

Interner Bericht  
DESY K-69/3  
November 1969

DESY-Bibliothek  
13. DEZ. 1969

Wechselrichter - Schutzprobleme

von

I. Borchardt  
P. Zajíček

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Eine vereinfachte Beschreibung des Wechselrichters im stationären Betrieb
3. Sonderfall: Die Wechselrichter-Gefäße zünden nicht.
  - 3.1 Problemstellung
  - 3.2 Lösung auf dem Analogrechner
  - 3.3 Digitales Kontrollprogramm
  - 3.4 Interpretation der Ergebnisse
4. Sonderfall: Unterbrechung in der Zuleitung zu einem Wechselrichter-Gefäß und einer Diode.
  - 4.1 Problemstellung
  - 4.2 Lösung auf dem Analogrechner
  - 4.3 Interpretation der Ergebnisse
5. Literaturhinweise

## 1. Einleitung

Die Führungsmagnete des Elektronensynchrotrons werden mit einem Gemisch aus Gleich- und Wechselstrom gespeist. Die Wechselstromkomponente wird von einem Wechselrichter geliefert.

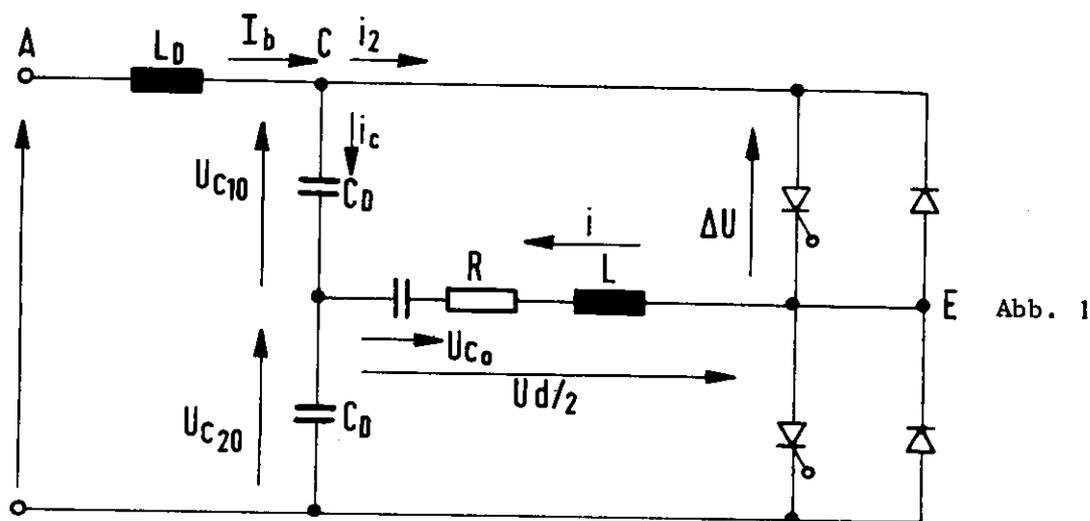
Der hier betrachtete Schwingkreisumrichter setzt als Last einen Reihenresonanzkreis voraus.

In dieser Arbeit werden zwei Sonderfälle des Wechselrichters in Hinblick auf das Schutzproblem betrachtet.

## 2. Eine vereinfachte Beschreibung des Wechselrichters im stationären Betrieb

Der Verlauf des Schwingkreisstromes  $i$  ist nach einem vereinfachten Schaltplan Abb. 1.

$$i = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-1)$$



Im eingeschwungenem Zustand kann über einen Kondensator nur Wechselstrom fließen.

Der gesamte Gleichstromanteil des Stromes  $i_2$  ist:

$$\bar{i}_2 = \hat{i} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\pi+\varphi} \sin \omega t dt = \hat{i} \cdot \frac{\cos \varphi}{\pi} \quad (2-2)$$

Unter der Annahme, daß  $L_D$  unendlich ist, fließt der gesamte Wechselstromanteil von  $i_2$  über den Kondensator  $C_D$ :

$$i_c = \bar{i}_2 - i_2$$

und erzeugt die Wechselspannung

$$U_{CD\sim} = \frac{1}{C_D} \int i_c dt + C$$

die mit der Speisespannung  $U/2$  zusammengesetzt wird zu:

$$U_{c1} = U/2 + U_{CD\sim}$$

Die durch den Strom  $i$  entstehenden Teilspannungen sind: [L2]

$$U_{A1D} = \frac{\hat{i}}{\omega C_D} \cdot \cos(\omega t + \varphi') \quad (2-3)$$

$$U_B = \frac{\bar{i}_2}{\omega C_D} \cdot (\omega t - \pi) = \frac{\hat{i}}{\omega C_D} \cdot \cos\left(\frac{\omega t}{\pi} - 1\right) \quad (2-4)$$

$$U_C = -\frac{\hat{i}}{\omega C_D} \left[ \int_{\varphi'}^{\pi + \varphi'} \cos \omega t dt \right] = \frac{\hat{i}}{\omega C_D} \cdot \frac{\sin \varphi'}{\pi} \quad (2-5)$$

Die Verläufe der Teilspannungen sind in Abb. 2, 3, 4 gezeichnet.

Die gesamte Wechselspannungskomponente ist dann:

$$U_{CD\sim} = \frac{\hat{i}}{\omega C_D} \left[ \cos(\omega t + \varphi') + \cos \varphi' \left( \frac{\omega t}{\pi} - 1 \right) + \frac{1}{\pi} \sin \varphi' \right] \quad (2-6)$$

In Abb. 5 ist der Verlauf  $U/2 + U_{CD\sim}$  gezeichnet.

Strom und Spannung eines Spannungsteilerkondensators bei  $\gamma=35^\circ$

Nach Abb. 1 sind folgende Werte ausgerechnet worden:

$$U_d/2 = 1,1 \cdot \frac{1180}{\cos 35^\circ} = 1586 \text{ [V]}$$

Der Laststrom verursacht eine Erhöhung der Ventilsperrensorgung und dann gilt:

$$U/2 = U_d/2 + \Delta U = 1606 \text{ [V]}$$

Für die Teilspannungen gilt

$$\hat{U}_A = 650,9 \text{ [V]}$$

$$U_C = 390 \text{ [V]}$$

$$\hat{U}_{B[0,2\pi]} = \hat{U}_A \cdot \cos \varphi \left( \frac{t}{T} - 1 \right) = \pm 534 \text{ [V]}$$

Für die Ströme, die in Abb. 6 gezeichnet sind, kann man folgende Werte ausrechnen:

$$\hat{I}_b = 534 \text{ [A]}$$

$$\hat{i} = 1444 \cdot \sqrt{2} = 2040 \text{ [A]}$$

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden folgende Größen gebraucht, die für den Zeitpunkt  $t = T/2 + \gamma$  ausgerechnet wurden:

$$U_{C0} = \frac{\hat{i}}{\omega_0 C} \cdot \cos \varphi = 125,4 \cdot 10^3 \text{ [V]}$$

$$U_{C10} = 1462 \text{ [V]}$$

$$(U_{C10})' = 1,709 \cdot 10^5 \text{ [V} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$U_{C20} = -1996 \text{ [V]}$$

und für die Ströme gilt:

$$I_{C0} = 1709 \text{ [A]}$$

$$I_0 = -1175 \text{ [A]}$$

$$(i_0)' = -\hat{i} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$$(i_{i0}) = \hat{i} \cdot \frac{1}{\omega} \cos(\omega t + \varphi)$$

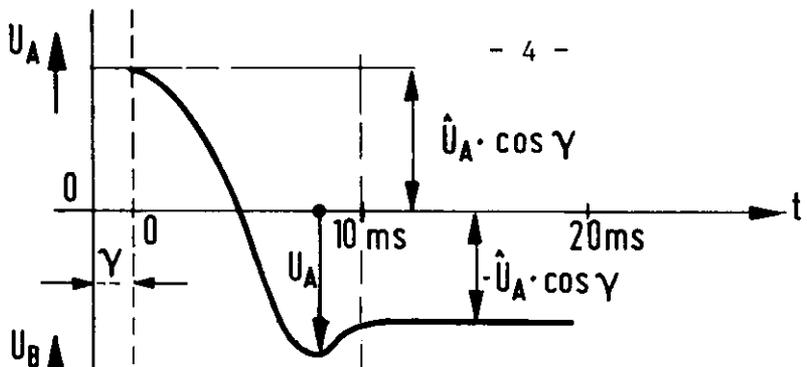


Abb. 2

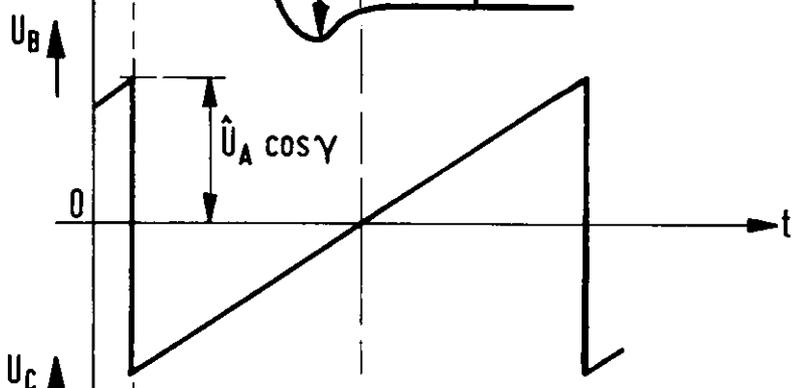


Abb. 3



Abb. 4

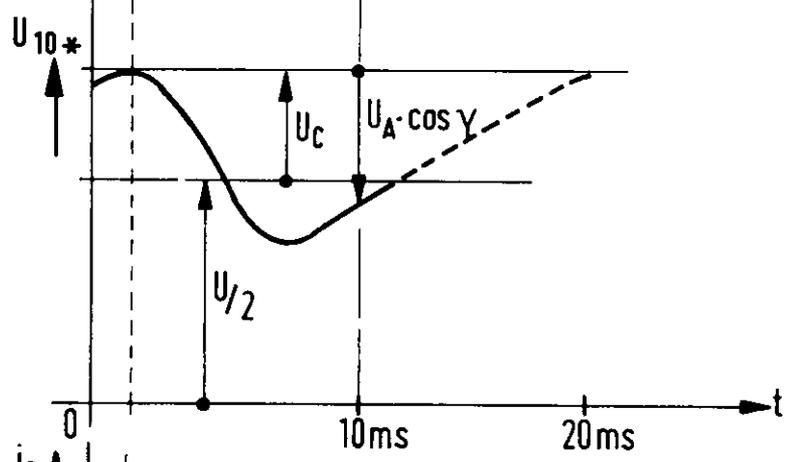


Abb. 5

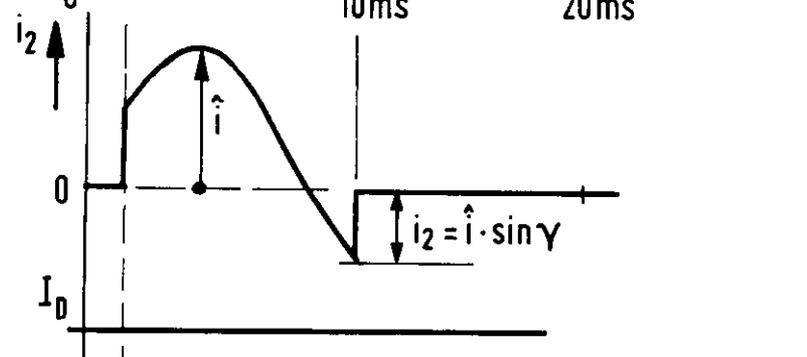
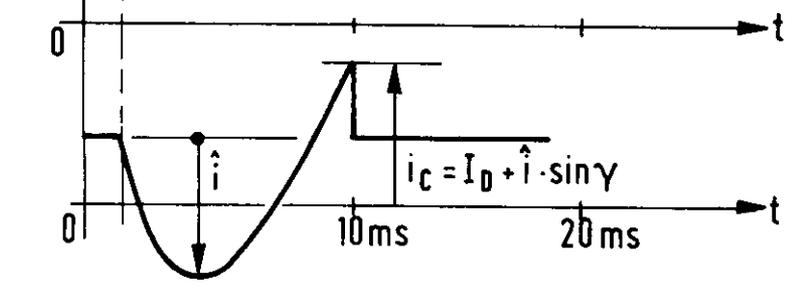


Abb. 6



### 3. Sonderfall: Die Wechselrichtergefäße zünden nicht

#### 3.1 Problemstellung

Wie die Praxis gezeigt hat, tritt manchmal der Fall ein, daß die W-gefäße beide nicht zünden. Man kann sie dann in Abb. 7 durch unendlich große Widerstände ersetzen. Der Verlauf der Ströme wird jetzt allein durch die beiden Dioden gesteuert. Um Schutzmaßnahmen vorzusehen, ist es notwendig, die Spannungsverläufe zu kennen.

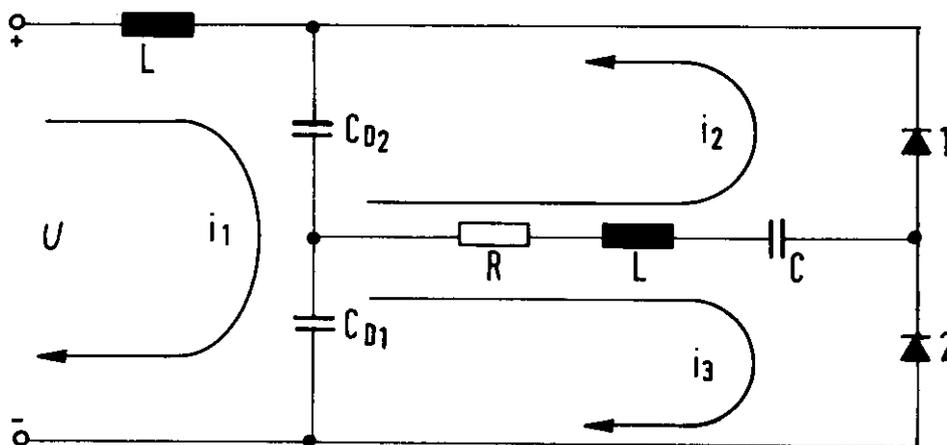


Abb. 7

Für den Schaltplan nach Abb. 7 können sehr verschiedenartige Gleichungssysteme aufgestellt werden, je nachdem, wie man die Ströme definiert und welche Regeln man zur Beschreibung der Zusammenhänge benutzt. Nicht alle diese Gleichungssysteme sind analog oder digital lösbar, besonders dann nicht, wenn die Variablen oder ihre Ableitungen nur implizit auftreten. Aber auch das Programmieren und Rechnen eines weniger eleganten Gleichungssystems kann viel zum Verständnis der Schaltung beitragen und dadurch einen besseren theoretischen Ansatz ermöglichen. Ein Analogprogramm ist für ein solches Studium wesentlich besser geeignet als ein Digitalprogramm.

Folgendes Gleichungssystem wurde nach einigen weniger erfolgreichen Versuchen gefunden:

$$U = L_D p I_1 + \frac{1}{C_{D1}} \cdot \frac{1}{p} (I_1 + I_2) + U_{C10} + \frac{1}{C_{D2}} \cdot \frac{1}{p} (I_1 - I_3) + U_{C20}$$

$$0 = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{p} (I_2 + I_3) + U_{C0} + L p (I_2 + I_3) + R (I_2 + I_3) + \frac{1}{C_{D1}} \cdot \frac{1}{p} (I_2 + I_1) + U_{C10}$$

$$0 = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{p} (I_2 + I_3) + U_{C0} + L p (I_2 + I_3) + R (I_3 + I_2) + \frac{1}{C_{D2}} \cdot \frac{1}{p} (I_3 - I_1) + U_{C20}$$

$$p U_C = \frac{1}{C_D} (I_1 + I_2)$$

dabei bedeuten  $U_{C0}$ ,  $U_{C10}$  und  $U_{C20}$  die Spannungen über den Kondensatoren im Zeitpunkt  $t_0$ .

Wenn man diese Gleichungen nach  $pI_2$ ,  $pI_3$  auflöst, erhält man das System:

$$pI_2 = -pI_3 - \frac{1}{L} \left[ R I_2 + \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{C_{D1}} \right) \frac{I_2}{p} + R I_3 + \frac{1}{C} \cdot \frac{I_3}{p} + \frac{1}{C_{D1}} \cdot \frac{I_1}{p} + U_{C0} + U_{C10} \right]$$

$$pI_3 = -pI_2 - \frac{1}{L} \left[ R I_3 + \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{C_{D2}} \right) \frac{I_3}{p} + R I_2 + \frac{1}{C} \cdot \frac{I_2}{p} - \frac{1}{C_{D2}} \cdot \frac{I_1}{p} + U_{C0} + U_{C20} \right]$$

Bei der Analyse der Differentialgleichungen für  $I_2$  und  $I_3$  treten die ersten Ableitungen nur implizit auf:

$$pI_2 = -pI_3 - F_1(I_1, I_2, I_3)$$

$$pI_3 = -pI_2 - F_2(I_1, I_2, I_3)$$

oder

$$pI_2 = pI_2 + F_2(I_1, I_2, I_3) - F_1(I_1, I_2, I_3)$$

Beim Entwurf eines Blockschaltplanes für die Lösung der Gleichungen für  $I_2$  und  $I_3$  kann eine algebraische Schleife, die aus den Verstärker  $V_1$  und  $V_2$  gebildet wird, nicht vermieden werden (Siehe Abb. 7a). Das System ist instabil und für die Lösung nicht geeignet. [L3]

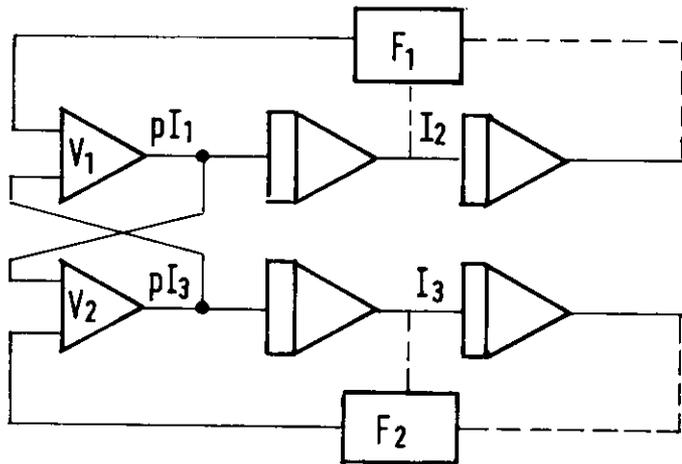


Abb. 7a

Besser ist da folgender Weg:

Man definiert und setzt voraus aus Symmetriegründen:

$$I = I_2 + I_3, \quad \frac{1}{C_{D1}} = \frac{1}{C_{D2}} = \frac{1}{C_D}$$

Nach Division durch den Faktor der höchsten Ableitung erhält man

$$pI_1 + \frac{2}{L_D C_D} \cdot \frac{1}{p} I_1 + \frac{1}{L_D} (U_{C10} + U_{C20}) + \frac{1}{L_D C_D} \cdot \frac{1}{p} (I_2 - I_3) - \frac{1}{L_D} U = 0 \quad (3-1)$$

$$pI + \frac{1}{LC} \cdot \frac{1}{p} I + \frac{1}{L} U_{C0} + \frac{R}{L} I + \frac{1}{LC_D} \cdot \frac{1}{p} (I_2 + I_1) + \frac{1}{L} U_{C10} = 0 \quad (3-2)$$

$$pI + \frac{1}{LC} \cdot \frac{1}{p} I + \frac{1}{L} U_{C0} + \frac{R}{L} I + \frac{1}{LC_D} \cdot \frac{1}{p} (I_3 - I_1) + \frac{1}{L} U_{C20} = 0 \quad (3-3)$$

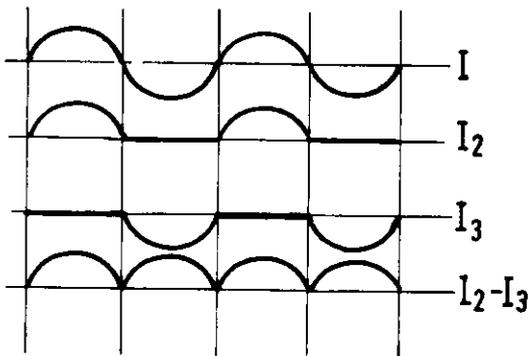
Durch Addition der Gleichungen (3-2) und (3-3) und Division durch 2 ergibt sich

$$pI_1 + \frac{2}{L_D C_D} \cdot \frac{1}{p} I_1 + \frac{1}{L_D} (U_{C10} + U_{C20}) + \frac{1}{L_D C_D} \cdot \frac{1}{p} (I_2 - I_3) - \frac{1}{L_D} U = 0 \quad (3-4)$$

$$pI + \frac{1}{L} \left( \frac{1}{C} + \frac{0,5}{C_D} \right) \frac{1}{p} I + \frac{1}{L} U_{C0} + \frac{R}{L} I + \frac{0,5}{L} (U_{C10} + U_{C20}) = 0 \quad (3-5)$$

Das zunächst aus 3 Dgl'n (3-1) bis (3-3) bestehende System kann durch 2 Gleichungen (3-4) und (3-5) ersetzt werden. Dieses auf rein mathematischem Wege gewonnene Ergebnis kann folgendermaßen interpretiert werden:

Über die Komponenten R, L und C fließt ständig ein Wechselstrom I, der als Lösung der Gleichung (3-5) gewonnen wird. Die positive Halbwelle von I bildet den Strom  $I_2$ , wenn die Diode 1 leitet. Sobald I jedoch negativ wird, sperrt die Diode 1, d.h.  $I_2$  wird Null und die negative Halbwelle von I bildet nun den Strom  $I_3$  (siehe Abb. 8) über Diode 2. Der Strom  $I_2 - I_3$ ,



der die Gleichungen (3-4) und (3-5) miteinander verknüpft, ist also ein pulsierender Gleichstrom, der durch Bildung des absoluten Betrages von I gewonnen werden kann.

Abb. 8

Dieses Gleichungssystem kann gelöst werden, wenn die Anfangsbedingungen

$$I(0), I_1(0), U_{C0}, U_{C10}, U_{C20}$$

bekannt sind. Die Integralausdrücke  $\frac{1}{p} I_1$ ,  $\frac{1}{p} I$  haben im Zeitpunkt  $t = 0$

den Wert Null, die Anfangswerte müssen also die Gleichungen

$$\begin{aligned} p I_1(0) + \frac{1}{L_D} (U_{C10} + U_{C20}) - \frac{1}{L_D} U &= 0 \\ p I(0) + \frac{1}{L} U_{C0} + \frac{R}{L} I(0) + \frac{0,5}{L} (U_{C10} + U_{C20}) &= 0 \\ U_{C1(0)} &= U_{C10} \end{aligned}$$

erfüllen.

### 3.2 Lösung auf dem Analogrechner

Die Gleichungen (3-4) und (3-5) werden umgeschrieben

$$p I_1 + \frac{2}{L_D C_D} \cdot \frac{1}{p} \left( I_1 + \frac{I_2}{2} - \frac{I_3}{2} \right) - \frac{1}{L_D} U = 0 \quad (3-6)$$

$$p I + \frac{1}{L C^*} \cdot \frac{1}{p} I + \frac{R}{L} I = 0 \quad (3-7)$$

$$p U_C = \frac{1}{C_D} (I_1 + I_2) \quad (3-8)$$

mit

$$\left( \frac{1}{p} I_1 \right)_0 = \frac{C_D}{2} \cdot (U_{C10} + U_{C20})$$

$$\left( \frac{1}{p} I \right)_0 = 0,5 C^* (2 U_{C0} + U_{C10} + U_{C20})$$

$$\frac{1}{C^*} = \frac{1}{C} + \frac{0,5}{C_D}$$

und

$$U_{C0}, I_{10} \text{ und } I_0$$

Das Programm, das die Strom- und Spannungsverläufe in der Echtzeit von 0 - 250 msec zeigen soll, läuft auf dem Analogrechner um einen Faktor  $1/\beta$  langsamer ab. Die Maschinenzeit ist  $\tau = \frac{1}{\beta} t$ ,

entsprechend gilt  $\frac{d}{d\tau} = \hat{p} = \beta \frac{d}{dt} = \beta \cdot p$

Außerdem werden die Gleichungen (3-6 und (3-7) in 4 Differentialgleichungen 1. Ordnung aufgelöst.

$$V_1 - \beta \frac{1}{p} I_1 - \frac{\beta}{2} \cdot \frac{1}{p} |I| = 0$$

$$\hat{p} I_1 + \frac{2\beta}{L_D C_D} V_1 - \frac{\beta}{L_D} U = 0$$

$$V - \beta \cdot \frac{1}{p} I = 0$$

$$\hat{p} I + \frac{\beta}{L C^*} V + \frac{\beta R}{L} I = 0$$

Hinzu kommen die Gleichungen

$$|I| = I_2 - I_3$$

$$\hat{p} U_C = \frac{\beta}{C_D} (I_1 + I_2)$$

Zur Amplitudenskalierung werden nun alle Maximalamplituden der Ströme, ihrer Integrale und der Spannungen auf die Rechner-Referenzspannung normiert.

Das skalierte System

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_1}{V_{1m}}\right) - \left\{\frac{\beta I_{1m}}{V_{1m}}\right\} \cdot \left(\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{I_1}{I_{1m}}\right) - \left\{\frac{\beta I_m}{2V_{1m}}\right\} \cdot \left(\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{|I|}{I_m}\right) &= 0 \\ \left(\hat{\rho} \frac{I_1}{I_{1m}}\right) + \left\{\frac{2\beta V_{1m}}{L_D C_D I_{1m}}\right\} \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1m}}\right) - \left\{\frac{\beta U_m}{L_D I_{1m}}\right\} \cdot \left(\frac{U}{U_m}\right) &= 0 \\ \left(\frac{V}{V_m}\right) - \left\{\frac{\beta I_m}{V_m}\right\} \cdot \left(\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{I}{I_m}\right) &= 0 \\ \left(\hat{\rho} \frac{I}{I_m}\right) + \left\{\frac{\beta \cdot V_m}{L C^* I_m}\right\} \cdot \left(\frac{V}{V_m}\right) + \left\{\frac{\beta \cdot R}{L}\right\} \cdot \left(\frac{I}{I_m}\right) &= 0 \\ \left(\frac{|I|}{I_m}\right) &= \left(\frac{I_2}{I_m}\right) - \left(\frac{I_3}{I_m}\right) \\ \left(\hat{\rho} \frac{U_c}{U_{cm}}\right) &= \left\{\frac{\beta I_{1m}}{C_D U_{cm}}\right\} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1m}}\right) + \left\{\frac{\beta I_m}{C_D U_{cm}}\right\} \cdot \left(\frac{I_2}{I_m}\right) \end{aligned}$$

In ( )-Klammern stehen jetzt Rechenspannungen, die in den folgenden Maschinengleichungen abgekürzt mit dem Zeichen geknzeichnet werden, in { }-Klammern stehen Potentiometerwerte, die mit  $S_i$  durchnumeriert werden

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 - S_1 \frac{1}{\hat{\rho}} \hat{I}_1 - S_3 \frac{1}{\hat{\rho}} |\hat{I}| &= 0 \\ \hat{\rho} \hat{I}_1 + S_2 \hat{V}_1 - S_4 \hat{U} &= 0 \\ \hat{V} - S_5 \frac{1}{\hat{\rho}} \hat{I} &= 0 \\ \hat{\rho} \hat{I} + S_6 \hat{V} + S_7 \hat{I} &= 0 \\ |\hat{I}| &= \hat{I}_2 - \hat{I}_3 \\ \hat{\rho} \hat{U}_c - S_9 \hat{I}_1 - S_{10} \cdot \hat{I}_2 &= 0 \end{aligned}$$

Eine Abschätzung der Maximalwerte ergibt:

$$\begin{aligned} I_m &= 2 \text{ kA} & V_m &= \frac{2}{\omega} & U_m &= 5 \text{ kV} \\ I_{1m} &= 4 \text{ kA} & V_{1m} &= \frac{4}{\omega_1} & U_{cm} &= 10 \text{ kV} \end{aligned}$$

Die Konstanten haben die Werte

$$\begin{aligned} L_D &= 0.0261 \text{ H} & R &= 0.624 \text{ } \Omega \\ C_D &= 998 \cdot 10^{-5} \text{ F} & \text{Abgeleitete GröÙen:} & \\ L &= 0.2385 \text{ H} & C^* &= 4.251 \cdot 10^{-5} \text{ F} \\ C &= 4.26 \cdot 10^{-5} \text{ F} & \omega &= 314 \text{ Hz} \\ & & \omega_1 &= 90 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Die Berechnung der Faktoren  $S_i$  entnehme man der Tabelle 1. Zur Berechnung der Anfangsbedingungen wurden die in Abschnitt 2 zusammengestellten Endwerte für  $I_1$ ,  $I$  usw. benutzt. Diese Größen werden ebenfalls amplitudenskaliert.

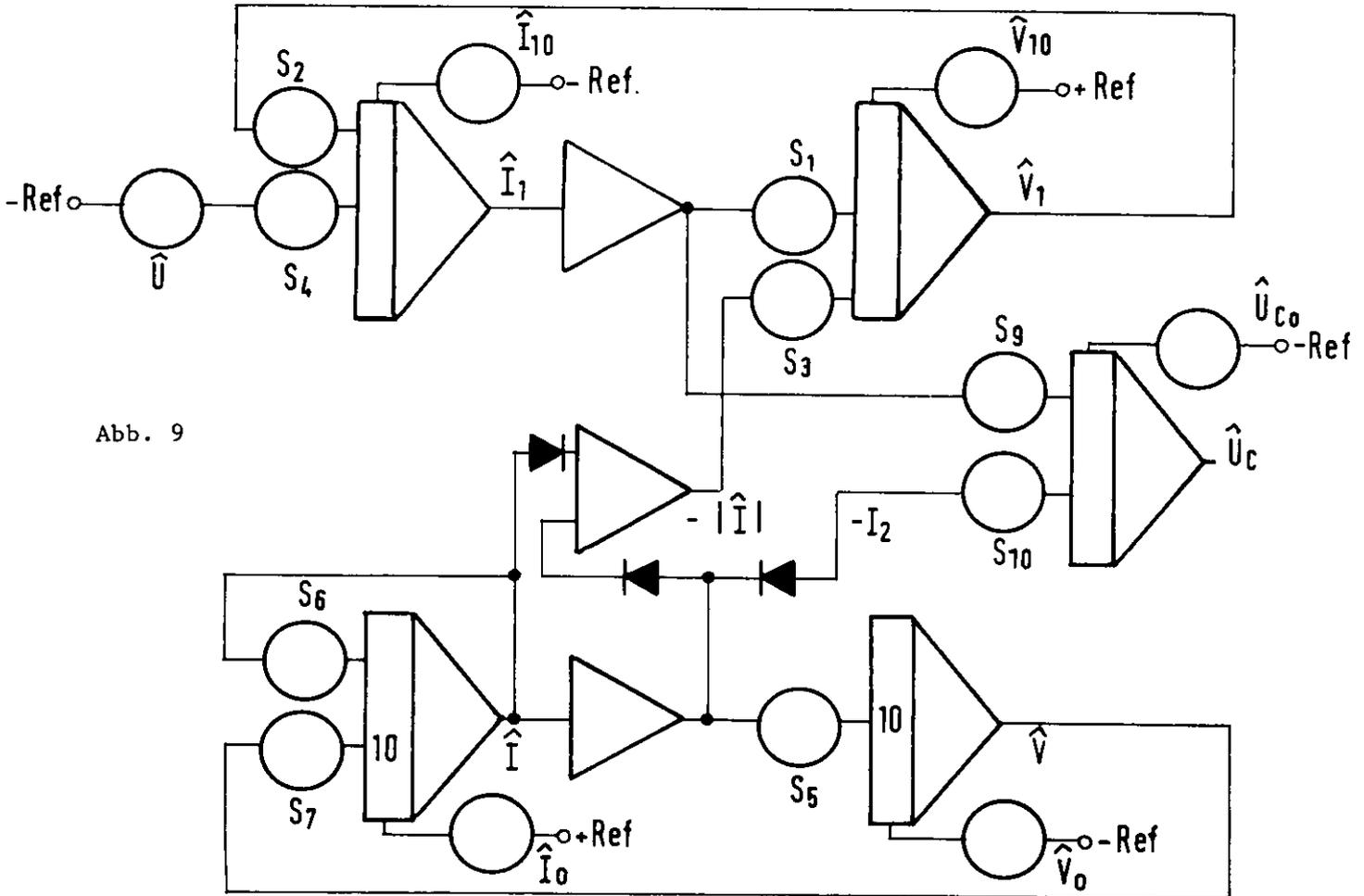


Abb. 9

Abb. 9 zeigt den Analogrechner-Schaltplan, wie er anhand der Maschinengleichungen aufgebaut wurde.

Tabelle 1: Potentiometerwerte

		$\beta = 0.5 \cdot 10^{-2}$	POT-WERTE
S <sub>1</sub>	$\beta I_{1m} / V_{1m}$	$\beta \omega_1$	0.4500
S <sub>2</sub>	$2\beta V_{1m} / L_D C_D I_{1m}$	$2\beta / L_D C_D \omega_1$	0.4265
S <sub>3</sub>	$\beta I_m / 2V_{1m}$	$\beta \omega_1 / 4$	0.1125
S <sub>4</sub>	$\beta U_m / L_D I_{1m}$	$1,25\beta / L_D$	0.2395
S <sub>5</sub>	$\beta I_m / V_m$	$\beta \omega$	1.570
S <sub>6</sub>	$\beta V_m / LC^* I_m$	$\beta / LC^* \omega$	1.570
S <sub>7</sub>	$\beta R / L$	$\beta R / L$	0.0131
S <sub>8</sub>	$\beta I_m / V_{2m}$	$0.5\beta \omega$	0.7850
S <sub>9</sub>	$\beta I_{1m} / C_D U_{cm}$	$0.2\beta / C_D$	0.2000
S <sub>10</sub>	$\beta I_m / C_D U_{cm}$	$0.1\beta / C_D$	0.1000

Anfangsbedingungen

	$\hat{I}_{10}$		+0.4273
	$\hat{V}_{10}$	$0.1123(U_{C10} + U_{C20})$	-0.0600
	$\hat{I}_0$		-0.5875
	$\hat{V}_0$	$0.3336 \cdot 10^{-2} \cdot (2U_{C0} + U_{C10} + U_{C20})$	+0.8357
	$\hat{U}_{C0}$		+0.1462
S <sub>11</sub>	Zeitmaßstab		0.0200
	$\hat{U}$	$3 \cdot K V$	0.6000

### 3.3 Digitales Kontrollprogramm

Die IBM-Programmiersprache CSMP eignet sich besonders gut dazu, die in den vorigen Kapiteln gewonnenen Kurven nachzuprüfen. Wie aus Abb. 10 ersichtlich, ist die Programmierung der Gleichungen (3-6) bis (3-8) sehr einfach und auch für ungeübte Programmierer verständlich. Skalierungsprobleme fallen weg. Der Vergleich von Abb. 11 mit den auf analogem Wege gewonnenen Ergebnissen von Abb. 12 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

### 3.4 Interpretation der Ergebnisse

Abschnitt 3 behandelt den Sonderfall: Im eingeschwungenem Zustand des Wechselrichters setzt die Zündung beider Wechselrichtergefäße aus.

In der Abb. 11 sind die Funktionen  $U_{CD}=f(t)$ ,  $i_2=f(t)$  und  $i_1=f(t)$  aufgezeichnet. Aus der Funktion  $U_{CD}=f(t)$  ersieht man, daß die Spannung  $U_{CD}$  über 6 KV ansteigt. Da diese Spannung für die Zwischenkreis-kondensatoren  $C_D$  unzulässig hoch ist, sind Schutzeinrichtungen vorzusehen.

```
TITLE RECHSELRICHTERGEFAESSE ZUENDEN NICHT
*
CONST   LD=0.0261,   CD=998.E-05,   L=0.2385,   C=4.26E-05,   R=0.624
INCON   I0=-1175.,   I10=1709.
PARAM  UCD10=1462.,UCD20=-1996. ,   U=3.F03 , UCD=125.4F03
*
*       BERECHNUNG DER ANFANGSBEDINGUNGEN
*
INIT
CS      = C*CD/(C+0.5*C)
V10    = C7*(UCD10+UCD20)*0.5
V0     = 0.5*CS*(2*UCD+UCD10+UCD20)
DYNAM
*
*       INTEGRATION DER DGLN MIT RUNGE - KUTTA 5.ORDNUNG
*
V1     = INTEGRL(V10, (I1+IBETR*0.5))
I1     = INTEGRL(I10, (-V1/(0.5*LD*CD)+U/LD))
V      = INTEGRL(V0, I)
I      = INTEGRL(I0, (-V/(L*CS)-I*R/L))
UC     = INTEGRL(UCD10, (I1+I2)/C0)
IBETR = I2-I3
I2     = NOT(-I)*I
I3     = NOT(I)*I
*
*       AUSDRUCKEN DER GEWUNSCHTEN GROESSEN
*
PRTPRT I(V,I3,IBETR),  I1(V1),  UC(I1,I2)
*
*       ANGABEN UEBER INTEGRATIONSINTERVALL UND SCHRITTWERTEN
*
TIMER  FINTIM=0.1,  OFLT=1.E-05,  OUTOFL=1.E-03
*
*       UEBERSCHRIFT
*
LABEL  NR - GFAESSE ZUENDEN NICHT
*
END
STOP
ENDJOB
```

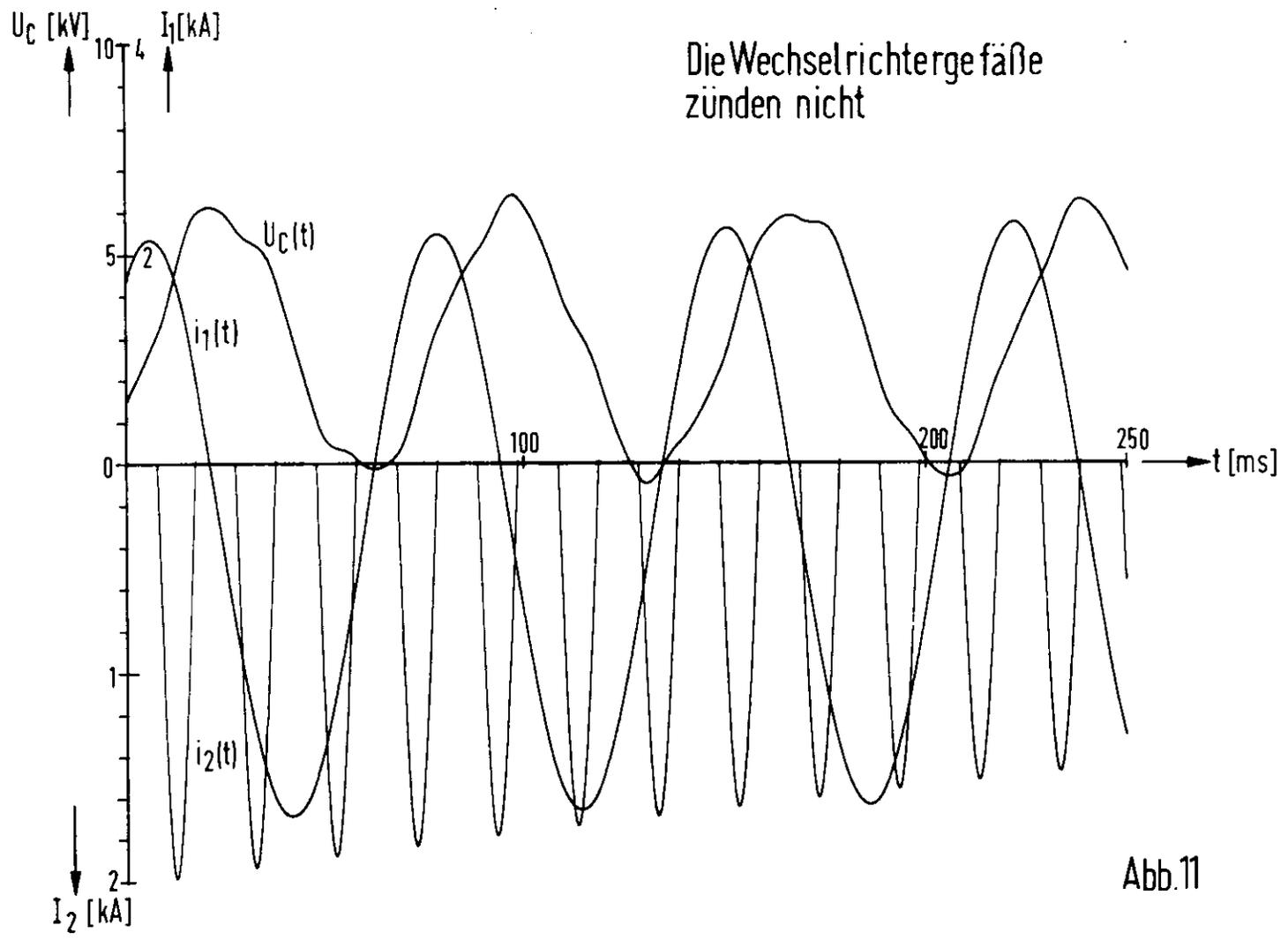


Abb.11

TIME	HC	MEASURE	HC	VERSUS TIME	MAXIMUM		
		-1.2749E 02			6.4400E 03	I	I1
0.0		1.4620E 03				1.7790E 03	0.0
1.0000E-03		1.6397E 03				1.8351E 03	0.0
2.0000E-03		1.8291E 03				1.9499E 03	0.0
3.0000E-03		2.0279E 03				2.0245E 03	0.0
4.0000E-03		2.2340E 03				2.0849E 03	0.0
5.0000E-03		2.4450E 03				2.1219E 03	0.0
6.0000E-03		2.6585E 03				2.1362E 03	0.0
7.0000E-03		2.8724E 03				2.1296E 03	0.0
8.0000E-03		3.0846E 03				2.1042E 03	0.0
9.0000E-03		3.3222E 03				2.0618E 03	5.9394E 02
1.0000E-02		3.6145E 03				2.0013E 03	1.1580E 03
1.1000E-02		3.9500E 03				1.9211E 03	1.6075E 03
1.2000E-02		4.3150E 03				1.8199E 03	1.8988E 03
1.3000E-02		4.6892E 03				1.6976E 03	2.0038E 03
1.4000E-02		5.0501E 03				1.5547E 03	1.9128E 03
1.5000E-02		5.3771E 03				1.3925E 03	1.6351E 03
1.6000E-02		5.6510E 03				1.2135E 03	1.1984E 03
1.7000E-02		5.8561E 03				1.0205E 03	6.4577E 02
1.8000E-02		5.9825E 03				8.1731E 02	3.1477E 01
1.9000E-02		6.0541E 03				6.0700E 02	0.0
2.0000E-02		6.1041E 03				3.8981E 02	0.0
2.1000E-02		6.1320E 03				1.6528E 02	0.0
2.2000E-02		6.1370E 03				-6.6543E 01	0.0
2.3000E-02		6.1184E 03				-3.0499E 02	0.0
2.4000E-02		6.0757E 03				-5.4862E 02	0.0
2.5000E-02		6.0084E 03				-7.9522E 02	0.0
2.6000E-02		5.9163E 03				-1.0419E 03	0.0
2.7000E-02		5.7997E 03				-1.2850E 03	0.0
2.8000E-02		5.6590E 03				-1.5208E 03	0.0
2.9000E-02		5.5230E 03				-1.7456E 03	5.7476E 02
3.0000E-02		5.4231E 03				-1.9593E 03	1.1249E 03
3.1000E-02		5.3524E 03				-2.1622E 03	1.5636E 03
3.2000E-02		5.2983E 03				-2.3545E 03	1.8485E 03
3.3000E-02		5.2452E 03				-2.5357E 03	1.9520E 03
3.4000E-02		5.1754E 03				-2.7049E 03	1.8645E 03
3.5000E-02		5.0712E 03				-2.8605E 03	1.5951E 03
3.6000E-02		4.9171E 03				-3.0001E 03	1.1706E 03
3.7000E-02		4.7013E 03				-3.1212E 03	6.3284E 02
3.8000E-02		4.4171E 03				-3.2208E 03	3.4620E 01
3.9000E-02		4.0707E 03				-3.2964E 03	0.0
4.0000E-02		3.7576E 03				-3.3489E 03	0.0
4.1000E-02		3.4203E 03				-3.3799E 03	0.0
4.2000E-02		3.0809E 03				-3.3909E 03	0.0
4.3000E-02		2.7414E 03				-3.3828E 03	0.0
4.4000E-02		2.4036E 03				-3.3560E 03	0.0
4.5000E-02		2.0695E 03				-3.3105E 03	0.0
4.6000E-02		1.7403E 03				-3.2456E 03	0.0
4.7000E-02		1.4197E 03				-3.1602E 03	0.0
4.8000E-02		1.1083E 03				-3.0529E 03	0.0
4.9000E-02		8.3504E 02				-2.9230E 03	5.5620E 02
5.0000E-02		6.3283E 02				-2.7727E 03	1.0926E 03
5.1000E-02		4.9529E 02				-2.6054E 03	1.5209E 03
5.2000E-02		4.1096E 02				-2.4238E 03	1.7995E 03
5.3000E-02		3.6465E 02				-2.2305E 03	1.9015E 03
5.4000E-02		3.3913E 02				-2.0273E 03	1.8175E 03
5.5000E-02		3.1695E 02				-1.8154E 03	1.5561E 03
5.6000E-02		2.8236E 02				-1.5956E 03	1.1435E 03
5.7000E-02		2.2290E 02				-1.3678E 03	6.2012E 02
5.8000E-02		1.3080E 02				-1.1320E 03	3.7566E 01
5.9000E-02		2.9649E 01				-8.8817E 02	0.0
6.0000E-02		-4.6917E 01				-6.3964E 02	0.0
6.1000E-02		-9.8508E 01				-3.9030E 02	0.0
6.2000E-02		-1.7522E 02				-1.4367E 02	0.0
6.3000E-02		-1.2749E 02				9.7302E 01	0.0
6.4000E-02		-1.0599E 02				3.3038E 02	0.0
6.5000E-02		-6.1595E 01				5.5410E 02	0.0
6.6000E-02		4.7132E 01				7.6772E 02	0.0
6.7000E-02		9.1914E 01				9.7115E 02	0.0
6.8000E-02		1.9903E 02				1.1648E 03	0.0
6.9000E-02		3.5756E 02				1.3489E 03	5.3871E 02
7.0000E-02		5.7529E 02				1.5204E 03	1.0617E 03
7.1000E-02		3.6397E 02				1.5763E 03	1.4796E 03
7.2000E-02		1.2022E 03				1.8136E 03	1.7519E 03
7.3000E-02		1.5721E 03				1.9304E 03	1.8523E 03
7.4000E-02		1.9535E 03				2.0253E 03	1.7715E 03
7.5000E-02		2.3264E 03				2.0979E 03	1.5178E 03
7.6000E-02		2.6724E 03				2.1486E 03	1.1165E 03
7.7000E-02		2.9764E 03				2.1786E 03	6.0715E 02
7.8000E-02		3.2281E 03				2.1896E 03	3.9837E 01
7.9000E-02		3.4475E 03				2.1830E 03	0.0
8.0000E-02		3.6051E 03				2.1577E 03	0.0
8.1000E-02		3.8792E 03				2.1118E 03	0.0
8.2000E-02		4.0876E 03				2.0442E 03	0.0
8.3000E-02		4.2381E 03				1.9543E 03	0.0
8.4000E-02		4.4785E 03				1.8424E 03	0.0
8.5000E-02		4.6566E 03				1.7098E 03	0.0
8.6000E-02		4.3205E 03				1.5583E 03	0.0
8.7000E-02		4.0684E 03				1.3907E 03	0.0
8.8000E-02		5.0738E 03				1.2101E 03	0.0
8.9000E-02		5.2352E 03				1.0195E 03	5.2129E 02
9.0000E-02		5.4958E 03				8.1907E 02	1.0313E 03
9.1000E-02		5.6022E 03				6.9844E 02	1.4392E 03
9.2000E-02		5.8113E 03				3.8766E 02	1.7054E 03
9.3000E-02		6.0157E 03				1.5741E 02	1.8044E 03
9.4000E-02		6.1980E 03				-8.0904E 01	1.7268E 03
9.5000E-02		6.3397E 03				-3.2517E 02	1.4807E 03
9.6000E-02		6.4246E 03				-5.7257E 02	1.0906E 03
9.7000E-02		6.4400E 03				-8.1974E 02	5.9489E 02
9.8000E-02		6.3773E 03				-1.0629E 03	4.2424E 01
9.9000E-02		6.2598E 03				-1.2986E 03	0.0

4. Sonderfall: Unterbrechung in der Zuleitung zu einem Wechselrichter-  
gefäß und zu einer Diode

4.1 Problemstellung

Es ist geplant, die durch Überspannung gefährdeten Kondensatoren  $C_D$  mit Schutzschaltungen zu überbrücken. Der theoretische Entwurf für die Überspannungsschutzeinrichtung wird in Abb. 13 gezeigt. Sie besteht aus einer Induktivität  $L_S$ , einem Widerstand  $R_S$  und einem Thyristor Th in Reihe geschaltet (siehe Abb. 14).

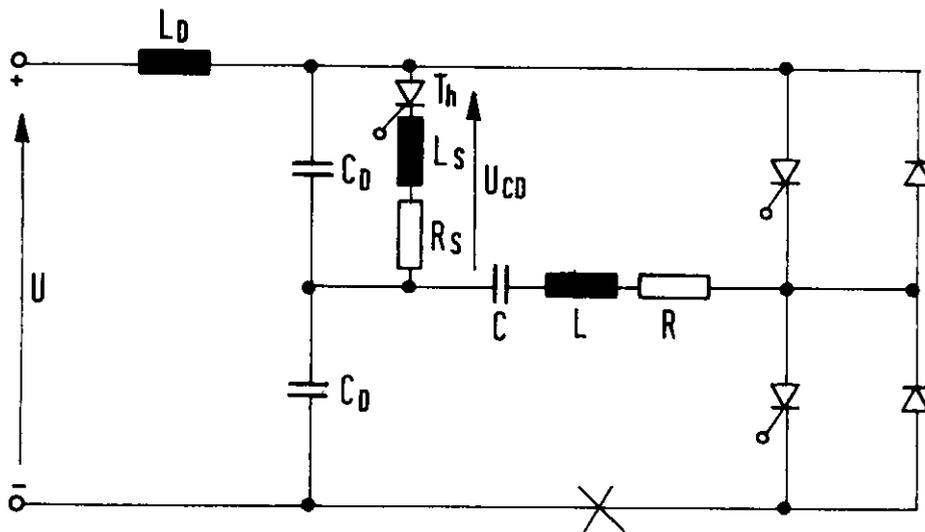


Abb. 13

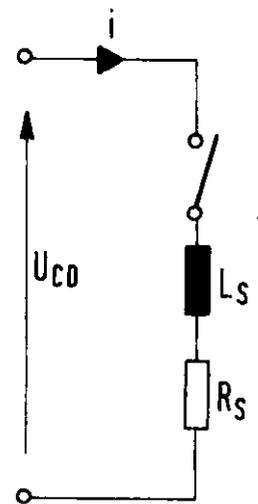


Abb. 14

Nach Abb. 13 gilt

$$U_{CD} = R_S i + L_S \frac{di}{dt}$$

$$i = \frac{U_{CD}}{R_S} \left( 1 - e^{-\frac{R_S}{L_S} t} \right)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{CD}}{L_S} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{L_S}{R_S} \tag{4-1}$$

Die zulässige Stromsteilheit des Thyristors von  $20A/\mu\text{sec}$  darf nicht überschritten werden. Es ist also wichtig, die Gleichung (4-1) zu untersuchen.

4.2 Lösung auf dem Analogrechner

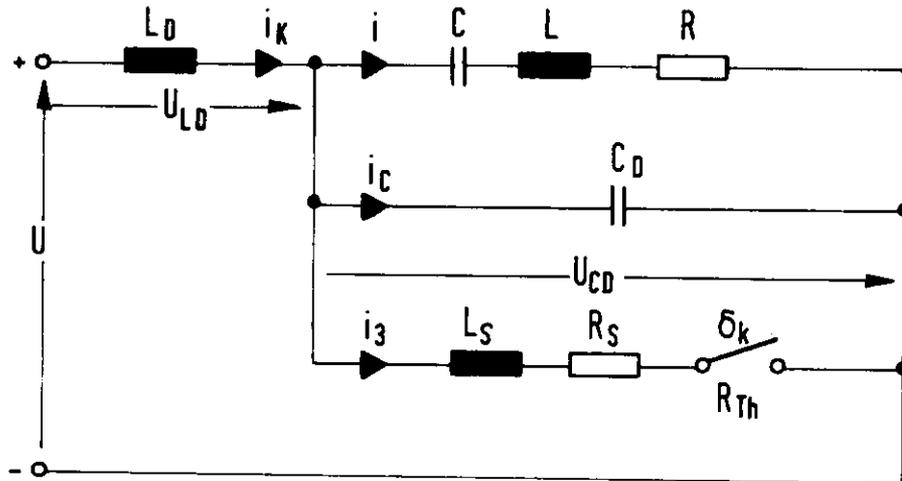


Abb. 15

Nach Abb. 15 kann man Gleichungen aufstellen, die nach Umformung folgendes System ergeben:

$$I_k = I + I_c + I_3$$

$$U_{LD} = pL_D(I + pC_D U_{CD} + I_3 \delta_k)$$

$$U = pL_D I + p^2 L_D C_D U_{CD} + pL_D I_3 \delta_k + U_{CD}$$

Aufgelöst nach  $U_{CD}$  :

$$p^2 U_{CD} = \frac{1}{L_D C_D} U - p \frac{1}{C_D} I - p \frac{1}{C_D} I_3 \delta_k - \frac{1}{L_D C_D} U_{CD} \quad (4-2)$$

Weiter gilt für die Ströme

$$p^2 I = p \frac{1}{L} U_{CD} - p \frac{R}{L} I - \frac{1}{LC} I \quad (4-3)$$

$$I_3 = U_{CD} \frac{1}{pL_S + R_S} \delta_k$$

$$pI_3 = \frac{1}{L_S} U_{CD} \delta_k - \frac{R_S}{L_S} I_3 \quad (4-4)$$

$$I_c = pC_D U_{CD} \quad (4-5)$$

Der Schalter im Schutzkreis kann durch eine Stufenfunktion  $\delta_K$  dargestellt werden, die den Wert Null hat, solange  $U_{CD}$  einen bestimmten Grenzwert von z.B. 2 kV nicht übersteigt. Für  $U_{CD} \geq 2$  kV hat  $\delta_K$  den Wert 1 und behält diesen Wert bei, unabhängig von der Größe von  $U_{CD}$ .

Das endgültige System der Differentialgleichungen 1. Ordnung nach (4-2) bis (4-5):

$$p U_{CD} = w$$

$$p w = \frac{1}{L_D C_D} U - \frac{1}{C_D} V - \frac{1}{C_D} p I_3 \delta_K - \frac{1}{L_D C_D} U_{CD}$$

$$p I = v$$

$$p v = \frac{1}{L} w - \frac{R}{L} v - \frac{1}{L C} I$$

$$p I_3 = \frac{1}{L_S} U_{CD} \delta_K - \frac{R_S}{L_S} I_3$$

$$I_C = C_D w$$

Dieses Gleichungssystem kann gelöst werden, wenn die Anfangsbedingungen  $\hat{U}_{CD0}$ ,  $\hat{w}_0$ ,  $I_{10}$ ,  $\hat{v}_0$ , - bekannt sind.

Das Programm, das die Spannungs-Stromverläufe in der Echtzeit von 0-250 msec. zeigen soll, läuft auf dem Analogrechner um einen Faktor  $1/\beta$  langsamer ab.

Das System der skalierten Maschinengleichungen lautet:

$$\hat{p} \hat{U}_{CD} = S_1 \hat{w}$$

$$\hat{p} \hat{w} = S_5 \hat{U} - S_4 \hat{v} - S_3 \hat{p} \hat{I}_3 \delta_K - S_2 \hat{U}_{CD}$$

$$\hat{p} \hat{I} = S_6 \hat{v}$$

$$\hat{p} \hat{v} = S_9 \hat{w} - S_7 \hat{v} - S_8 \hat{I}$$

$$\hat{p} \hat{I}_3 = S_{10} \hat{U}_{CD} \delta_K - S_{11} \hat{I}_3$$

$$\hat{I}_C = S_{12} \hat{w}$$

Die Berechnung der Faktoren  $S_i$  entnehme man der Tabelle 2. Dabei wurden folgende Konstanten eingesetzt:

$$L_D = 0.0261 \text{ H} \quad C = 4.26 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

$$C_D = 9.98 \cdot 10^{-3} \text{ F} \quad R = 0.624 \text{ } \Omega$$

$$L = 0.2385 \text{ H}$$

Abgeleitete Größen:

$$\omega_1 = 314$$

$$\omega_2 = 60$$

Eine Abschätzung der Maximalwerte ergibt:

$$U_{CDm} = 5 \text{ kV} \quad \omega_m = 5 \omega_2 \quad U_m = 5 \text{ kV}$$

$$I_m = 2 \text{ kA} \quad V_m = 2 \omega_1$$

$$I_{cm} = 5 \text{ kA}$$

$$I_{3m} = 5 \text{ kA} \quad (p I_{3m}) = 5 \cdot 10^3$$

In Tabelle 3 sind die Faktoren  $S_{10}$  und  $S_{11}$  für verschiedene Induktivitäten ausgerechnet worden.

Abb. 16 zeigt den Analogrechnerschaltplan, wie er anhand der Maschengleichungen aufgebaut wurde. Dabei wurde der Komparator KO2, der die Stufenfunktion  $\delta_K$  simulieren soll, mit einem Relais RL so zusammenschaltet, daß er nur einmal beim Erreichen der vorgegebenen Spannungsschwelle für  $U_{CD}$  schaltet.

Tabelle 2: Potentiometerwerte

		$\beta=0.5 \cdot 10^{-2}$	POT-WERTE
S <sub>1</sub>	$\beta \cdot W_m U_{CDm}$	$\beta \cdot \omega_2$	0.3
S <sub>2</sub>	$\beta \cdot U_{CDm} L_D C_D \cdot W_m$	$\beta L_D C_D \cdot \omega_2$	0.318
S <sub>3</sub>	$\beta \cdot p I_{3m} C_D \cdot W_m$	$\beta \cdot 10^3 C_D \cdot \omega_2$	8.333
S <sub>4</sub>	$\beta \cdot V_m C_D \cdot W_m$	$\beta \cdot \bar{\omega}_1^2 C_D \cdot 5 \bar{\omega}_2$	1.046
S <sub>5</sub>	$\beta \cdot U_m L_D C_D \cdot W_m$	$\beta L_D C_D \cdot \omega_2$	0.318
S <sub>6</sub>	$\beta \cdot V_m I_m$	$\beta \cdot \omega_1$	1.57
S <sub>7</sub>	$\beta \cdot R \cdot V_m L \cdot V_m$	$\beta \cdot R L$	0.0131
S <sub>8</sub>	$\beta \cdot I_m LC V_m$	$\beta LC \cdot \omega_1$	1.568
S <sub>9</sub>	$\beta W_m L \cdot V_m$	$\beta 5 \omega_2 L \cdot 2 \cdot \omega_1$	0.010
S <sub>10</sub>	$\beta \cdot U_{CDm} L_S p I_{3m}$	$\beta L_S \cdot 10^3$	
S <sub>11</sub>	$\beta \cdot R_S \cdot I_{3m} L_S \cdot p I_{3m}$	$\beta \cdot R_S L_S 10^3$	
S <sub>12</sub>	$C_D W_m I_{cm}$	$C_D \cdot \omega_2$	0.60
Anfangsbedingungen	$\hat{U}_{CDO}$		+0.2924
	$\hat{W}_O$		-0.5697
	$\hat{I}_O$		-0.5875
	$\hat{V}_O$		+0.8357
Zeitmaßstab	$\hat{U}$		0.0200
	$\hat{U}_{CD}$		0.30
	$\hat{T}_{UCD}$		0.4
	$\hat{T}_{UCD}$		0.4

Tabelle 3

	$L_S = 10^{-5}$ [H]	$\frac{S_{10}}{S_{11}}$	0.5
			0.55
$R_S = 1.1[\Omega]$	$L_S = 10^{-4}$ [H]	$\frac{S_{10}}{S_{11}}$	0.05
			0.055
	$L_S = 10^{-6}$ [H]	$\frac{S_{10}}{S_{11}}$	5.0
			5.5

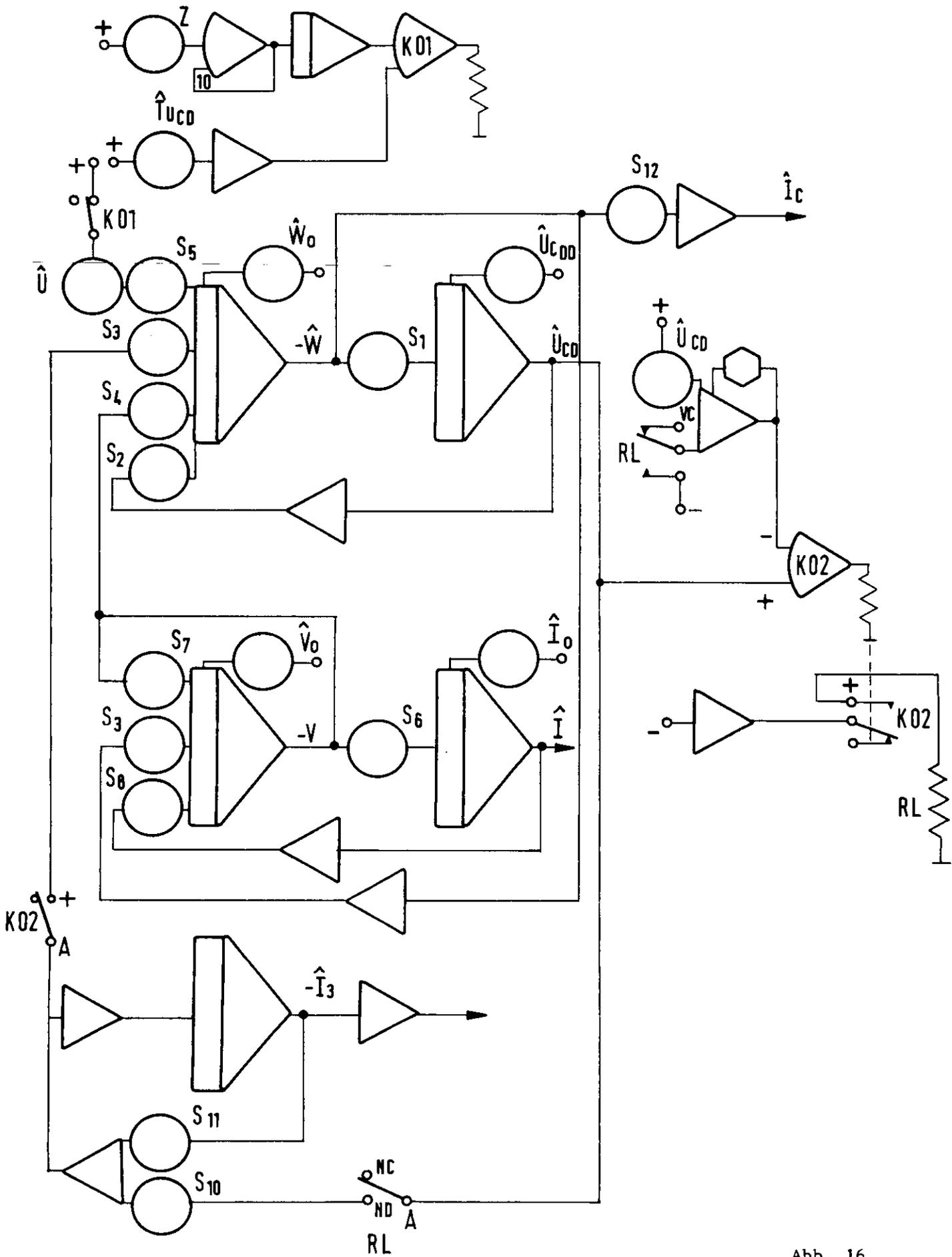


Abb. 16

### 4.3 Interpretation der Ergebnisse

Abschnitt 4 behandelt den Sonderfall: Unterbrechung in der Zuleitung zu einem Wechselgefäß und einer Diode.

In der Abb. 17 sind die Funktionen  $U_{CD}(t)$ ,  $i(t)$  und  $i_C(t)$  ohne Schutzkreis aufgezeichnet. Abb. 18, 19 und 20 zeigen die Spannungen  $U_{CD}(t)$  und die Ströme durch den Schutzkreis  $i_3(t)$  für drei verschiedene Induktivitäten. Es ist zu sehen, daß die Spannung  $U_{CD}$  und der Strom  $i_3$  sehr abhängig von der Größe  $L_S$  sind.

Die Stromanstiegsgeschwindigkeit im Thyristor  $L_S = 10^{-6}$  H ist nicht größer als  $2A/\mu\text{sec}$ .

Dabei wurde angenommen, daß die Speisespannung  $U$  genau 100 ms nach Ansprechen des Schutzkreises zu 0 wird.

Wenn man annimmt, daß nur ein Wechselrichtergefäß nicht zündet, kann man für die Beschreibung der Funktionen von ähnlichen Voraussetzungen ausgehen, wie für den in diesem Kapitel betrachteten Sonderfall.

Man kann die in Kapitel 4 gewonnenen Ergebnisse, ohne große Fehler zu machen, übernehmen.

Wir danken Herrn Bothe für anregende Diskussionen.

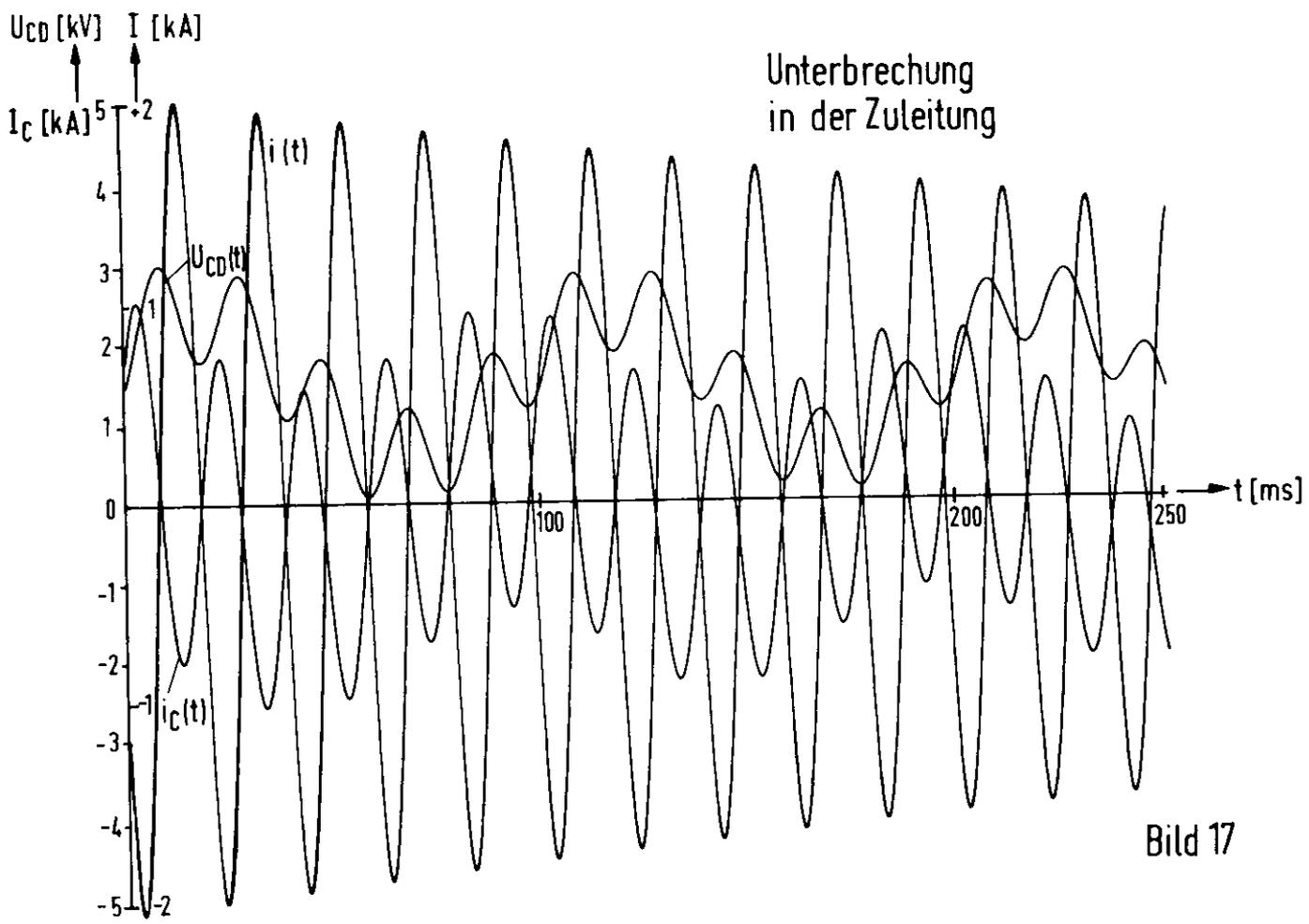


Bild 17

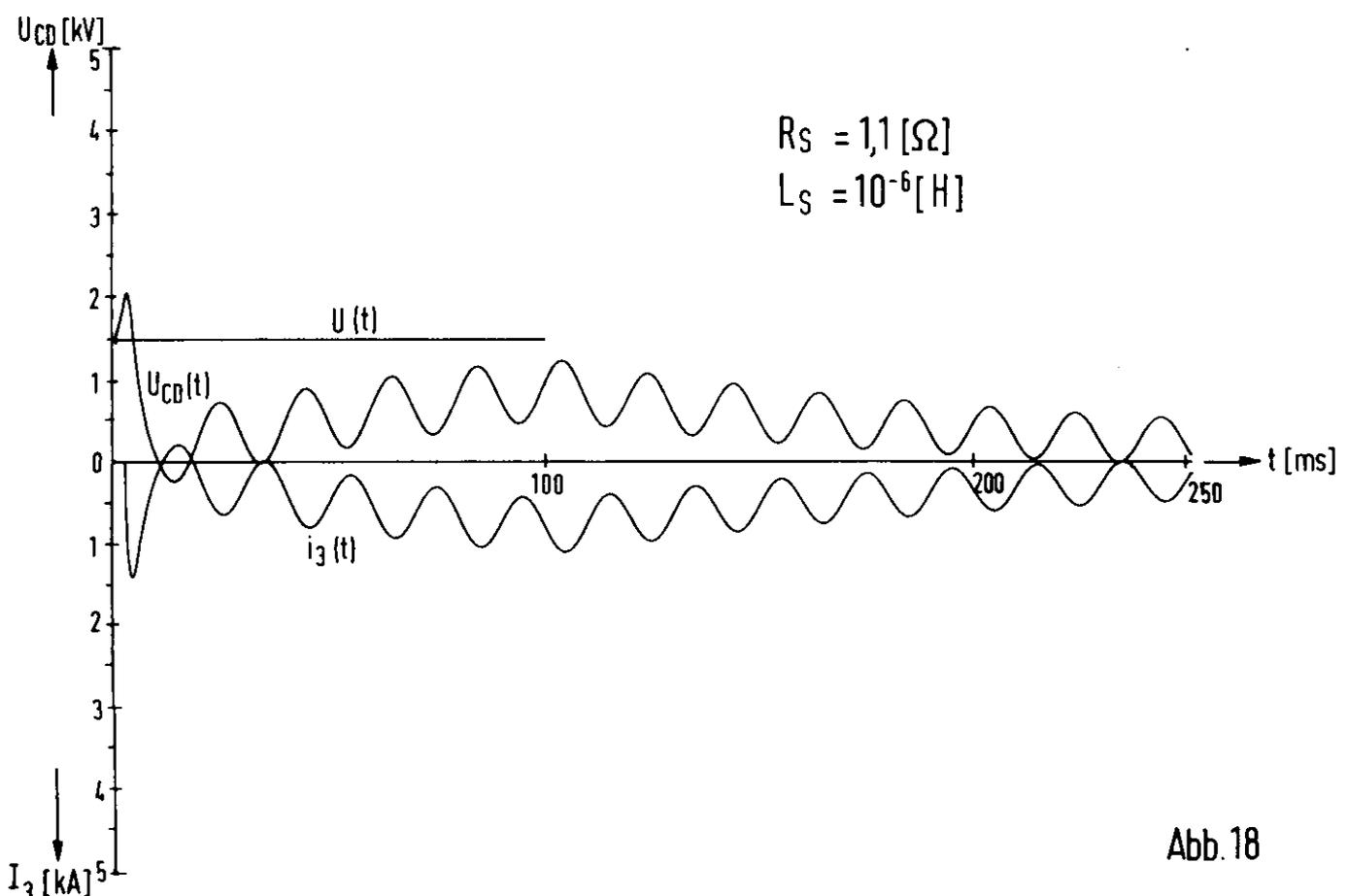


Abb. 18

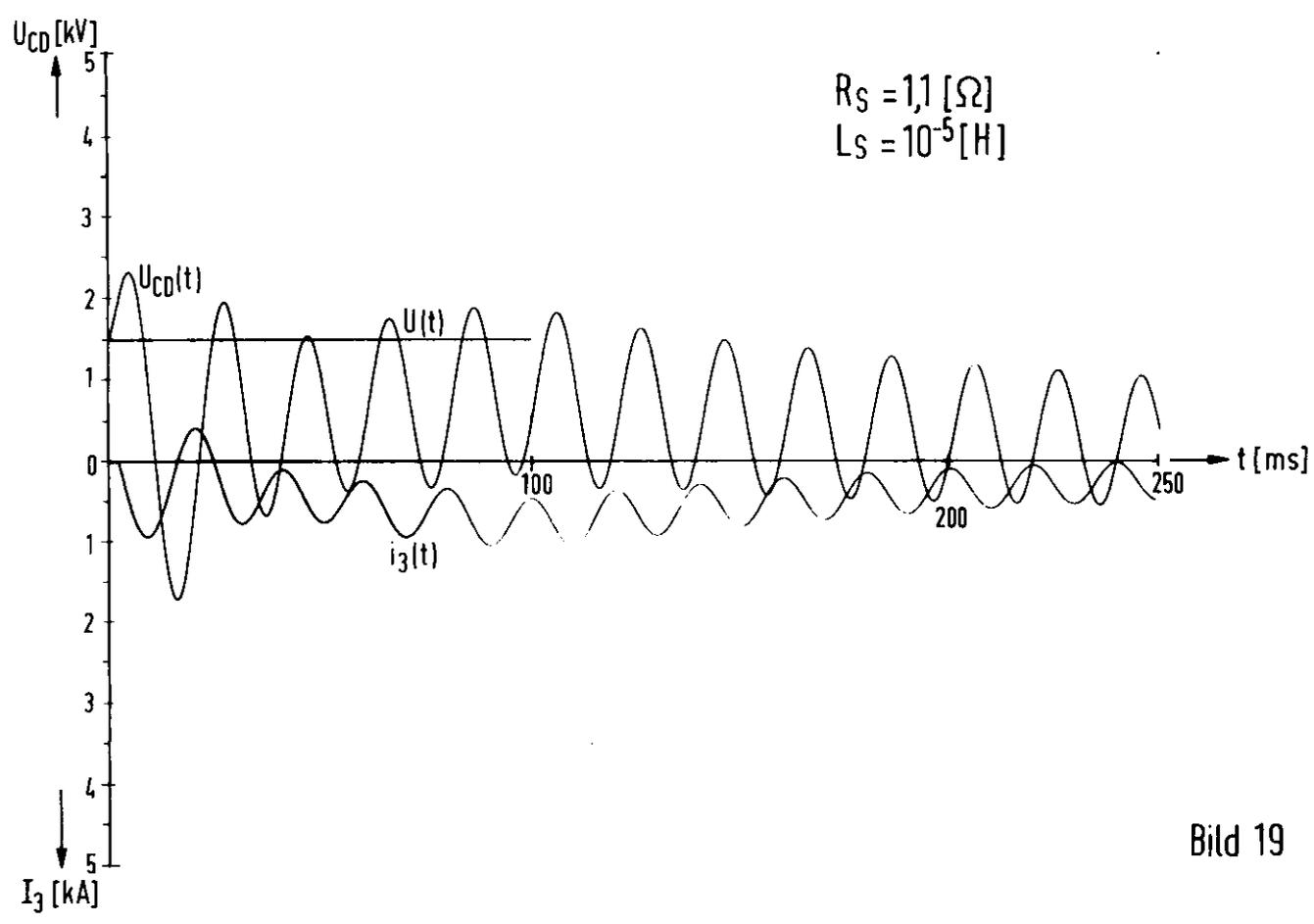


Bild 19

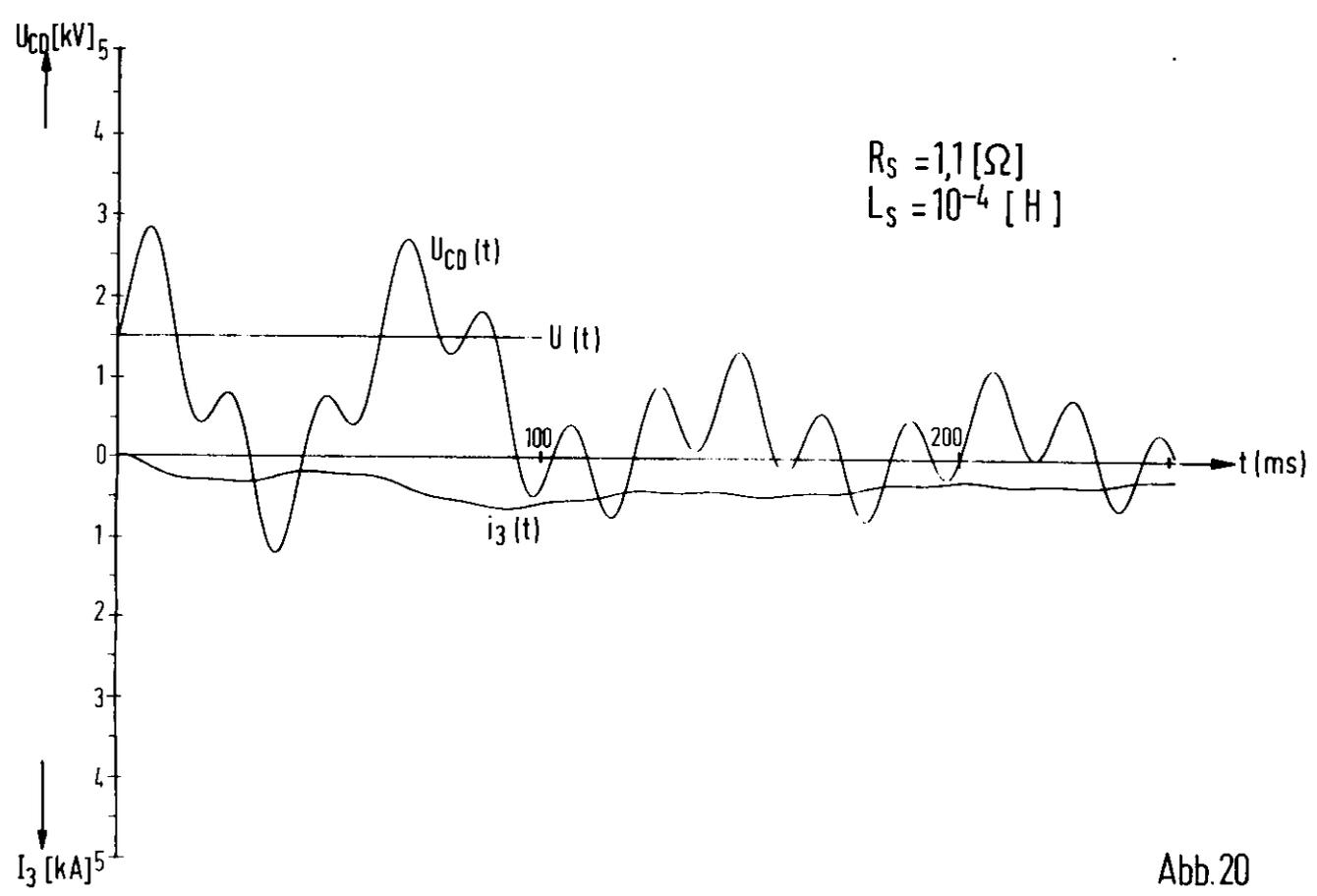


Abb. 20

Literaturhinweise

- [L1] W. Bothe: Aufbau der Stromversorgung für die Führungsmagnete des DESY (ETZ 1963, Seite 231-235)
- [L2] H. Glimski: Der Einfluß des Energiespeichers im Gleichstrom-Zwischenkreis auf Ausgangsspannung und -frequenz beim Schwingkreisumrichter.  
(BBC-Nachrichten 1964, Heft 12, S. 648-654)
- [L3] W. Giloi: Über die Behandlung elektrischer und mechanischer Netzwerke auf dem Analogrechner.  
(Elektr.Rechenanlage 1962, Heft 1, S. 27-35)
- [L4] D. Ernst: Elektronische Analogrechner (1960)