

5 Stromrichter

Stromrichter haben beim Steuern und Regeln von Elektroenergiesystemen eine große Bedeutung. Sie werden zum Gleich- wie auch zum Wechselrichten eingesetzt. In Stromrichtern werden *Dioden*, *Transistoren* (IGBTs und MOSFETs) und *Thyristoren* als elektronische Schalter verwendet.

Stromrichtermaterial ist vor allem der Halbleiterwerkstoff Silizium, in neuesten Entwicklungen auch Siliziumcarbit. Zum Aufbau eines Halbleiterbauelements werden P- und N-dotiertes Silizium verwendet. Bei solchen Bauelementen gibt es je nach Polarität der angelegten Spannung eine Durchlass- bzw. eine Sperrrichtung.

Bei den Schaltungen der Leistungshalbleiter spricht man von 2-, 3-, 6-, 12- und höherpulsigen Schaltungen mit der Pulszahl p , je nachdem, in wie viele Sinuskurven die auf der Wechselstromseite vorhandenen Wechsel- oder Drehspannungen zerlegt werden. Abhängig davon, von wo die Kommutierungsspannung (Spannung, durch deren Wirkung der Strom von einem Stromrichterzweig auf den nächsten übergeht) geliefert wird, spricht man von fremd- oder von selbstgeführten Stromrichterschaltungen.

Beispiel 5.1:

Welche maximale Spitzensperrspannung muss eine Diode haben, wenn an der Diode eine sinusförmige Spannung von 400 V anliegt? k ist mit 2 anzunehmen.

Lösung:

$$U_{R\max} = 1,1 \cdot k \cdot \hat{u}_V = 1,1 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 400 \text{ V} = \underline{\underline{1\,244,5 \text{ V}}} \quad (\text{Gl. (5.1)})$$

Beispiel 5.2:

An den gezeigten Diodenkennlinien sind folgende Berechnungen anzustellen:

1. Wie groß ist der statische Durchlasswiderstand, wenn der Arbeitspunkt bei Gleichspannung bei 0,8 V liegt?
2. Wie groß ist der statische Sperrwiderstand, wenn der Arbeitspunkt bei Gleichspannung bei 800 V liegt?
3. Wie groß ist der dynamische Widerstand im Durchlassbereich, wenn eine einer Gleichspannung überlagerte Wechselfspannung zwischen 0,5 V und 0,7 V vorhanden ist?

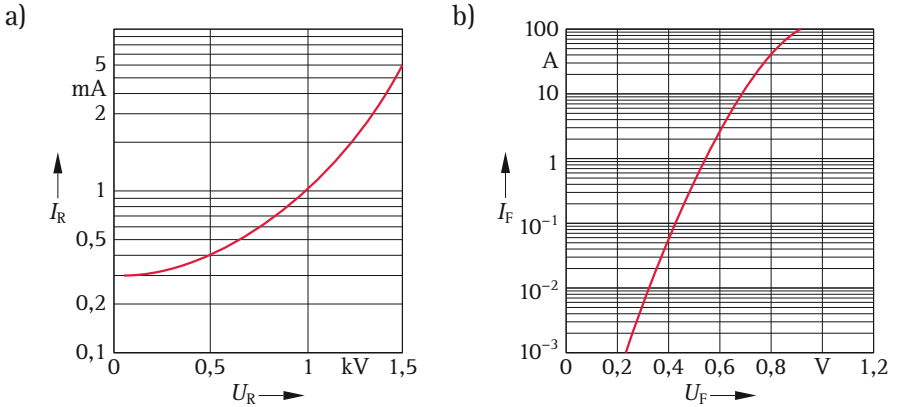


Bild L5.1 Diodenkennlinien zu Beispiel 5.2

a) Kennlinie im Sperrbereich; U_R Sperrspannung, I_R Strom in Sperrrichtung

b) Kennlinie im Durchlassbereich; U_F Durchlassspannung, I_F Strom in Durchlassrichtung

Lösung:

1. $U_F = 0,8 \text{ V} \rightarrow I_F = 40 \text{ A}$ (Bild 5.1 b)

$$R_F = \frac{U_F}{I_F} = \frac{0,8 \text{ V}}{40 \text{ A}} = \underline{\underline{20 \text{ m}\Omega}} \quad (\text{Gl. (5.2)})$$

2. $U_R = 0,8 \text{ kV} \rightarrow I_R = 0,62 \text{ mA}$ (Bild 5.1 a)

$$R_R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{0,8 \text{ kV}}{0,62 \text{ mA}} = \underline{\underline{1,29 \text{ M}\Omega}} \quad (\text{Gl. (5.3)})$$

3. $U_{F1} = 0,5 \text{ V} \rightarrow I_{F1} = 0,37 \text{ A}$

$$U_{F2} = 0,7 \text{ V} \rightarrow I_{F2} = 10 \text{ A}$$

$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{(0,7 - 0,5) \text{ V}}{(10 - 0,37) \text{ A}} = \underline{\underline{20,77 \text{ m}\Omega}} \quad (\text{Gl. (5.4)})$$

Beispiel 5.3:

Welche Verluste entstehen in einer Diode, die von einem Dauergleichstrom von 5 A durchflossen wird?

Lösung:

$$I_F = 5 \text{ A} \quad \rightarrow \quad U_F = 0,65 \text{ V} \quad (\text{Bild 5.1 b})$$

$$P_F = U_F \cdot I_F = 0,65 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = \underline{\underline{3,25 \text{ W}}}$$

Beispiel 5.4:

Wie groß ist der Sperrstrom einer Diode, wenn eine Sperrspannung von 1 kV anliegt?

Lösung:

$$U_R = 1 \text{ kV} \quad \rightarrow \quad I_R = \underline{\underline{1 \text{ mA}}} \quad (\text{Bild 5.1 a})$$

Beispiel 5.5:

Ein Thyristor hat eine Freiwerdezeit von 30 μs . Die Löszeit betrage 1/7-tel der Periodendauer. Berechnen Sie die Frequenz, mit der der Thyristor maximal betrieben werden darf!

Lösung:

$$t_c \geq k_q \cdot t_q = \frac{T}{7} \quad \rightarrow \quad (\text{Gl. (5.5)})$$

$$T = 7 \cdot k_q \cdot t_q = \frac{1}{f} \quad \rightarrow$$

$$f = \frac{1}{7 \cdot k_q \cdot t_q} = \frac{1}{7 \cdot 1,5 \cdot 30 \mu\text{s}} = \underline{\underline{3,17 \text{ kHz}}}$$

Beispiel 5.6:

Thyristoren haben in einer Schaltung im $16\frac{2}{3}$ -Hz-Netz als Löschzeit 10° zur Verfügung. Welche maximale Freiwerzeit steht den Thyristoren zur Verfügung?

Lösung:

$$t_c = \frac{10^\circ}{360^\circ} \cdot T = \frac{10^\circ}{360^\circ} \cdot \frac{1}{f} \rightarrow$$

$$t_q = \frac{t_c}{k_q} = \frac{10^\circ}{360^\circ \cdot 16\frac{2}{3} \text{ s}^{-1} \cdot 1,5} = \underline{\underline{1,11 \text{ ms}}} \quad (\text{Gl. (5.5)})$$

Beispiel 5.7:

Ein Thyristor wird in Durchlassrichtung mit 1 kA Gleichstrom betrieben, in Sperrichtung steht eine Gleichspannung von 1,5 kV an. Wie groß sind in beiden Fällen die Verluste im Thyristor?

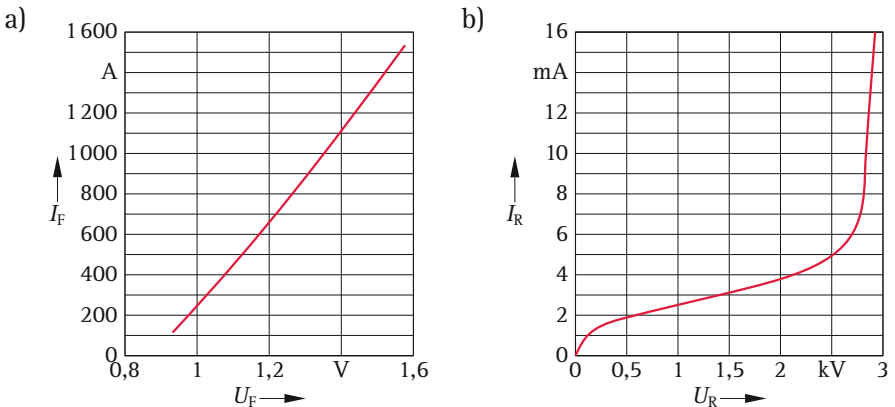


Bild L5.2 Thyristorkennlinien zu Beispiel 5.7

- a) Kennlinie im Durchlassbereich; U_F Durchlassspannung, I_F Strom in Durchlassrichtung
 b) Kennlinie im Sperrbereich; U_R Sperrspannung, I_R Strom in Sperrrichtung

Lösung:

$$I_F = 1 \text{ kA} \rightarrow U_F = 1,35 \text{ V} \quad (\text{Bild L5.2 a})$$

$$P_F = U_F \cdot I_F = 1,35 \text{ V} \cdot 1 \text{ kA} = \underline{\underline{1,35 \text{ kW}}}$$

$$U_R = 1,5 \text{ kV} \rightarrow I_R = 3,2 \text{ mA} \quad (\text{Bild L5.2 b})$$

$$P_R = U_R \cdot I_R = 1,5 \text{ kV} \cdot 3,2 \text{ mA} = \underline{\underline{4,8 \text{ W}}}$$

Beispiel 5.8:

Wie groß ist bei dem Thyristor nach der Kennlinie aus Beispiel 5.7 (Bild L5.2) die Durchbruchspannung in Sperrrichtung?

Lösung:

$$U \approx \underline{\underline{2,8 \text{ kV}}}$$

Beispiel 5.9:

Wie groß ist der statische Durchlasswiderstand eines Thyristors bei 1,3 V, und wie groß ist der statische Sperrwiderstand bei 2 kV (Bild L5.2)?

Lösung:

$$U_F = 1,3 \text{ V} \rightarrow I_F = 890 \text{ A} \rightarrow R_F = \frac{U_F}{I_F} = \frac{1,3 \text{ V}}{890 \text{ A}} = \underline{\underline{1,46 \text{ m}\Omega}}$$

$$U_R = 2 \text{ kV} \rightarrow I_R = 3,8 \text{ mA} \rightarrow R_R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{2 \text{ kV}}{3,8 \text{ mA}} = \underline{\underline{526,32 \text{ k}\Omega}}$$

Beispiel 5.10:

Berechnen Sie den arithmetischen Mittelwert U_d einer von einer Wechselspannung U herrührenden:

1. Einweggleichspannung ohne Glättung,
2. Zweiweggleichspannung ohne Glättung.
3. Geben Sie die Zahlenwerte für U_d bei $U = 230 \text{ V}$ an!
4. Mit welchem Messinstrument könnte dieser Spannungswert gemessen werden?

Lösung:

1. Die Kurve der Einweggleichrichtung zeigt **Bild L5.3**. Der arithmetische Mittelwert ist über die gesamte Periodendauer T zu berechnen, während die Sinuskurve nur über $T/2$ geht.

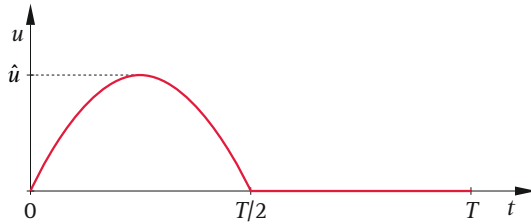


Bild L5.3 Einweggleichrichtung

Zunächst benötigt man folgende Zusammenhänge:

$$u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \cdot \int u \cdot dt \quad (\text{Gl. (1.39)})$$

Wenn man nun beim Integral die entsprechenden Grenzen einsetzt, erhält man:

$$\bar{U} = U_{d1} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T/2} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \cdot dt$$

Die Lösung des Integrals findet man in Tabelle 1.4. Damit ergibt sich Folgendes:

$$U_{d1} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{T} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot [-\cos(\omega t)]_0^{T/2}$$

$$U_{d1} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{T} \cdot \frac{1}{\frac{2\pi}{T}} \cdot \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2}\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot 0\right) \right]$$

$$U_{d1} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2\pi} \cdot (1+1)$$

$$U_{d1} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\pi} = \underline{\underline{0,45 \cdot U}}$$

2. Bei der Zweiweggleichrichtung werden beide Wechselstromhalbschwingungen gleichgerichtet. Der arithmetische Mittelwert über T ergibt sich aus zwei Sinushalbschwingungen mit jeweils $T/2$. Demzufolge muss der arithmetische Mittelwert der doppelte Wert der Einweggleichrichtung sein.

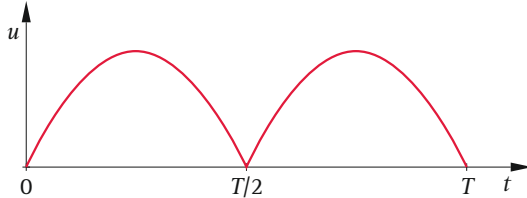


Bild L5.4 Zweiweggleichrichtung

$$U_{d2} = 2U_{d1} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U}{\pi} = \underline{\underline{0,9 \cdot U}}$$

$$3. \quad U_{d1} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230 \text{ V}}{\pi} = \underline{\underline{103,5 \text{ V}}}$$

$$U_{d2} = 2U_{d1} = \underline{\underline{207,0 \text{ V}}}$$

4. Die Messung kann mit einem **Drehspulmessinstrument** erfolgen.

Beispiel 5.11:

Berechnen Sie den Effektivwert $\tilde{U} = U_1$ einer Einweggleichrichtung ohne Glättung! Mit welchem Messinstrument könnte der Spannungswert gemessen werden?

Lösung:

$$u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$

$$\tilde{U} = U_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int u^2 \cdot dt} \quad (\text{Gl. (1.40)})$$

$$\tilde{U} = U_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{T/2} \sqrt{2}^2 \cdot U^2 \cdot \sin^2(\omega t) \cdot dt}$$

$$U_1 = \sqrt{\frac{2U^2}{T} \cdot \left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \cdot \sin(2\omega t) \right]_0^{T/2}} \quad (\text{Tabelle 1.4})$$

$$U_1 = \sqrt{\frac{2U^2}{T} \cdot \left(\frac{T}{4} - 0 - 0 + 0 \right)} = \sqrt{\frac{U^2}{2}}$$

$$U_1 = \frac{U}{\sqrt{2}}$$

Die Messung kann mit einem Dreheisenmessinstrument erfolgen.

Beispiel 5.12:

Berechnen Sie den arithmetischen Mittelwert $U_{d\alpha}$ für eine durch einen Thyristor mit dem Zündwinkel α entstehende Einweggleichspannung:

1. allgemein,
2. für $U = 230 \text{ V}$ und $\alpha = 0, 30, 60, 90, 120, 150$ und 180° .
3. Skizzieren Sie $U_{d\alpha} = f(\alpha)$!

Lösung:

Bild L5.5 zeigt das Diagramm der Einweggleichrichtung mit dem Zündwinkel α .

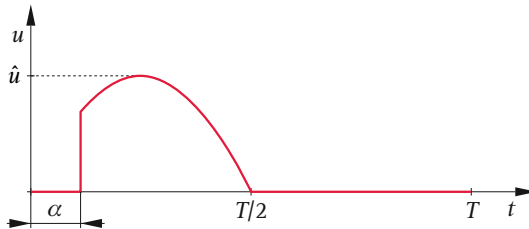


Bild L5.5 Einweggleichrichtung mit Zündwinkel α

$$1. \quad U_{d\alpha} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T/2} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \cdot dt$$

$$U_{d\alpha} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{T} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \left[-\cos(\omega t) \right]_{t_\alpha}^{T/2}$$

t_α ist die Zeit beim Winkel α .

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$U_{d\alpha} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2\pi} \cdot \left[-\cos \pi + \cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t_\alpha \right) \right]$$

$$\frac{t_\alpha}{T} = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{360^\circ} \rightarrow$$

$$U_{d\alpha} = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

$$2. \quad U_{d\alpha} = \frac{230 \text{ V}}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \alpha) = 51,8 \text{ V} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

α in °	0	30	60	90	120	150	180
$U_{d\alpha}$ in V	103,5	96,6	77,7	51,8	25,9	6,9	0

3. Die Kurve $U_{d\alpha} = f(\alpha)$ zeigt **Bild L5.6**.

Mit zunehmendem Zündwinkel α sinkt die Spannung.

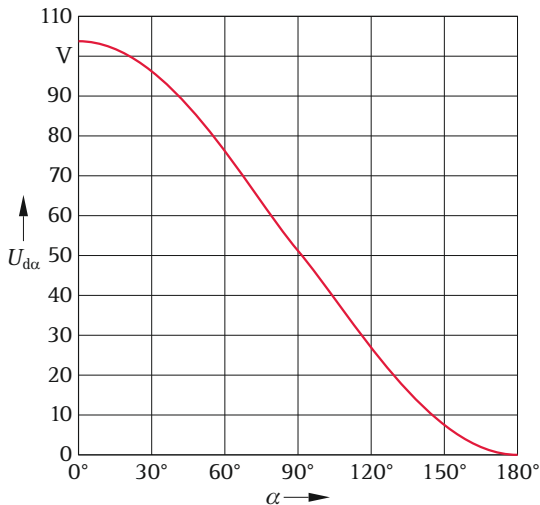


Bild L5.6 $U_{d\alpha} = f(\alpha)$

Beispiel 5.13:

Berechnen Sie den Effektivwert $U_{S\alpha}$ für eine durch einen Triac mit dem Zündwinkel α entstehende angeschnittene Wechselspannung:

1. allgemein,
2. für $U = 230 \text{ V}$ und $\alpha = 0, 30, 60, 90, 120, 150$ und 180° .
3. Skizzieren Sie $U_{S\alpha} = f(\alpha)$!

Lösung:

Bild L5.7 zeigt den Kurvenverlauf der Spannung u . Bei der Berechnung des Effektivwerts kann man, da beide Halbschwingungen gleich sind, nur von einer Halbschwingung ausgehen, d. h. $t = T/2$.

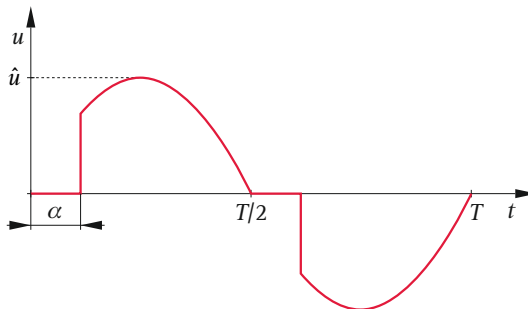


Bild L5.7 Spannungskurve durch einen Triac

$$1. \quad U_{S\alpha} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_\alpha}^{T/2} u^2 \cdot dt}$$

$$U_{S\alpha} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_{t_\alpha}^{T/2} \sqrt{2}^2 \cdot U^2 \cdot \sin^2(\omega t) \cdot dt}$$

$$U_{S\alpha} = \sqrt{\frac{4U^2}{T} \cdot \left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \cdot \sin(2\omega t) \right]_{t_\alpha}^{T/2}}$$

Durch Einsetzen der Grenzen und mit $f = 1/T$ folgt:

$$U_{S\alpha} = \sqrt{\frac{4U^2}{T} \cdot \left\{ \frac{T}{4} - \left[\frac{T}{8\pi} \cdot \sin(2\pi) \right] - \frac{t_\alpha}{2} + \left[\frac{T}{8\pi} \cdot \sin\left(\frac{4\pi \cdot t_\alpha}{T}\right) \right] \right\}}$$

$$\frac{t_\alpha}{T} = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{360^\circ}$$

$$U_{S\alpha} = \sqrt{U^2 \cdot \left\{ 1 - 0 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \left[\frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha) \right] \right\}}$$

$$U_{S\alpha} = U \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \left[\frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha) \right]} \quad (\text{Gl. (L5.1)})$$

α in $^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
$U_{S\alpha}$ in V	230,0	226,7	206,3	162,6	101,7	39,1	0

3. Die Kurve $U_{S\alpha} = f(\alpha)$ zeigt Bild L5.8.

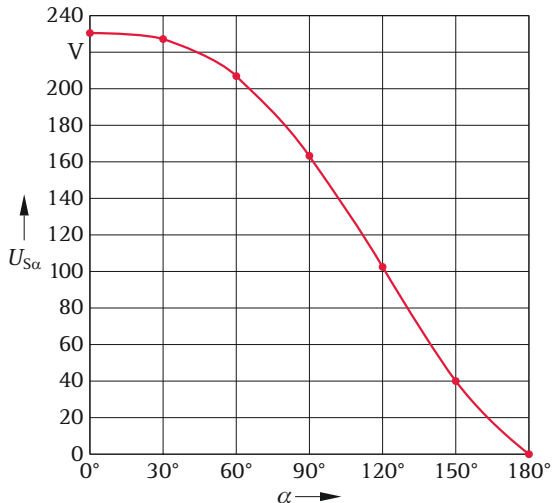


Bild L5.8 $U_{S\alpha} = f(\alpha)$ für einen Triac

Beispiel 5.14:

Berechnen und skizzieren Sie die Leistung P , die in Abhängigkeit vom Zündwinkel α bei einer Schaltung mit Triac und rein ohmscher Belastung umgesetzt wird, wenn bei $\alpha = 0^\circ$ die Leistung $P = 100\%$ sein soll!

Lösung:

Allgemein gilt für die Leistung:

$$P = U \cdot I$$

Da I proportional zu U ist, folgt $P \sim U^2$. Nach Beispiel 5.13 wird demnach:

$$P = \left(\frac{U_{S\alpha}}{U_{S\alpha=0^\circ}} \right)^2 \cdot 100\% = \left(\frac{U_{S\alpha}}{230\text{ V}} \right)^2 \cdot 100\%$$

α in $^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
P in %	100	97,2	80,5	50,0	19,6	2,9	0

Die Kurve $P = f(\alpha)$ zeigt Bild L5.9.

Mit dem Zündwinkel kann man die Leistung steuern.

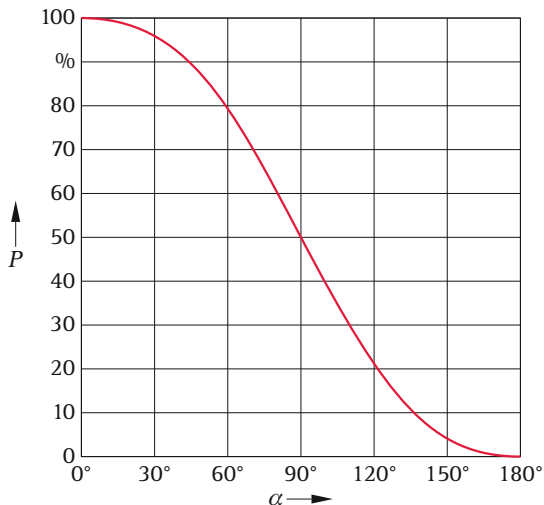


Bild L5.9 $P = f(\alpha)$ für einen Triac

Beispiel 5.15:

Mit einer M2-Schaltung soll eine Gleichspannung von 210 V erzeugt werden. Der Gleichstrom beträgt höchstens 35 A.

Berechnen Sie:

1. benötigte Strangspannung des Stromrichtertransformators,
2. benötigte Spitzensperrspannung der Halbleiterbauelemente,
3. Leistung auf der Gleichstromseite,
4. Leistung des Stromrichtertransformators,
5. Übersetzungsverhältnis des Stromrichtertransformators, wenn wechsellagerungsseitig 230 V vorhanden sind!

Lösung:

$$1. \quad U_{\text{di}} = 0,90 \cdot U_{\text{S}} \quad \rightarrow \quad U_{\text{S}} = \frac{U_{\text{di}}}{0,9} = \frac{210 \text{ V}}{0,9} = \underline{\underline{233,3 \text{ V}}} \quad (\text{Gl. (5.6)})$$

$$2. \quad U_{\text{Rmax}} \geq 7,78 \cdot U_{\text{S}} = 7,78 \cdot 233,3 \text{ V} = \underline{\underline{1815,1 \text{ V}}} \quad (\text{Gl. (5.7)})$$

$$3. \quad P_{\text{di}} = U_{\text{di}} \cdot I_{\text{d}} = 210 \text{ V} \cdot 35 \text{ A} = \underline{\underline{7350 \text{ W}}} \quad (\text{Gl. (5.8)})$$

$$4. \quad S_{\text{T}} = 1,34 \cdot P_{\text{di}} = 1,34 \cdot 7350 \text{ VA} = \underline{\underline{9849 \text{ VA}}} \quad (\text{Gl. (5.9)})$$

$$5. \quad \hat{u} = \frac{U_1}{2U_{\text{S}}} = \frac{230 \text{ V}}{2 \cdot 233,3 \text{ V}} = \underline{\underline{0,49}} \quad (\text{Gl. (5.10)})$$

Beispiel 5.16:

Weisen Sie für die B6-Schaltung die Formeln $U_{\text{di}} = 2,34 \cdot U_{\text{S}}$ (Gl. (5.22)) und $U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \cos \alpha$ (Gl. (5.23)) nach!

Lösung:

Die Sinuskurven einer Sechspulsschaltung in Bild 5.11 b sind die verketteten Leiterspannungen u_{12} usw. mit $\sqrt{3} \cdot U_{\text{S}}$. Die jeweilige Strangspannung ist U_{S} . Der Scheitelwert einer Sinuskurve in Bild 5.11 b ist somit:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{S}} = \sqrt{6} \cdot U_{\text{S}} = 2,449 \cdot U_{\text{S}}$$

Der Momentanwert ist $u_{12} = \hat{u}_{12} \cdot \sin \omega t$.

U_{di} ist der arithmetische Mittelwert der gleichgerichteten roten Kurven in Bild L5.10b. Eine solche Kurve geht bei einer sechspulsigen Schaltung immer über $T/6$ (60°) von $T/6$ (60°) bis $T/3$ (120°) der zugehörigen Sinuskurve, wie in Bild L5.10a dargestellt. Somit wird:

$$U_{\text{di}} = \frac{1}{T} \cdot \int_{T/6}^{T/3} \hat{u}_{12} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{6}{T} \cdot \sqrt{6} \cdot U_S \cdot \frac{1}{\omega} \cdot [-\cos \omega t]_{T/6}^{T/3}$$

Mit $\omega = \frac{2\pi}{T}$ wird:

$$U_{\text{di}} = \frac{6}{T} \cdot \sqrt{6} \cdot U_S \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot [-\cos \omega t]_{T/6}^{T/3} = \left(\frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_S}{\pi} \right) \cdot \left[-\cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{3} \right) + \cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{6} \right) \right]$$

$$U_{\text{di}} = \left(\frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_S}{\pi} \right) \cdot \left[-\cos \left(\frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\frac{\pi}{3} \right) \right] = \left(\frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_S}{\pi} \right) \cdot [-(-0,5) + 0,5]$$

$$U_{\text{di}} = \left(\frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_S}{\pi} \right) = \underline{\underline{2,34 \cdot U_S}}$$

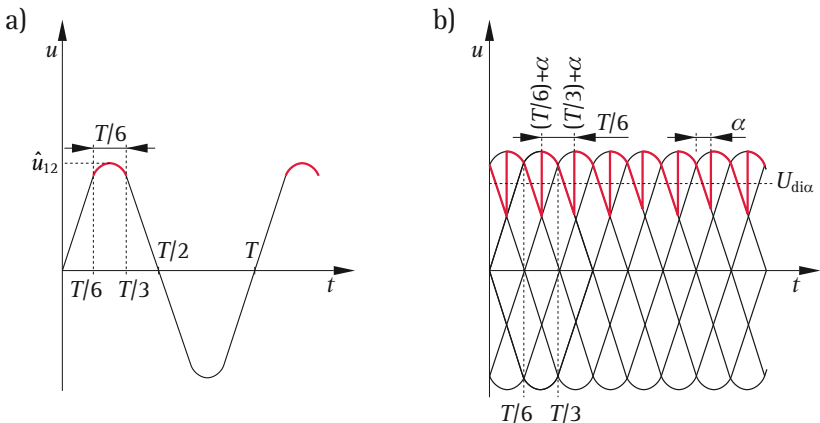


Bild L5.10 Zu Beispiel 5.16

a) Sinuskurve $u_{12} = f(t)$

b) $U_{\text{di}} = f(\alpha)$

Die Kurven, um $U_{\text{di}\alpha}$ zu bestimmen, zeigt Bild L5.10b. Aus diesem Bild ergibt sich auch der Ansatz der Gleichung.

$$U_{\text{di}\alpha} = \frac{1}{T} \cdot \int_{T/6+\alpha T/(2\pi)}^{T/3+\alpha T/(2\pi)} \hat{u}_{12} \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

Da $T/6$ und $T/3$ Zeitgrößen sind, muss der Zündwinkel α ebenfalls in eine Zeitgröße gewandelt werden. Es gilt:

$$\frac{t}{T} = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{360^\circ} \rightarrow t = \frac{T \cdot \alpha}{360^\circ} = \frac{\alpha \cdot T}{2\pi}$$

Deshalb die Grenzen $T/6 + \alpha \cdot T/(2\pi)$ und $T/3 + \alpha \cdot T/(2\pi)$.

$$U_{\text{di}\alpha} = \frac{6}{T} \cdot \sqrt{6} \cdot U_S \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot \left[-\cos \omega t \right]_{T/6+\alpha T/(2\pi)}^{T/3+\alpha T/(2\pi)}$$

$$U_{\text{di}\alpha} = \left(\frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_S}{\pi} \right) \cdot \left\{ -\cos \left[\frac{2\pi}{T} \cdot \left(\frac{T}{3} + \frac{\alpha \cdot T}{2\pi} \right) \right] + \cos \left[\frac{2\pi}{T} \cdot \left(\frac{T}{6} + \frac{\alpha \cdot T}{2\pi} \right) \right] \right\}$$

Mit $\frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_S}{\pi} = U_{\text{di}}$ wird:

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \left[-\cos \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha \right) + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right]$$

Die Umstellung der Winkelfunktionen ergibt nach Tabelle 1.2:

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \left\{ - \left[\cos \left(\frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \alpha - \sin \left(\frac{2\pi}{3} \right) \cdot \sin \alpha \right] + \cos \left(\frac{\pi}{3} \right) \cdot \cos \alpha - \sin \left(\frac{\pi}{3} \right) \cdot \sin \alpha \right\}$$

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \left\{ - \left[(-0,5 \cdot \cos \alpha) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right] + 0,5 \cdot \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right\}$$

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \left\{ 0,5 \cdot \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha + 0,5 \cdot \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right\}$$

$$U_{\text{di}\alpha} = \underline{\underline{U_{\text{di}} \cdot \cos \alpha}}$$

Beispiel 5.17:

Berechnen und skizzieren Sie $U_{\text{di}\alpha}$ für die B6- und B6H-Schaltung bei $U_{\text{di}} = 300 \text{ V}$ und $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$ in 30° -Schritten!

Lösung:

Für B6 gilt:

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. (5.23)})$$

Und für B6H gilt:

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \frac{\cos \alpha + 1}{2} \quad (\text{Gl. (5.33)})$$

Die Ergebnisse enthält die nachfolgende Tabelle.

α in $^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
$U_{\text{di}\alpha}$ in V (B6)	300	259,8	150	0	-150	-259,8	-300
$U_{\text{di}\alpha}$ in V (B6H)	300	279,9	225	150	75	20,1	0

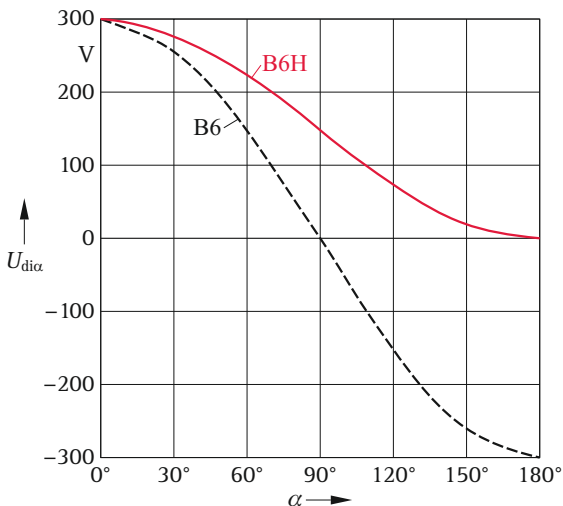


Bild L5.11 $U_{\text{di}\alpha} = f(\alpha)$

Die Skizze zeigt **Bild L5.11**. Die B6-Kurve wird ab $\alpha = 90^\circ$ negativ, was bedeutet, dass die Spannung $U_{\text{di}\alpha}$ und damit auch der Strom I_d sich umkehren müssten. Dies geht aber nicht, da bei B6H die Thyristoren sperren würden. Somit zeigt sich, dass die B6-Schaltung nur bis $\alpha = 90^\circ$ funktioniert.

Die B6H-Schaltung dagegen geht bis $\alpha = 180^\circ$. Diese Schaltung bewirkt eine feinere Spannungseinstellung.

Beispiel 5.18:

Zu untersuchen sind eine B6- und eine B6H-Schaltung. Gegeben sind $U_{\text{di}} = 400 \text{ V}$, $I_d = 400 \text{ A}$ und $U_{\text{di}\alpha} = 400 \text{ V} \dots 0 \text{ V}$ in Schritten von 50 V. Berechnen und skizzieren Sie für beide Schaltungen jeweils α , P , Q_1 und S_1 ! Welche Aussagen können über die Leistungen der beiden Schaltungen in Abhängigkeit des Steuerwinkels getroffen werden?

Lösung:

Für die B6-Schaltung gelten:

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \cos \alpha \quad \rightarrow \quad \alpha = \arccos\left(\frac{U_{\text{di}\alpha}}{U_{\text{di}}}\right) \quad (\text{Gl. (5.23)})$$

$$P = U_{\text{di}} \cdot I_d \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. (5.25)})$$

$$Q_1 = U_{\text{di}} \cdot I_d \cdot \sin \alpha \quad (\text{Gl. (5.30)})$$

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \quad (\text{Gl. (5.31)})$$

Für die B6H-Schaltung gelten:

$$U_{\text{di}\alpha} = U_{\text{di}} \cdot \frac{\cos \alpha + 1}{2} \quad \rightarrow \quad \alpha = \arccos\left(\frac{2 \cdot U_{\text{di}\alpha}}{U_{\text{di}}} - 1\right) \quad (\text{Gl. (5.33)})$$

$$P = U_{\text{di}} \cdot I_d \cdot \frac{\cos \alpha + 1}{2} \quad (\text{Gl. (5.35)})$$

$$Q_1 = U_{\text{di}} \cdot I_d \cdot \frac{\sin \alpha}{2} \quad (\text{Gl. (5.40)})$$

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \quad (\text{Gl. (5.41)})$$

Die Ergebnisse der Berechnung gibt die nachfolgende Tabelle wieder, die zugehörigen Kurvenverläufe zeigt **Bild L5.12**.

		B6								
$U_{\text{d}\alpha}$ in V		400	350	300	250	200	150	100	50	0
α in °		0	28,96	41,41	51,32	60	67,98	75,52	82,82	90
P in kW		160	140	120	100	80	60	40	20	0
Q_1 in kvar		0	77,47	105,83	124,90	138,56	148,33	154,92	158,75	160
S_1 in kVA		160	160	160	160	160	160	160	160	160
		B6H								
$U_{\text{d}\alpha}$ in V		400	350	300	250	200	150	100	50	0
α in °		0	41,41	60	75,52	90	104,48	120	138,59	180
P in kW		160	140	120	100	80	60	40	20	0
Q_1 in kvar		0	52,92	69,28	77,46	80	77,46	69,28	52,92	0
S_1 in kVA		160	149,67	138,56	126,49	113,14	97,98	80	56,57	0

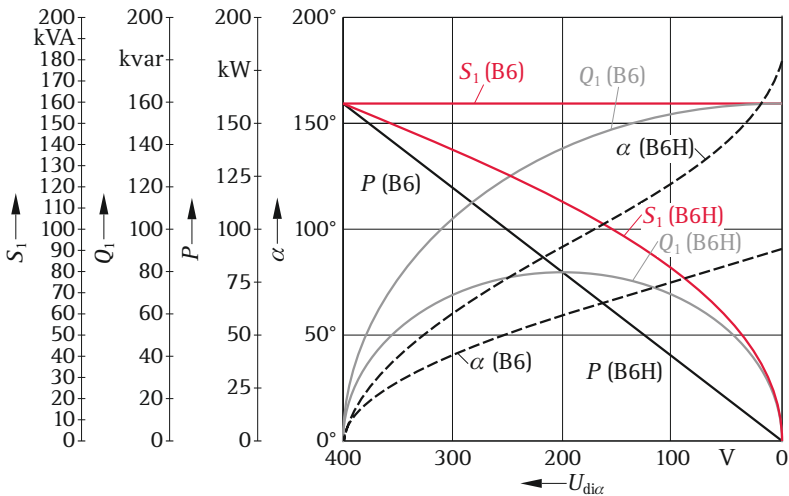


Bild L5.12 Kurvenverläufe der Größen α , P , Q_1 und S_1 bei der B6- und der B6H-Schaltung zu Beispiel 5.18

Die Wirkleistung P verläuft bei beiden Schaltungen linear in Abhängigkeit der gesteuerten Stromrichterspannung $U_{\text{d}\alpha}$. Die Blindleistung Q_1 dagegen ist bei der B6-Schaltung wesentlich größer als bei der B6H-Schaltung. Dies macht sich dann auch bei der Scheinleistung S_1 bemerkbar. Während sie bei der B6-Schaltung konstant und hoch bleibt, verringert sie sich bei der B6H-Schaltung mit zunehmendem Steuerwinkel α ständig und wird bei $\alpha = 180^\circ$ sogar null.

Bei der vollgesteuerten Drehstrombrückenschaltung B6 tritt die maximale Blindleistung bei $\alpha = 90^\circ$ auf, d. h., bei $U_{di\alpha} = 0$. Wenn die Stromrichterspannung auf null gesteuert ist, hat die Blindleistung ihr Maximum und entspricht der Wirkleistung bei U_{di} . Bei der halbgesteuerten Drehstrombrückenschaltung B6H dagegen tritt die maximale Blindleistung bei $U_{di\alpha} = 0,5 \cdot U_{di}$ auf und beträgt $0,5 \cdot P$ bei U_{di} . Die B6H-Schaltung ist also günstiger bezüglich Blind- und Scheinleistung als die B6-Schaltung.

Beispiel 5.19:

Berechnen Sie für eine B6H-Schaltung $\varphi_1 = f(\alpha)$ für $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ und 150° !

Lösung:

$$\alpha = 0^\circ \dots 60^\circ$$

$$\varphi_1 = 30^\circ - \arctan\left(\frac{3,418 + \cos(2\alpha) - \sqrt{3} \cdot \sin(2\alpha)}{5,921 + \sqrt{3} \cdot \cos(2\alpha) + \sin(2\alpha)}\right) \quad (\text{Gl. (5.44)})$$

$$\alpha = 60^\circ \dots 180^\circ$$

$$\varphi_1 = 30^\circ - \arctan\left\{\frac{2,2786 - \alpha - \sin\left[2 \cdot \left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right)\right]}{5,941 - \sqrt{3} \cdot \alpha + \cos\left[2 \cdot \left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right)\right]}\right\} \quad (\text{Gl. (5.45)})$$

Die Ergebnisse beinhaltet die nachfolgende Tabelle.

α in $^\circ$	0	30	60	90	120	150
φ_1 in $^\circ$	0	12,5	16,5	32,4	50,6	69,9

Beispiel 5.20:

Berechnen Sie an einer B6H-Schaltung Steuerblind- und Scheinleistung für die Steuerwinkel $0^\circ, 30^\circ$ und 60° , wenn eine Wirkleistung von 20 kW übertragen wird!

Lösung:

$$\varphi_1 = 30^\circ - \arctan\left(\frac{3,418 + \cos(2\alpha) - \sqrt{3} \cdot \sin(2\alpha)}{5,921 + \sqrt{3} \cdot \cos(2\alpha) + \sin(2\alpha)}\right) \quad (\text{Gl. (5.44)})$$

$$Q_1 = P \cdot \tan \varphi_1$$

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2}$$

Die Ergebnisse enthält die nachfolgende Tabelle.

α in °	0	30	60
φ_1 in °	0	12,5	16,5
Q_1 in kvar	0	4,43	5,92
S_1 in kVA	20,0	20,5	20,9

Mit zunehmendem Steuerwinkel α steigen Steuerblindleistung und damit auch die Scheinleistung an.

Beispiel 5.21:

Berechnen Sie für eine Einweg-Gleichrichterschaltung mit $\alpha = 90^\circ$, $U_S = 230$ V und einem Belastungswiderstand von 10Ω die Effektivwerte $U_{d \text{ eff}}$ und $I_{d \text{ eff}}$ sowie die Leistungen P , S , Q , Q_1 und die Verzerrungsleistung D ! Der Phasenwinkel φ_1 ist $32,5^\circ$.

Lösung:

$$U_{S\alpha} = U \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)} \quad (\text{Gl. (L5.1)})$$

Diese Gleichung gilt für die Zweiweggleichrichtung. Für die Einweggleichrichtung ist der Wert unter der Wurzel durch 2 zu teilen, da hier der Effektivwert über T und nicht über $T/2$ zu ermitteln ist.

$$U_{d \text{ eff}} = \frac{U_{S\alpha}}{\sqrt{2}} = \frac{230 \text{ V}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{90^\circ}{180^\circ} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2 \cdot 90^\circ)} = \underline{\underline{115 \text{ V}}}$$

$$I_{d \text{ eff}} = \frac{U_{d \text{ eff}}}{R} = \frac{115 \text{ V}}{10 \Omega} = \underline{\underline{11,5 \text{ A}}}$$

$$P = U_{d \text{ eff}} \cdot I_{d \text{ eff}} = 115 \text{ V} \cdot 11,5 \text{ A} = \underline{\underline{1322,5 \text{ W}}}$$

$$S = U_S \cdot I_S = U_S \cdot I_{d \text{ eff}} = 230 \text{ V} \cdot 11,5 \text{ A} = \underline{\underline{2645 \text{ VA}}}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \underline{\underline{2290,6 \text{ var}}}$$

$$Q_1 = U_S \cdot I_S \cdot \sin \varphi_1 = 230 \text{ V} \cdot 11,5 \text{ A} \cdot \sin 32,5^\circ = \underline{\underline{1\,421,2 \text{ var}}}$$

$$D = \sqrt{Q^2 - Q_1^2} = \underline{\underline{1\,796,4 \text{ var}}}$$

Beispiel 5.22:

Welche ersten vier Gleichspannungsüberschwingungen und welche ersten vier Wechselstromüberschwingungen treten bei einer dreipulsigen Stromrichterschaltung auf?

Lösung:

Nach Tabelle 5.1 ergeben sich für die Gleichspannung $\nu = 3, 6, 9$ und 12 und für den Wechselstrom $k = 2, 4, 5$ und 7 .

Beispiel 5.23:

Werten Sie die Kurven von a) und b) in Bild 5.19 aus!

Lösung:

Die Kurven von Bild 5.19 a zeigen Gleichspannung und Oberschwingungen auf der Gleichspannungsseite.

Die Gleichspannung \bar{U} nimmt mit steigendem Steuerwinkel α ab und erreicht bei $\alpha = 180^\circ$ $\bar{U} = 0$.

Bei $\alpha = 0$ erkennt man eindeutig die Sechspuls-Schaltung mit $\nu = 6$ und 12 , so wie in Tabelle 5.1 angegeben. Wird $\alpha > 0$, geht die Schaltung in eine dreipulsige über mit $\nu = 3, 6, 9$ und 12 . Dies kann man auch bei der Betrachtung von Bild 5.11 a und Bild 5.13 b erahnen. Weiterhin erkennt man, dass mit steigender Ordnungszahl der Oberschwingungen deren Beträge abnehmen.

Die Kurven von Bild 5.19 b zeigen Grundschwingung und Oberschwingungen auf der Wechselstromseite.

Die Grundschwingung I_1 nimmt mit steigendem Steuerwinkel α ab und erreicht bei $\alpha = 180^\circ$ $I_1 = 0$.

Auch hier erkennt man bei $\alpha = 0$ die reine Sechspuls-Schaltung mit $k = 5$ und 7 , wie in Tabelle 5.1 angegeben. Wird $\alpha > 0$, entsteht Dreipuls-Charakter mit $k = 2, 4, 5$ und 7 . Auch hier zeigt sich, dass mit steigender Ordnungszahl der Oberschwingungen deren Beträge abnehmen.

Man sieht weiter, dass das Verhältnis der Beträge der Oberschwingungen zueinander je nach Steuerwinkel unterschiedlich ist.