



Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren

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

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

© DKI 2003

**Erschienen im «Bulletin» des
Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
SEV/AE und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
VSE/AES**
Nr. 3/02, 7/02, 9/02, 15/02, 17/02

Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren

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.

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 gro-

Stefan Fassbinder

ßer 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 voneinander 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-Kern² («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-Longschnitt-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 Longschnitt gleicher Schichthöhe. Darüber hinaus besteht beim UI-Kern im Gegen-

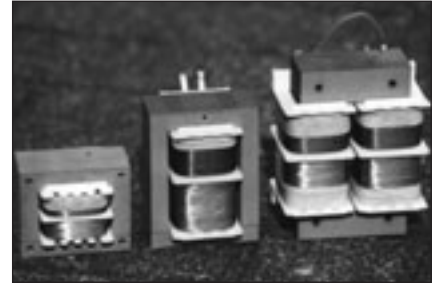


Bild 1 Gebräuchliche Kernschnitte

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 im Betriebsverhalten.

satz 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 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 in Finnland gefertigte Third Harmonic Filter (THF) nennen (Bild 4), der das Fließen der dritten Strom-Oberschwingung im Neutralleiter eines Dreiphasennetzes verhindern soll [1].

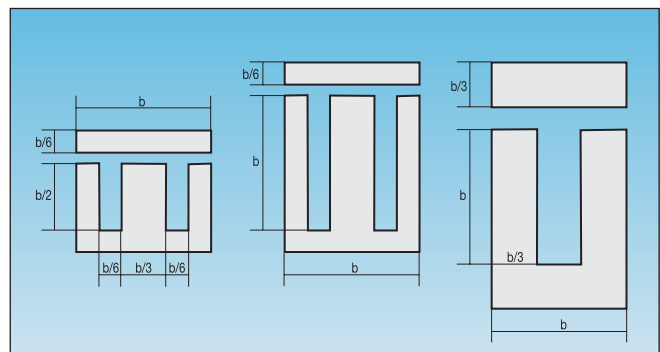


Bild 2 Bei den Kernschnitten EI (links), EI lang (Mitte) und UI (rechts) stehen bei den einzelnen Kerngrößen (Kernbreite b) jeweils alle Masse im gleichen Verhältnis zueinander.

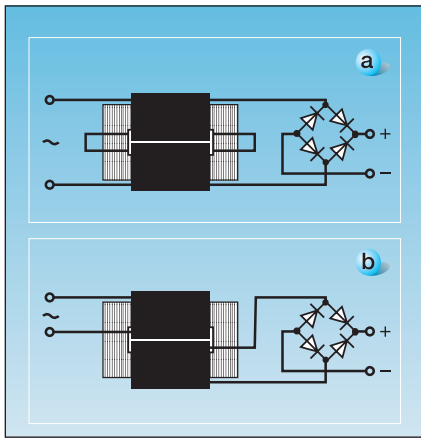


Bild 3 Verschiedene Bewicklungs- und Verschaltungsmöglichkeiten eines Netztrafos mit UI-Kern

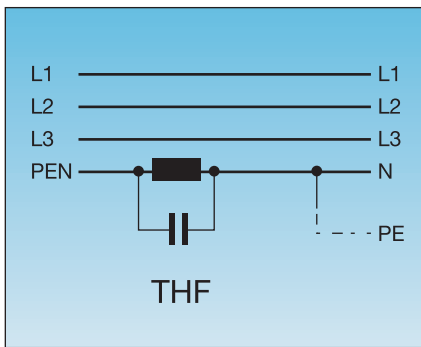


Bild 4 THF, finnische Version

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 « \exists » 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.

Streuaktanz

Ringkern-Transformatoren sind wegen ihrer sehr geringen Leerlaufverluste, ihrer Streufeld- und Geräuscharmheit 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.

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 Bemes-

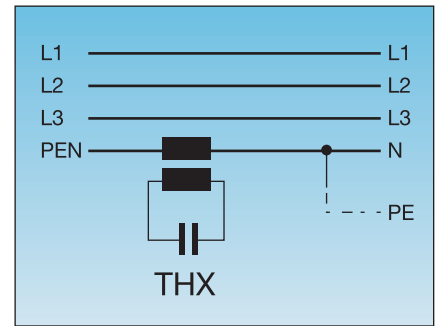


Bild 5 Version THX aus Deutschland

sungsleistung sich immer auf ohmsche Last bezieht, addiert sich der Lastwiderstand linear zum Wicklungswiderstand und in quadratischer Manier zur Streuaktanz:

(Formeln 1–3, Kasten nächste Seite)

wobei

- U_2 Sekundärspannung
- U_{20} Sekundärleerlaufspannung
- n_1 Primärwindungszahl
- n_2 Sekundärwindungszahl
- R_{Cu1} Widerstand der Primärwicklung
- R_{Last} Lastwiderstand
- R_{Cu2} Widerstand der Sekundärwicklung
- $X_{1\sigma}$ Streuaktanz der Primärwicklung
- $X_{2\sigma}$ Streuaktanz der Sekundärwicklung
- I_{Last} Laststrom

Bei gewöhnlichen Zweiwicklungs-Transformatoren 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

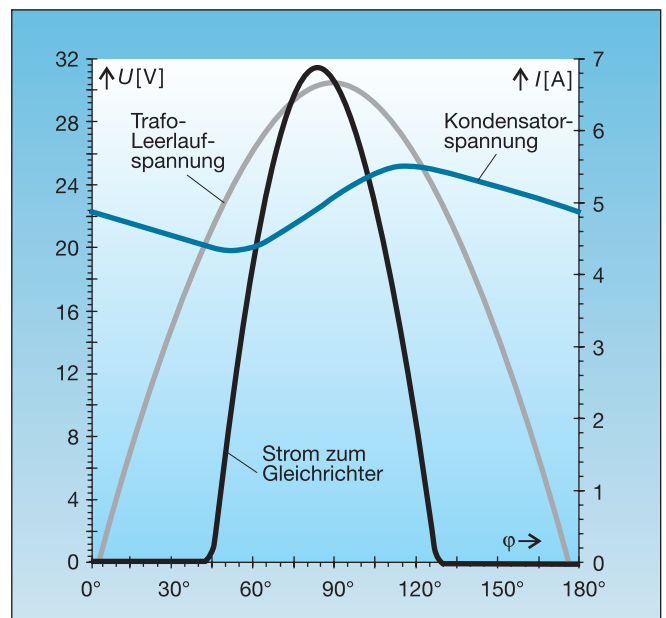


Bild 6 Belastung eines streufeldarmen Kleintransformators mit Gleichrichterlast

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

– bezogen auf die Windungszahl – 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 Stromüberschwingungen 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

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

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 Ober-

schwingungsbelastung 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 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

Formeln 1–3

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

mit

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

und

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

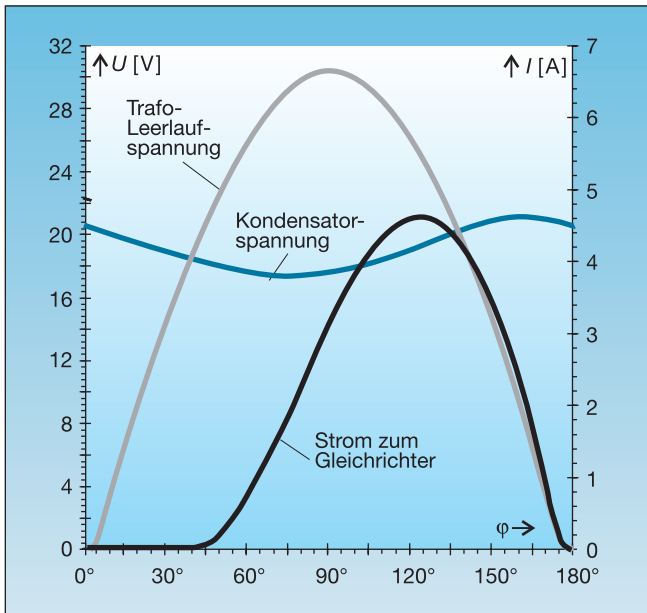


Bild 7 Belastung eines streufeldreichen Kleintransformators mit Gleichrichterlast

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 einmal³. 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 Stromschiebel liegt in Bild 6 vor dem Spannungsschiebel. 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.

Elektronische Halogenlampentransformatoren

Elektronische Halogenlampentransformatoren stellen eine Form von Umrichtern dar, die die ankommende Wechselspannung gleichrichten, in eine Wechselspannung wesentlich höherer Frequenz umrichten und erst dann in einem – dank der sehr viel höheren Frequenz erheblich kleineren – Transformator umwandeln. Im Gegensatz zu allen anderen elektronischen Lasten wie Kompaktsparlampen und Schaltnetzteilen von PCs, Fernsehgeräten und dergleichen kann hier aber auf einen Glättungskondensator verzichtet werden. Es entstehen daher auch keine nennenswerten niederfrequenten Stromverzerrungen, wie sie beim Ausglätten der gleichgerichteten Eingangsspannung entstehen, weil nur dann Strom vom Netz durch den Gleichrichter fließt, wenn der Augenblickswert der gleichgerichteten Wechselspannung größer ist als die Restspannung auf dem Glättungskondensator (Bild 8).

Die Einsparung von Kupfer und Eisen durch diese Technik ist enorm und somit der Vorteil bei Volumen und Gewicht beachtlich. Ferner lässt sich das erforderliche Volumen in weiten Grenzen den verschiedensten Gehäusebauformen anpassen, da man nicht an bestimmte DIN-Blechschnittformen gebunden ist, und schließlich sind diese Geräte, da sie ohnehin über die Umrichtelelektronik verfügen müssen, auch mit einer Regelung ausgestattet, die die Ausgangsspannung stabilisiert.

Allerdings pulsiert infolge des Verzichts auf einen Glättungskondensator die an den Ausgangsklemmen austretende Hochfrequenz im Takt der Netzfrequenz, was die Lampen aber nicht stört, denn diese werden beim Betrieb mit konventionellen Transformatoren auch mit Netzfrequenz gespeist und flackern mit Sicherheit viel weniger als eine normale, mit Netzspannung betriebene Glühlampe, da ihre Glühwendel viel dicker sind.

Billigprodukte haben Probleme mit Teillast

Manche Billigprodukte unter den elektronischen Trafos werden jedoch mit

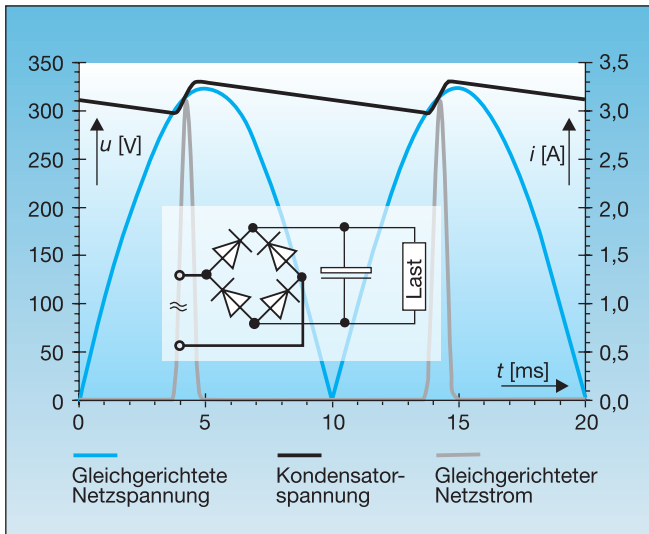


Bild 8 Spannung und Strom am Glättungskondensator

Teillast überhaupt nicht fertig, und eine einzelne 20-W-Lampe, an einen 60-W-Trafo angeschlossen, fängt an zu flackern. Ähnliches kann auch bei Defekt eines elektronischen Halogenlampentransformators auftreten: So können etwa in Verkaufsräumen, in Restaurants und deren Toiletten einzelne Lampen oder Gruppen von Lampen in regelmäßigem Rhythmus blinken oder zwischen zwei Helligkeiten pulsieren.

Induktionsschleifen bei Halogenseilanlagen

Viele Betreiber solcher Halogenlampenbeleuchtungen klagen außerdem u.a., dass die angegebene Lebensdauer der Lampen bei weitem nicht erreicht wird: So kann es in einem Haushalt beispielsweise vorkommen, dass ständig – aus Richtung (elektronischer) Trafo gesehen – die erste von drei angeschlossenen Lampen durchbrennt.

Der Grund hierfür könnte in den Induktionsschleifen liegen, die entstehen, wenn in einem Nutz- oder Wohnraum ein ganzes Gewirr von Halogenseilanlagen erstellt wird (Bild 9). Die einzelnen Seile können ohne weiteres Längen von 10 m und mehr erreichen und haben einen beträchtlichen Abstand zueinander. Sie sind meist nicht isoliert und dürfen sich daher trotz ihrer freitragenden Konstruktion nicht berühren können. Außerdem hat man gerne ausreichend Platz zur Verfügung, um die Scheinwerfer zwischen Hin- und Rückleitung schwenkbar aufzuhängen. Die so gebildete Induktionsschleife hat daher eine ganz beträchtliche Querschnittsfläche. Dazu kommt die Induktivität der oft dekorativ in Schleifen gewundenen Befestigungsanschlusleitungen der einzelnen Lampen (Bild 9, linke und mittlere Lampe).



Bild 9 Dekorative HF-Drosseln
Quelle: <http://www.conrad.de>

Die sich ergebende Reaktanz ist bei 50 Hz ohne praktische Bedeutung (Tabelle IV), aber bei Hochfrequenz kann es passieren, dass die erste, direkt hinter dem Trafo angebrachte Lampe an eine erheblich höhere Spannung zu liegen kommt als die am weitesten vom Trafo entfernte (Tabelle IV), sofern sich keine Resonanzen bildeten, die zu Überspannung an der letzten Lampe führen.

Der Hersteller der Transformatoren hat darüber aber keine Kontrolle, weil er nicht wissen kann, welche Ausdehnung die so erzeugten Leiterschleifen erreichen werden und wie viel Induktivität der Anwender hiermit an den Trafo anschließen

Lampennummer	Lampenleistung [W]	Spannungsabfall bis zu dieser Lampe	
		Frequenz = 50 Hz	Frequenz = 40 kHz
1	35	0,0003 V	0,2100 V
2	35	0,0005 V	0,3781 V
3	35	0,0006 V	0,5041 V
4	35	0,0007 V	0,5881 V
5	35	0,0008 V	0,6301 V

Tabelle IV Beispielwerte für induktive Spannungsabfälle an einer Halogenlampenseilanlage bei Betrieb mit konventionellem Transformator (50 Hz) und elektronischem Transformator (40 kHz)

wird. Das Vorhandensein entsprechender Vorschriften, die lediglich die Leitungslänge begrenzen und über Seilabstände, Strom und Frequenz keine Aussagen treffen, hilft in der Praxis daher wenig, zumal die Produkte im Baumarkt frei erhältlich sind und somit die Einhaltung von Vorschriften sich der Kontrolle entzieht.

Und nicht nur die an den elektronischen Transformatoren betriebenen Lampen, sondern auch diese selbst sind bedeutend empfindlicher als herkömmliche 50-Hz-Transformatoren. Eine bekannte Störquelle sind induktive Vorschaltgeräte von Leuchtstofflampen. Diese nämlich erzeugen zum Zünden der Röhre einen Spannungsimpuls, der bei einer 58-W-Lampe etwa 1600 V beträgt. Obwohl dieser Spannungsimpuls eigentlich zwischen den Enden der Röhre verläuft, gerät leider mehr oder weniger davon doch in das speisende Netz. Dies hat schon so häufig zu Ausfällen der elektronischen Trafos geführt, dass inzwischen spezielle StörfILTER auf dem Markt erschienen sind, die dies verhindern sollen. Ein Vorschaltgerät für das Vorschaltgerät gewissermaßen – ein bei Anwendung konventioneller Technik jedoch unnötiger Aufwand und letztlich wohl zumindest teilweise eine Folge des fehlenden Siebkondensators am Eingang, der bei anderen elektronischen Schaltnetzteilen solche Störungen weitgehend schluckt.

Der Ersatz aller induktiven Vorschaltgeräte für die Leuchtstofflampen durch elektronische hingegen stellt eine recht kostspielige Lösung dar – und auch eine unvollkommene, solange nicht auch alle anderen nennenswerten Induktivitäten aus dem Netz entfernt werden, was schwer fallen dürfte. Außerdem kann man sich dadurch leicht wieder ein ganzes Bündel neuer Probleme ins Haus holen. [11] [12]

Die Eingangswerte eines solchen Trafos stellen sich bei der Messung (Bild 10, links) allerdings als recht respektabel dar: Im Leerlauf zeigt er eine sehr geringe Verlustleistung und unter Last einen nahezu sinusförmigen und blindleistungs-

freien Strom. Auch die Einschaltströme (Bild 10, Mitte unten) halten sich in Grenzen. Der ausgangsseitige Einschaltstrom wird zu Gunsten der Lebensdauer der Lampen begrenzt. Eine Glühlampe hat unter «normalen» Umständen (beim Aufschalten auf eine praktisch impedanzlose Spannungsversorgung) einen etwa 10fach überhöhten Einschaltstrom. Die Ausgangsspannung (Bild 10, rechts) ist unter Last für solche Geräte normal. Bei der Ermittlung der Leistungen zeigt allerdings selbst das verwendete hochwertige Messgerät mit 40 MHz Taktfrequenz Probleme, da es sich offenbar durch die auf die Hochfrequenz aufmodulierte Netzfrequenz täuschen lässt. Die Lampen jedenfalls ($4 \times 20\text{ W}$) brannten während der Messung mit normaler Helligkeit. Die Leistungsaufnahme betrug wegen der Lampenschonung durch Unterspannung nur 74,8 W. Es ist gängige Praxis, Halogenleuchtampen mit 12 V Bemessungsspannung nur mit 11,6 V zu betreiben.

Nur im Leerlauf nimmt die Ausgangsspannung merkwürdige Formen an, wenn man die Zeitbasis entsprechend der Hochfrequenz einstellt (Bild 10, Mitte oben). Die Frage ist, wann – bei welchem Auslastungsgrad – eine vernünftige Regelung einsetzt. Hier unterscheiden sich gute von schlechten Geräten. Über eine Korrelation zum Preis kann an dieser Stelle schlecht spekuliert werden. Bei dem vorliegenden Muster jedenfalls handelte es sich um ein Billigangebot aus Fernost einer grossen Handelskette, und zumindest dieses Exemplar funktionierte bereits mit einer einzigen angeschlossenen Lampe einwandfrei.

Aus Bild 10 unten rechts und der angezeigten Zeitbasis ergibt sich, dass die Hochfrequenz, aus der die darüber gezeigten Buckel bestehen, eine Periodendauer von 40 μs , also eine Frequenz von 25 kHz hat. Es ergibt sich aber auch, dass diese Hochfrequenz nicht sinus-, sondern rechteckförmig verläuft und also ihrerseits wieder ein theoretisch unendliches Spektrum an Oberschwingungen enthält. Somit sind prinzipiell in allen Frequenzbereichen Störungen möglich.

Feldstärken bzw. Flussdichten

Auf Grund der Induktionsschleifen entstehen mit Hochspannungsleitungen vergleichbare magnetische Feldstärken: So erzeugt eine Hochspannungsleitung mit 600 A Last und 8 m Seilabstand in 50 m Entfernung ein gleich starkes Feld wie ein Seilsystem mit 6 A Last und 80 mm Seilabstand in 0,5 m Entfernung. Gesundheitsschädliche Auswirkungen auf den Menschen durch die magnetischen Felder sind bislang jedoch nicht

erwiesen. Alle angeblichen Untersuchungen in diese Richtung halten einer ernsthaften Prüfung mit statistischen und epidemiologischen Methoden nicht Stand [3, 4].

Gäbe es die vermuteten Erkrankungen in nennenswertem Umfang, so wäre dies mit Sicherheit bereits aufgefallen. Und schließlich darf auch nicht vergessen werden, dass auch Angst, z. B. vor Krankheit, krank machen kann [5]. Wo immer aber solche Auswirkungen vermutet werden, wird auch eine höhere Empfindlichkeit des Organismus bei höheren Frequenzen vermutet, so dass dem konventionellen Netzfrequenz-Halogenlampentransformator die geringere Beeinträchtigung bescheinigt wird.

Die Lösung im vorliegenden Hochfrequenzfall wäre Gleichrichtung und Glättung am Ausgang, aber das hieße, einen zusätzlichen Verlust von etwa 1,5 W je Ampère Ausgangsstrom in Kauf zu nehmen, ganz abgesehen davon, dass schon wesentlich sinnvollere und notwendigere Maßnahmen an ein paar Rappen mehr im Verkaufspreis gescheitert sind.

Ein weiterer Vorteil wäre allerdings, dass man solche elektronischen Transformatoren mit Gleichrichtung am Ausgang auch ausgangsseitig parallel zueinander betreiben könnte, was bei nicht genau definierter Frequenz am Ausgang, von Pha-

senlage ganz zu schweigen, natürlich nicht möglich ist.

Bei Verwendung konventioneller Transformatoren ist es technisch kein Problem, die erforderliche Leistung «zusammenzustückeln» und so im Effekt die Energietransportwege auf der Kleinspannungsebene zu reduzieren, genau dem üblichen Aufbau von Niederspannungs-Verteilnetzen entsprechend. Wie auf allen Spannungsebenen ist dabei lediglich auf richtige Polung und auf Einhaltung der Kurzschlussleistung bzw. der Abschaltbedingungen zu achten.

So müssen alle sekundärseitig parallel liegenden Transformatoren auf einen gemeinsamen Primärschalter fest verdrahtet sein, sonst kommt es bei Abschaltung einzelner Trafos zur Überlastung der übrigen, und vor allem steht am Eingang eines abgeschalteten, ausgesteckten oder abgeklemmten Trafos auf einmal wieder die rücktransformierte Eingangsspannung an.

Wichtig ist auch, dass extrem harte, spannungssteife Transformatoren nicht mit extrem weichen parallel geschaltet werden, sondern Einheiten mit näherungsweise gleichen Kurzschlussspannungen verwendet werden, sonst werden – ganz im Gegensatz zum richtigen Leben – die weichen Typen nicht ausgelastet und die harten überlastet. Bei Be-

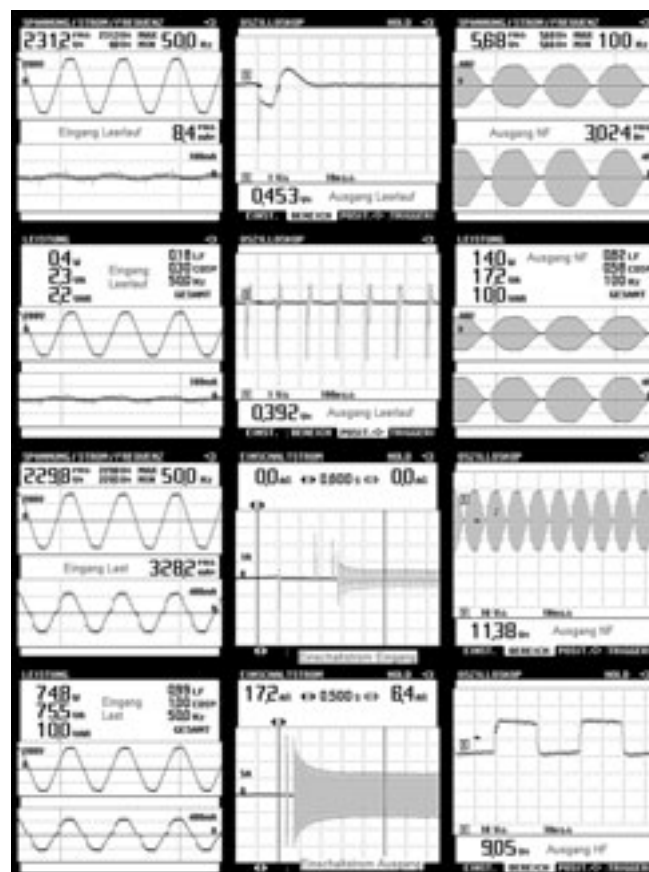


Bild 10 Einschalten und Betrieb eines elektronischen Halogenlampentransformators

trieb der Anlage mit konstanter Last empfiehlt sich der Einsatz weicher Typen, um die hohen Einschaltströme der Lampen zu dämpfen und dadurch die Lampen zu schonen. Dennoch kann es durch die Einschaltstöße der Trafos selbst zum Auslösen von Leitungsschutzschaltern kommen, gerade wenn größere Gruppen parallel betrieben, also auch zeitgleich geschaltet werden. Die Streureaktanz hilft zwar, die Einschaltströme zu reduzieren, denn sie rührt aus demjenigen Teil des Flusses her, der das Eisen umgeht und somit keine Sättigung und keine Remanenz kennt, doch dieser Dämpfungseffekt reicht bei Gruppen mit größerer Gesamtleistung nicht mehr aus.

Beides auf einmal, Schonung der Lampen und Verhinderung unnötiger, unsinniger Auslösungen von Schutzorganen, kann durch Steuerung jeweils einer ganzen Gruppe über einen Transformator-Sanfteinschalter gelöst werden [6–10].

Die Dimmbarkeit konventioneller Kleintransformatoren

In der Regel können konventionelle Kleintransformatoren mit einem ganz normalen Glühlampendimmer geregelt werden. Die Streureaktanz sorgt dabei auch gleich für die Entstörung. Ist der Zündimpuls des Dimmers zu kurz, kann im Extremfall lediglich der Stromanstieg zu langsam sein, was zu Zündaussetzern und damit zu flackernden Lampen führen kann. Hier hilft ein RC-Glied parallel zu der als Last wirkenden Primärwicklung des Trafos (z. B. 1,5 kΩ und 1 μF in Serie). Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Transformatoren bei phasen-angeschnittenen Spannungen und Strömen erheblich stärker zum Brummen neigen.

Nach Möglichkeit sollte daher der Transformator vergossen oder ein Ringkerntransformator gewählt werden.

Der Einfluss von Gleichspannungsanteilen

Leider sind Transformatoren – vor allem in Ringkernbauweise – empfindlich gegen Gleichspannungsanteile in der Versorgungsspannung, was der in den Bildern 11 und 12 dokumentierte Versuch deutlich macht. Dabei wurde das Netz an der dem Versuchsaufbau nächstgelegenen Steckdose mit einer Einweg-Gleichrichterlast belastet (dies könnte z. B. ein auf halbe Leistung eingestellter einfacher Haarföhn sein). Im Netz entsteht dadurch eine geringfügige Unsymmetrie. Auf Grund dieser ungleichen Belastung der positiven und der negativen Halbwelle und der entsprechend unterschiedlichen Spannungsfälle im Netz entsteht ein kleiner Gleichspannungsanteil der Netzspannung von – je nach Last und Netz Widerstand – beispielsweise 0,5 V.

Schuld an dem markanten Unterschied zwischen den beiden Messungen ist die Sättigung: Legt man eine Gleichspannung von 0,5 V an die Primärwicklung eines Ringkerntransformators mit einem Wicklungswiderstand von beispielsweise 20 Ω, so fließt in der Wicklung ein Gleichstrom von 25 mA. Wie aus Bild 11 ersichtlich ist, tritt das Kernmaterial jedoch bereits bei rund 11 mA in den Bereich magnetischer Sättigung ein. Der Transformator befindet sich daher vollständig in der Sättigung.

Der Nachweis, dass die Impedanz⁴ des Netzes für die Unsymmetrie verantwortlich ist, lässt sich auch erbringen, indem man beide Verbraucher – den leer laufenden Ringkerntrafo und den mit halber

Leistung laufenden Föhn – über eine gemeinsame Verlängerungsleitung anschließt. Der Effekt der Sättigung wirkt deutlich verstärkt. Schaltet man den Föhn anschließend auf volle Leistung, fällt der Gleichstromanteil weg, und der Transformator gerät nicht mehr in die Sättigung.

Umgekehrt gilt, dass jegliche Verringerung ohmscher Spannungsfälle im Netz auch das Auftreten unerwarteter und unerwünschter Überraschungen mindert, und das schon weit unterhalb jener Grenze der thermischen Belastbarkeit, die üblicherweise der Dimensionierung von Kabeln, Leitungen, Transformatorwicklungen und dergleichen zu Grunde gelegt wird.

Die Empfindlichkeit gegen Gleichspannungsanteile in der Versorgungsspannung ist übrigens bei allen anderen Transformatortypen wesentlich geringer, weil diese durch die Bank Restluftspalte aufweisen, wodurch die Leerlaufströme in der Regel mehr als eine Größenordnung höher sind. Das Verhältnis des vom Gleichspannungsanteil getriebenen Gleichstroms in der Primärwicklung zum Leerlaufstrom und die bei der Auslegung gewählte Leerlaufinduktion bestimmen das Ausmaß dieses Einflusses.

Ist ein Kleintransformator dimmbar?

Es stellt sich die Frage, ob garantiert werden kann, dass die Ansteuerung des Dimmers immer absolut symmetrisch erfolgt, zumal die Bauteiltoleranzen eher erwarten lassen, dass dies höchstens durch Zufall hier und da einmal der Fall ist. In der Regel sollte man daher vermuten, dass das erwähnte halbe Volt Gleichspannung schnell einmal zusammenkommt.

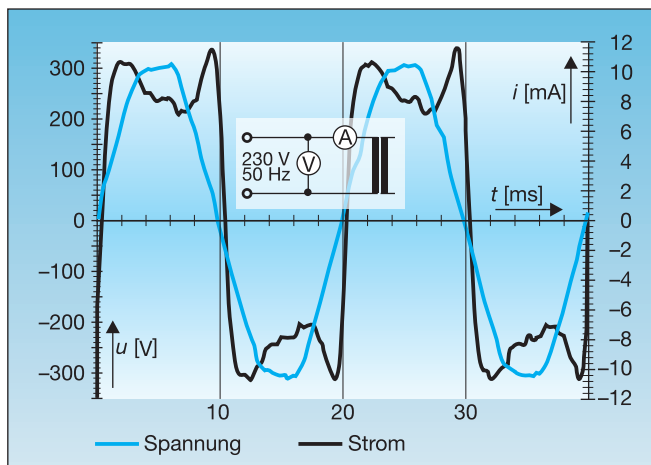


Bild 11 Leerlaufstrom eines Ringkerntransformators 200 VA
 $U = 228,5 \text{ V}$, $I = 9,2 \text{ mA}$, $P = 1,82 \text{ W}$, $S = 2,09 \text{ VA}$, $Q = 1,03 \text{ VAR}$, $LF = 0,87$,
 $\cos \varphi = 0,99$

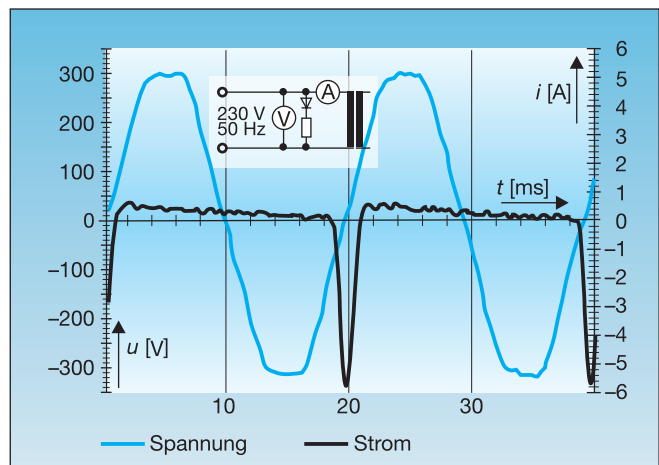


Bild 12 Leerlaufstrom eines Ringkerntransformators 200 VA bei Parallelbetrieb mit einem auf halbe Leistung eingestellten Föhn von 1500 W
 $U = 224,3 \text{ V}$, $I = 1,26 \text{ A}$, $P = 38 \text{ W}$, $S = 286 \text{ VA}$, $Q = 283 \text{ VAR}$

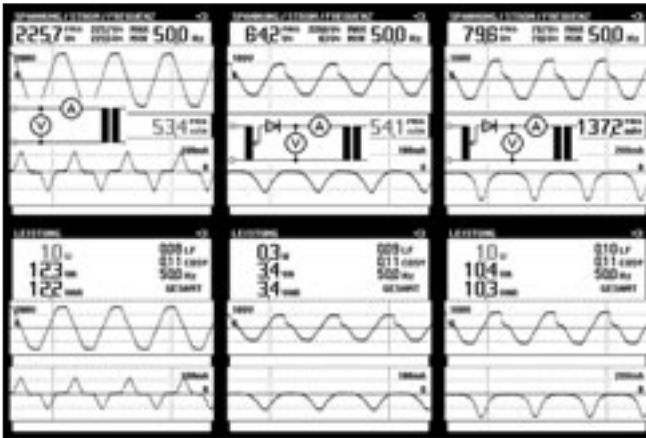


Bild 13 Betrieb eines Transformators UI48 im Leerlauf an Nennspannung (links) und über Gleichrichterdiode (Mitte und rechts)

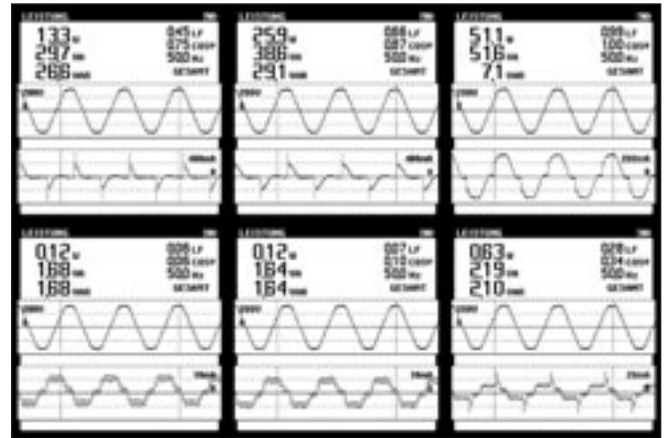


Bild 14 Zusammenarbeit einer Halogenleuchte mit Ringkerntransformator mit einem Phasenanschnittdimmer

Der auf diese Art zu Stande kommende Gleichspannungsanteil in der Versorgungsspannung wird aber durch die angeschlossene Induktivität wieder herausgefiltert, denn die im Dimmer zur Anwendung gelangenden Thyristoren oder Triacs bleiben nicht so lange leitend, bis die Spannung, sondern bis der Strom seinen Nulldurchgang erfährt. Das ist bekanntlich bei Induktivitäten nicht derselbe Zeitpunkt.

Ein Versuch unter Extrembedingungen

Ein Versuch unter Extrembedingungen (Bild 13) macht dies deutlich: Hierzu wird ein Transformator im Leerlauf über eine Einweg-Gleichrichtung betrieben. Es zeigt sich, dass der Leerlaufstrom nun ein welliger (lückender) Gleichstrom ist, die Spannung an der Wicklung jedoch wieder nahezu Sinusform annimmt.

Die Eingangsspannung der Versuchsschaltung muss schon auf etwa 64 V eingestellt werden (Bild 13, Mitte), ehe sich beim Leerlaufstrom der gleiche Effektivwert einstellt wie bei Nennspannung (Bild 13, links), und erst bei etwa 80 V hat man die gleiche Leerlaufleistung wie im regulären Betrieb (Bild 13, rechts).

Man muss sich das so vorstellen, dass der Strom nach dem Wechsel der Spannungsrichtung von eben dieser Spannung wieder auf null «heruntergebremst» wird. Erst danach geht im Versuch die Diode (bzw. im Dimmer der Triac) in den sperrenden Zustand über. Die an der Induktivität gemessene Spannung ist also keine Gleichspannung – wie auch die Messung zeigt – obwohl ein Stromfluss nur in eine Richtung möglich ist. Es besteht also für den Trafo beim Betrieb am Dimmer kein Risiko, nicht einmal bei Auftreten einer erheblichen Unsymmetrie bei der Ansteuerung.

Ringkerntransformator am Phasenanschnittdimmer

Ein Beispiel für gute Zusammenarbeit zwischen Ringkerntransformator und Phasenanschnittdimmer fand sich in einer hochwertigen Tischleuchte (Bild 14). Die Leuchte wurde zweimal mit Vollaussteuerung gemessen (rechts), zweimal bei halber Leistung (Mitte) und zweimal in der unteren Anschlagstellung des Dimmers (links). Die Vorschrift verlangt eine gewisse Resthelligkeit. Ein Glühlampendimmer darf sich auch bei Betrieb an der unteren Toleranzgrenze der Netzspannung nicht so weit herabregeln lassen, dass zwar noch Strom durch die Lampe fließt, dies aber nicht mehr am Leuchten erkennbar ist.

Zunächst wurde die Leuchte im regulären Betrieb, also mit der vorgesehenen Glühlampe 12 V/50 W, gemessen (Bild 14, oben) und dann ohne Leuchtmittel, also im Leerlauf des Transformators (Bild 14, unten). Dabei lässt sich Folgendes feststellen:

- Offenbar wurde hier das erwähnte RC-Glied eingesetzt, wie die Stromspitzen im Einschaltpunkt zeigen, die immer dann und nur dann auftreten, wenn die Einschaltflanke der Spannung vergleichsweise hoch ist, denn nur dann fließt ein registrierbarer Ladeimpuls in den Kondensator des RC-Gliedes.
- Die Steuerung funktioniert bei leerlaufendem Trafo offenbar in der unteren Hälfte des Stellbereiches trotzdem nicht, was sich dadurch zeigt, dass sich die Werte von unten bis zur Mitte praktisch nicht verändern und auch die unter Last beobachtbaren Einschaltspitzen ausbleiben: Es kommt zu keiner Zündung des Triacs bzw. der Thyristoren im Dimmer. Das Ausfallen der Einstellbarkeit spielt im vorliegenden

Fall zwar keine Rolle, weil ein Betrieb im Leerlauf ohne Belang ist. Das Beispiel zeigt aber, dass bei Anwendung dieser Schaltung auf eine Anordnung mit variabler Last (z. B. mehrere Lampen) alle möglichen Lastpunkte getestet werden müssten und nicht nur im Fall von Volllast.

- EMV-Probleme und die für den Ringkerntrafo fatale Gleichstrom-Vorbelastung treten weder im Leerlauf noch unter Last auf.
- Die Leerlaufleistung ist gering.
- Im Leerlauf zeigen die Stromkurven wegen des parallel angeordneten Kondensators eine Überlagerung mit Hochfrequenz. Das weist auf Vorhandensein solcher Frequenzen in der Netzspannung hin.
- Die Magnetisierungsblindleistung des Ringkerntrafos ist gering: Bei dieser Baugröße ist etwa 1 VA typisch. Hingegen tritt im unteren und mittleren Stellbereich unter Last das Phänomen der bei Phasenanschnitt induktiv wirkenden Glühlampe auf: Das Messgerät errechnet einen erheblichen Blindleistungsanteil, obwohl nirgends Bereiche mit ungleichen Vorzeichen von Spannung und Strom auftreten. Das ist aber korrekt. Zerlegt man die angeschnittene Kurve in ihre harmonischen Bestandteile (Fourier-Analyse), so stellt man fest, dass die Grundschiwingung des Stroms gegenüber der Netzspannung nach hinten verschoben ist.

Was aus Bild 14 nicht hervorgeht: Die Leuchte arbeitet dank dem Ringkerntransformator und einem massiven Messinggehäuse in allen Betriebspunkten vollkommen geräuschlos.

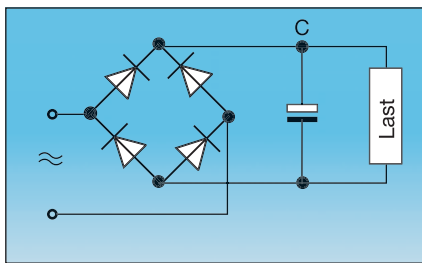


Bild 15 Darstellung einer B2-Brücke

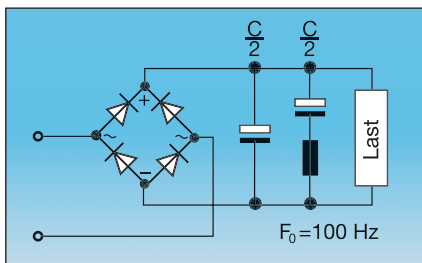


Bild 16 Bessere Glättung mit Saugkreis

Bessere Glättung mit Saugkreis

Die Gleichspannung am Glättungselko in einer B2-Brücke (Bild 15) hinter einem Einphasen-Kleintransformator weist normalerweise noch eine beträchtliche Restwelligkeit auf, bzw. sie ist von einer Vielzahl von Frequenzen überlagert. Die Aufgabe des Glättungskondensators ist es, für die Gleichspannung zu sperren und die darin noch enthaltenen Wechselspannungen abfließen zu lassen. Das gelingt aber niemals ganz, weil die Kapazität endlich und damit die Reaktanz größer als null ist.

Ausgerechnet die am stärksten vorhandene niedrigste Frequenz von 100 Hz wird aber am wenigsten durchgelassen. Es bietet sich daher an, die Kapazität ganz grob in zwei Hälften zu teilen und eine davon mit einer geeigneten Drossel in Reihe zu schalten, so dass sich ein Reihenresonanzkreis für 100 Hz ergibt. Diese Frequenz kann dann praktisch impedanzlos abfließen, wodurch sich die Restwelligkeit erheblich reduziert – je nach den Parametern der Schaltung um fast die Hälfte (Bild 16).

Feiner als die Feinsicherung: Temperaturschalter

Die eleganteste Art, einen Kleintrafo abzusichern, ist ein Temperaturschalter. Damit wird der Trafo nicht nur gegen zu hohe Strombelastung, sondern auch gegen überhöhte Umgebungstemperaturen geschützt. Problematisch ist jedoch bei größeren Kleintrafos stets die zu schnelle Erwärmung im Kurzschlussfall,

die dem Schalter nicht ausreichend Zeit zum Reagieren lässt. Ausnahmen stellen wiederum die diversen beschriebenen Formen von streufeldreichen Bauformen dar.

So würde sich bei dem auf Seite 5 Tabelle II und III angeführten Vergleich der beiden UI48-Trafos der Typ mit 20 A Kurzschlussstrom im Kurzschlussfall fast fünfmal so schnell erwärmen wie der Typ mit 9,5 A Kurzschlussstrom, was zwar wieder für Letzteren spricht; doch wie bereits erwähnt, ist für die meisten Anwendungen der spannungssteife Trafo im Normalbetrieb zweckmäßiger. Für diese Fälle bauen die Hersteller in die Temperaturschalter einen «Beschleuniger» in Form eines Serienwiderstands ein, der den Schalter bei erheblicher Überschreitung des Bemessungsstroms schnell erwärmt und zum Auslösen bringt. Nun wächst aber die Erwärmung im Quadrat zum Strom, und wird ein bestimmter Grenzstrom überschritten, so ist der Schalter nicht einmal mehr flink genug, um sich selbst zu schützen; der Widerstand brennt also durch, ehe der Kontakt öffnet.

Ist der Kurzschlussstrom des Trafos größer als dieser Grenzstrom, ist der Schalter ungeeignet. Der nächstkleinere Widerstandswert kann aber schon wieder zu klein und der Beschleunigungseffekt somit zu gering sein. Abhilfe könnten die Schalterhersteller bieten, indem sie den Längswiderstand durch zwei antiparallele Dioden ersetzen. Dann steigt die Erwärmung nur noch näherungsweise linear mit dem Strom, vor allem im oberen Strombereich, wodurch sich die Spanne zwischen minimalem Abschaltstrom und höchstzulässigem Strom vergrößert. In Laborversuchen hat sich diese Methode schon mehrfach bewährt, vor allem dann, wenn im Zuge einer Mittelpunkts-Gleichrichterschaltung ohnehin zwei Dioden zum Einsatz kommen, auch wenn diese in diesem Fall in den Ausgangskreis geschaltet werden. Die entsprechenden Isolierungen und Abstände sind meist schon durch das Schaltergehäuse allein eingehalten. Außerdem kann ein Transformator auch ausgangsseitig geschützt werden.

Auch bei Kleintrafos keine Kleinigkeit: der Wirkungsgrad

Bei Großtransformatoren achten Energieversorger seit Jahr und Tag peinlich genau auf den Wirkungsgrad. Die Verluste werden dort bewertet, also ein entsprechender Preiszu-/abschlag für Über-/Unterschreitung der Nennverluste

vereinbart. Die Werte liegen etwa bei 1 €/W für den Lastverlust und bei ungefähr 4 €/W für den Leerlaufverlust. So sollte im Prinzip auch bei Kleintransformatoren vorgegangen werden.

Bei betriebseigenen Industrienetzen und einigen ausländischen Unternehmen bestehen hier allerdings auch bei den Groß- und Verteiltransformatoren noch Defizite. Sicher erscheint es im ersten Moment auch unsinnig, von einer weiteren Verbesserung des Wirkungsgrades zu reden, wenn man bedenkt, dass die Wirkungsgrade der größten Baugrößen um 99,75 % liegen. Bedenkt man aber weiterhin, dass diese Baugrößen bis 1100 MVA reichen und 1/4% mehr als 2,5 MW bedeutet, macht es sehr wohl Sinn, hierüber nachzudenken [13].

Ein solcher «Grenzleistungs-Transformator» mit 2,5 MW Verlust kostet übrigens um 7,5 Mio. Euro, ein Kleintransformator von 11 VA kostet etwa 7,5 Euro und hat 2,5 W Verlustleistung. Preise und Verluste stehen also im gleichen Verhältnis zueinander. Somit wären aus Gründen der wirtschaftlichen Vernunft in beiden Fällen die gleichen Maßstäbe anzulegen. Dies geschieht aber nicht, weil bei den Kleintransformatoren wie bei den erwähnten kundeneigenen Anlagen die Stromrechnung und die Investitionen von verschiedenen Kostenstellen bezahlt werden, wenn auch beide Rechnungen vom selben Unternehmen beglichen werden müssen. So erscheint bei Kleintransformatoren das Wort «Wirkungsgrad» allenfalls im Ausdruck eines Berechnungsprogramms und wird danach in der Regel nie wieder erwähnt. Die Wirkungsgrade liegen hier jedoch viel niedriger, bei der Kerngröße EI30 (etwa 1 bis 3 VA) um 50%, im Bereich EI60 bis EI96 bzw. UI39 bis UI60 (etwa 40 bis 200 VA) um 80%, je nach Auslegung und Bauform. Das Potenzial für Verbesserungen ist also relativ betrachtet viel größer. Zwar durchfließt der größte Teil aller erzeugten elektrischen Energie mehrere Großtransformatoren, aber nur ein kleiner Teil einen Kleintransformator, was das absolute Sparpotenzial kleiner werden lässt. Das ändert aber nichts an der Tatsache, dass die in der Herstellung billigste Auslegung in den meisten Fällen über die Lebensdauer gerechnet auf die in den Gesamtkosten teuerste Variante hinausläuft. Als Beispiel sei nur noch einmal an die Einführung eines neuen Klingeltransformators erinnert, der bei einem renommierten Hersteller mit Kerngröße UI30 und möglichst billigem Dynamoblech Dyba V800 ausgelegt wurde. Die Leerlauf-Verlustleistung lag bei 1,6 W. Durch genau die gleiche Auslegung, jedoch mit

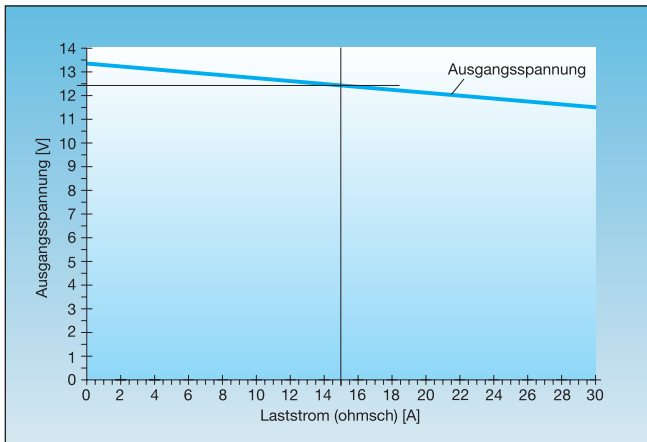


Bild 17 Verhalten eines Transformators UI66, 230 V / 12 V, 180 VA, mit 1-Kammer-Wicklung nach Bild 20a (geteilte Wicklungen)

etwas höherwertigem kornorientiertem Blech Armco VM111 hätte sie sich auf 0,6 W reduzieren lassen. Die Mehrkosten in der Herstellung hätten zwischen 50 Cent und 1 Euro gelegen und sich also innerhalb von 6 bis 12 Monaten amortisiert, wobei ein solcher Klingeltransformator durchaus 30 Jahre ununterbrochen im Betrieb bleiben kann.

Dabei war die Wahl des UI-Kernschnitts für vorliegenden Anwendungsfall mit praktisch durchgehendem Leerlaufbetrieb im Prinzip richtig. Wie schon ausgeführt, kommt hierbei relativ viel Kupfer zum Einsatz, im Verhältnis zum Kernquerschnitt doppelt so viel wie beim EI-Langschnitt und viermal so viel wie beim Standard-EI-Schnitt. Da die Schenkellängen (Längen des Wickelfensters) beim EI-Lang- und beim UI-Schnitt gleich sind, stehen Kernquerschnitt und Eisen-Einsatzmenge näherungsweise im gleichen Verhältnis zueinander. Beim EI-Schnitt ist, wie gesagt, die Schenkellänge genau halb so groß wie beim EI-Langschnitt, doch das Eisen-Einsatzgewicht ist deutlich mehr als halb so groß. Somit liefert der EI-Schnitt einen Trafo mit relativ hohem Eisen- und relativ geringem Kupfer-Einsatzgewicht, der UI-Schnitt dagegen sozusagen einen relativ kupferreichen und relativ eisenarmen Trafo. Weitere Variations-Möglichkeiten ergeben sich durch die unterschiedlichen Schichthöhen. Für jeden Kernschnitt nach DIN 41302 stehen Spulenkörper nach DIN 41305 in 2, 3, 4 oder sogar 5 Schichthöhen zur Verfügung, nicht zu reden von kundenspezifischen Sonderanfertigungen.

Unbemerkte Verluste

Bei gleicher Induktion, Frequenz und Eisenqualität hängt aber der Eisenverlust nur noch von der Eisenmenge ab; analog der Kupferverlust, der bei gleicher Stromdichte nur noch von der Kupfer-

menge abhängt. Ein Transformator, der den größten Teil seines Lebens im Leerlauf oder mit geringer Last betrieben wird, sollte mit geringem Leerlaufverlust, also weniger Eisen und mehr Kupfer ausgelegt sein. Daher war für den vorliegenden Fall des Klingeltransformators die Wahl der minderen Eisenqualität ungünstig, die Wahl des UI-Kernschnittes jedoch günstig. Man findet auf dem Markt auch Klingeltransformatoren, bei denen in beiden Punkten die ungünstigere Variante gewählt wurde. Diese schlagen dann mit etwa 3 W Leerlaufverlust zu Buche, bzw. etwa 26 kWh pro Jahr. Das macht nur deshalb nichts aus, weil der Endverbraucher in der Regel niemals merkt, dass er hier im Verhältnis «ein bisschen Trafo und viel Strom» verbraucht.

Für Anwendungen mit permanentem Vollastbetrieb ist also umgekehrt die Wahl eines EI-Kernschnittes mit großer Schichthöhe, also eines eisenreichen Transformators, zu empfehlen. Diese Bauform bietet in der Regel auch die größte Spannungssteifheit, aber damit natürlich auch die größten Kurzschlussströme mit den früher dargelegten, wenn auch lösbaren Problemen.

Es sollte nicht übersehen werden, dass jegliche Vermehrung des Einsatzes von

Eisen oder Kupfer bei entsprechender Anpassung der restlichen Auslegung immer den besseren Transformator abgibt, das umgekehrte Vorgehen immer den schlechteren. Ein «eisenreicher» Trafo sollte also nicht als Kompensation für den «kupferarmen» angesehen werden.

Auch verursacht der Wirkwiderstand der Wicklungen nicht nur den größten Teil der Energieverluste und der Erwärmung, sondern addiert sich zudem direkt zum Lastwiderstand. Bei der Prüfung wird mit ohmscher Last gemessen. Somit fehlt die Spannung, die am Wicklungswiderstand abfällt, nachher bei der Lastspannung komplett, bzw. ist bei Leerlauf und Schwachlast zu viel vorhanden. Beim induktiven Spannungsfall an der Streureaktanz ist das anders. Diese kommt erst richtig zum Tragen, wenn man sich dem Kurzschlussstrom nähert. Ein durch Streureaktanz «weich» gemachter Trafo ist also hinsichtlich Wirklast gar nicht so weich wie man vom Kurzschlussstrom her meinen sollte, ein durch Knausern am Kupfer weich gemachter aber sehr wohl.

Ein extremes Beispiel macht dies deutlich: Ist der Trafo nach Bild 17 mit seinem Kurzschlussstrom von etwa 220 A (im Bild nicht dargestellt) zu hart, kann man auch auf die Halbierung der Wicklungen verzichten und die Primärwicklung auf den einen und die Sekundärwicklung auf den anderen Schenkel aufbringen. Das Ergebnis (Bild 18) schießt wohl für die meisten praktischen Anwendungsfälle ein wenig über das Ziel hinaus, beträgt doch jetzt der Kurzschlussstrom (nun im Bild zu sehen) nur knapp das Doppelte des Bemessungsstroms.

Eines wird jedoch deutlich: Die Spannung am Ausgang liegt immer noch weit über der halben Leerlaufspannung. Wollte man den Kurzschluss- oder den Einschaltstrom über den Wicklungswiderstand begrenzen, was krimineller-

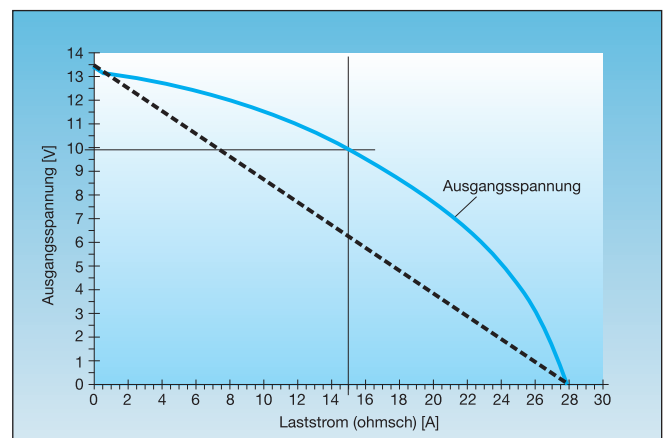


Bild 18 Verhalten eines Transformators UI66 mit den gleichen Wickeldaten wie in Bild 17, jedoch mit 1-Kammer-Wicklung nach Bild 20b (getrennte Wicklungen)

weise wirklich manchmal versucht wird [6–10], verlief die Spannungskennlinie am Ausgang so wie die gestrichelte Linie in Bild 18.

Der meist gewählte Kompromiss zwischen den beiden dargestellten extremen Charakteristiken besteht aus aufgeteilten Wicklungen mit Zweikammer-Spulenkörpern gemäß Bild 1, Seite 3 (rechts), und 20d (bzw. c bei 115 V). Noch einmal wird hier deutlich, wie sehr sich das Betriebsverhalten des Transformators über die Anordnung der Wicklungen – beim selben Kern – variieren lässt, mehr als genug, um nicht zu Gunsten einer bestimmten Charakteristik die Verluste des Trafos künstlich erhöhen zu müssen.

Noch besser: Ringkerntrafos

Die besten Wirkungsgrade erreicht man mit Ringkerntransformatoren, weil sich hier die Verwendung kornorientierten Bleches geradezu anbietet, denn bei dieser Bauform verläuft das Feld im gesamten Kern in Kornrichtung. Extrem niedrige Leerlaufverluste sind die Folge. Darüber hinaus sprächen eine Reihe von technologischen Vorteilen wesentlich häufiger für den Einsatz von Ringkerntransformatoren als diese tatsächlich zum Einsatz kommen: Sehr geringe Leerlaufströme, geringes Bauvolumen und die Unabhängigkeit von irgendwelchen vorgegebenen Blechschnitten und Spulenkörpern. Die äußere Gestalt und das Verhältnis von Kupfer-zu-Eisen-Einsatz kann sozusagen «stufenlos» frei gewählt werden. Im Einzelfall kann bei sonst gleicher Fertigungs-Technologie auch von der kreisrunden Ringform abgewichen werden. Als Mischform lassen sich die Schnittbandkerne ansehen, die ähnlich gute Gebrauchseigenschaften bieten. Als Sonderform hiervon gibt es auch Ringkern-Transformatoren, deren Kern nicht ringförmig, aber deren Kernquerschnitt kreisrund ist. Hier werden kreisrunde Spulenkörper aus zwei Halbschalen in Schnapptechnik verwendet, die auf dem Kern drehbar angebracht und somit erst nach der Montage bewickelt werden (Bild 19).

Die Spulenkörper herkömmlicher Transformatoren aber werden, wenn die geforderte Leistung gerade noch ein wenig unter der prinzipiellen Leistungsfähigkeit der gewählten Baugröße liegt, häufig noch nicht einmal voll gewickelt, gerade so, als müsse eine bestimmte Mindestwärme unbedingt erreicht werden. Im völligen Einklang hiermit hat sich eine Mentalität unter Produzenten wie Anwendern breitgemacht, die einen Trafo höherer Isolierstoffklasse als den



Bild 19 Rechteckiger Ringkern mit drehbaren Spulenkörpern

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 das Gerät ein, in dem er zum Einsatz kommt. Er ist allenfalls ein wenig kleiner, aber das ist sein einziger Vorteil, und der wird oft genug schon dadurch mehr als aufgezehrt, als dass man wegen der höheren Temperatur mehr Abstand halten und wegen der höheren Verlustleistung mehr Aufwand zur Wärmeabfuhr treiben muss. Der Spannungsabfall wird ebenfalls höher, was bei Gleichrichterlast zur Folge haben kann, dass eine höhere Bemessungsausgangsspannung gewählt werden muss und sich die Bauleistung wieder entsprechend vergrößert. Ein großes Trafowerk in Deutschland wird von mehreren Wettbewerbern einhellig dafür kritisiert, dass es sich mit seinen Transformatoren der Temperaturklasse H (180 °C Dauertem-

peratur) brüstet. In der Fachwelt muss sich die Erkenntnis durchsetzen, dass der heißere Trafo nicht der bessere Trafo ist.

Gut oder billig? – Drei Beispiele qualitätsbewusster Produktion

Beispiel 1: Spulenkörper werden voll gewickelt

Bei einer dem Autoren bekannten Firma wird der Inhaber nicht müde, seinen Kunden zu erklären, warum seine Spulenkörper immer vollgewickelt sind, und warum seine Transformatoren meist etwas – manchmal auch wesentlich – teurer sind als scheinbar gleiche Produkte des Wettbewerbs. Auch muss erklärt werden, warum der billigste Trafo oft zur teuersten Gesamtanlage führt. Offenbar gelingt es, erfolgreiche Überzeugungsarbeit zu leisten, um auch wirtschaftlich damit Erfolg zu erzielen.

Das Deutsche Kupferinstitut bietet dazu ein firmenneutrales Schrifttum an, in welchem die Zusammenhänge und die Sparpotenziale bei den Gesamtkosten dargelegt werden.

Beispiel 2: Verwendung von kornorientiertem Blech

Eine andere bekannte Transformatorfabrik zählt ebenfalls zu der Minderheit von Herstellern, die lieber gute als billige Produkte anbieten und damit Erfolg haben: Dort wird schon ab einer Bauleistung von etwa 1 kVA grundsätzlich nur kornorientiertes Blech eingesetzt. Das ist nicht einmal bei der vorher erwähnten üblich. 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 [18, 19], ebenso wie spezielle Stromrichter-Zwischenkreisdrosseln desselben Unternehmens [20].

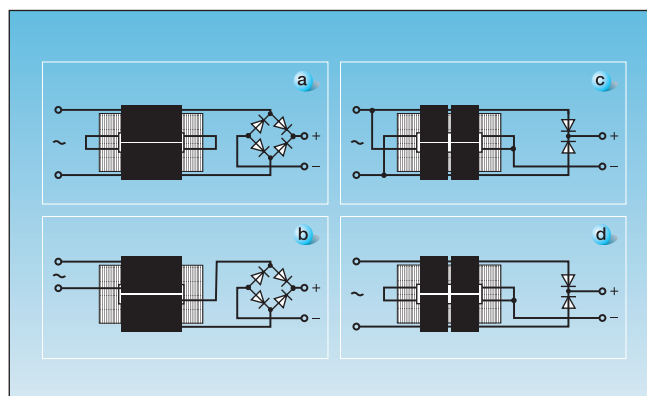


Bild 20 Schaltung des Transformators

Beispiel 3: Schichtung des Kerns

Auch im dritten Beispiel setzt man auf Wirkungsgrad [21]. Hinzu kommt ein besonderes patentiertes Verfahren der Schichtung des Kerns, das der Hersteller allerdings nicht preisgibt. Es soll aber ermöglichen, z.B. aus einem Kern der Größe EI66 mit der größten genormten Schichthöhe von 35 mm in der Temperaturklasse t_40/B^5 eine Bemessungsleistung von 74 VA zu ziehen – bei einem Wirkungsgrad, der deutlich über dem marktüblichen Niveau liegt.

Natürlich ist eine solch hohe Leistungsdichte nur mit dem beim Großtrafo selbstverständlichen, beim Kleintrafo aber eher ungebräuchlichen kornorientierten Blech möglich. Wenn man die hohe Magnetisierbarkeit dieses Kernmaterials ausnutzt und die Flussdichte von den üblichen Werten (um 1,3 T) auf etwa 1,7 T heraufsetzt, lässt sich natürlich ein kleinerer Trafo bauen. Das kornorientierte Blech weist hierbei immer noch wesentlich niedrigere Verluste auf als das übliche «Dyba» schon bei 1,3 T, und es kann auf eine kleinere Baugröße, zumindest eine kleinere Schichthöhe, gewechselt werden.

Der so ausgelegte Trafo verbraucht also zwar wesentlich teureres Kernblech, hiervon jedoch weniger und als Folge auch weniger Platz. Zudem hat ein kleinerer Trafo auch weniger Oberfläche, was bei gleicher Temperaturklasse schon impliziert, dass die Verluste geringer sein müssen.

Die Firma bietet eine «kompakte» und eine «ökonomische» Ausführung ihrer Baureihen an. Wer also unbedingt den Minimaltrafo haben will, soll ihn bekommen, aber in der Ausführung ökonomisch bringt es oben genannter EI66/35 «nur» auf 62 VA bei gleicher Temperaturklasse.

Ihren besten Wirkungsgrad erreichen Transformatoren bekanntlich generell nicht nahe der Bemessungsleistung, sondern je nach Ausführung etwa bei 30%–60% dieses Wertes. Es ist also in Anwendungsfällen mit langen Betriebszeiten sinnvoll, die Bemessungsleistung sozusagen künstlich niedriger zu legen als von der zulässigen Erwärmung her möglich bzw. einen größeren Transformator zu kaufen als nötig.

Fazit

Die Unterschiede, die sich aus den Kleintrafo-Bauformen ergeben, prägen deren Betriebsverhalten erheblich. Daher sollten die Elektronikentwickler nicht bis zuletzt mit der Auswahl des Netztransformators warten, und nicht nur nach dessen äußerem Format und dem Preis entschei-

den, sondern versuchen, das für den betreffenden Anwendungsfall günstigste Betriebsverhalten zu ermitteln.

Beispielsweise hat ein EI66-Kernschnitt (Bild 2, links) bei gleicher Schichthöhe den gleichen Eisenquerschnitt wie ein EI66-Langschnitt (Bild 2, Mitte) und ein UI66-Schnitt (Bild 2, rechts): nämlich jeweils ein Drittel der Kernbreite b , hier also 22 mm, multipliziert mit der Schichthöhe. Das Wickelfenster ist jedoch beim EI66-Langschnitt genau doppelt so groß, beim UI66 sogar viermal so groß wie beim EI66-Standardschnitt. Die Windungszahlen werden also bei gleicher Bemessungsspannung in allen drei Fällen gleich gewählt werden, der Drahtquerschnitt aber bei weitem nicht. Der UI-Schnitt verwendet im Prinzip dieselben Spulenkörper wie der EI-Langschnitt, jedoch zwei Stück davon je Trafo statt eines einzigen. Aus den unterschiedlichen Verhältnissen von Eisenquerschnitt zu Kupferquerschnitt ergeben sich Unterschiede im Betriebsverhalten. Erst recht wird dieses durch die Anordnung der Wicklungen beeinflusst.

Halogenlampen-Transformatoren werden normalerweise entweder bei voller Last betrieben oder vollständig (eingangsseitig) abgeschaltet. Geringere Verluste und bessere Spannungs-Konstanz bietet bei dieser Betriebsart ein Trafo mit relativ viel Eisen. Optimal ist aus technisch-physikalischer Sicht hier wie fast immer die Ringkern-Bauform. Elektronische Transformatoren sollten jenen Fällen vorbehalten bleiben, wo Platzbedarf und Gewicht zum Problem werden können, aber ansonsten ist die konventionelle Lösung aus Kupfer und Eisen robuster, überschaubarer und auch zum Parallelbetrieb geeignet.

Bei der Elektronik hingegen kommt es darauf an, was der Entwickler daraus macht: Dies ist allerdings nicht von außen ersichtlich. Prinzipiell bietet die Elektronik die Möglichkeit, einen Transformator herzustellen, der nicht nur viel kleiner ist, sondern auch noch viel geringere Verluste – vor allem praktisch keine Leerlaufverluste – aufweist. Unter dem Preisdruck in der Praxis aber entwickelt der Elektroniker genau das Gegenteil. Probleme kann zudem die hohe Frequenz der Ausgangsspannung bereiten, was den Parallelbetrieb unmöglich macht.

Beim Kleintrafo wird um jeden Preis Kupfer gespart. Diese Sparsamkeit kann sehr teuer werden, wenn es darum geht, die entstehende Verlustwärme wieder abzuführen. Eine hohe Temperaturklasse ist kein Merkmal eines besonders guten Transformators, sondern eines besonders heißen.

Wenn man bedenkt, dass bei den Spulen, ob voll gewickelt oder nicht, die Windungszahlen fix sind und nur am Querschnitt des einzelnen Drahtes gespart werden kann, beim dünneren Draht aber der Kilogrammpreis höher ist, wird die ohnehin sehr fragwürdige Ersparnis noch kleiner.

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
- [3] Christopher H. Müller: Niederfrequente elektrische und magnetische Felder und Elektrosensibilität in der Schweiz. Bulletin SEV/VSE 91(2000)24.
- [4] Gerhard Hosemann: Lassen sich elektromagnetische Felder verwalten? ETZ 3/1996, S. 32.
- [5] Gerhard Hosemann: Elektromagnetische Felder und noch kein Ende. ETZ 11/1996, S. 42.
- [6] Michael Konstanzer: Sanftes Einschalten induktiver Lasten. ETZ 1/1995, S. 28.
- [7] Michael Konstanzer: Drehstromtransformatoren sanft einschalten. ETZ 8/1995, S. 34.
- [8] Michael Konstanzer: Transformator-Sanft-Einschalter spart Kosten. Elektro-Praktiker 6/1998, S. 524.
- [9] Michael Konstanzer: Blindstrom-Kompensations-Kondensatoren sanft schalten. ETZ 16/1995, S. 44.
- [10] Michael Konstanzer: Trafo-Einschalt-Stromstoss – beherrschen, verkleinern, begrenzen oder vermeiden. DE 17/2000, S. 26.
- [11] S. Fassbinder: Induktive Vorschaltgeräte – besser als ihr Ruf? DE 21/2002, S. 28, sowie KVG: Besser als ihr Ruf? ET Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik, 4/2003, S.65.
- [12] S. Fassbinder: Netzstörungen durch passive und aktive Bauelemente. VDE Verlag, Offenbach 2002.
- [13] Energiesparpotentiale bei Motoren und Transformatoren. Informationsdruck Best.-Nr. i001 des Deutschen Kupferinstituts, Düsseldorf, 1998
- [14] Christiane Decker: Energie sparen mit EMU. de 15-16/2000, S. 34
- [15] Stefan Fassbinder: Sparen mit dem Spartrafo. de 8/2000, S. 39, (verfügbar als Sonderdruck s183 «Energie sparen mit Spartransformatoren» beim Deutschen Kupferinstitut, Düsseldorf)
- [16] Thomas Bürkle: Wassergekühlte Zweipunkt-Zwischenkreisdrosseln. etz 22/2000, S. 18
- [17] etz 7/1996, S. 92
- [18] Printtransformatoren sparen Energie. etz 22/2000, S. 20

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.

⁴ Im vorliegenden Beispiel handelt es sich lediglich um die ohmsche Komponente, da die reaktive bei Gleichstrom nicht vorhanden ist.

⁵ Umgebungstemperatur: 40 °C, Kupfertemperatur im Dauerbetrieb: 120 °C

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
.....
Korrosion und Korrosionsschäden an Kupfer und Kupferwerkstoffen in Trinkwasserinstallationen; Bestell-Nr. s. 177
.....
Metallene Werkstoffe in der Trinkwasser-Installation; Bestell-Nr. i. 156
.....
Durchführungsanleitungen für die Kupferrohrverarbeitung zum Rahmenlehrplan GWI 1/92 „Unlösbare Rohrverbindung und Rohrverarbeitung“; Bestell-Nr. i. 157
.....
Die fachgerechte Kupferrohrinstallation; Bestell-Nr. i. 158
.....
Die fachgerechte Installation von thermischen Solaranlagen; Bestell-Nr. i. 160

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 / Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung; Bestell-Nr. i. 4
.....
Niedriglegierte Kupferwerkstoffe; Bestell-Nr. i. 8
.....
Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing); Bestell-Nr. i. 5
.....
Rohre aus Kupfer-Zink-Legierungen; Bestell-Nr. i. 21
.....
Bänder, Bleche, Streifen aus Kupfer-Zink-Legierungen; Bestell-Nr. i. 22
.....
Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber); Bestell-Nr. i. 13
.....
Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen); Bestell-Nr. i. 15
.....
Kupfer-Nickel-Legierungen; Bestell-Nr. i. 14
.....
Kupfer-Aluminium-Legierungen; Bestell-Nr. i. 6
.....
Kupferwerkstoffe im Automobilbau; Bestell-Nr. i. 9
.....
Gewichtstabellen für Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 29
.....
Dekorativer Innenausbau mit Kupferwerkstoffen
.....
Messing – Ein moderner Werkstoff mit langer Tradition
.....
Von Messing profitieren – Drehteile im Kostenvergleich
.....
Von Messing profitieren – Mit Messing installieren
.....
Messing ja – Spannungsrisskorrosion muss nicht sein!
.....
Messing ja – Entzinkung muss nicht sein!

Verarbeitung

- Konstruktive Gestaltung von Formgussstücken aus Kupferwerkstoffen; Bestell-Nr. s. 133
.....
Kupfer-Zink-Legierungen für die Herstellung von Gesenkschmiedestücken; Bestell-Nr. s. 194
.....
Löten von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 3
.....
Kleben von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 7
.....
Schweißen von Kupfer; Bestell-Nr. i. 11
.....
Schweißen von Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 12
.....
Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 18
.....
Mechanische, chemische und elektrolytische Oberflächenvorbehandlung von Kupfer und Kupferlegierungen; Bestell-Nr. i. 23
.....
Beschichten von Kupfer und Kupfer-Zink-Legierungen mit farblosen Transparentlacken; Bestell-Nr. i. 24

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
.....
Fehlauslösungen von Fehlerstrom-Schutz-einrichtungen; Bestell-Nr. s. 184
.....
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
.....
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 Klärschlamm; 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 Messing-legierung 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
.....
Türgriffe: Eine Infektionsquelle in Krankenhäusern? / Doorknobs: a source of nosocomial infection?
.....
Wieviel Blei gelangt ins Trinkwasser?

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
.....
Grundlegende korrosionschemische Eigenschaften von Kupferwerkstoffen; Bestell-Nr. s. 176
.....
Ammoniakanlagen und Kupfer-Werkstoffe?; Bestell-Nr. s. 210
.....
Kupferwerkstoffe in Ammoniakkälteanlagen; Bestell-Nr. s. 211
.....
Kupfer – Ein Metall mit Zukunft; Bestell-Nr. i. 75

DKI-Fachbücher*

- je EUR 4,35
Kupfer
.....
Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen
.....
Treiben von Kupfer und Kupferlegierungen
.....
Chemische Färbungen von Kupfer und Kupferlegierungen
.....
Kupfer als Werkstoff für Wasserleitungen
.....
Kupferrohre in der Heizungstechnik
.....
Kupfer in der Landwirtschaft
.....
Guss aus Kupfer und Kupferlegierungen – Technische Richtlinien
.....
Kupfer im Hochbau EUR 24,00****
Planungsleitfaden Kupfer – Messing – Bronze EUR 17,90****
.....
Architektur und Solarthermie
Dokumentation zum Architekturpreis EUR 25,00

CD-ROM des Deutschen Kupferinstituts

- Werkstoff-Datenblätter EUR 10,00
.....
Kupferschlüssel EUR 10,00
Solares Heizen EUR 10,00
Was heißt hier schon „harmonisch“? EUR 10,00

Lernprogramm

- Die fachgerechte Kupferrohr-Installation EUR 20,00****

Lehrhilfen

- Werkstofftechnik – Herstellungsverfahren
2 Sammelmappen mit farbigen Klarsichtfolien und Texterläuterungen Band I EUR 125,00**
Band II EUR 100,00**

Filmdienst des DKI

- Das Deutsche Kupferinstitut verleiht kostenlos die nachstehend aufgeführten Filme und Videos:
.....
„Kupfer in unserem Leben“
Videokassette, 20 Min.; Schutzgebühr EUR 21,50.
Verleih kostenlos
.....
„Fachgerechtes Verbinden von Kupferrohren“
Lehrfilm, Videokassette, 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 Bonnhof 5, 40474 Düsseldorf.
** Dozenten im Fach Werkstofftechnik an Hochschulen erhalten die Mappen kostenlos
*** Sonderkonditionen für Berufsschulen
**** Sonderkonditionen für Dozenten und Studenten

Fordern Sie bitte unverbindlich das Dienstleistungs- und Verlagsverzeichnis des DKI an.

**Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen**

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

www.kupferinstitut.de