

radio und fernsehen	Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (1)	Gr. Üg. 2 Blatt 1
	15 (1966) H. 23	Labor- und Berechnungsunterlagen

Diese Arbeitsunterlage behandelt die Berechnung von Netz-Kleintransformatoren bei 50-Hz-Betrieb und Belastung durch ohmsche Verbraucher und die in der Schwachstromtechnik üblichen Gleichrichterschaltungen.

Für einige gebräuchliche Kleintransformatoren-Typenreihen werden Berechnungsunterlagen in Form von Tabellen angegeben.

## 1. Grundlagen

### 1.1. Das Transformator-Ersatzschaltbild

Ein Transformator mit Eisenkern mit zunächst einer Sekundärwicklung läßt sich unter Vernachlässigung der Wicklungskapazitäten durch ein Ersatzschaltbild entsprechend Bild 1 darstellen.

- $R_1$   $\triangleq$  Kupferwiderstand der Primärwicklung
- $R_2$   $\triangleq$  Kupferwiderstand der Sekundärwicklung
- $L_{\sigma 1}$   $\triangleq$  primärseitige Streuinduktivität
- $L_{\sigma 2}$   $\triangleq$  sekundärseitige Streuinduktivität
- $R_{Fe}$   $\triangleq$  Eisenverlustwiderstand
- $L_{H1}$   $\triangleq$  primärseitige Hauptinduktivität
- $R_L$   $\triangleq$  Lastwiderstand

Die Primär- und die Sekundärseite sind durch einen idealen Transformator mit dem Übersetzungsverhältnis  $\bar{u} = w_1/w_2$  verkoppelt.

Bei Blechkerntransformatoren sind bei 50 Hz die Streuinduktivitäten stets zu vernachlässigen, so daß sich für einen Netztrafo mit mehreren Sekundärwicklungen ein Ersatzschaltbild nach Bild 2 ergibt.

### 1.2. Elektrische Grundbeziehungen

Das Ersatzschaltbild nach Bild 2 besteht aus dem idealen Übertrager und den parasitären Elementen (Wicklungswiderstände, Eisenverlustwiderstand, Primärinduktivität). Für die Spannungs- und Stromübersetzung des idealen Übertragers gilt:

$$\frac{U_p^*}{U_{sp}^*} = \frac{w_p}{w_{sp}} \quad (1)$$

$$I_p^* = \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sp} w_{sp} \quad (2)$$

$n$   $\triangleq$  Anzahl der Sekundärwicklungen

$s_p$  = laufender Index

Für den Fall ohmscher Belastungswiderstände sind  $U_{sp}$  sowie  $U_{sp}^*$  und  $I_{sp}$  in Phase. Dann gilt für die Sekundärseite

$$U_{sp} = U_{sp}^* - I_{sp} R_{sp} \quad (3)$$

und mit Gl. (1)

$$U_{sp} = U_p^* \frac{w_{sp}}{w_p} - I_{sp} R_{sp} \quad (4)$$

Darin ist  $U_p^*$  die innere induzierte Spannung (s. Ersatzschaltbild, Bild 2). Zur Ermittlung des Zusammenhanges der Sekundärspannungen mit der Primärspannung muß noch der durch den Primärstrom verursachte Spannungsabfall am primärseitigen Kupferwiderstand berücksichtigt werden. Der Primärstrom setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- a) Summe der transformierten Sekundärströme  $I_p^*$  entsprechend Gl. (2)
- b) Eisenverluststrom  $I_{Fe}$
- c) Magnetisierungsstrom  $I_0$

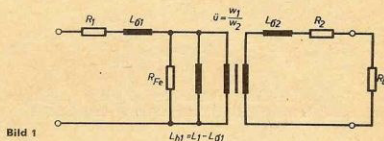


Bild 1

Davon sind  $I_p^*$  und  $I_{Fe}$  mit  $U_p^*$  in Phase, während  $I_0$  als induktiver Blindstrom um  $90^\circ$  (nacheilend) phasenverschoben ist. Es gilt also

$$\bar{I}_p = \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sp} w_{sp} + I_{Fe} \right) - j I_0 \quad (5)$$

$$I_p = |\bar{I}_p| = \sqrt{\left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sp} w_{sp} + I_{Fe} \right)^2 + I_0^2} \quad (6)$$

Für den Zusammenhang zwischen  $U_p^*$  und  $U_p$  ergibt sich dann

$$U_p = U_p^* + R_p \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sp} w_{sp} + I_{Fe} - j I_0 \right) \quad (7)$$

$$U_p = |U_p| = \sqrt{\left[ U_p^* + \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sp} w_{sp} + I_{Fe} \right) R_p \right]^2 + (I_0 R_p)^2} \quad (8)$$

Stellt man Gl. (8) entsprechend um, so ergibt sich für die innere induzierte Spannung  $U_p^*$

$$U_p^* = \sqrt{U_p^2 - (I_0 R_p)^2} - R_p \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right) \quad (9)$$

Aus Gl. (9) erkennt man, daß der durch den Magnetisierungsstrom verursachte Anteil des Spannungsabfalls quadratisch subtrahiert wird, während der durch  $I_0$  und  $I_{FE}$  verursachte Anteil linear subtrahiert wird. Schreibt man Gl. (9) in der Form

$$U_p^* = U_p \sqrt{1 - \left( \frac{I_0 R_p}{U_p} \right)^2} - R_p \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right) \quad (10)$$

so erkennt man, daß für  $I_0 R_p \ll U_p$ , also  $(I_0 R_p)/U_p \ll 1$  dieser Ausdruck vernachlässigt werden kann. Insbesondere ist für  $(I_0 R_p)/U_p < 0,1$

$$\left( \frac{I_0 R_p}{U_p} \right)^2 < 0,01 \quad (< 1\%)$$

und daher ohne weiteres vernachlässigbar.

Für diese Fälle, wo dieser Anteil vernachlässigt werden kann, gehen die Gln. (8) und (9) in folgende Form über:

$$U_p \approx U_p^* + R_p \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right) \quad (11)$$

$$U_p^* \approx U_p - R_p \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right) \quad (12)$$

Der Magnetisierungsstrom ist in diesem Fall nur für die strommäßige Belastung (Erwärmung) der Primärwicklung zu berücksichtigen [s. Gl. (6)], nicht aber für den Spannungsabfall. Für die sekundärseitigen Klemmenspannungen des belasteten Trafos ergibt sich aus den Gln. (4) und (9)

$$U_{sV} = \sqrt{U_p^2 - (I_0 R_p)^2} - \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right) \frac{w_{sV}}{w_p} - I_{sV} R_{sV} \quad (13)$$

und für den Fall, daß der durch den Magnetisierungsstrom verursachte Spannungsabfall vernachlässigt werden kann

$$U_{sV} = \left[ U_p - \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right) \right] \frac{w_{sV}}{w_p} - I_{sV} R_{sV} \quad (14)$$

oder

$$U_{sV} = (U_p - U_{CUP}) \frac{w_{sV}}{w_p} - U_{CUBV} \quad (15)$$

mit

$$U_{CUP} = R_p \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right) \quad (16)$$

$$U_{CUBV} = R_{sV} I_{sV} \quad (17)$$

### 1.2.1. Leistungsbeziehungen

Die gesamte sekundärseitig abgegebene Wirkleistung beträgt

$$P_{sW} = \sum_1^n U_{sV} I_{sV} \quad (18)$$

Die aufgenommene Wirkleistung ergibt sich aus der sekun-

därseitig abgegebenen Wirkleistung und den Verlusten im Trafo zu

$$P_{pW} = P_{sW} + V_{CUB} + V_{CUP} + V_{FE} \quad (19)$$

$V_{CUB} \triangleq$  sekundärseitige Kupferverluste

$V_{CUP} \triangleq$  primärseitige Kupferverluste

$V_{FE} \triangleq$  Eisenverluste

Mit den vorher genannten Strom- und Spannungsgrößen ergeben sich die einzelnen Verlustleistungen

$$V_{CUB} = \sum_1^n I_{sV}^2 R_{sV} \quad (20)$$

$$V_{CUP} = R_p I_p^2 = R_p \left[ \left( \sum_1^n \frac{w_{sV}}{w_p} I_{sV} + I_{FE} \right)^2 + I_0^2 \right] \quad (21)$$

$$V_{FE} = U_p^* I_{FE} \quad (22)$$

Außerdem ist

$$P_{sW} + V_{CUB} = U_p^* \sum_1^n I_{sV} w_{sV} \quad (23)$$

Die aufgenommene Blindleistung ergibt sich aus dem Magnetisierungsstrom zu

$$P_{pb} = U_p^* I_0 \quad (24)$$

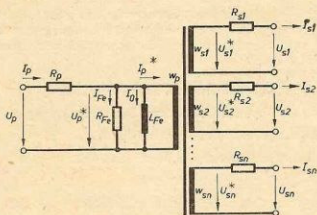


Bild 2

Aus den Leistungen kann man Wirk- und Blindanteil des Primärstromes (bezogen auf  $U_p$ ) bestimmen.

$$I_{pW} = \frac{P_{pW}}{U_p} \quad (25)$$

$$I_{pb} = \frac{P_{pb}}{U_p} = \frac{U_p^* I_0}{U_p} \quad (26)$$

Eine interessante Beziehung für  $I_{pW}$  erhält man, indem man Gl. (26) in Gl. (6) einsetzt.

Es gilt

$$I_{pW}^2 = I_p^2 - I_{pb}^2 \quad (27)$$

$$I_{pW}^2 = \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right)^2 + I_0^2 - \left( \frac{U_p^* I_0}{U_p} \right)^2 \quad (28)$$

$$I_{pW}^2 = \left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right)^2 + I_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{U_p^*}{U_p} \right)^2 \right] \quad (29)$$

$$I_{pW} = \sqrt{\left( \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{sV} w_{sV} + I_{FE} \right)^2 + I_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{U_p^*}{U_p} \right)^2 \right]} \quad (30)$$

Der Wirkungsgrad  $\eta$  und der Leistungsfaktor  $\cos \varphi_p$  lassen sich aus diesen Größen unmittelbar berechnen.



radio und fernsehen	Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (2)	Gr. Üg. 2
		Blatt 2
15 (1966) H. 24	Labor- und Berechnungsunterlagen	DK.621.314.2

### 1.3. Praktische Trafogrößen

#### 1.3.1. Die übertragbare Leistung (Typenleistung)

Für jeden Trafotyp kann eine Typenleistung  $P_t$  angegeben werden, die die maximal übertragbare Leistung unter günstigster Ausnutzung des Wickelraumes (nur eine Primär- und eine Sekundärwicklung, minimale Isolation) angibt.

Die Typenleistung gilt für eine bestimmte Arbeitsinduktion und eine bestimmte Stromdichte, wodurch die Eisen- und Kupferverluste so festgelegt sind, daß die Temperatur der Kupferwicklung gegenüber der äußeren Umgebungstemperatur eine bestimmte Übertemperatur  $t_{ü}$  nicht überschreitet. Für die Übertemperatur werden meist Werte von 50 °C oder 60 °C angegeben.

Bei gegebener Umgebungstemperatur  $t_{ü}$  ergibt sich dann die Wicklungstemperatur  $t_w$  zu

$$t_w = t_{ü} + t_{ü} \quad (31)$$

wobei die Wicklungstemperatur den für die Isoliermaterialien (Spulenkörper, Isolierlack des Drahtes, Isolierpapiere) zulässigen Wert von 105 °C nicht überschreiten darf. Sicherheiten für 100% Überspannung sind einkalkuliert. Die Wahl der o.g. maximalen Übertemperaturen (50 °C bzw. 60 °C) berücksichtigt also die üblichen, im betriebswarmen Gerät herrschenden Umgebungstemperaturen von etwa 45 °C.

#### 1.3.2. Induktion und Windungsspannung

Zwischen den induzierten Spannungen  $U_p^*$  und  $U_{sp}^*$  und der magnetischen Induktion besteht nach dem Induktionsgesetz die Beziehung

$$\dot{U}^* = j\omega w q_{Fe} \mathcal{B} \quad (32)$$

oder

$$U_{eff}^* = 2\pi \frac{1}{\sqrt{2}} f w q_{Fe} \hat{B} \quad (33)$$

$$U_{eff}^* = 4,44 f w q_{Fe} \hat{B} \quad (34)$$

$f$   $\triangleq$  Frequenz

$w$   $\triangleq$  Windungszahl

$q_{Fe}$   $\triangleq$  Eisenquerschnitt

$\hat{B}$   $\triangleq$  Spitzenwert der magnetischen Induktion

In Trafoberechnungstabellen wird für die einzelnen Trafotypen die Windungszahl je Volt für die optimale Arbeitsinduktion angegeben.

$$n = \frac{w}{U_{eff}^*} = \frac{1}{4,44 f q_{Fe} \hat{B}} \quad (35)$$

#### 1.3.3. Relativer Spannungsabfall

Der Einfluß der Spannungsabfälle an den Wicklungswiderständen kann nach Errechnung der Kupferwiderstände mit Gl. (13) bzw. Gl. (14) exakt berücksichtigt werden.

Es läßt sich jedoch zeigen, daß der relative, auf die Primärspannung  $U_p$  bezogene Gesamte Spannungsabfall

$$\varepsilon_g = \frac{U_{Cup}}{U_p} + \frac{w_p U_{Cus}}{w_s U_p} \quad (36)$$

unter bestimmten Bedingungen eine typenabhängige Konstante ist. Der relative Spannungsabfall gilt für die in der Tabelle angegebene Arbeitsinduktion und Stromdichte im betriebswarmen Zustand ( $t_w = 95$  °C).

Der relative Spannungsabfall kann somit zur ersten Abschätzung der inneren induzierten Spannungen und Berechnung der Windungszahlen verwendet werden. Unter Verwendung von Gl. (15) über in

$$U_{sp} = U_p (1 - \varepsilon_g) \frac{w_{sp}}{w_p} \quad (37)$$

Außerdem kann man näherungsweise annehmen, daß sich der relative Gesamtspannungsabfall  $\varepsilon_g$  zu etwa gleichen Teilen auf die Primär- und die Sekundärwicklung aufteilt, also

$$\varepsilon_p \approx \varepsilon_s \approx \frac{1}{2} \varepsilon_g \quad (38)$$

wobei

$$\frac{U_{Cup}}{U_p} \approx \varepsilon_p \approx \frac{1}{2} \varepsilon_g \quad (39)$$

$$\frac{U_{Cus}}{U_p} \approx \varepsilon_s \approx \frac{1}{2} \varepsilon_g \quad (40)$$

Mit Gl. (37) kann Gl. (40) folgendermaßen umgewandelt werden:

$$\frac{U_{Cus}}{U_s} = \frac{\varepsilon_s}{1 - \varepsilon_g} \approx \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_g} \quad (41)$$

Für die inneren induzierten Spannungen ergibt sich dann

$$U_p^* \approx U_p \left(1 - \frac{1}{2} \varepsilon_g\right) \quad (42)$$

$$U_{sp}^* \approx U_{sp} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_g}\right) \quad (43)$$

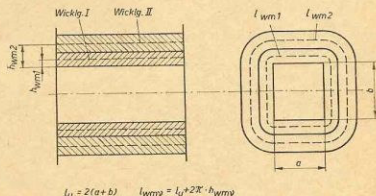


Bild 3

und damit für die Windungszahlen

$$w_p \approx n U_p^* \approx n U_p \left(1 - \frac{1}{2} \varepsilon_g\right) \quad (44)$$

$$w_{pV} \approx n U_{pV}^* \approx n U_{pV} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_g}\right) \quad (45)$$

Für kleine Werte von  $\varepsilon_g$  ist natürlich  $1 - \varepsilon_g \approx 1$ , wodurch sich Gl. (43) und Gl. (45) entsprechend vereinfachen.

### 1.3.4. Die Stromdichte

Wie bereits unter 1.3.1. erläutert, dürfen für jeden Trafotyp die Verluste einen bestimmten Maximalwert nicht überschreiten, damit die Erwärmung in den zulässigen Grenzen bleibt. Darüber hinaus ist aber erforderlich, daß jede Wicklung die Grenztemperatur einhält, d. h., daß nicht z. B. eine Wicklung überlastet und eine andere unterlastet wird. Diese Bedingung wird dann erfüllt, wenn in allen Wicklungen die gleiche Stromdichte herrscht. Die Stromdichte  $s$  wird für jeden Trafotyp für die unter 1.3.1. genannten Bedingungen angegeben.

Mit der gegebenen Stromdichte und den geforderten Wicklungsströmen ergeben sich die notwendigen Drahtdurchmesser

$$d = \sqrt{\frac{4 I}{\pi s}} \quad (46)$$

die natürlich entsprechend der Normreihe für Wickeldrahtdurchmesser auf- oder evt. abgerundet werden.

Wird die Typenleistung des Trafos nicht ausgenutzt, d. h. ist  $P_s < P_t$ , dann kann zur Erreichung der gleichen Kupferverluste (gleiche Erwärmung) die Stromdichte umgekehrt proportional erhöht werden, also

$$s' = s \frac{P_t}{P_s} \quad (47)$$

Dieser Sachverhalt ist dann von Interesse, wenn man trotz  $P_s < P_t$  nicht mit dem Wickelraum auskommt, weil ein zu hoher Prozentsatz des Wickelraumes für die Isolation benötigt wurde (z. B. hohe Spannungen oder zahlreiche voneinander zu isolierende Sekundärwicklungen).

### 1.3.5. Der Magnetisierungsstrom

Für den Magnetisierungsstrom gilt nach dem Durchflutungsgrad für einen geschlossenen Eisenkreis

$$I_0 = \frac{H l_{Fe}}{w_p} \quad (48)$$

$H$   $\triangleq$  magnetische Feldstärke

$l_{Fe}$   $\triangleq$  Eisenweglänge

Diese Beziehung gilt eigentlich nur für einen magnetischen Kreis ohne Luftspalt. Da aber bei Blechkernen Luftspalte und Inhomogenitäten unvermeidlich sind, wird für jeden Trafotyp die Größe  $(I_0 w)$  für eine bestimmte Induktion (oder in Abhängigkeit von der Induktion) unter Berücksichtigung aller durch die Kernform bedingten Einflüsse angegeben. Es gilt dann

$$I_0 = \frac{(I_0 w)}{w_p} \quad (49)$$

wobei  $(I_0 w)$  als Effektivwert angegeben wird, so daß sich  $I_0$  als Effektivwert ergibt.

Dieser Magnetisierungsstrom ist praktisch ein reiner Blindstrom. Für die Blindleistung gilt dann

$$P_{pb} = U_p^* I_0 \quad (50)$$

und mit

$$w_p = U_p^* n$$

$$P_{pb} = \frac{(I_0 w)}{n} \quad (51)$$

$P_{pb}$  ist also für jeden Trafotyp eine Konstante.

### 1.3.6. Eisenverluste und Eisenverluststrom

Zur Berechnung der Eisenverluste werden meist die spezifischen Eisenverluste  $v$  (Eisenverluste je Gewichtseinheit) eines Kernmaterials für eine bestimmte Induktion (oder in Abhängigkeit von der Induktion) angegeben.

Für die gebräuchlichsten Trafobleche Dyn.-Bl. III  $\times$  0,5 und Dyn.-Bl. IV  $\times$  0,35 ergeben sich für 12 000 G und 13 000 G folgende spezifische Verluste:

$\hat{B}/G$	Dyn.-Bl. III $\times$ 0,5	Dyn.-Bl. IV $\times$ 0,35
12 000	3,5 W/kg	1,75 W/kg
13 000	4,4 W/kg	2,3 W/kg

Für einen bestimmten Trafokern ergeben sich dann die Eisenverluste aus spezifischen Verlusten und Kerngewicht

$$V_{Fe} = v \cdot G_{Fe} \quad (52)$$

Der Eisenverluststrom ergibt sich daraus schließlich zu

$$I_{Fe} = \frac{V_{Fe}}{U_p^*} \quad (53)$$

### 1.3.7. Die Wicklungswiderstände (Kupferwiderstände)

Für den Widerstand eines linearen Leiters gilt bekanntlich

$$R = \varrho l/q \quad (54)$$

$\varrho$   $\triangleq$  spezifischer Widerstand

$l$   $\triangleq$  Länge des Leiters

$q$   $\triangleq$  Querschnitt des Leiters

Bei einer Spule bzw. Wicklung ergibt sich die Länge des Drahtes aus dem Produkt der Windungszahl  $w$  und der mittleren Windungslänge  $l_w$ , so daß für den Widerstand gilt

$$R = \varrho \frac{w l_w}{q} \quad (55)$$

Die mittlere Windungslänge ergibt sich für den bei Transformator üblichen rechteckigen Spulenkörper entsprechend Bild 3 zu

$$l_w = l_u + 2 \pi h_{wm} \quad (56)$$

$l_u$   $\triangleq$  untere Windungslänge (Umfang des Spulenkörpers)  
 $h_{wm}$   $\triangleq$  mittlere Wicklungshöhe (Abstand der Mitte einer Wicklung vom Spulenkörper)

Die untere Windungslänge  $l_u$  ist für die einzelnen Trafotypen angegeben. Desgleichen ist für die Wickeldrähte für jeden Drahtdurchmesser die Größe  $\varrho/q = R/l$  (Widerstand je „m“ bei 20 °C) angegeben.

Die Kupferwiderstände werden zunächst für eine Temperatur von 20 °C berechnet (Kaltwiderstände). Für die Berechnung des betriebswarmen Trafos interessieren noch die Warmwiderstände, die sich mit dem TK des Kupfers nach folgender Beziehung ergeben

$$R_w = R_{20} [1 + \alpha (t - 20^\circ)] \quad (57)$$

$$\alpha_{Cu} = 3,9 \cdot 10^{-3}/^\circ C$$

Für die übliche Warmtemperatur von etwa 95 °C ergibt sich gegenüber 20 °C eine Erhöhung des Kupferwiderstandes um 30%, also

$$R_{95} = 1,3 R_{20} \quad (58)$$

### 1.3.8. Wickelraumgrößen

Der Wickelraum wird durch die Wickelhöhe ( $h_w$ ;  $h_{w\text{eff}}$ ) und die Wickelbreite ( $b_w$ ;  $b_{w\text{eff}}$ ) charakterisiert. Dabei sind  $h_w$  und  $b_w$  die absoluten geometrischen Abmessungen, während die effektiven Wickelraumgrößen  $h_{w\text{eff}}$  und  $b_{w\text{eff}}$  die rechnerisch ausnutzbare Wickelhöhe und Wickelbreite darstellen.



## 2. Berechnungsgang für Transformatoren mit ohmscher Belastung

### 2.1. Vorgegebene Größen (technische Forderungen)

$$U_p; U_{sp}; I_{sp}; t_{ag}$$

### 2.2. Ermittlung der Sekundärleistung entspr. Gl. (18)

$$P_s = \sum_1^n U_{s,v} I_{s,v}$$

### 2.3. Auswahl eines Trafotyps mit einer Typenleistung

$$P_L > P_s$$

### 2.4. Ermittlung der Trafokonstanten

Für den gewählten Trafotyp werden aus den entsprechenden Tabellen 5-10 folgende Trafokonstanten entnommen:

$$P_t; n; \epsilon_g; s; V_{Fe}; V_{Cu} \text{ (bzw. } V_{CuP} \text{ und } V_{CuS}) ; I_0 W$$

### 2.5. Überschlägige Berechnung der Windungszahlen entspr. den Gln. (44) und (45)

$$w_p = n U_p \approx n U_p \left( 1 - \frac{1}{2} \epsilon_g \right)$$

$$w_{s,r} = n U_{s,r} \approx n U_{s,r} \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\epsilon_g}{1 - \epsilon_g} \right)$$

Dabei ist evtl. „n“ so zu ändern, daß sich bei der kleinsten Sekundärspannung eine ganzzahlige Windungszahl ergibt.

### 2.6. Überschlägige Berechnung von $I_p$ unter Verwendung der Gln. (19), (25), (26) und (51)

$$I_{p,s} = \frac{P_s + V_{CuP} + V_{CuS} + V_{Fe}}{U_p}$$

$$I_{p,b} = \frac{I_0 W}{n U_p}$$

$$I_p = \sqrt{I_{p,s}^2 + I_{p,b}^2}$$

### 2.7. Bestimmung der Drahtstärken mit der Stromdichte $s$ und den geforderten Strömen

#### a) evtl. Korrektur der Stromdichte nach Gl. (47)

$$s' = s \frac{P_t}{P_s}$$

#### b) Bestimmung der Drahtstärken nach Gl. (46)

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{s}} \text{ (bzw. } s' \text{ anstatt } s)$$

### 2.8. Anordnung der Wicklungen

Die Primärwicklung wird zuerst angeordnet. Bei Trafos mit zwei Spulen (UL- oder LL-Kern-Trafos) ist die Primärwicklung gleichmäßig auf beide Spulen zu ver-

## Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (3)

LABOR- UND BERECHNUNGSUNTERLAGEN

teilen (Reihen- oder Parallelschaltung der beiden Halbwicklungen möglich).

Die Sekundärwicklungen werden über der Primärwicklung nach steigender Drahtstärke angeordnet, also so, daß zuerst die Wicklung mit dem dünnsten Draht und ganz oben die Wicklung mit dem stärksten Draht angeordnet wird.

Bei Trafos mit zwei Spulen Aufteilung jeder Sekundärwicklung auf beide Spulen und zumindest leistungssymmetrische Verteilung der Sekundärwicklungen.

Ermittlung der Windungszahl je Lage:

$$w_L = \frac{b_{eff}}{d_{CuL}}$$

Ermittlung der Lagenzahl:

$$z = \frac{w}{w_L}$$

Wahl der Isolation entspr. den Drahtstärken und Spannungsverhältnissen nach Tabelle 3.

Wickelraumkontrolle: Für die gesamte Wickelhöhe muß gelten

$$h_{ges} = h_{CuL} + h_{is} \leq h_{eff}$$

### 2.9. Berechnung derwicklungswiderstände entspr. den Gln. (55), (56) und (58)

$$\text{Koltwiderstand: } R_k = \rho \frac{w I_w}{q} = R_{30} w I_w$$

mit

$$I_w = I_u + 2 \pi h_{wm}$$

Warmwiderstand:  $R_w = 1,3 R_k$  [oder für spezielle Temperaturforderungen Gl. (57)]

### 2.10. Korrektur- und Kontrollrechnung

Der Trafo wird meist so ausgelegt, daß die Nennwerte der Ausgangsspannungen bei belastetem Trafo im betriebswarmen Zustand (etwa 95°C) erreicht werden. Deshalb ist die Korrekturrechnung mit den Warmwiderständen durchzuführen.

#### a) Sekundärseite

Die korrigierte Windungszahl ergibt sich zu

$$w_{s,r} \text{ kor} = n (U_{s,r} + I_{s,r} R_{w,s,r})$$

#### b) Primärseite

Zunächst wird der korrigierte Primärstrom unter Verwendung der Gln. (2), (6), (49) und (53) berechnet. Komponenten des Primärstromes:

$$I_p^* = \frac{1}{w_p} \sum_1^n I_{s,v} w_{s,v}$$

$$I_0 = \frac{(I_0 W)}{w_p}$$

$$I_{Fe} = \frac{V_{Fe}}{U_p^*} = \frac{V_{Fe} n}{w_p}$$

Primärstrom:

$$I_p = \sqrt{(I_p^*)^2 + I_{Fe}^2 + I_0^2}$$

Kontrolle, ob der Primärstrom den unter 2.6. berechneten Wert einhält.

Mit den Komponenten des Primärstromes ergibt sich die korrigierte Primärwindungszahl entspr. Gl. (9) oder Gl. (12)

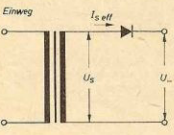

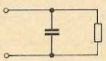
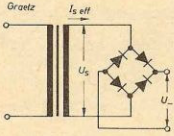
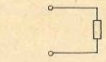

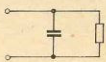
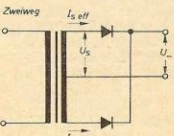

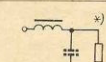
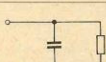
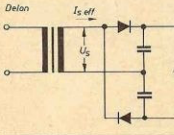
$$W_{p, \text{kor}} = n U_p^* = n \left[ \sqrt{U_p^2 - (I_p R_{pw})^2} - R_{pw} (I_p^* + I_{pV}) \right]$$

$$\approx n [U_p - R_{pw} (I_p^* + I_{pV})] \quad \text{für } \frac{I_p R_{pw}}{U_p} < 0,1$$

Bei großen Abweichungen der korrigierten Windungszahlen von den unter 2.5. berechneten sind die Kupferwiderstände und der transformierte Primärstrom mit den korrigierten Windungszahlen erneut zu berechnen und die Korrekturrechnung zu wiederholen.

Bei kleinen Trafos mit großem relativem Spannungsabfall  $\varepsilon_g$  können u. U. mehrere Kontrollrechnungen erforderlich sein, da sich hier Änderungen der Windungszahlen besonders stark auswirken.

Tabelle 1: Näherungswerte für die Belastung von Transformatoren durch Gleichrichterschaltungen

Gleichrichterschaltungen	Belastungsarten	$U_s$	$I_s \text{ eff}$	$P_{\text{C ess}}$	$P_{\text{Tr}}$	$I_{\text{Co}}$
		$k_1 U_n$	$k_2 I_n$	$k_3 P_n$	$k_4 P_n$	$k_5 I_n$
		2,5 $U_n$	1,55 $I_n$	4,4 $P_n$	—	—
		0,9 $U_n$	2,5 $I_n$	2,4 $P_n$	—	—
		1,25 $U_n$	1,15 $I_n$	1,45 $P_n$	1,45 $P_n$	1,15 $I_n$
		1,25 $U_n$	1,05 $I_n$	1,3 $P_n$	1,3 $P_n$	0,9 $I_n$
		0,9 $U_n$	1,75 $I_n$	1,6 $P_n$	1,6 $P_n$	1,3 $I_n$
		1,25 $U_n$	0,8 $I_n$	1,65 $P_n$	1,45 $P_n$	0,57 $I_n$
		1,25 $U_n$	0,75 $I_n$	1,6 $P_n$	1,3 $P_n$	0,45 $I_n$
		0,9 $U_n$	1,25 $I_n$	1,85 $P_n$	1,6 $P_n$	0,65 $I_n$
		0,45 $U_n$	3,6 $I_n$	1,65 $P_n$	1,65 $P_n$	2,6 $I_n$

\*) Bei Verwendung eines LC-Filters (mit gestrichelt gezeichnetem C) gelten die Formeln nur für  $L > L_{\text{krit}} = 10^{-3} \frac{U_n - V}{I_n - A}$  H



### 3. Berechnung von Trafos bei Belastung durch Gleichrichterschaltungen

#### 3.1. Allgemeines

Die wichtigsten in der Schwachstromtechnik angewendeten Gleichrichterschaltungen sind die Einweg-, Graetz-, Zweiweg- und die Delonschaltung (Spannungsverdopplerschaltung). Zur vollständigen Charakterisierung der Eigenschaften der Schaltung ist nach der Belastungsart des eigentlichen Gleichrichters zu beachten. Die typischen Belastungsarten sind rein ohmsche Belastung, induktive Belastung (Drosselungsfiler) und kapazitive Belastung (Ladekondensator). Eine weitere Belastungsart wäre noch die Belastung durch eine Gegenspannung (Batterieladung). Die für die Praxis wichtigsten Fälle sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Gleichzeitig sind Näherungswerte zur Dimensionierung des Gleichrichtertrafos angegeben. Die Näherungen sind für die Fälle rein ohmscher Belastung und induktiver Belastung recht genau, während für den Fall kapazitiver Belastung nur sehr grobe Näherungen angebar sind. Eine genaue Berechnung der Gleichrichterschaltungen mit Ladekondensator ist nur unter Kenntnis der Größen Innenwiderstand (Trafowicklung und Gleichrichter), Kapazität des Ladekondensators und Belastungswiderstand möglich und kann z. B. nach Kammerloher [8] erfolgen.

#### 3.2. Näherungsweise Dimensionierung des Gleichrichtertrafos nach Tabelle 1

In der Tabelle 1 sind für die einzelnen Schaltungsarten die Spannungen, Ströme und Leistungen des Trafos in Abhängigkeit von der geforderten Gleichspannung  $U_{\text{L}}$  und dem geforderten Gleichstrom  $I_{\text{L}}$  angegeben.

##### 3.2.1. Trafowechselspannung $U_{\text{s}}$

In der Spalte  $U_{\text{s}}$  sind die Trafoklemmenspannungen in Abhängigkeit von der Gleichspannung  $U_{\text{L}}$  angegeben. Im allgemeinen Fall ist  $U_{\text{s}} \neq U_{\text{L}}$ !

Genauigkeit der Näherung:

für ohmsche und induktive Belastung etwa  $\pm 5\%$   
für kapazitive Belastung (Lade-C) etwa  $\pm 15\%$

##### 3.2.2. Trafosekundärstrom $I_{\text{s}}$

In der Spalte  $I_{\text{s,eff}}$  ist der sekundärseitige Trafostrom in Abhängigkeit vom entnommenen Gleichstrom  $I_{\text{L}}$  angegeben. Für die Zweiweg- (Mittelpunkt-) Schaltung gelten die Ströme je Halbwicklung. Hierbei ist zu beachten: Es ist stets  $I_{\text{s}} > I_{\text{L}}$  (bei der Zweiwegschaltung ist  $I_{\text{s}} > 1/2 I_{\text{L}}$ ). Wird die Sekundärwicklung also nur für  $I_{\text{L}}$  dimensioniert, so wird der Trafo überlastet.

Der Sekundärstrom ist bei Graetz- und Delonschaltung ein reiner Wechselstrom, der allerdings bei Anwendung von Glättungsschaltungen (Lade-C oder Drossel) nicht sinusförmig ist (Oberwellen). Bei der Einweg- und Zweiwegschaltung fließt durch die Sekundärwicklungen ein

## Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (4)

LABOR- UND BERECHNUNGSUNTERLAGEN

pulsierender Gleichstrom, der also eine Überlagerung eines reinen Gleichstromes und eines Wechselstromes darstellt.

#### 3.2.3. Trafoersatzleistung $P_{\text{T,ers}}$

In der Spalte  $P_{\text{T,ers}}$  ist die zur Bestimmung der Trafogröße erforderliche Ersatzleistung in Abhängigkeit von der entnommenen Gleichleistung  $P_{\text{L}} = U_{\text{L}} I_{\text{L}}$  angegeben. Es ist stets  $P_{\text{T,ers}} > P_{\text{L}}$ , d. h., es darf also keinesfalls die Trafogröße nur für die Gleichleistung ausgelegt werden.

Die Trafoersatzleistung ist für Graetz- und Delonschaltung, wo der Sekundärstrom keine Gleichstromkomponente enthält,

$$P_{\text{T,ers}} = U_{\text{s}} I_{\text{s}}$$

Bei der Zweiwegschaltung enthalten die Sekundärströme Gleichstromanteile, die nicht auf die Primärseite transformiert werden, so daß also die Sekundärleistung größer als die Primärleistung ist. Hier wurde  $P_{\text{T,ers}}$  als Mittelwert von primärer und sekundärer Leistung bestimmt.

$$P_{\text{T,ers}} = \frac{\eta U_{\text{s}} I_{\text{s}} + P_{\text{Tf}}}{1 + \eta_{\text{s}}} \approx \frac{U_{\text{s}} I_{\text{s}} + P_{\text{Tf}}}{2} \quad (59)$$

$P_{\text{Tf}} \triangleq$  transformierte Wechselleistung (siehe Punkt 3.2.4.)  
 $\eta \triangleq$  Wirkungsgrad des Trafos

Bei der Einwegschaltung ist in  $P_{\text{T,ers}}$  ebenfalls die Gleichstrombelastung der Sekundärwicklung und zusätzlich die Vergrößerung des Primärstromes durch die Gleichstrommagnetisierung des Eisenkernes berücksichtigt.

#### 3.2.4. Transformierte Wechselleistung $P_{\text{Tf}}$

Die in der Spalte  $P_{\text{Tf}}$  angegebene Leistung ist zur Berechnung des Primärstromes entspr. den Gln. (25) und (19) zu verwenden. Sie stellt die auf die Primärseite transformierte Wechselleistung dar.

Bei Graetz- und Delonschaltung ist  $P_{\text{Tf}} = P_{\text{L,ers}}$ . Bei der Zweiwegschaltung, wo in den Sekundärwicklungen ein Gleichstromanteil fließt, der nicht auf die Primärseite transformiert wird, ist  $P_{\text{Tf}} < P_{\text{L,ers}}$ . Es ist jedoch in allen Fällen  $P_{\text{Tf}} > U_{\text{L}} I_{\text{L}}$ .

Für die Einwegschaltung ist die Angabe von  $P_{\text{Tf}}$  nicht sinnvoll, da die durch Gleichstrommagnetisierung des Kernes hervorgerufene Erhöhung des Magnetisierungsstromes, die in die gleiche Größenordnung kommt, nicht angegeben werden kann.

In der Praxis wird man jedoch den Fall, daß ein Trafo nur durch eine Einweg-Gleichrichterschaltung belastet wird, wegen des schlechten Wirkungsgrades vermeiden.

In Fällen, wo die Einwegschaltung nur eine geringe Teillast des Trafos darstellt, kann man näherungsweise mit  $P_{\text{Tf}} \approx U_{\text{s}} I_{\text{s}}$  rechnen.

#### 3.2.5. Grundwellenkomponente des Sekundärstromes $I_{\text{s,0}}$

Die in der Spalte  $I_{\text{s,0}}$  angegebene Grundwellenkomponente des Sekundärstromes dient zur Berechnung des Spannungsabfalles an den Kupferwiderständen des Trafos (s. Korrektur- und Kontrollrechnung).

Der durch die Gleichrichterschaltung verzerrte Sekundärstrom besteht nach der Fourieranalyse aus einer sinusförmigen Grundwelle  $I_{s0}$  und ebenfalls sinusförmigen Oberwellen. Grundwellen- und Oberwellenanteile werden zwar beide auf die Primärseite transformiert und rufen am primärseitigen Kupferwiderstand einen Spannungsabfall hervor. Es wird jedoch nur der durch den Grundwellenanteil verursachte Spannungsabfall von der Primärspannung entspr. Gl. (9) linear subtrahiert. Der durch die Oberwellen verursachte Anteil des Spannungsabfalls ist quadratisch zu subtrahieren und daher meist zu vernachlässigen.

### 3.3. Berechnungsgang für Transformatoren mit Gleichrichterbelastung

Gegenüber dem unter Punkt 2. dargestellten Berechnungsgang für Trafos mit rein ohmscher Belastung ergibt sich bei Trafos mit Gleichrichterbelastung (bzw. gemischter Belastung) unter Verwendung von Tabelle 1 folgender Berechnungsgang:

#### 3.3.1. Ermittlung der sekundärseitigen Trafowechselspannung und des Sekundärstromes aus der Gleichspannung $U_-$ und dem Gleichstrom $I_-$

(Für jede Wicklung, die durch eine Gleichrichterschaltung belastet wird)

Verwendung der Faktoren von Tabelle 1.

$$U_s = k_1 U_- \quad (60)$$

$$I_s = k_2 I_- \quad (61)$$

#### 3.3.2. Ermittlung der Trafogröße

Bestimmung der Ersatz-Trafoleistung für jede Gleichrichterschaltung

$$P_{\text{L.ers}} = k_3 U_- I_- \quad (62)$$

Allgemein gilt für einen Trafo mit gemischter Belastung, also Belastung durch Gleichrichterschaltungen und ohmsche Widerstände (z. B. Heizungen):

$$P_{\text{L.ers}} = \underbrace{\sum_1^m P_{\text{L.ers } \mu}}_{\text{Gleichrichterschaltungen}} + \underbrace{\sum_1^n U_{\text{or } \mu} \cdot I_{\text{or } \mu}}_{\text{ohmsche Belastungen}} \quad (63)$$

#### 3.3.3. Auswahl eines Trafotyps mit einer Typenleistung $P_L > P_{\text{L.ers}}$

#### 3.3.4. Für den gewählten Trafotyp werden aus der entspr. Tabelle folgende Trafokonstanten entnommen

$P_L$ ;  $n$ ;  $e_g$ ;  $s$ ;  $V_{\text{Fe}}$ ;  $V_{\text{Cu}}$  (bzw.  $V_{\text{CuD}}$  u.  $V_{\text{CuW}}$ );  $I_0$  w

#### 3.3.5. Überschlägige Berechnung der Windungszahlen

Dazu siehe Pkt. 2.5.

#### 3.3.6. Überschlägige Berechnung des Primärstromes

a) Bestimmung der transformierten Leistungen der durch die Gleichrichterschaltungen belasteten Wicklungen

$$P_{\text{L}} = k_4 U_- I_- \quad (64)$$

b) Bestimmung der transformierten Gesamtleistungen (bezogen auf die Sekundärseite)

$$P_s = \underbrace{\sum_1^m P_{\text{Lr } \mu}}_{\text{Gleichrichterschaltungen}} + \underbrace{\sum_1^n U_{\text{or } \mu} I_{\text{or } \mu}}_{\text{ohmsche Belastungen}} \quad (65)$$

c) Berechnung von  $I_{\text{pW}}$ ,  $I_{\text{p1}}$  und  $I_{\text{p}}$  entspr. Pkt. 2.6.

#### 3.3.7. Bestimmung der Drahtstärken

Dazu siehe Pkt. 2.7.

#### 3.3.8. Anordnung der Wicklungen

Dazu siehe Pkt. 2.8.

#### 3.3.9. Berechnung der Wicklungswiderstände

Dazu siehe Pkt. 2.9.

#### 3.3.10. Korrektur- und Kontrollrechnung

Bei den Gleichrichterwicklungen ist die Korrektur mit den Grundwellenkomponenten  $I_{s0 \mu}$  durchzuführen.

Die Grundwellenkomponenten ergeben sich aus Tabelle 1

$$I_{s0} = k_5 I_- \quad (66)$$

a) Sekundärseite

Die korrigierte Windungszahl ergibt sich für Wicklungen mit Gleichrichterbelastung

$$W_{s \mu \text{ kor}} = n (U_{s \mu} + I_{s0 \mu} R_{s \mu}) \quad (67)$$

und für Wicklungen mit ohmscher Belastung

$$W_{s \text{ or } \text{ kor}} = n (U_{s \text{ or}} + I_{s \text{ or}} \cdot R_{s \text{ or}}) \quad (68)$$

$R_{s \mu \text{ or}} ; R_{s \text{ or}}$   $\triangleq$  Warmwiderstände der Sekundärwicklung

b) Primärseite

Hierzu ist die transformierte Grundwellenkomponente des Primärstromes zu berechnen

$$I_{p0}^* = \frac{1}{W_p} \left[ \sum_1^m I_{s0 \mu} W_{s \mu} + \sum_1^n I_{s \text{ or}} \cdot W_{s \text{ or}} \right] \quad (69)$$

Außerdem Berechnung von  $I_{\text{Fe}}$  und  $I_0$  wie unter Pkt. 2.10.b. Dann ist die korrigierte Primärwindungszahl

$$W_{p \text{ kor}} = n \left[ \sqrt{U_p^2 - (I_0 R_{pW})^2} - R_{pW} (I_{p0}^* + I_{\text{Fe}}) \right] \quad (70)$$

$$\approx n [U_p - R_{pW} (I_{p0}^* + I_{\text{Fe}})] \quad \text{für } \frac{I_0 R_{pW}}{U_p} < 0,1$$

(71)

$R_{pW} \triangleq$  Warmwiderstand der Primärwicklung  
Ansonsten gilt das unter 2.10. Gesagte.

In diesem Abschnitt und auch im Abschnitt 2 wurde der Berechnungsgang von Kleintransformatoren zunächst allgemein und abstrakt demonstriert. In den folgenden Abschnitten werden tabellarische Unterlagen über die wichtigsten in der DDR verwendeten Kleintransformatoren-Typenreihen sowie über Wickeldrähte und Isolationsmaterialien angegeben und anschließend mit diesen Unterlagen ein konkretes Beispiel durchgerechnet.



# Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (5)

LABOR- UND BERECHNUNGSUNTERLAGEN

Gr. Ug. 2 · Blatt 5 · DK 621.314.2

**Tabelle 2: Wickeldrahttabelle**

$d_{Cu}$ in mm	$d_{CuL}$ in mm	$R_{20}$ in $\Omega \cdot m^{-1}$	$d_{Cu}$ in mm	$d_{CuL}$ in mm	$R_{20}$ in $\Omega \cdot m^{-1}$
0,03	0,042	24,48	0,85	0,922	3,05 · 10 <sup>-2</sup>
0,04	0,052	13,78	0,90	0,972	2,72 · 10 <sup>-2</sup>
0,05	0,065	8,83	0,95	1,022	2,44 · 10 <sup>-2</sup>
0,06	0,075	6,13	1,00	1,072	2,21 · 10 <sup>-2</sup>
0,07	0,088	4,50	1,05	1,141	2,01 · 10 <sup>-2</sup>
0,08	0,099	3,45	1,10	1,191	1,82 · 10 <sup>-2</sup>
0,09	0,112	2,718	(1,15)	1,241	1,67 · 10 <sup>-2</sup>
0,10	0,122	2,208	1,20	1,291	1,53 · 10 <sup>-2</sup>
0,11	0,132	1,825	1,25	1,341	1,41 · 10 <sup>-2</sup>
0,12	0,142	1,528	1,30	1,391	1,31 · 10 <sup>-2</sup>
(0,13)	0,159	1,306	1,35	1,441	1,21 · 10 <sup>-2</sup>
0,14	0,169	1,128	1,40	1,491	1,12 · 10 <sup>-2</sup>
0,15	0,179	9,80 · 10 <sup>-1</sup>	1,45	1,545	1,05 · 10 <sup>-2</sup>
0,16	0,190	8,64 · 10 <sup>-1</sup>	1,50	1,595	9,80 · 10 <sup>-3</sup>
(0,17)	0,200	7,63 · 10 <sup>-1</sup>	(1,55)	1,645	9,13 · 10 <sup>-3</sup>
0,18	0,210	6,80 · 10 <sup>-1</sup>	1,60	1,695	8,60 · 10 <sup>-3</sup>
(0,19)	0,220	6,11 · 10 <sup>-1</sup>	(1,65)	1,745	8,10 · 10 <sup>-3</sup>
0,20	0,230	5,51 · 10 <sup>-1</sup>	1,70	1,795	7,63 · 10 <sup>-3</sup>
(0,21)	0,245	5,08 · 10 <sup>-1</sup>	(1,75)	1,850	7,21 · 10 <sup>-3</sup>
0,22	0,255	4,53 · 10 <sup>-1</sup>	1,80	1,900	6,80 · 10 <sup>-3</sup>
0,23	0,265	4,17 · 10 <sup>-1</sup>	1,90	2,000	6,11 · 10 <sup>-3</sup>
0,24	0,275	3,83 · 10 <sup>-1</sup>	2,00	2,100	5,51 · 10 <sup>-3</sup>
0,25	0,285	3,53 · 10 <sup>-1</sup>	2,10	2,210	5,00 · 10 <sup>-3</sup>
0,26	0,297	3,27 · 10 <sup>-1</sup>	2,20	2,310	4,56 · 10 <sup>-3</sup>
(0,27)	0,307	3,02 · 10 <sup>-1</sup>	2,30	2,415	4,18 · 10 <sup>-3</sup>
0,28	0,317	2,81 · 10 <sup>-1</sup>	2,40	2,515	3,83 · 10 <sup>-3</sup>
(0,29)	0,327	2,62 · 10 <sup>-1</sup>	2,50	2,615	3,53 · 10 <sup>-3</sup>
0,30	0,337	2,45 · 10 <sup>-1</sup>	2,60	2,715	3,25 · 10 <sup>-3</sup>
(0,31)	0,354	2,29 · 10 <sup>-1</sup>	2,70	2,815	3,03 · 10 <sup>-3</sup>
0,32	0,364	2,16 · 10 <sup>-1</sup>	2,80	2,915	2,81 · 10 <sup>-3</sup>
(0,33)	0,374	2,02 · 10 <sup>-1</sup>	2,90	3,015	2,62 · 10 <sup>-3</sup>
(0,34)	0,384	1,90 · 10 <sup>-1</sup>	3,00	3,115	2,44 · 10 <sup>-3</sup>
0,35	0,394	1,80 · 10 <sup>-1</sup>			
0,36	0,404	1,70 · 10 <sup>-1</sup>			
(0,37)	0,414	1,61 · 10 <sup>-1</sup>			
0,38	0,424	1,53 · 10 <sup>-1</sup>			
(0,39)	0,434	1,45 · 10 <sup>-1</sup>			
0,40	0,444	1,38 · 10 <sup>-1</sup>			
(0,42)	0,471	1,25 · 10 <sup>-1</sup>			
(0,43)	0,481	1,19 · 10 <sup>-1</sup>			
0,45	0,501	1,09 · 10 <sup>-1</sup>			
0,47	0,521	9,99 · 10 <sup>-2</sup>			
(0,48)	0,531	9,59 · 10 <sup>-2</sup>			
0,50	0,551	8,81 · 10 <sup>-2</sup>			
0,55	0,609	7,29 · 10 <sup>-2</sup>			
0,60	0,659	6,13 · 10 <sup>-2</sup>			
0,65	0,709	5,25 · 10 <sup>-2</sup>			
0,70	0,759	4,50 · 10 <sup>-2</sup>			
0,75	0,822	3,92 · 10 <sup>-2</sup>			
0,80	0,872	3,45 · 10 <sup>-2</sup>			

Eingeklammerte Werte vermeiden!

Werte von  $R_{20}$  gelten für

$$\rho = 1,73 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot mm^2/m$$

$$(\theta = 20^\circ C)$$

$d_{Cu}$   $\triangleq$  Durchmesser des Kupferdrahtes

$d_{CuL}$   $\triangleq$  Durchmesser des Kupferdrahtes mit Lackisolierung

$R_{20}$   $\triangleq$  Widerstand des Drahtes je 1 m bei 20°C

**Tabelle 3: Lagenisolierung**

a) Abhängigkeit der Lagenisolierung von der Lagenanzahl

$U_L < 20 V$	nach jeder 3. Drahtlage	1X Lagenisolierung
$20 V < U_L < 50 V$	nach jeder Drahtlage	1X Lagenisolierung
$U_L > 50 V$	nach jeder Drahtlage	2X Lagenisolierung

b) Stärke der Lagenisolierung in Abhängigkeit von der Drahtstärke

Drahtdurchmesser in mm	Stärke des Lackpapiers in mm	
	Sollwert	Rechenwert
$d \leq 0,2$	$1 \times 0,03$	0,05
$0,2 < d \leq 1,0$	$1 \times 0,06$	0,08
$1,0 < d \leq 1,7$	$1 \times 0,1$	0,12
$1,7 < d \leq 2,0$	$1 \times 0,2$	0,22
$d > 2,0$	$2 \times 0,2$	0,48

Grund-, Wicklungs- und Deckisolierung

Isolationsspannung $U_{is}$	Prüfspannung in kV	Isolation Lagenzahl $\times$ Stärke in mm			
		Lackpapier		Lackgewebe	
		Sollwert	Rechenwert	Sollwert	Rechenwert
$U_{is} \leq 250 V$	1,5	$2 \times 0,06$	0,16	—	—
$250 V < U_{is} \leq 750 V$	2,5	$2 \times 0,1$	0,24	$2 \times 0,1$	0,24
$750 V < U_{is} \leq 1250 V$	4,5	$3 \times 0,15$	0,5	$3 \times 0,15$	0,5
$1250 V < U_{is} \leq 2250 V$	6,0	$4 \times 0,2$	0,88	$4 \times 0,2$	0,88
$2250 V < U_{is} \leq 2900 V$	7,0	$5 \times 0,2$	1,1	$5 \times 0,2$	1,1
$2900 V < U_{is} \leq 3500 V$	8,0	$6 \times 0,2$	1,32	$4 \times 0,3$	1,32
$3500 V < U_{is} \leq 5000 V$	10	$8 \times 0,2$	1,8	$5 \times 0,3$	1,8

**Tabelle 4: Isolierschlauch**

a) Prüfspannungen von Isolierschläuchen<sup>1)</sup>

Isolierschlauchqualität	Anzahl der Isolierschläuche	Wandstärken in mm	$U_{is}$ in kV
Normalausführung	1	alle Stärken	1,5
	2		2,5
	3		3,75
Sonderausführung	1	0,25	2,25
	1	0,5	3,0
	2	0,25 + 0,5	4,5
	2	0,5 + 0,5	5,0
	3	0,25 + 0,5 + 0,5	7,0
	3	0,5 + 0,5 + 0,5	7,5

<sup>1)</sup> Isolierschlauch A, gewebehaltig, nach TGL 13 322

b) Isolierschlauchabmessungen in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser

Drahtdurchmesser in mm	1.	2.	3.	Isolierschlauch Innendurchmesser $\times$ Außendurchmesser in mm		
				von	bis	
0,03	0,4	$0,5 \times 1,0$	$1,5 \times 2,5$	$3,0 \times 4,0$		
0,42	0,75	$0,8 \times 1,3$	$1,5 \times 2,5$	$3,0 \times 4,0$		
0,8	0,95	$1,0 \times 1,5$	$2,0 \times 3,0$	$4,0 \times 5,0$		
1,0	1,45		$1,5 \times 2,5$	$3,0 \times 4,0$	$5,0 \times 6,0$	
1,5	1,9		$2,0 \times 3,0$	$4,0 \times 5,0$		
2,0	2,5		$3,0 \times 4,0$			
2,5	3,0		$4,0 \times 5,0$			

Tabelle 5: Trafokonstanten für M-Schnitte

		M 42/15	M 55/20	M 65/26	M 74/32	M 85/32	M 85/45	M 102/35	M 102/53
$P_t$	in VA	4	12	25	50	70	100	120	175
n	in $V^{-1}$	22,0	11,4	7,5	5,4	4,3	3,1	3,3	2,3
s	in $A/mm^2$	6,0	4,5	3,5	3,2	3,0	3,0	2,8	2,8
$\epsilon_r$	—	0,35	0,20	0,15	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06
$I_{aW}$	Dyn.-Bl. III in A	36	44	48	53	58	58	67	67
	Dyn.-Bl. IV in A	61	74	81	89	97	97	112	112
$V_{Fe}$	Dyn.-Bl. III in W	0,5	1,2	2,0	3,0	4,3	6,3	7,0	10,0
	Dyn.-Bl. IV in W	0,27	0,66	1,2	1,92	2,74	3,83	4,23	6,35
$V_{Cu}$	in W	1,7	2,9	4,4	6,9	7,8	8,7	11,5	13,0
$h_{w\ abs}$	in mm	7,0	8,5	10,3	12,0	11,5	11,5	13,5	13,5
$h_{w\ erf}$	in mm	6,0	7,5	8,8	10,2	9,8	9,5	11,5	11,2
$b_{w\ abs}$	in mm	26,3	33,5	38,5	44,5	49,0	49,0	61,0	61,0
$b_{w\ erf}$	in mm	22,0	29,0	33,7	39,0	43,3	43,3	54,0	54,0
$I_a$	in mm	68	90	108	126	138	164	159	194

Dyn.-Bl. III  $\times 0,5$  Dyn.-Bl. IV  $\times 0,35$ ; B  $\approx 1,2$  Vs/m<sup>2</sup> (12 000 G),  $t_a = 60^\circ C$

Tabelle 6: Trafokonstanten der EI-Typenreihe

		EI 42/14	EI 48/16	EI 54/18	EI 60/20	EI 66/22	EI 66/30	EI 78/26	EI 78/35	EI 84/28	EI 84/42	EI 92/23	EI 92/32	EI 106/32	EI 106/45
$P_t$	in VA	3,1	5,4	8,8	13,2	20	26,5	30	38	40	55	60	85	120	165
n	in $V^{-1}$	21,3	16,3	12,8	10,4	8,6	6,3	5,4	4,0	4,7	3,2	6,8	5,0	4,0	2,85
s	in $A/mm^2$	4,4	4,0	3,6	3,5	3,3	3,2	3,2	3,1	3,0	2,8	2,7	2,7	2,5	2,4
$\epsilon_r$	—	0,33	0,27	0,21	0,18	0,16	0,14	0,15	0,13	0,12	0,1	0,1	0,09	0,08	0,07
$I_{aW}$	Dyn.-Bl. III in A	33,5	38,4	43	48	53	53	68	68	74	74	85	85	96	96
	Dyn.-Bl. IV in A	59	67	76	84	92	92	124	124	134	134	155	155	174	174
$V_{Fe}$	Dyn.-Bl. III in W	0,41	0,6	0,87	1,2	1,6	2,2	3,3	4,4	4,2	6,1	3,3	4,5	6,3	8,7
	Dyn.-Bl. IV in W	0,24	0,34	0,5	0,7	0,9	1,2	1,7	2,3	2,3	3,2	1,7	2,3	3,2	4,6
$V_{Cu}$	in W	1,3	1,7	2,2	2,6	3,2	3,4	3,7	4,5	4,5	5,0	9,0	11,0	12,0	13,0
$h_{w\ abs}$	in mm	5,5	6,5	7,5	8,0	9,0	9,0	11,0	11,0	12,0	12,0	20,5	20,5	21,5	21,5
$h_{w\ erf}$	in mm	4,5	5,5	6,5	7,0	8,0	8,0	10,0	10,0	11,0	11,0	19,0	19,0	20,0	20,0
$b_{w\ abs}$	in mm	20,5	22,0	25,0	27,5	30,5	30,5	36,0	36,0	38,5	38,5	46,0	46,0	50,0	50,0
$b_{w\ erf}$	in mm	18,0	19,0	22,0	24,5	27,5	27,5	33,0	33,0	35,0	42,0	42,0	46,0	46,0	46,0
$I_a$	in mm	66	74	84	90	98	114	118	136	127	155	106	126	139	169

Blech: Arbeitsinduktion: EI 92/23 und EI 92/32 nicht mehr in TGL 3015  
 Dyn.-Blech III  $\times 0,5$  EI 42/14—EI 66/30: 1,2 Vs/m<sup>2</sup> (12 000 G) enthalten.  
 Dyn.-Blech IV  $\times 0,35$  EI 78/26—EI 106/45: 1,3 Vs/m<sup>2</sup> (13 000 G)  $t_a = 60^\circ C$

Tabelle 7: Trafokonstanten der EI-Typenreihe

		EI 130/36	EI 130/46	EI 150/40	EI 150/50	EI 150/60	EI 170/55	EI 170/65	EI 170/75	EI 195/56	EI 195/69	EI 195/84	EI 231/63	EI 231/79	EI 231/98
$P_t$	in VA	250	320	370	450	550	750	820	870	1000	1250	1500	1750	2000	2500
n	in $V^{-1}$	3,0	2,36	2,38	1,9	1,58	1,52	1,32	1,12	1,27	1,02	0,83	0,94	0,76	0,62
s	in $A/mm^2$	2,2	2,1	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,35	1,25	1,15	1,1	1,05	1,0
$\epsilon_r$	—	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,035	0,025	0,023	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016
$I_{aW}$	Dyn.-Bl. III in A	114	114	130	130	130	150	150	150	187	187	187	216	216	216
	Dyn.-Bl. IV in A	215	215	240	240	240	280	280	280	355	355	355	410	410	410
$V_{Fe}$	Dyn.-Bl. III in W	10,2	12,9	15,2	18,9	22,5	27,0	31,8	36,6	41,6	50,8	61,5	63,9	79,8	99,0
	Dyn.-Bl. IV in W	6,5	8,2	9,8	12,1	14,5	17,4	20,5	23,5	26,8	32,7	39,6	41,1	51,3	63,7
$V_{Cu}$	in W	19	19	21	20	19	29	27	25	33	30	27	35	35	35
$h_{w\ abs}$	in mm	26,5	26,5	30,5	30,5	30,5	34,5	34,5	34,5	43,0	43,0	43,0	52,0	52,0	52,0
$h_{w\ erf}$	in mm	25,5	25,0	29,0	29,0	29,0	32,5	32,5	32,5	40,5	40,5	40,5	49,5	49,5	49,5
$b_{w\ abs}$	in mm	65	65	71	71	71	86	86	86	114	114	114	132	132	132
$b_{w\ erf}$	in mm	60	60	66	66	66	81	81	81	108	108	108	124	124	124
$I_a$	in mm	160	180	181	203	225	226	248	270	252	281	314	289	324	366

Blech: Arbeitsinduktion: B = 1,3 Vs/m<sup>2</sup> (13 000 G)  
 Dyn.-Blech III  $\times 0,5$  mm  $t_a = 60^\circ C$   
 Dyn.-Blech IV  $\times 0,35$  mm



## Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (6)

Gr. Ug. 2 · Blatt 6 · DK 621.314.2

LABOR- UND BERECHNUNGSUNTERLAGEN

**Tabelle 8: Trafokonstanten der UI-Typenreihe**

		UI 30/10	UI 30/16	UI 39/13	UI 39/20	UI 48/16	UI 48/25	UI 60/20	UI 60/30	UI 75/25	UI 75/40	UI 90/30	UI 90/50	UI 102/34	UI 102/55
$P_t$	in VA	2,3	4,5	10	15	20	30	40	60	90	150	200	300	330	530
$n$	in $V^{-1}$	41,7	26,1	24,8	16,0	16,3	10,4	10,4	6,95	6,7	4,17	4,63	2,78	3,62	2,24
$s$	in $A/mm^2$	7,0	7,0	5,8	5,8	4,8	4,8	4,0	4,0	3,2	3,2	2,7	2,7	2,4	2,4
$r_{sp}$	—	0,58	0,45	0,42	0,33	0,29	0,24	0,2	0,16	0,14	0,1	0,095	0,072	0,089	0,066
$I_{sW}$	in A	79	79	91	91	103	103	120	120	142	142	165	165	180	180
$V_{Fe}$	in W	0,17	0,28	0,39	0,60	0,72	1,13	1,43	2,14	2,79	4,47	4,8	8,0	7,0	11,3
$V_{Cu}$	in W	1,7	2,2	3,6	4,3	5,2	6,2	7,9	9,2	11,8	14,2	22,0	28,3	32	36
$h_{w abs}$	in mm	3,0	3,0	4,9	4,9	5,9	5,9	7,7	7,7	9,6	9,6	11,6	11,6	12,9	12,9
$h_{w eff}$	in mm	2,6	2,6	4,2	4,2	5,0	5,0	6,8	6,8	8,2	8,2	10,3	10,0	11,4	11,0
$b_{w abs}$	in mm	27	27	36	36	45	45	56	56	70	70	85	85	95	95
$b_{w eff}$	in mm	23	23	31,5	31,5	40	40	51	51	63,5	63,5	76	76	85,5	85,5
$l_a$	in mm	49	61	63	77	75	93	93	112	118	148	138	178	160	202

Dyn.-Bl. IV  $\times$  0,35;  $B = 1,2 \text{ Vs/m}^2$  (12 000 G),  $t_a = 50^\circ\text{C}$  (UI-Reihe für Neuentwicklungen nicht mehr zugelassen)

**Tabelle 9: LL-Kern Typenreihe mit Dynamoblech III**

		LL 30/10	LL 30/16	LL 39/13	LL 39/20	LL 48/16	LL 48/25	LL 60/20	LL 60/30	LL 75/25	LL 75/40	LL 90/30	LL 90/50
$P_t$	in VA	3,8	6,4	16	19	34	45	75	92	160	210	330	400
$\tilde{B}$	in $Vs/m^2$	1,3	1,3	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,40
$n$	in $V^{-1}$	35,6	22,7	18,7	12,4	12,3	8,07	7,99	5,41	5,07	3,24	3,55	2,26
$s_p$	in $A/mm^2$	6,9	7,1	5,7	5,3	4,4	4,1	3,4	3,2	2,6	2,3	2,1	1,8
$s_a$	in $A/mm^2$	3,7	3,1	3,3	2,6	2,9	2,3	2,5	2,0	2,1	1,7	1,9	1,5
$r_{sp}$	—	0,23	0,19	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,025	0,02
$r_{sp}/1 - r_{sp}$	—	0,24	0,15	0,14	0,08	0,09	0,055	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02
$I_{sW}$	in A	119	153	153	227	173	242	190	236	221	221	186	163
$V_{Fe}$	in W	0,5	0,8	1,4	2,1	2,6	3,9	4,7	6,9	8,4	13,1	12,9	18,9
$V_{Cu}$	in W	4,2	2,8	5,0	4,1	6,3	6,1	8,3	8,2	11,5	11,6	17,6	16,5
$h_{w abs}$	in mm	3,0	3,0	4,9	4,9	5,9	5,9	7,7	7,7	9,6	9,6	11,6	11,6
$h_{p abs}$	in mm	1,1	1,1	2,1	2,1	2,6	2,6	3,5	3,5	4,6	4,6	5,8	5,8
$h_{y abs}$	in mm	1,9	1,9	2,8	2,8	3,3	3,3	4,2	4,2	5,0	5,0	5,8	5,8
$b_{w abs}$	in mm	27	27	36	36	45	45	56	56	70	70	85	85
$l_a$	in mm	49	61	63	77	75	93	93	112	118	148	138	178
Blechzahl	in St.	2 $\times$ 19	2 $\times$ 30	2 $\times$ 25	2 $\times$ 38	2 $\times$ 31	2 $\times$ 48	2 $\times$ 38	2 $\times$ 57	2 $\times$ 49	2 $\times$ 76	2 $\times$ 58	2 $\times$ 95
Jochverstärk.	in St.	4 $\times$ 3	4 $\times$ 4	4 $\times$ 3	4 $\times$ 4	4 $\times$ 3	4 $\times$ 4	4 $\times$ 4	4 $\times$ 5	4 $\times$ 6	4 $\times$ 7	4 $\times$ 6	4 $\times$ 8

Dyn.-Bl. III  $\times$  0,5 TGL 10 475; Kerne einseitig geschichtet;  $t_a = 50^\circ\text{C}$ ;  $b_{w eff} \approx 0,9 \cdot b_{w abs}$ ;  $h_{w eff} \approx 0,9 \cdot h_{w abs}$

Tabelle 10: LL-Kern Typenreihe mit Einfach-Texturblech E 0,7

		LL 30/10	LL 30/16	LL 39/13	LL 39/20	LL 48/16	LL 48/25	LL 60/20	LL 60/30	LL 75/25	LL 75/40	LL 90/30	LL 90/50
$P_L$	in VA	4,1	8,2	17,3	27,0	37,5	52,5	84	107	182	250	340	480
$\hat{B}$	in Vs/m <sup>2</sup>	1,35	1,55	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,7	1,7
$n$	in V <sup>-1</sup>	29,8	19,0	16,5	11,0	10,8	7,1	7,0	4,76	4,45	2,85	3,03	1,85
$s_p$	in A/mm <sup>2</sup>	7,0	6,9	5,9	5,3	4,6	4,1	3,6	3,2	2,8	2,5	2,3	2,0
$s_e$	in A/mm <sup>2</sup>	3,0	3,3	2,8	2,9	2,6	2,5	2,3	2,2	2,1	1,9	2,0	1,7
$\frac{s_p}{s_e}$	—	0,2	0,14	0,13	0,097	0,087	0,062	0,056	0,041	0,036	0,026	0,024	0,016
$s_p/t - s_e$	—	0,15	0,12	0,098	0,078	0,071	0,052	0,052	0,038	0,037	0,026	0,029	0,017
$l_0 w$	in A	110	195	148	260	165	270	160	265	170	250	190	260
$V_{Fe}$	in W	0,3	0,46	0,82	1,24	1,5	2,3	2,8	4,3	5,2	8,2	9,3	15,2
$V_{Cu}$	in W	4,2	4,2	5,2	5,3	7,6	6,5	8,8	8,6	11,9	11,9	17,6	18,7
$h_{w abs}$	in mm	3,0	3,0	4,9	4,9	5,9	5,9	7,7	7,7	9,6	9,6	11,6	11,6
$h_{p abs}$	in mm	1,1	1,1	2,1	2,1	2,6	2,6	3,5	3,5	4,6	4,6	5,8	5,8
$h_{s abs}$	in mm	1,9	1,9	2,8	2,8	3,3	3,3	4,2	4,2	5,0	5,0	5,8	5,8
$b_{w abs}$	in mm	27	27	36	36	45	45	56	56	70	70	85	85
$l_u$	in mm	49	61	63	77	75	93	93	112	118	148	138	178
Blechzahl	in St.	2×37	2×43	2×36	2×55	2×44	2×68	2×55	2×81	2×70	2×109	2×83	2×136
Jochverstärk.	in St.	4×3	4×4	4×4	4×6	4×4	4×6	4×6	4×7	4×8	4×10	4×8	4×11

Texturblech E 0,7 > 0,35 TGL 14342; Kerne einseitig geschichtet;  $t_0 = 50^\circ\text{C}$ ;  $b_{w\text{eff}} \approx 0,9 \cdot b_{w abs}$ ;  $b_{p\text{eff}} \approx 0,9 \cdot b_{p abs}$ 

#### 4. Bemerkungen zur Berechnung von LL-Kern-Trafos

Die LL-Typenreihe ist eine in der DDR entwickelte und patentierte Typenreihe, die aus der UI-Reihe entstanden ist. Sie ermöglicht neben der Verwendung konventioneller Trafobleche (z. B. Dyn.-Bl. III) auch die Verwendung von Texturblech mit einer magnetischen Vorzugsrichtung (Blech E 0,7), da der Blechschnitt so ausgebildet ist, daß ein großer Teil des magnetischen Kreises mit der magnetischen Vorzugsrichtung des Bleches zusammenfällt. (Vorzugsrichtung in Richtung der Trafoschenkel). Gegenüber den UI-Kern-Trafos wurde auch bereits bei Dynamoblech eine Erhöhung der übertragbaren Leistung (Typenleistung) vorgenommen, indem durch Wahl einer höheren Induktion (optimale Induktion) und Abstufung der Stromdichte in den verschiedenen Trafowicklungen entsprechend den Wärmeabfuhrverhältnissen (höhere primärseitige Stromdichte) eine günstigere Ausnutzung der Trafos erreicht wurde.

Außerdem bietet die LL-Reihe auch technologische Vorteile, insbesondere im Hinblick auf das Stopfen der Kerne, da eine gleichseitige Schichtung der Bleche (Einschieben des gesamten Blechpaketes) möglich ist. Der Einfluß des dabei entstehenden Luftspaltes wird durch Jochverstärkungsbleche (LLI-Bleche) ausgeglichen, die bei Verwendung von Texturblech außerdem noch eine Verbesserung des magnetischen Verhaltens der nicht in Vorzugsrichtung liegenden Joches des Trafokernes bewirken.

Die optimale Ausnutzung der Trafos erfordert allerdings eine wesentlich sorgfältigere Berechnung. Insbesondere kommt durch die höhere Induktion der Magnetisierungsstrom in die gleiche Größenordnung wie der durch die sekundärseitige Belastung verursachte Anteil des Primärstromes  $I_p^*$ . Das hat folgende Besonderheiten zur Folge:

a) Bei Reduzierung der sekundärseitigen Belastung

( $P_s < P_L$ ) kann die Stromdichte für die Primärwicklung nicht mehr entsprechend Gl. (47) erhöht werden, da diese Beziehung nicht die Belastung der Primärwicklung durch den Magnetisierungsstrom berücksichtigt und demzufolge nur näherungsweise für kleine Blindleistungen gilt. Die zulässige Erhöhung der primärseitigen Stromdichte ist geringer und berechnet sich nach folgender Beziehung

$$s_p' = s_p \sqrt{\frac{(P_L + V_{Cu} + V_{Fe})^2 + P_{pb}^2}{(P_s + V_{Cu} + V_{Fe})^2 + P_{pb}^2}} \approx s_p \sqrt{\frac{P_L^2 + P_{pb}^2}{P_s^2 + P_{pb}^2}}$$

wobei sich  $P_{pb}$  aus Gl. (51) ergibt.

Die sekundärseitige Stromdichte kann nach wie vor entsprechend Gl. (47) erhöht werden.

b) Für die endgültige Korrekturrechnung muß die Berechnung des primärseitigen Spannungsabfalles, zumindest bei den kleinen Trafotypen, nach den exakt geltenden Gleichungen (7), (9) und (13), die den Magnetisierungsstrom berücksichtigen, vorgenommen werden.

In den Tabellen 9 und 10 werden tabellarische Berechnungsunterlagen für die gebräuchlichsten LL-Kern-Typen (LL 30–LL 90) angegeben. Größere Typen (LL 102–LL 210) werden bisher kaum angewendet. Für LL-Kern-Trafos mit Texturblech (Tabelle 10) wurde die Arbeitsinduktion und damit die Typenleistung gegenüber den Angaben nach TGL 15 583 (Entwurf) etwas reduziert, um den Einfluß des Magnetisierungsstromes auch bei nicht voll ausgelastetem Trafo in vernünftigen Grenzen zu halten.

Ausführliche Unterlagen über Berechnung und Technische Daten von LL-Kerntrafos (Daten für verschiedene Übertemperaturen, Diagramme für die Stromdichteerhöhung bei reduzierter Sekundärleistung sowie für die Abhängigkeit des Magnetisierungsstroms von der Induktion) befinden sich in [10].



## Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (7)

Gr. Ug. 2 · Blatt 7 · DK 621.314.2

LABOR- UND BERECHNUNGSUNTERLAGEN

### 5. Berechnungsbeispiel

#### 5.1. Aufgabenstellung

Es ist ein Transformator für ein Rundfunkgerät zu berechnen, der durch eine Gleichrichterschaltung (Anodenspannungsversorgung) und Röhrenheizungen belastet wird (s. Bild 4).

Geforderte Daten:

a)  $U_p = 220 \text{ V}$

b) Gleichrichterdaten:

$U_- = 260 \text{ V}$

$I_- = 70 \text{ mA}$

$P_- = 260 \text{ V} \cdot 0,07 \text{ A} = 18,2 \text{ W}$

Ausführung der Gleichrichterschaltung: Zweiweggleichrichter mit Gleichrichterröhre EZ 80 und Ladekondensator ( $50 \mu\text{F}$ ).

c) Heizwicklungen

$U_{h2} = 6,3 \text{ V}; I_{h2} = 0,6 \text{ A}; P_{h2} = 3,8 \text{ VA}$

(Heizung Gleichrichterröhre)

$U_{h3} = 6,3 \text{ V}; I_{h3} = 2,7 \text{ A}; P_{h3} = 17,0 \text{ VA}$

(Röhrenheizung und Skalenbeleuchtung)

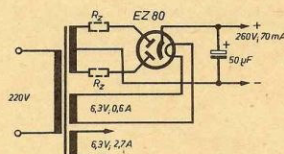


Bild 4

#### 5.2. Berechnungsgang

5.2.1. Berechnung der Wechselgrößen für die Gleichrichterschaltung

$U_{h1} \approx 0,9 U_- = 0,9 \cdot 260 \text{ V} = 235 \text{ V}$   
(je Halbwicklung)

$I_{h2} \approx 1,25 I_- = 1,25 \cdot 0,07 \text{ A} = 0,087 \text{ A}$   
(je Halbwicklung)

$P_{t\text{ ers}} \approx 1,85 P_- = 1,85 \cdot 18,2 \text{ W} = 33,5 \text{ VA}$

$P_{t\text{ r}} \approx 1,6 P_- = 1,6 \cdot 18,2 \text{ W} = 29,0 \text{ VA}$

5.2.2. Bestimmung der Trafoersatzleistung und Auswahl des Trafotyps

$P_{t\text{ ers}} = P_{t\text{ ers1}} + P_{h2} + P_{h3}$

$P_{t\text{ ers}} = 33,5 \text{ VA} + 3,8 \text{ VA} + 17,0 \text{ VA} = 54,3 \text{ VA}$

Der Trafo soll durch einen Typ der M-Reihe realisiert

werden. Entsprechend der Leistung ist der Typ M 85/32 erforderlich.

$P_t = 70 \text{ VA} > P_{t\text{ ers}}$

5.2.3. Entnahme der Trafokonstanten aus Tabelle 5

$P_t = 70 \text{ VA} \quad s = 3,0 \text{ A mm}^{-2} \quad I_0 w = 89 \text{ A} \quad V_{Ch} = 7,8 \text{ W}$   
 $n = 4,3 \text{ V}^{-1} \quad \varepsilon_G = 0,12 \quad V_{F0} = 2,74 \text{ W}$

Da  $P_t > P_{t\text{ ers}}$  ist, kann die Stromdichte entsprechend Gl. (47) erhöht werden.

$s' = s \frac{P_t}{P_{t\text{ ers}}} = 3,0 \text{ A/mm}^2 \cdot \frac{70}{54,3} = 3,85 \text{ A/mm}^2$

5.2.4. Berechnung des Primärstromes

Bestimmung der transformierten Leistung

$P_s = P_{t\text{ r}} + P_{h2} + P_{h3} = 29,0 \text{ VA} + 3,8 \text{ VA} + 17,0 \text{ VA} = 49,8 \text{ VA}$

Damit ist

$I_{yw} = \frac{P_s + V_{Ch} + V_{F0}}{U_p} = \frac{49,8 \text{ VA} + 2,74 \text{ W} + 7,8 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 0,274 \text{ A}$

Für den Blindanteil ergibt sich

$I_{pb} = \frac{I_0 w}{n U_p} = \frac{89 \text{ A}}{4,3 \text{ V}^{-1} \cdot 220 \text{ V}} = 0,094 \text{ A}$

Damit ergibt sich der Primärstrom zu

$I_p = \sqrt{I_{yw}^2 + I_{pb}^2} = \sqrt{0,274^2 + 0,094^2} \text{ A} = 0,29 \text{ A}$

5.2.5. Berechnung der Windungszahlen

$w_p = n U_p \left(1 - \frac{1}{2} \varepsilon_G\right) = 4,3 \text{ V}^{-1} \cdot 220 \text{ V} (1 - 0,06) = 890$

$w_{sr} = n U_{sr} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_G}{1 - \varepsilon_G}\right) = 4,3 \text{ V}^{-1} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,12}{0,88}\right) U_{sr} = 4,6 \text{ V}^{-1} \cdot U_{sr}$

Zuerst wird die zu der kleinsten Spannung gehörende Windungszahl berechnet, da hier zum Erreichen einer ganzzahligen Windungszahl evtl. eine Korrektur von n erforderlich ist.

$w_{h2} = w_{h3} = 4,6 \cdot 6,3 = 29$

Es ergibt sich bereits eine ganze Zahl, keine Korrektur nötig.

$w_{h1} = 4,6 \cdot 235 = 1080 \quad w_{h1\text{ ges}} = 2 \cdot 1080$

### 5.2.6. Berechnung der Drahtstärken

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot s}} = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot 3,85 \text{ A} \cdot \text{mm}^2}} = 0,574 \sqrt{\frac{I}{\text{A}}} \text{ mm}$$

Primärwicklung:	$I_p = 0,29 \text{ A}$	$d_{Cu p} = 0,32 \text{ mm}$
Sekundärwicklungen:	$I_{s1} = 0,087 \text{ A}$	$d_{Cu s1} = 0,18 \text{ mm}$
	$I_{s2} = 0,6 \text{ A}$	$d_{Cu s2} = 0,45 \text{ mm}$
	$I_{s3} = 2,7 \text{ A}$	$d_{Cu s3} = 0,95 \text{ mm}$

### 5.2.7. Wickelraumberechnungen und Aufstellung des Wickelschemas

Aus Tabelle 5 entnimmt man für den M 85/32 die Wickelraumgrößen  $h_{w \text{ eff}}$  und  $b_{w \text{ eff}}$ .

$$h_{w \text{ eff}} = 9,8 \text{ mm}; \quad b_{w \text{ eff}} = 43,3 \text{ mm}$$

Für die berechneten Kupferdrahtdurchmesser entnimmt man aus der Drahttabelle Tabelle 2 die äußeren Drahtdurchmesser  $d_{Cu \text{ al}}$ . Damit ergeben sich die Windungszahlen je Lage  $w_L$  und die Logenzahlen  $z$  für jede Wicklung:

Wicklung	w	$d_{Cu}$	$d_{Cu \text{ al}}$	$w_L = \frac{b_{w \text{ eff}}}{d_{Cu \text{ al}}}$	$z = \frac{w}{w_L}$
Primärwicklung	890	0,32	0,364	119	7,5 (8)
1. Sek.-Wickl.	2160	0,18	0,21	206	10,5 (11)
2. Sek.-Wickl.	29	0,45	0,501	86	0,34 (1)
3. Sek.-Wickl.	29	0,95	1,022	42	0,69 (1)

Damit ergibt sich zunächst folgendes Wickelschema:

Wickelschema	w in Wdg.	$d_{Cu}$ in mm	$d_{Cu \text{ al}}$ in mm	$h_{Cu}$ in mm	$h_{is}$ in mm
1. Grundisolation	$2 \times 0,1$ Lackpapier				0,24
2. Primärwicklung	0,32 Cu-Draht	890	8	24,5	2,91
Lagenisolation	$1 \times 0,06$ Lackpapier nach jeder Drahtlage				0,56
3. Zwischenisolation	$2 \times 0,1$ Lackpapier				0,24
4. 1. Sek.-Wicklung	0,18 Cu-Draht	1080	11	42,8	2,31
Lagenisolation	$1 \times 0,03$ Lackpapier nach jeder Drahtlage				0,50
5. Zwischenisolation	$2 \times 0,1$ Lackpapier				0,24
6. 2. Sek.-Wicklung	0,45 Cu-Draht	29	1		0,50
7. Zwischenisolation	$2 \times 0,1$ Lackpapier				0,24
8. 3. Sek.-Wicklung	0,95 Cu-Draht	29	1		1,02
9. Deckisolation	$2 \times 0,1$ Lackpapier				0,24

Für die gesamte Wickelhöhe ergibt sich damit

$$h_{\text{ges}} = h_{CuL} + h_{is} = 6,74 \text{ mm} + 2,26 \text{ mm} = 9,00 \text{ mm} < h_{w \text{ eff}}$$

### 5.2.8. Berechnung der mittleren Windungslängen und der Kupferwiderstände

Aus Tabelle 5 entnimmt man für den M 85/32  $l_u = 138 \text{ mm}$ . Die mittleren Windungslängen ergeben sich zu

$$l_w = l_u + 2 \cdot \pi \cdot h_{wM}$$

Für die Primärwicklung ergibt sich dann

$$h_{wM} = \text{Grundisolation} + 1/2 (\text{prim. Kupferhöhe} + \text{Lagenisolation}) = 0,24 \text{ mm} + 1/2 (2,91 \text{ mm} + 0,56 \text{ mm}) = 1,98 \text{ mm}$$

$$l_w = 138 \text{ mm} + 2 \cdot \pi \cdot 1,98 \text{ mm} = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$$

Aus Tabelle 2 entnimmt man für die Drahtstärke der Primärwicklung den auf 1 m Drahtlänge bezogenen Widerstand

$$R_{p1} = 2,16 \cdot 10^{-1} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

Damit ist der primäre Kupferwiderstand bei 20°C:

$$R_{pk} = R_{p0} \cdot w_p \cdot l_{wp} = 2,16 \cdot 10^{-1} \Omega \cdot \text{m}^{-1} \cdot 890 \cdot 0,15 \text{ m} = 28,7 \Omega$$

und der Warmwiderstand ( $t = 95^\circ \text{C}$ ):

$$R_{pw} = 1,3 \cdot R_{pk} = 1,3 \cdot 28,7 \Omega = 37,2 \Omega$$

In entsprechender Weise ergeben sich für die Sekundärwicklungen folgende Werte:

	w in Wdg.	$h_{wM}$ in mm	$l_w$ in m	$R_{p0}$ in $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$	$R_L$ in $\Omega$	$R_w$ in $\Omega$
1. Sek.-Wicklung	$2 \times 1080$	5,36	0,172	$6,8 \cdot 10^{-1}$	$2 \times 127$	$2 \times 165$
2. Sek.-Wicklung	29	7,25	0,184	$1,09 \cdot 10^{-1}$	0,58	0,76
3. Sek.-Wicklung	29	8,25	0,190	$2,44 \cdot 10^{-1}$	0,135	0,176

### 5.2.9. Korrekturrechnung für die Gleichrichterschaltung

Mit den bekannten Wicklungswiderständen könnte nun eine Berechnung der Gleichrichterschaltung nach Kammerloher [8] erfolgen. Speziell für Röhrengleichrichter werden jedoch vom Hersteller Belastungskennlinien angegeben [für EZ 80 siehe radio und fernsehen 4 (1955), H. 3, S. 90].

Zunächst ist zu klären, ob noch zusätzliche Schutzwiderstände ( $R_2$  im Bild 4) erforderlich sind. Dazu wird der sekundärseitig wirksame Trafowiderstand berechnet.

$$R_{Tr} = R_1 + \left(\frac{w_{s1}}{w_p}\right)^2 R_p$$

$$R_{Trk} = 127 \Omega + \left(\frac{1080}{890}\right)^2 28,7 \Omega = 170 \Omega$$

(Widerstand je Halbwicklung)

$$R_{Trw} = 165 \Omega + \left(\frac{1080}{890}\right)^2 37,2 \Omega = 220 \Omega$$

(Widerstand je Halbwicklung)

Für die EZ 80 ist ein  $R_{p \text{ min}} = 125 \Omega$  vorgeschrieben. Der Trafowiderstand erfüllt bereits im kalten Zustand diese Forderung, so daß keine zusätzlichen Schutzwiderstände erforderlich sind.

Aus den Belastungskennlinien für die EZ 80 entnimmt man für  $R_p = 200 \Omega$  und  $U_{Tr} = 2 \times 250 \text{ V}$  bei  $l = 70 \text{ mA}$  eine Gleichspannung  $U = 263 \text{ V}$ . Damit kann man für die gewünschte Gleichspannung von  $U = 260 \text{ V}$  die Trafospannung errechnen.

$$U_{Tr}' = \frac{260 \text{ V}}{263 \text{ V}} \cdot 250 \text{ V} = 247 \text{ V}$$

Die in den Röhrenunterlagen angegebene Trafospannung  $U_{Tr}$  ist die Leerlaufspannung. Mit  $I_{s01}$  und  $R_{Tr}$  kann man die im warmen Zustand erforderliche Klemmenspannung abschätzen.

$$U_{s1w} \approx U_{Tr} - R_{Tr} I_{s01} \approx 247 \text{ V} - 220 \Omega \cdot 0,046 \text{ A} = 237 \text{ V}$$



### 5.2.10. Korrekturrechnung für den Trafo

#### a) Sekundärseite

Mit den unter 5.2.5. berechneten Windungszahlen und den unter 5.2.8. berechneten Kupferwiderständen ergeben sich im belasteten betriebswarmen Zustand folgende Spannungen:

$$U_{s1w} = \frac{w_{s1}}{n} + I_{s02} R_{s1w} \\ = \frac{1080}{4,3} \text{ V} - 0,046 \text{ A} \cdot 165 \Omega = 242,4 \text{ V}$$

Da dieser Wert von dem geforderten ( $U_{s1w} = 237 \text{ V}$ ) abweicht, ist eine Korrektur erforderlich.

$$w_{s1 \text{ korrt}} = n (U_{s1w} + I_{s02} R_{s1w}) \\ = 4,3 \text{ V}^{-1} (237 \text{ V} + 7,6 \text{ V}) = 1050$$

(Windungszahl je Halbwicklung)

Die Kupferwiderstände für die korrigierte Windungszahl ergeben sich dann zu

$$R_{s1k} = 2 \times 124 \Omega; R_{s1w} = 2 \times 160 \Omega$$

Eine weitere Kontrollrechnung für die Klemmenspannung ergibt dann

$$U_{s1w} = \frac{1050}{4,3} \text{ V} - 0,046 \text{ A} \cdot 160 \Omega \\ = 244 \text{ V} - 7,4 \text{ V} = 236,6 \text{ V}$$

Es ergibt sich also eine gute Übereinstimmung mit dem geforderten Wert.

Für die Heizwicklungen ergibt die Kontrollrechnung

$$U_{s2w} = \frac{w_{s2}}{n} - I_{s2} \cdot R_{s2w} = \frac{29}{4,3 \text{ V}^{-1}} - 0,6 \text{ A} \cdot 0,76 \Omega = 6,34 \text{ V}$$

$$U_{s3w} = \frac{w_{s3}}{n} - I_{s3} \cdot R_{s3w} = \frac{29}{4,3 \text{ V}^{-1}} - 2,7 \text{ A} \cdot 0,176 \Omega = 6,27 \text{ V}$$

Bei den Heizwicklungen ist also keine Korrektur erforderlich. Die Notwendigkeit einer Korrektur bei den Anodenwicklungen erklärt sich daraus, daß die Drahtstärke für den Effektivwert des durch die Sekundärwicklung fließenden Gleichstromes ( $I_{s \text{ eff}} = 0,087 \text{ A}$ ) dimensioniert wurde, während der Spannungsabfall nur durch den Grundwellenanteil des Sekundärstroms ( $I_{s02} = 0,046 \text{ A}$ ) verursacht wird.

#### b) Primärseite

$$I_{p02}^* = \frac{1}{w_p} (2 \cdot I_{s02} w_{s1} + I_{s2} w_{s2} + I_{s3} w_{s3}) \\ = \frac{1}{890} (2 \cdot 0,046 \text{ A} \cdot 1050 + 0,6 \text{ A} \cdot 29 + 2,7 \text{ A} \cdot 29) \\ = 0,203 \text{ A}$$

$$I_{p0} = \frac{V_{p0}}{U_p^*} = \frac{2,74 \text{ W}}{890} 4,3 \text{ V}^{-1} = 0,013 \text{ A}$$

$$U_{p0w}^* \approx U_p - (I_{p02}^* + I_{p0}) R_{p0w} \\ \approx 220 \text{ V} - (0,203 \text{ A} + 0,013 \text{ A}) 37,2 \Omega = 211,9 \text{ V}$$

## Berechnung von Netz-Kleintransformatoren (8)

Gr. Ug. 2 · Blatt 8 und Schluß · DK 621.314.2

LABOR- UND BERECHNUNGSUNTERLAGEN

Es muß nun gelten:

$$\frac{w_p}{n} = U_{p0w}^*$$

Für den vorliegenden Fall ist aber

$$\frac{w_p}{n} = \frac{890}{4,3 \text{ V}^{-1}} = 207 \text{ V} \neq U_{p0w}^*$$

Es ist also eine Korrektur erforderlich.

$$w_{p \text{ korrt}} \approx n [U_p - R_{p0w} (I_{p02}^* + I_{p0})] = 211,9 \text{ V} \cdot 4,3 \text{ V}^{-1} \\ = 910$$

Die korrigierten Wicklungswiderstände sind dann

$$R_{pk} = \frac{28,7 \Omega}{890} 910 = 29,3 \Omega;$$

$$R_{pw} = 1,3 \cdot 29,3 \Omega = 38,0 \Omega$$

Da sich durch die Änderung von  $w_p$  der primärseitige Kupferwiderstand und die transformierten Ströme geändert haben, ist noch eine Probe sinnvoll.

$$I_{p02}^* = \frac{1}{910} (2 \cdot 0,046 \text{ A} \cdot 1050 + 0,6 \text{ A} \cdot 29 + 2,7 \text{ A} \cdot 29) \\ = 0,201 \text{ A}$$

$$I_{p0} = \frac{2,74 \text{ W}}{910} 4,3 \text{ V}^{-1} = 0,013 \text{ A}$$

$$U_{p0w}^* = 220 \text{ V} - (0,201 \text{ A} + 0,013 \text{ A}) 38,0 \Omega = 211,85 \text{ V}$$

$$\frac{w_p}{n} = \frac{910}{4,3 \text{ V}^{-1}} = 211,9 \text{ V}$$

Es besteht eine gute Übereinstimmung von  $U_{p0w}^*$  und  $w_p/n$ .

#### Endgültiges Wickelschema:

1. Grundisolation 2 × 0,1 Lackpapier
2. Prim.-Wicklung 0,32 CuL; 910 Wdg.; 119 Wdg./Lg.: 8 Lg.  
Lagenisolation 1 × 0,06 Lackpapier nach jeder Drahtlage
3. Zwischenisolation 2 × 0,1 Lackpapier
4. 1. Sek.-Wicklung 0,18 CuL; 2 × 1050 Wdg.; 206 Wdg./Lg.: 11 Lg.  
Lagenisolation 1 × 0,03 Lackpapier nach jeder Drahtlage
5. Zwischenisolation 2 × 0,1 Lackpapier
6. 2. Sek.-Wicklung 0,45 CuL; 29 Wdg.; 1 Lg.
7. Zwischenisolation 2 × 0,1 Lackpapier
8. 3. Sek.-Wicklung 0,95 CuL; 29 Wdg.; 1 Lg.
9. Deckisolation 2 × 0,1 Lackpapier

## 6. Messung der Trafogrößen – Trafoprüfung

### 6.1. Durchführung der Prüfungen

Die wichtigsten Prüfvorschriften sowie Hinweise auf die TGL-Vorschriften für Spezialtransformatoren befinden sich in [12]. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten elektrischen Prüfungen gegeben werden. Soweit nicht anders angegeben, sind die Prüfungen bei normaler Zimmertemperatur ( $20^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) durchzuführen. Die Wechselstrommessungen werden mit 50-Hz-Netzfrequenz durchgeführt.

#### 6.1.1. Prüfung der Wicklungswiderstände

Die Wicklungswiderstände werden durch Gleichstrommeßverfahren (Wheatstonesche-Brücke, Thomson-Brücke) überprüft.

Toleranzen für die Wicklungswiderstände:  $\pm 15\%$ .

#### 6.1.2. Bestimmung der Isolationswiderstände mit Gleichspannung 500 V $\pm 25$ V

Dabei müssen folgende Werte eingehalten werden:

$R_{10} > 5 \text{ M}\Omega$  zwischen Ein- und Ausgangswicklungen

$R_{10} > 2 \text{ M}\Omega$  für die anderen Isolierungen

#### 6.1.3. Wicklungsprüfung

Prüfung der Wicklungen gegeneinander und gegen Kern mit einer 50-Hz-Prüfwechselspannung, wobei die Prüfspannung nach [12] entsprechend der Nennspannung, mit der die Isolation beansprucht wird, festgelegt ist.

#### 6.1.4. Windungsprüfung

Mit dieser Prüfung soll die genügende Isolation der Windungen gegeneinander sowie der einzelnen Lagen gegeneinander nachgewiesen werden. Hierzu wird der Trafo im Leerlauf 5 min an eine Spannung von mindestens dem 2fachen Wert der Nenneingangsspannung angeschlossen, wobei die Frequenz mindestens den 2fachen Wert der Netzfrequenz haben muß. Dabei darf kein Durchschlag erfolgen (Kontrolle der Stromaufnahme).

#### 6.1.5. Leerlaufspannungsprüfung

Diese Prüfung dient zur Kontrolle der Windungszahlen. Hierzu muß möglichst genau das Leerlaufspannungsübersetzungsverhältnis

$$U_{\text{sp}} = U_p \frac{W_{\text{sp}}}{W_p}$$

gemessen werden. Die Bedingungen hierfür erkennt man aus Gl. (13). Zunächst muß  $I_{\text{sp}} \approx 0$  sein (hochohmige Spannungsmessung). Außerdem müssen  $I_0$  und  $I_{\text{Fe}}$  klein gehalten werden. Das bedeutet, daß man nicht bei Nenn-Primärspannung messen darf, da hier bereits im Sättigungsgebiet gearbeitet wird (starkes Ansteigen des Leerlaufstromes), man mißt zweckmäßigerweise bei 50% der Nennspannung. Übliche Toleranzen:  $1 \cdot \dots \cdot 2\%$ .

#### 6.1.6. Leerlaufstrom und Eisenverluste

Diese Größen werden im Leerlaufbetrieb gemessen. Es ist zweckmäßig, sie bei der Arbeitsinduktion zu ermitteln, um eine Aussage über die veranschlagten Werte zu erhalten. Da im Leerlauf der Spannungsabfall am primärseitigen Wicklungswiderstand bedeutend geringer ist, ist die Primärspannung wie folgt zu reduzieren:

$$U_{p \text{ mes}} = \sqrt{U_p^2 + (I_0 R_p)^2} = \sqrt{\left(\frac{W_p}{n}\right)^2 + (I_0 R_p)^2} \approx \frac{W_p}{n}$$

Der Magnetisierungsstrom muß, da er nicht mehr sinusförmig ist, mit einem Effektivwertmesser gemessen werden.

Die Leerlaufverluste sind mit einem Wattmeter (Leistungs-

faktor  $\cos \varphi = 0,1$ ) zu messen. Aus den Leerlaufverlusten  $V_{\text{leer}}$  ergeben sich die Eisenverluste zu

$$V_{\text{Fe}} = V_{\text{leer}} - I_0^2 R_p \quad (I_0 \hat{=} \text{gemessener Leerlaufstrom})$$

Zulässige Toleranzen: Leerlaufstrom  $+ 30\%$ .

#### 6.1.7. Bestimmung der Erwärmung

Die Erwärmung wird bei sekundärseitiger Nennbelastung bei Primär-Nennspannung und bei 1,1facher Nennspannung bestimmt. Die Gleichrichterwicklungen sind zweckmäßigerweise durch die entsprechenden Gleichrichterschaltungen zu belasten. Nach Erreichen der Endtemperatur werden Kern- und Wicklungstemperatur bestimmt.

a) Bestimmung der Kerntemperatur durch Thermometer, Temperaturfarben, Thermoelement usw.

b) Bestimmung der Wicklungstemperatur durch Messen der Wicklungswiderstände sofort nach dem Abschalten. Aus den unter 6.3. gemessenen Kaltwiderständen  $R_K$  und den Warmwiderständen  $R_w$  ergeben sich die Wicklungstemperaturen zu

$$\vartheta_w = \frac{R_w - R_K}{R_K} (235 + \vartheta_K) + \vartheta_K$$

und die Übertemperatur der Wicklung

$$\vartheta_{\text{Ü}} = \vartheta_w - \vartheta_{\text{UG}} \quad (\vartheta_{\text{UG}} \hat{=} \text{Umgebungstemperatur})$$

## Literatur

- [1] Rint: Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechnik, Bd. I, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH
- [2] Meinke/Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 1. Auflage, Springer-Verlag 1956
- [3] Feldkeller: Einführung in die Theorie der Spulen und Übertrager mit Eisenblechkernen, Hirzel-Verlag Stuttgart 1949
- [4] Kühn: Der Kleintransformator, Wintersche Verlagsbuchhandlung Füssen 1949
- [5] Hassel/Bleicher: Trafo-Handbuch, Francis-Verlag München 1951
- [6] Küchler: Die Transformatoren, Springer-Verlag 1956
- [7] Braltenbruch: Transformatoren kleiner Leistung, Wintersche Verlagsbuchhandlung Prien (Chiemsee) 1960
- [8] Kammerloher: Hochfrequenztechnik III – Gleichrichter, Wintersche Verlagsbuchhandlung Füssen 1957
- [9] TGL 3015: Kleintransformatoren, Übertrager und Drosseln – Kerngrößen für Kerne aus gestanzten Blechen
- [10] TGL 15383 (Entwurf): Transformatoren bis 6,3 kVA, 50 Hz, Bl. 1: Berechnungsverfahren, Bl. 2: Technische Daten
- [11] TGL 16559: Kriech- und Luftstrecken
- [12] TGL 200-1643: Kleintransformatoren und Drosseln, Bl. 1) Allgemeine Technische Forderungen, Lieferung, Bl. 2) Prüfung

## Berichtigungen

1. Unter Pkt. 1.2. müssen die Gl. (13) und (14) wie folgt korrigiert werden:

$$U_{\text{sp}} = \left[ \sqrt{U_p^2 - (I_0 R_p)^2} - R_p \left( \frac{1}{W_p} \sum_{\text{T}} I_{\text{sp}} W_{\text{sp}} + I_{\text{Fe}} \right) \right] \frac{W_{\text{sp}}}{W_p} - I_{\text{sp}} R_{\text{sp}} \quad (13)$$

$$U_{\text{sp}} = \left[ U_p - R_p \left( \frac{1}{W_p} \sum_{\text{T}} I_{\text{sp}} W_{\text{sp}} + I_{\text{Fe}} \right) \right] \frac{W_{\text{sp}}}{W_p} - I_{\text{sp}} R_{\text{sp}} \quad (14)$$

2. Unter Pkt. 5.2.3. wurden die Konstanten  $I_0 W$  und  $\sigma_K$  einer falschen Spalte von Tabelle 5 (M 74/32 statt M 85/32) entnommen. Dadurch ergeben sich für  $I_{\text{pH}}$ ,  $I_{\text{p}}$ ,  $W_p$ ,  $W_{\text{sp}}$  sowie für die Kupferwiderstände geringfügig andere Werte. Die richtigen Werte sind:  $I_0 W = 97 \text{ A}$ ,  $\sigma_K = 0,09$ .