt er zur runden Form, die das grössere Volumen pro Oberfläche bietet. In Grösse und Gestalt vom Russ schwarz gesprenkelter Ostereier wird das Leitermaterial als kupferne rote bzw. blass silberne Aluminiumtropfen später beim Auseinanderbauen in der Bodenwanne gefunden. Die Wicklung und oft auch der Kessel sind Schrott, nur der Kern und Zubehör lassen sich noch verwenden. Hätte dieser Fehler auch nur einige Sekunden unabgeschaltet angestanden, so wäre der Kessel geplatzt, das reichlich vorhandene Öl wäre ausgelaufen, hätte sich entzündet und auch noch als Brandbeschleuniger gewirkt. Auf Kurzschlussschutz kann also nicht verzichtet werden, auf Schutz gegen Überlast schon. Mit dem Einzug der Elektronik wird heute allerdings vielfach schon eine Fernüberwachung der Öltemperatur eingebaut. Die hilft nicht nur bei der Gefahren-Abwehr, sondern auch bei der Optimierung des Netzbetriebs, denn die Differenz zur Umgebungstemperatur lässt Rückschlüsse auf die Auslastung des Transformators zu.

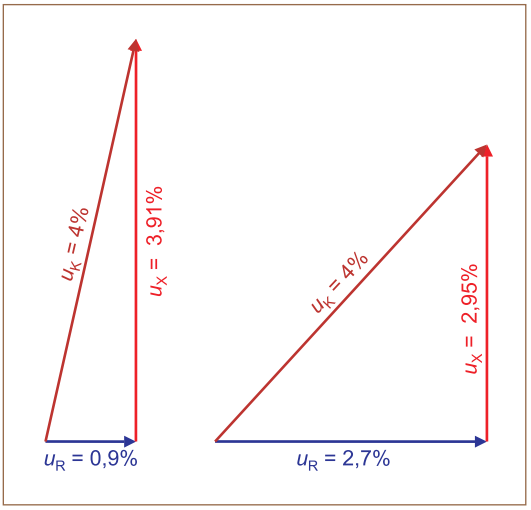


Bild 31 Unterschiedliches Verhältnis des aktiven zum reaktiven Spannungsfall in einem grösseren Transformator von 630 kVA nach HD 428 Liste C (links) und in einem kleineren Transformator von 50 kVA nach HD 428 Liste B (rechts).

Parallelbetrieb

Das Parallelschalten von Transformatoren ist prinzipiell möglich. Eine Voraussetzung ist banalerweise, dass die Nennspannungen der parallel zu betreibenden Wicklungen gleich sein müssen. Auch Umsteller oder Umklemmvorrichtungen müssen auf die gleiche Stufe eingestellt sein. Ange-

nommen, zwei Transformatoren gleicher Nennleistung, die jeweils über eine Umklemmvorrichtung im Bereich ±5% der Nennspannung verfügen, sollten eingangs- und ausgangsseitig parallel betrieben werden, doch der eine sei auf +5% und der andere auf –5% eingestellt. Einer habe eine Kurzschlussspannung von $u_K = 4\%$ und der andere $u_K = 6\%$. Dann liegen die beiden Kurzschluss-Impedanzen in Reihe zueinander, und die beiden Transformatoren sind also über eine Impedanz von insgesamt 4% + 6% = 10% der (auf die Nennlast eines Trafos bezogenen) Last-Impedanz gekoppelt. Die Differenz der parallel geschalteten Spannungen beträgt ebenfalls 10% (der Nennspannung). So wird derjenige Transformator, der im Leerlauf die um 10% höhere Spannung aufwiese, einen Strom in Höhe des Nennstroms durch den anderen treiben, der diesen Strom wiederum auf die Eingangsseite zurück transformiert. Alle Wicklungen beider Transformatoren wären mit Nennstrom belastet, der eine vorwärts, der andere rückwärts, und das ohne irgendwelche elektrische Leistung abzugeben. Käme noch Belastung hinzu, so würde die Spannung an den parallelen Ausgangsklemmen noch etwas einbrechen. Der rückspeisende Trafo würde dadurch etwas entlastet, doch der vorwärts speisende würde überlastet.

Wird die ungleiche Einstellung der Eingangsspannungen nun korrigiert, so ist die getroffene Annahme trotzdem immer noch Frevel. Man darf nämlich keine Transformatoren unterschiedlicher Kurzschlussspannungen ausgangsseitig parallel betreiben, selbst wenn alle Spannungen übereinstimmen, sonst passiert zwar im Leerlauf nichts mehr, aber die Last verteilt sich immer noch ungleich. Nehmen wir an, unsere beiden Beispieltrafos lägen an derselben Spannungsquelle und seien auf gleiche Stufen geklemmt oder es würde sonst wie sichergestellt, dass sich im Leerlauf an den Unterspannungsseiten beider Trafos nach Betrag *und* Phasenlage gleiche Klemmenspannungen einstellen. Die beiden Ausgangswicklungen werden nun parallel geschaltet und arbeiten auf eine Last, die der Summe der Nennleistungen beider Transformatoren entspricht, so dass also eigentlich volle Auslastung für jeden Trafo gegeben wäre – aber auch nicht mehr als das, wenn jeder seinen Teil übernimmt. Das eben tun sie aber nicht. Derjenige mit 6% Kurzschlussspannung wird mit nur 4/5 seiner Nennlast belastet, der mit 4% aber mit 6/5, also 20% Überlast.

Bedingungen für Parallelbetrieb von Transformatoren:

- Gleiche Spannungen der parallel zu betreibenden Wicklungen.
- Gleiche Nenn-Kurzschlussspannungen.
- Gleiche Schaltgruppen-Kennziffern.
- Gleiche Phasenlagen der speisenden Netze sicherstellen.
- Wenn eingangsseitig nicht parallel gefahren wird, müssen die Kurzschlussleistungen der speisenden Netze etwa gleich sein.
- Grössenverhältnis parallel zu betreibender Einheiten maximal 3:1.

Und auch das stimmt schon wieder nur ungefähr. Auch die Grössen der Transformatoren (das Verhältnis der Nennleistungen) spielt nämlich eine Rolle. Als Faustregel geben Fachleute an, man solle keine Transformatoren (ausgangsseitig) parallel betreiben, deren Baugrössen sich um mehr als im Verhältnis von 3:1 unterscheiden. Wie schon einmal kurz angedeutet, wird der ohmsche Spannungsfall an der Wicklung mit grösserer Baugrösse immer kleiner. Bei einem kleinen Transformator steckt also in der Kurzschlussspannung u_K wesentlich mehr u_R und etwas weniger u_X (Bild 31). Zum grösseren hin wird u_R für *diese* Betrachtung allmählich vernachlässigbar. Wie jedoch in den Betrachtungen zur ohmschen und induktiven Last ausgeführt, bricht die Spannung an einem Transformator unterschiedlich stark ein, je nach dem, ob er ohmsch oder induktiv belastet wird (Bilder 23 bis 25). Hat der Spannungsfall im Trafo selbst nur einen geringen ohmschen Anteil, so bricht er bei induktiver Last stärker ein als bei ohmscher und umgekehrt. So mögen zwei Transformatoren mit unterschiedlichem Verhältnis u_R/u_X zwar exakt gleiche Leerlaufspannungen haben, doch unter Last unterscheiden sich die Spannungen dennoch wieder etwas. Je nach Phasenwinkel der Last knickt entweder der eine oder der andere stärker ein. Parallelschaltung der Ausgangswicklungen bringt also – nicht im Leerlauf, aber unter Last – wieder einen Ausgleichsstrom zum Fliessen. Dessen Richtung und Ausmass hängt ab vom Phasenwinkel der Last, der schwer vorherzusagen ist, und so wäre bei Parallelschaltung eines grossen mit einem kleinen Transformator ein gewisser Sicherheitsfaktor einzusetzen, der die Sache gleich wieder ins Absurde abgleiten lässt. Macht es doch ohnehin keinen Sinn, einem Trafo von z. B. 630 kVA noch einen kleinen Assistenten von 63 kVA oder 100 kVA zur Seite zu stellen. So viel Reserve sollte in jedem Fall vorhanden sein, und wenn nicht, so würde der Sicherheitsfaktor gleich wieder eine Vergrösserung des «Assistenten» auf z. B. 250 kVA erfordern. Damit wäre aber die 3:1-Bedingung wieder erfüllt und der Sicherheitsfaktor gar nicht mehr erforderlich. Hier beisst sich die Katze in den Schwanz.

Der wirtschaftlichste Betriebspunkt stellt sich beim Transformator ohnehin weit unterhalb der Nennlast ein, anders als beim Elektromotor, also lieber gleich in der Planungsphase reichlich Reserven vorsehen! Es lohnt sich doppelt und dreifach, in obigem Beispiel gleich einen Transformator von 1000 kVA oder gar 1250 kVA einzuplanen – oder aus Redundanzgründen noch besser 2 Stück zu je 630 kVA, von denen zur Not jeder die Last allein tragen kann. Einmal lohnt sich die Investition in beruhigende Reserven durch die viel geringeren Nachrüstkosten im Falle des Last-Zuwachses, einmal durch geringere Verlustleistung und eventuell auch durch den geringeren Spannungsfall, den die Parallelschaltung ebenso wie der grössere Trafo bringen. Dies kann unter Umständen die optimale Lösung von Flickerproblemen sein, die an der Basis ansetzt und nicht oben aufgepfropft werden muss.[9] Erkauft wird

[9] Vgl. [1], S. 51

[10] Fender, Manfred: Vergleichende Untersuchungen der Netzrückwirkungen von Umrichtern mit Zwischenkreis bei Beachtung realer industrieller Anschlussstrukturen, Promotionsschrift, Wiesbaden 1997.

[11] Fassbinder, Stefan: Erdkabel kontra Freileitung «de» 9/2001, gig S. 9, enthalten in DKI-Sonderdruck S.180 «Drehstrom, Gleichstrom, Supraleitung – Energie-Übertragung heute und morgen».

diese verbesserte Flickerfestigkeit des Versorgungssystems natürlich durch eine höhere Kurzschlussleistung, die sich bei der Parallelschaltung aufsummiert und auch mit der grösseren Baugrösse bei gleicher Nenn-Kurzschlussspannung linear zunimmt. Das muss bei der Auslegung des angeschlossenen Verteilnetzes berücksichtigt werden – und der Begriff «Kurzschlussleistung» muss mit Bedacht verwendet werden. Definitionsgemäss wird zu deren Ermittlung die Leerlaufspannung einer Anlage mit dem Kurzschlussstrom multipliziert. Die Betriebszustände Leerlauf und Kurzschluss schliessen sich aber gegenseitig aus. Die Kurzschlussleistung ist also eine rein fiktive Rechengrösse, nichtsdestoweniger jedoch eine sinnvolle zum Abschätzen dessen, was im Kurzschlussfall geschehen kann.

Banal ist auch eine weitere Bedingung für die Zulässigkeit des Parallelbetriebs, nämlich dass die Schaltgruppen-Kennziffern der parallel zu betreibenden Einheiten gleich sein müssen. Nicht notwendigerweise die Schaltgruppen, aber die Kennziffern. Sonst würde man Spannungen parallel schalten, die nicht phasengleich sind. Das bedarf an dieser Stelle keines weiteren Kommentars. Zwei Transformatoren der Schaltgruppen Dd0 und YNyn0 beispielsweise können aber sehr wohl parallel betrieben werden. Nur wenn der Sternpunkt belastet wird, wird diese Last – etwa eine einphasige oder eine nicht lineare – von nur einem Trafo getragen, denn der andere hat keinen Sternpunkt! Das muss berücksichtigt werden. Zudem beziehen sich die angegebenen Kurzschlussspannungen auf symmetrische, lineare, dreiphasige Belastung, anderenfalls gelten ganz andere Werte, und diese Abweichungen wiederum sind je nach Schaltgruppe sehr verschieden![10] Spätestens hier wird die Sache unübersichtlich. Empfehlenswert ist es also auf keinen Fall, Transformatoren unterschiedlicher Schaltgruppen parallel zu betreiben, sondern allenfalls eine Notlösung.

Wenn hier von Parallelbetrieb die Rede ist, so ist normalerweise die Parallelschaltung der Ausgangsseiten gemeint, denn die Eingangsseiten arbeiten meist auf irgendeine direkte oder entfernte Art ohnehin parallel. Es sind aber auch Fälle denkbar, in denen die Speisung aus unterschiedlichen Mittelspannungsnetzen erfolgt, die beispielsweise aus demselben Hochspannungsnetz, jedoch ihrerseits über Hochspannungstransformatoren unterschiedlicher Schaltgruppen-Kennziffern gespeist werden, also verschiedene Phasenlagen haben. Dann müssen die *Summen* der Schaltgruppen-Kennziffern des Hochspannungs- und des nachgeschalteten Verteiltransformators jeweils gleich sein, damit die Niederspannungen an den Ausgangswicklungen gleiche Phasenlagen haben.

Und auch das ist schon wieder nicht die ganze Wahrheit. Die Schaltgruppen-Kennziffern sind nämlich noch nicht alles. Es gibt Kabelnetze, und es gibt Freileitungsnetze. Beim Erdkabel ist die Querkapazität (Kapazitätsbelag)[11] sehr gross und die Längsinduktivität (Induktivitätsbelag) eher gering. Bei der Freileitung ist die Kapazität geringer und die Induktivität grösser. Je nach Belastung ergeben sich hierdurch verschiedene Phasenverschiebungen. Nehmen wir an, zwei ausgangsseitig parallel zu betreibende Verteiltransformatoren hätten gleiche Nennleistungen, gleiche Schaltgruppen, gleiche Kurzschlussspannungen, gleiche Ausgangsspannungen und sogar annähernd gleiche Kupferverluste, seien also zum Parallelbetrieb optimal geeignet. Einer werde über ein relativ langes Mittelspannungs-Erdkabel gespeist und der andere über eine relativ lange Mittelspannungs-Freileitung. Die eingespeisten Spannungen mögen an den Leitungs-Anfängen gleiche Phasenlagen haben, und die Impedanzen der beiden Leitungen seien dem Betrage nach ähnlich gross, so dass eine nennenswerte Ungleich-Verteilung der gemeinsamen Last nicht zu erwarten ist. Die Phasenlagen der Spannungen an den Eingangsseiten der beiden parallelen Verteiltransformatoren, also an den Enden der Mittelspannungsleitungen, können aber unterschiedlich sein! Damit sind sie es auch an den Niederspannungs-Durchführungen, und werden die parallel verbunden, fängt wieder ein Kreisstrom an zu fliessen, und die beiden Trafos werden anscheinend im Leerlauf schon warm. Anscheinend, denn in Wirklichkeit laufen sie beide nicht leer, sondern schicken den Strom im Kreis herum, wobei es sich um fast reine Blindleistung handelt – eben bis auf die ohmschen Verluste in den beiden beteiligten Transformatoren und deren ober- und unterspannungsseitigen Zuleitungen bis zu den Kuppelstellen.

Ausserdem stellt das Erdkabel für den speisenden Hochspannungstrafo eine erhebliche kapazitive Last dar, so dass es zu der schon beschriebenen Anhebung der Ausgangsspannung kommen kann. Die Kapazität der Freileitung dagegen ist wahrscheinlich nicht wesentlich grösser als dass sie (zumindest bei voller Last) durch die Streuinduktivität des gespeisten Verteiltrafos kompensiert wird. Also können sich die Spannungen sowohl nach Betrag wie auch nach Phasenlage unterscheiden. Ob hierbei ein kritisches Mass erreicht werden kann, ist in der Planungsphase für alle theoretisch möglichen Belastungsfälle zu berechnen, und das ist nicht so einfach, da so viele Parameter – nicht nur der Transformatoren, sondern auch der Netze – zu berücksichtigen sind.

Wirkungsgrad von Verteiltransformatoren

«Ersatz von Transformatoren-Veteranen macht sich bezahlt», titelte die Verbandszeitung des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (Electrosuisse) und des Verbands Schweizer Elektrizitätswerke (VSE)[12] 1999 und rechnete vor, dass es auch ganz ohne Bemühung ökologischer Begründungen sehr wohl ökonomisch sinnvoll sein kann, alte Transformatoren ausser Dienst zu stellen, selbst wenn sie noch funktionstüchtig sind. So sehr haben sich inzwischen die Wirkungsgrade verbessert. Nachfolgend soll erläutert werden, wie dies erreicht wurde und welche Bedeutung dies für Nutzer und Beschaffer heute und künftig hat.

Neue Norm für Transformatoren-Wirkungsgrade

«Wären in der EU ausschliesslich Energiespar-Transformatoren im Einsatz, würde dies heute auf Strompreisbasis 1999 zu jährlichen Einsparungen in der Grössenordnung von etwa 1,2 Mrd. € führen.»[13] Leider aber kommt auch bei neuen Produkten noch nicht immer die – auf die Lebensdauer bezogen – wirtschaftlichste Technik zum Einsatz, sondern die im Kaufpreis billigste. Dies ist bei dem Produkt, um das es hier geht, besonders bedauerlich, weil diese «suboptimalen» Produkte danach durchschnittlich 30 Jahre im Einsatz bleiben und während dessen, sobald weiterer technischer Fortschritt eintritt, immer weiter hinter dieses Optimum zurückfallen. Die EU liess für ihr Gebiet mit Unterstützung durch das European Copper Institute ECI, die KEMA,[14] ein niederländisches EVU, einen belgischen Transformatoren-Hersteller und eine britische Energie-Agentur in einer Studie allein für Verteiltransformatoren ein jährliches Einsparpotenzial von 22 TWh ausrechnen. Das entspricht trotz der ohnehin schon hohen Wirkungsgrade von Transformatoren einer vermiedenen Emission von 9 Mio. Tonnen CO_2 oder 4% der EU-Zielvorgabe von Kyoto.[15]

Oberflächlich betrachtet möchte man hier keinen nennenswerten Handlungsbedarf vermuten, denn die Wirkungsgrade von Verteiltransformatoren sind nicht nur, wie eben erwähnt, sehr hoch, sondern auch genormt. So muss man lediglich zur besten Klasse CC' im Harmonisierungsdokument 428 greifen und hat gleich den derzeit wirtschaftlichsten Transformator ausgewählt.

Hat man? Bedauerlicherweise nicht wirklich. Tatsächlich stellt es heute technisch keine besondere Herausforderung dar und würde sich auch ökonomisch rechnen, zu den drei Kategorien AA' als schlechteste bis CC' als bis dahin beste noch ein verbessertes Listenpaar DD' anzufügen und entsprechende Transformatoren zu produzieren und einzusetzen. Solche Transformatoren werden in der Schweiz lange schon standardmässig gebaut und betrieben. Gleichzeitig wird in Belgien darauf hingewiesen, dass ein geräuschminimierter Transformator zur Aufstellung in Wohngebieten konstruktiv bedingt auch mit verminderten Verlusten daher kommt, und man versucht, die beiden Vorteile im Verbund zu vermarkten (Bild 32). Das HD 428 wird deswegen demnächst durch eine Europanorm abgelöst, deren Nummer noch nicht festliegt. Was schon nahezu festliegt, sind die Werte und das neue Schema ihrer Klassifizierung. So ergeben sich zukünftig vier wesentliche Änderungen gegenüber dem bisherigen Schema:

- Unter weit gehender Beibehaltung der bisherigen Grenzwerte werden beim Lastverlust eine, beim Leerlaufverlust sogar zwei noch bessere Klassen hinzugefügt.
- Den Leerlaufverlusten werden gleichzeitig auch Grenzwerte für die Schalldruckpegel zugeordnet.
- Bei den Lastverlusten werden nun zwei Gruppen bis 24 kV und bis 36 kV Oberspannung unterschieden. Bei höherer Spannung wird der Draht dünner, seine Isolation ebenso wie die Lagen-Isolation und die End-Abstände (Schlagweiten) grösser. Das reduziert den Platz für Kupfer.
- Die Reihenfolge der Klassen wird umgekehrt, sodass die Klasse A stets für die beste Ausführung steht. Dies hat gegenüber dem alten System den Nachteil, dass es nicht mehr nach oben offen ist. Während eine Erweiterung nach oben in Zukunft vielleicht möglich und erwünscht ist, kommt eine Erweiterung nach unten wohl kaum jemals in Frage. Diese Änderung stellt jedoch eine Anpassung an alle möglichen bereits bestehenden Klassifizierungsschemen dar, wie die für Elektromotoren, für Haushaltsgeräte und viele andere, die alle das A am oberen Ende der Skala führen. Man hat sich deshalb vorbehalten, unter Beibehaltung des Schemas die Werte gegebenenfalls in Zukunft noch zu ändern, sodass immer und für alle Zeiten die Klasse A für die zur jeweiligen Zeit beste verfügbare Technologie steht, was auch etwas für sich hat.

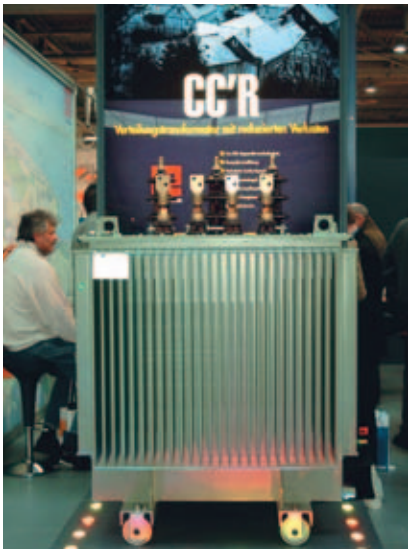


Bild 32 Bei der Geräuschminderung wird der bessere Wirkungsgrad gleich frei Haus mitgeliefert.

---

[12] Borer Edi: *«Ersatz von Transformatoren-Veteranen macht sich bezahlt»,* Bulletin SEV/VSE 4/1999, S. 31.

[13] European Copper Institute: *«The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers»,* Brüssel 1999. *www.eurocopper.org*

[14] *www.kema.nl*

[15] «Verlustminimierte Trafos können EU helfen», «etz» 9/2000.

Nun kann man nach wie vor prinzipiell jede Lastverluste-Liste (Tabelle 3) mit jeder Leerlaufverluste-Liste (Tabellen 4 und 5) kombinieren. In Abhängigkeit von dieser Gewichtung, aber nicht nur hiervon, lässt sich ein Transformator ganz allgemein mit viel Leiterwerkstoff und weniger Kernwerkstoff oder umgekehrt auslegen. Dies führt zu etwas unterschiedlichem Betriebsverhalten, vor allem hinsichtlich der Verluste. Der Wirkungsgrad kann bei 24% oder aber erst bei 47% Auslastung sein Optimum aufweisen (Bild 33). Bei gleicher Stromdichte verursacht mehr Leitermaterial auch entsprechend mehr Verlust, den so genannten Lastverlust, auch Kupferverlust genannt. Eigentlich müsste dieser «Trivialname» eher «Aluminiumverlust» lauten, denn im gleichen Querschnitt aus Aluminium entsteht bei gleichem Strom 35% mehr Verlust. Das ist aber unüblich, was auf Kupfer als das historische Standard-Material hinweist.

Bei gleicher Induktion, Frequenz und Eisenqualität hängt der Eisenverlust nur von der Eisenmenge ab; analog der Kupferverlust bei gleicher Stromdichte, grob gesagt, nur von der Kupfermenge. Andererseits lässt sich der Eisenverlust senken, indem man auf denselben Kern mehr Windungen aufbringt und so die magnetische Flussdichte (Induktion) senkt. Der Kupferverlust lässt sich umgekehrt senken, indem man eine höhere Induktion zulässt und entsprechend weniger Windungen aufbringt – aber dies geht nur sehr in Grenzen, denn hochwertige Magnetwerkstoffe haben recht scharfe Sättigungsknicke, und bei üblicher Auslegung arbeiten Transformatoren schon hart an dieser Grenze. Senkung des Kupferverlusts funktioniert in erster Linie über Senkung der Stromdichte unter Beibehaltung der Windungszahl und des Kernquerschnitts und lediglich einer Modifizierung des Kerns in der Art, dass das Wickelfenster vergrössert wird, um für eine Wicklung aus dickerem Draht Platz zu schaffen.

Ein Transformator, der den grössten Teil seines Lebens im Leerlauf oder mit geringer Last betrieben wird, sollte daher mit geringem Leerlaufverlust, also weniger Eisen und mehr Kupfer, ausgelegt sein. Zur Auslegung eines Transformators für permanente

3

Nennleistung S_N	rel. Kurzschl.-spg. u_k	Lastverlust: Öltransformator ≤24 kV, Liste D_K ≤24 kV P_K	Liste C_K ≤24 kV P_K	Liste C_K ≤36 kV P_K	Liste B_K ≤24 kV P_K	Liste B_K ≤36 kV P_K	Liste A_K ≤24 kV P_K	Liste A_K ≤36 kV P_K	Gießharz- HD538 ≤12 kV P_K
50 kVA	4%	1350 W	1100 W	1450 W	875 W	1250 W	750 W	1050 W	
100 kVA	4%	2150 W	1750 W	2350 W	1475 W	1950 W	1250 W	1650 W	2000 W
160 kVA	4%	3100 W	2350 W	3350 W	2000 W	2550 W	1700 W	2150 W	2700 W
250 kVA	4%	4200 W	3250 W	4250 W	2750 W	3500 W	2350 W	3000 W	3500 W
315 kVA	4%	5000 W	3900 W		3250 W		2800 W		
400 kVA	4%	6000 W	4600 W	6200 W	3850 W	4900 W	3250 W	4000 W	4900 W
500 kVA	4%	7200 W	5500 W		4600 W		3900 W		
630 kVA	4%	8400 W	6500 W	8800 W	5400 W	6500 W	4600 W	5500 W	7300 W
630 kVA	6%	8700 W	6750 W	8800 W	5600 W	6500 W	4800 W	5500 W	7600 W
800 kVA	6%	10500 W	8400 W	10500 W	7000 W	8400 W	6000 W	7000 W	
1000 kVA	6%	13000 W	10500 W	13000 W	9000 W	10500 W	7600 W	8900 W	10000 W
1250 kVA	6%	16000 W	13500 W	16000 W	11000 W	13500 W	9500 W	11500 W	
1600 kVA	6%	20000 W	17000 W	19200 W	14000 W	17000 W	12000 W	14500 W	14000 W
2000 kVA	6%	26000 W	21000 W	24000 W	18000 W	21000 W	15000 W	18000 W	
2500 kVA	6%	32000 W	26500 W	29400 W	22000 W	26500 W	18500 W	22500 W	21000 W

4

Nennleistung S_N	rel. Kurzschl.-spg. u_k	Leerlaufverlust: Öltransformator Liste E_0 ≤24 kV P_0	Liste E_0 Lärm	Liste D_0 ≤24 kV P_0	Liste D_0 Lärm	Liste C_0 ≤24 kV P_0	Liste C_0 Lärm	Liste B_0 ≤24 kV P_0	Liste B_0 Lärm	Liste A_0 ≤24 kV P_0	Liste A_0 Lärm	Gießharz- HD538 ≤12 kV P_0
50 kVA	4%	190 W	55 dB(A)	145 W	50 dB(A)	125 W	47 dB(A)	110 W	42 dB(A)	90 W	39 dB(A)	
100 kVA	4%	320 W	59 dB(A)	260 W	54 dB(A)	210 W	49 dB(A)	180 W	44 dB(A)	145 W	41 dB(A)	440 W
160 kVA	4%	460 W	62 dB(A)	375 W	57 dB(A)	300 W	52 dB(A)	260 W	47 dB(A)	210 W	44 dB(A)	610 W
250 kVA	4%	650 W	65 dB(A)	530 W	60 dB(A)	425 W	55 dB(A)	360 W	50 dB(A)	300 W	47 dB(A)	820 W
315 kVA	4%	770 W	67 dB(A)	630 W	61 dB(A)	520 W	57 dB(A)	440 W	52 dB(A)	360 W	49 dB(A)	
400 kVA	4%	930 W	68 dB(A)	750 W	63 dB(A)	610 W	58 dB(A)	520 W	53 dB(A)	430 W	50 dB(A)	1150 W
500 kVA	4%	1100 W	69 dB(A)	880 W	64 dB(A)	720 W	59 dB(A)	610 W	54 dB(A)	510 W	51 dB(A)	
630 kVA	4%	1300 W	70 dB(A)	1030 W	65 dB(A)	860 W	60 dB(A)	730 W	55 dB(A)	600 W	52 dB(A)	1500 W
630 kVA	6%	1200 W	70 dB(A)	940 W	65 dB(A)	800 W	60 dB(A)	680 W	55 dB(A)	560 W	52 dB(A)	1370 W
800 kVA	6%	1400 W	71 dB(A)	1150 W	66 dB(A)	930 W	61 dB(A)	800 W	56 dB(A)	650 W	53 dB(A)	
1000 kVA	6%	1700 W	73 dB(A)	1400 W	68 dB(A)	1100 W	63 dB(A)	940 W	58 dB(A)	770 W	55 dB(A)	2000 W
1250 kVA	6%	2100 W	74 dB(A)	1750 W	69 dB(A)	1350 W	64 dB(A)	1150 W	59 dB(A)	950 W	56 dB(A)	
1600 kVA	6%	2600 W	76 dB(A)	2200 W	71 dB(A)	1700 W	66 dB(A)	1450 W	61 dB(A)	1200 W	58 dB(A)	2800 W
2000 kVA	6%	3100 W	78 dB(A)	2700 W	73 dB(A)	2100 W	68 dB(A)	1800 W	63 dB(A)	1450 W	60 dB(A)	
2500 kVA	6%	3500 W	81 dB(A)	3200 W	76 dB(A)	2500 W	71 dB(A)	2150 W	66 dB(A)	1750 W	63 dB(A)	4300 W

5

Nennleistung S_N	rel. Kurzschl.-spg. u_k	Leerlaufverlust: Öltransformator Liste Z_0 ≤36 kV P_0	Liste Z_0 Lärm	Liste Y_0 ≤36 kV P_0	Liste Y_0 Lärm	Liste X_0 ≤36 kV P_0	Liste X_0 Lärm	Gießharz- HD538 ≤12 kV P_0
50 kVA	4%	230 W	52 dB(A)	190 W	52 dB(A)	160 W	50 dB(A)	
100 kVA	4%	380 W	56 dB(A)	320 W	56 dB(A)	270 W	54 dB(A)	440 W
160 kVA	4%	520 W	59 dB(A)	460 W	59 dB(A)	390 W	57 dB(A)	610 W
250 kVA	4%	780 W	62 dB(A)	650 W	62 dB(A)	550 W	60 dB(A)	820 W
315 kVA	4%							
400 kVA	4%	1120 W	65 dB(A)	930 W	65 dB(A)	790 W	63 dB(A)	1150 W
500 kVA	4%							
630 kVA	4%	1450 W	67 dB(A)	1300 W	67 dB(A)	1100 W	65 dB(A)	1500 W
630 kVA	6%							1370 W
800 kVA	6%	1700 W	68 dB(A)	1450 W	68 dB(A)	1300 W	66 dB(A)	
1000 kVA	6%	2000 W	68 dB(A)	1700 W	68 dB(A)	1450 W	67 dB(A)	2000 W
1250 kVA	6%	2400 W	70 dB(A)	2100 W	70 dB(A)	1750 W	68 dB(A)	
1600 kVA	6%	2800 W	71 dB(A)	2600 W	71 dB(A)	2200 W	69 dB(A)	2800 W
2000 kVA	6%	3400 W	73 dB(A)	3150 W	73 dB(A)	2700 W	71 dB(A)	
2500 kVA	6%	4100 W	76 dB(A)	3800 W	76 dB(A)	3200 W	73 dB(A)	4300 W

Tabelle 3 Lastverluste genormter Verteiltransformatoren.

Tabelle 4 Leerlaufverluste und Lärmpegel genormter Verteiltransformatoren bis 24 kV und von Giessharztransformatoren bis 12 kV.

Tabelle 5 Leerlaufverluste und Lärmpegel genormter Verteiltransformatoren über 24 kV bis 36 kV.

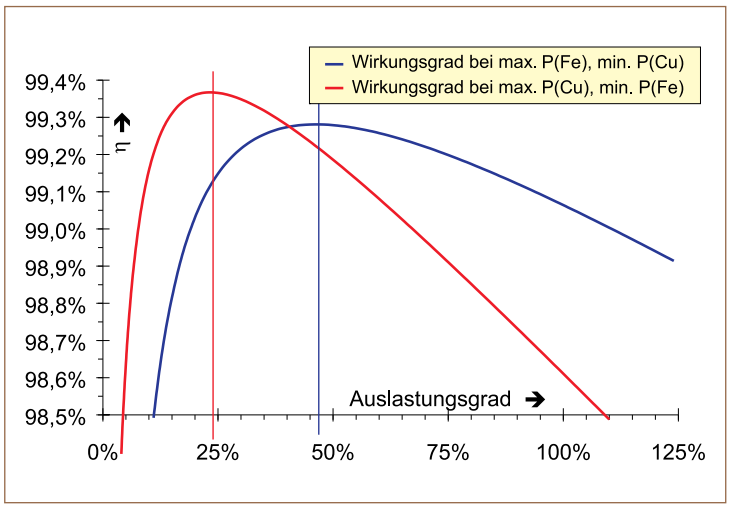


Bild 33 Je nach dem, ob man Leerlauf- oder Lastverluste minimiert, ergibt sich ein unterschiedliches Betriebsverhalten, wie hier beim Vergleich der Klassen A_0D_K und E_0A_K für einen 1000-kVA-Transformator nach Tabelle 3 und Tabelle 4.

Volllast (was nur bei Maschinentrafos in Kraftwerken und in einigen industriellen Einsatzfällen vorkommt) entsprechend den Einsatz von möglichst wenig Kupfer zu fordern, wäre etwas missverständlich. Vielmehr sollte hier ein möglichst grosser Eisenquerschnitt gewählt werden, um die Windungszahl minimieren zu können. Ein maximierter Drahtquerschnitt aber ist bei dieser Betriebsart umso wichtiger.

Die im Abschnitt zum Betriebsverhalten vorgeschlagene Aufteilung des 1250-kVA-Transformators in zwei Einheiten zu je 630 kVA (Seite 16) bringt leider eine leichte Erhöhung sämtlicher Verluste in allen Lastbereichen mit sich, ist aber aus den genannten Redundanzgründen trotzdem empfehlenswert und wird deswegen häufig praktiziert. Andererseits bietet sie die Option, einen Transformator in Schwachlastzeiten abzuschalten. Dadurch können bei Schwachlast die Verluste – auch gegenüber dem Einsatz eines grösseren Transformators – gesenkt werden. Natürlich muss der Transformator beiderseitig vom Netz getrennt werden, sonst bleibt er erregt, und der Leerlaufverlust fällt weiterhin an.

Kosten treiben durch Sparen am Preis

Die Spulenkörper herkömmlicher Kleintransformatoren und oft auch der hier betrachteten Baugrössen werden nämlich, wenn die geforderte Leistung gerade noch ein wenig unter der prinzipiellen Leistungsfähigkeit der gewählten Baugrösse liegt, noch nicht einmal voll gewickelt, gerade so, als müsse eine bestimmte Mindest-Erwärmung unbedingt erreicht werden.

Im völligen Einklang hiermit hat sich eine Mentalität unter Produzenten wie Anwendern breit gemacht, die einen Trafo höherer Isolierstoffklasse als den besseren ansieht. Physikalische Tatsache ist: Der Trafo mit der höheren Temperaturklasse darf definitionsgemäss heisser werden, und das tut er in der Regel auch. Warum sonst sollte der Hersteller die teureren Isolierstoffe einsetzen? Die Temperatur liegt höher, die Verluste liegen höher, und der Trafo bringt entsprechend mehr Wärme in die Anlage ein, in der er seinen Dienst verrichtet. Er ist allenfalls ein wenig kleiner, aber das ist sein einziger Vorteil, und der wird oft genug schon dadurch mehr als aufgezehrt, dass man wegen der höheren Temperatur mehr Abstand halten und wegen der höheren Verlustleistung mehr Aufwand zur Wärme-Abfuhr treiben muss. Der Spannungsfall wird ebenfalls höher. Die Fachwelt muss sich dringend verabschieden von der Mentalität: «Mein Trafo ist besser als deiner, weil er heisser wird.» So kann man es nämlich auch formulieren; dann wird der Unfug dieser Denkensart klarer. Eine Werbeagentur, die früher einmal sehr erfolgreich Waschmittel vermarktet hat, könnte ein solches Produkt etwa mit dem Werbespruch anpreisen: «Das wird so heiss, heisser geht's nicht!» Wenn der «Fortschritt» von Klasse H (180 °C Dauer-Gebrauchstemperatur) auf Klasse C (220 °C) dann auch noch gelingt, könnte man nachsetzen: «Das wird noch heisser!»

Wie ist es hierzu gekommen? In der Regel wird der Preisdruck als Grund angeführt, der nur die Beschaffungspreise berücksichtigt, aber keinerlei Folgekosten. Das hiesse, dem zuwider handelnde Anbieter müssten mittlerweile vom Markt verschwunden sein. Tatsache ist aber, dass es Transformatoren-Hersteller gibt, die sich genau die Philosophie auf die Fahnen geschrieben haben, Qualität anzubieten, auch wenn der Kunde zunächst nur auf Preise schielt, und diese Unternehmen können sehr wohl von ihrem Umsatz leben. Man muss seinen Kunden nur erklären, warum die Spulenkörper immer voll gewickelt sind, warum diese Transformatoren meist etwas, manchmal auch wesentlich teurer sind als scheinbar gleichwertige Produkte des Wettbewerbs und warum der billigste Trafo meist zur teuersten Gesamtanlage führt, und offenbar gelingt es oft genug, erfolgreiche Überzeugungsarbeit zu leisten, um auch wirtschaftlich damit Erfolg zu erzielen.[16]

Ein Hersteller setzt schon ab einer Bauleistung von etwa 1 kVA grundsätzlich nur kornorientiertes Blech ein. Möglicherweise hängt es damit zusammen, dass die Transformatoren – hier in jedem Sinne des Wortes Spartransformatoren – zum Teil in einem anderen Geschäftsbereich des eigenen Werkes in Energiesparanlagen eingebaut werden[17] ebenso wie spezielle Stromrichter-Zwischenkreisdrosseln desselben Unternehmens, zu denen gesagt wird: «In den letzten Jahren erhöhten sich aus Kosten- und Platzgründen die Isolierstoffklassen bis zur Isolierstoffklasse H 180 °C. Daraus ergeben sich viele Nachteile …»[18], wie oben bereits beschrieben. Abgesehen davon, dass wieder einmal Preise mit Kosten verwechselt wurden, denn es hätte sachlich korrekt «aus Preis- und Platzgründen» heissen müssen, verdeutlicht dies die Firmenphilosophie, die hier nur lobend hervorgehoben werden kann.

---

[16] *www.riedel-trafobau.de, www.buerkle-schoeck.de*

[17] Decker, Christiane: *«Energie sparen mit EMU»* «de» 15-16/2000, S. 34, und Fassbinder, Stefan: *«Sparen mit dem Spartrafo»*, «de» 8/2000, S. 39, verfügbar als Sonderdruck s183 *«Energie sparen mit Spartransformatoren»* des Deutschen Kupferinstituts, Düsseldorf.

[18] Bürkle, Thomas: *«Wassergekühlte Zweipunkt-Zwischenkreisdrosseln»*, «etz» 22/2000, S. 18.

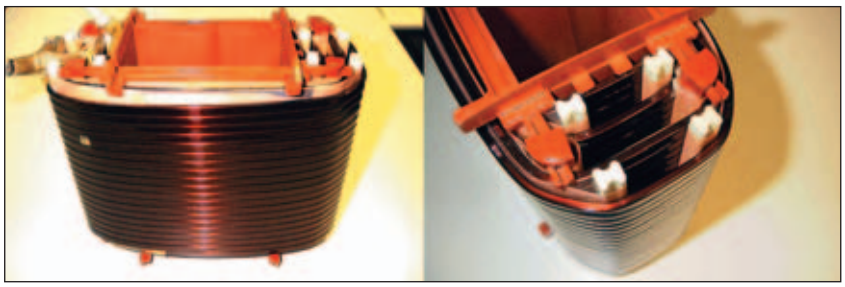


Bild 34 Spule eines Einphasen-Transformators, Ober- und Unterspannung als Lagenwicklung gefertigt, ähnlich dem betrachteten Transformator.

Tabelle 6 Verbesserung des Billig-Transformators Version Nr. 0 in Stufen 1 bis 7.

Ein Beispiel

Nachfolgend soll am Beispiel eines Einphasen-Trockentransformators von 40 kVA für den industriellen Einsatz dargestellt werden, wie sehr die Verluste je nach Auslegung variieren können und wie schnell sich der Aufpreis für eine bessere Ausführung bezahlt macht, denn im industriellen Bereich besteht dringenderer Handlungsbedarf als beim Netz der öffentlichen Versorgung. Zu diesem Zweck wurde der Transformator in 8 möglichen Varianten durchgerechnet und dem Kunden angeboten (Tabelle 6). Die Version Nr. 0 war als billigste die Basisversion – nicht kostengünstig, preiswert oder was sonst noch alles für beschönigende, leider aber falsche Ausdrücke hierfür angewendet werden, sondern schlichtweg die im Kaufpreis billigste. Die rechteckigen Wicklungen waren so ausgelegt, dass zwischen allen Lagen und an allen Seiten Kühlkanäle erforderlich wurden. Danach wurden in 7 Stufen Verlustminderungs-Massnahmen vorgenommen, von denen die ersten 6 sich auf Vergrösserungen der Leiterquerschnitte beschränkten. Man sollte meinen, dies vergrössere den Transformator, doch im Gegenteil. Schwerer wird er zwar, jedoch eher kleiner statt grösser, denn indem man die Kühlkanäle quasi zur Hälfte mit Kupfer auffüllt, erübrigt sich die andere Hälfte. Zunächst können die Kanäle zwischen den Lagen einer Wicklung an den Breitseiten weggelassen werden (ähnlich der Spule in Bild 34), dann – mit zunehmendem Draht-Querschnitt – auch die an den Breitseiten zwischen den beiden Spulen und am Ende auch die Kanäle an den Stirnseiten. In Version 7 bleiben die Wickeldaten (Drahtquerschnitte und Windungszahlen) aus Version 6 erhalten, jedoch der Kern wird von warm gewalztem auf kornorientiertes Blech umgestellt. Dennoch fällt der Kupferverlust noch einmal, da dieses Eisen höher magnetisierbar ist. Die Schichthöhe wird kleiner und die mittlere Windungslänge somit kürzer.

Die Auswirkungen der in Tabelle 6 zwangsweise relativ unübersichtlich aufgeführten Veränderungen wurden in Bild 35 übersichtlich dargestellt. Dabei fallen vor allem zwei Punkte auf:

- Die Verluste fallen im Verlauf der Verbesserungen deutlich steiler, als der Preis steigt.
- Die Amortisationszeit liegt für fast alle Verbesserungsstufen unter 1,5 Jahren, nur das bessere Eisen braucht etwas länger. Dabei wurde mit einem Strompreis von 10 c/kWh und 242 Arbeitstagen im Jahr zu je einer Schicht von 8 Stunden gerechnet. Bei 2-Schicht-Betrieb halbieren sich die Zeiten noch einmal.

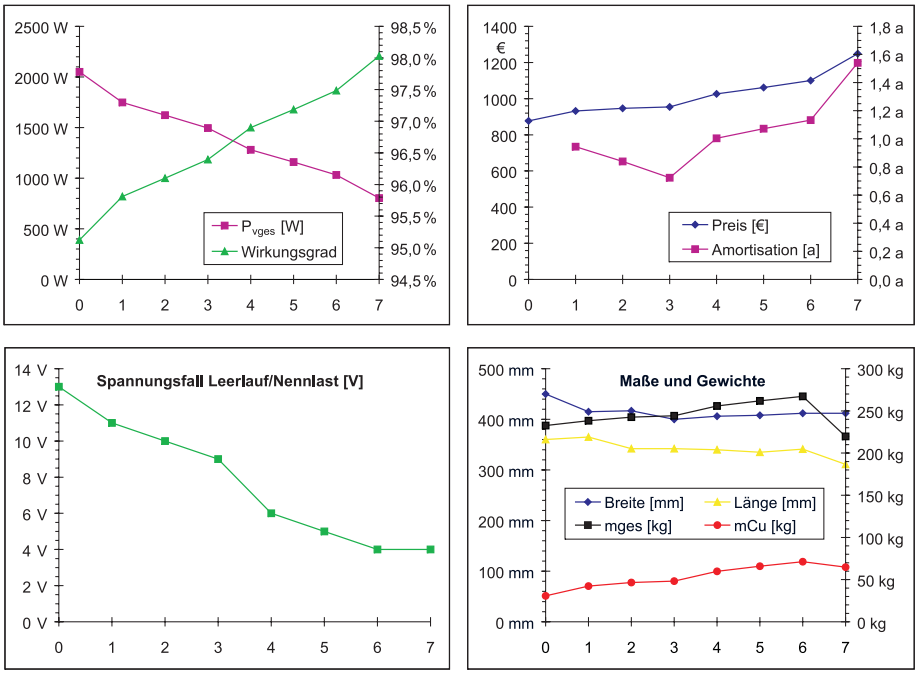
Dazu kommt ein weiterer technischer Vorteil als «Nebenwirkung» der Verlustminderung: Der Spannungsfall im Trafo fällt – nicht immer ein Vorteil, da bei grösseren Transformatoren als hier betrachtet stets ein definierter Spannungsfall gewünscht ist. Dort ist jedoch das Weglassen des Kanals aus Kühlungs- ebenso wie aus Isolationsgründen nicht möglich. Der Beispieltrafo hier ist aber relativ klein und arbeitet eingangs- wie ausgangsseitig im Niederspannungsbereich, und ein möglichst geringer Spannungsfall, sowohl ohmsch wie induktiv, war vom Prozess her vorteilhaft.

Auf die Frage ein Jahr später, was denn nun aus der Anfrage von damals geworden sei, wird der Hersteller etwas verlegen: «Das darf man eigentlich gar nicht erzählen. Der Kunde hat den billigsten genommen. Und nicht nur das, sondern er hat auch noch die Last falsch angegeben. Jetzt rauchen die Dinger einer nach dem anderen durch». Ein verbesserter Transformer der Stufe 5, 6 und 7 hätte hinreichend Reserven aufgewiesen, um den Fehler

6

Version	Kanäle / Bauart									Maße & Gewichte					Elektrische Rechenwerte					Preis	Amortisation
	zw. Kern & US-Wicklung		in US-Wicklung		zw. US- & OS-Wicklung		in OS-Wicklung		Paket-Höhe	Breite	Länge	m_{Fe}	m_{Cu}	m_{ges}	P_{vFe}	P_{vCu}	P_{vges}	ΔU	η		
	Stirn [mm]	Breit [mm]	Stirn [mm]	Breit [mm]	Stirn [mm]	Breit [mm]	Stirn [mm]	Breit [mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg]	[kg]	[W]	[W]	[W]	[V]	[%]	[€]	[a]
0	10	10	10	10	10	10	10	10	100	450	360	202	30,7	232,7	417	1634	2051	13	95,1%	877	––
1	10	10	10	0	10	10	10	0	100	415	365	196	42,4	238,4	406	1343	1749	11	95,8%	932	0,944
2	10	10	0	0	10	10	10	0	100	417	342	196	46,6	242,6	406	1217	1623	10	96,1%	946	0,839
3	10	10	0	0	10	0	10	0	100	400	342	196	48,2	244,2	406	1090	1496	9	96,4%	955	0,723
4	10	10	0	0	10	10	0	0	100	406	340	196	59,9	255,9	406	874	1280	6	96,9%	1027	1,004
5	10	10	0	0	0	0	0	0	100	408	335	196	65,9	261,9	406	753	1159	5	97,2%	1062	1,072
6	Wie 5, jedoch noch stärkerer Draht								100	412	341	196	71,3	267,3	406	626	1032	4	97,5%	1100	1,133
7	Wie 5, jedoch kornorientiertes Blech, kleinere Paket-Höhe								80	412	311	155	64,7	219,7	223	580	803	4	98,0%	1249	1,541

Grafische Darstellung von Tabelle 6



der falschen Angabe auszugleichen und diese Ausfälle zu vermeiden.

Es gibt aber auch Lichtblicke. Während einige Hersteller von Giessharz-Verteiltransfomatoren ein paar Kilogramm Kupfer (in der Oberspannungswicklung) und Aluminium (in der Unterspannungswicklung) bzw. ihre Kunden ein paar Euro beim Kaufpreis sparen wollen und die Wicklungen mittels Zwangskühlung beblasen, verzichten andere ganz bewusst so lange wie möglich auf diese letztlich auch ausfallgefährdete Mechanik. So werden Giessharz-Trafos in Kühlart AN (Luft-Naturkühlung) schon bis 6,3 MVA angeboten. Hier werden hohe Isolierstoffklassen natürlich unumgänglich und dienen nicht mehr einer an sich vermeidbaren Energie-Verschwendung, sondern der Realisierbarkeit. Andere Hersteller setzen im Bereich um 1 MVA bereits Lüfter ein, die jedoch nur im Notbetrieb bei Überlast anlaufen, bei Nennlast und üblicher Umgebungstemperatur aber noch nicht erforderlich sind. Dies ist ein sinnvoller Ansatz, denn nur für ein paar Stunden Notbetrieb einen grösseren Transformator einzusetzen lohnt sich weder ökonomisch noch ökologisch. Ja, es könnte sogar im Jahresmittel die Verluste erhöhen, wenn der zu grosse Trafo dann zu gering ausgelastet ist (Bild 33).

Amorphes Eisen

Energetisch optimal wäre also bei einem Transformator, der über weite Teile seines Lebens gering belastet wird, ein Kern mit minimalen Verlusten. Während der Lastverlust vom Quadrat des Stroms abhängt und also bei halber Last schon auf ein Viertel des Nennwerts gefallen ist, hängt der Leerlaufverlust von der Spannung und von der Frequenz ab. Diese sollten beide konstant sein, und der Eisenverlust steht somit ständig in voller Höhe an, solange der Trafo in Betrieb ist, ob mit viel, mit wenig oder ohne Last. Daher auch die Bezeichnung Leerlaufverlust. Dieser ist also, obwohl fast eine Zehnerpotenz kleiner (vgl. Tabelle 3 mit Tabelle 4), für den praktischen Betrieb viel bedeutender als der Lastverlust. Ja, man muss sogar die oben gemachte Einschränkung in Zweifel ziehen, demzufolge der Leerlaufverlust besonders bei geringer Auslastung von Bedeutung ist, denn er bleibt (nahezu) unvermindert bestehen und verschwindet nicht etwa bei Belastung, nur weil der grössere Lastverlust hinzukommt. Ist der Trafo einmal installiert, lässt sich die Belastung und hiermit der Lastverlust z. B. durch andere Aufteilung der Lasten oder durch Beeinflussung des Lastgangs – zu «deutsch» *demand side management* – sehr wohl noch beeinflussen, während am Leerlaufverlust nichts mehr zu ändern ist. Steht jedoch die Auslegung oder Auswahl eines neuen Transformators an, gilt es sehr wohl, auf das Verhältnis der Verluste zu achten (Bild 33).

Niedrigen Leerlaufverlust erreicht man ausser durch Senkung der Induktion mit speziellen Kernwerkstoffen. Je dünner das Blech, desto weniger Wirbelströme kann es ausbilden. Gänzlich unterbunden sind sie in Kernwerkstoffen, die nicht elektrisch leiten, den so genannten Ferriten, doch die sind der Hochfrequenztechnik vorbehalten, da ihre Magnetisierbarkeit für Netzfrequenz-Transformatoren zu gering ist. Ein Kompromiss besteht im so genannten amorphen Eisen, das aus der Schmelze fein zerstäubt und auf eine rotierende Walze aufgesprüht wird. Dabei kühlt es sich extrem schnell ab, so schnell, dass es keine Kristalle bilden kann, daher die Bezeichnung. Der entstehende Kernwerkstoff ist leider nur bis höchstens 1,3 T magnetisierbar statt bis etwa 1,75 T wie kalt gewalztes, kornorientiertes Blech, doch der Leerlaufverlust eines Transformators mit einem solchen Kern (Bilder 36 und 37) liegt um 60% niedriger. Leider wird der Transformator entsprechend der niedrigeren Induktion grösser und schwerer und auch entsprechend teurer. Ausserdem ist er um etwa 12 dB lauter. Beides muss nicht immer ein Hindernis gegen den Einsatz sein, zumal Studien in Belgien, Grossbritannien und Irland zu Amortisationszeiten von 3 bis 5 Jahren führten, was sich also bei einer Lebensdauer von 30 Jahren 6- bis 10-mal bezahlt macht, doch so schwer, wie der amorphe Kern ist, so schwer lässt er sich auch vermarkten. In Deutschland hat es eine Firma versucht.[19] In Belgien und Irland wurden umfangreiche Studien durchgeführt und einige Transformatoren verkauft,[20] doch dann kam die Liberalisierung der Strommärkte mit ihren fallenden Strompreisen dazwischen. Bekanntlich spielen auf dem freien Markt, anders als man nach wirtschaftlicher Logik annehmen sollte, Kosten keine Rolle, sondern Preise.

[19] *www.marxtrafo.de*
[20] *www.power-technology.com/contractors/switchgear/pauwels*

Transformatoren für Anlagen der regenerativen Energie-Erzeugung

Eine jede Windkraft-Anlage (WKA) beinhaltet einen Transformator, um die Generatorleistung, die meist bei 690 V erzeugt wird, in das Mittelspannungsnetz einspeisen zu können.

Gemäss in der Transformatoren-Industrie und in der Stromwirtschaft üblichen Formeln wird bei der Herstellung und Beschaffung von Transformatoren eine so genannte Verlust-Bewertung vorgenommen. Die gibt an, welche Investition je vermiedener Verlustleistung sich noch lohnt und welche nicht mehr. Gelegentlich – bei Grosstransformatoren – kommt dieser Satz auch als Pönale, als Abzug vom Kaufpreis bei Überschreitung des vertraglich vereinbarten Verlusts bzw. als Vergütung, als Aufpreis bei Unterschreitung, zum Tragen. Im Falle eines Transformators für eine Windkraft-Anlage (WKA) wurde eine Bewertung des Leerlaufverlusts in Höhe von 9,28 €/W ermittelt – ein hier mit Recht relativ hoher Wert. Der Lastverlust kam jedoch mit herkömmlichen Rechenmethoden nur auf 0,79 €/W. Das wäre für einen gewöhnlichen Transformator schon wenig gewesen und führte im vorliegenden Fall auch zu dem Schluss, dass sich der CC'-Trafo noch rechnete, der Schweizer «DD'» aber in den Lebensdauerkosten höher lag. Eine neu entwickelte probabilistische Rechenmethode[21] jedoch, die das Verhalten des Transformators an die 4000-mal in allen denkbaren Betriebszuständen betrachtet und die zugehörigen Verluste ermittelt, kam auf 1,43 €/W. Damit wäre der reale Schweizer Transformator der hypothetischen Klasse «DD'», die in der neuen Klasse B_0A_K ihre Entsprechung finden wird, oder sogar ein A_0A_K-Transformator der Trafo der Wahl gewesen. Doch wie kam es zu der Abweichung? Die herkömmliche Methode rechnete mit der durchschnittlichen Auslastung, und die ist gering, weil der Wind selten so stark bläst, dass die WKA mit voller Leistung fährt, ja, oftmals gänzlich abflaut. Dieser Ansatz ist aber falsch, weil der Lastverlust nicht linear, sondern mit dem Quadrat der Last zunimmt. Beträgt der Nenn-Kupferverlust z. B. 8 kW, so sind es bei halber Last nur noch 2 kW. Eine Stunde mit voller Last und eine Stunde Stillstand verursachen also zusammen 8 kWh Verlustwärme, 2 Stunden mit halber Last dagegen nur 4 kWh. Der Unterschied ist der Gleiche wie zwischen dem echten Effektivwert und dem Gleichricht-Mittelwert von Wechselströmen[22] und wird umso grösser, je diskontinuierlicher der Verlauf ist, und regenerative Energien sind zumeist wesentlich diskontinuierlicher als konventionelle. Im vorliegenden Fall muss auch berücksichtigt werden, dass die WKA oftmals still steht oder aber im schwachen Wind vor sich hin dümpelt, ohne zu produzieren. Theoretisch ist die Produktion dann negativ, weil die Steuer- und Überwachungstechnik in Betrieb bleiben muss. Deren Bedarf ist zwar minimal im Vergleich z. B. zu einem Kohlekraftwerk, das etwa 7% seiner Brutto-Generatorleistung für den Eigenbedarf verbraucht, doch die Leistung muss aus dem Netz bezogen werden. Dies bedingt, dass der Transformator in Betrieb bleiben muss, wenn er auch nahezu leer läuft. Der Leerlaufverlust bleibt also für 8760 h/a von Bedeutung, unabhängig davon, wie lange die Anlage Voll- oder Teillast oder gar nicht produziert.

Speziell für Deutschland mit seinem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) kommt hinzu, dass nach diesem für den eingespeisten Strom Vergütungen zu zahlen sind, die beim Doppelten bis Dreifachen des Marktpreises liegen. Dies verdoppelt oder verdreifacht auch den Wert – oder zumindest den Preis – aller verlorenen Energie. Entsprechend müssten Leerlauf- und Lastverluste auch bewertet werden, was bei dieser Anwendung zu einer völlig anderen Auslegung führen müsste als im öffentlichen Netz üblich – eigentlich ein typischer Fall für den Transformator mit amorphem Kern.

Andere Länder, andere Sitten

Irland bot sich als Testfeld für amorphe Transformatoren nicht nur an, weil die herstellende Firma dort eine Produktionsstätte unterhält, sondern auch, weil dort die Netzverluste 1980 mit fast 12% für europäische Verhältnisse noch beschämend hoch lagen.

36

37

Bild 36 Kern aus amorphem Eisen (Bild: Pauwels), aus konstruktiven Gründen in 5-Schenkel-Bauweise (sonst nur bei Grenzleistungs-Transformatoren üblich).

Bild 37 Aktivteil mit amorphem Kern. (Bild: Pauwels)

Zwar war dies wohl mehr auf die dünne Besiedlung und entsprechende Weitmaschigkeit des Netzes zurückzuführen als auf Nachlässigkeit, doch vielleicht sah man dort mehr Handlungsbedarf als anderswo. Die Verbesserung auf heute unter 10% geht wohl auch kaum auf ein paar Modellversuche zurück.

Die meisten europäischen Staaten liegen zwischen 6% und 10%. Deutschland kann schon fast ein »Edelnetz« mit 4,6% Verlust aufweisen. Transformatoren werden hier auf allen Spannungsebenen so ausgewählt, dass sie im Verlauf eines typischen Tageslastgangs zwischen 30% und 60% ausgelastet sind. Das ist der optimale Bereich (Bild 33) – was aber andererseits theoretisch immer noch 4,6% Einspar-Potenzial offen lässt. Weniger hat nur Luxemburg mit 2% zu bieten, doch in einem dicht besiedelten Ländchen, in dem keine Übertragungsstrecke länger als 20 km werden kann, ist das vielleicht weniger

[21] *www.efficient-transformers.org*

[22] Fassbinder, Stefan: *«Netzstörungen durch passive und aktive Bauelemente»*, VDE Verlag, Berlin/Offenbach 2002.

schwierig. Im Allgemeinen liegt rund die Hälfte dieses Potenzials in den Transformatoren – und hier zum grössten Teil in den Verteil-Transformatoren.

Doch in anderen, weiter entfernten Ländern sieht es noch weit schlimmer aus. So wird aus Indien berichtet, dort würden Verteiltransformatoren oft regelmässig 50%, manchmal 100% überlastet. Die Ausfallrate läge folglich bei unglaublichen 25% pro Jahr. Das «Bulletin on Energy Efficiency», das offizielle Organ der IREDA (Indian Renewable Energy Developmental Agency – die immerhin gibt es dort) wird vom indischen Kupfer-Institut ICDC mit seiner Ausgabe vom Februar 2002 zitiert, wonach in Indien nicht einmal 50% des Stromverbrauchs in Rechnung gestellt wird. Der Rest fällt Netzverlusten (etwa 18%), der «widerrechtlichen Nutzung» oder der Schlampigkeit zum Opfer, weil die Versorger einfach keine Zähler einbauen.

Manche Stimmen meinen, die Einführung höherer Spannungsebenen hätte in unseren Breiten auch dem Zweck gedient, die «widerrechtliche Nutzung elektrischer Energie» (auch «nicht technische Verluste» genannt) zu erschweren. Der Transformator als Diebstahlschutz? Manche meinen auch, die Einführung der niedrigeren Frequenz von 16 2/3 Hz bei der DB, den SBB, den ÖBB und einigen skandinavischen Bahnen hätte diesem Zweck gedient, doch das ist wohl eher ein Gerücht. Die Frequenz sollte helfen, Kommutierungsprobleme der Reihenschlussmotoren zu mindern.

Ausblick

Ein Ersatz herkömmlicher Netztransformatoren durch irgendeine andere Technik, wie etwa die Schaltnetzteile bei Kleintransformatoren, ist derzeit nicht in Sicht. Wohl wird vermutet, in der Höchstspannung werde die Ebene 220 kV auf lange Sicht verschwinden und die Ebene 380 kV auf noch längere Sicht durch ein Gleichspannungsnetz ersetzt.[23] Dadurch entfiele zumindest ein Teil der heute notwendigen Transformatoren. Energetisch wäre diese Lösung aber ziemlich neutral, denn die Umrichter inklusive der notwendig werdenden Entstörfilter würden Verluste in ähnlicher Höhe verursachen.

Auch wurde versucht, noch verlustärmere Transformatoren mit supraleitenden Spulen zu entwickeln.[24] Leider aber sind diese Leiter nur bei Gleichstrom wirklich völlig verlustfrei, und die Eisenverluste können sogar höher werden, wenn der Kern mit gekühlt wird. Ausserdem wird die Kühlleistung ständig in voller Höhe benötigt, muss also dem teuren Eisenverlust zugeschlagen werden, obwohl der Trafo in der Praxis kaum jemals oder jeweils nur für kurze Zeit voll belastet wird. So blieb am Ende keine Verlust-Einsparung mehr übrig. Nur in Bahnfahrzeugen sollte man supraleitende Transformatoren einsetzen, sobald diese serienreif sind, denn hier sparen sie sowohl Gewicht – und damit noch einmal zusätzlich Energie – als auch Platz. Ausserdem sind die gegenwärtigen Bahntransformatoren aufgrund der Gewichts- und Platzprobleme ganz anders ausgelegt (»ausgereizt«) und daher vom Wirkungsgrad her viel schlechter als vergleichbare Netztransformatoren.

Besondere Belastungen und besondere Lösungen

In den vorangegangenen Folgen war bereits mehrmals von Transformator-Verlusten die Rede, vom Leerlaufverlust und Lastverlust. Von hier an stehen die Lastverluste im Plural, denn hier geht es um Formen von Belastung ausserhalb jener, für die ein Transformator üblicherweise ausgewiesen ist, die aber heute im Netz vorkommen. Solche Lasten muss man differenzierter betrachten, und darum soll es hier gehen.

Übellast

Man könnte sagen, es gäbe beim Transformator nicht nur Überlast, sondern auch «Übellast». Die ist noch übler als die Überlast. Wird der Transformator, wie vorgesehen, mit sinusförmiger Spannung gespeist und mit sinusförmigem Strom belastet, so ist die Betrachtung noch vergleichsweise einfach: Die Eingangsspannung verursacht einen geringfügigen Magnetisierungs- oder Leerlaufstrom und somit einen bestimmten Leerlauf- oder Eisenverlust durch die nicht völlig unterdrückbaren Wirbelströme im Kern, und der Laststrom verursacht ohmschen Last- bzw. Kupferverlust in jeder Wicklung. Die Stromwärme des Leerlaufstroms in der Eingangswicklung ist vernachlässigbar. Spannung und Frequenz sind konstant, und somit ist der Eisenverlust fix. Zusätzlicher Verlust tritt in elektrisch leitfähigen mechanischen Bauteilen auf, wo das magnetische Streufeld Wirbelströme induziert, vor allem in ferromagnetischen Teilen, die Streufelder auf sich ziehen. Dieser Verlust ist im Leerlauf ebenfalls konstant und wird dem Leerlaufverlust einfach zugeschlagen, ist also in dem angegebenen Wert bereits enthalten. Nur die bereits früher behandelte kapazitive Belastung stellt die einzig traditionelle Form der «Übellast» dar, da sie einen «negativen Spannungsfall» im Trafo erregt und den Leerlaufverlust und die Spannung an der Last überhöht.

Die Streufelder sind aber im Leerlauf nicht sehr stark. Bei Belastung tritt ein zweites Streufeld hinzu, das vom Hauptstreukanal ausgeht, also von dem Bereich zwischen den Spulen, der nur von der aussen liegenden Spule durchflutet wird und nicht von der innen liegenden. Wie auf Seite 9 «Kurzschlussspannung» beschrieben, ist dieser Kanal für Transformatoren

---

[23] Fassbinder, Stefan: *«Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)»* «de» 11/2001, S. gig9, enthalten im Sonderdruck s180 *«Drehstrom, Gleichstrom, Supraleitung – Energie-Übertragung heute und morgen»* des Deutschen Kupferinstituts, Düsseldorf.

[24] Fassbinder, Stefan: *«Supraleitung – ein Teil zukünftiger Energieversorgung?»* «de». 9/2001, S. 38, enthalten im Sonderdruck s180 *«Drehstrom, Gleichstrom, Supraleitung – Energie-Übertragung heute und morgen»* des Deutschen Kupferinstituts, Düsseldorf.

38

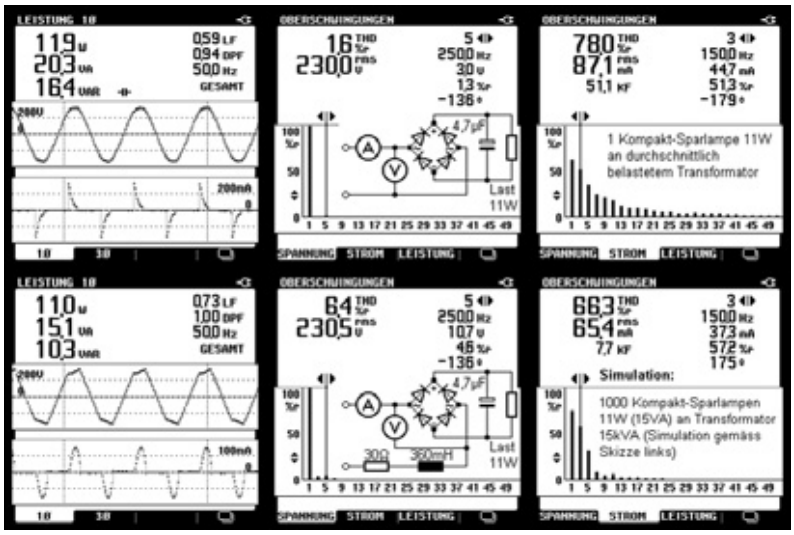


Bild 38 Strom und Oberschwingungsspektrum einer Kompakt-Sparlampe 11 W, oben an durchschnittlich belastetem Transformator in einem Wohngebiet, unten Simulation eines Transformators, der ausschliesslich mit solchen Lampen bis zum Nennstrom belastet ist.

ab Verteiltrafogrösse erforderlich für:

- Isolation
- Kühlung
- Begrenzung des Kurzschlussstroms.

Die Stärke dieses vom Laststrom abhängigen Teils des Streufeldes steigt proportional zum Strom und induziert wiederum proportional hierzu sozusagen eine «Wirbelspannung» in vom Feld durchsetzten leitfähigen Teilen. Diese Spannung treibt die Wirbelströme in solchen Teilen. Auch und gerade in den Leitern, deren Leitfähigkeit um knapp eine Zehnerpotenz höher liegt als die der Stahlteile, kommt ein zusätzlicher Kreisstrom in einer Ebene senkrecht zur eigentlichen Stromrichtung zum Fliessen, umso mehr, je dicker der Leiterquerschnitt ist. Aufgrund der ohmschen Verhältnisse – konstante Temperatur angenommen – verläuft dieser Querstrom wieder proportional zur «Wirbelspannung». Somit steigt dieser Anteil des Wirbelstrom-Verlusts ebenfalls im Quadrat zum Laststrom und wird normalerweise dem aus Strömen und Wicklungswiderständen errechneten Lastverlust (als Aufschlag von etwa 5% bis 10%) zugeschlagen. *Normalerweise* – also bei der Nennfrequenz, für die der Transformator ausgewiesen ist. Nun ist eine induzierte Spannung aber bekanntlich proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der magnetischen Flussdichte, also zum Scheitelwert *und* zur Frequenz des erregenden Feldes. Somit steigt der Wirbelstromverlust im Quadrat zum Strom *und* im Quadrat zur Frequenz!

Müssen sich nun mehrere Ströme verschiedener Frequenzen – es darf auch ein Gleichstrom darunter sein – eine gemeinsame Leitung teilen, so errechnet sich der Gesamteffektivstrom in dieser Leitung, indem man die Einzelwerte quadriert, die Quadrate addiert und aus der Summe wieder die Wurzel zieht. Hier wollen wir vorerst von folgendem, vereinfachtem, erdachtem Beispiel ausgehen:

Ein Transformator habe einen Wirbelstromverlust in Höhe von 10% des Kupferverlusts und werde mit 70,7% seines Grundschwingungs-Nennstroms (50 Hz) und mit 70,7% seines Nennstroms an dritter Harmonischer (150 Hz) belastet. Der Gesamtstrom errechnet sich dann zu:

$$I = \sqrt{(0{,}707\ I_N)^2 + (0{,}707\ I_N)^2} = I_N$$

Der Transformator läuft also mit Nennstrom. Der Beitrag der Grundschwingung zu den Wirbelstromverlusten, auch Zusatzverluste P_Z genannt, beträgt:

$$P_Z = 0{,}707^2\, P_{ZN} = 0{,}5\ P_{ZN}$$

der Zusatzverluste P_{ZN} im Nennbetriebspunkt bei 50 Hz Sinus-Nennstrom, worauf sich alle Nennwerte – meist unerwähntermassen – beziehen. Diese Grundschwingung in Höhe von 70,7% des Nennstroms erzeugt also Wirbelstromverluste in Höhe von 50% der Wirbelstromleistung, die bei Nennlast auftritt, also 5% der Nenn-Kupferverluste. Der am Ausgang abgenommene Strom der dritten Oberschwingung mit 150 Hz, der am Eingang auch als solcher gezogen werden muss, verursacht jedoch eine Wirbelstromverlustleistung in Höhe von

$$P_Z = 0{,}707^2\, P_{ZN} \left(\frac{150\ Hz}{50\ Hz}\right)^2 = 4{,}5\ P_{ZN}$$

Der Gesamteffektivstrom entspricht also genau dem Nennstrom. Dadurch sollte eine Überlastung des Transformators ausgeschlossen sein, doch die Wirbelstromverluste, die von den beiden Komponenten dieses Gesamtstroms zusammen erzeugt werden, belaufen sich auf genau das Fünffache dessen, was der Transformator bei Nennlast, also 50 Hz Sinus, vorzuweisen hat und was normalerweise einfach als ein – noch dazu geringfügiger – Teil der Kupferverluste betrachtet wird. Dies hat schon zu anfänglich rätselhaft erscheinenden Überhitzungen geführt.

Seit Langem schon werden so genannte Stromrichtertransformatoren gebaut, bei denen die «zusätzlichen Zusatzverluste» bei der Bemessung eingerechnet werden. Ausserdem versucht man, deren Anteil zu mindern. Durch Aufteilung dicker Leiter in mehrere gegeneinander isolierte Einzeladern nach dem Prinzip der HF-Litze, durch grössere Abstände bestimmter mechanischer Teile vom Streufeld oder aber durch Einsatz magnetisch oder elektrisch nicht leitender mechanischer Komponenten lassen sich die Wirbelströme erforderlichenfalls noch senken. Bewährt hat sich der Gebrauch von Edelstahl, der im Gegensatz zu gewöhnlichem Baustahl erstaunlicherweise nicht ferromagnetisch ist. Ausserdem ist die elektrische Leitfähigkeit des Edelstahls, also auch für Wirbelströme, noch einmal um die Hälfte geringer. Nun ist aber ein solcher Stromrichtertransformator gewöhnlich zur ausschliesslichen Speisung eines einzigen Stromrichters gedacht, und dessen Oberschwingungsspektrum ist im Voraus bekannt. Um einen handelsüblichen Transformator in Anwesenheit von Oberschwingungen, bei-

Oberschwingungsmessung Osram Dulux 11W mit Serien-Impedanz R = 30 Ohm, X = 113 Ohm							
	U	U^2	I_L	I_L^2	I_N	I_N^2	P_Z/P_{Cu}
n	V	V²	mA	mA²	mA	mA²	
1	230,2	52992,0	48,5	2352,3	0,0	0,0	5,6%
3	8,3	68,9	37,1	1376,4	111,3	12387,7	29,5%
5	10,7	114,5	20,3	412,1	0,0	0,0	24,5%
7	4,3	18,5	5,3	28,1	0,0	0,0	3,3%
9	1,1	1,2	3,0	9,0	9,0	81,0	1,7%
11	2,3	5,3	3,8	14,4	0,0	0,0	4,2%
13	1,0	1,0	1,5	2,3	0,0	0,0	0,9%
15	0,6	0,4	1,5	2,3	4,5	20,3	1,2%
17	1,1	1,2	1,5	2,3	0,0	0,0	1,5%
19	0,5	0,3	0,9	0,8	0,0	0,0	0,7%
21	0,5	0,3	1,3	1,7	3,9	15,2	1,8%
23	0,6	0,4	0,8	0,6	0,0	0,0	0,8%
25	0,4	0,2	0,6	0,4	0,0	0,0	0,5%
27	0,6	0,4	0,8	0,6	2,4	5,8	1,1%
29	0,4	0,2	0,5	0,3	0,0	0,0	0,5%
31	0,3	0,1	0,5	0,3	0,0	0,0	0,6%
33	0,3	0,1	0,5	0,3	1,5	2,3	0,6%
35	0,3	0,1	0,4	0,2	0,0	0,0	0,5%
37	0,3	0,1	0,4	0,2	0,0	0,0	0,5%
39	0,3	0,1	0,3	0,1	0,9	0,8	0,3%
41	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0	0,4%
43	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2%
45	0,1	0,0	0,2	0,0	0,6	0,4	0,2%
47	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2%
49	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1%
51	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3	0,1	0,1%
U = 230,7 V			I_L = 64,8 mA		I_N = 111,9 mA		
THD(U) = 14,6 V			THD(I) = 43,0 mA, entsprechend 66,4%				
Anteil der Zusatz-Verluste am Kupferverlust: 81,4%							

7

Tabelle 7 Messwerte an einer typischen Kompakt-Sparlampe und Auswirkungen auf den speisenden Transformator, angenommen dieser würde ausschliesslich mit solchen Lampen genau bis zum Nennstrom belastet.

spielsweise für ein Bürohochhaus, passend auszuwählen, sodass Überhitzung vermieden wird, gibt es bestimmte Faktoren, mit denen die Belastbarkeit im Verhältnis zur Nennleistung berechnet werden kann. In Nordamerika wurde hierfür der so genannte K-Faktor eingeführt. Wie eben schon in Worten ausgedrückt, gibt er an, um das Wievielfache der Wirbelstromverlust gegenüber der reinen Sinuslast ansteigt:

$$K = \sum_{1}^{n} I_n^2 n^2$$

wobei n die Ordnungszahl der betreffenden Oberschwingung und I_n deren Strom als relativer Anteil am Nennstrom ist, wie im obigen Zahlenbeispiel. Allerdings hilft diese Zahl nur dann weiter, wenn auch die Bezugsbasis, also der Anteil der Wirbelstrom-Verluste P_Z an den Verlusten des betreffenden Transformators, bekannt ist. Normalerweise aber werden nur Eisen- und Kupferverluste P_0 und P_K auf dem Leistungsschild spezifiziert, wenn überhaupt.

In Europa berechnet man statt dessen in nur geringfügig anderer Namensgebung den so genannten Faktor K, wie im Harmonisierungsdokument HD 538.3.S1 angegeben:

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 \sum_{n+2}^{n=N} \left(n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0,5}$$

worin

$$I = \left(\sum_{n=1}^{n=N} (I_n)^2 \right)^{0,5} = I_1 \left[\sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]^{0,5}$$

Das soll als Abschreckung reichen. Ist dem Praktiker die korrekte Anwendung dieser exakten Formeln endlich mit viel Mühe gelungen, fragt er sich, was ihm die exakten Ergebnisse denn nun sagen und wie exakt sie noch sind. Können doch die eingegebenen Ausgangswerte nur Annahmen, Schätzungen oder Erfahrungswerte sein, denn die zu planende Anlage steht noch nicht. Eine Messung ist also nicht möglich, eine Befragung des späteren Nutzers ausgeschlossen, weil der noch nicht feststeht. Viele Gebäude werden heute zuerst geplant und gebaut und erst dann ein Mieter oder Käufer gesucht. Das Oberschwingungsprofil ist also zurzeit der Planung noch unbekannt. Gehen wir das Problem daher lieber von der praktischen Seite an:

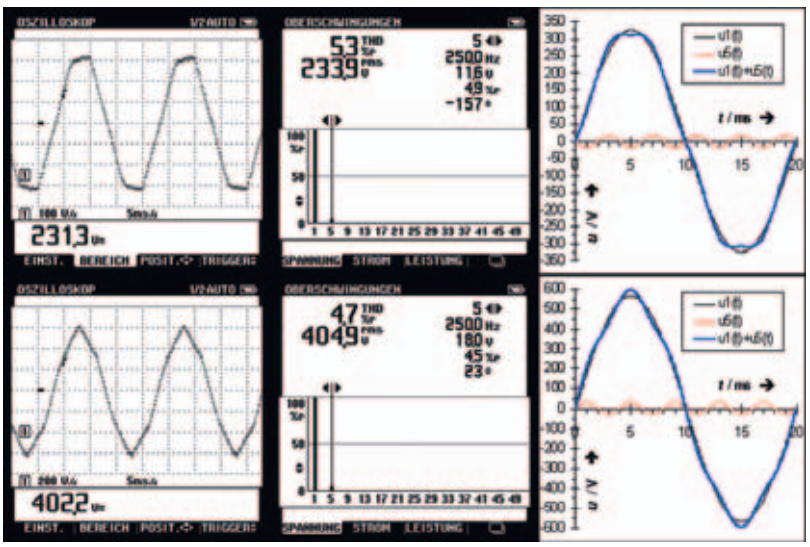
Soll ein gewöhnlicher Transformator eingesetzt werden, so kann man die Zusatzverluste mit 10% des für den 50-Hz-Betrieb angegebenen Lastverlusts annehmen, dann liegt man auf der sicheren Seite. Mit dieser Annahme führen wir nun ein Gedankenexperiment durch und belasten einen Transformator vollständig und ausschliesslich mit typischen Kompakt-Energiesparlampen (Bild 38).

Die Effektivwerte der einzelnen Teilschwingungen 1 bis 51 von Netzspannung und Lampenstrom wurden vom Messgerät abgeschrieben (Tabelle 7). Die Wurzel aus der Summe der Quadrate ergibt dann unten jeweils die Gesamt-Effektivwerte. Hieraus ergibt sich für die Lampe mit 11 W Nennleistung eine Scheinleistungsaufnahme von

230,7 V · 64,8 mA = 15,0 VA

Nun nehmen wir der Einfachheit halber an, der speisende Drehstromtransformator habe eine Nennleistung von 15 kVA und speise ausschliesslich 1000 solcher Lampen, symmetrisch auf die drei Aussenleiter aufgeteilt. Gut, um diese Voraussetzung erfüllen zu können, müsste man von 999 Lampen und 14,985 kVA Transformatorleistung ausgehen, aber man kann es mit der Genauigkeit beispielhafter Annahmen auch übertreiben. Da es ein wenig schwierig ist, einen solchen Transformator aufzutreiben und mit 1000 Sparlampen zu belasten, kann man sich auch mit einer einzigen Lampe behelfen und jeweils das 1000fache von R_K und X_K des Trafos vorschalten, wie in Bild 38 geschehen. Der Transformator erscheint mit solcher Last haargenau ausgelastet, aber eben nicht überlastet. Er scheint. Wer-

39



den jedoch die Wirbelstromverluste, wie angegeben, als im Quadrat zum Strom und im Quadrat zur Frequenz steigend eingesetzt, so ergibt sich etwa für die dritte Oberschwingung ein Beitrag in Höhe von 29,5% des für Nennlast angegebenen Kupferverlusts an Wirbelstromverlust. Die Grundschwingung verursacht dagegen nur 5,6%, denn sie ist bedeutend kleiner als der Gesamteffektivwert, der gleich dem Nennstrom ist und somit die angenommene Marke von 10% setzte.

Addiert man alle Beiträge von 1 bis 51 auf, so kommt heraus, dass allein der Wirbelstromverlust dieses Transformators von den angenommenen 10% bei Sinus-Nennstrom auf 81,4% des Kupferverlusts bei derart verzerrtem Nennstrom steigt! Der Nennstrom nennt also nicht immer den richtigen Strom, der Effektivstrom hat nicht immer den gleichen Effekt.

Massnahmen

Was soll der Praktiker also tun, dem die zuvor dargestellten Formeln aller Wahrscheinlichkeit nach überhaupt nichts genützt haben? Sich folgende Eckwerte merken, notieren, kopieren oder sonst wie zugänglich halten:

Der Anteil von 10% Streuverlust an den Lastverlusten war hoch gegriffen. Moderne Transformatoren, erst recht Stromrichtertransformatoren, mögen eher bei 5% oder darunter liegen. Damit sinkt auch der Anteil der durch Oberschwingungen verursachten «zusätzlichen Zusatzverluste» auf rund die Hälfte, also gut 40% des Kupferverlusts. Eine ausschliessliche Belastung mit Kompaktsparlampen oder gleichartigen Lasten (Schaltnetzteilen) kommt nur in extremen Fällen vor, etwa bei der Versorgung eines Rechenzentrums. Bleiben wir aber bei der Extremfallbetrachtung, dass aus Zusatzverlusten in Höhe von 10% der Kupferverluste gut 80% werden, also im Nenn-Betriebspunkt 70% mehr Lastverluste als für diesen Betriebspunkt vorausberechnet. Um die Kupferverluste mitsamt Wirbelstrom-/Zusatzverlust und somit die Erwärmung wieder auf den Wert zu bringen, der 100% bei 50 Hz entsprach, muss der für die Auswahl des Transformators zugrunde zu legende Echt-Effektivlaststrom also mit Rücksicht auf den quadratischen Zusammenhang zwischen Strom und Wärme um den Faktor

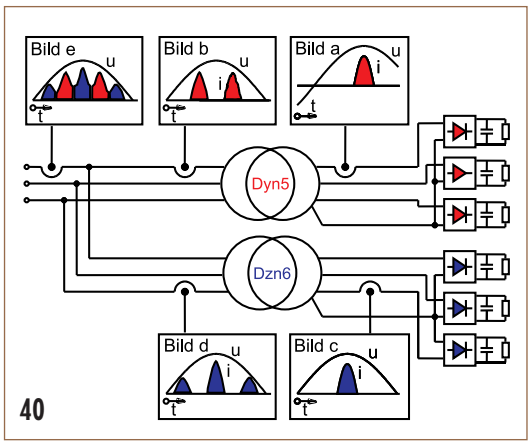
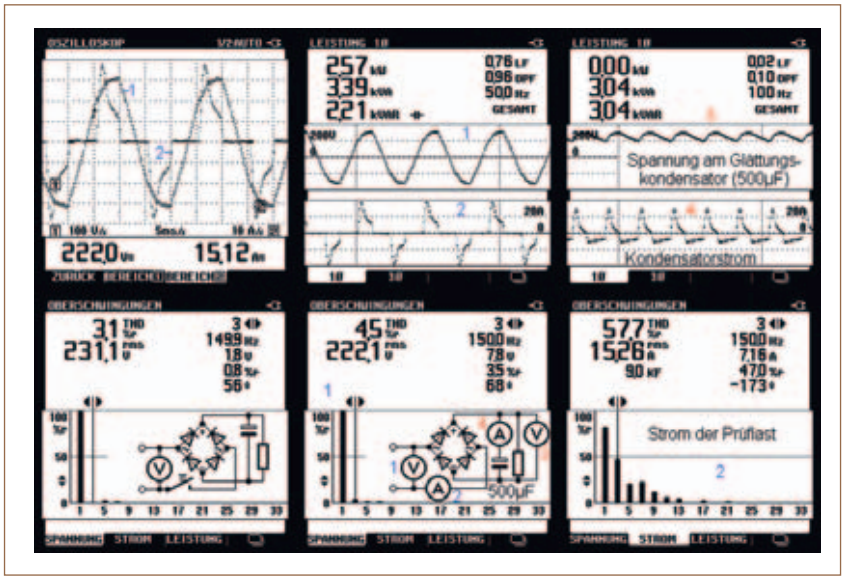


Bild 39 Strangspannung und Leiterspannung in einem deutschen Wohngebiet während des Fussball-Weltmeisterschafts-Endspiels gegen Brasilien, Messung und Simulation.

Bild 40 Einsatz von Transformatoren unterschiedlicher Schaltgruppen führt zum Phasen-Versatz der Strombuckel auf der MS-Ebene (Prof. Fender, FH Wiesbaden).

Bild 41 Unsymmetrische Verteilung von Gleichrichterlasten, hier 2,5 kW an einem Aussenleiter – und siehe da: Nun ist auch in der Spannung die dritte Harmonische grösser als die fünfte (unten Mitte).

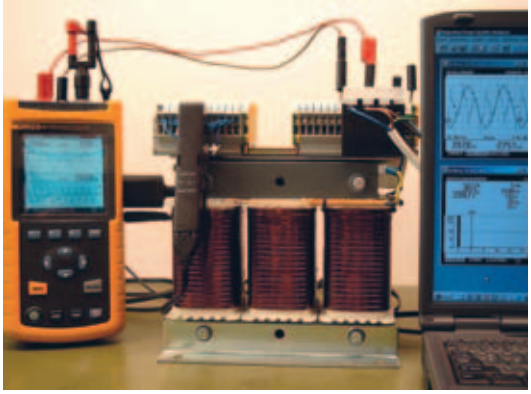


$$K = \sqrt{\frac{170\,\%}{100\,\%}} \approx 1{,}3$$

grösser angenommen werden, als er ist. Die Transformatorleistung sollte also annähernd 30% höher gewählt werden als nach dem eigentlichen Scheinleistungsbedarf $U_{Eff} \cdot I_{Eff}$ berechnet, denn der Rest der Verlustleistung, der Leerlaufverlust, bleibt von Oberschwingungsströmen weit gehend unbeeinflusst. Hier tritt eine Erhöhung erst ein, wenn die erregende Spannung Oberschwingungen enthält, doch die sind meist viel niedriger als die Oberschwingungen des Stroms. Der Sonderfall eines Gegenbeispiels folgt später.

Davon unberührt bleiben natürlich die Sicherheitsfaktoren, die aus anderen Gründen in die Planung meist eingesetzt werden; die müssen bleiben. Ergibt die Planung unter Zugrundelegung all jener Faktoren, wie Redundanz, Reserve für Lastzuwachs usw., jedoch ohne die Oberschwingungen, einen Bedarf von 1000 kVA, so sollte ein Transformator von 1250 kVA gewählt werden. Zum Schaden des Kunden ist dies langfristig sicher nicht, denn Verteiltransformatoren arbeiten je nach Auslegung stets zwischen 24 und 47% ihrer Nennleistung am wirtschaftlichsten (siehe Seite 18 und folgende).

Ausserdem muss der Sternpunkt mit 173% des Aussenleiterstroms belastbar sein. In den meisten Fällen wird diese Bedingung das engste Kriterium setzen, da bei Verteiltransformatoren normalerweise von einer Sternpunktbelastbarkeit von 100% ausgegangen wird – und auch dies nur bei ein- oder zweiphasiger Last, also mindestens einem unbelasteten Schenkel, denn bei voller, also symmetrischer dreiphasiger Last wird von vollständiger gegenseitiger Auslöschung der Rückströme im Neutralleiter ausgegangen. Dies ist indes nur für die Oberschwingungen nicht durch 3 teilbarer Ordnungen und für



42

Bild 42 Versuchsaufbau zu Bild 43.

Bild 43 Nur 3,2% THD in der Eingangsspannung treiben schon einen Kreisstrom in Höhe von 14% des Nennstroms in einer Dreieckwicklung.

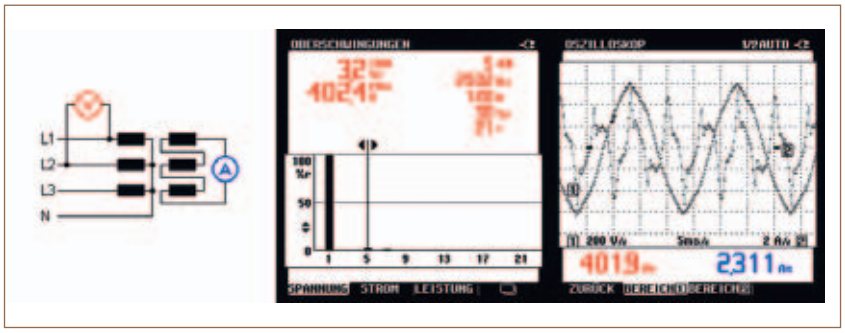
die Grundschwingung richtig. Die Oberschwingungen durch 3 teilbarer Ordnungen addieren sich linear im Neutralleiter, weil sie phasengleich sind, und dort addieren sie sich zu den anderen dort fliessenden Frequenzen wiederum quadratisch zum Gesamteffektivwert des Rückleiterstroms, wie in Tabelle 7 rechnerisch dargestellt.

Verschiedenartige Netzstörungen können sich unter bestimmten Umständen gegenseitig auslöschen. So ist es für einphasige Lasten nach Bild 38 charakteristisch, dass sie Strom nur dann vom Netz aufnehmen, wenn die Spannung sich gerade in der Nähe des Scheitelwerts befindet, dann aber umso heftiger. Im Dreiphasen-System müssen wir ergänzend hinzufügen, dass die Spannung zwischen einem Aussen- und dem Neutralleiter gemeint ist. Die Spannung zwischen L2 und L3 beispielsweise ist aber gegenüber der Spannung zwischen L1 und N um 90° versetzt. Dadurch hat die Spannung zwischen L2 und L3 gerade dann ihren Nulldurchgang, wenn der Strom von L1 nach N seinen (in Folge der «Übellast» überhöhten) Scheitelwert hat. Während die Spannung, die diesen Strom treibt, in Folge der Netzimpedanzen diesem äusseren Zwang nachgibt und um den Scheitel herum einbricht, weist die Verformung der Spannung zwischen den Aussenleitern genau das gegenteilige Bild auf (Bild 39)! Nun kann man aber durch geeignete Wahl der Schaltgruppe eine Strangspannung (die Spannung einer Spule) am Ausgang wahlweise aus einer Strangspannung oder aus einer verketteten Spannung am Eingang erzeugen, je nach dem, welche Schaltgruppe man wählt. Das ist im Prinzip das Gleiche, als ob man die Spannung im Bild 39 unten durch einen Einphasen-Transformator von 400 V auf 230 V herab transformiert und diese Spannung dann für einen Teil, optimalerweise für die Hälfte, jener Lasten verwendet, die die ursprüngliche Verzerrung der Spannung im Bild 39 oben verursacht haben. Die Verzerrung der Spannung wäre dann beinahe verschwunden. Das bedeutet: Transformatoren unterschiedlicher Schaltgruppen könnten einen ganz erheblichen Beitrag zur Netzreinigung beitragen, würde man sie nur gut gemischt einsetzen.

In der Tat wurde diese Methode schon von Prof. Fender und anderen vorgeschlagen[25] (Bild 40) – und im Falle des beschriebenen[26] Netzes der Katholieke Universiteit im belgischen Leuven bereits in den frühen Jahren der Elektrotechnik verwirklicht, wie in Folge 3 über die Schaltgruppen erwähnt. Zu dem dort genannten Vorteil kommt also in dem hier betrachteten Lastfall mit nicht linearen Lasten der Folgende hinzu: Würde jeder zweite der üblichen Dyn5-Transformatoren durch einen entsprechenden in Schaltgruppe Dzn6 oder Yzn6 ersetzt, zöge die Hälfte der Einphasen-Gleichrichterlasten ihre Strombuckel aus der Sicht des Mittelspannungsnetzes gegenüber der anderen Hälfte um 30° phasenversetzt. Oder anders betrachtet: Die von Einphasenlasten ins Netz entlassenen Oberschwingungen kämen teilweise (auf ihre höhere Frequenz bezogen) um 180° versetzt im Mittelspannungsnetz an und würden sich dort auslöschen. Die Simulation im Bild 39 rechts verdeutlicht dies. Ausserdem werden in der Mitte vom Bild 39 die Phasenwinkel der fünften Oberschwingung ausgewiesen, und man sieht, dass hier die fünfte Oberschwingung *sowohl* im oberen *als auch* im unteren Fall den grössten Teil der Verzerrung ausmacht. Da die beiden Fünften aber, wie man es auch ausdrücken könnte, jeweils gegensätzliche Polaritäten haben, würden sie sich auslöschen, wenn sie je zur Hälfte im selben Stromkreis aufträten (Bild 40).

Warum nur tut das dann kein Mensch? Weil der Transformator mit der Zickzackwicklung etwa 5%, ja vielleicht sogar 10% teurer wäre. Das ist der tatsächliche Grund. Der üblicherweise vorgebrachte ist, dass sich die Transformatoren dann ausgangsseitig nicht mehr parallel schalten lassen. Dies schliesst sich hingegen an jenen Betriebsorten, wo es nötig wäre, ohnehin ganz von selbst aus, denn das sind die Bürohochhäuser mit eigenem Niederspannungsnetz. In einem Gebäude die eine Schaltgruppe, im nächsten oder übernächsten die andere, das reicht vollkommen aus. Kein Mensch möchte Transformatoren mit verschiedenen Schaltgruppenkennziffern im selben Gebäude Seite an Seite aufstellen.

Dabei tragen die üblichen Dyn5-Transformatoren insofern schon zur Netzreinigung bei, als sie den einen Buckel je Halbschwingung und Aussenleiter, den die Einphasen-Gleichrichterlasten verursachen (Bild 40a), auf zwei Buckel in zwei Aussenleitern auf der Eingangsseite verteilen, je 60° vor- und 60° nacheilend, also nach abseits des dortigen Spannungsscheitels (Bild 40b). Dazu kommt der Effekt der im Dyn5-Transformator nahezu kurz-



43

[25] Fender, Manfred: *«Vergleichende Untersuchungen der Netzrückwirkungen von Umrichtern mit Zwischenkreis bei Beachtung realer industrieller Anschluss-Strukturen.»* Promotionsschrift, Wiesbaden, 1997.

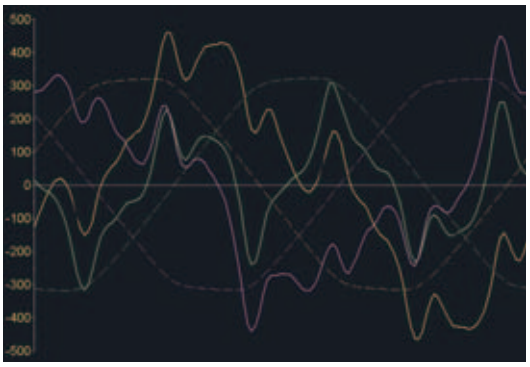
[26] Fassbinder, Stefan: *«Netzstörungen durch passive und aktive Bauelemente»*, VDE Verlag, Berlin/Offenbach, 2002.

geschlossenen Stromoberschwingungen durch 3 teilbarer Ordnung, die von den Verbrauchsmitteln her gleichphasig Richtung Trafo und durch den Sternpunkt wieder zurückfliessen, so als wären alle drei Aussenleiter parallel geschaltet. Diese drei Ströme verlangen nach einem gleichphasigen Gegenfluss in der Oberspannungswicklung, und den können sie bekommen, indem sie in dieser im Dreieck verschalteten Wicklung einen Kreisstrom induzieren. Sie finden dort als Impedanz lediglich die Streureaktanz und unter «ferner liefen» auch noch die Wicklungswiderstände vor. Das funktioniert jedoch nur, wenn dieser Strom unterspannungsseitig wirklich aus allen drei Aussenleitern gleichzeitig kommt. Der Grund ist im Prinzip der Gleiche wie zuvor in Folge 3 über die Schaltgruppen zur Belastbarkeit des Sternpunkts gesagt. Allein deshalb finden sich in üblichen Netz*spannungen* nur geringe Teile dritter Oberschwingung, obwohl die dritte im *Strom* dort vorherrscht. Sollte es jemals irgendwo gelingen, alle verzerrenden Lasten an einen Aussenleiter anzuschliessen und die linearen an die beiden anderen, wäre der Effekt dahin. Ein einfacher Versuch, in dem man z. B. ein elektrisches Heizgerät von 2 kW Leistung über Gleichrichter und Glättungskondensator an einer gewöhnlichen Haussteckdose betreibt (Vorsicht, die Leistung steigt dann über 3 kW!), zeigt es schon (Bild 41). Setzt man diesem immanenten Reinigungseffekt des Dyn5-Trafos noch den Versatz um 30° aus dem Trafo mit der anderen Schaltgruppe hinzu (Bild 40a), ist die Schönheit der ursprünglichen Sinuskurve (lat. sinus = Busen) nahezu wieder hergestellt. Natürlich aber werden dadurch, dass die Spannungsoberschwingungen fast aus dem Netz verschwunden sind, die Transformatoren nicht etwa entlastet, sondern im Gegenteil wird diese Entlastung durch verstärkten Fluss von Strom-Oberschwingungen auch und gerade innerhalb des Trafos und durch die Trafos erkauft. Insbesondere der in der Dreieckswicklung induzierte Kreisstrom erzeugt zusätzliche Verlustwärme. Auch daraus bestehen die «zusätzlichen Zusatzverluste». Ein Versuch an einem Kleintransformator (Bild 42) verdeutlicht, wie schnell dieser zusätzliche Verlust Bedeutung erlangt. Der Reihenwiderstand der im Dreieck verschalteten Ausgangswicklung beträgt 0,1 Ohm, und schon bei nur 3,2% THD in der Eingangsspannung fliesst darin ein Kreisstrom von 2,3 A (Bild 43). Der hierdurch verursachte Verlust $I^2 \cdot R$ liegt also um 0,5 W. Das ist etwa 1% der gesamten Kupferverluste und klingt als solches noch nicht nach viel. Bei 6,4% THDU, was auch vorkommt, wären dies aber schon 4% der Kupferverluste oder 4,6 A, was wiederum in diesem Fall 28% des Nennstroms entspräche. Somit müsste der Transformator um 28% niedriger belastet werden, nur um eine Überhitzung der Ausgangswicklung durch den 150-Hz-Kreisstrom zu vermeiden. Die 30% Überdimensionierung wegen der Zusatz-Verluste durch Wirbelströme wären dann noch einmal separat in Rechnung zu stellen.

Das Nullsystem, also die gleichpolige Komponente der Eingangsströme in den Drehstromtransformator, lässt sich auch an den drei Leerlaufströmen erkennen (Bild 44): Alle drei Ströme weisen im selben Moment eine ausgeprägte Spitze jeweils gleicher Polarität auf, und dies 6-mal je Netzperiode, obwohl die treibenden Spannungen doch um jeweils 120° gegeneinander versetzt sind. Trennt man die im Dreieck verschaltete Unterspannungswicklung auf und unterbricht damit den Strom aus Bild 43, so ist das im Bild 44 gezeigte Phänomen verschwunden, und die drei Ströme werden weit gehend unabhängig voneinander.

Als Nachtrag zum Kapitel Parallelbetrieb lässt sich hier noch anfügen, dass sich, wenn man zwei Transformatoren unterschiedlicher Kurzschlussspannungen parallel arbeiten lässt, die Oberschwingungsströme erst recht ungleich aufteilen, noch ungleicher als die Grundschwingung, weil bei höheren Frequenzen die Streureaktanz höher ist. Also ein Grund mehr, dies zu unterlassen, denn ein Transformator mit 4% Nenn-Kurzschlussspannung hat bei 150 Hz bereits nahezu 12% Kurzschlussspannung, bei 250 Hz sind es schon fast 20% und so fort, weil der innere Spannungsfall vorwiegend induktiv ist. Bei 6% Nenn-Kurzschlussspannung sind es schon wieder entsprechend mehr. Lediglich bei Dyn-Typen und Harmonischen durch 3 teilbarer Ordnungen gilt dies wegen der sich ausbildenden Kreisströme nicht.

44



45

Bild 44 Leerlaufströme eines Dreiphasen-Kleintransformators Schaltgruppe YNd11.

Bild 45 EMV-Transformator mit geringsten Streufeldern (Bild: Rauscher & Stoecklin).

Nun aber doch noch ein Blick auf die Spannung: In einigen Sonderfällen könnte sie doch so sehr verzerrt sein, dass nachteilige Auswirkungen auf einen daran betriebenen Transformator wirksam werden. So erzeugen kleine USV-Anlagen bei Stromausfall «systembedingt» (also weil sie sonst zu teuer würden) oft eine Rechteck- statt einer Sinusspannung. Die hat aber, wenn sie nicht lückt, einen um 11% kleineren Formfaktor als die Sinusspannung! Das ist der Verknüpfungsfaktor zwischen Betragsmittel- und Effektivwert. Der angegebene Wert ist stets der Effektivwert oder sollte es doch zumindest sein; die Magnetisierung ist aber vom Mittelwert abhängig. Bei richtigem Effektivwert

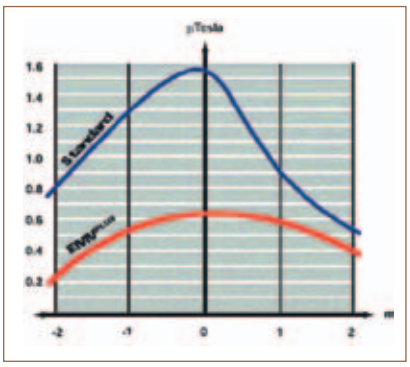


Bild 46 Verlauf der Flussdichte als Funktion des horizontalen Abstands von der Transformatormitte, gemessen in 2 m Höhe über dem Transformatordeckel (Messung: Rauscher & Stoecklin).

am Ausgang einer solchen Klein-USV wird ein daran betriebener Transformator also erheblich übererregt! Ausserdem ist der Klirrfaktor (Oberschwingungsgehalt) der Rechteckspannung so hoch, dass mit sehr stark erhöhten Leerlaufverlusten gerechnet werden muss!

Fazit

Transformatoren stehen also nicht nur herum und brummen, sondern sind fast schon richtige Wohltäter in verschmutzten Netzen, auch wenn sie manchmal zur Störquelle werden können, sei es durch ihr Gebrumm oder ihre magnetischen Wechselfelder, wenn sie im Keller stehen und in einem Büro im Erdgeschoss die Bildschirme flimmern. Oft aber ist der Trafo gar nicht schuld. Die von einem Transformator ausgehenden Streufelder sind im Allgemeinen gar nicht so gross, wie man annehmen sollte. Die Störungen gehen zumeist von Leitungstrassen aus, und das wegen falscher Netzform, die ein Ausweichen von Strömen, die dem Neutralleiter zugedacht waren, auf alle leitfähigen Gebäudeteile zulässt. Ist dies in Ordnung gebracht, dann hilft nur noch die Vergrösserung des Abstands von Störquelle zu Störsenke und die Minimierung des Abstands zwischen Hin- und Rückweg des Stroms. Dabei kann eine spezielle Transformatorbauform helfen, bei welchem man die Durchführungen nicht auf dem Deckel, sondern im Fussraum und auch nicht in einer Reihe, sondern im Viereck angeordnet hat (Bild 45). Der Erfolg kann sich sehen lassen (Bild 46). Solch eine Lösung wird in keiner Norm beschrieben, und so wirbt der Hersteller denn auch in einer Anzeige: «Wir bauen Transformatoren in erster Linie nach Mass und erst in zweiter Linie nach Norm, denn meistens steckt in den Kundenwünschen mehr Innovationspotenzial, als es die Norm zulässt.» Das haben wir schon einmal bei den nicht gerade überragenden genormten Wirkungsgraden festgestellt. Die Normen haben aber inzwischen mächtig aufgeholt, das muss auch gesagt werden. Der Prozess dauert nur viel zu lange, weil die Normen international harmonisiert werden müssen, aber daran ist nichts zu machen. In der Zwischenzeit sind wirklich die Kreativität der Industrie und die Kommunikation mit ihrem Kunden gefragt. ET 07

Web-Wegweiser

www.power-technology.com/contractors/switchgear/pauwels
www.bitctrl.com/partner/partner.htm
www.raustoc.ch
www.eurocopper.org
www.efficient-transformers.org

Stefan Fassbinder
Deutsches Kupferinstitut
D-40474 Düsseldorf
Tel. 0049 211 479 63 23
sfassbinder@kupferinstizut.de

Verlagsprogramm

Dach und Wand
Verhalten von Kupferoberflächen an der Atmosphäre; Bestell-Nr. s. 131
.....
Dachdeckung und Außenwandbekleidung mit Kupfer; Bestell-Nr. i. 30
.....
Ausschreibungsunterlagen für Klempnerarbeiten an Dach und Fassade
.....
Blau-Lila-Färbungen an Kupferbauteilen

Sanitärinstallation
Kupfer in Regenwassernutzungsanlagen; Bestell-Nr. s. 174
.....
Metallene Werkstoffe in der Trinkwasser-Installation; Bestell-Nr. i. 156
.....
Die fachgerechte Kupferrohrinstallation; Bestell-Nr. i. 158

Werkstoffe
Schwermetall-Schleuder- und Strangguss - technische und wirtschaftliche Möglichkeiten; Bestell-Nr. s. 165
.....
Zeitstandeigenschaften und Bemessungskennwerte von Kupfer und Kupferlegierungen für den Apparatebau; Bestell-Nr. s. 178
.....
Ergänzende Zeitstandversuche an den beiden Apparatewerkstoffen SF-Cu und CuZn20Al2; Bestell-Nr. s. 191
.....
Einsatz CuNi10Fe1Mn plattierter Bleche für Schiffs- und Bootskörper
Use of Copper-Nickel Cladding on Ship and Boat Hulls; Bestell-Nr. s. 201
.....
Kupfer-Nickel-Bekleidung für Offshore-Plattformen
Copper-Nickel Cladding for Offshore Structures;
Bestell-Nr. s. 202
.....
Werkstoffe für Seewasser-Rohrleitungssysteme
Materials for Seawater Pipeline Systems;
Bestell-Nr. s. 203
.....
Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing)
Bestell-Nr. i. 5
.....
Kupfer-Aluminium-Legierungen
Bestell-Nr. i. 6
.....
Niedriglegierte Kupferwerkstoffe
Bestell-Nr. i. 8
.....
Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber)
Bestell-Nr. i. 13
.....
Kupfer-Nickel-Legierungen
Bestell-Nr. i. 14
.....
Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen)
Bestell-Nr. i. 15
.....
Rohre aus Kupfer-Zink-Legierungen
Bestell-Nr. i. 21
.....
Bänder, Bleche, Streifen aus Kupfer-Zink-Legierungen
Bestell-Nr. i. 22
.....
Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Zinnbronzen)
Bestell-Nr. i. 25
.....
Kupfer – Das rote Metall
.....
Kupfer - Werkstoff der Menschheit
.....
Messing – Ein moderner Werkstoff mit langer Tradition
.....
Von Messing profitieren – Drehteile im Kostenvergleich
.....
Messing ja – Entzinkung muss nicht sein!
.....
Dekorativer Innenausbau mit Kupferwerkstoffen
.....
Bronze – unverzichtbarer Werkstoff der Moderne
.....

Verarbeitung
Konstruktive Gestaltung von Formgussstücken aus Kupferwerkstoffen; Bestell-Nr. s. 133
.....
Kupfer-Zink-Legierungen für die Herstellung von Gesenkschmiedestücken; Bestell-Nr. s. 194
.....
Kleben von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 7
.....
Trennen und Verbinden von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 16
.....
Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen;
Bestell-Nr. i. 18

Elektrotechnik
Drehstrom, Gleichstrom, Supraleitung – Energie-Übertragung heute und morgen;
Bestell-Nr. s. 180
.....
Brandsichere Kabel und Leitungen;
Bestell-Nr. s. 181
.....
Energiesparen mit Spartransformatoren;
Bestell-Nr. s. 183
.....
Wechselwirkungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen mit Oberschwingungen;
Bestell-Nr. s. 185
.....
Vom Umgang mit Blitzschäden und anderen Betriebsstörungen; Bestell-Nr. s. 186
.....
Sparen mit dem Sparmotor; Bestell-Nr. s. 192
.....
Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren; Bestell-Nr. s. 193
.....
Energiesparpotentiale bei Motoren und Transformatoren; Bestell-Nr. i. 1
.....
Kupferwerkstoffe in der Elektrotechnik und Elektronik; Bestell-Nr. i. 10
.....
Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen
.....
Kupfer spart Energie
.....
Geld sparen mit Hochwirkungsgrad-Motoren

Umwelt/Gesundheit
Versickerung von Dachablaufwasser;
Bestell-Nr. s. 195
.....
Kupfer in kommunalen Abwässern und Klärschlämmen; Bestell-Nr. s. 197
.....
Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung;
Bestell-Nr. s. 198
.....
Sachbilanz zur Kupfererzeugung unter Berücksichtigung der Endenergien;
Bestell-Nr. s. 199
.....
Untersuchung zur Bleiabgabe der Messinglegierung CuZn39PB3 an Trinkwasser – Testverfahren nach British Standards BS 7766 and NSF Standard 61; Bestell-Nr. s. 200
.....
Kupfer – Lebensmittel – Gesundheit;
Bestell-Nr. i. 19
.....
Recycling von Kupferwerkstoffen;
Bestell-Nr. i. 27
.....
Kupfer und Kupferwerkstoffe ein Beitrag zur öffentlichen Gesundheitsvorsorge;
Bestell-Nr. i. 28
.....
Kupfer – der Nachhaltigkeit verpflichtet
.....
Kupfer in unserer Umwelt
.....
Natürlich Kupfer – Kupfer ökologisch gesehen
.....
Doorknobs: a source of nosocomial infection?
.....
Kupfer – Hygienischer Werkstoff
.....
Kupfer – Lebenswichtiges Spurenelement

Spezielle Themen
Kupferwerkstoffe im Kraftfahrzeugbau;
Bestell-Nr. s. 160
.....
Die Korrosionsbeständigkeit metallischer Automobilbremsleitungen - Mängelhäufigkeit in Deutschland und Schweden;
Bestell-Nr. s. 161
.....
Kupfer – Naturwissenschaften im Unterricht Chemie; Bestell-Nr. s. 166
.....
Ammoniakanlagen und Kupfer-Werkstoffe?;
Bestell-Nr. s. 210
.....
Kupferwerkstoffe in Ammoniakkälteanlagen;
Bestell-Nr. s. 211
.....
Kupferrohre in der Kälte-Klimatechnik,
für technische und medizinische Gase
Bestell-Nr. i. 164

DKI-Fachbücher*
Kupfer
.....
Schweißen von Kupfer und Kupfer-legierungen
.....
Chemische Färbungen von Kupfer und Kupferlegierungen
.....
Kupfer als Werkstoff für Wasserleitungen
.....
Kupfer in der Landwirtschaft
.....
Kupfer im Hochbau
EUR 10,00****
.....
Planungsleitfaden Kupfer – Messing – Bronze
EUR 10,00****
.....
Architektur und Solarthermie
Dokumentation zum Architekturpreis
EUR 10,00

CD-ROM des Deutschen Kupferinstituts
Werkstoffdatenblätter
EUR 10,00
.....
Solares Heizen
EUR 10,00
.....
Was heißt hier schon "harmonisch"?
EUR 10,00
.....
Faltmuster für Falzarbeiten mit Kupfer
Muster für Ausbildungsvorlagen in der Klempnertechnik
EUR 10,00
.....
Werkstofftechnik – Herstellungsverfahren
EUR 10,00

Lernprogramm
Die fachgerechte Kupferrohr-Installation
EUR 10,00 ***

Filmdienst des DKI
Das Deutsche Kupferinstitut verleiht kostenlos die nachstehend aufgeführten Filme und Videos:

„Kupfer in unserem Leben“
Videokassette oder DVD, 20 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00
Verleih kostenlos
.....
„Fachgerechtes Verbinden von Kupferrohren“
Lehrfilm, DVD, 15 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00
Verleih kostenlos
.....
„Kupfer in der Klempnertechnik“
Lehrfilm, Videokassette, 15 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00
Verleih kostenlos
.....
*Fachbücher des DKI sind über den Fachbuchhandel zu beziehen oder ebenso wie Sonderdrucke, Informationsdrucke und Informationsbroschüren direkt vom Deutschen Kupferinstitut,
Am Bonneshof 5, 40474 Düsseldorf.

**Dozenten im Fach Werkstofftechnik an Hochschulen erhalten die Mappen kostenlos

***Sonderkonditionen für Berufsschulen

****Sonderkonditionen für Dozenten und Studenten

Deutsches Kupferinstitut

Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen

Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Telefon: (0211) 4 79 63 00
Telefax: (0211) 4 79 63 10
info@kupferinstitut.de

www.kupferinstitut.de