

Beanspruchung stromrichter gespeister Gleichstrommaschinen im Lückbetrieb

J. Schwarz, Berlin

Der Einsatz von Gleichstrommaschinen mit geblechten Jochen und Wendepolen gestattet den Betrieb von elektrischen Antrieben ohne Glättungsdrossel bei minimalem Materialaufwand und, in Zusammenhang mit dem Einsatz von adaptiven Ankerstromreglern, optimalen dynamischen Eigenschaften. Da die Glättungsdrossel einen beachtlichen Materialeinsatz an Kupfer und Eisen erfordert, ist der volkswirtschaftliche Gesamtaufwand, auch durch die Einsparung von Rohstoffimporten, bei derartig konzipierten Antriebssystemen am kleinsten.

Bei der heute üblichen Maschinenauslegung (GFC-Maschinenreihe des VEB Elbtalwerk Heidenau) steigt die Welligkeit bei einem 22-kW-Antrieb mit einer Nennzahl von 1500 U/min bei Speisung durch eine halbgesteuerte Drehstrombrückenschaltung mit Nullventil ohne Glättungsdrossel bei Nennstrom bis zu $w = 0,46$; sie liegt also in unmittelbarer Nähe der Grenze zum Bereich des lückenden Ankerstromes. Bei Entlastung geht der Antrieb sofort in den lückenden Betrieb über.

Die bisher bekannten Methoden lassen eine Berechnung der Kenngrößen des Ankerstromes im Lückbetrieb nicht zu. Zur optimalen Auslegung der Bauelemente sind aber genaue Kenntnisse der Stromkenngrößen, insbesondere der Effektivwertwelligkeit und der relativen Schwingungsweite erforderlich.

1. Geltungsbereich und Voraussetzungen

Die folgenden wichtigsten netzgelöschten Stromrichterschaltungen werden in dieser Arbeit behandelt

- Einpulsstromrichter mit und ohne Nullventil (*M1* und *M1F*)
- vollgesteuerte Stromrichter mit den Pulszahlen $p = 2, 3, 6$ und 12
- Zweipulsstromrichter mit Nullventil (*M2F*, *B2CF*, *B2HF* und *B2HZ*)
- halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil (*B6HF*).

Alle Berechnungen gelten unter folgenden Voraussetzungen

- symmetrisches Netz ohne Oberschwingungen
- symmetrisch arbeitende Ansteuervorrichtung
- keine Kommutierungsreaktanzen vorhanden
- ideal leitende und sperrende Ventile
- keine Resistanzen vorhanden
- die Gegenspannung E sei konstant
- lineare Kreisinduktivität L .

Im Bild 1 ist das Ersatzschaltbild der zu berechnenden Schaltungen gezeigt.

Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz ist Mitarbeiter im VEB Kombinat Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin.

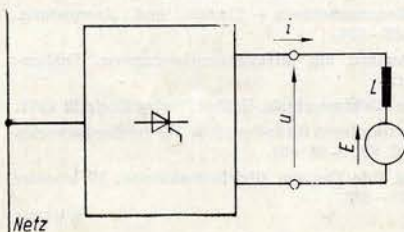


Bild 1 Ersatzschaltbild

2. Der Wellenstrom und seine Kenngrößen [1]

In der stromrichtergespeisten Gleichstrommaschine fließt ein Mischstrom, für den im Bild 2 zwei ausgewählte Beispiele gezeigt sind.

Die Welligkeit w ist das Verhältnis des Effektivwertes des überlagerten Wechselstromes I_{\sim} zum arithmetischen Mittelwert (Gleichwert) des Mischstromes \bar{i}

$$w = \frac{I_{\sim}}{\bar{i}} \quad (1)$$

Die relative Schwingungsweite w_{ss} ist das Verhältnis der Schwingungsweite Δi zum Gleichwert \bar{i}

$$w_{ss} = \frac{\Delta i}{\bar{i}} = f_s w_p = (r + 1) w_p \quad (2)$$

Der Gleichrichterscheitelfaktor f_s ist das Verhältnis des Größtwertes \hat{i} zum Gleichwert \bar{i}

$$f_s = \frac{\hat{i}}{\bar{i}} = \frac{w_{ss}}{w_p} = r + 1 \quad (3)$$

Der Riffelfaktor r ist das Verhältnis des Größtwertes des Oberschwingungsgehaltes \hat{i}_{\sim} zum Gleichwert \bar{i}

$$r = \frac{\hat{i}_{\sim}}{\bar{i}} = \frac{\hat{i}}{\bar{i}} - 1 = f_s - 1 = \frac{w_{ss}}{w_p} - 1 \quad (4)$$

Die Pulsation w_p ist das Verhältnis der Schwingungsweite Δi zum Größtwert \hat{i}

$$w_p = \frac{\Delta i}{\hat{i}} = \frac{w_{ss}}{f_s} = \frac{w_{ss}}{r + 1} \quad (5)$$

Der Scheitelfaktor k_s ist das Verhältnis vom Größtwert \hat{i} zum Effektivwert I der Mischgröße

$$k_s = \frac{\hat{i}}{I} = \frac{f_s}{\sqrt{1 + w^2}} = \frac{r + 1}{\sqrt{1 + w^2}} \quad (6)$$

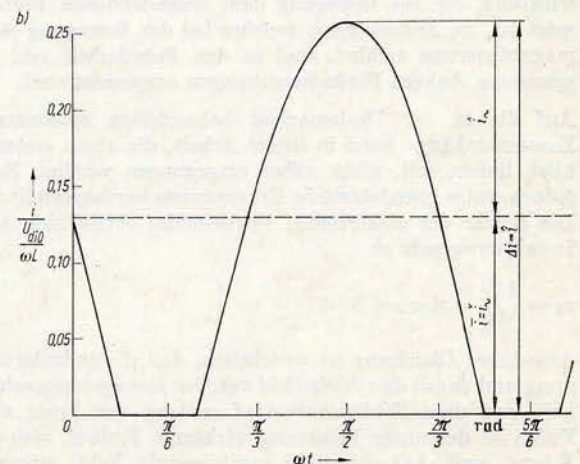
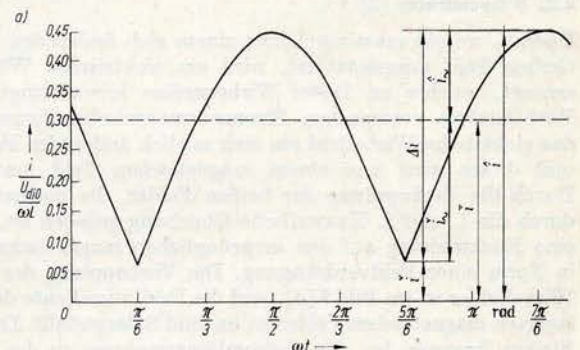


Bild 2. Laststrom einer *B6HF*

- a) nichtlückender Betrieb $\alpha = 90^\circ$ el. $\bar{i} = 0,3 \quad U_{di0}/\omega L$
 b) lückender Betrieb $\alpha = 100^\circ$ el. $\bar{i} = 0,13 \quad U_{di0}/\omega L$

Der Scheitelfaktor k_s wird bei Strömen nur sehr selten angewandt und deshalb nicht weiter berücksichtigt. Er kann aber durch einfache Rechnung aus den anderen Kenngrößen gewonnen werden.

Im Lückbetrieb (Bild 2b) vereinfachen sich die Beziehungen teilweise. Da der Kleinstwert des Stromes \bar{i} Null ist, sind der Größtwert \hat{i} und die Schwingungsweite Δi gleich und damit haben die relative Schwingungsweite w_{ss} und der Gleichrichtscheitelfaktor f_s den gleichen Wert. Für den Riffelfaktor gilt

$$r \Big|_{\bar{i}=0} = w_{ss} - 1. \quad (7)$$

Die Pulsation w_p wird im Lückbetrieb $w_p = 1 = \text{konst}$

Zur Bedeutung der angegebenen Kenngrößen als Parameter der Beanspruchung der Gleichstrommaschinen sei auf die Literaturstellen [2] bis [5] verwiesen.

3. Berechnung

3.1. Induktivitätsfaktor

Es wird eine bezogene Induktivität K , der „Induktivitätsfaktor“

$$K = \frac{\omega L \bar{i}}{U_{di0}}; \quad (8)$$

ω Netzfrequenz

U_{di0} ideale Leerlaufgleichspannung des Stromrichters definiert. K wird im Rahmen dieser Arbeit als Funktion der Effektivwertwelligkeit w und der relativen Schwingungsweite w_{ss} berechnet.

3.2. Nichtlückender Betrieb

Durch Einsetzen der Gleichungen zur Berechnung der Kenngrößen im nichtlückenden Betrieb [6]

$$w = \frac{f_w U_{di0}}{\bar{i} \omega L} \quad (9)$$

$$w_{ss} = \frac{f_e U_{di0}}{\bar{i} \omega L} \quad (10)$$

in Gl. (8) erhält man

$$K = f(w) = \frac{f_w}{w} \quad (11)$$

$$K = f(w_{ss}) = \frac{f_e}{w_{ss}}; \quad (12)$$

f_w bezogener Effektivwert des Oberschwingungsgehaltes

f_e bezogene Schwingungsweite.

Die bezogene Induktivität K verändert sich hier hyperbelförmig in Abhängigkeit von dem vorgegebenen Parameter.

3.3. Lückender Betrieb

Aus Gl. (8) ergibt sich die Proportionalität des fließenden Stromes \bar{i} mit K . Berechnet man auf der Grundlage von [7] den Gleichstrom \bar{i} eines Stromrichters im Lückbetrieb als Funktion der Gegenspannung E und leitet daraus die Welligkeit w und die relative Schwingungsweite des Stromes ab [8] bis [10], so erhält man durch Einsetzen von

$$\bar{i} = f\left(\alpha, \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}\right); \quad (13)$$

α Steuerwinkel des Stromrichters

$U_{di\alpha}$ ideale Leerlaufspannung beim Steuerwinkel α

mit

$$w = f\left(\alpha, \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}\right); \quad \text{und} \quad (14)$$

$$w_{ss} = f\left(\alpha, \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}\right) \quad (15)$$

in Gl. (8) die gewünschten Funktionen $K = f(w)$ und $K = f(w_{ss})$ (Bild 3). Die Lückgrenze wird in den Bildern 3 und 4 durch eine gestrichelte Linie angedeutet.

Bei den Gln. (13) (14) und (15) handelt es sich um im allgemeinen nicht explizit ausdrückbare Gleichungssysteme für die einzelnen Stromrichterschaltungen mit vielen Fallunterscheidungen. Die Berechnung und Auswertung erfolgte numerisch. Eine zusammenfassende Darstellung ist in [11] enthalten.

3.4. Maximalwerte

Wird der Steuerbereich der Stromrichter voll ausgenutzt, so interessieren oft nur die Maximalwerte der auftretenden Welligkeiten. Diese Maximalwerte sind im Bild 4 graphisch dargestellt.

4. Beispiele

Beispiel 1

Stromrichter: $B2\text{ HZ}$, $U_{di0} = 342\text{ V}$, $\omega = 314\text{ 1/s}$ ($f = 50\text{ Hz}$)

Kreisinduktivität: $L = 10\text{ mH}$

Es sollen w , w_{ss} , f_s , r und k_s im Arbeitspunkt $U_{di\alpha} = 170\text{ V}$ und $\bar{i} = 20\text{ A}$ berechnet werden.

$$K = \frac{314\text{ 1/s} \cdot 0,01\text{ Vs/A} \cdot 20\text{ A}}{342\text{ V}} = 0,184$$

$$\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \frac{170\text{ V}}{342\text{ V}} = 0,50$$

Aus Bild 3e und Bild 3f ergeben sich $w = 1,00$ und $w_{ss} = 2,60$. Die anderen Kenngrößen erhält man durch Rechnung zu

$$f_s = w_{ss} = 2,60$$

$$r = f_s - 1 = 1,60$$

$$k_s = \frac{f_s}{\sqrt{1+w^2}} = \frac{2,60}{\sqrt{1+1^2}} = 1,84.$$

Beispiel 2

Gleichstrommaschine: 40 kW , 440 V , 102 A

Stromrichter: $B6\text{ HF}$, $U_{di0} = 513\text{ V}$, $\omega = 314\text{ 1/s}$

Kreisinduktivität: $L = 9\text{ mH}$

Es sollen die maximal auftretenden Kenngrößen des Stromes bei einem Strommittelwert von 20 A bestimmt werden. Mit Gl. (8) erhält man

$$K = \frac{314\text{ 1/s} \cdot 0,009\text{ Vs/A} \cdot 20\text{ A}}{513\text{ V}} = 0,110.$$

Aus Bild 4 folgt $w = 0,82$ und $w_{ss} = 2,14$. Diese Werte werden in o.g. Antrieb bei einem Strom von 20 A mit Sicherheit nicht überschritten.

Beispiel 3

Stromrichterdaten: $M1\text{ F}$, $U_{di0} = 99,2\text{ V}$, $f = 50\text{ Hz}$.

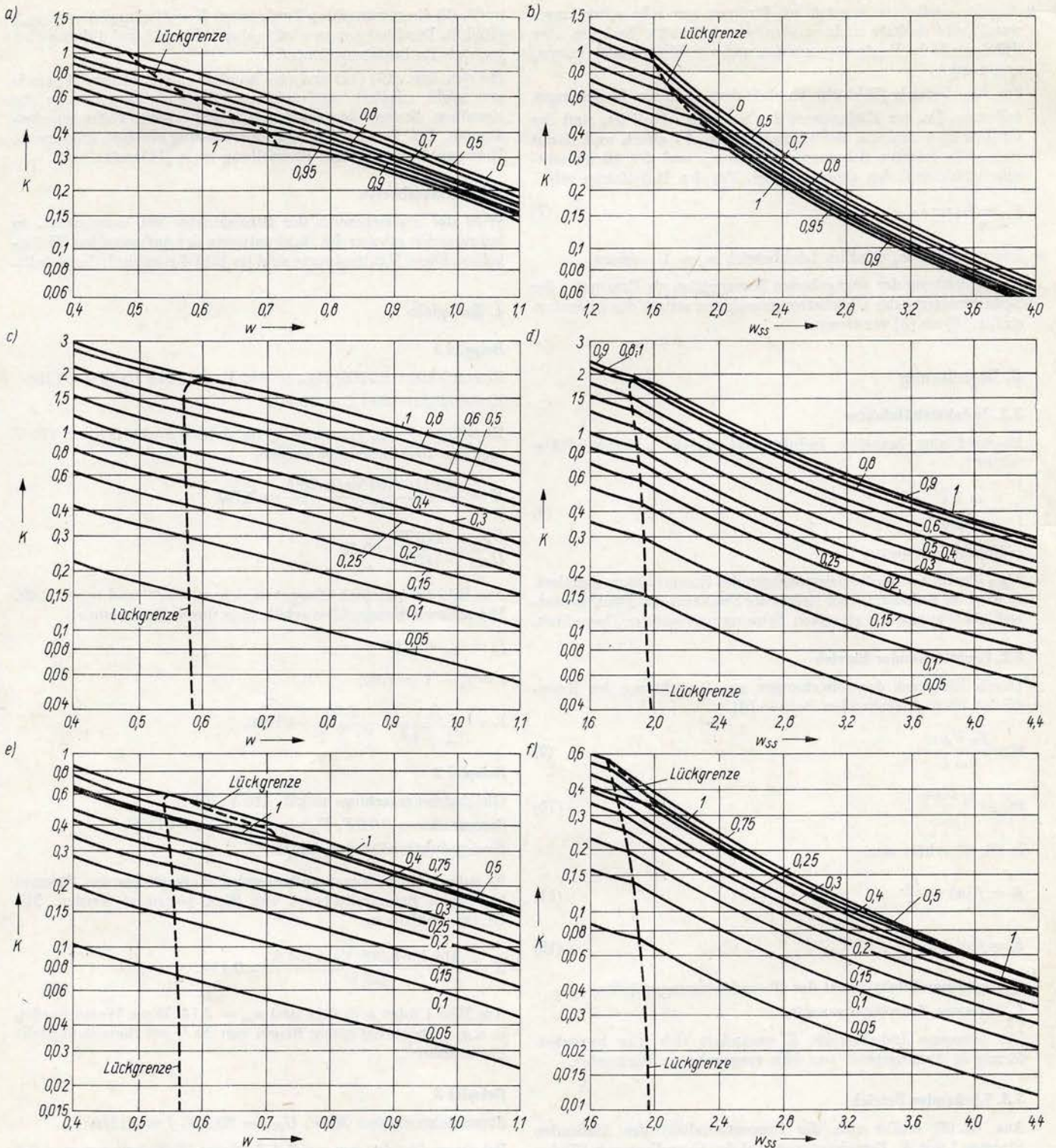
Bei einem Gleichstrom von 5 A darf eine Welligkeit von $w = 0,8$ nicht überschritten werden. Es soll die Mindestkreisinduktivität berechnet werden.

Aus Bild 4a erhält man $K = 1,32$.

$$L = \frac{K U_{di0}}{\omega \bar{i}} = \frac{1,32 \cdot 99,2\text{ V}}{314\text{ 1/s} \cdot 5\text{ A}} = 83,3\text{ mH}.$$

Literatur

- [1] Schwarz, J.: Kenngrößen zur Charakterisierung oberwellenbehafteter Größen. (In Vorbereitung)
- [2] Beier, E.: Einfluß der Glättungsinduktivität auf Kommutierung und Leistung thyristorgespeister Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen. Siemens-Z. 42 (1968) H. 10, S. 843–854.



[3] Philipps, W.: Kommutierungsprobleme bei stromrichter gespeisten Gleichstrommaschinen mit massivem Ständerjoch. ETZ-A 90 (1969) H. 5, S. 103 bis 106.

[4] Budig, P.-K.: Das Betriebsverhalten von mischstrom gespeisten Gleichstrommaschinen. ELEKTRIE 24 (1970) H. 5, S. 167-169.

[5] Locke, G.: Zur Stromrichter verträglichkeit von Gleichstrommotoren. Wiss. Ber. AEG-Telefunken 45 (1972) H. 1/2, S. 47-55.

[6] Schwarz, J.: Das System „Netzgelöschter Stromrichter - Glättungsdrossel - Gleichstrommaschine“ im nichtlückenden Betrieb. ELEKTRIE 30 (1976) H. 5, S. 325-330.

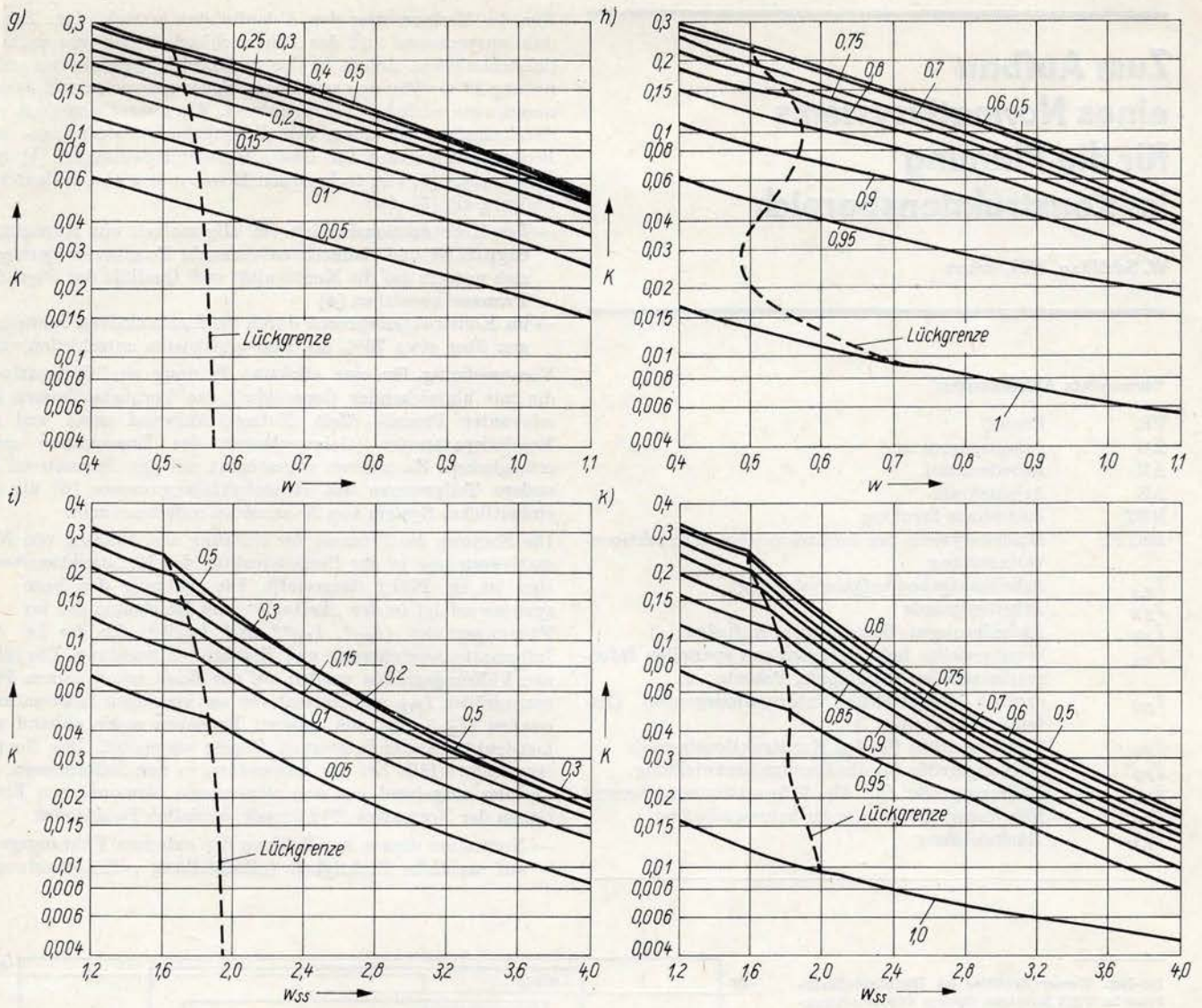
[7] Wasserrab, Th.: Schaltungslehre der Stromrichtertechnik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1962.

[8] Schwarz, J.: Vollgesteuerte netzgelöschte Stromrichter im Lückbetrieb. Arch. Elektrotechn. 58 (1976) H. 3, S. 175-184.

[9] Schwarz, J.: Netzgelöschte Stromrichterschaltungen mit Nullventil im Lückbetrieb. Archivum Elektrotechniki 26 (1977) H. 3, S. 581-600.

[10] Schwarz, J.: Die halbgesteuerte Drehstrombrückenschaltung mit Gegenspannung und induktiver Strombegrenzung im Lückbetrieb. Z. elektr. Inform. Energietechnik 7 (1977) H. 3, S. 193-218.

[11] Schwarz, J.: Das System „Netzgelöschter Stromrichter - Glättungsdrossel - Gleichstrommaschine“ im lückenden Betrieb. Z. elektr. Inform. Energietechnik 7 (1977) H. 6, S. 501-512 und 8 (1978) H. 1, S. 14-36.



3

Bild 3. Induktivitätsfaktor

- (Parameter: $U_{di\alpha}/U_{di0}$)
- a) Zweipulsstromrichter: $K = f(w)$
 - b) Zweipulsstromrichter: $K = f(w_{ss})$
 - c) M1F: $K = f(w)$
 - d) M1F: $K = f(w_{ss})$
 - e) M2F, B2CF, B2HF, B2HZ: $K = f(w)$
 - f) M2F, B2CF, B2HF, B2HZ: $K = f(w_{ss})$
 - g) B6HF: $K = f(w)$ für $U_{di\alpha}/U_{di0} \leq 0,5$
 - h) B6HF: $K = f(w_{ss})$ für $U_{di\alpha}/U_{di0} \geq 0,5$
 - i) B6HF: $K = f(w_{ss})$ für $U_{di\alpha}/U_{di0} \leq 0,5$
 - k) B6HF: $K = f(w_{ss})$ für $U_{di\alpha}/U_{di0} \geq 0,5$

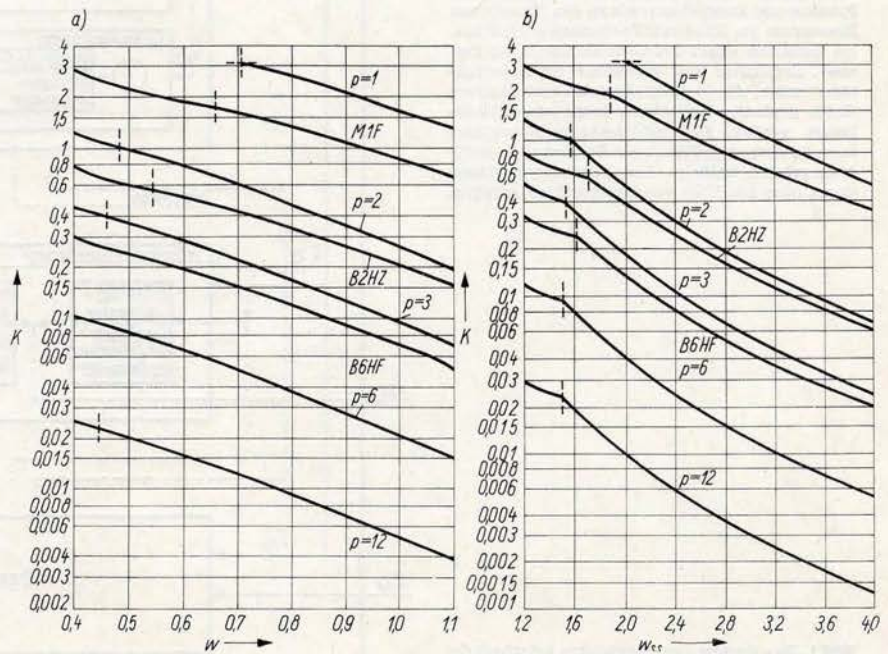


Bild 4. Maximalwerte der Induktivitätsfaktoren

- a) $K = f(w)$
- b) $K = 3f(w_{ss})$

EA 8210