

# Berechnung der Kommutierungskreise von elektronischen Impulsschaltungen für Fusionsanlagen

Autor(en): **Maier, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **74 (1983)**

Heft 15

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904843>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Berechnung der Kommutierungskreise von elektronischen Impulsschaltungen für Fusionsanlagen

F. Maier

In Anlagen der Fusionsforschung müssen für die Plasmazündung Hochleistungsimpulse erzeugt und übertragen werden. Die Impulserzeugung erfolgt in herkömmlichen Anlagen durch Kommutierung des im Speicherkreis fließenden Gleichstromes auf einen Widerstand. Gemäss neueren Schaltungsvorschlägen kann diese Stromkommutierung auch durch elektrische Ventile erreicht werden. An [1] anschliessend wird die praktische Berechnung der hierfür erforderlichen Kommutierungskreise dargestellt.

Dans des installations de recherche sur la fusion, l'allumage du plasma requiert des impulsions de grande puissance, produites dans des installations usuelles par commutation sur une résistance du courant continu circulant dans le circuit d'accumulation. Selon les propositions récentes, cette commutation du courant peut également être obtenue par des valves électriques. Ce travail fait suite à [1] et présente le calcul des circuits de commutation nécessaires.

## 1. Einleitung und Übersicht

In [1] wurden neue elektronische Schaltungen für das kontaktlose Kommutieren sehr grosser Gleichströme beschrieben. Die dabei erzeugten Impulse werden durch transformatorische Wirkung in den Plasmakreis übertragen und bewirken im vollionisierten Plasma den Aufbau eines kräftigen achsenparallelen Stromes. Das polare Feld dieses Stromes addiert sich zum toroidalen der Einschlusspulen und bewirkt so eine Verdrillung der Feldlinien. Dadurch kann ein Driften des heissen Plasmas gegen die materielle Begrenzungswand verhindert werden. Der induzierte Strom heizt auch das Plasma.

Für die eigentliche Impulserzeugung wurde im Verlaufe der Zeit eine grössere Anzahl verschiedener Schaltungen entwickelt. Diese verwenden in der Mehrzahl einen synchron wirkenden mechanischen Schalter mit erzwungenem Stromnulldurchgang. Damit kann der gespeicherte Gleichstrom auf einen Widerstand kommutiert werden. Die dadurch bedingte Stromabnahme erzeugt die für die Transformation des Plasmastromes erforderliche Flussänderung im Transformator. Die Anforderungen an einen solchen Kommutierungsschalter sind hoch.

Die Funktion des mechanischen Schalters kann von elektrischen Halbleiterventilen übernommen werden. Damit erfolgt die Kommutierung des Stromes kontaktlos. Die einfache und bewährte Steuerung solcher Ventile ermöglicht den Aufbau einer für den periodischen Betrieb geeigneten und sicher wirkenden Schaltung. In Figur 1 ist die in [1] beschriebene Schaltung mit kapazitiver Zwischenspeicherung dargestellt. Der Löschimpuls aus dem mit korrekter Polarität aufgeladenen Kondensator (11) über das gesteuerte Ventil (9) wird durch die Wicklung (16) in den Plasmakreis als Zündimpuls eingekoppelt. Nach erfolgter Abschaltung der Stromrichterbrücke

(Ventile 1...6) durch diesen Löschimpuls erfolgt der Stromfluss abwechselnd über die gesteuerten Ventile (8) und (9).

Nachstehend werden die für die Kommutierungskreise gültigen Zusammenhänge angegeben und daraus die praktische Berechnung solcher Kreise abgeleitet.

## 2. Die Kommutierungskreise von elektronischen Impulsschaltungen

Mit Kommutierung wird der Stromübergang von einem Schaltkreis auf einen anderen bezeichnet. Da der Strom im Speicherkreis ein unipolarer Strom ohne Nulldurchgang ist, kann die Kommutierung des Stromes nur durch einen Hilfskreis, den *Kommutierungskreis*, erreicht werden. Dieser besteht aus einer Reihenschaltung eines gesteuerten Ventils, mit einer Induktivität und einem Kondensator (z.B. 9, 16 und 11 in Fig. 1).

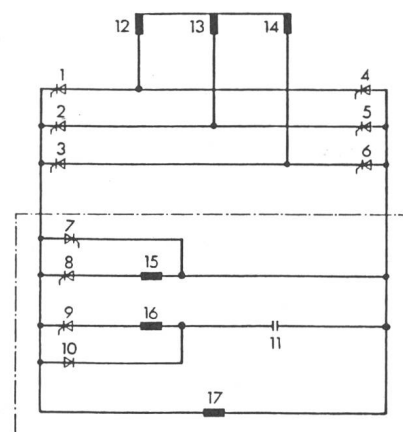


Fig.1 Kommutierungsschaltung für Impulserzeugung und Übertragung durch kapazitive Zwischenspeicherung (einstufige Kommutierung)

- 1...6 Stromrichterventile
- 7, 10 Rückladeventile
- 8, 9 Freilauf- und Kommutierungsventile
- 11 Kommutierungskondensator
- 12, 13, 14 Transformatorwicklungen
- 15, 16 Kommutierungsinduktivitäten
- 17 Speicherinduktivität

### Adresse des Autors

Dipl. Ing. Dr. techn. Franz Maier, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Abt. NLP (Turgi), 5401 Baden.

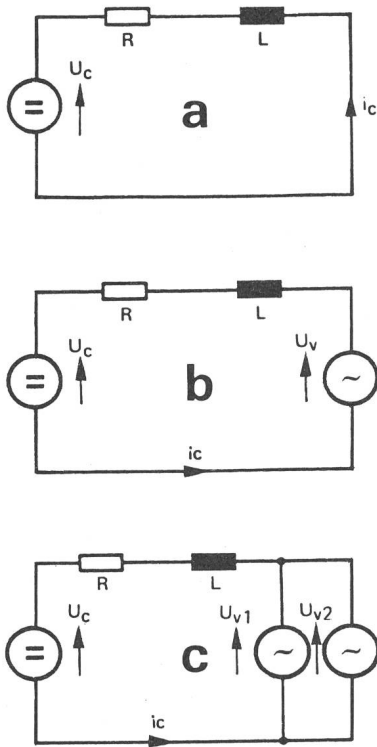


Fig. 2 Ersatzschaltbilder für den Kommutierungskreis

- a ohne Gegenspannung
- b mit zeitlich sinusförmiger Gegenspannung
- c mit zeitlich sinusförmiger Gegenspannung und bei kommutierendem Stromrichter

Der Kommutierungsvorgang erfordert eine *Kommutierungsspannung*. Im abzulösenden Stromrichterventil (Schaltthyristor) muss der Strom unter den Haltestrom gebracht werden. Das Ventil wird beim Vorgang der *Zwangskommutierung* durch den Entladestromimpuls eines Kondensators gelöscht. Damit das Ventil wieder in der Vorwärtsrichtung sperren (blockieren) kann, muss seine *Freiwerdezeit*  $t_q$  eingehalten werden. Während dieser Zeit muss in Rückwärtsrichtung (Sperrichtung) des Ventils Sperrspannung anstehen. Die Zeit, während der die negative Kondensatorspannung in Sperrichtung wirkt, wird als *Freihaltezeit*  $t_H$  bezeichnet.

Die genannten zwei Bedingungen (Löschen des Ventilstromes und Spannung in Sperrichtung) müssen vom Kommutierungskreis erfüllt werden [2, 3, 4]. Wie den Ersatzschaltbildern der Figur 2 zu entnehmen ist, kann im Kommutierungskreis auch eine zeitabhängige Gegenspannung wirken. Für die richtige Bemessung des Kommutierungskreises müssen alle erwähnten Einflüsse berücksichtigt werden. In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Zusammenhänge für die Berechnung der Kommutierungs-

kreise angegeben. Die praktische Anwendung der abgeleiteten Gleichungen erfolgt in Kapitel 3 durch ein Berechnungsbeispiel.

### 2.1 Schaltung ohne Gegenspannung im Löschkreis

Für die Kommutierungsvorgänge zwischen den Ventilen (8) und (9) der Figur 1 enthält der Kommutierungskreis keine Gegenspannung.

#### Verlauf von Spannung und Strom

Im vereinfachten Ersatzschaltbild gemäss Figur 2a gilt die homogene Differentialgleichung

$$U_C + U_L = 0 = U_C + L \frac{di_c}{dt} \quad (1)$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass der Löschkreis dämpfungsfrei ist ( $R = 0$ ). Diese Bedingung ist weitgehend erfüllt. Gleichung (1) hat die allgemeine Lösung

$$U_C = U_{C0} \cos(\nu t + \gamma) \quad (2)$$

Für einen willkürlich gewählten Anfangszustand mit  $\gamma = 0$  gilt für den Strom

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = -\hat{U}_{C0} \sqrt{L/C} \sin \nu t \quad (3)$$

mit dem Scheitelwert

$$\hat{I}_C = -\hat{U}_{C0} \sqrt{C/L} \quad (4)$$

#### Löschkreisinduktivität

Die Löschkreisinduktivität ist so festzulegen, dass die maximal zulässige Stromsteilheit  $(di/dt)_{krit}$  für das Lös- und Freilaufventil nicht überschritten wird. Somit gilt

$$L = \frac{\hat{U}_{C0}}{(di/dt)_{t=0}} = \frac{\hat{U}_{C0}}{(di/dt)_{krit}} \quad (5)$$

#### Löschkreis Kapazität

Die Kapazität des Löschkondensators muss so bestimmt werden, dass die erforderliche Freihaltezeit der zu löschenden Ventile (Schaltthyristoren) eingehalten wird. Die Kondensatorspannung wird mit Rücksicht auf die Zündbedingung des Löschventils wie folgt festgelegt:

$$\hat{U}_{C0} \geq U_{dio} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{V0} \quad (6)$$

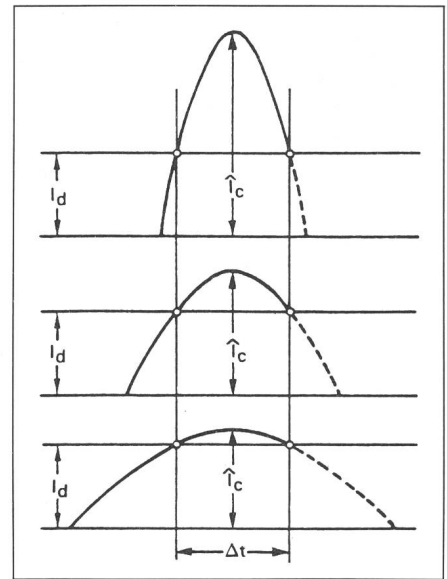


Fig. 3 Sinusförmige Löschimpulse verschiedener Breite und Höhe

Diese Gleichung mit der ideellen Leerlaufspannung  $U_{dio}$  gilt für eine Drehstrombrückenschaltung. Bei anderen Schaltungen sind entsprechende Gleichungen zu verwenden.

Gemäss Figur 3 gilt die Beziehung

$$\cos \frac{\nu \Delta t}{2} = I_d / \hat{I}_C = 1/\chi \quad (7)$$

mit  $\nu = 1/\sqrt{LC}$ . Somit wird

$$\Delta t / \sqrt{LC} = 2 \arccos \frac{1}{\chi} = g(\chi) \quad (8)$$

Die vom Kommutierungskreis aufzubringende Löschenenergie ist

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} C \hat{U}_{C0}^2 = \frac{1}{2} L \hat{I}_C^2 \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{LC} \hat{U}_{C0} \hat{I}_C \quad (9) \end{aligned}$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{2 \arccos 1/\chi} \hat{U}_{C0} \chi I_d \quad (10)$$

oder in bezogener Form

$$\frac{W}{\hat{U}_{C0} I_d \Delta t} = \frac{\chi}{4 \arccos 1/\chi} h(\chi) \quad (11)$$

Die Funktionen  $g(\chi)$  und  $h(\chi)$  sind in Figur 4 dargestellt. Das Minimum für die spezifische Kommutierungsenergie kann durch Bildung der Ablei-

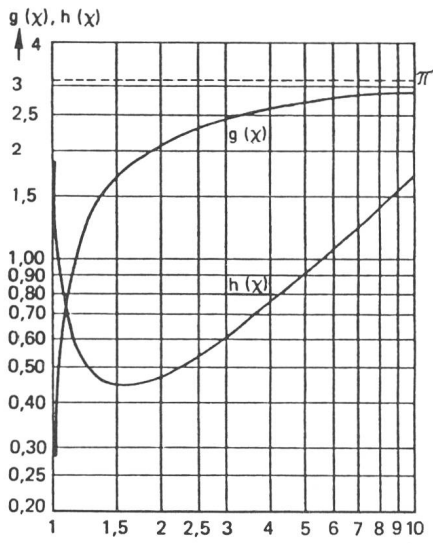


Fig. 4 Kommutierungsenergie und Parameter des Löschkreises

tung der Funktion (11) nach  $\chi$  bestimmt werden. Dies führt zur transzendenten Bedingungsgleichung für  $\chi$

$$\arccos \frac{1}{\chi} = \frac{1}{\chi \sqrt{1 - 1/\chi^2}} \quad (12)$$

Die Lösung lautet  $\chi = 1,533$ , wobei  $h(\chi) = 0,446$  und  $g(\chi) = 1,720$ . Somit ergibt sich für die optimalen Werte der Löschkapazität  $C_0$  und der Löschinduktivität  $L_0$

$$C_0 = \frac{\chi_0}{g(\chi_0)} \frac{I_{d0} \Delta t}{\hat{U}_{C0}} = 0,891 \frac{I_{d0} \Delta t}{\hat{U}_{C0}} \quad (13)$$

$$L_0 = \frac{1}{\chi_0 g(\chi_0)} \frac{\hat{U}_{C0} \Delta t}{I_{d0}} = 0,379 \frac{\hat{U}_{C0} \Delta t}{I_{d0}} \quad (14)$$

#### Lösch- und Freihaltezeit

Es gilt die Löschbedingung

$$I_d = i_c = \hat{I}_c \sin v t_L = -\hat{U}_{C0} \sqrt{C/L} \sin v t_L \quad (15)$$

Somit erhält man für die Löschzeit

$$t_L = \frac{1}{v} \arccos \left( \frac{I_d}{\hat{U}_{C0}} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \quad (16)$$

Im Löschzeitpunkt beträgt die Kondensatorspannung

$$U_C = U_{C1} = \hat{U}_{C0} \cos(v t_L) \quad (17)$$

Ab diesem Zeitpunkt ändert sich wegen des konstanten Stromes  $I_d = i_c$  die Kondensatorspannung  $u_c$  linear mit der Zeit. Es gilt

$$U_C = U_{C1} - \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_d dt = U_{C1} - \frac{I_d}{C} (t_2 - t_1) = 0 \quad (18)$$

Im Zeitpunkt  $t_2$  wird die Kondensatorspannung  $u_c = 0$  (Umpolung). Somit erhält man für den Zeitraum mit negativer Kondensatorspannung die entsprechende Freihaltezeit

$$t_H = t_2 - t_1 = \frac{u_{C1} C}{I_d} \quad (19)$$

#### 2.2 Schaltung mit zeitabhängiger Gegenspannung im Löschkreis

Soll der Speicherstrom in Figur 1 von der Stromrichterbrücke auf den Freilaufkreis (9), (11), (16) kommutiert werden, so erfolgt die Stromlöschung über die Wicklungsstränge (12), (13), (14) des Speisekreises. Es gilt das Ersatzschaltbild gemäss Figur 2b oder 2c. Die Induktivitäten der Wicklungen und die im Löschkreis wirksame Gegenspannung müssen entsprechend berücksichtigt werden. Der grösste Induktivitätswert der Wicklungen ergibt sich bei nicht kommutierendem Stromrichter zu  $2L_{\sigma T}$ .

#### Verlauf von Spannung und Strom

Bei Vernachlässigung von  $R$  gilt die Differentialgleichung

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{u_c}{LC} = \frac{\hat{U}_V}{LC} \sin \omega t = k \sin \omega t \quad (20)$$

Die Lösung der homogenen Differentialgleichung wurde bereits mit Gleichung (2) angegeben. Die inhomogene Differentialgleichung wird mit nachstehendem Ansatz gelöst:

$$u_c = C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (21)$$

Daraus folgt die spezielle Lösung der inhomogenen Differentialgleichung (20)

$$u_c = \hat{U}_{C0} \cos v t + \frac{\hat{U}_V}{1 - \omega^2 LC} \sin(\omega t + \varphi_z) \quad (22)$$

$\varphi_z$  bezeichnet den Zündwinkel des Löschthyristors gezählt vom Nulldurchgang der verketteten Spannung  $U_V$  des Transformators. Für den Kondensatorstrom  $i_c$  kann entsprechend Gleichung (3) geschrieben werden

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = -\hat{U}_{C0} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin v t + \frac{C \omega \hat{U}_V}{1 - \omega^2 LC} \cos(\omega t + \varphi_z) \quad (23)$$

#### Löschkreis

Für die Berechnung der Löschkreis-komponenten  $C$  und  $L$  wird in 1. Näherung gemäss Figur 3  $\Delta t = 1,5 t_H$  gesetzt. Somit erhält man nach Gleichung (13) und (14)

$$C_0 = 0,891 \frac{I_{d0} 1,5 t_H}{\hat{U}_{C0}} \quad (24)$$

$$L_0 = 0,379 \frac{\hat{U}_{C0} 1,5 t_H}{I_{d0}} \quad (25)$$

#### Lösch- und Freihaltezeit

Es gilt die Löschbedingung gemäss Gleichung (15)

$$I_d = i_c = -\hat{U}_{C0} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin v t_L + \frac{C \omega \hat{U}_V}{1 - \omega^2 LC} \cos(\omega t_L + \varphi_z) \quad (26)$$

Diese transzendente Gleichung für die Löschzeit  $t_L$  muss iterativ gelöst werden. Mit der so berechneten Löschzeit kann sodann die Kondensatorspannung  $U_{C1}$  nach Gleichung (17) berechnet werden. Die Freihaltezeit  $t_H$  ergibt sich schliesslich aus Gleichung (19).

#### Realer Löschkreis mit parallelen Strommaschinen

Da der Strom gleichzeitig in mehreren Maschen fliessen kann (z.B. Fig. 2c), wird der Schalt- und Kommutierungsvorgang durch simultane Differentialgleichungen beschrieben. Sie können schrittweise numerisch in bekannter Weise mittels eines Digitalrechners gelöst werden.

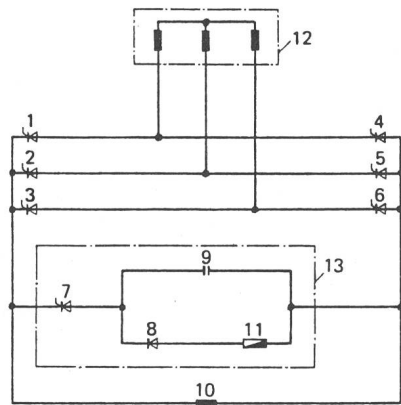


Fig. 5 Thyristorschalter für einstufige Kommutierung

- 1...6 Stromrichterventile
- 7 Lös- und Freilaufventil
- 8 Entkopplungs- und Freilaufdiode
- 9 Löschkondensator
- 10 Lastinduktivität
- 11 Entregungswiderstand
- 12 Sekundärwicklungen des Transformators
- 13 Thyristorschalter und Freilaufkreis

### 3. Berechnung des Kommutierungskreises einer Impulsschaltung

Als Beispiel soll der Kommutierungskreis für eine Impulsschaltung gemäss Figur 5 berechnet werden.

#### Anforderungen an die Schaltung

- $I_{d0} = 60 \text{ kA}$  stationärer Speicherstrom
- $U_{R \max} = 4 \text{ kV}$  maximale Impulsspannung
- $t_E = 2 \text{ s}$  Entregungszeit
- $T_p = 600 \text{ s}$  Impulsperiode (Wiederholungsrate)

Es werden also die Thyristoren der Stromrichterbrücke als Schaltthyristoren verwendet. Sie haben eine Freiwerdzeit von  $t_q = 400 \mu\text{s}$ .

#### Löschkreiskapazität

Mit  $\hat{U}_{c0} = U_{R \max} = 4 \text{ kV}$  und  $\Delta t = 1,25 t_q$  (Erfahrungswert) folgt nach Gleichung (13)

$$C_0 = 0,891 \frac{I_{d0} \cdot 1,5 \Delta t}{\hat{U}_{c0}} = 10,023 \cdot 10^{-3} \text{ F}$$

#### Löschkreisinduktivität

Entsprechend Gleichung (14) gilt

$$L_0 = 0,379 \frac{\hat{U}_{c0} \cdot 1,5 \Delta t}{I_{d0}} = 0,0189 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

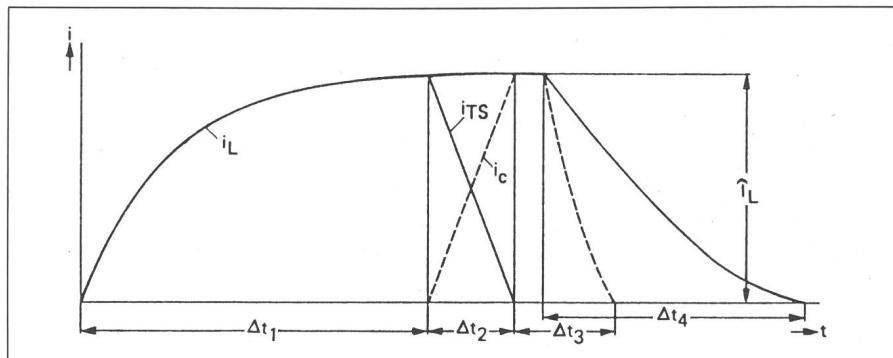


Fig. 6 Primärer Stromverlauf für den Speicher-, Kommutierungs- und Entregungsvorgang (Prinzipielle Darstellung mit verschiedenem Zeitmassstab)

- $i_L$  Speicherstrom
- $i_{TS}$  Schaltthyristorstrom
- $i_c$  Löschkondensatorstrom
- $\hat{i}_L$  Scheitelwert des Speicherstromes
- $\Delta t_1$  Aufladezeit für die Speicherinduktivität
- $\Delta t_2$  Kommutierungszeit vom Schaltthyristor auf den Löschkreis
- $\Delta t_3$  Kommutierungszeit vom Lös- auf den Entregungskreis mit Umpolung des Löschkondensators und Freihaltezeit für den Schaltthyristor
- $\Delta t_4$  Entregungszeit für die Speicherinduktivität L

Somit ergibt sich die Schwingkreisfrequenz

$$\nu = 1/\sqrt{LC} = 2297$$

#### 3.4 Lös- und Freihaltezeit

Es wird angenommen, dass die Löschung bei nicht kommutierendem Stromrichter erfolgt. Im Kommutierungskreis wirkt somit die sinusförmige Gegenspannung  $U_v$ . Es kann die Löszeit  $t_L$  aus der transzendenten Gleichung (26) berechnet werden, wobei für den Speisegleichrichter gelte:  $U_v = 1000 \text{ V}$ ,  $\alpha = 30^\circ$  el. Im Zeitpunkt  $t = 0$  leiten die Ventile (3) und (5) der Stromrichterbrücke. Das Lös- und Freilaufventil (7) wird gezündet und die Impulse aller Brückenventile gesperrt. Somit ist die im Löschkreis wirkende Gegenspannung  $U_v = U_{ST}$  um  $(180 + \alpha)^\circ$  el. phasenverschoben. Bei einem Steuerwinkel  $\alpha = 30^\circ$  el. des Stromrichters ergibt sich somit

$$\varphi_Z = 180 + \alpha \triangleq 3,66 \text{ rad}$$

Aus Gleichung (26) erhält man für die Löszeit  $t_L \approx 1690 \mu\text{s}$ .

Im Löszeitpunkt  $t_1$  ist die Kondensatorspannung abgefallen auf

$$U_{c1} = -\hat{U}_{c0} \cos(\nu t_L) = 2950 \text{ V.}$$

Somit wird die Freihaltezeit

$$t_H = t_2 - t_1 = \frac{U_{c1} C}{I_{d0}} = 492,8 \mu\text{s}$$

Die Freiwerdzeit der Schaltthyristoren wird also mit guter Sicherheit eingehalten.

#### 3.5 Anzahl Parallelventile im Löschkreis und Energie des Speicherkreises

Mit  $N_p = 12$  parallelen Lösventilen (7) ergibt sich die Stromteilheit zu Beginn des Lös Vorganges

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\hat{U}_c}{L_0 N_p} = 17,63 \text{ A}/\mu\text{s}$$

Bei  $U_{R \max} = 4 \text{ kV}$  primärer Impulsspannung erhält man bei  $I_{d0} = 60 \text{ kA}$  den Entregungswiderstand  $R = 66,66 \text{ m}\Omega$ .

Mit einer gewählten Zeitkonstanten  $\tau = 400 \text{ ms}$  wird die Speicherinduktivität

$$L = \tau R = 26,66 \text{ mH}$$

Somit ergibt sich der gespeicherte Energieinhalt

$$W_\mu = \frac{L I_{d0}^2}{2} = 47,98 \text{ MWs}$$

In Figur 6 wurde der grundsätzliche Verlauf für Speicherung, Kommutierung und Entregung einer solchen Schaltung dargestellt.

#### Literatur

- [1] F. Maier: Elektronische Schaltungen zur Erzeugung und Übertragung von Hochleistungsimpulsen in Fusionsanlagen. Bull. SEV/VSE 75(1982)23, S. 1230...1237.
- [2] B. D. Bedford and R. G. Hoft: Principles of inverter circuits. New York/London/Sydney, John Wiley, 1964.
- [3] K. Heumann und A. C. Stumpe: Thyristoren, Eigenschaften und Anwendungen. 3. Auflage. Stuttgart, Teubner, 1974.
- [4] K. Heumann: Halbleiterschalter in der Energietechnik. Wissenschaftliche Berichte AEG-Telefunken 48(1975)2/3, S. 106...118.