Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 93 (2002)

Heft: 3

Artikel: Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren : Teil 1

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855383

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 24.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren – Teil 1

Wenn den Entwicklern elektronischer Geräte im letzten Moment einfällt, auf ihrer Platine auch noch eine Stromversorgung unterbringen zu müssen, wundern sie sich häufig über die Grösse des erforderlichen Netztransformators. Mit diesem Fachartikel eröffnet das *Bulletin SEV/VSE* eine fünfteilige Serie zur Auslegung von Kleintransformatoren. Die Artikel werden in loser Folge publiziert.

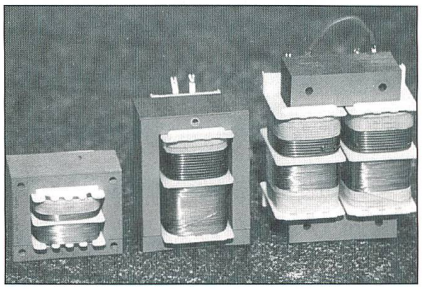

Bild 1 Gebräuchliche Kernschnitte
Transformatoren mit gleichen Eisenquerschnitten, aber unterschiedlichen Kernschnitten (EI66 Standard, EI66 lang, UI66). Obwohl alle mit Zweikammer-Spulenkörper ausgeführt, ergeben sich Unterschiede bei Masse, Volumen, Bauleistung und vor allem Betriebsverhalten.

Im ersten Beitrag wird der Einfluss der Bauformen auf die Streureaktanz dargestellt, was schon im Bereich um 30 VA dazu führen kann, dass die Streureaktanz in der Grösse der Wicklungswiderstände liegt.

Bauformen

Die feinen Unterschiede zwischen den Bauformen

Die Bemessungsleistung für Kleintransformatoren ist definitionsgemäss die Ausgangsscheinleistung des Trafos. Haben die Entwickler auf der Gleichstromseite einen Leistungsbedarf von beispielsweise 10 W ermittelt, bietet ihnen der Hersteller einen passenden Trafo mit 14 VA, 16 VA oder auch schon einmal 18 VA Bemessungsleistung an. Beim Gleichrichten entsteht Verzerrungsblindleistung und ein entsprechend gros-

Stefan Fassbinder

ser Formfaktor. Zwar dämpft der Trafo – anders als beim Schaltnetzteil – diesen Verzerrungseffekt, doch hängt das Ausmass dieser dämpfenden Wirkung in sehr starkem Masse von Grösse und Bauform des Transformators ab: Es wird durch den ohmschen und vor allem durch den induktiven Spannungsfall im Trafo bestimmt.

Bei den kleinsten Transformatoren (um 1 VA) dominiert stets der ohmsche Spannungsfall. Er beträgt in der Regel etwa 45% der Leerlaufspannung. Die Streureaktanz spielt überhaupt keine Rolle. Schon im Bereich um 30 VA aber ändert sich dies gewaltig. Je nach Bauform – vor allem der Lage der Wicklungen zueinander – kann in diesem Bereich die Streureaktanz im Vergleich zu den Wicklungswiderständen entweder verschwindend gering oder bereits etwa gleich gross sein. Dies gilt bis hinauf zu einer Grösse von einigen kVA. So wurde beispielsweise ein Transformator EI96[1,2], Schichthöhe 47,5 mm (≈200 VA), mit einem professionellen Rechenprogramm einmal mit Einkammer-Spulenkörper und einmal – mit den gleichen Wickeldaten – mit Zweikammer-Spulenkörper berechnet. Im Kurzschluss stellt er, wie jeder Trafo, eine ohmsch-induktive Last dar, allerdings mit einem Phasenwinkel von im ersten Fall 7° und im zweiten Fall 47°, denn die in radialer Richtung in einer einzigen Wickelkammer übereinander gewickelten Wicklungen ergeben eine wesentlich engere magnetische Kopplung zwischen Eingangs- und Ausgangsseite als die in axialer Richtung voreinander liegenden Wicklungen auf dem Zweikammer-Spulenkörper. Entsprechend unterschiedlich sind das magnetische Streufeld und die Streureaktanz bei gleichen ohmschen Widerständen.

Extrem wird dies bei Transformatoren mit UI-Kern[2] («Kerntrafo», Bilder 1 und 2, jeweils rechts). Üblicherweise werden diese in Einkammer-Technik bewickelt und beide Wicklungen je zur Hälfte auf die beiden Schenkel aufgeteilt (Bild 3a). Das gibt einen streufeldarmen Trafo ab. Es gibt auch Zweikammer-Spulenkörper für UI-Kerne, die allerdings mit zunehmender Grösse immer seltener verwendet werden. Kommen sie jedoch zum Einsatz, ergeben sich in etwa die gleichen Verhältnisse wie bei einem EI-Langschnitt-Typ (Bilder 1 und 2 Mitte) vergleichbarer Leistung. Dabei werden aber gleiche Bauleistungen nicht mit gleicher Nennschnittgrösse (Mass b in Bild 2) nach DIN 41302 erzielt. So entspricht beispielsweise ein UI48 in etwa einem EI66 («Manteltrafo») bzw. einem EI54 Langschnitt gleicher Schichthöhe. Darüber hinaus besteht beim UI-Kern im Gegensatz zu den EI-Typen die Möglichkeit, die Eingangswicklung auf einen Schenkel und die Ausgangswicklung auf den anderen Schenkel zu wickeln (Bild 3b), was natürlich geringere Produktionskosten verursacht als die beiden anderen Bewicklungsmöglichkeiten. Ein

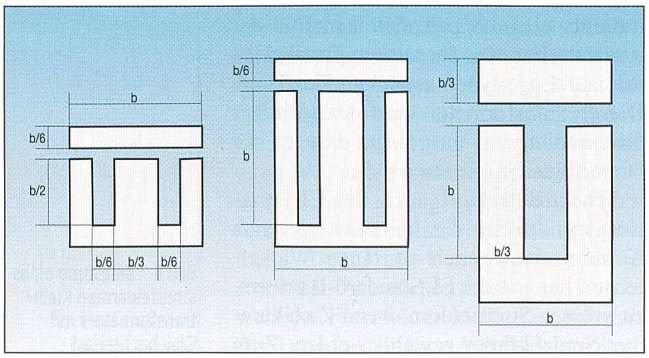

Bild 2 Bei den Kernschnitten EI (links), EI lang (Mitte) und UI (rechts) stehen bei den einzelnen Kerngrössen (Kernbreite b) jeweils alle Masse im gleichen Verhältnis zueinander.

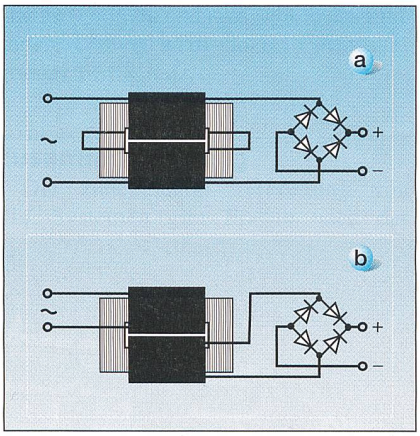

Bild 3 Verschiedene Bewicklungs- und Verschaltungsmöglichkeiten eines Netztrafos mit UI-Kern

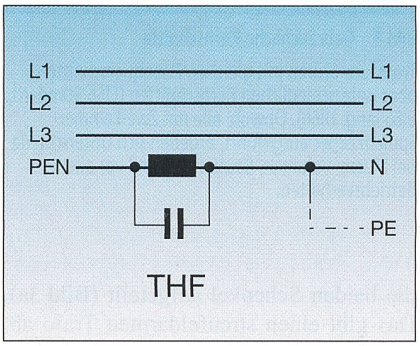

Bild 4 THF der Firma ABB Control Oy, Vasa, Finnland

solcher Trafo hat aber ein ungewöhnlich hohes Streufeld, und sein Kurzschlussstrom ist im Extremfall nicht viel grösser als der Bemessungsstrom, auf jeden Fall aber ganz erheblich kleiner als bei Versionen mit aufgeteilten Wicklungen. Diese Eigenschaft ist nur in Sonderfällen erwünscht, auch wenn das Beherrschen von Kurzschlüssen dadurch natürlich erleichtert wird.

Als typisches Beispiel für einen solchen Sonderfall lässt sich hier der Third Harmonic Filter (THF) der ABB Finnland nennen (Bild 4), der das Fliessen der dritten Strom-Oberschwingung im Neutralleiter eines Dreiphasennetzes verhindern soll [1].

Bei der in Deutschland gebauten Variante THX (Bild 5) wird die Kapazität mittels eines Transformators in den Neutralleiter eingekoppelt, damit man in der Auswahl der Kondensatoren flexibel ist und auf Lagertypen zurückgreifen kann. Dieser Transformator wird mit so hoher Streuinduktivität ausgelegt, dass er die Drossel gleich mit ersetzt.

Tendenziell führt auch die EI-Lang-Kernschnittform, die bei sonst gleichen Kernmassen doppelt so lange Wickelfenster hat wie die EI-Standard-Bauform, zu grossen Streufeldern, wenn Zweikammer-Spulenkörper gewählt werden. Zum einen bietet sie brutto doppelt so viel Wickelraum (netto sogar noch etwas mehr, weil das abzuziehende Volumen der Spulenkörperstege sich nicht verdoppelt). Das führt zu einem anderen Verhältnis der Einsatzmenge von Kupfer und Eisen und somit zu einem etwas anderen Betriebsverhalten. Zum anderen ist der Unterschied zwischen der Ein- und der Zweikammerbewicklung hier wegen der langgestreckten Bauform noch viel grösser.

Dabei sind die Kosten für das Stanzen bei der Wahl des Blechschnitts kein Argument. Alle drei genannten Schnittformen lassen sich ohne Abfall und in einem Arbeitsgang aus Blechrollen der passenden Breite (Mass b in Bild 2) stanzen: Zunächst werden die I-Bleche paarweise längs aus dem Band gestanzt, dann wird das Band quer in Stücke geschnitten, so dass es in lauter E-Bleche, oder vielmehr wechselweise ein «E» und ein «∃» zerfällt. Die einzige Einschränkung ist, dass beim EI-Langschnitt je E-Blech zwei I-Bleche und somit doppelt so viele wie benötigt anfallen. Diese lassen sich jedoch als Streifenbleche noch für andere Zwecke verkaufen. Der UI-Schnitt ist wiederum vollkommen abfalllos.

Streureaktanz

Ringkern-Transformatoren sind wegen ihrer sehr geringen Leerlaufverluste, ihrer Streufeld- und Geräuscharmut sowie ihres geringen Bauvolumens die technisch optimale Lösung. Sie haben gewöhnlich zwei radial übereinander angeordnete Wicklungen – was aber nicht zwingend ist. Auch hier liesse sich die Eingangswicklung auf eine Hälfte des Rings wickeln und die Ausgangswicklung auf die andere. Bei gleichen Drahtabmessungen und gleichen Windungszahlen ergäbe sich in diesem Fall dennoch ein sehr starkes Streufeld und ein entsprechend weicher Trafo mit z.B. 30% Kurzschlussspannung – auch hier nur in Sonderfällen vorteilhaft.

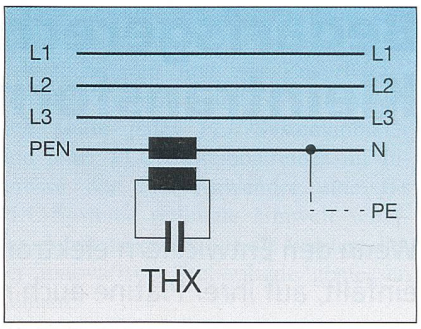

Bild 5 Version THX der Firma ABB Kondensatoren, Brilon

Mitunter muss dies als unangenehme Nebenwirkung in Kauf genommen werden, wenn z.B. eine extrem hohe Isolationsspannung zwischen Eingangs- und Ausgangswicklung erreicht werden soll. Gewöhnlich strebt man aber einen geringen Spannungsfall, also eine geringe Kurzschlussspannung an. Da die Bemessungsleistung sich immer auf ohmsche Last bezieht, addiert sich der Lastwiderstand linear zum Wicklungswiderstand und in quadratischer Manier zur Streureaktanz:

(Formeln 1–3, Kasten nächste Seite)

wobei

U_2 Sekundärspannung
U_{20} Sekundärleerlaufspannung
n_1 Primärwindungszahl
n_2 Sekundärwindungszahl

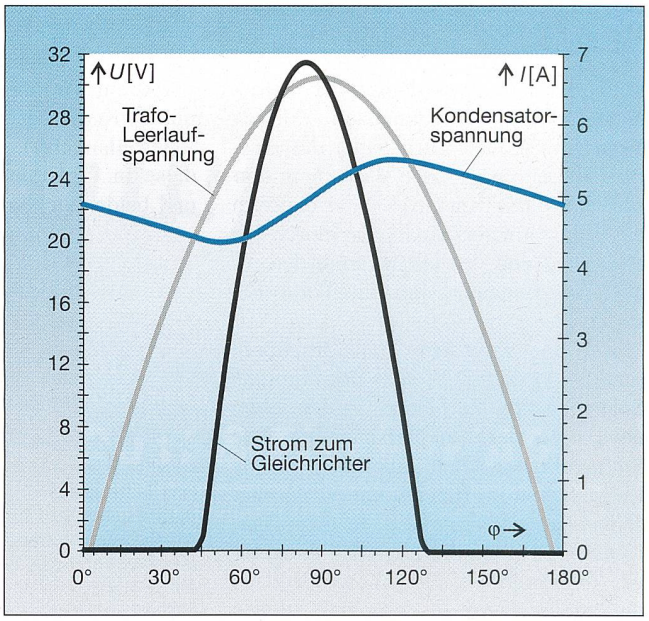

Bild 6 Belastung eines streufeldarmen Kleintransformators mit Gleichrichterlast

Wicklungswiderstand primär bei beiden Prüfmustern	57,4 Ω
Wicklungswiderstand sekundär bei beiden Prüfmustern	0,57 Ω
Leerlaufspannung bei beiden Prüfmustern	22,9 V
Kurzschlussstrom der Ausführung mit aufgeteilten Wicklungen	20,0 A
Kurzschlussstrom der Ausführung mit einer Wicklung je Schenkel	9,5 A

Tabelle I Messwerte der Trafos für die Berechnung der Betriebsgrössen eines weichen und eines harten Trafos

Bei gleichen Lastgleichströmen	geringes Streufeld	starkes Streufeld
Effektivwert Trafostrom sekundär	3,287 A	2,668 A
Scheitelwert Trafostrom sekundär	6,798 A	4,607 A
Formfaktor Trafostrom sekundär	1,638	1,334
Scheitelfaktor Trafostrom sekundär	3,388	2,304
Effektivwert Trafospannung sekundär	20,005 V	19,209 V
Trafoleistung sekundär	65,752 VA	51,256 VA
Minimum Kondensatorspannung	19,734 V	17,383 V
Mittelwert Kondensatorspannung	22,467 V	19,118 V
Maximum Kondensatorspannung	25,082 V	21,060 V
Gleichstromleistung gesamt	45,068 W	38,319 W
Leistungsfaktor P_{DC}/S_{Trafo}	0,685	0,748

Tabelle II Verhalten eines Kleintransformators mit «harter» und «weicher» Wicklungsaufteilung bei Gleichrichterlast und jeweils gleichen Gleichströmen

Bei gleichen Gleichstromleistungen	geringes Streufeld	starkes Streufeld
Effektivwert Trafostrom sekundär	3,287 A	3,320 A
Scheitelwert Trafostrom sekundär	6,798 A	5,549 A
Formfaktor Trafostrom sekundär	1,638	1,291
Scheitelfaktor Trafostrom sekundär	3,388	2,157
Effektivwert Trafospannung sekundär	20,005 V	18,177 V
Trafoleistung sekundär	65,752 VA	60,355 VA
Minimum Kondensatorspannung	19,734 V	15,388 V
Mittelwert Kondensatorspannung	22,467 V	17,444 V
Maximum Kondensatorspannung	25,082 V	19,734 V
Gleichstromleistung gesamt	45,068 W	45,086 W
Leistungsfaktor P_{DC}/S_{Trafo}	0,685	0,747

Tabelle III Verhalten eines Kleintransformators mit «harter» und «weicher» Wicklungsaufteilung bei Gleichrichterlast und jeweils gleicher Wirkleistung

R_{Cu1} Widerstand der Primärwicklung
R_{last} Lastwiderstand
R_{Cu2} Widerstand der Sekundärwicklung
$X_{1\sigma}$ Streureaktanz der Primärwicklung
$X_{2\sigma}$ Streureaktanz der Sekundärwicklung
I_{Last} Laststrom

Bei gewöhnlichen Zweiwicklungstransformatoren kann in der Regel vereinfachend mit $R_{Cu1}'=R_{Cu2}$ und $X_{1\sigma}'=X_{2\sigma}$ gerechnet werden, zumindest beim Zweikammer-Spulenkörper.

Beim Einkammer-Spulenkörper wird die aussen liegende Wicklung in der Regel (auf die Windungszahl bezogen) wegen der grösseren mittleren Windungslänge einen deutlich höheren Widerstand haben, sofern dem nicht bei der Auslegung durch eine geringere Stromdichte entgegengewirkt wurde.

Normalerweise ist der Lastwiderstand R_{Last} der grösste Summand, und der Einfluss der Streureaktanz $X_{1\sigma}'+X_{2\sigma}\approx 2\cdot X_{2\sigma}$ wird bei Bemessungslast also entsprechend gering (ganz im Gegensatz zum Kurzschluss, wo definitionsgemäss der Lastwiderstand gleich 0 ist). Die Stromoberschwingungen hingegen, die beim Gleichrichten entstehen und deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Netzfrequenz sind, verursachen die gleichen ohmschen Spannungsfälle wie die Grundschwingung, aber ein Vielfaches der induktiven Spannungsfälle. Obige Formel für U_2 liefert also bei nahezu streuspannungsfreien Transformatoren für die wichtigsten Oberschwingungen fast den gleichen Wert wie für die Grundschwingung; bei einem weichen Trafo aber für unterschiedliche Frequenzen sehr unterschiedliche Werte. Das heisst: Der weiche Trafo verformt die Stromkurve, und zwar weg von der extremen Verzerrung, wie man sie von der direkten Gleichrichtung der Netzspannung z.B. in Schaltnetzteilen kennt, zurück in Richtung Sinusform. Das Netz hat das natürlich gern, wird doch auf diese Art die vom Glättungsvorgang ausgehende Oberschwingungsbelastung deutlich reduziert.

Vergessen wird hierbei aber leider regelmässig, dass sich aus dem unterschiedlichen Verhalten erhebliche Unterschiede für die Auslegung des Transformators ergeben. Der gewünschte Gleichstrom ist nämlich gleich dem Gleichricht-Mittelwert des gleichgerichteten Wechselstroms, nicht dem Effektivwert (Scheinleistung), wonach ein Transformator bekanntlich bemessen werden muss. Der Trafo-Bemessungsstrom ist somit bei der weichen Auslegung kleiner, weil der Formfaktor kleiner ist. Obwohl der Transformator im Wechselstromkreis

Formeln 1–3

(1) $$U_2 = U_{20} - I_{Last} \times \sqrt{(R_{Cu1}' + R_{Cu2} + R_{Last})^2 + (X_{1\sigma}' + X_{2\sigma})^2}$$

mit

(2) $$R_{Cu1}' = R_{Cu1} \cdot (n_2/n_1)^2$$

und

(3) $$X_{1\sigma}' = X_{1\sigma} \cdot (n_2/n_1)^2$$

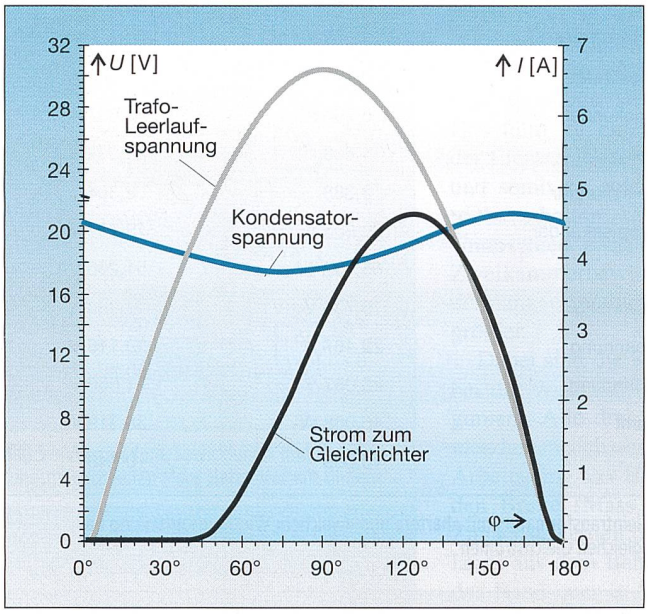

Bild 7 Belastung eines streufeldreichen Kleintransformators mit Gleichrichterlast

angeordnet ist, hilft seine Streureaktanz beim Glätten des Gleichstroms. Ist diese gross, so ist ihr Einfluss beträchtlich.

Diesem positiven Effekt der Streureaktanz steht ein Nachteil gegenüber: Ist der Spannungsfall im weichen Trafo schon im Falle ohmscher Last grösser als beim harten Trafo, so verstärkt sich diese Wirkung bezüglich der Gleichspannung am Glättungskondensator (Elko) noch einmal[3]. Ein weicher Trafo ist hinsichtlich der erzeugten Gleichspannung noch weicher, als er bei ohmscher Last ohnehin schon ist. Um dies zu kompensieren, muss die Leerlaufspannung höher gewählt werden, was nicht nur die erforderliche Bauleistung wieder ansteigen lässt, sondern im Teillastbereich leider auch die Verlustleistung an dem häufig nachgeschalteten Linearregler, da die Spannung am Glättungskondensator mit fallender Last stärker ansteigt als mit einem steifen Trafo. Eine sorgfältige Überlegung bzw. Berechnung des Trafos und seiner Betriebsumgebung sind daher gefragt, um die optimale Wahl zu treffen. Allerdings gibt es für solche Belastungsfälle kaum Rechenprogramme.

Das Durchrechnen zweier Varianten, die sich nur durch die Streuspannung unterscheiden, macht die erstaunlichen Unterschiede deutlich. Ausgegangen wurde dabei von den nachfolgenden Messwerten an zwei Kleintrafos UI48 mit Einkammer-Spulenkörpern, einer mit der harten geteilten Wicklungsanordnung nach Bild 3a und einer mit der weichen getrennten Wicklungsaufteilung nach Bild 3b (s. Tabelle I).

Aus diesen Messdaten wurde der Belastungsfall mit einem Brückengleichrichter und folgenden Daten berechnet:

Spannungsfall am Gleichrichter (in der Rechnung als konstant angenommen): 2 V; Glättungskapazität: 2200 µF; Gleichstromlast (Strom vollständig geglättet durch Längsregler): 2 A.

Die Ergebnisse sind in Tabelle II einander gegenübergestellt. Es bestätigt sich das Gesagte: Die Belastung des weichen Trafos ist geringer, der Leistungsfaktor besser. Allerdings fällt die Gleichspannung, wie vorausgesagt, mit steigender Last wesentlich stärker als beim harten Trafo. Die Werte sind daher so nicht vergleichbar, weil die Leistungen auf der Gleichstromseite unterschiedlich sind. In Tabelle III wurde der Lastgleichstrom so weit erhöht (auf 2,575 A), dass sich für beide Schaltungen die gleiche Wirkleistungsabgabe ergibt. Es bleibt dabei: Der weiche Transformator unterdrückt die beim Ausglätten entstehenden Oberschwingungen stärker als der harte. In Bild 6 und 7 sind die Verläufe der Gleichspannung am Kondensator und des Stroms vom Gleichrichter zum Kondensator für beide Bauformen dargestellt. Der Stromverlauf des weichen Trafos sieht in der Tat schon optisch deutlich weicher aus. Die Bauleistung des weichen Trafos ist etwa 10% geringer.

Es fällt auf, dass der dicke Glättungskondensator zusammen mit dem streuinduktivitätsarmen Transformator, obschon Ersterer im Gleichstromkreis angeordnet ist, eine leicht kapazitive Last ergibt: Der Stromscheitel liegt in Bild 6 vor dem Spannungsscheitel. Beim streuinduktivitätsreichen Trafo und demselben Glättungskondensator hingegen wird dieser Effekt durch die Streuinduktivität mehr als aufgezehrt: In Bild 7 ist die Gesamtlast induktiv, obwohl die Gleichstromlast in jedem Fall einer ohmschen Last entspricht. Bemerkenswert ist, dass sich die Verzerrungsblindleistungen solcher Schaltungen zu einem erheblichen Teil gegenseitig kompensieren, wenn die Schaltungen je zur Hälfte im selben Netz zum Einsatz kommen, denn der Gesamtstrom entspricht dann der Summe der beiden Stromverläufe in den Bildern 6 und 7.

Ganz allgemein sei bemerkt, dass es häufig zur partiellen gegenseitigen Auslöschung verschiedener Arten von Netzschmutz [2] kommt.

Le choix de petits transformateurs en fonction des besoins – 1ère partie

Lorsqu'il vient au dernier moment à l'idée des développeurs d'appareils électroniques d'installer encore une alimentation sur leur platine, ils s'étonnent souvent de la taille du transformateur réseau nécessaire. Avec le présent article, le *Bulletin ASE/AES entame une série en cinq parties sur le choix des petits transformateurs*. Ce premier article traite de l'influence des formes de construction sur la réactance de fuite qui, vers 30 VA déjà, peut être de l'ordre de grandeur de celle provoquée par la résistance des enroulements.

Les articles suivants seront publiés en ordre irrégulier.

Literatur

[1] *S. Fassbinder:* Oberschwingungen im Griff. de 8/2001, S. 68.

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

Links

http://www.pflaum.de/de.dir/tip/a_de_tip14.htm

Adresse des Autors

Deutsches Kupfer-Institut e.V., D-40474 Düsseldorf: *Stefan Fassbinder*, Tel. +49 211 47 96 300, sfassbinder@kupferinstitut.de

[1] EI96 bedeutet: Der Kern besteht aus E- und I-förmigen Blechen von 96 mm Breite bzw. Länge (siehe auch Bild 2).

[2] Die Abkürzungen E und U sowie I beziehen sich auf die Blechform mit Massen nach DIN 41302. Die einzelnen Bleche werden entsprechend als «E-Blech», «U-Blech» oder «I-Blech» bezeichnet.

[3] Die durchaus unterschiedlichen Auswirkungen des ohmschen und des induktiven Spannungsfalls im Trafo im Falle ohmscher Belastung werden bei der Diskussion der Wirkungsgrade betrachtet.