

## Das System „Netzgelöschter Stromrichter — Glättungsdrossel — Gleichstrommaschine“ im lückenden Betrieb

### Teil II

Von J. Schwarz<sup>1</sup>

Mit 18 Abbildungen, 3 Tabellen und 3 ALGOL 60-Unterprogrammen

(Eingegangen am 30. April 1976)

Im Teil I wurden ausgehend von der Zielvorstellung der Ermittlung eines „Induktivitätsfaktors“ (Abschnitt 1) die Strom-Spannungs-Beziehungen in den verschiedenen Arbeitsbereichen der Stromrichterschaltungen abgeleitet. Die folgenden Abschnitte behandeln die Auswertung der ermittelten Gleichungen, die Umsetzung in die Rechenprogramme und vier charakteristische Beispiele.

### 3. Bestimmung der Induktivität der Glättungsdrossel

Es soll der Faktor  $K = f(w)$  und  $K = f(\dot{w})$  für die gebräuchlichsten Stromrichterschaltungen berechnet und graphisch dargestellt werden.

#### 3.1. $K$ im nichtlückenden Bereich

Die Faktoren  $f_w$  und  $f_e$  können als Funktion der Gegenspannung [1] entnommen werden. Für ausgewählte Werte der Gegenspannung sind die Gln. (1.12) und (1.13) in den Abb. 8–21 dargestellt. Der Bereich des lückenden Stromes ist vom Bereich des nichtlückenden Stromes durch eine gekennzeichnete Linie abgetrennt.

#### 3.2. $K$ im lückenden Bereich

Tab. 1 zeigt die interessierenden Faktoren der Stromrichterschaltungen.

Tabelle 1. Faktoren zur Berechnung von  $K$

Schaltung	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 6$	$p = 12$	M1F	B2HF	B6HF
$\frac{U_{di0}}{U}$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$	$\frac{3\sqrt{6}}{2\pi}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi}$	$\frac{12}{\pi} \sqrt{1 - \frac{1}{2}\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi}$
$q$	$\pi$	$\pi$	$\frac{2\pi}{\sqrt{3}}$	$2\pi$	$\frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{3}\right)}}$	$\pi$	$\pi$	$\pi$

<sup>1</sup> Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz, DDR-1017 Berlin, Koppenstraße 66.

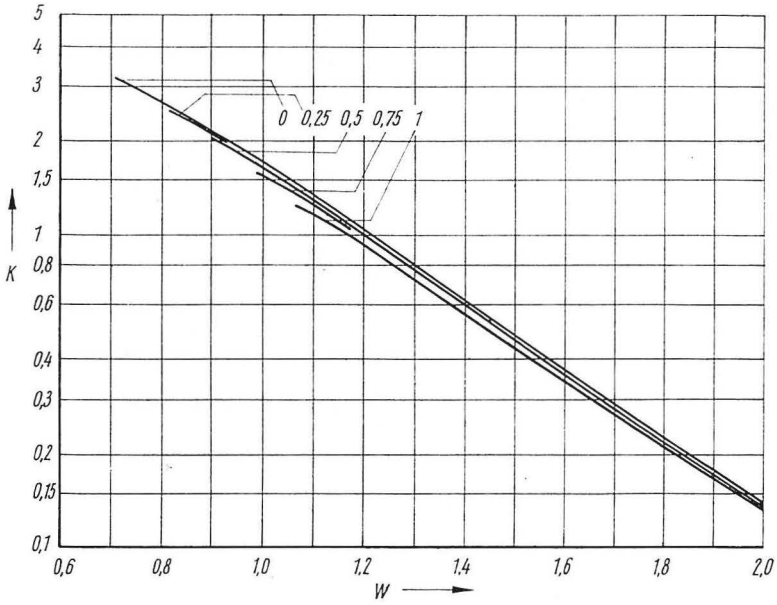


Abb. 8. Induktivitätsfaktor Einpulsstromrichter (Parameter:  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}$ )

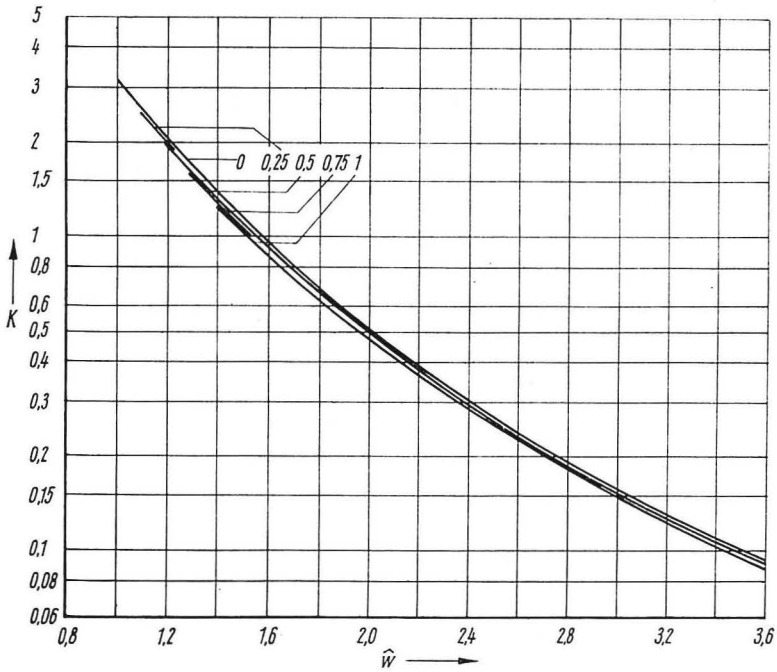


Abb. 9. Induktivitätsfaktor Einpulsstromrichter (Parameter:  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}$ )

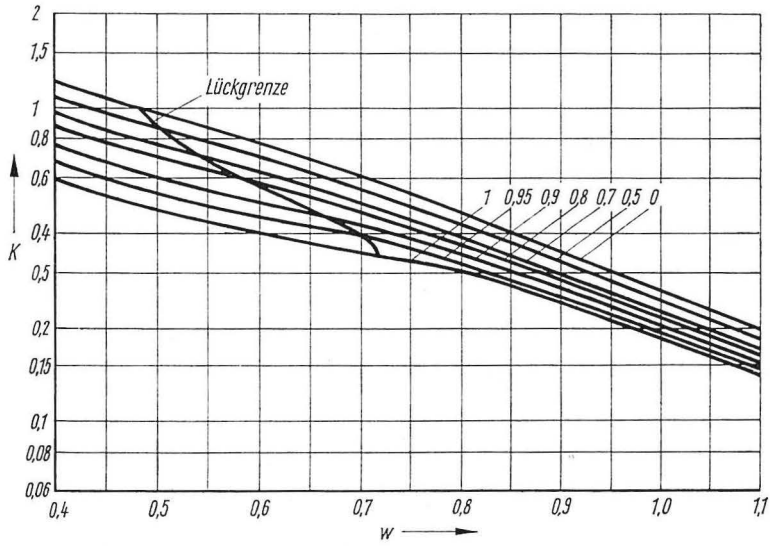


Abb. 10. Induktivitätsfaktor Zweipulsstromrichter (Parameter:  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{dio}}$ )

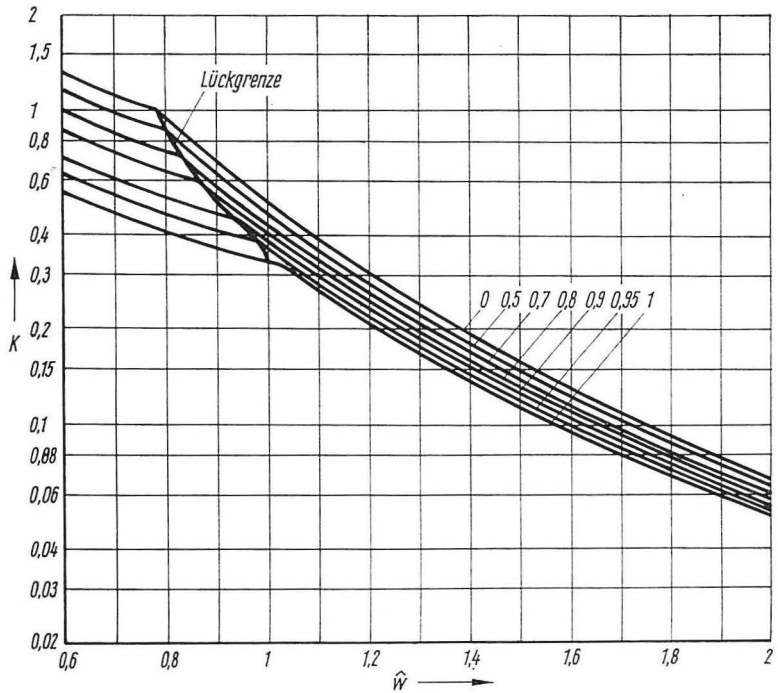


Abb. 11. Induktivitätsfaktor Zweipulsstromrichter (Parameter:  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{dio}}$ )

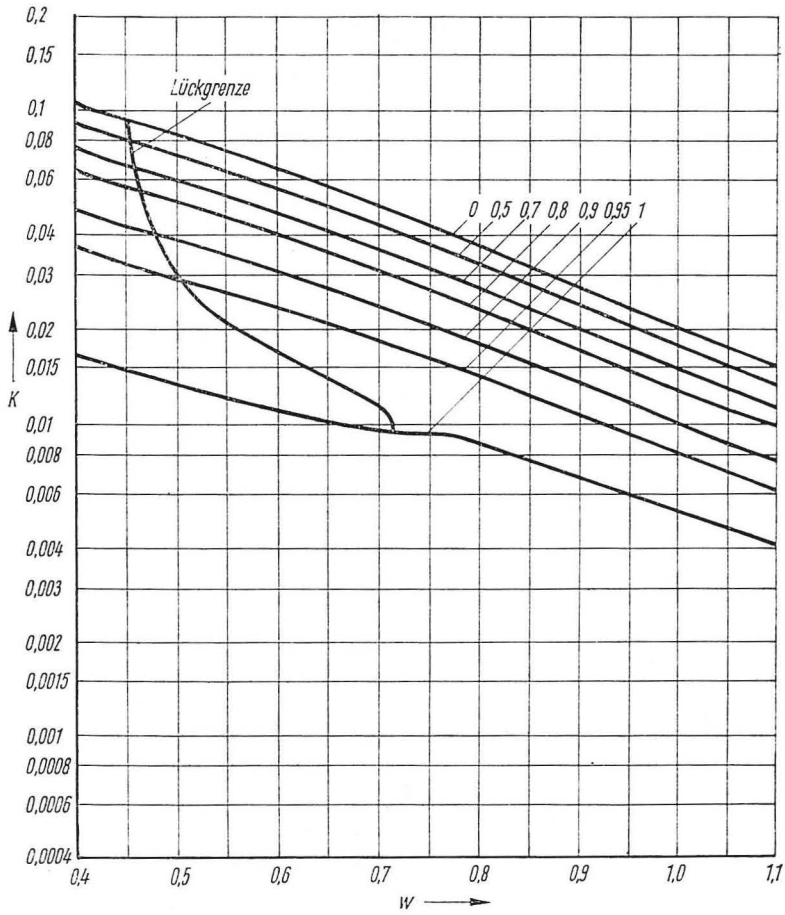


Abb. 12. Induktivitätsfaktor Sechspulsstromrichter (Parameter:  $\frac{U_{diX}}{U_{di0}}$ )

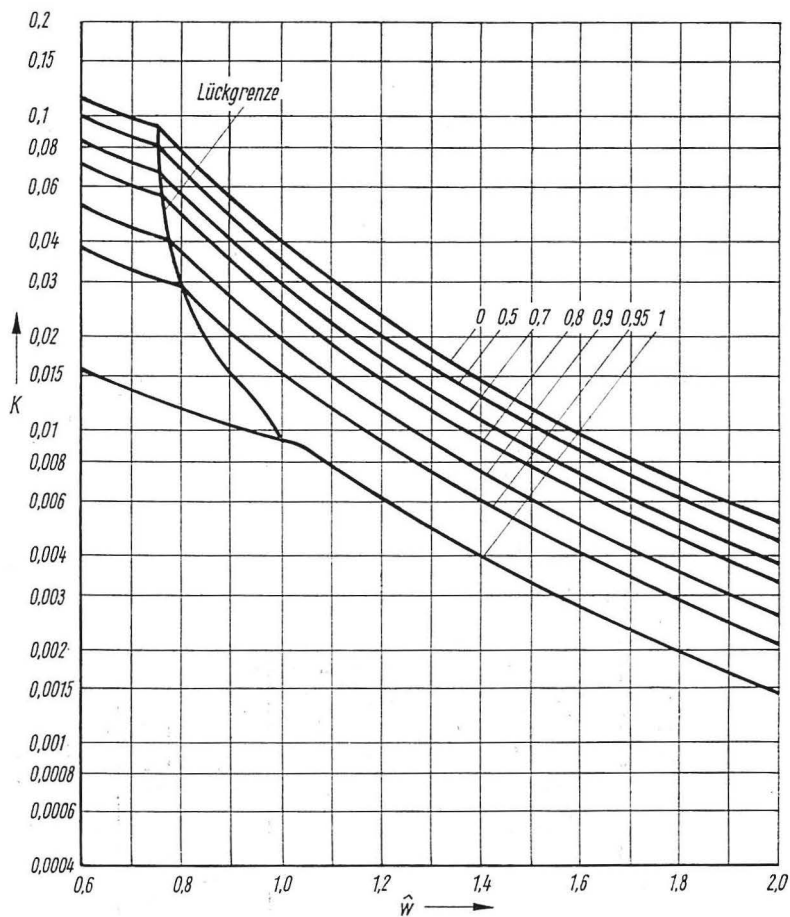


Abb. 13. Induktivitätsfaktor Sechspulsstromrichter (Parameter:  $\frac{U_{dix}}{U_{dio}}$ )

Allgemein gilt für die vollgesteuerten Schaltungen in Mittelpunktschaltung nach [2]

$$U_{di0} = U \sqrt{2} \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p}. \tag{3.1}$$

Zusammengefaßt mit (1.14) und (1.15) ergibt sich

$$K = \frac{\pi}{\sin \frac{\pi}{p}} I_{da}^* \tag{3.2}$$

bzw.

$$q = \frac{\pi}{\sin \frac{\pi}{p}}, \tag{3.3}$$

wobei für  $I_{da}^*$  der Strom des Einpulsstromrichters einzusetzen ist (nur eine Stromflußphase  $\beta$  bezogen auf  $2\pi$ ). Die Abb. 8–21 sind mit den in Abschnitt 4. beschriebenen Rechenprogrammen berechnet worden.

#### 4. Rechenprogramme

Auf der Grundlage der Abschnitte 3. und 4. wurden drei Rechenprogramme erarbeitet, die zur Ermittlung der Induktivitätsfaktoren verwendet wurden.

Bestandteil aller drei Programme (in den Programmen 1 und 2 direkt enthalten, im Programm 3 Bestandteil des Unterprogrammes B 6 HF) sind die Unterprogramme

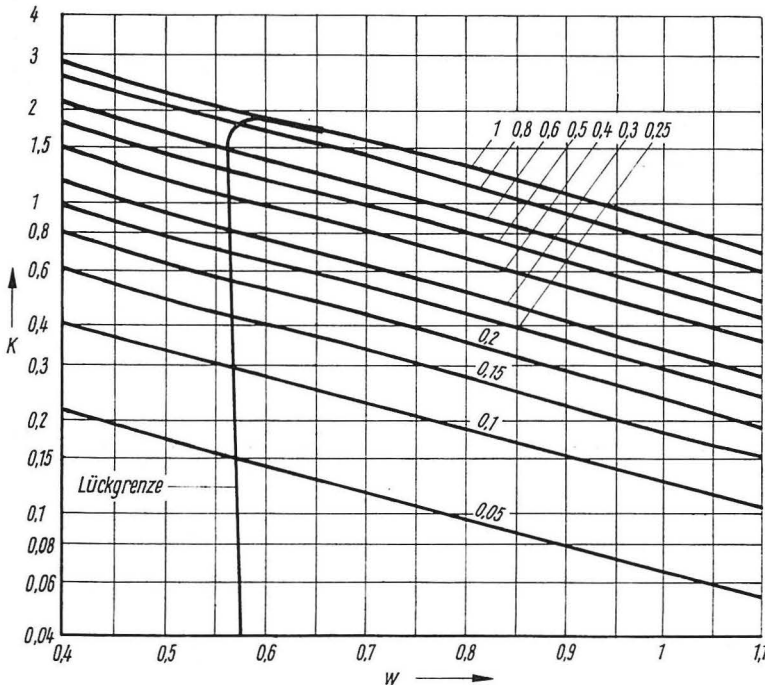


Abb. 14. Induktivitätsfaktor Einpulsstromrichter mit Nullventil (Parameter:  $\frac{U_{di0}}{U_{di0}}$ )

*int* und *reg*. Mit der **real procedure** *reg* erfolgt die numerische Ermittlung der Lösung der nicht explizit ausdrückbaren Gleichungen nach der Methode der *regula falsi*. Zur Berechnung der Mittelwerte der Ströme erfolgt die Bildung der Integrale mittels der **procedure** *int*, welche gleichzeitig das Integral

$$ia := \int_a^b f(x) dx \quad (4.1)$$

und das Integral

$$ie := \int_a^b f^2(x) dx \quad (4.2)$$

nach *Simpson* ermittelt. Die Prozedur arbeitet mit einer festen Anzahl von Schritten (100) ohne Kontrolle der zu erwartenden Fehler. Selbstverständlich lassen sich für *reg* und *int* auch leistungsfähigere Unterprogramme einsetzen.

#### 4.1. Vollgesteuerte Schaltungen

Nach Vorgabe von  $p$  erfolgt die Berechnung der ideellen Leerlaufspannung  $U_{di0}$ . Der Ausgangsspannungsbereich wird in 20 gleiche Teile unterteilt. Ist  $p = 1$ , so erfolgt die Ermittlung der maximalen Leitdauer aus (2.3), sonst ist die maximale Leitdauer

$$\beta_{\max} = \frac{2\pi}{p}. \quad (4.3)$$

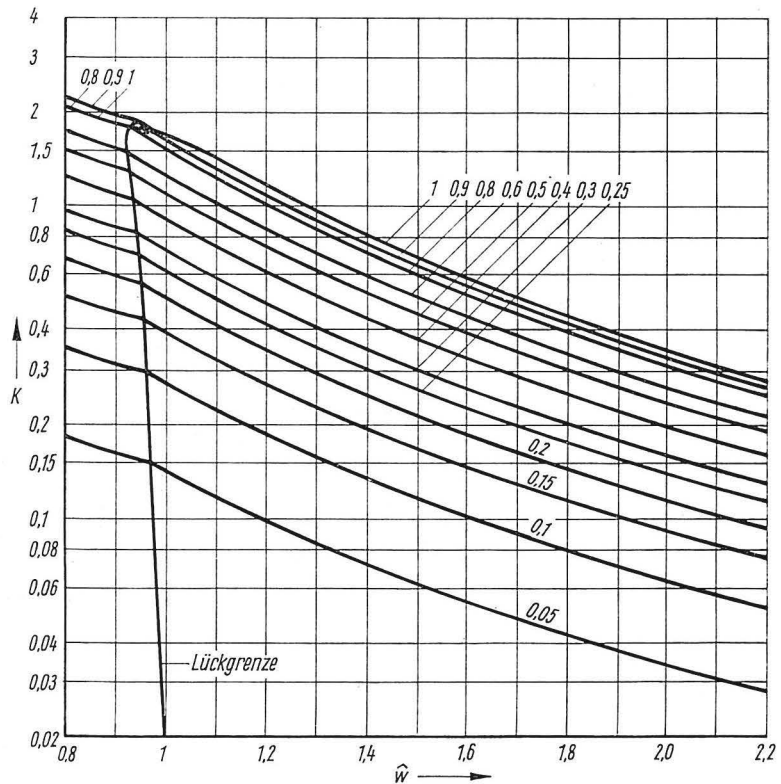


Abb. 15. Induktivitätsfaktor Einpulsstromrichter mit Nullventil (Parameter:  $\frac{U_{di\kappa}}{U_{di0}}$ )

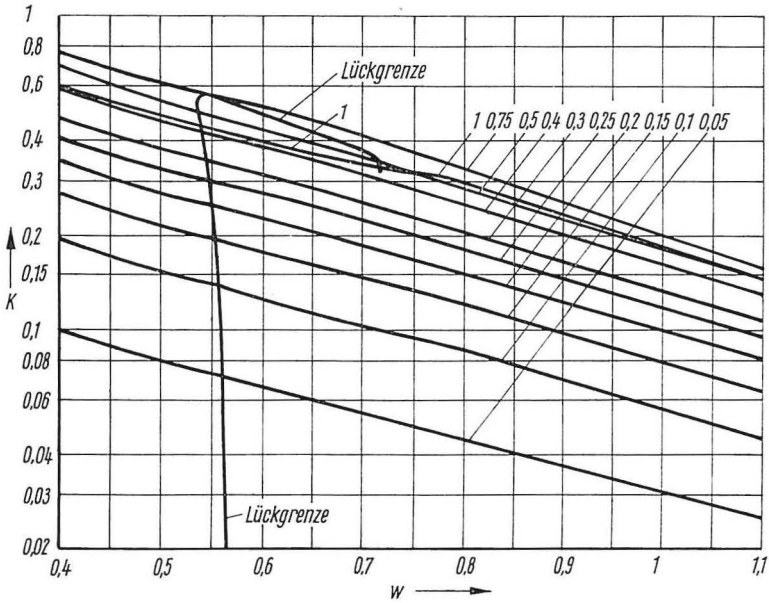


Abb. 16. Induktivitätsfaktor Einphasenbrückenschaltung mit Nullventil (Parameter:  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}$ )

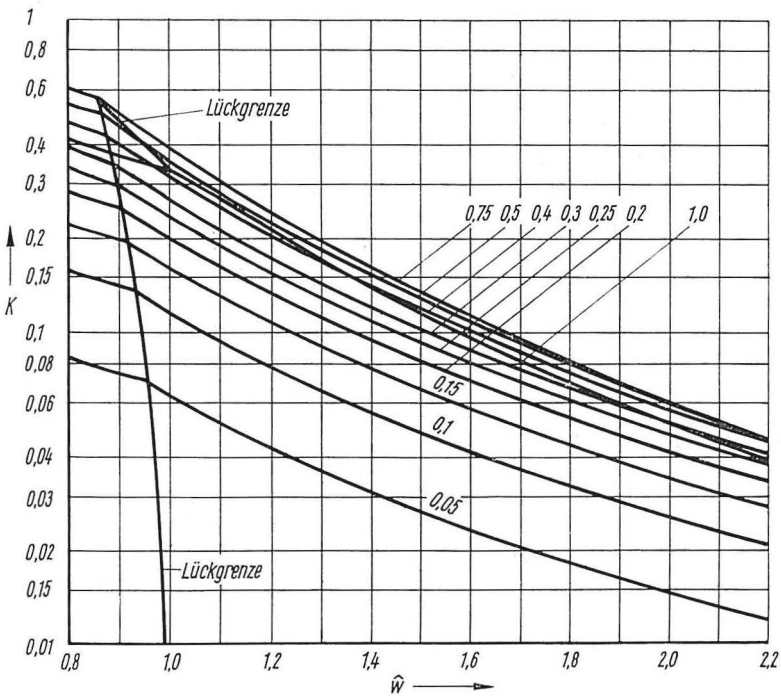


Abb. 17. Induktivitätsfaktor Einphasenbrückenschaltung mit Nullventil (Parameter:  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}$ )



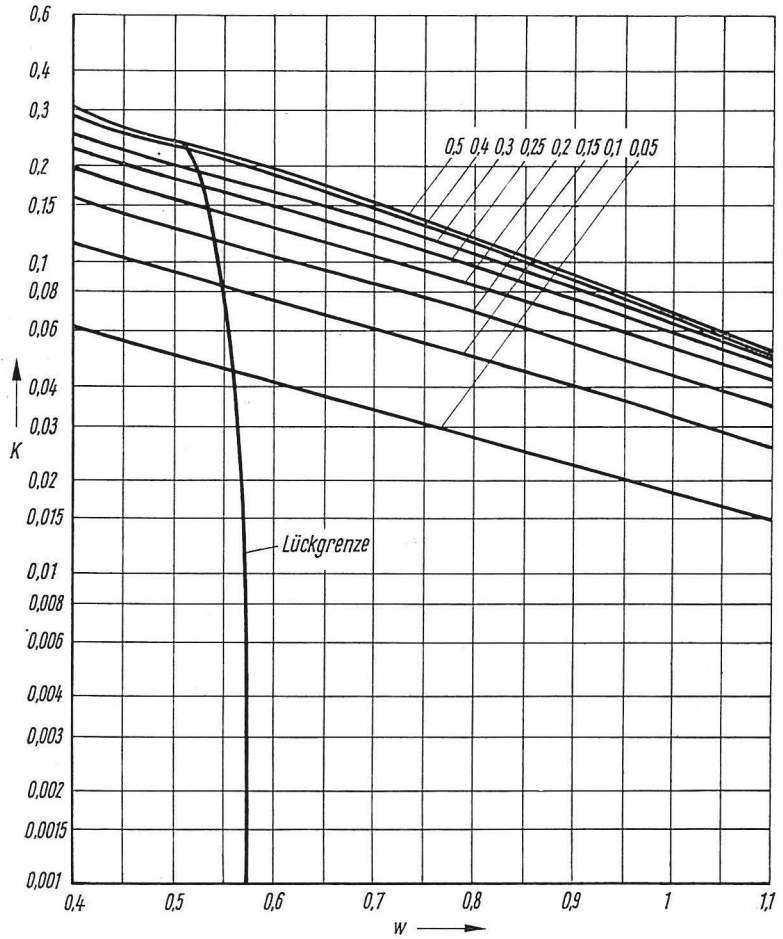


Abb. 18. Induktivitätsfaktor halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil für

$$\frac{U_{diX}}{U_{di0}} \leq 0,5 \quad \left( \text{Parameter: } \frac{U_{diX}}{U_{di0}} \right)$$

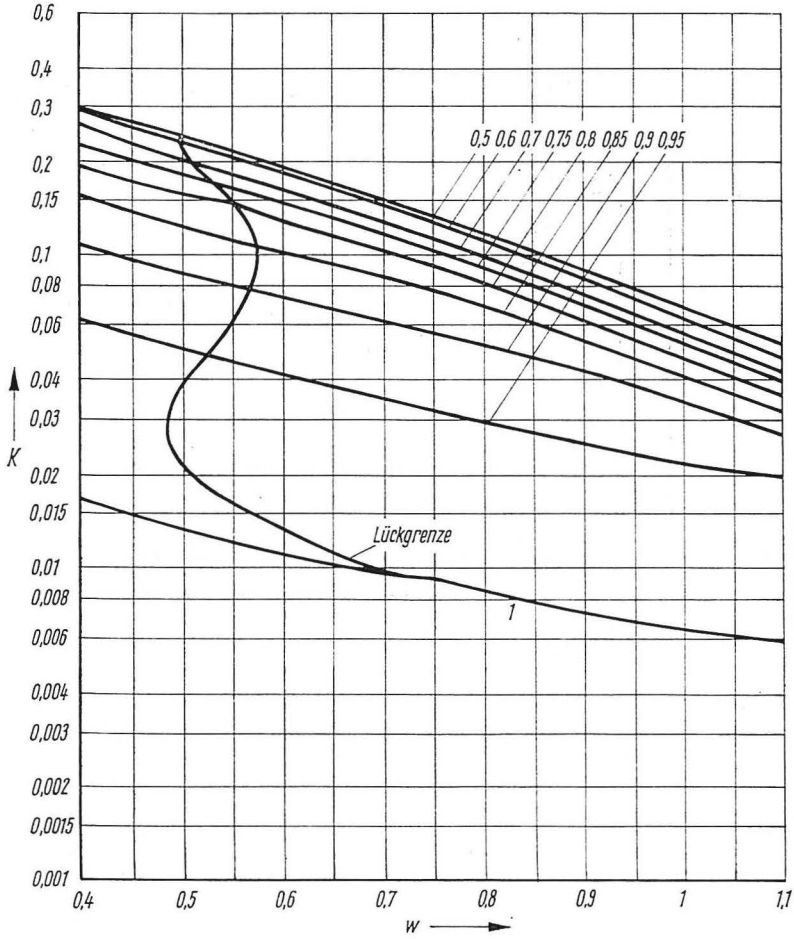


Abb. 19. Induktivitätsfaktor halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil für  $\frac{U_{diX}}{U_{di0}} \geq 0,5$  (Parameter:  $\frac{U_{diX}}{U_{di0}}$ )

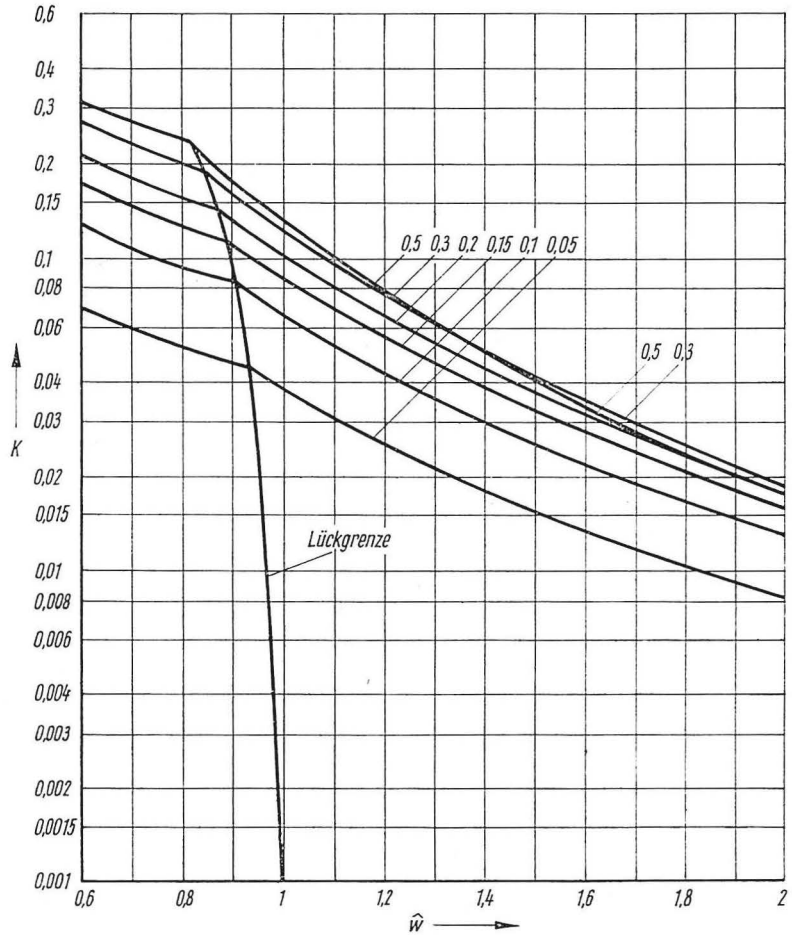


Abb. 20. Induktivitätsfaktor halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil für

$$\frac{U_{diX}}{U_{di0}} \leq 0,5 \quad \left( \text{Parameter: } \frac{U_{diX}}{U_{di0}} \right)$$

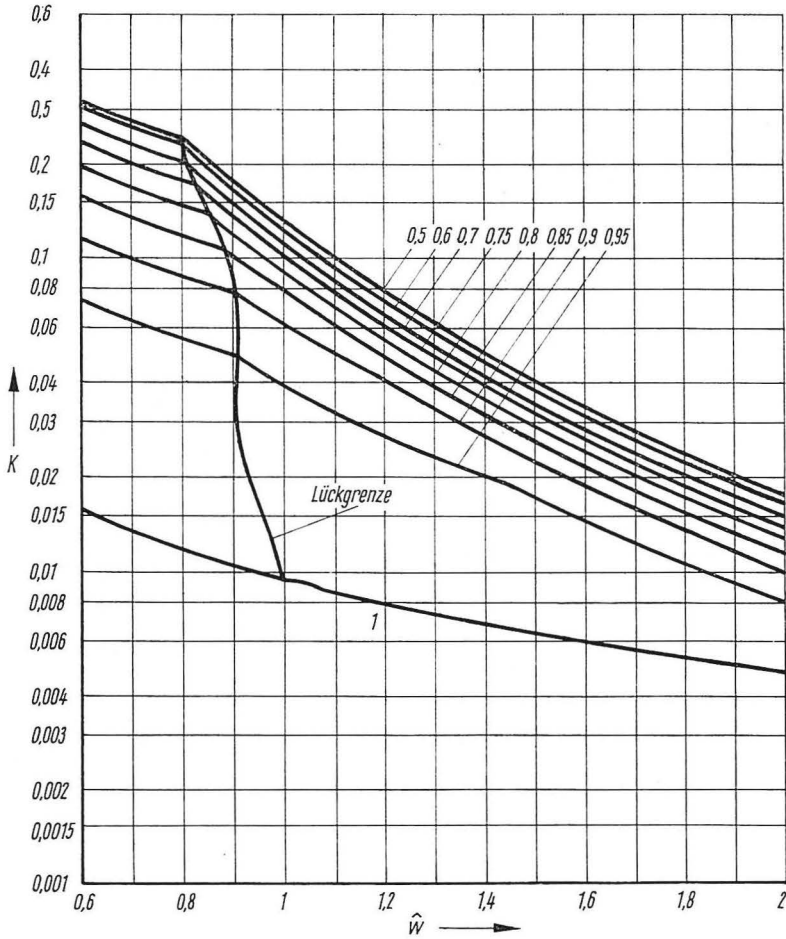


Abb. 21. Induktivitätsfaktor halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil für  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} \cong 0,5$  (Parameter:  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}$ )

In Stufen von  $0,05 \times \beta_{\max}$  wird mit (2.11) bzw. (2.18) der zugehörige Steuerwinkel  $\alpha$  bestimmt. Die Mittelwerte der Ströme werden durch das Unterprogramm *int* berechnet.  $\alpha$  wird auf seinen natürlichen Kommutierungszeitpunkt bezogen und zusammen mit  $K$ ,  $w$ ,  $\hat{w}$  und  $\beta$  ausgedrückt. Das Programm ist in Anlage 1 dargestellt.

#### 4.2. Schaltungen mit Nullventil

Die Ermittlung von  $\beta_{\max}$  erfolgt hier nach (4.3). Für die B 6 HF gelten die Gleichungen nur für  $\alpha \geq \frac{\pi}{3}$ , d. h. über  $\beta_{\max}$  muß hier eine Begrenzung des auftretenden Steuerwinkels erfolgen. Ist  $g \geq \frac{1}{2} \sqrt{3}$ , so ergibt sich die maximale Leitdauer aus (2.3), liegt  $g$  im Bereich  $\frac{9}{4\pi} \leq g \leq \frac{1}{2} \sqrt{3}$ , so ergibt sich  $\beta_{\max}$  aus (2.10) für  $\alpha = \frac{\pi}{3}$ . Für kleinere  $g$  gilt (4.3), d. h. für  $g \leq 0,75 \times U_{\text{di0}}^*$  wird  $K$  vollständig berechnet. Das Programm ist in der Sprache ALGOL 60 formuliert und in Anlage 2 dargestellt.

#### 4.3. Schaltung B 6 HF für $\alpha \leq \pi/3$

Unter Anwendung des in [3] angegebenen Unterprogrammes erfolgt die Ermittlung des Induktivitätsfaktors  $K$  für kleine Steuerwinkel. Im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Programmen wird hier nicht  $\beta$ , sondern  $\alpha$  vorgegeben. Dies ist wegen der zwei Stromflußphasen erforderlich. Nachteilig bei der Vorgabe des Steuerwinkels ist, daß in bestimmten Arbeitsbereichen (s. [3]) keine Veränderung der Ströme, trotz Änderung des Steuerwinkels erfolgt (Freilaufbereiche).

### 5. Maximalwerte

Wird der Steuerbereich der Stromrichter voll ausgenutzt, so interessieren oft nur die Maximalwerte der auftretenden Welligkeiten. Diese Maximalwerte sind in den Abb. 22 und 23 graphisch dargestellt. Zur Anwendung von (1.12) und (1.13) sind in Tab. 2 die Maximalwerte von  $f_w$  und  $f_e$  aufgetragen.

Tabelle 2. Maximalwerte von  $f_w$  und  $f_e$  [1]

Schaltung	$p = 2$	$p = 3$	$p = 6$	$p = 12$	M 1 F	B 2 HF	B 6 HF
$f_e$	1,571	0,6046	0,1403	0,03447	3,559	0,9709	0,3836
$f_w$	0,4834	0,1827	0,0420	0,01028	1,136	0,3086	0,1201

#### 5.1. Vollgesteuerte Schaltungen

In [4] wurde nachgewiesen, daß die Welligkeit bei  $g = 0$  ihr Maximum hat. Dann gilt

$$\beta = 2(\pi - \alpha) \quad \text{bzw.} \quad \alpha = \pi - \frac{\beta}{2} \quad (5.1)$$

und eingesetzt in (2.12) und (2.13)

$$I_{\text{da0}}^* = \frac{p}{\pi} [(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha], \quad (5.2)$$

$$I_{\text{de0}}^* = \sqrt{\frac{p}{2\pi} [(\pi - \alpha) (2 \cos^2 \alpha + 1) + 3 \cos \alpha \cdot \sin \alpha]}. \quad (5.3)$$

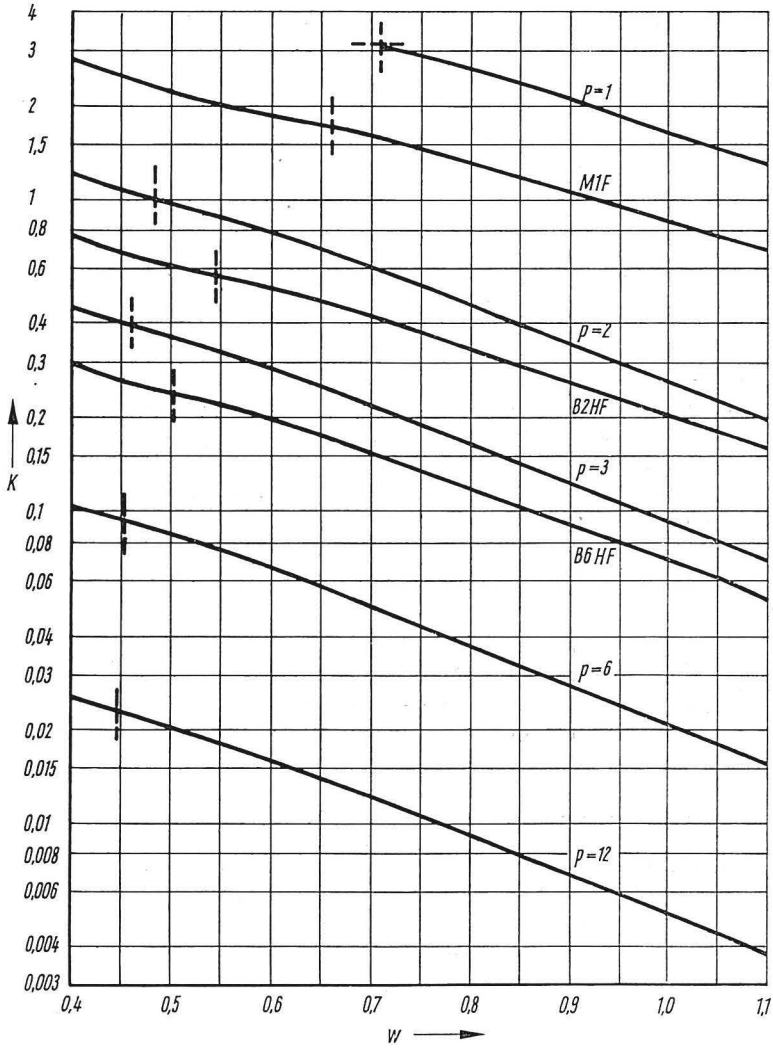


Abb. 22. Induktivitätsfaktoren für die einzelnen Stromrichterschaltungen zur Bestimmung der Effektivwertelligkeit bei voller Ausnutzung des Steuerbereiches

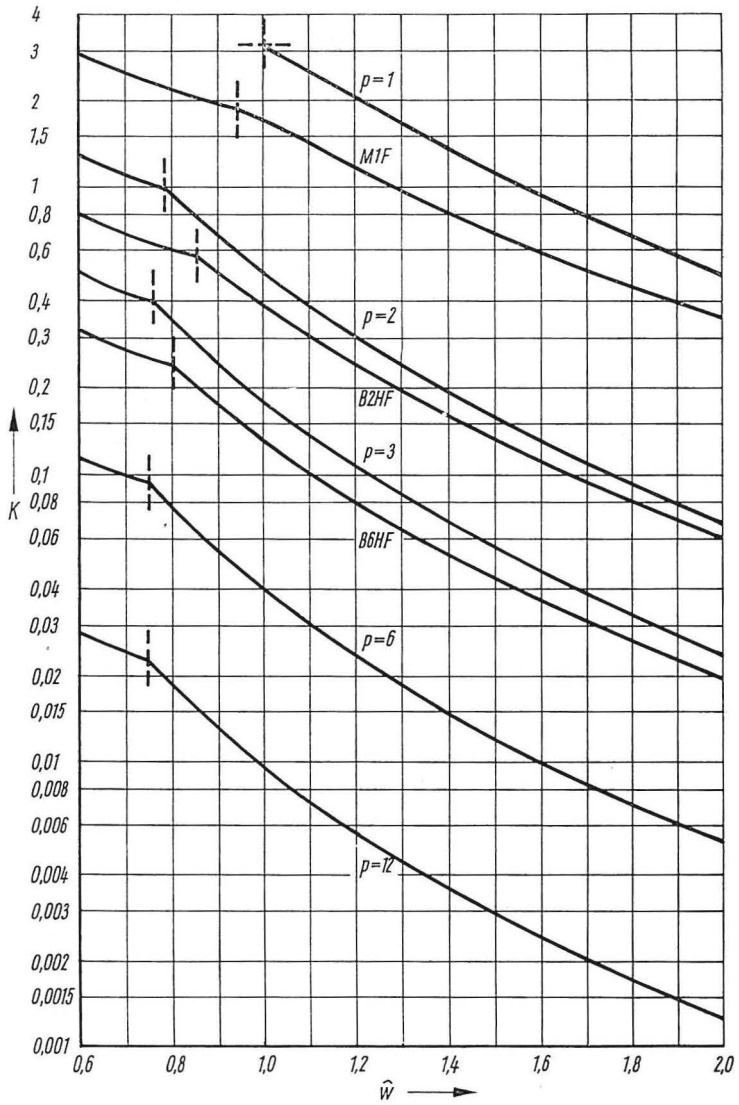


Abb. 23. Induktivitätsfaktoren der einzelnen Stromrichterschaltungen zur Bestimmung des Oberschwingungsgehaltes bei voller Ausnutzung des Steuerbereiches

Damit wird die Welligkeit

$$w = \sqrt{\frac{\pi[(\pi - \alpha)(2 \cos^2 \alpha + 1) + 3 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha]}{2p[(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha]^2}} - 1 \quad (5.4)$$

und der Oberschwingungsgehalt

$$\hat{w} = \frac{\pi(1 + \cos \alpha)}{2p[(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha]}. \quad (5.5)$$

### 5.2. Schaltungen mit Nullventil

Der Maximalwert der Welligkeit des Stromes bei einem angenommenen Stromflußwinkel  $\beta$  tritt in der Nähe des Strommaximums auf [4]. Zur Berechnung wird die Ableitung von (2.31) Null gesetzt

$$\frac{\partial I_{da}^*}{\partial \alpha} = \frac{p}{2\pi} \left( \cos \alpha + 1 - \frac{\beta}{2} \cdot \sin \alpha \right) = 0. \quad (5.6)$$

Daraus ergibt sich

$$\alpha = \begin{cases} \text{Arc sin } \frac{\beta}{1 + \beta^2/4} & \text{für } \beta \geq 2 \\ \pi - \text{Arc sin } \frac{\beta}{1 + \beta^2/4} & \text{für } \beta \leq 2. \end{cases} \quad (5.7)$$

Der Maximalwert der Welligkeit tritt also immer im Bereich des Wirkens des Nullventils auf.

## 6. Beispiele

### 6.1. Beispiel 1

Schaltung: B 6 HF  $U_{di0} = 513 \text{ V}$   $f = 50 \text{ Hz}$   $I_{da} = 100 \text{ A}$   $L_A = 1,4 \text{ mH}$ .

Berechnet werden soll die Induktivität, die sicher verhindern soll, daß die Welligkeit  $w = 0,6$  überschritten wird.

Aus Abb. 22:  $K = 0,195$ ,

$$L = \frac{0,195 \cdot 513 \text{ Vs}}{314 \cdot 100 \text{ A}} = 3,19 \text{ mH}, \quad L_D = (3,19 - 1,4) \text{ mH} = 1,72 \text{ mH}.$$

### 6.2. Beispiel 2

Daten wie Beispiel 1. Es soll der Oberschwingungsgehalt bei einer Ankerkreisinduktivität  $L = 1,4 \text{ mH}$  bei einer Spannung von  $440 \text{ V}$  bestimmt werden.

$$\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \frac{440 \text{ V}}{513 \text{ V}} = 0,856,$$

$$K = \frac{\omega L \cdot I_{da}}{U_{di0}} = \frac{314 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{513} = 0,0856,$$

aus Abb. 21:  $\hat{w} = 0,96$ .

### 6.3. Beispiel 3

Für die Gleichstrommaschinen der B-Reihe des VEB Elbtalwerk Heidenau gilt für die Ankerinduktivität

$$L_A = C \frac{U_N}{I_N \cdot n_N} \quad (6.1)$$



mit

$$C = \begin{cases} 0,03 \dots 0,0333 & \text{für zweipolige Maschinen} \\ 0,025 \dots 0,0266 & \text{für vierpolige Maschinen.} \end{cases} \quad (6.2)$$

Bei direktem Anschluß der Maschinen an die Stromrichter entsprechend Tab. 3 ergeben sich die in Abb. 24 dargestellten Maximalwerte für die Welligkeit. Im nichtlückenden Betrieb steigt die Welligkeit mit der Nennzahl der Maschinen linear an, beim Übergang in den Lückbetrieb ist deutlich das Abknicken der Kurven der Maximalwelligkeit zu erkennen.

Tabelle 3. Zuordnung Stromrichter – Gs-Maschinen

Stromrichter	Gleichstrommaschine
$p = 2$ , B 2 HF, $U_{di0} = 342$ V	$U_N = 270$ V
$p = 2$ , B 2 HF, $U_{di0} = 198$ V	$U_N = 160$ V
$p = 6$ , B 6 HF, $U_{di0} = 513$ V	$U_N = 440$ V

Der Motorenhersteller läßt Lückbetrieb nur unter bestimmten Umständen, z.B. bei geblechten Sonderausführungen, die etwa gleiche Ankerinduktivitäten haben oder bei bestimmten (kleinen) Nennzahlen, zu.

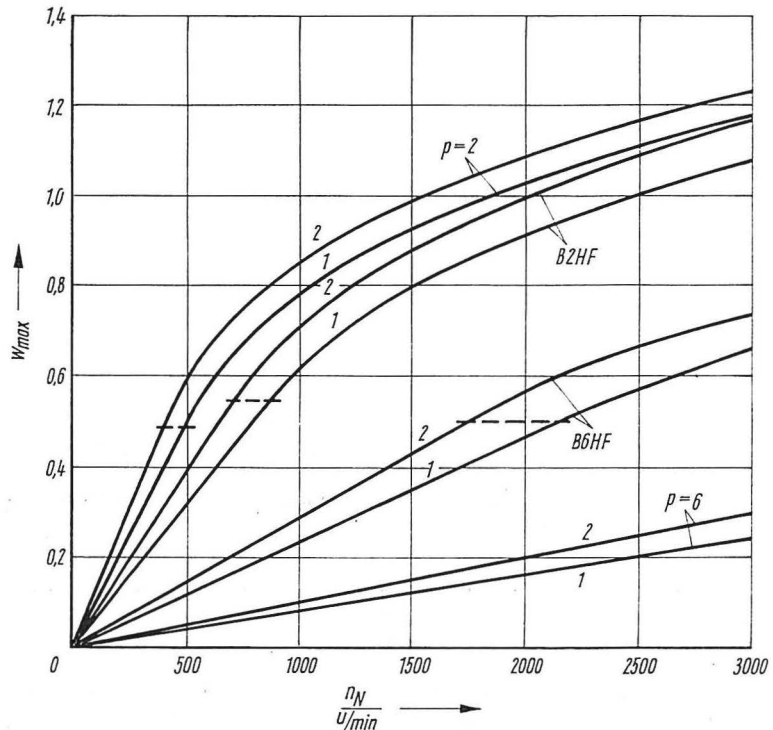


Abb. 24. Maximale Welligkeit bei direktem Anschluß von Gleichstrommaschinen an Stromrichter bei Nennstrom (Parameter: Stromrichterschaltung und Polpaarzahl)

6.4. Beispiel 4

Abb. 25 zeigt die Welligkeit einer direkt an eine vollgesteuerte Drehstrombrücke ( $p = 6$ ) angeschlossenen Gleichstrommaschine mit einer Nenndrehzahl von 1500 U/min als Funktion des Ankerstromes mit der Motorspannung als Parameter. Die Ankerinduktivität wird mit (6.1) berechnet und die Spannungen sind gemäß Tab. 3 zugeordnet.

7. Zusammenfassung

Mit Hilfe der Abb. 8–23 ist die Dimensionierung der gleichstromseitigen Drossel in den gebräuchlichsten Stromrichterschaltungen auch im Lückbetrieb auf einfache Weise möglich. Selbstverständlich kann das in [1] beschriebene Verfahren der kritischen Dimensionierung zur optimalen Auslegung angewandt werden (Lösung kann mittels Rechenprogramm oder auch graphisch erfolgen).

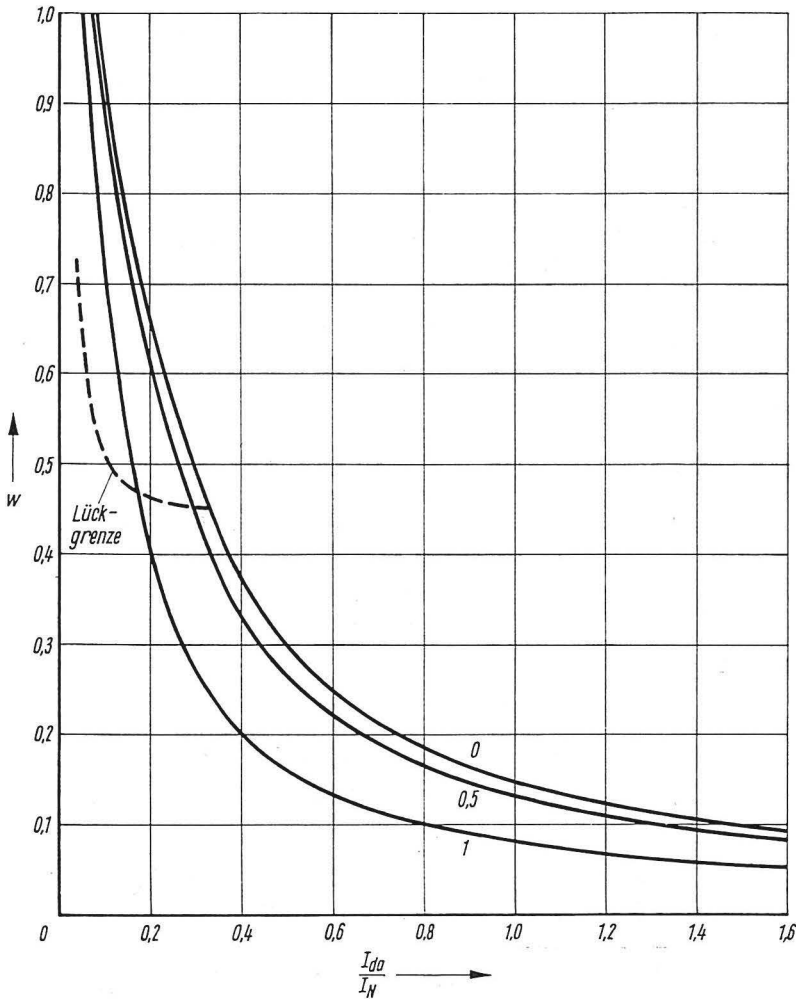


Abb. 25. Welligkeit einer Gleichstrommaschine mit  $n_N = 1500$  U/min und  $U_N = 440$  V bei Speisung durch eine Drehstrombrücke mit direkter Netzeinspeisung von einem 380 V-Drehstromnetz (Parameter:  $\frac{U_{d1\alpha}}{U_N}$ )

**Anlage 1.** ALGOL 60-Programm zur Berechnung des Induktivitätsfaktors für vollgesteuerte Stromrichter bei Vorgabe der Gegenspannung

**comment** Induktivitätsfaktor fuer vollgesteuerte Schaltungen;

**begin real** alpha,beta,betamax,ca,cz,fo,fu,g,ia1,ia2,ida,ide,ie1,ie2,imax,pi,q,udi0,w,ws,x,zeta;

**integer** p;

**procedure** int(f,a,b,ia,ie);

**real** f,a,b,ia,ie;

**begin real** delta,r,s,y,z;

**integer** k;

    delta:=0.01 × (b-a);

    x:=a;

    r:=f;

    s:=r × r;

**for** k:=1 **step** 2 **until** 99 **do**

**begin** x:=a+k × delta;

        y:=f;

        x:=x+delta;

        z:=f;

        r:=r+4 × y+2 × z;

        s:=s+4 × y × y+2 × z × z;

**end;**

      ia:=delta/3 × (r-z);

      ie:=delta/3 × (s-z × z);

**end;**

**real procedure** reg(f,y,xo,xu);

**value** y,xo,xu;

**real** f,y,xo,xu;

**begin real** fo,fu,fx;

    x:=xo;

    fo:=f-y;

    x:=xu;

    fu:=f-y;

  mp1: x:=xo-fo × (xo-xu)/(fo-fu);

    fx:=f-y;

**if** fx × fu < 0 **then**

**begin** fo:=fx;

        xo:=x;

**end else**

**begin** fu:=fx;

        xu:=x;

**end;**

**if** abs(fx/y) ≥ 0.000001 **then goto** mp1;

      reg:=x;

**end;**

  print(' ?\_p\_\_\_\_\_uda\_\_\_\_\_K\_\_\_\_\_w\_\_\_\_\_ws\_\_\_\_\_alpha\_\_\_\_\_beta ?');

  pi:=3.141592654;

**for** p=1,2,3,6,12 **do**

**begin** betamax:=2 × pi/p;

**if** p=1 **then**

**begin** udi0:=1/pi;

          q:=pi;

```

end else
begin udi0:=p/pi×sin(pi/p);
      q:=pi/sin(pi/p);
end;
format(' ?12┌───┐');
print(p);
for g:=0 step 0.05×udi0 until 1.02×udi0 do
begin zeta:=arcsin(g);
      cz:=cos(zeta);
      if p=1∧g≠0 then
betamax:=reg((1-cos(x))/sqrt((x-sin(x))2+(1-cos(x))2),g,2×pi,pi-2×
zeta); format('0.12┌───┐');
print(g/udi0);
for beta:=betamax step -0.05×betamax until 0.02×betamax do
begin ia2:=ie2:=0;
      if g=0 then
begin alpha:=pi-0.5×beta;
      goto ma2;
end;
fo:=0.5×g×beta;
fu:=sqrt(abs(fo2-0.5×((g×beta)2-sin(beta)2)/(1-cos(beta)))));
alpha:= if beta < pi∧fo-fu ≥ 1 ∨ beta ≥ pi∧fo+fu ≥ 1 then 0 else
if beta < pi then arccos(fo-fu) else arccos(fo+fu);
if alpha ≥ zeta then goto ma2;
fo:=0.5×(g×beta+cos(zeta+beta-2×pi/p)-cz);
fu:=sqrt(abs(fo2+(sin(2×pi/p))2-4×fo2)/(2×(1-cos(2×pi/p)))));
alpha:=arccos(fo-fu);
ca:=cos(alpha);
int(cz-cos(x)+g×(zeta-x),zeta,alpha+2×pi/p,ia1,ie1);
int(cz+ca-cos(alpha+2×pi/p)-cos(x-2×pi/p)+g×(zeta-x),
alpha+2×pi/p,zeta+beta,ia2,ie2);
imax:=2×cz+g×(2×zeta-pi);
goto ma3;
ma2: ca:=cos(alpha);
int(ca-cos(x)+g×(alpha-x),alpha,alpha+beta,ia1,ie1);
imax:=ca+cz+g×(alpha+zeta-pi);
ma3: ida:=0.5/pi×(ia1+ia2);
ide:=sqrt(0.5/pi×(ie1+ie2));
w:=sqrt((ide/ida)2/p-1);
ws:=0.5×imax/(ida×p);
format('0.123456┌───┐┌───┐┌───┐0.123456┌───┐┌───┐┌───┐
123.456┌───┐┌───┐123.456?');
print(q×ida,w,ws, if p > 2 then alpha×180/pi-90+180/p
else alpha×180/pi,beta×180/pi);
space(12);
if w > 3 then goto ma1;
end;
ma1: line(1);
space(5);
end;
end;
end

```

Bemerkung: Das Programm wurde auf der Digitalrechenanlage ODRÄ 1204 in der Programmiersprache ALGOL 1204 gerechnet.

**Anlage 2.** ALGOL 60-Programm zur Berechnung des Induktivitätsfaktors für Stromrichter mit Nullventil bei Vorgabe der Gegenspannung

**comment** Induktivitätsfaktor fuer Stromrichter mit Nullventil;

**begin integer p;**

**real** alpha,beta,betamax,ca,cz,g,ia1,ia2,ia3,ida,ide,ie1,ie2,ie3,imax,pi,udi0,w,ws,x,y,zeta;

**procedure** int(f,a,b,ia,ie);

**real** f,a,b,ia,ie;

**begin real** delta,r,s,y,z;

**integer** k;

delta:=0.01 × (b-a);

x:=a;

r:=f;

s:=r × r;

**for** k:=1 **step** 2 **until** 99 **do**

**begin** x:=a+k × delta;

y:=f;

x:=x+delta;

z:=f;

r:=r+4 × y+2 × z;

s:=s+4 × y × y+2 × z × z;

**end;**

ia:=delta/3 × (r-z);

ie:=delta/3 × (s-z × z);

**end;**

**real procedure** reg(f,y,xo,xu);

**value** y,xo,xu;

**real** f,y,xo,xu;

**begin real** fo,fu,fx;

x:=xo;

fo:=f-y;

x:=xu;

fu:=f-y;

mp1: x:=xo-fo × (xo-xu)/(fo-fu);

fx:=f-y;

**if** fx × fu < 0 **then**

**begin** fo:=fx;

xo:=x;

**end else**

**begin** fu:=fx;

xu:=x;

**end;**

**if** abs(fx/y) ≥ 0.000001 **then goto** mp1;

reg:=x;

**end;**

print(' ?\_p\_\_\_\_\_uda\_\_\_\_\_K\_\_\_\_\_w\_\_\_\_\_ws\_\_\_\_\_alpha\_\_\_\_\_beta ?');

pi:=3.141592654;

**for** p:=1,2,3 **do**

**begin** betamax:=2 × pi/p;

udi0:=p/pi;

format(' ?12\_\_\_\_\_');

print(p);

**for** g:=0.05 × udi0 **step** 0.05 × udi0 **until** 1.02 × udi0 **do**

```

begin zeta:=arcsin(g);
      cz:=cos(zeta);
      format('0.12┌┌┌');
      print(g/udi0);
      if p=3 ^ g ≥ 2.25/pi then
betamax:=if g ≤ 0.5×sqrt(3) then reg(g×x+cos(x+pi/3), 0.5,pi/1.5,0.5×pi)
          else reg((1-cos(x))/sqrt((x-sin(x))↑2+(1-cos(x))↑2),g,2×pi,
pi-2×zeta);
      for beta:=betamax step -0.05×betamax until 0.02×betamax do
begin alpha:=if beta×g-1 ≥ 1 then 0 else arc cos(beta×g-1);
      ca:=cos(alpha);
      ia2:=ia3:=ie2:=ie3:=0;
      if alpha < zeta then goto ma3;
      if alpha+beta > pi then goto ma1;
      alpha:=arccos(0.5×g×beta-sqrt(abs((0.5×g×beta)↑2
-0.5×((g×beta)↑2-sin(beta)↑2)/(1-cos(beta)))));
      ca:=cos(alpha);
      int(ca-cos(x)+g×(alpha-x),alpha,alpha+beta,ia1,ie1);
      goto ma2;
ma1: int(ca-cos(x)+g×(alpha-x),alpha,pi,ia1,ie1);
      int(ca+1+g×(alpha-x),pi,alpha+beta,ia2,ie2);
      goto ma2;
ma3: imax:=2×cz+g×(2×zeta-pi);
      if p=1 then goto ma5;
      alpha:=arccos(beta×g-1-cz-cos(zeta+beta));
      ca:=cos(alpha);
      int(cz-cos(x)+g×(zeta-x),zeta,pi,ia1,ie1);
      int(cz+1+g×(zeta-x),pi,pi+alpha,ia2,ie2);
      int(cz+1+ca+cos(x)+g×(zeta-x),pi+alpha,zeta+beta,ia3,ie3);
      goto ma9;
ma5: alpha:=arccos(beta×g-1-cz+cos(zeta+beta));
      ca:=cos(alpha);
      int(cz-cos(x)+g×(zeta-x),zeta,pi,ia1,ie1);
      int(cz+1+g×(zeta-x),pi,2×pi+alpha,ia2,ie2);
      int(cz+1+ca-cos(x)+g×(zeta-x),2×pi+alpha,zeta+beta,ia3,ie3);
      goto ma9;
ma2: imax:=ca+cz+g×(alpha+zeta-pi);
ma9: ida:=0.5/pi×(ia1+ia2+ia3);
      ide:=sqrt(0.5×(ie1+ie2+ie3)/pi);
      w:=sqrt((ide/ida)↑2/p-1);
      ws:=0.5×imax/(ida×p);
      format('0.123456┌┌┌┌┌┌0.123456┌┌┌┌┌┌0.123456┌┌┌┌┌┌
123.456┌┌┌┌┌┌123.456?');
      print(pi×ida,w,ws,alpha×180/pi,beta×180/pi);
      space(12);
      if w > 3 then goto ma7;
ma8: end;
ma7: line(1);
      space(5);
end;
end;
end

```

Bemerkung: Das Programm wurde auf der Digitalrechenanlage ODRA 1204 in der Programmiersprache ALGOL 1204 gerechnet.

**Anlage 3.** ALGOL 60-Rahmenprogramm zur Berechnung des Induktivitätsfaktors für die halbgesteuerte Drehstrombrücke für  $\alpha \leq \pi/3$

```

comment Rahmenprogramm Induktivitätsfaktor B6HF;
begin real alpha,alphamin,beta,beta1,beta2,deltaalpha,g,ida,ide,imax1,imax2,pi,udi0,w,ws;
    integer k;
    procedure B6HF(g,alpha,beta,beta1,beta2,ida,ide,imax1,imax2,w,ws,k);
    real g,alpha,beta,beta1,beta2,ida,ide,imax1,imax2,w,ws;
    integer k;
    drum;
    pi:=3.141592654;
    udi0:=3/pi;
    print('?uda K w ws alpha beta?');
    for g:=0.8×udi0 step 0.05×udi0 until 1.02×udi0 do
    begin alphamin:= if pi/1.5×g-1 ≥ 1 then 0 else arccos(pi/1.5×g-1);
        deltaalpha:=0.05×(pi/3-alphamin);
        format('?0.12┐┐┐?');
        print(g/udi0);
        for alpha:=alphamin step deltaalpha until 1.000001×pi/3 do
        begin B6HF(g,alpha,beta,beta1,beta2,ida,ide,imax1,imax2,w,ws,k);
            format('0.123456┐┐┐0.123456┐┐┐0.123456┐┐┐123.456┐┐┐123.456?');
            print(ida/udi0,w,ws,alpha×180/pi,beta×180/pi);
            space(7);
        end;
    end;
    line(1);
end;
end

```

Bemerkung: Das vorliegende Programm wurde auf der EDVA ODRA 1204 in der Programmiersprache ALGOL 1204 geschrieben und getestet.

Der Prozedurhauptteil der Prozedur B 6 HF ist durch das Codierungszeichen **drum** ersetzt. Das aus [3] entnommene Unterprogramm wird vom Rahmenprogramm getrennt übersetzt und auf dem Trommelspeicher des Rechners gespeichert. Bei Aufruf der **procedure** B 6 HF durch das Hauptprogramm wird es in Maschinensprache von der Trommel in den Hauptspeicher des Computers übertragen und abgearbeitet.

### Schrifttum

- [1] Schwarz, J.: Das System „Netzgelöschter Stromrichter-Glättungsdrossel-Gleichstrommaschine“ im nichtlückenden Betrieb. ELEKTRIE 30 (1976) H. 6, 325—330.
- [2] Wasserrab, Th.: Schaltungslehre der Stromrichtertechnik. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag 1962.
- [3] Schwarz, J.: Die halbgesteuerte Drehstrombrückenschaltung mit Gegenspannung und induktiver Strombegrenzung im Lückbetrieb. Z. elektr. Inform.- u. Energietechnik, Leipzig 7 (1977) 3, 193—218.
- [4] Schwarz, J.: Die Effektivwertwelligkeit des Laststromes von Einpulsstromrichtern. Z. elektr. Inform.- u. Energietechnik, Leipzig 6 (1976) 4, 331—342.

*Schwarz, J.*

DK 621.314.63:621.882.2

**Das System „Netzgelöschter Stromrichter — Glättungs-  
drossel — Gleichstrommaschine“ im lückenden Betrieb. II.**

Z. elektr. Inform.- u. Energietechnik, Leipzig 8 (1978) 1,  
S. 14—36, 18 Abb., 3 Tab., 3 ALGOL60-Programme,  
4 Lit.-Zit.

Ausgehend von den in Teil I abgeleiteten Grundlagen wird ein Verfahren zur Dimensionierung der gleichstromseitigen Drossel für die wichtigsten netzgelöschten Stromrichterschaltungen im lückenden Betrieb abgeleitet. Die Abbildungen gestatten auf einfache Weise die Ermittlung der wesentlichsten Stromkenngößen. Drei ALGOL 60-Programme erlauben den Einsatz des Rechenverfahrens in automatischen Entwurfsprogrammen und gestatten die optimale Dimensionierung des Systems „Netzgelöschter Stromrichter — Glättungs-drossel — Gleichstrommaschine“.