

# Dimensionierung der gleichstromseitigen Drossel von Thyristorstromrichtern zur Speisung von Peltierelementen

J. Schwarz, Berlin

Mitteilung aus der Bauakademie der Deutschen Demokratischen Republik, Institut für Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik

## Formelzeichen

$E$	Thermokraft der einzelnen Elemente
$E_{ges}$	Gegenspannung
$f_w$	Welligkeitsfaktor
$f_{wrl}$	Welligkeitsfaktor für $RL$ -Last
$i$	Stromaugenblickswert
$I_{da}$	arithmetischer Mittelwert des Stromes
$I_{de}$	Effektivwert des Stromes
$\tilde{I}_{de}$	Effektivwert des Oberschwingungsgehaltes des Stromes
$I_\nu$	Effektivwert der $\nu$ -ten Oberwelle
$L$	Induktivität
$n$	Anzahl der in Reihe geschalteten Elemente
$p$	Pulszahl des Stromrichters
$R$	ohmscher Widerstand der einzelnen Elemente
$R_{ges}$	ohmscher Widerstand
$t$	Zeit
$T$	Periodendauer
$u$	Spannungsaugenblickswert
$U$	Netzennspannung
$U_{di0}$	ideelle Leerlaufgleichspannung
$U_{dia}$	ideelle Gleichspannung beim Steuerwinkel $\alpha$
$U_\nu$	Effektivwert der $\nu$ -ten Oberwelle
$w$	Effektivwertwelligkeit
$\alpha$	Steuerwinkel
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$\nu$	Zähler der Oberwellen
$\tau$	Zeitkonstante
$\varphi_\nu$	Phasenverschiebung der $\nu$ -ten Oberwelle
$\psi_\nu$	Phasenverschiebung der $\nu$ -ten Oberwelle
$\omega$	Netzkreisfrequenz

Mit einem \* gekennzeichnete Größen sind bezogene Größen.

Die steigenden Kosten für Primärenergie begünstigen die Anwendung von Wärmepumpen u.a. zur Klimatisierung von Gebäuden. Der spezifische Wärmeverbrauch sinkt, weil Energiequellen genutzt werden, die nicht die Primärenergiebilanz belasten. Gegenüber konventionellen Wärmepumpen zeigen thermoelektrische Wärmepumpen Eigenschaften, die ihre Anwendung günstig werden lassen [1].

Zur Speisung der Baugruppen aus Peltierelementen werden Gleichstromquellen benötigt. Zur Zeit werden noch oft ungesteuerte Gleichrichter mit vorgeschalteten Transformatoren eingesetzt [5]. Zur Variation des Wärmestromes ist der Einsatz von Stelltransformatoren erforderlich. Soll eine selbsttätige Leistungsregelung realisiert werden, so werden Stelltransformatoren mit Motorantrieb in Verbindung mit Dreipunktreglern

Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz ist Mitarbeiter im VEB Kombinat Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin. Diese Arbeit entstand im Auftrag der Bauakademie der DDR.

<sup>1)</sup> Voraussetzung ist eine relativ hohe zuverlässige Prüfwechselspannung für die Peltierelemente von etwa 2 kV (siehe [2]), weil betriebsmäßig die Netzspannung an den Elementen anliegt.

angewendet. Nachteilig ist die große Masse und der damit verbundene große Materialaufwand sowie der große Raumbedarf, das nichtstetige Regelverhalten (die Hysterese) und die kleine Verstellgeschwindigkeit solcher Anlagen. Kostengünstiger ist der Einsatz von direkt aus dem Netz gespeisten Thyristorstromrichtern<sup>1)</sup>. Die Anlagen werden dadurch kleiner, leichter und zuverlässiger und haben einen höheren Wirkungsgrad. Geeignete Thyristorstromrichter werden, im allgemeinen für Antriebszwecke entwickelt, von vielen Herstellern angeboten.

Zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades der Anlage darf die Effektivwertwelligkeit des Gleichstromes einen bestimmten Betrag nicht überschreiten. Dieser Wert ist vom fließenden Strom und vom Elemententyp abhängig. Typisch ist eine zulässige Welligkeit von 10% bei maximaler Stromstärke [5]. Um diesen Wert einzuhalten, muß in den Stromkreis eine Glättungsdrossel geschaltet werden.

Für die zur Speisung in Frage kommenden Stromrichterschaltungen wird im folgenden ein Verfahren zur Auslegung der Glättungsdrossel abgeleitet.

## 1. Allgemeines

### 1.1. Definitionen

Der arithmetische Mittelwert des Stromes wird durch

$$I_{da} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (1)$$

und der Effektivwert durch

$$I_{de} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2)$$

definiert. Von Interesse ist noch der Effektivwert des Oberwellengehaltes des Stromes

$$I_{de} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - I_{da}]^2 dt} \quad (3)$$

der sich auch aus (1) und (2) durch

$$\tilde{I}_{de} = \sqrt{I_{de}^2 - I_{da}^2} \quad (4)$$

berechnen läßt.

Wird der Effektivwert des Oberwellengehaltes ins Verhältnis zum arithmetischen Mittel des Stromes gesetzt, ergibt sich die Effektivwertwelligkeit

$$w = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - I_{da}]^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt} \quad (5)$$

Diese soll einen bestimmten Wert nicht überschreiten.

### 1.2. Lastbedingungen

Für die Strom-Spannungs-Kennlinie der Peltierelemente gilt

$$u = (E \Delta T + R i) n, \quad (6)$$

d.h., die Spannung setzt sich aus einem Gegenspannungsanteil und einem ohmschen Anteil zusammen. Je nach Betriebsfall liegt der Gegenspannungsanteil zwischen 0% und 50% der Gesamtspannung. Die Ersatzschaltung der Peltierelemente ist demzufolge eine Reihenschaltung einer EMK und eines Widerstandes.

### 1.3. Stromrichterspeisung

Zur Speisung von Peltierelementen kommen die Stromrichterschaltungen

- vollgesteuerte p-Pulsstromrichter ( $M p, B p$ )
- Einpulsstromrichter mit Nullventil ( $M 1 F$ )
- halbgesteuerte Einphasenbrücke ( $B 2 HZ, B 2 HF$ )
- halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil ( $B 6 HF$ )

in Frage. Die berechneten Diagramme lassen sich selbstverständlich für Schaltungen mit gleichem äußerem Betriebsverhalten genauso anwenden (siehe Abschnitt 2.).

In [3] ist ein Berechnungsverfahren zur Welligkeitsbestimmung angegeben, bei dem die Last durch eine Gegenspannung mit induktiver Strombegrenzung angenähert ist. In dem hier behandelten Fall kann der ohmsche Anteil der Last nicht vernachlässigt werden.

Weil die Drossel einen erheblichen Anteil des Preises der Stromversorgung ausmacht, muß sie so klein wie möglich gehalten werden.

### 1.3.1. Voraussetzungen und bezogene Größen

In dieser Arbeit gelten folgende Voraussetzungen:

- symmetrisches Netz ohne Oberwellen
- symmetrisch arbeitende Ansteuervorrichtung
- keine Kommutierungsreaktanzen vorhanden
- ideal leitende und sperrende Ventile
- mit Ausnahme des Lastkreises keine Resistenzen
- lineare Induktivität  $L$
- Gegenspannung  $E_{ges}$  und Widerstand  $R_{ges}$  im betrachteten Zeitraum konstant.

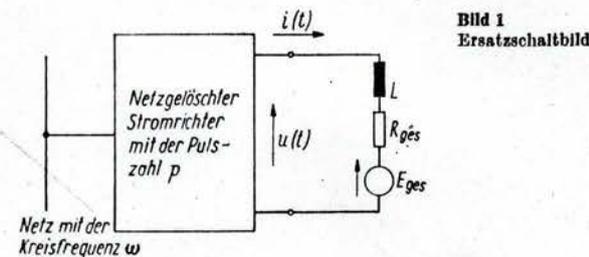


Bild 1  
Ersatzschaltbild

Bild 1 zeigt das Ersatzschaltbild der zu berechnenden Schaltung. Spannungen und Ströme werden bezogen dargestellt:

$$U^* = \frac{U}{U_{di0}} \quad (7)$$

$$I^* = \frac{I}{\frac{U_{di0}}{R}} \quad (8)$$

Die Zeitkonstante des Lastkreises sei

$$\tau = \frac{L}{R_{ges}} \quad (9)$$

### 1.3.2. Grundlagen

Nach dem Satz von FOURIER kann man jede periodische Funktion durch ein Gleichglied und eine Summe von  $m$  Sinusfunktionen mit den Frequenzen  $f, 2f, \dots, mf$  darstellen, wobei  $f = 1/T$  die reziproke Periodendauer der Funktion ist.

Die Ausgangsspannung des Stromrichters  $u(t)$  läßt sich also allgemein mit

$$u(t) = U_{di0} + \sum_{\nu=p, 2p, \dots}^{\infty} \sqrt{2} U_{\nu} \sin(\nu \omega t + \varphi_{\nu}) \quad (10)$$

ausdrücken. Für den fließenden Strom läßt sich analog

$$i(t) = I_{da} + \sum_{\nu=p, 2p, \dots}^{\infty} \sqrt{2} I_{\nu} \sin(\nu \omega t + \psi_{\nu}) \quad (11)$$

ansetzen.

Nach den in Abschn. 1.3.1. definierten Voraussetzungen (lineare Verhältnisse) ist der Superpositionssatz anwendbar, und es genügt eine Betrachtung jeder Oberwelle für sich.

## 2. FOURIER-Analyse der Spannung

Die angegebenen Formeln sind [3] entnommen und gelten nur für nichtlückenden Betrieb.

### 2.1. Vollgesteuerter p-Pulsstromrichter

Die Formeln gelten allgemein für jeden p-Pulsstromrichter, gleichgültig, welche Schaltung eingesetzt wird (Mittelpunkt- bzw. Brückenschaltung). Gl. (12) gilt nur für Mittelpunktschaltungen.

$$U_{di0} = \frac{p}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \sqrt{2} U \quad (12)$$

$$U_{di\alpha} = \cos \alpha U_{di0} \quad (13)$$

$$U_{\nu}^* = \frac{1}{p^2 - 1} \sqrt{2} (\cos^2 \alpha + p^2 \sin^2 \alpha) \quad (14)$$

Gl. (12), (13) und (14) gelten nur für  $p \neq 1$ .

### 2.2. Einpulsstromrichter mit Nullventil (H 1 F)

$$U_{di0} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \quad (15)$$

$$U_{di\alpha} = \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} U_{di0} \quad (16)$$

$$U_{\nu}^* = \frac{\sqrt{2}}{2(p^2 - 1)} \sqrt{[\cos(\nu \alpha) + \cos(\nu \alpha) \cos \alpha + \nu \sin(\nu \alpha) \sin \alpha]^2 + [\sin(\nu \alpha) \cos \alpha - \nu \cos(\nu \alpha) \sin \alpha]^2} \quad (17)$$

Für die Grundschwingung der Einpulserschaltung gilt

$$U_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} \sqrt{\sin^4 \alpha + \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha\right)^2} \quad (18)$$

### 2.3. Zweipulsstromrichter mit Nullventil

Die angegebenen Gleichungen gelten für die unsymmetrische halbgesteuerte (zweigesteuerte) Einphasenbrücke (B 2 HZ), für die halbgesteuerte symmetrische Einphasenbrücke (B 2 HF) mit Nullventil und für die Zweipulsmittelpunktschaltung mit Nullventil (M 2 F).

$$U_{di0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \quad (19)$$

$$U_{\nu}^* = \frac{\sqrt{2}}{2(p^2 - 1)} \sqrt{[1 + \cos(\nu \alpha) \cos \alpha + \nu \sin(\nu \alpha) \sin \alpha]^2 + [\sin(\nu \alpha) \cos \alpha - \nu \cos(\nu \alpha) \sin \alpha]^2} \quad (20)$$

Außerdem gilt Gl. (16),

### 2.4. Halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil (B 6 HF)

$$U_{di0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \quad (21)$$

$$U_{\nu}^* = \frac{1}{p^2 - 1} \sqrt{[-1 - (-1)^{\nu} [\cos \alpha \cos(\nu \alpha) + \nu \sin \alpha \sin(\nu \alpha)]]^2 + [\nu \sin \alpha \cos(\nu \alpha) - \cos \alpha \sin(\nu \alpha)]^2} \quad (22)$$

$$p = 3. \quad (23)$$

Gl. (16) gilt auch für die halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil.

## 3. Berechnung

Der arithmetische Mittelwert der Spannung über der Induktivität  $L$  ist Null. Damit gilt für den Gleichstromanteil

$$I_{da} = \frac{U_{di0} - E_{ges}}{R_{ges}} \quad (24)$$

Für den Effektivwert einer Oberwelle des Stromes ergibt sich

$$I_{\nu} = \frac{U_{\nu}}{\sqrt{R^2 + (\nu \omega L)^2}} \quad (25)$$

Die Phasenbeziehungen sind zur Berechnung der Welligkeit nicht signifikant.

Durch Einführung der bezogenen Größen ergibt sich

$$I_{da}^* = U_{di0}^* - E_{ges}^* \quad (26)$$

$$I_{\nu}^* = \frac{U_{\nu}^*}{\sqrt{1 + (\nu \omega \tau)^2}} \quad (27)$$

Damit wird die Welligkeit

$$w = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=p, 2p, \dots}^{\infty} \frac{U_{\nu}^{*2}}{1 + (\nu \omega \tau)^2}}}{U_{di0}^* - E_{ges}^*} \quad (28)$$

abgeleitet aus der bekannten Beziehung

$$\tilde{I}_{da} = \sqrt{\sum_{\nu=p, 2p, \dots}^{\infty} I_{\nu}^2} \quad (29)$$

Die Bilder 2 bis 8 zeigen die bezogene Welligkeit

$$w^* = \frac{\sqrt{\sum_{v=p, 2p, \dots}^{\infty} \frac{U_v^{*2}}{1 + (v \omega \tau)^2}}}{U_{di a}^*} \quad (30)$$

woraus sich die Welligkeit mit

$$w = \frac{w^*}{1 - \frac{E_{ges}^*}{U_{di a}^*}} = \frac{w^*}{1 - \frac{E_{ges}^*}{U_{di a}^*}} \quad (31)$$

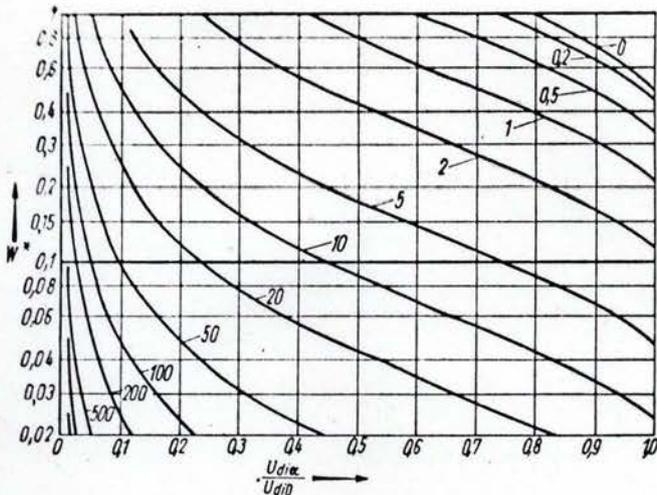
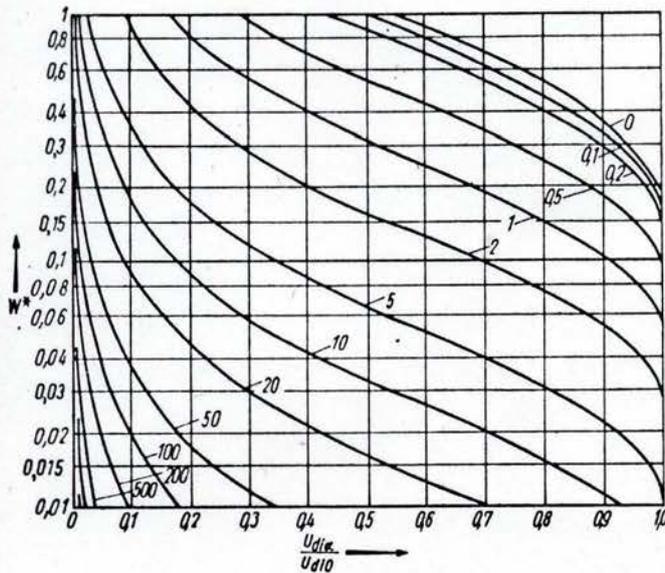


Bild 2. Bezogene Welligkeit des Zweipulsstromrichters (Parameter:  $\omega \tau$ )

Bild 3. Bezogene Welligkeit des Dreipulsstromrichters (Parameter:  $\omega \tau$ )



berechnen läßt.  $w^*$  wurde mit Hilfe des in Tafel 1 dargestellten EDV-Programmes berechnet.

Ist  $p \omega \tau \gg 1$ , dann gilt näherungsweise

$$w \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=p, 2p, 3p, \dots}^{\infty} \frac{U_v^{*2}}{v^2}}}{\omega \tau (U_{di a}^* - E_{ges}^*)} \quad (32)$$

Aus [3] entnommen ist Bild 9, das den Welligkeitsfaktor

$$f_w = \sqrt{\sum_{v=p, 2p, \dots}^{\infty} \frac{U_v^{*2}}{v^2}} \quad (33)$$

zeigt. Daraus läßt sich dann

$$w \approx \frac{f_w U_{di 0}}{\omega \tau (U_{di a} - E_{ges})} \quad (34)$$

ermitteln.

Bequemer zu handhaben ist der Faktor

$$f_{wrt} = \frac{\sqrt{\sum_{v=p, 2p, \dots}^{\infty} \frac{U_v^{*2}}{v^2}}}{U_{di a}^*} \quad (35)$$

der im Bild 10 dargestellt ist und die Berechnung von  $w$  mit

$$w \approx \frac{f_{wrt}}{\omega \tau \left(1 - \frac{E_{ges}^*}{U_{di a}^*}\right)} \quad (36)$$

gestattet.

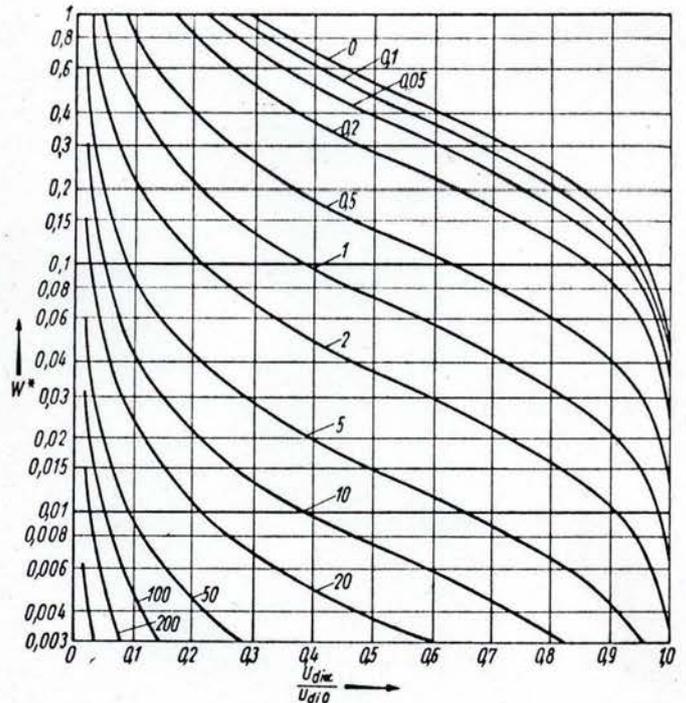
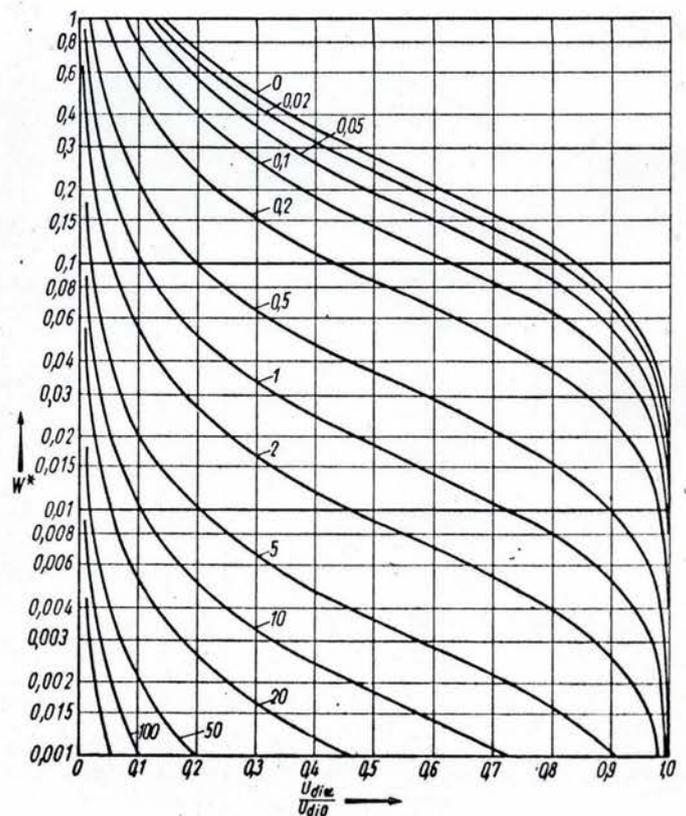


Bild 4. Bezogene Welligkeit des Sechspulsstromrichters (Parameter:  $\omega \tau$ )

Bild 5. Bezogene Welligkeit des Zwölfpulsstromrichters (Parameter:  $\omega \tau$ )



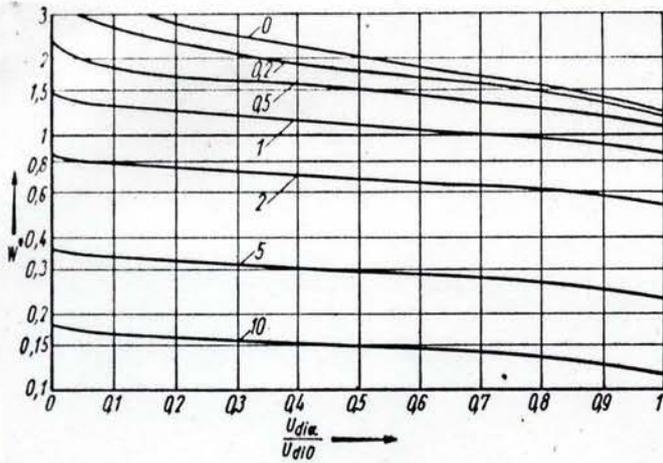


Bild 6. Bezogene Welligkeit des Einpulsstromrichters mit Nullventil M 1 F (Parameter:  $\omega\tau$ )

Bild 7. Bezogene Welligkeit des Zweipulsstromrichters mit Nullventil B 2 H 7 (Parameter:  $\omega\tau$ )

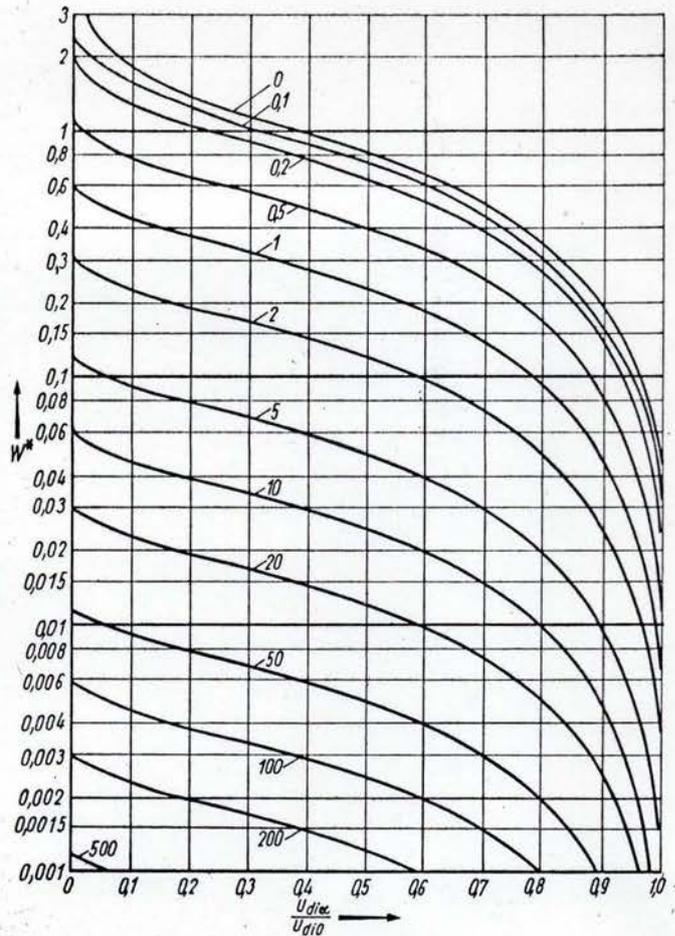
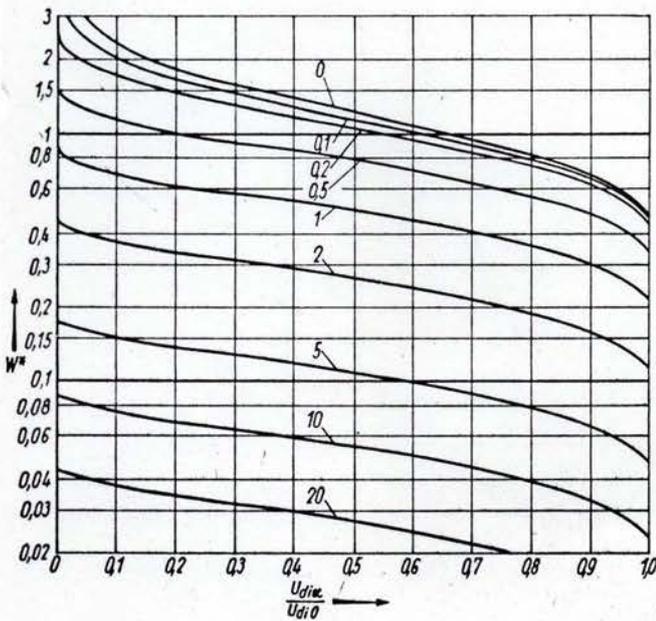


Bild 8 (r. u.). Bezogene Welligkeit der halbgesteuerten Drehstrombrückenschaltung mit Nullventil B 6 HF (Parameter:  $\omega\tau$ )

Tafel 2. Berechnungsbeispiel

Technische Daten des Stromrichters

Schaltung: B 6 HF

Netzspannung: 380 V verkettelt

Ideelle Leerlaufgleichspannung:  $U_{di0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U = 513 \text{ V}$

Netzfrequenz: 50 Hz, daraus  $\omega = 100 \cdot \pi \cdot 1/s = 314 \cdot 1/s$

Technische Daten der Peltierelemente

Thermokraft  $E = 4 \cdot 10^{-4} \text{ V/K}$

Widerstand  $R = 2,4 \text{ m}\Omega$

Temperaturdifferenz  $\Delta T = 80 \text{ K}$

Strom  $I_{da} = 40 \text{ A}$

in Reihe geschaltete Elemente  $n = 3750$

Gesamtspannung  $U_{ges} = (E \Delta T + RI) n = 480 \text{ V}$

Rechnung

Gesamtwiderstand  $R_{ges} = n R = 9 \Omega$

bezogene Gegenspannung  $\frac{E_{ges}}{U_{dia}} = \frac{E \Delta T}{E \Delta T + RI} = 0,25$

bezogene Gleichspannung  $\frac{U_{dia}}{U_{di0}} = 0,935$

Glättungsdrossel  $L = 14,3 \text{ mH}$ , daraus  $\omega\tau = \frac{\omega L}{R_{ges}} = 0,5$

aus Bild 8:  $w^* = 0,055$ ,

daraus mit (31)  $w = \frac{w^*}{1 - \frac{E_{ges}}{U_{dia}}} = 0,0733$

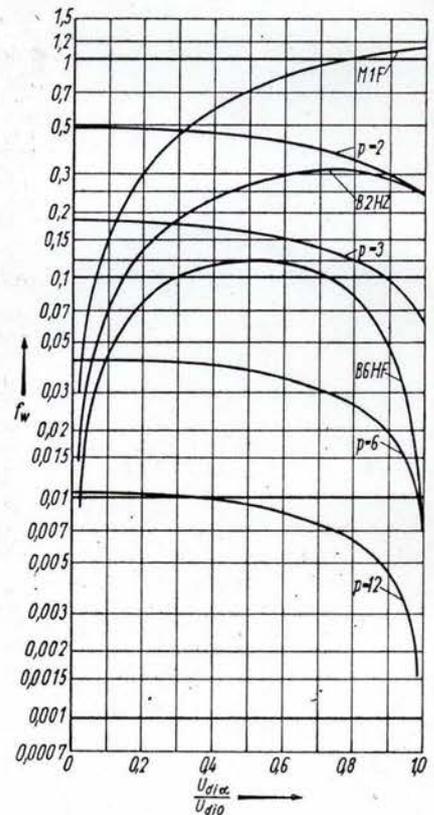


Bild 9 (r. u.) Welligkeitsfaktor für netzgelöschte Stromrichter

Der Fehler in der Rechnung mit (34) und (36) liegt unter 5%, wenn  $p \omega\tau \geq 3$ , und unter 0,5%, wenn  $p \omega\tau \geq 10$  ist. Lückender Betrieb läßt sich für eine Welligkeit  $w \geq 0,4$  ausschließen, Ist die berechnete Welligkeit größer, ist das Ergebnis

Tafel 1. ALGOL 60-Programm zur Berechnung der Welligkeit bei ohmsch-induktiver Last mit Hilfe der Fourierreihenzerlegung von Spannung und Strom

```

comment Welligkeitsberechnung bei ohmsch-induktiver Last;
begin real alpha, ap, l, omtau, p, pl, s2, s3, uda, uda0, ude, w, x, y, z;
integer k, m, n, q, r;
array uny [1:4000];
real procedure ua0 (n);
integer n;
begin real x;
if n <= 2 then p := n + 1;
if n = 3 then p := 6;
if n = 4 then p := 12;
if n >= 5 then p := n - 4;
if n <= 4 then x := p * s2/pi * sin (pi/p);
if n >= 5 then x := p * s2/pi;
end;
end;
procedure druck (u);
integer u;
begin format ('12');
if u = 5 then print ('?? Vollgesteuerter Stromrichter p = ', p);
if u = 5 then print ('?? Einpulsstromrichter mit Nullventil');
if u = 6 then print ('?? Zweipulsstromrichter mit Nullventil');
if u = 7 then print ('?? Halbgesteuerte Drehstrombruecke mit Nullventil');
line (1);
end;
real procedure al (ua, n);
real ua;
integer n;
begin if ua >= 1 sqrt 2 * ua - 1 >= 1 then
begin alpha := 0;
goto mp 1;
end;
alpha := if n <= 4 then arccos (ua) else arccos (2 * ua - 1);
mp 1: alpha := alpha * 180/pi;
end;
real procedure uo (n, alpha, ny);
integer n;
real alpha, ny;
begin real x;
if n <= 4 then x := sqrt (2 * (cos (alpha) + 2 + (ny * sin (alpha) + 2)) /
(ny + 2 - 1));
if n = 5 sqrt n = 6 then
begin if n = 5 ^ ny = 1 then x := 0.25 * s2 * sqrt (sin (alpha) + 4
+ (pi - alpha + 0.5 * sin (2 * alpha) + 2)
else x := sqrt (2 * ((cos (ny * pi)
+ cos (ny * alpha) * cos (alpha) + ny
* sin (ny * alpha) *
sin (alpha) + 2 + (sin (ny * alpha)
* cos (alpha) - ny * cos (ny * alpha) *
sin (alpha) + 2)) / (2 * (ny + 2 - 1));
end;
if n = 7 then x := sqrt ((- 1 - cos (ny * pi) * cos (alpha)
* cos (ny * alpha) + ny * sin (alpha)
* sin (ny * alpha)) + 2 + (ny * sin (alpha)
* cos (ny * alpha) - cos (alpha)
* sin (ny * alpha) + 2)) / (s2 * (ny + 2 - 1));
uo := x;
end;
s2 := sqrt (2);
s3 := sqrt (3);
pi := 3.141592654;
for n := 1 step 1 until 7 do
begin uda0 := ua0 (n);
druck (n);
format ('? 0.12 --- 0.123456 --- 12345.67 --- 0.123456');
print ('? uda udeu omtau w?');
for uda := 0.05 step 0.05 until 1.02 do
begin ap := al (uda, n);
if n = 7 ^ alpha <= 10 - 5 then l := 6 else l := p;
y := 0;
w := 1;
for k := 1 step 1 until 4000 do
begin uny [k] := z := uo (n, alpha, k * l) + 2;
y := y + z;
if z/y <= 10 - 5 ^ w/y <= 10 - 5 then goto m 2;
end;
k := 4000;
m 2: ude := sqrt (y);
for q := 4 step - 1 until - 3 do
for r := 5, 2, 1 do
begin omtau := r * 10 + q;
x := 0;
if omtau < 8 10 - 3 then omtau := 0;
if omtau > 15000 then goto m 3;
for m := 1 step 1 until k do x := x + uny [m] /
(1 + (omtau * l * m) + 2);
w := sqrt (x) / uda;
print (uda, ude, omtau, w);
if omtau < 8 10 - 3 sqrt w > 3 then goto m 4;
m 3: end;
m 4: line (1);
end;
end;
end;
end;

```

Bemerkung: Das Progrm wurde auf der Digitalrechenanlage Odra 1204 in der Programmiersprache ALGOL 1204 gerechnet.

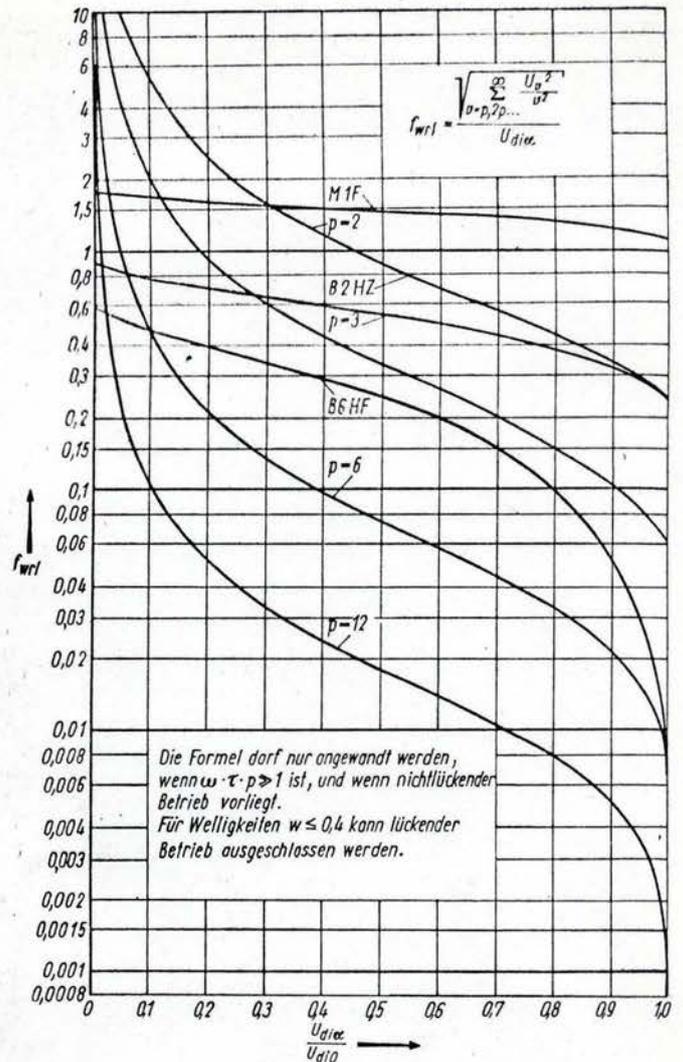


Bild 10. Welligkeitsfaktor für ohmsch-induktive Last für netzgelöschte Stromrichter

u.U. fehlerbehaftet. Der berechnete Wert ist im lückenden Betrieb größer als der wahre Wert.<sup>2)</sup>

Tafel 2 zeigt ein Rechenbeispiel.

#### 4. Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt ein Verfahren zur Drosseldimensionierung bei Stromrichterspeisung einer Last aus Gegenspannung mit ohmsch-induktiver Strombegrenzung im nichtlückenden Betrieb. Es ermöglicht eine optimale Auslegung der Glättungs-drossel zur Speisung von Peltierelementen aus netzgelöschten Stromrichtern.

EA 7578

#### Literatur

- [1] Scheel, H.: Entwicklungsstand und Einsatzmöglichkeiten der thermoelektrischen Wärmepumpe. Stadt- und Gebäudetechnik 29 (1975) H. 11, S. 321 und H. 12, S. 379.
- [2] Naumann, W.: Normung der Nennstehspannungen für Niederspannungsbetriebsmittel und -anlagen. XIX. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TH Ilmenau (1974) H. 1, S. 153.
- [3] Schwarz, J.: Parameter netzgelöschter Stromrichter im nichtlückenden Betrieb. Zeitschrift für elektrische Informations- und Energietechnik Leipzig 6 (1976) Teil I H. 5, S. 385 und Teil II H. 6, S. 481.
- [4] Wasserrab, Th.: Schaltungslehre der Stromrichtertechnik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1962, S. 318.
- [5] Thermoelektrische Kühlelemente. Prospekt des VEB Röhrenwerk „Anna Seghers“ Neuhaus am Rennweg (Ausgabe 1970).

<sup>2)</sup> Für den p-Pulsstromrichter läßt sich nach [4] mit

$$I_{da}^* = \frac{\pi}{p} \frac{\coth \frac{\pi}{p \omega \tau} - \omega \tau \cot \frac{\pi}{p}}{1 + (\omega \tau)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{U_{dia}}{U_{dio}}\right)^2} + \left[1 - \frac{\pi}{p} \frac{\cot \frac{\pi}{p} + \omega \tau \coth \frac{\pi}{p \omega \tau}}{1 + (\omega \tau)^2}\right] \frac{U_{dia}}{U_{dio}}$$

der Strom an der Lückgrenze exakt berechnen.