

Thema

Untersuchung und Simulation von Störungen im Stellglied
netzgeführter Stromrichterantriebe

Von S c h w a r z , Jürgen
geboren am 26. Februar 1947 in Berlin

Sektion Elektrotechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung
des akademischen Grades
Diplom eines Wissenschaftszweiges
Dipl.-Ing.

vorgelegte Diplomarbeit

Tag der Einreichung: 15. September 1970

Gutachter: Dr.-Ing. Büchner

genehmigt / nicht genehmigt
Vertraulichkeitsgrad:

Dresden, am 15. September 1970

Prof. Dr.-Ing. habil. Schönfeld
beauftragter Hochschullehrer

Abschrift

Sektion Elektrotechnik

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Diplomaufgabe Nr. 165/70

für Herrn cand.ing. Jürgen S c h w a r z

Dr.B./U.

Fachgebiet: Elektrische Antriebe

Thema: Untersuchung und Simulation von Störungen im
Stellglied netzgeführter Stromrichterantriebe

Störungen im Stellglied netzgeführter Stromrichterantriebe verursachen hohe zusätzliche Beanspruchungen der Bauelemente.

Für die Fälle des Verlustes der Sperrfähigkeit eines Ventils und für den Ausfall eines Zündimpulses sind, ausgehend von dem normalen Betriebszustand, Möglichkeiten zur Ermittlung der Beanspruchungen anzugeben.

Dabei soll insbesondere die Methode der analogen Simulation berücksichtigt werden.

Es ist zu untersuchen, in welcher Weise die möglichen Störungen in die Entwurfsstrategie von Stromrichterantrieben eingehen müssen, um störungssichere Antriebe zu entwerfen.

Literaturhinweise:

Büchner, P. u.a. Zwischenbericht zur Vertragsforschung
"Maschinelle Berechnung"

Sektion Elektrotechnik, März 1970

Wasserab, Th. Schaltungslehre der Stromrichtertechnik
Springerverlag Berlin 1965

gez. Schönfeld

Prof. Dr.-Ing. habil. Schönfeld

Betreuer: Dr.-Ing. Büchner

Tag des Aushändigung: 15.4.1970

Abgabetermin: 15.8.1970

F.d.R.d.A.

Schwarz

Thesen
zur Diplomarbeit

"Untersuchung und Simulation von Störungen im Stellglied
netzgeführter Stromrichterschaltungen"

eingereicht von Jürgen Schwarz

Zur Simulation von Störungen sind digitale und analoge Verfahren geeignet:

1. Vorausberechnung der Ströme
2. hybride Programmstrukturen
3. spezielle Fehlerprogramme auf dem Digitalrechner und
4. direkte Nachbildung der Ventileigenschaften
5. Verwendung getriggelter Einseitenintegrierer ("Schnörr"-Integratoren)
6. Verwendung gesteuerter Integratoren
7. iterative Lösung von Differentialgleichungssystemen
8. Simulation durch Nachbildung der Spannungscurvenform auf dem Analogrechner.

Ein verdrahtungsprogrammierter Digitalzusatz zum Analogrechner ermöglicht die Simulation von Stromrichterschaltungen ohne Verwendung von Differenziergliedern.

Es wurden die Störungsfälle

1. Ventildurchbruch
2. Zündimpulsausfall
3. Netzspannungssprung
4. Lastsprung
5. Kurzschluß
6. Netzausfall

für Gleichrichterbetrieb einer Dreipulsmittelpunktsschaltung näher untersucht.

Unter Umständen ist ein Betrieb mit gestörten Ventilen möglich. Mit Hilfe des getriggerten Einseitenintegrierers und Anwendung der impliziten Funktionstechnik ist es möglich, mit vertretbarem Aufwand die Simulation beliebiger netzgelöschter Stromrichterschaltungen, einschließlich der dazugehörigen elektrischen Maschinen und Regelungsschaltungen, auf dem Analogrechner durchzuführen. Die erreichbare Genauigkeit ist allerdings auf ca. 2% begrenzt.

Schwarz

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1. Einleitung	6
2. Simulationsmöglichkeiten von netzgelöschten Stromrichtern auf Rechnersystemen	7
2.1. Simulation auf dem Digitalrechner	7
2.1.1. Vorausberechnung der Ströme	8
2.1.1.1. Beispiel einer zweipulsigen Mittelpunktschaltung mit passiver Last	8
2.1.1.2. ALGOL-Programm und grobes Flußdiagramm	11
2.1.1.3. Ausführliches Flußdiagramm	13
2.1.2. Lösung von Differentialgleichungssystemen	15
2.1.2.1. Beispiel einer Drehstrombrückenschaltung mit Motorlast	16
2.1.2.1.1. Voraussetzungen	16
2.1.2.1.2. Kein Ventil führt Strom	18
2.1.2.1.3. Zwei Ventile führen Strom	19
2.1.2.1.4. Drei Ventile führen Strom	19
2.1.2.1.5. Vier Ventile führen Strom	20
2.1.2.1.6. Fünf Ventile führen Strom	21
2.1.2.1.7. Sechs Ventile führen Strom	22
2.1.2.2. Möglichkeiten zur Aufstellung eines Programmes	22
2.1.2.3. ALGOL-Programm Prozedur Drehstrombrücke	23
2.1.2.4. Erklärung zum ALGOL-Programm	30
2.1.2.5. Übersichtsflußdiagramm	32
2.1.2.6. Flußdiagramm	32
2.1.2.6.1. Unterprogramm INVERT	32
2.1.2.6.2. Unterprogramm MULT	36
2.1.2.6.3. Unterprogramm DGLS	37
2.1.2.6.4. Gesamtprogramm: <u>procedure</u> Drehstrombruecke	38
2.2. Simulation auf dem Analogrechner	45
2.2.1. Direkte Nachbildung der Ventileigenschaften	45
2.2.2. Ventilaufbildung durch getriggerten Einseitenintegrierer	46
2.2.3. Ventilaufbildung mit gesteuerten Integratoren	48
2.2.4. Stromrichtersimulation durch iterative Lösung von Differentialgleichungssystemen	49
2.2.5. Stromrichtersimulation durch Nachbildung der Spannungskurvenform	50

	Seite
2.3. Simulation auf dem Hybridrechner	50
2.3.1. Hybride Rechnersysteme und hybride Programmstrukturen	50
2.3.1.1. Vorstufe: iterativgesteuerte Analogrechner	51
2.3.1.2. Hybride Analogrechner	52
2.3.1.3. Kombinierte Analog- und Digitalrechner	53
2.3.1.4. Hybride Programmstrukturen für festverdrahtete Digitalrechner (Ziffern-Integrieranlagen, DDA)	55
2.3.1.5. Hybride Programmstrukturen für freiprogrammierbare Digitalrechner	55
2.3.2. Anwendungsmöglichkeiten eines hybriden Rechnersystems	56
2.4. Erweiterung des MEDA 120 T zum Hybridrechner durch einen verdrahtungsprogrammierten Digitalzusatz	58
2.4.1. Analoger Teil	58
2.4.1.1. Allgemeiner Teil	58
2.4.1.2. Die Brücke ist stromlos	58
2.4.1.3. Zwei Ventile führen Strom	61
2.4.1.4. Kommutierungsbereiche 1...3	62
2.4.1.5. Kommutierungsbereich 4	62
2.4.2. Digitaler Teil	62
2.4.3. Speicherteil	64
2.4.4. Zusammenfassung	64
3. Qualitative Betrachtungen der Störungen	64
3.1. Allgemeines	64
3.2. Zerstörung von Thyristoren (Durchbruch)	68
3.3. Ausfall von Zündimpulsen	71
3.4. Verschiebung von Zündimpulsen	74
3.5. Netzausfall	74
3.6. Kurzschluß an der Last	75
3.7. Laststöße großer Amplitude	75
4. Rechenschaltungen	75
4.1. Grundsaltungen	75
4.1.1. Dreiphasengenerator	75
4.1.2. Differenzierglied	75
4.1.3. Ideale Diode	76
4.1.4. Extremwertauswahl	76
4.1.5. Maximalwertspeicher	77
4.1.6. $\int i(t)dt$ - und $\int i^2(t)dt$ - Schaltung	77
4.2. Lastschaltungen	77
4.2.1. Nachbildung einer ohmsch-induktiven Last	77

4.2.2.	Nachbildung einer Gleichstromnebenschlußmaschine	77
4.2.3.	Nachbildung einer Gleichstromnebenschlußmaschine mit Vorgabe des Stromes	77
4.2.4.	Nachbildung einer linearen Gleichstromreihenschlußmaschine	78
4.3.	Stromrichteranlagen	78
4.3.1.	Dreipulsmittelpunktsschaltung mit verbessertem "Schnörr"-Integrator	78
4.3.2.	Gegenparallelmittelpunktsschaltung	79
4.3.3.	Sechphasensaugdrosselschaltung	80
4.3.4.	Gesteuerter Integrator	80
4.3.5.	Beispiel zur iterativen Lösung von Dgl.-Systemen	81
4.3.6.	Nachbildung einer Dreipulsmittelpunktsschaltung ohne Verwendung eines Differenziergliedes	82
4.3.7.	Verbesserung des "Schnörr"-Integrators	83
4.3.8.	Modell einer Drehstrombrückenschaltung	83
4.4.	Regelungsschaltungen	85
4.5.	Simulation von Wechsel- und Drehstromstellern	85
4.6.	Realisierung von Stromunterbrechungen	86
4.7.	Steuerschaltungen	87
4.7.1.	Erzeugung von Zündverzögerungsimpulsen	87
4.7.2.	Erzeugung von Zündimpulsen einstellbarer Länge	87
5.	Simulierte Störungen	87
5.1.	Bemerkungen zu den Diagrammen 1 ... 3	88
5.2.	Ungestörter Betrieb der Dreipulsmittelpunktschaltung	88
5.3.	Durchbruch von Ventilen	90
5.4.	Ausfall der Zündfähigkeit von Ventilen	91
5.5.	Netzspannungssprung	92
5.6.	Lastsprung	92
5.7.	Äußere Kurzschlüsse	92
5.8.	Netzausfälle	92
5.9.	Gegenüberstellung	92
5.10.	Diskussion der Eignung der verschiedenen Stromrichtermodelle zur Simulation	93
6.	Zusammenfassung	94
7.	Formelzeichenverzeichnis	96
8.	Quellenverzeichnis	97
Anhang A:	Diagramme 1 ... 24	
Anhang B:	Beschreibung des Steuergerätes	

1. Einleitung

Die Gleichstrommaschine ist zur Zeit die am häufigsten verwendete elektrische Maschine auf dem Gebiet der drehzahlsteuerbaren elektrischen Antriebe. Ausschlaggebend dafür sind ihre guten Regeleigenschaften und ihre günstige Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie (Nebenschlußverhalten). Durch Spannungssteuerung läßt sich mit ihr ein weiter Drehzahlstellbereich auch bei stark wechselnder Last erreichen.

Die Spannungssteuerung wird heute meist mit Hilfe von Stromrichtern realisiert. Die Stromrichter haben die "klassischen" Stellglieder mit rotierenden Umformern und Verstärkermaschinen weitgehend abgelöst. Dies gilt auch für Transduktoren, obwohl diese Geräte die meisten Regelaufgaben lösen. Die Stromrichter haben die Vorteile eines hohen Wirkungsgrades, eines kleinen Volumens und der Wartungs- und Geräuscharmheit. Außerdem können durch Einsparung der Maschinenfundamente usw. noch erhebliche Kosten eingespart werden.

In den vergangenen fünfzehn Jahren sind Leistungsgleichrichter auf Halbleiterbasis in zahlreichen Anlagen und Geräten erfolgreich eingesetzt worden. Aufgrund ihrer besonderen Vorzüge konnten sie die gebräuchlichen Selen- und Quecksilberdampfgleichrichter verdrängen, die Kontaktumformer dagegen völlig ablösen. In allen Anwendungen aber, wo es auf die "Steuerbarkeit" ankam, waren Quecksilberdampf- bzw. Glühkatodengleichrichter bisher unentbehrlich. Die ernsthaften Bemühungen um ein entsprechendes Halbleiterbauelement führte mit der Entwicklung des Siliziumthyristors zum Erfolg. Mit Hilfe dieser Bauelemente ist man in der Lage kleine temperatur- und erschütterungsunempfindliche, in der Leistung praktisch unbegrenzte Stromrichter zu erstellen.

Prinzipiell unterscheidet man netz-, last- und fremdgelöschte Stromrichter. In den Fällen, in denen ein Drehstrom- oder ein Wechselstromnetz vorhanden ist, verwendet man heute praktisch ausschließlich (im Rahmen der Antriebstechnik) netzgelöschte Stromrichter. Diese haben vor allen Dingen den Vorteil, daß die geringsten Anforderungen an die Daten der Bauelemente gestellt werden. Für Halbleiterventile wird vorrangig die Drehstrombrückenschaltung verwendet.

Unabhängig von den hier gemachten Bemerkungen ist für die Zukunft beim Vorhandensein billigerer Ventile mit günstigeren statischen und dynamischen Eigenschaften die Anwendung von netzgeführten, selbstgelöschten Stromrichtern, zur Einsparung und Erzeugung von

Blindleistung zu erwarten. Weitere Anwendungsgebiete dieser Bauelemente wären Antriebe mit selbst- und fremdgesteuerten Wechselrichtern zur Speisung von kommutatorlosen Drehfeldmaschinen mit günstigeren dynamischen und statischen Eigenschaften. Weitere netzgelöschte Stromrichter, die aber nur in Zusammenhang mit Drehfeldmaschinen interessant sind, sind direkte Umrichter und Wechsel- bzw. Drehstromsteller.

Durch die Anwendung der Halbleiterventile ergab sich auf Grund ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Überbelastungen (Überspannungen, Überströme, Übertemperaturen) die Notwendigkeit, die Belastungen der Ventile genauer zu untersuchen. Besondere Berücksichtigung müssen hierbei Belastungsschwankungen finden.

Darüber sind bisher bereits viele Veröffentlichungen erschienen, so daß dieses Gebiet als abgeschlossen betrachtet werden kann /1//2//3//4//5/. Dagegen sind in der einschlägigen Literatur keine Veröffentlichungen über das Verhalten von Stromrichtern bei Störungen und unsymmetrischen Betriebsfällen zu finden. Ein genaueres Untersuchen dieser Fälle ist notwendig zur richtigen Dimensionierung von Schutzeinrichtungen (Sicherungen usw.) und zum Entwurf von störungssicheren Antriebssystemen.

Prinzipiell können sehr viele verschiedene Fehlerarten auftreten. Hier sei nur an Kurzschlüsse, Zündimpulsausfälle und Fehlimpulse, Netzausfälle und Ventildurchbrüche erinnert. Aber auch die Untersuchung von Störungen wie der Ausfall von TSE-Beschaltungen und des Schutzgleichrichters kann wesentliche Ergebnisse bringen.

2. Simulationsmöglichkeiten von netzgelöschten Stromrichtern auf Rechnersystemen

Die Voraussetzung zur Simulation von Störungen ist die Simulation des Normalbetriebes von Stromrichtern in allen Arbeitsbereichen einschließlich der auftretenden dynamischen Vorgänge.

2.1. Simulation auf dem Digitalrechner

Hier bieten sich drei verschiedenen Möglichkeiten an.

In /16/ wird das im Abschnitt 2.1.2. beschriebene Verfahren angedeutet. Dieses Programm wurde auch in ALGOL formuliert. Als Integrationsschrittweite wurde 0,1 ms gewählt. Außerdem wird über ein von J.Holtz entwickeltes Verfahren berichtet. Die Drehstrombrücke wird durch Auswertung nur zweier Zustände, Kommutierung oder Nichtkommutierung, und zyklische Vertauschung der eingeprägten Spannungen berechnet. Der Fall der Doppelkommutierung in einer Brücke wurde allerdings nicht erfaßt. Der Mitteilung

ist zu entnehmen, daß es durch eine ausgefeilte Programmtechnik gelang, den Umfang des Programmes stark zu verringern. Es wurde von Rechenzeiten von etwa 150s/Periode bei Verwendung eines kleinen Prozeßrechners (SIEMENS 302) bzw. von 2s/Periode auf einer größeren Anlage (ICL 1907) berichtet.

Die dritte Möglichkeit der Stromrichtersimulation ist das im Abschnitt 3.2. skizzierte Verfahren. Hier wird ein Differentialgleichungssystem speziell für einen bestimmten Fehlerfall aufgestellt und gelöst.

2.1.1. Vorausberechnung der Ströme

Die einfachste Methode ist die der Vorausberechnung der Stromverläufe und die Ableitung der Schaltbedingungen aus den Augenblickswerten der Ströme. Voraussetzung für die Lösung ist ein lineares System und sinusförmig eingeprägte Spannungen. Als Lösungen kommen hier nur Sinusfunktionen in Frage, die mit e-Funktionen überlagert sind. Vorteil ist, daß der Digitalrechner keine Differentialgleichungssysteme zu lösen braucht. Demzufolge benötigt er auch keine großen Rechenzeiten.

2.1.1.1. Beispiel einer zweipulsigen Mittelpunktschaltung mit passiver Last

Abb.1 zeigt das Schaltbild der zu simulierenden Schaltung.

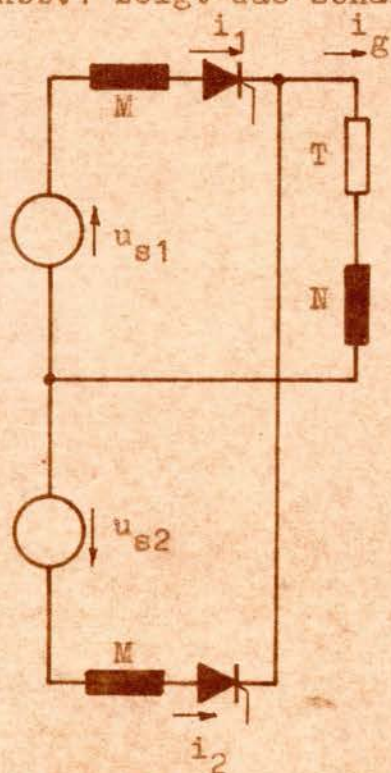


Abb.1

Die Effektivwerte der Spannungen seien konstant und gleich und ihre Augenblickswerte

$$u_{s1} = \sqrt{2} U_s \sin \omega t \quad (2.1.1.1)$$

$$u_{s2} = -\sqrt{2} U_s \sin \omega t \quad (2.1.1.2)$$

Mögliche Schaltzustände sind:

a) Ventil 1 führt Strom:

Dann gilt

$$u_{s1} = (N+M) \frac{di}{dt} + T i \quad (2.1.1.3)$$

(Abb.2)

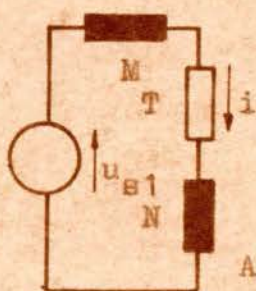


Abb.2

b) Ventil 2 führt Strom:

Hier gilt nach Abb.3

$$u_{s2} = (N+M) \frac{di}{dt} + T i \quad (2.1.1.4)$$

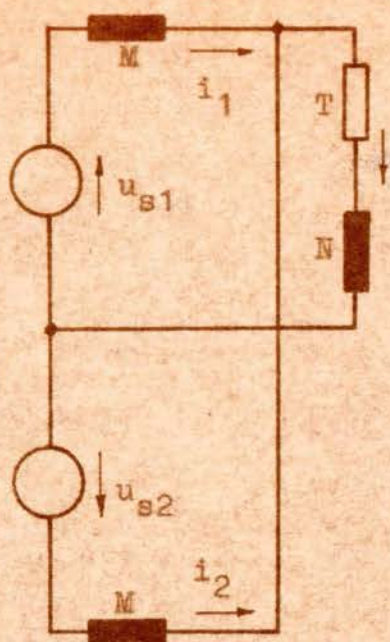


Abb.4

c) Beide Ventile führen Strom (Abb.4):

$$u_{s1} = M \frac{di_1}{dt} + N \frac{di_g}{dt} + T i_g \quad (2.1.1.5)$$

$$u_{s2} = M \frac{di_2}{dt} + N \frac{di_g}{dt} + T i_g \quad (2.1.1.6)$$

$$i_1 + i_2 = i_g \quad (2.1.1.7)$$

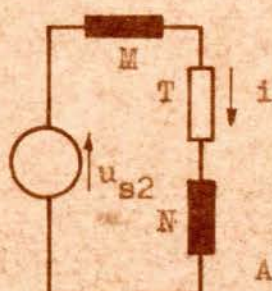


Abb.3

Aus Gründen der Anschaulichkeit werden die Differentialgleichungen direkt gelöst.

a)

$$\frac{di}{dt} + \frac{T}{(N+M)} i = \frac{u_{s1}}{(N+M)}$$

$$\tau_1 = \frac{N+M}{T} \quad (2.1.1.8)$$

Homogene (flüchtige) Lösung

$$\frac{di_f}{dt} + \frac{1}{\tau_1} i_f = 0$$

$$i_f = I_0 e^{-t/\tau_1}$$

Eingeschwungener Zustand

$$U_s^L = \left\{ j\omega(M+N) + T \right\} I^L$$

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_s}{T \sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad \text{mit}$$

$$\varphi_1 = \arctan \omega\tau_1 \quad (2.1.1.9)$$

Damit ergibt sich der Gesamtstrom zu

$$i = \frac{\sqrt{2} U_s}{T \sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_0 e^{-t/\tau_1} \quad (2.1.1.10)$$

Mit der Anfangsbedingung

$$i(t_a) = I_a \quad (2.1.1.11)$$

ergibt sich I_0 zu

$$I_0 = e^{t_a/\tau_1} \left[\frac{-\sqrt{2} U_s}{T \sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}} \sin(\omega t_a + \varphi_1) + I_a \right] \quad (2.1.1.12)$$

b) Analog ergibt sich für den Bereich b:

$$i = \frac{-\sqrt{2} U_s}{T \sqrt{1 + (\omega \tau_1)^2}} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_0 e^{-t/\tau_1} \quad (2.1.1.13)$$

und

$$I_0 = e^{t_a/\tau_1} \left[\frac{+\sqrt{2} U_s}{T \sqrt{1 + (\omega \tau_1)^2}} \sin(\omega t_a + \varphi_1) + I_a \right] \quad (2.1.1.14)$$

(t_a kann direkt in die e-Funktion eingesetzt werden, da $\frac{de^{x+t}}{dx} = e^x$.)

c)

$$u_{s1} - u_{s2} = M \left(\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right)$$

$$\int di_1 = \int di_2 + \int \frac{u_{s1} - u_{s2}}{M} dt + C$$

$$i_1 = i_2 - \frac{2\sqrt{2} U_s}{\omega M} \cos \omega t + C \quad (2.1.1.15)$$

Möglichkeit 1 :

$$i_1(t_a) = 0 ; i_2(t_a) = I_a$$

$$C = \frac{2\sqrt{2} U_s}{\omega M} \cos \omega t_a - I_a \quad (2.1.1.16)$$

Möglichkeit 2 :

$$i_1(t_a) = I_a ; i_2(t_a) = 0$$

$$C = + \left(I_a + \frac{2\sqrt{2} U_s}{\omega M} \cos \omega t_a \right) \quad (2.1.1.17)$$

Durch Einsetzen ergibt sich

$$\frac{di_2}{dt} + \frac{2T}{M+2N} i_2 = \frac{1 + N/M}{M+2N} u_{s2} - \frac{u_{s1}}{M+2N} + \frac{T}{\omega M(M+2N)} 2\sqrt{2} U_s \cos \omega t + \frac{C T}{M+2N}$$

Homogene Lösung:

$$i_{2f} = I_0 e^{-t/\tau_2} \quad \text{mit} \quad \tau_2 = \frac{M+2N}{2T} \quad (2.1.1.18)$$

Eingeschwungener Zustand:

$$i_{2d} = \sqrt{2} U_s \frac{\sqrt{(2N/M+1)^2 + (2T/\omega M)^2}}{\sqrt{(2T)^2 + [(M+2N)\omega]^2}} \sin(\omega t + \varphi_2 + \varphi_3)$$

mit

$$\varphi_2 = \arctan \frac{M+2N}{2T} \omega \quad (2.1.1.19)$$

und

$$\varphi_3 = \arctan \omega \frac{2N-M}{2T} \quad (2.1.1.20)$$

Der Gesamtstrom folgt daraus zu

$$i_2 = \sqrt{2} U_s \frac{1}{\sqrt{(2T)^2 + [(M+2N)\omega]^2}} \sin(\omega t + \varphi_2 + \varphi_3) + I_0 e^{-t/\tau_2} \quad (2.1.1.21)$$

mit I_0 nach Möglichkeit 1

$$I_0 = e^{t_a/\tau_2} \left[I_a - \sqrt{2} U_s \frac{\sqrt{\dots}}{\dots} \sin(\dots) \right] \quad (2.1.1.22)$$

bzw. nach Möglichkeit 2

$$I_0 = e^{t_a/\tau_2} \left[-\sqrt{2} U_s \frac{\dots}{\dots} \sin(\dots) \right]. \quad (2.1.1.23)$$

2.1.1.2. ALGOL-Programm und grobes Flußdiagramm

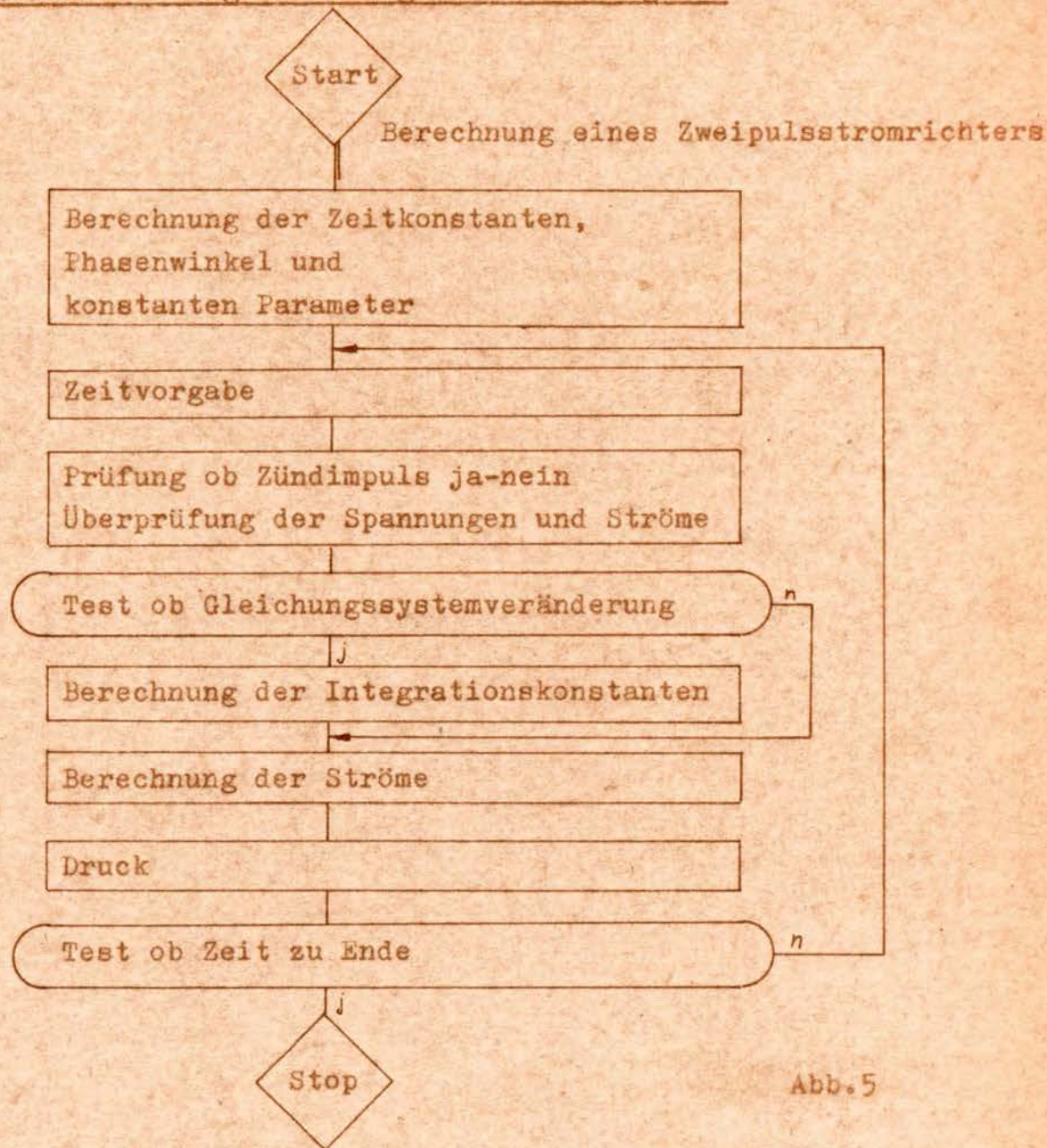


Abb.5

ALGOL-Programm:

```

begin real pi, Us, omega, N, M, T, t, ta, i1, i2, delta, ia, C,
  alpha1, alpha2, stib1, stib2, tau1, tau2, us1, us2,
  phi1, phi2, phi3, ki1, ki2, ki3, beta, W2, Grenze, i0;
integer k, l, m, n;
Boolean L1, L2, S1, S2, du1, du2;
read(pi, Us, omega, N, M, T, delta, alpha1, alpha2, stib1,
  stib2, du1, du2, Grenze);
tau1:=(N+M)/T;
tau2:=(M+2*N)/2/T;

```



```

W2:=sqrt(2);
phi1:=arctan(omegaxtau1);
phi2:=arctan(omegaxtau2);
phi3:=arctan(omegax(2xN-M)/2/T);
ki1:=W2xUs/T/sqrt(1+(omegaxtau1)2);
ki2:=W2x2xUs/omega/M;
ki3:=W2xUsxsqrt((2xT/omega/M)2+(2xN/M+1)2)/
      sqrt(4xT2+((M+2xN)xomega)2);
l:=i1:=i2:=0;
m:=1;
for t:=0 step delta until Grenze do
  begin
    us1:=W2xUsxsin(omegaxt);
    us2:=-us1;
    k:=div(omegaxt,2xpi);
    beta:=omegaxt-2xpixk;
    L1:=beta>alpha1^beta<(alpha1+stib1);
    L2:=(beta+pi)>alpha2^(beta+pi)<(alpha2+stib2);
    S1:=i1>0Vdu1;
    S2:=i2>0Vdu2;
    L1:=L1^(¬S1);
    L2:=L2^(¬S2);
    print(us1, us2, L1, L2, t);
    if l+m then
      begin
        ta:=t;
        if (¬L1)^(¬L2) then ia:=0 else
        if (¬L2)^(L1) then ia:=i1 else
        if L2^(¬L1) then ia:=i2 else
        if L1^L2 then
          begin
            ia:=i1+i2;
            if i1=0 then
              begin
                C:=ki2xcos(omegaxt)-ia;
                n:=1;
              end
            else
              begin
                C:=(ki2xcos(omegaxt)+ia);
                n:=0;
              end;
            end;
          end;
        end;
        l:=m;
        if (¬L1)^(¬L2) then
          begin
            m:=1;
            i1:=i2:=0;

```



```

end else
if L1^(¬L2) then
begin m:=2;
i2:=0;
i1:=ki1*sin(omega*t+phi1)+exp(-t/tau1)*
exp(ta/tau1)*(ki1*sin(omega*ta+phi1)+ia);
end else
if L2^(¬L1) then
begin m:=3;
i1:=0;
i2:=-ki1*sin(omega*t+phi1)+exp(-t/tau1)*
exp(ta/tau1)*(+ki1*sin(omega*ta+phi1)+ia);
end else
if L1^L2 then
begin m:=4;
if n=0 then i0:=(-ki3*sin(omega*ta+phi2+phi3))*
exp(ta/tau2)
else i0:=(ia-ki3*sin(omega*ta+phi2+phi3))*
exp(ta/tau2);
i2:=ki3*sin(omega*t+phi2+phi3)+i0*exp(-t/tau2);
i1:=i2-ki2*cos(omega*t)+C;
end;
end;
print(i1, i2);
end

```

2.1.1.3. Ausführliches Flußdiagramm

Zweipulsmittelpunktsschaltung

```

read(pi,Us,omega,N,M,T,delta,alpha1,
alpha2,stib1,stib2,du1,du2,
Grenze);
tau1:=(N+M)/T;
tau2:=(2*N+M)/2/T;
phi1:=arc tan(omega*tau1);
phi2:=arc tan(omega*tau2);
phi3:=arc tan(omega*(2*N-M)/2/T);
W2:=sqrt(2);
ki1:=W2*Us/T/sqrt(1+(omega*tau1)^2);

```


1

```
ki2:=W2*2*Us/omega/M;
ki3:=W2*Us*sqrt((2*T/omega/M)^2+
(2*N/M+1)^2)/sqrt(4*T^2+
((M+2*N)*omega)^2);

l:=i1:=i2:=0;
m:=1;
t:=0;
```

3

```
us1:=W2*Us*sin(omega*t);
us2:=-us1;
k:=div(omega*t,2*pi);
beta:=omega*t-2*pi*k;
L1:=beta>alpha1^beta<(alpha1+stib1);
L2:=(beta+pi)^alpha2^(beta+pi)<
(alpha2+stib2);

print(us1,us2,L1,L2,t);
Test:=l+m;
```

```
ta:=t
Test:=(¬L1)^(¬L2);
```

```
Test:=L1^(¬L2);
```

```
Test:=L2^(¬L1);
```

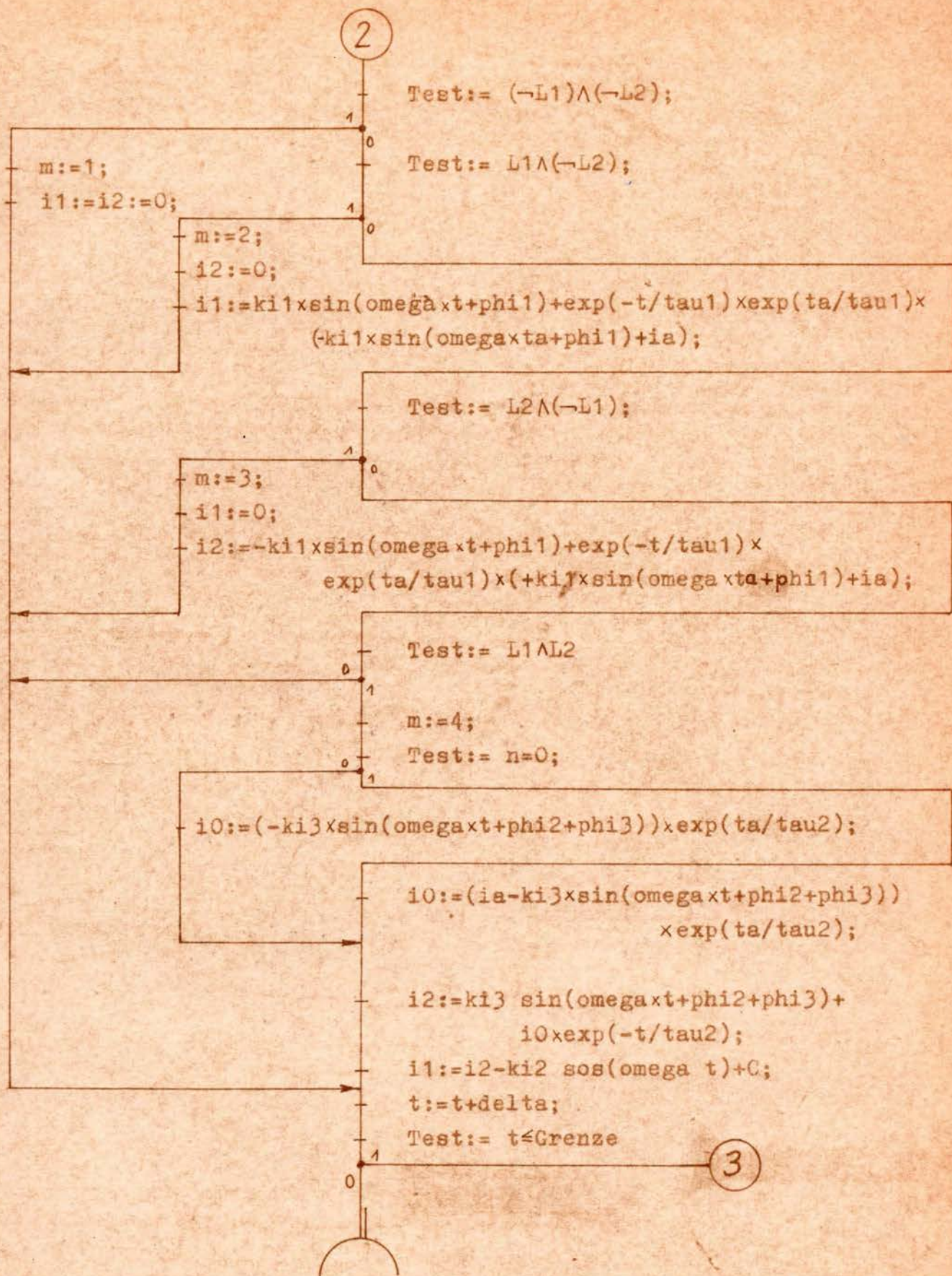
```
Test:=L1^L2;
```

```
ia:=i1+i2;
Test:= i1=0;
```

```
C:=(ki2*cos(omega*t)
+ia);
n:=0;
```

```
l:=m;
```

2



2.1.2. Lösung von Differentialgleichungssystemen

Die zweite Methode zur Berechnung des Verhaltens von Stromrichterschaltungen ist die Lösung des Differentialgleichungssystems, wobei hier wiederum auf Grund der Stromverläufe eine Auswahl der Gleichungen getroffen wird. In /9/ wird dieses Verfahren

auch angewandt.

2.1.2.1. Beispiel einer Drehstrombrückenschaltung mit Motorlast

Ausgangspunkt ist die Dissertation Schulze-Buxloh /8/. Es wird allerdings die Steuerbarkeit des Gleichrichters mit einbezogen. Die Last ist ohmsch-induktiv mit Gegen-EMK (Motorlast). Zuerst werden die Differentialgleichungssysteme und die Matrizen zur Berechnung der Spannungen über den Ventilen angegeben.

2.1.2.1.1. Voraussetzungen

Das vollständige Ersatzschaltbild der Brücke zeigt Abb.6.

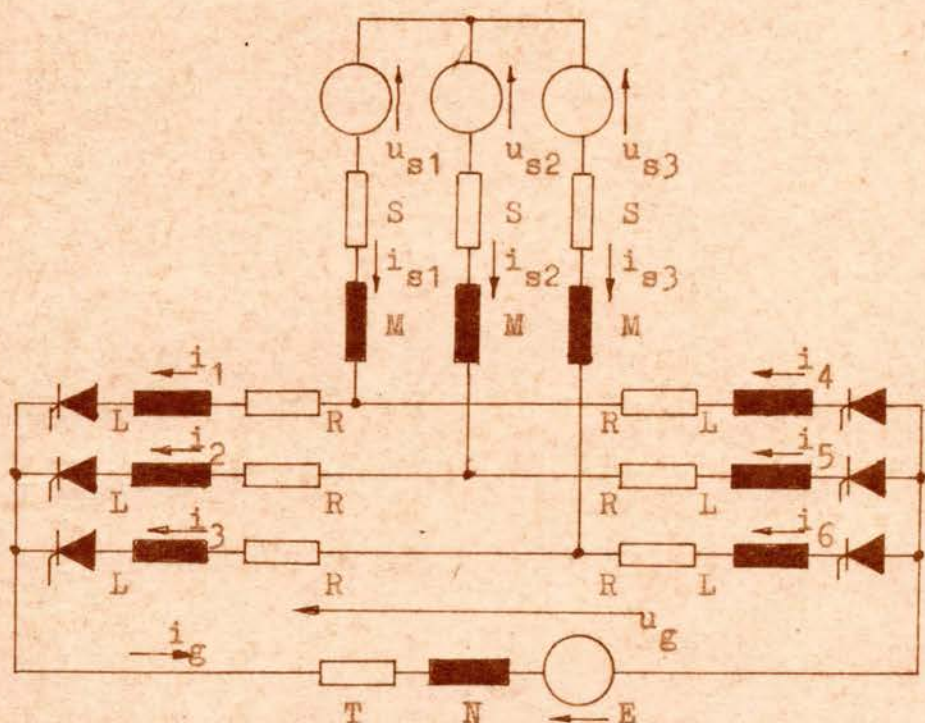


Abb.6

Gespeist wird die Schaltung durch die auf der Ventilseite des Stromrichtertrafos bezogenen drei Sternspannungen u_{s1} , u_{s2} , u_{s3} . Für diese, die Anlage speisenden Generatoren, gilt

$$u_{s1} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.1.2.1)$$

$$u_{s2} = \sqrt{2} U_s \cos \omega t \quad (2.1.2.2)$$

$$u_{s3} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.1.2.3)$$

Die Spannungen sind zeitlich sinusförmig und gegeneinander um 120° el. in der Phasenlage versetzt. Die drei untereinander gleichen Transformator-Induktivitäten M berücksichtigen zunächst die ventilseitigen Wicklungsstreuinduktivitäten und die Induktivitäten der Verbindungsleitungen bis zu diesem Punkt, wo sich die Leitung in die beiden Ventilzuleitungen aufteilt. Darüber

hinaus sind aber auch die auf die Ventilseiten bezogenen Induktivitäten der Netzseite, einschließlich der Induktivitäten der Generatoren, des Netzes und gegebenenfalls der zwischengeschalteten Transformatoren enthalten. Zur Bezeichnung der Transformatorinduktivität wurde M gewählt, da durch diese Induktivität gewissermaßen eine Verkettung der Ventilströme in beiden Brückenseiten gegeben ist. Mit den gleichen Abgrenzungen sind alle ohmschen Widerstände in S zusammengefaßt.

Die Induktivität einer Ventilizuleitung (Leitung, Stromteiler- oder Transduktordrossel) wird mit L bezeichnet. Der entsprechende ohmsche Widerstand ist R .

Die Ventile seien ideal, d.h. sie haben keinen Widerstand in Durchlaßrichtung und unendlich hohen Widerstand in Sperrichtung. Für genaueste Berechnungen müßte der stromabhängige Anteil des Spannungsabfalls an den Ventilen (differentieller Widerstand) im Ersatzschaltbild im Widerstand R berücksichtigt werden. Der stromunabhängige Anteil des Spannungsabfalls an den Ventilen (Schleusenspannung) subtrahiert sich direkt von der Gleichspannung.

Die Ventile sind in der positiven Brückenseite mit 1 bis 3, in der negativen Brückenseite mit 4 bis 6 gekennzeichnet. Die Ventilströme werden entsprechend mit i_1 bis i_6 durchnummeriert.

Ist eine allgemeine Zuordnung erforderlich, so werden in der gleichen Reihenfolge Buchstaben verwendet, deren Zuordnung nicht der der Zahlen entspricht.

Die gleichstromseitige Glättungsdrossel wird mit N , der entsprechende Widerstand mit T und die Gegenspannung mit E bezeichnet.

In jedem Fall gilt

$$u_g = E + T i_g + N \frac{di_g}{dt}, \quad (2.1.2.4)$$

wie auch

$$i_{s1} + i_{s2} + i_{s3} = 0 \quad (2.1.2.5)$$

$$i_{s1} = i_1 - i_4 \quad (2.1.2.6)$$

$$i_{s2} = i_2 - i_5 \quad (2.1.2.7)$$

$$i_{s3} = i_3 - i_6 \quad (2.1.2.8)$$

$$i_g = i_1 + i_2 + i_3 = i_4 + i_5 + i_6 \quad (2.1.2.9)$$

Der arithmetische Mittelwert der ideellen Leerlaufgleichspg. ist

$$U_{da} = \frac{3}{2\pi} 2\sqrt{2} U_s \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_s \quad (2.1.2.10)$$

2.1.2.1.2. Kein Ventil führt Strom

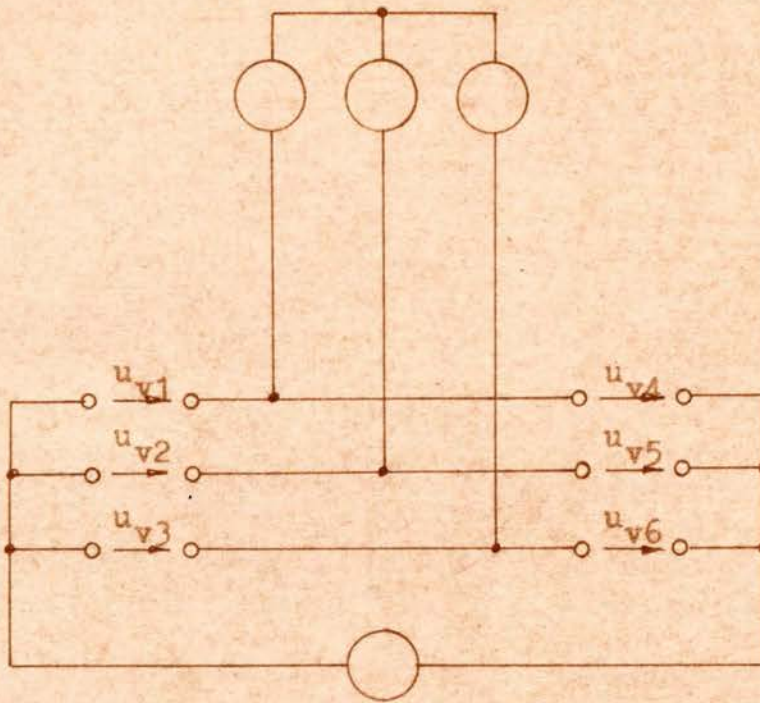


Abb.7

Angenommen werden gleiche Sperrwiderstände $R \rightarrow \infty$ aller Ventile.
Dann ergibt sich folgendes Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} u_{s1} - u_{s2} \\ u_{s1} - u_{s3} \\ u_{s2} - u_{s3} \\ u_{s3} - u_{s1} \\ E \\ 0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} \quad (2.1.2.11)$$

Durch Inversion der Matrix folgt daraus

$$\begin{bmatrix} u_{v1} \\ u_{v2} \\ u_{v3} \\ u_{v4} \\ u_{v5} \\ u_{v6} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 & -3/2 \\ 1 & -2 & 1 & -3/2 \\ 1 & 1 & -2 & -3/2 \\ 2 & -1 & -1 & -3/2 \\ -1 & 2 & -1 & -3/2 \\ -1 & -1 & 2 & -3/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{s1} \\ u_{s2} \\ u_{s3} \\ E \end{bmatrix} \quad (2.1.2.12)$$

Ag 306/67/DDR/1944/1900/1967 V.5-2

2.1.2.1.3. Zwei Ventile führen Strom

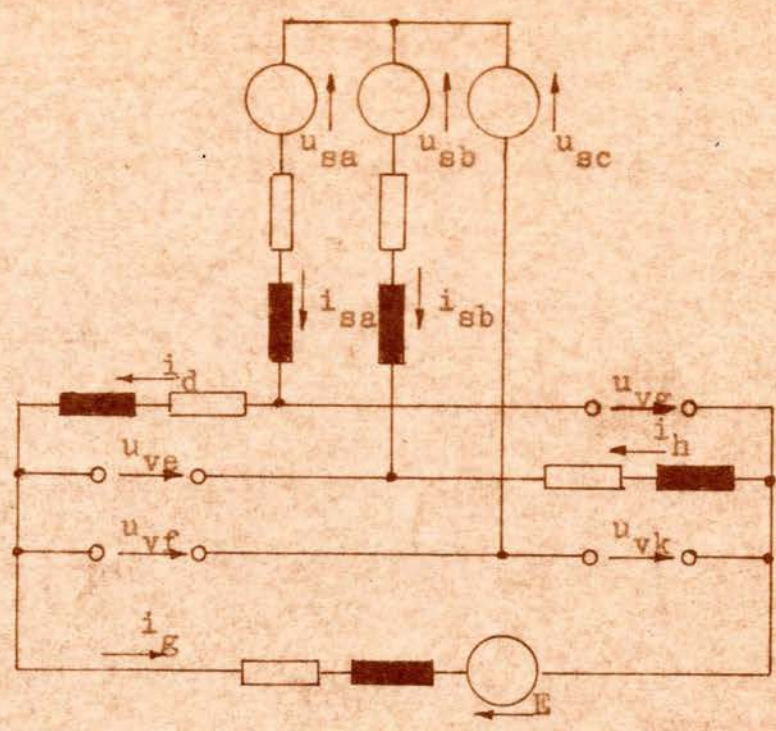


Abb.8

$$i_{sa} = i_g = i_d = i_h = -i_{sb}$$

$$u_{sb} - u_{sa} - E - i_d (2R + 2S + T) = (2M + 2L + N) \frac{di_d}{dt} \quad (2.1.2.13)$$

$$\begin{bmatrix} u_{ve} \\ u_{vf} \\ u_{vg} \\ u_{vk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & 0 & -R-2S & -L-2M \\ 1 & 0 & -1 & -R-S & -L-M \\ 1 & -1 & 0 & -R-2S & -L-2M \\ 0 & -1 & 1 & -R-S & -L-M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \\ i_d \\ di_d/dt \end{bmatrix} \quad (2.1.2.14)$$

2.1.2.1.4. Drei Ventile führen Strom

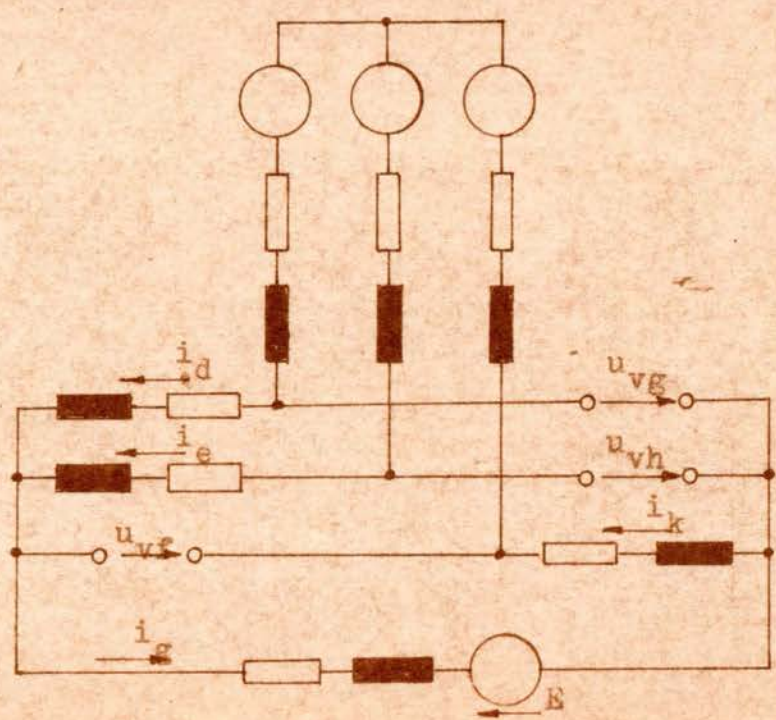


Abb.9

Bestell-Nr. 59012 Vordruck-Lieferung Gefordert

$$i_g = i_k = i_e + i_d$$

$$\begin{bmatrix} u_{sb} - u_{sa} + i_e(R+S) - i_d(R+S) \\ u_{sc} - u_{sa} - E - i_d(2R+2S+T) - i_e(R+S+T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L+M & -L-M \\ 2L+2M+N & L+M+N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_e \end{bmatrix} \quad (2.1.2.15)$$

$$\begin{bmatrix} u_{vf} \\ u_{vg} \\ u_{vh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -R-2S & -S & -L-2M & -M \\ 1 & 0 & -1 & -R-2S & -R-S & -L-2M & -L-M \\ 0 & 1 & -1 & -R-S & -R-2S & -L-M & -L-2M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \\ i_d \\ i_e \\ di_d/dt \\ di_e/dt \end{bmatrix} \quad (2.1.2.16)$$

An Stelle von $\frac{di}{dt}$ wurde i' eingeführt.

2.1.2.1.5. Vier Ventile führen Strom

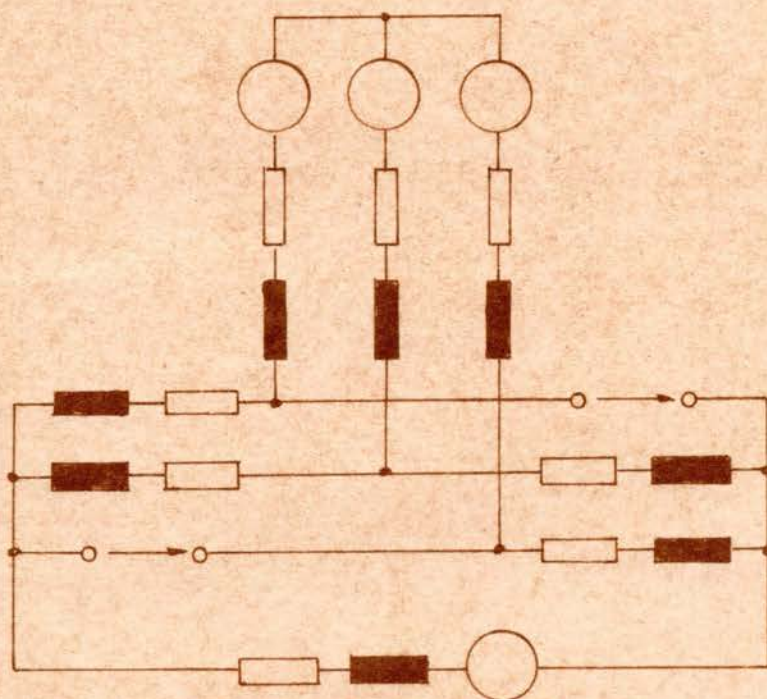


Abb. 10

$$i_k = i_d + i_e - i_h$$

$$\begin{bmatrix} u_{sb} - u_{sa} - i_d(R+S) + i_e(R+S) - i_h S \\ u_{sc} - u_{sb} - i_d(R+S) - i_e(R+2S) + i_h(2R+2S) \\ E + i_e(R+T) + i_d T + i_h R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & L+M & -(L+M) \\ -2(L+M) & L+M & L+2M \\ -L & -N & -(L+N) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_h \\ i'_d \\ i'_e \end{bmatrix} \quad (2.1.2.17)$$

$$u_{vf} = +u_{sa} - u_{sc} - i_d(R+2S) - i_e S + i_h S - (L+2M)i'_d - M i'_e + M i'_h \quad (2.1.2.18)$$

$$u_{vg} = u_{sa} - u_{sc} - i_d(R+2S) - i_e(R+S) + i_h(R+S) - (L+2M)i'_d - (L+M)i'_e + (L+M)i'_h$$

2.1.2.1.6. Fünf Ventile führen Strom

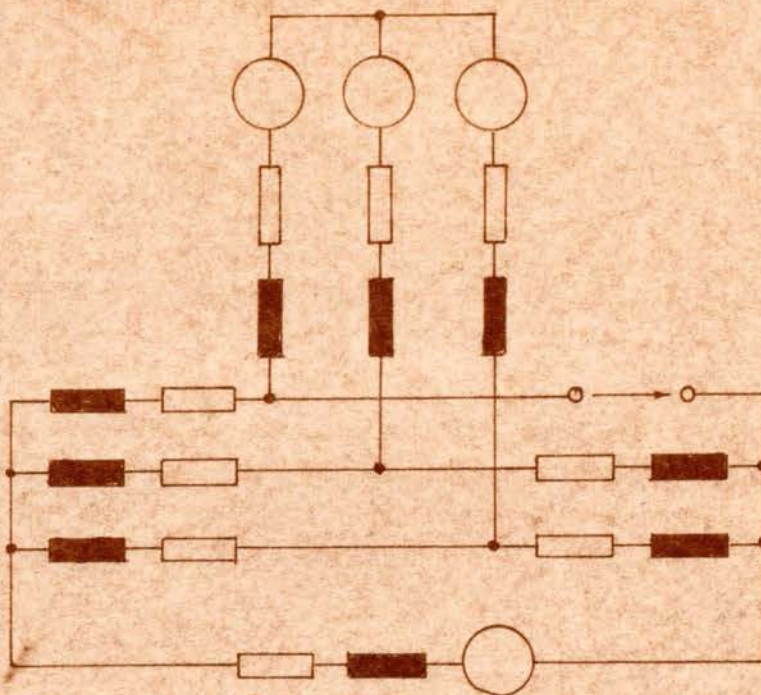


Abb. 11

$$i_k = i_d + i_e + i_f - i_h$$

$$i_{sc} = i_h - i_d - i_e$$

$$\begin{pmatrix} u_{sb} - u_{sa} + i_e(R+S) - i_h S - i_d(R+S) \\ u_{sc} - u_{sa} + i_h S - i_d(R+2S) - i_e S + i_f R \\ E + i_h R + i_e(R+T) + i_d T + i_f T \\ u_{sc} - u_{sb} + 2i_h(R+S) - i_d(R+S) - i_e(R+2S) - i_f R \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} L+M & -L-M & M & 0 \\ L+2M & M & -M & -L \\ -N & -(N+L) & -L & -N \\ L+M & L+2M & -2(L+M) & L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} i'_d \\ i'_e \\ i'_h \\ i'_f \end{pmatrix} \quad (2.1.2.19)$$

$$u_{vg} = u_{sa} - u_{sb} - i_h(R+S) - (L+M)i'_h + Si'_e + Mi'_e - Si'_d - Mi'_d \quad (2.1.2.20)$$

2.1.2.1.7. Sechs Ventile führen Strom

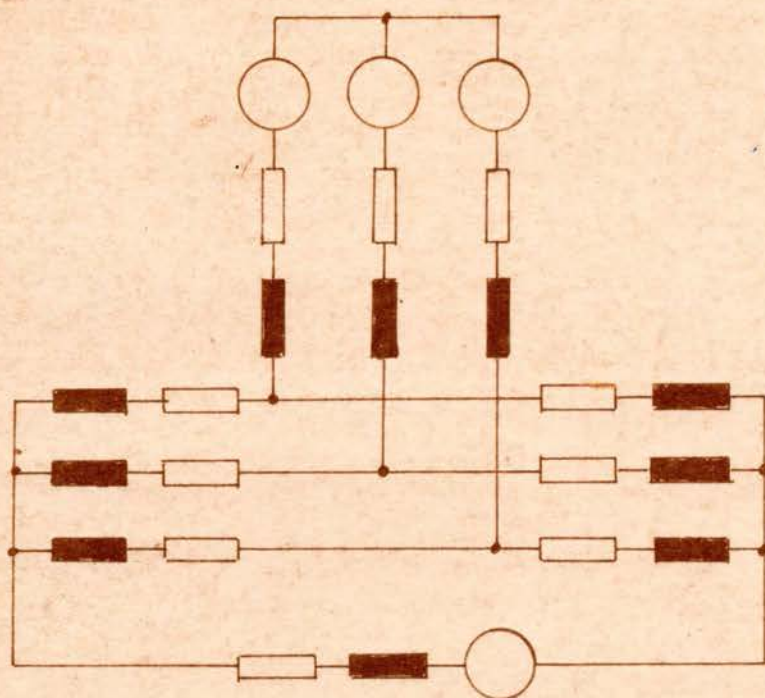


Abb.12

$$i_6 = i_1 + i_2 + i_3 + (-i_4 - i_5)$$

$$i_{s3} = i_4 + i_5 - i_1 - i_2$$

$$u_{s2} - u_{s1} + i_2(R+S) - i_5S - i_1(R+S) + i_4S$$

$$E + i_1(R+T) + i_2T + i_3T + i_4R$$

$$E + i_2(R+T) + i_1T + i_3T + i_5R + 2i_3S$$

$$u_{s3} - u_{s1} - i_1(R+2S) - i_2S + i_3R + 2i_4S + i_5S$$

$$u_{s3} - u_{s2} - i_1(R+S) - i_2(R+2S) - i_3R + i_4(R+S) + 2i_5(R+S)$$

$$\begin{vmatrix} L+M & -L-M & 0 & -M & M \\ -L-N & -N & -N & -L & 0 \\ -N & -L-N & -N & 0 & -L \\ L+2M & M & -2M-L & -2M & -M \\ L+M & L+2M & L & -L-M & -2(L+M) \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} i'_1 \\ i'_2 \\ i'_3 \\ i'_4 \\ i'_5 \end{vmatrix}$$

(2.1.2.21)

2.1.2.2. Möglichkeiten zur Aufstellung eines Programmes

Zweckmäßig ist die Aufstellung eines allgemein verwendbaren Unterprogrammes in der Sprache ALGOL. Dieses Programm kann in Zusammenhang mit einem Rahmenprogramm zur Berechnung von allen möglichen vorkommenden Fehlern dienen. Auch kann das Programm, sofern es vervollständigt wurde (s.u.), zur Simulation von zweipulsigen und dreipulsigen Mittelpunktsschaltungen sowie der zwei- und sechspulsigen Brückenschaltung-halb- und vollgesteuert-verwendet

werden.

Es soll noch betont werden, daß die hier bereitgestellten Gleichungen zwar zur Simulierung des ungestörten Betriebes genügen, daß aber bei bestimmten Havariefällen andere Gleichungssysteme auftreten. Als Beispiel soll nur der Fall genannt werden, daß die Ventile 3 und 6 keine Zündimpulse bekommen und trotzdem vier Ventile Strom führen. Es wäre u.U. zweckmäßig von vornherein ein gesteuertes Nullventil in das Programm mitaufzunehmen. Nach geringfügigen Veränderungen (die Spannungen müßten in den formalen Parameterteil mit aufgenommen werden) kann das Programm auch zur Simulation einer Brückenschaltung, die mit veränderlicher Frequenz gespeist wird, verwendet werden (z.B. untersynchrone Stromrichter-kaskade).

Zweckmäßig dazu ist der Entwurf von Unterprogrammen zur Simulation von elektrischen Maschinen und Regelkreisen. Voraussetzung zur Anwendung ist allerdings das Vorhandensein eines genügend schnellen Rechners mit verhältnismäßig viel Speicherraum. Gerade in Zusammenhang mit der untersynchronen Stromrichter-kaskade können Ein-, Aus- und Übergangsvorgänge noch genauer als bisher untersucht werden.

2.1.2.3. ALGOL-Programm Prozedur Drehstrombrücke

```

procedure Drehstrombruecke (i1,i2,i3,i4,i5,i6,alpha1,alpha2,
    alpha3,alpha4,alpha5,alpha6,stib1,stib2,stib3,stib4,
    stib5,stib6,L,M,N,R,S,T,f,Us,n,t,du1,du2,du3,du4,du5,
    du6,E,i1t,i2t,i3t,i4t,i5t,i6t,tt,uv1,uv2,uv3,uv4,
    uv5,uv6);
value L,M,N,R,S,T,f,Us,n,du1,du2,du3,du4,du5,du6,t,uv1,uv2,uv3,
    uv4,uv5,uv6;
integer n;
real i1,i2,i3,i4,i5,i6,alpha1,alpha2,alpha3,alpha4,alpha5,alpha6,
    stib1,stib2,stib3,stib4,stib5,stib6,L,M,N,R,S,T,f,Us,t,E,
    i1t,i2t,i3t,i4t,i5t,i6t,tt,uv1,uv2,uv3,uv4,uv5,uv6;
Boolean du1,du2,du3,du4,du5,du6;
begin real omegat,pi,beta1,beta2,beta3,beta4,beta5,beta6,us1,
    us2,us3,usa,usb,usc,id,ie,if,ig,ih,ik,uvd,uve,uvf,
    uvg,uvh,uvk;
    integer k,li1,li2,li3,li4,li5,li6,si1,si2,si3,si4,si5,si6,
    m,l;
    Boolean L1,L2,L3,L4,L5,L6,S1,S2,S3,S4,S5,S6,U1,U2,U3,U4,
    U5,U6;
    switch D:=D2,D3,D4,D5,D6;

```



```

array A2,A,G,AG [1,1],U2 [1:4,1:5],u2 [1:5,1],DGL2[0:1],
      D2 [1:4,1],B3,B [1:2,1:2];
procedure INVERT(matr,n,matri);
value n,matr;
integer n;
array matr,matri;
begin comment Matrizeninversion nach der Methode der
      Rangverkleinerung;
      comment Das Verfahren ist anwendbar, wenn die zu
      invertierende Matrix matr regulär ist und
      wenn matr[1,1] ungleich 1 ist, In diesen
      Fall wird die Matrix automatisch verändert;
      integer b,i,j,k,m,s;
      real sum1,sum2,sum3,lambda;
      array alpha,beta,u,v[1:n];
      for i:=1 step 1 until n do
      for j:=1 step 1 until n do
      matri[i,j]:=0;
      comment Prüfung ob matr[1,1] ungleich 1 ist, wenn
      ja, automatische Veraenderung der Matrix;
      if matr[1,1]=1 then
      begin for i:=1 step 1 until n do
        for j:=1 step 1 until n do
        matr[i,j]:=matr[i,j]x2;
        s:=1;
      end else s:=0;
      for i:=1 step 1 until n do
      begin matr[i,i]:=matr[i,i]-1;
        matri[i,i]:=1;
      end;
      m:=1;
      M1:for i:=m+1 step 1 until n do
      begin alpha[i]:=matr[i,m]/matr[m,m];
        beta[i]:= matr[m,i];
      end
      for i:=1 step 1 until n do
      begin sum1:=sum2:=0;
        for k:=m step 1 until n do
        begin sum1:=sum1+matri[i,k]xmatr[k,m];
          sum2 :=sum2+matr[m,k]xmatr[k,i];
        end;
      end;

```



```

u[i] := sum1;
v[i] := sum2;

end;
sum3 := 0;
for j := m step 1 until n do
  sum3 := sum3 + v[j] * matr[j, m];
  lambda := sum3 + matr[m, m];
  for i := 1 step 1 until n do
    for j := 1 step 1 until n do
      matr[i, j] := matr[i, j] - u[i] * v[j] / lambda;
    if m = n then goto ENDE;
    for i := m + 1 step 1 until n do
      for j := m + 1 step 1 until n do
        matr[i, j] := matr[i, j] - alpha[i] * beta[j];
      m := m + 1;
      goto M1;
    ENDE: if s = 1 then
      begin for i := 1 step 1 until n do
        for j := 1 step 1 until n do
          matr[i, j] := matr[i, j] * 2;
        end;
      end;
    end;
  end;

procedure MULT(l, m, n, a, b, c);
  comment Multiplikation einer [n, 1]-Matrix a mit
    einer [1, m]-Matrix b mit dem Ergebnis
    einer [n, m]-Matrix c;

  value l, m, n;
  integer l, m, n;
  array a, b, c;
  begin integer i, j, k;
    for i := 1 step 1 until n do
      for k := 1 step 1 until n do
        begin c[i, k] := 0;
          for j := 1 step 1 until l do
            c[i, k] := c[i, k] + a[i, j] * b[j, k];
          end;
        end;
      end;
    end;

  end;

procedure DGLS(n, delta, g);
  value n;
  integer n;
  real delta;

```



```

array g;
begin integer i,j;
    real d;
    array a,b,c[1:4],k,q,y[0:n];
    real procedure kij(i);
    value i;
    integer i;
    begin integer I;
        for I:=0 step 1 until n-1 do
            if n=2 then kij:=DGL2[i] else
            if n=3 then kij:=DGL3[i] else
            if n=4 then kij:=DGL4[i] else
            if n=5 then kij:=DGL5[i] else
                kij:=DGL6[i];
        end;
        a[1]:=c[1]:=c[4]:=0.5;
        a[2]:=c[2]:=1-sqrt(0.5);
        a[3]:=c[3]:=1+sqrt(0.5);
        a[4]:=1/6;
        b[1]:=b[4]:=2;
        b[2]:=b[3]:=1;
        for i:=0 step 1 until n do q[i]:=0;
        for j:=1 step 1 until 4 do
            for i:=0 step 1 until n do
                begin k[i]:=kij(i);
                    d:=a[j]x(k[i]-b[j]xq[i]);
                    y[i]:=y[i]+deltaXd;
                    q[i]:=q[i]+3xd-c[j]xk[i];
                end;
            for i:=1 step 1 until n do
                begin g[1,i]:=i;
                    g[2,i]:=y[0];
                    g[3,i]:=y[1];
                    g[4,i]:=q[i];
                end;
        end;
    end;
    pi:=3.141593;
    delta:=1/f/n;
    omegat:=2xpi xf xt;
    k:=div(omegat+2xpi/3,2xpi);

```



```

beta1:=omegat-2*pi*k;
k:=div(omegat,2*pi);
beta2:=omegat-2*pi*k;
k:=div(omegat-2*pi/3,2*pi);
beta3:=omegat-2*pi*k;
k:=div(omegat+pi/6,2*pi);
beta4:=omegat-2*pi*k;
k:=div(omegat-pi/2,2*pi);
beta5:=omegat-2*pi*k;
k:=div(omegat+5*pi/6,2*pi);
beta6:=omegat-2*pi*k;
L1:=(beta1-pi/6)>alpha1^(beta1-pi/6)<(alpha1+stib1);
L2:=(beta2-pi/6)>alpha2^(beta2-pi/6)<(alpha2+stib2);
L3:=(beta3-pi/6)>alpha3^(beta3-pi/6)<(alpha3+stib3);
L4:=(beta4-pi/6)>alpha4^(beta4-pi/6)<(alpha4+stib4);
L5:=(beta5-pi/6)>alpha5^(beta5-pi/6)<(alpha5+stib5);
L6:=(beta6-pi/6)>alpha6^(beta6-pi/6)<(alpha6+stib6);
comment Realisierung der Nachimpulse;
S1:=L1VL6;S2:=L2VL4;S3:=L3VL5;S4:=L4VL3;S5:=L5VL1;L6:=L6VL2;
L1:=i1>0Vdu1; L2:=i2>0Vdu2; L3:=i3>0Vdu3;
L4:=i4>0Vdu4; L5:=i5>0Vdu5; L6:=i6>0Vdu6;
us1:=sqrt(2)*Us*cos(beta1);
us2:=sqrt(2)*Us*cos(beta2);
us3:=sqrt(2)*Us*cos(beta3);
comment Berechnungen der Spannungen, falls Stroeme Null;
if ~(L1 L2 L3) then
begin uv1:=-2/3*us1+us2/3+us3/3-E/2;
      uv2:=us1/3-2/3*us2+us3/3-E/2;
      uv3:=us1/3+us2/3-2/3*us3-E/2;
      uv4:=-uv1-E;
      uv5:=-uv2-E;
      uv6:=-uv3-E;
end;
comment Zuendimpulse haben nur Wirkung, wenn Spannung ueber
dem Ventil positiv ist und wenn durch das Ventil
kein Strom fließt;
U1:=uv1>0;U2:=uv2>0;U3:=uv3>0;U4:=uv4>0;U5:=uv5>0;U6:=uv6>0;
S1:=S1^U1^(~L1);S2:=S2^U2^(~L2);S3:=S3^U3^(~L3);
S4:=S4^U4^(~L4);S5:=S5^U5^(~L5);S6:=S6^U6^(~L6);
comment Auswahl der jeweiligen Differentialgleichungssysteme;
if L1 then li1:=1 else li1:=0;if L2 then li2:=1 else li2:=0;

```



```

if L2 then li3:=1 else li3:=0; if L4 then li4:=1 else li4:=0;
if L5 then li5:=1 else li5:=0; if L6 then li6:=1 else li6:=0;
m:=li1+li2+li3+li4+li5+li6;
if S1 then si1:=1 else si1:=0; if S2 then si2:=1 else si2:=0;
if S3 then si3:=1 else si3:=0; if S4 then si4:=1 else si4:=0;
if S5 then si5:=1 else si5:=0; if S6 then si6:=1 else si6:=0;
m:=m+si1+si2+si3+si4+si5+si6;
comment Zur Feststellung durch welche Ventile Strom fließt
bzw. Strom zu fließen beginnt, dienen die folgenden
Booleschen Ausdrücke;
if m=0 then
begin i1t:=i2t:=i3t:=i4t:=i5t:=i6t:=0; goto END; end;
L1:=L1VS1; L2:=L2VS2; L3:=L3VS3; L4:=L4VS4; L5:=L5VS5; L6:=L6VS6;
goto D[m-1];
D2:A2 [1,1]:=2×M+2×L+N;
INVERT(A2,1,A);
U2 [1,1]:=U2 [2,1]:=U2 [3,1]:=U2 [4,3]:=-1;
U2 [1,3]:=U2 [2,2]:=U2 [3,3]:=U2 [4,1]:=0;
U2 [1,2]:=U2 [2,3]:=U2 [3,2]:=U2 [4,2]:=1;
U2 [2,4]:=U2 [4,4]:=R+S;
U2 [1,4]:=-2×S-R;
U2 [3,4]:=-U2 [1,4];
U2 [2,5]:=U2 [4,5]:=L+M;
U2 [1,5]:=-L-2×M;
U2 [3,5]:=-U2 [1,5];
if L1AL5 then
begin usa:=us1; usb:=us2; usc:=us3; l:=1;
id:=i1; i2t:=i3t:=i4t:=i6t:=uv1:=uv5:=0;
end else if L1AL6 then
begin usa:=us1; usb:=us3; usc:=us2; l:=2;
id:=i1; i2t:=i3t:=i4t:=i5t:=uv1:=uv6:=0;
end else if L2AL4 then
begin usa:=us2; usb:=us1; usc:=us3; l:=3;
id:=i2; i1t:=i3t:=i5t:=i6t:=uv2:=uv4:=0;
end else if L2AL6 then
begin usa:=us2; usb:=us3; usc:=us1; l:=4;
id:=i2; i1t:=i3t:=i4t:=i5t:=uv2:=uv6:=0;
end else if L3AL6 then
begin usa:=us3; usb:=us1; usc:=us2; l:=5;
id:=i3; i1t:=i2t:=i5t:=i6t:=uv3:=uv4:=0;
end else if L3AL5 then

```



```

begin usa:=us3; usb:=us2; usc:=us1; l:=6;
      id:=i3; i1t:=i2t:=i4t:=i6t:=uv3:=uv5:=0;
end;
G [1,1]:=usb-usa-E-id*(2*R+2*S+T);
MULT(1,1,1,A,G,AG);
u2[1,1]:=usa; u2[2,1]:=usb; u2[3,1]:=usc;
u2[4,1]:=id; u2[5,1]:=AG[1,1];
MULT(5,1,4,U2,u2,Uu2);
DGL2[0]:=1; DGL2[1]:=AG[1,1];
DGLS(m,delta,D2);
tt:=t+delta;
idt:=D2[3,1];
if l=1 then
begin uv2:=Uu2[1,1]; uv3:=Uu2[2,1]; uv4:=Uu2[3,1];
      uv6:=Uu2[4,1]; i1t:=i5t:=idt;
end else if l=2 then
begin uv3:=Uu2[1,1]; uv2:=Uu2[2,1]; uv4:=Uu2[3,1];
      uv6:=Uu2[4,1]; i1t:=i6t:=idt;
end else if l=3 then
begin uv1:=Uu2[1,1]; uv3:=Uu2[2,1]; uv5:=Uu2[3,1];
      uv6:=Uu2[4,1]; i2t:=i4t:=idt;
end else if l=4 then
begin uv1:=Uu2[2,1]; uv3:=Uu2[1,1]; uv4:=Uu2[4,1];
      uv5:=Uu2[3,1]; i2t:=i6t:=idt;
end else if l=5 then
begin uv1:=Uu2[1,1]; uv2:=Uu2[2,1]; uv5:=Uu2[4,1];
      uv6:=Uu2[3,1]; i3t:=i4t:=idt;
end else
begin uv1:=Uu2[1,1]; uv2:=Uu2[2,1]; uv4:=Uu2[3,1];
      uv6:=Uu2[4,1]; i3t:=i5t:=idt;
end;
goto END;
D3:B3[1,1]:=L+M; B3[1,2]:=-L-M; B3[2,1]:=2*L+2*M+N;
B3[2,2]:=L+M+N;
INVERT(B3,2,B); ....

```

END:

end

Das vorliegende Programm ist nicht vollständig und muß sinnge-
mäß ergänzt werden.

2.1.2.4. Erklärung zum ALGOL-Programm

Die Drehstrombrücke wird als Prozedur vereinbart. Eingegeben werden die sechs Ströme, der Steuerwinkel für jedes Ventil getrennt im Bogenmaß, die sechs Steuerimpulsbreiten, die Parameter der Brücke (Widerstände und Induktivitäten), die Betriebsfrequenz und die Betriebsspannung, die Anzahl der Schritte pro Periode, die aus Gründen der Genauigkeit der Steuerimpulse nicht zu klein gewählt werden darf, die absolute Zeit t . Außerdem noch die Befehle zum Durchbruch eines oder mehrerer Ventile sowie die EMK des Motors. Ausgegeben werden die Ströme, die Zeit und die Spannungen über den Ventilen nach dem Schritt.

Die eingegebenen Werte werden durch value geschützt. Nach dem Benennungsteil beginnt die eigentliche Prozedur. Vereinbart werden außer den benötigten Hilfsgrößen von den Typen real, integer, Boolean und array drei weitere lokale Prozeduren und eine Verteilervereinbarung. Die Prozedur INVERT dient zur Inversion von Matrizen nach dem in /7/ angegebenen Verfahren. MULT ist eine Prozedur zur Multiplikation von Matrizen, und DGLS ist ein Unterprogramm zur Lösung eines Schrittes in einem Differentialgleichungssystem erster Ordnung nach dem RUNGE-KUTTA-Verfahren /7/.

Nach Belegung der Zelle von π und Berechnung der Schrittweite wird ωt berechnet. Danach werden die Hauptwerte der Winkel eines Sechphasensystems bestimmt. In Anlehnung an die ALGOL-Variante des R300 /11/ wird hier eine Standardfunktion div eingeführt, deren Definition die folgende ist:

```
integer procedure div(I1,I2);  
    value I1,I2;  
    real I1,I2;  
    begin div:=entier(I1/I2);end;
```

div bezeichnet also den ganzen Teil von $I1/I2$.

Aus den Hauptwerten wird durch die logische Anweisung festgestellt, ob zu dem Zeitpunkt t ein Zündimpuls vorhanden ist oder nicht.

Danach werden, wie auch in der Praxis, die Nachimpulse realisiert. Durch Prüfung, ob die Ströme größer als Null sind oder der Durchbruchbefehl vorliegt, werden die Signale $L1...L6$ gebildet. Anschließend werden die Augenblickswerte der Spannungen bereitgestellt und die Spannungen über den Ventilen berechnet, falls durch die Brücke kein Strom fließt.

Die Zündimpulse haben nur Wirkung, wenn die Spannung über den gesperrten Ventilen positiv ist und wenn durch das Ventil kein

Strom fließt. Durch Addition der true-Werte kann das auszuwählende Differentialgleichungssystem bestimmt werden. Anschließend wird mit Hilfe der bereits erwähnten Verteilervereinbarung zu dem jeweiligen System gesprungen.

Nach dem Sprung wird die Strommatrix berechnet und invertiert sowie die Spannungsmatrix belegt. Durch fünf bedingte Anweisungen werden die Ströme und Spannungen den allgemeinen Strömen und Spannungen zugeordnet. Nach der Multiplikation der stationären Matrix (in der die Spannungen und die Ströme eingeordnet sind) mit der invertierten werden die Sperrspannungen berechnet und das Differentialgleichungssystem gelöst. Danach erfolgt die endgültige Zuordnung der Ergebnisse.

Es wären noch mehrere Verfeinerungen des Unterprogrammes denkbar. Zum Beispiel sei hier an die Vermeidung der "negativen Spitzen" der Ströme gedacht. Durch die begrenzte "Auflösung" des Verfahrens ergeben sich nach Beendigung eines Zeitabschnittes negative Ströme, die erst die Beendigung im Unterprogramm bewirken. Diese könnten durch Anwendung einer Regula falsi vermieden werden. Es wird eine Näherung der Nullstelle ermittelt und bereits ab dieser Zeit mit dem neuen System gerechnet. Eine Auflösung auf 0,1ms, d.h. auf 200 Schritte pro Periode wäre m.E. zur "Auflösung" der Steuerwinkel ausreichend.

Zum anderen möchte ich an die Notwendigkeit erinnern, Schalteinrichtungen (Schnellschalter, Sicherungen und Leistungsschalter) zu programmieren. Die geringsten Schwierigkeiten dürfte der Leistungsschalter machen. Er schaltet nach einer gewissen Verzögerungszeit im Nulldurchgang der Wechselströme. Zum Simulieren der Sicherung ist m.E. die Vorgabe der prinzipiellen Spannungen bzw. Ströme unzureichend. Als eventuelle Lösungsmöglichkeit möchte ich vorschlagen, die Temperatur des Schmelzdrahtes zu errechnen und aus ihr ein Differentialgleichungssystem für den Widerstand desselben abzuleiten, welches eventuell auch nur stückweise gültig ist. Gleichzeitig wäre es notwendig, ein Verfahren zur Bestimmung der Koeffizienten der Differentialgleichungen abzuleiten. Hier wäre die Vorgabe eines bestimmten Stromverlaufes durch die Sicherung denkbar, aus deren Spannung die Koeffizienten abgeleitet werden könnten (bzw. umgekehrt).

Beim Schnellschalter könnte eventuell ähnlich verfahren werden. Aus der mechanischen Bewegung müßte unter Einbeziehung des Stromes durch den Schnellschalter die Spannung über ihm errechenbar sein.

Wie bereits angedeutet, ist für viele Fälle die Einbeziehung der Augenblickswerte der Spannungen $u_{s1} \dots u_{s3}$ in den formellen Parameterteil der Prozedur sinnvoll. Dadurch könnten auch unsymmetrische Drehstromsysteme, nichtsinusförmige Spannungen, also beliebige Spannungsverläufe vorgegeben werden. Allerdings ist zu überlegen, wie dann die Zündimpulse erstellt werden. Die hier gemachten Ausführungen gelten sinngemäß sowohl für die analoge Simulation (die Schaltgeräte betreffend) als auch für die im Abschnitt 1.1.1. beschriebene Möglichkeit der Simulation. Es soll noch darauf aufmerksam gemacht werden, daß mit diesem Programm nicht alle denkbaren Fehlerzustände der Schaltung erfaßt werden. Es wäre möglich, daß vier Ventile Strom führen, die so verteilt sind, daß ein Ventil auf einer Seite der Brücke und drei Ventile auf der anderen Seite der Brücke leiten.

2.1.2.5. Übersichtsdiagramm

Das Übersichtsflußdiagramm zeigt die Abb.13 auf Seite 33.

2.1.2.6. Flußdiagramm

2.1.2.6.1. Unterprogramm INVERT

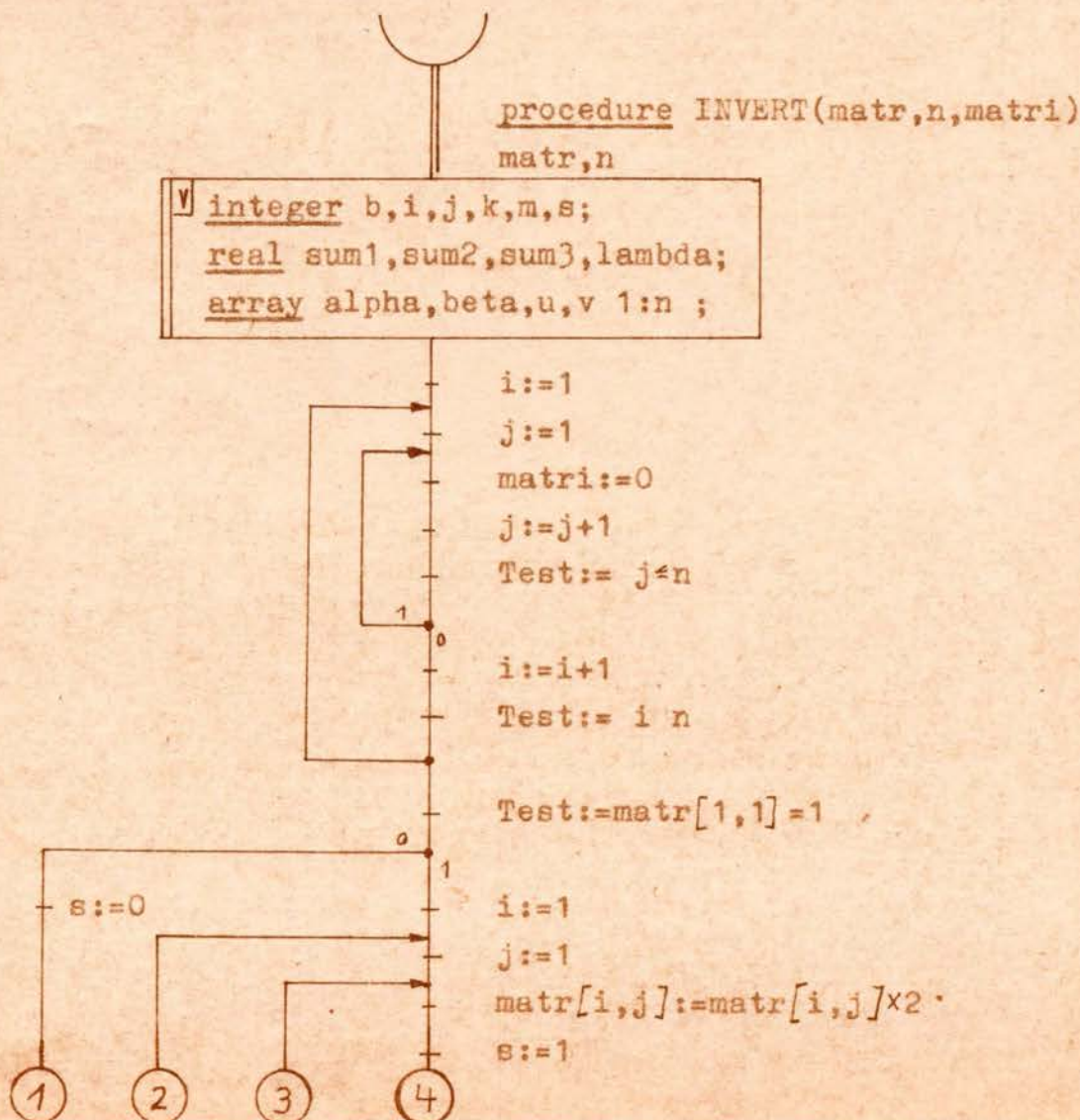
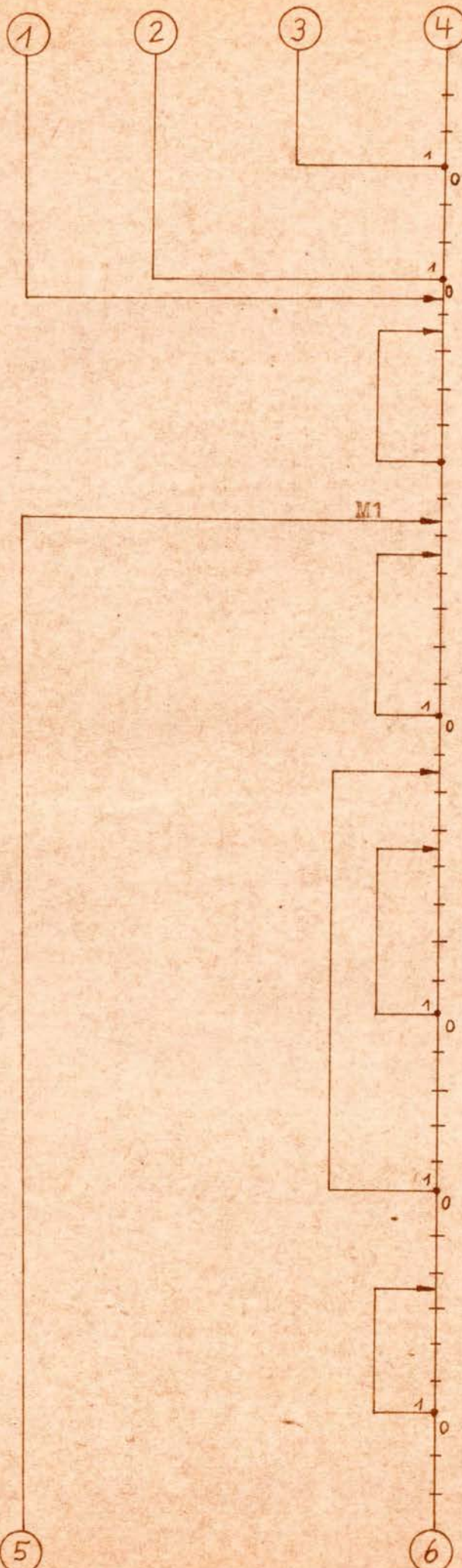




Abb. 13



j:=j+1
Test:= j≤n

i:=i+1
Test:= i≤n

i:=1
matr[i,i] :=1
i:=i+1
Test:= i≤n

m:=1
i:=m+1
alpha[i]:=matr[i,m]/matr[m,m]
beta[i]:=matr[m,i]
i:=i+1
Test:= i≤n

i:=1
sum1:=sum2:=0
k:=m
sum1:=sum1+matr[i,k]xmatr[k,m]
sum2:=sum2+matr[m,k]xmatr[k,i]
k:=k+1
Test:= k≤n

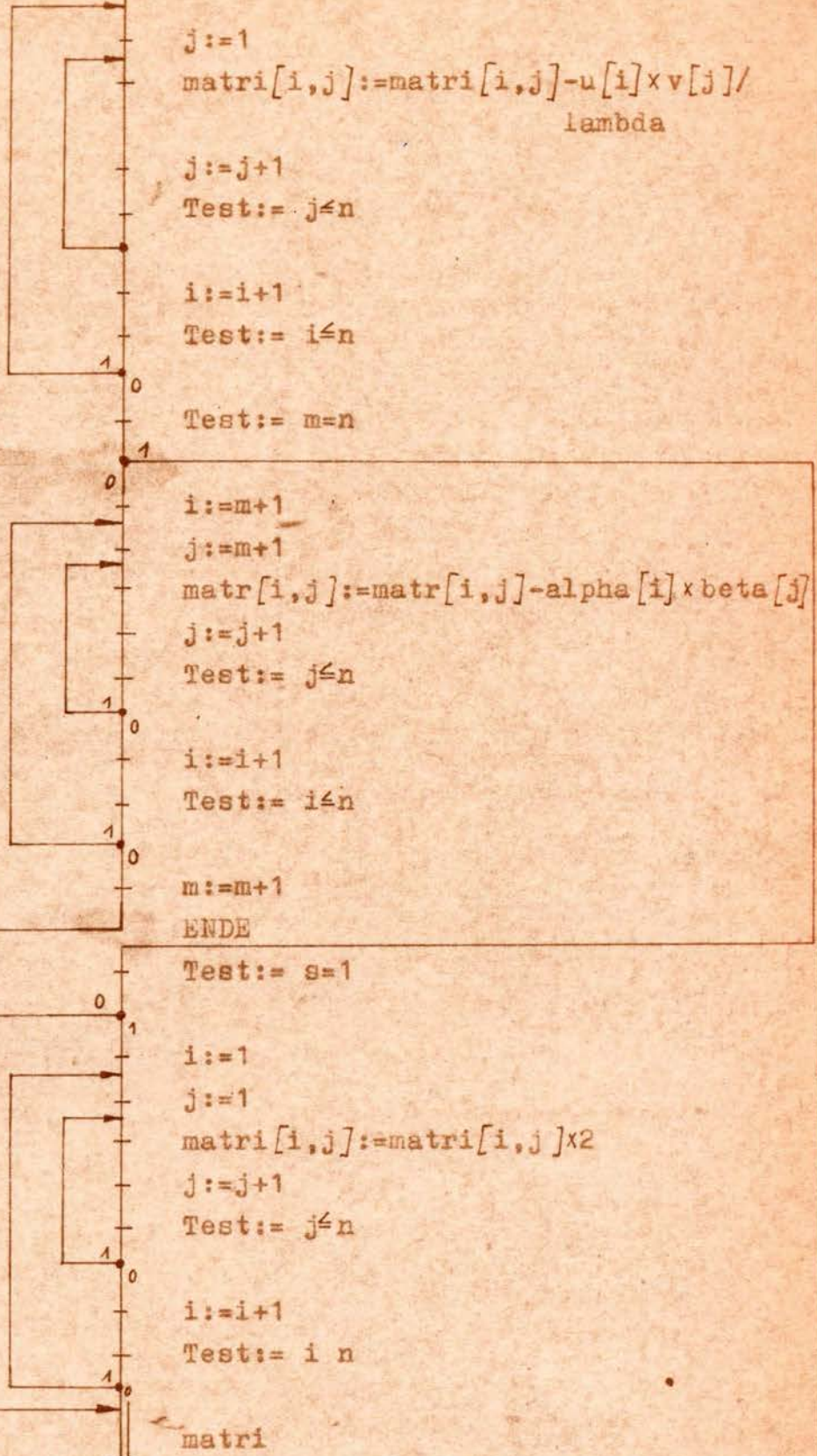
u[i]:=sum1
v[i]:=sum2
i:=i+1
Test:= i≤n

sum3:=0
j:=m
sum3:=sum3+v[j]xmatr[j,m]
j:=j+1
Test:= j≤n

lambda:=sum3+matr[m,m]
i:=1

5

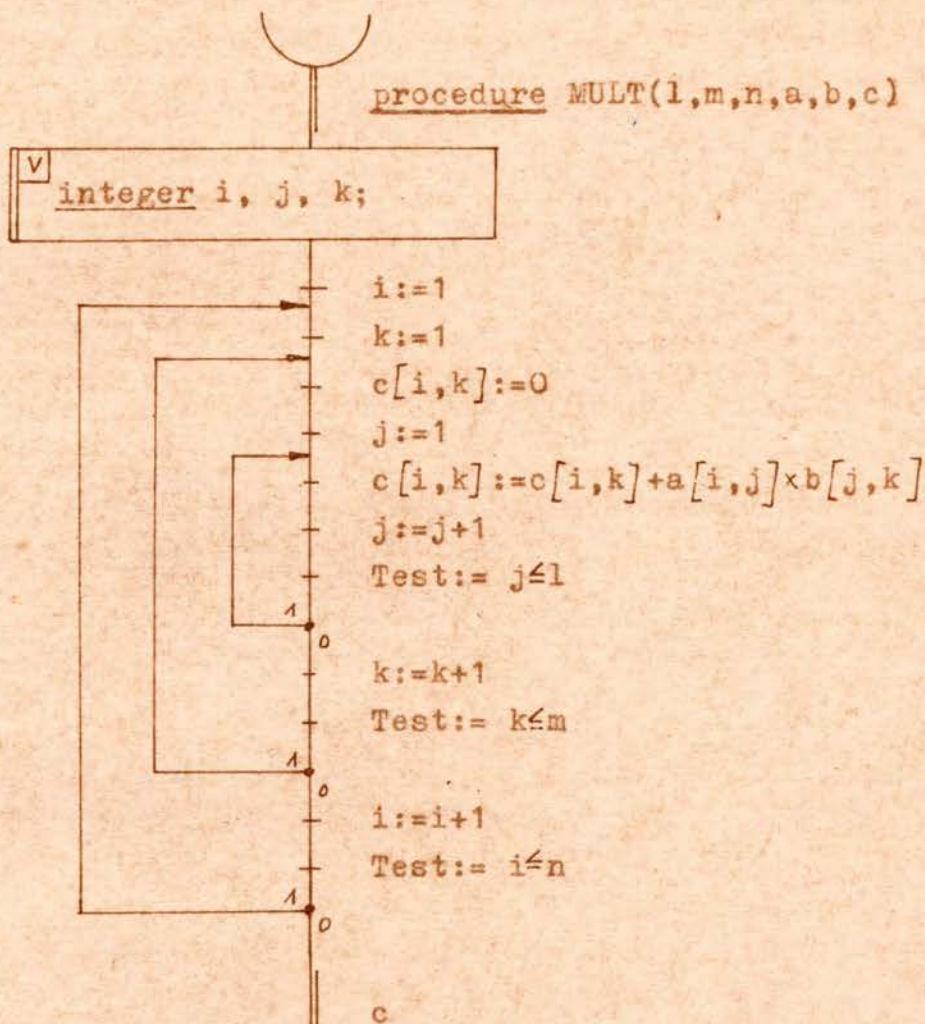
6



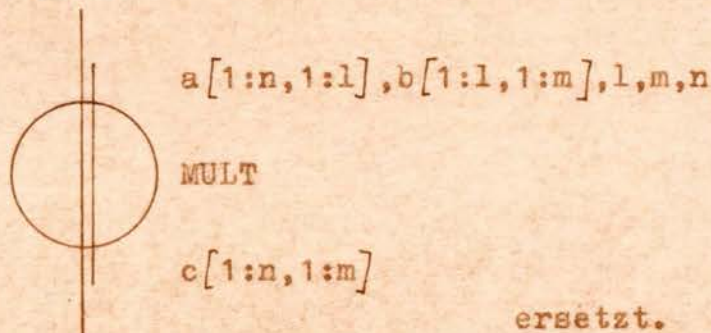
Dieses Unterprogramm wird durch folgendes Symbol dargestellt:

Bem.:
 (matri)=(matr)⁻¹
 matr[1:n,1:n],n
 INVERT
 matri[1:n,1:n]

2.1.2.6.2. Unterprogramm MULT



Dieses Programm wird durch



Bem.: $c[1:n, 1:m] = a[1:n, 1:l] \times b[1:l, 1:m]$

2.1.2.6.3. Unterprogramm DGLS

procedure DGLS(n,delta,G)
n,delta

integer i,j;real d;
array a,b,c[1:4],
k,q,y[0:n];
real procedure kij(i);

Die Funktionsprozedur kij(i)
wird entsprechend den Erfordernissen
(ausgewähltes Dgl.-System) durch
eine bedingte Anweisung belegt

a[1]:=c[1]:=c[4]:=0.5

a[2]:=c[2]:=1-sqrt(0.5)

a[3]:=c[3]:=1+sqrt(0.5)

a[4]:=1/6

b[1]:=b[4]:=2

b[2]:=b[3]:=1

i:=0

q[i]:=0

i:=i+1

Test:= i≤n

j:=1

i:=0

k[i]:=kij(i)

d:=a[j]×(k[i]-b[j]×q[i])

y[i]:=y[i]+delta×d

q[i]:=q[i]+3×d-c[j]×k[i]

i:=i+1

Test:= i≤n

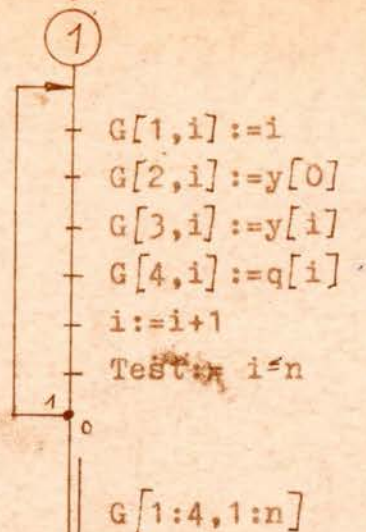
j:=j+1

Test:= j≤4

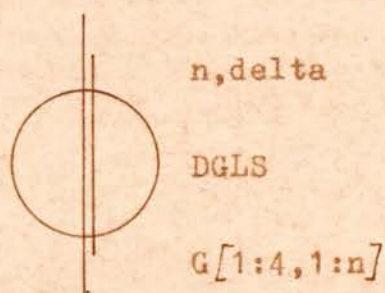
i:=1

1

-38-



Dieses Unterprogramm wird ersetzt durch



2.1.2.6.4. Gesamtprogramm: procedure Drehstrombruecke

procedure Drehstrombrücke

V

```

real omegat,pi,beta1, ... ,beta6,us1,us2,us3,
    usa,usb,usc,id, ... ,ik,uvd, ... ,uvk;
integer k,m,l,li1, ... ,li6,si1, ... ,si6;
Boolean L1, ... ,L6,S1, ... ,S6,U1, ... ,U6;
switch D:= D2,D3,D4,D5,D6;
array A2,A,G,AG 1,1 ,U2 1:4,1:5 ,u2 1:5,1 ,
    DGL2 0:1 ,D2 1:4,1 ,B3,B 1:2,1:2 ;
procedure INVERT ... ;
procedure MULT ... ;
procedure DGLS ... ;
  
```

```

- pi:=3.141593
- delta:=1/f/n
- omegat:=2xpixfxt
- k:=div(omegat+2xpi/3,2xpi)
- beta1:=omegat-2xpi x k
- k:=div(omegat,2xpi)
  
```

1

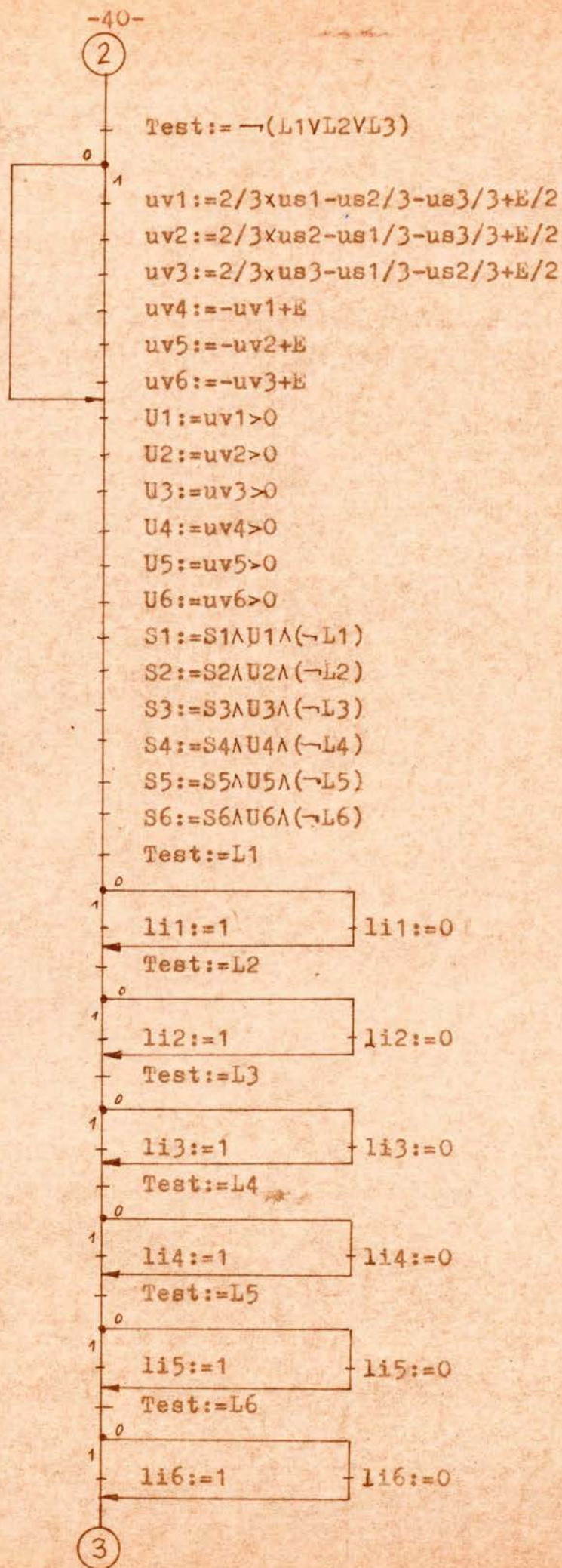
1

```

- beta2:=omegat-2*pi*k
- k:=div(omegat-2*pi/3,2*pi)
- beta3:=omegat-2*pi*k
- k:=div(omegat+pi/6,2*pi)
- beta4:=omegat-2*pi*k
- k:=div(omegat-pi/2,2*pi)
- beta5:=omegat-2*pi*k
- k:=div(omegat+5*pi/6,2*pi)
- beta6:=omegat-2*pi*k
- L1:=(beta-pi/6)>alpha1^
      (beta-pi/6)<(alpha1+stib1)
- L2:=(beta2-pi/6)>alpha2^
      (beta2-pi/6)<(alpha2+stib2)
- L3:=(beta3-pi/6)>alpha3^
      (beta3-pi/6)<(alpha3+stib3)
- L4:=(beta4-pi/6)<alpha4^
      (beta4-pi/6)<(alpha4+stib4)
- L5:=(beta5-pi/6)>alpha5^
      (beta5-pi/6)<(alpha5+stib5)
- L6:=(beta6-pi/6)>alpha6^
      (beta6-pi/6)<(alpha6+stib6)
- S1:=L1VL6
- S2:=L2VL4
- S3:=L3VL5
- S4:=L4VL3
- S5:=L5VL1
- S6:=L6VL2
- L1:=i1>0vdu1
- L2:=i2>0vdu2
- L3:=i3>0vdu3
- L4:=i4>0vdu4
- L5:=i5>0vdu5
- L6:=i6>0vdu6
- us1:=sqrt(2)*Us*cos(beta1)
- us2:=sqrt(2)*Us*cos(beta2)
- us3:=sqrt(2)*Us*cos(beta3)

```

2



3

Test:=S1

si1:=1

si1:=0

Test:=S2

si2:=1

si2:=0

Test:=S3

si3:=1

si3:=0

Test:=S4

si4:=1

si4:=0

Test:=S5

si5:=1

si6:=0

Test:=S6

si6:=S

si6:=0

m:=li1+li2+li3+li4+li5+li6
+si1+si2+si3+si4+si5+si6

L1:=L1VS1

L2:=L2VS2

L3:=L3VS3

L4:=L4VS4

L5:=L5VS5

L6:=L6VS6

Test:= m=0

i1t:=i2t:=i3t:=i4t:=i5t:=i6t:=0

Test:= m=6

Test:= m=5

Test:= m=4

Test:= m=3

Test:= m=2

END

D6

D5

D4

D3

D2

9

D2

```

A2[1,1] := 2XM+2XL+N
INVERT(A2,1,A)
U2[1,1] := U2[2,1] := U2[3,1] := U2[4,3] := -1
U2[1,3] := U2[2,2] := U2[3,3] := U2[4,1] := 0
U2[1,2] := U2[2,3] := U2[3,2] := U2[4,2] := 1
U2[2,4] := U2[4,4] := R+S
U2[1,4] := -R-2XS
U2[3,4] := R+2XS
U2[2,5] := U2[4,5] := L+M
U2[1,5] := -L-2XM
U2[3,5] := L+2XM
Test:= L1^L5

```

```

0 1
usa:=us1
usb:=us2
usc:=us3
l:=1
id:=i1
i2t:=i3t:=i4t:=i6t:=uv1:=uv5:=0

```

Test:= L1^L6

```

0 1
usa:=us1
usb:=us3
usc:=us2
l:=2
id:=i1
i2t:=i3t:=i4t:=i5t:=uv1:=uv6:=0

```

Test:= L2^L4

```

0 1
usa:=us2
usb:=us1
usc:=us3
l:=3
id:=i2
i1t:=i3t:=i5t:=i6t:=uv2:=uv4:=0

```

10

11

10

Test:= L2^L6

0

1

usa:=us2

usb:=us3

usc:=us1

l:=4

id:=i2

i1t:=i3t:=i4t:=i5t:=uv2:=uv6:=0

Test:= L3^L4

0

1

usa:=us3

usb:=us1

usc:=us2

l:=5

id:=i3

i1t:=i2t:=i5t:=i6t:=uv3:=uv4:=0

usa:=us3

usb:=us2

usc:=us1

l:=6

id:=i3

i1t:=i2t:=i4t:=i6t:=uv3:=uv5:=0

G[1,1]:=usb-usa-E-id x(2xR+2xS+T)

MULT(1,1,1,A,G,AG)

u2[1,1]:=usa

u2[2,1]:=usb

u2[3,1]:=usc

u2[4,1]:=id

u2[5,1]:=AG[1,1]

MULT(5,1,4,U2,u2,Uu2)

DGL2[0]:=1

DGL2[1]:=AG[1,1]

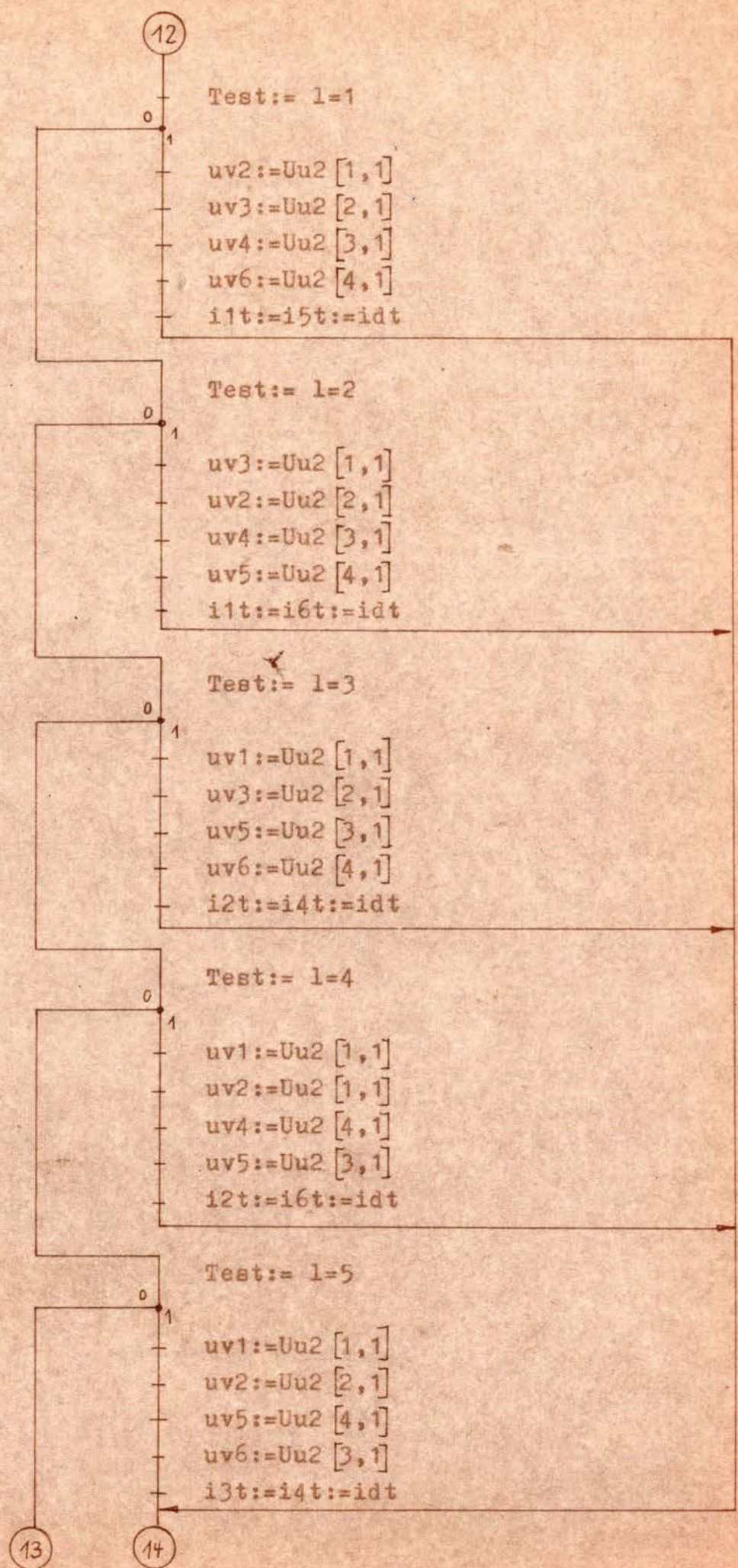
DGLS(m,delta,D2)

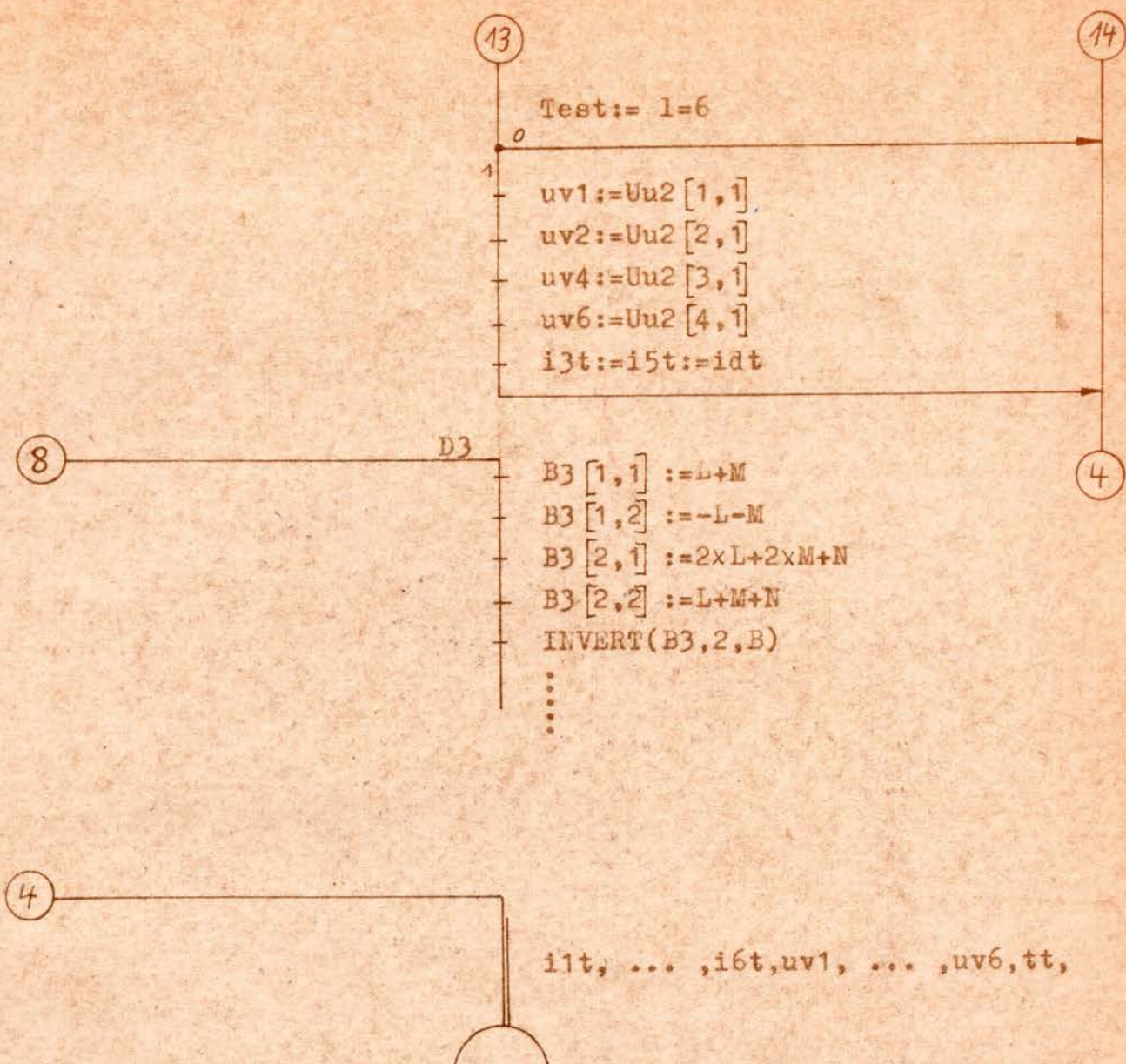
tt:=t+delta

idt:=D2[3,1]

12

11





2.2. Simulation auf dem Analogrechner

Auch hier gibt es prinzipiell mehrere Methoden zur Simulation. Die im folgenden gemachten Ausführungen sind in Anlehnung an /6/ entstanden.

2.2.1. Direkte Nachbildung der Ventileigenschaften

Diese Methode bietet sich bei dem Versuch, den Stromrichter mit seinen Ventilen zu programmieren, als erste an.

Als Schaltelemente stehen Komparatoren zur Verfügung. Abb.14 zeigt eine einpulsige Stromrichterschaltung mit Motorlast. Die Strom- und Spannungsverhältnisse werden durch diese Schaltung exakt wiedergegeben. Im Ruhezustand wird die am Ventilmodell liegende Spannung u_g nicht an die Last weitergegeben. Erst ein Zündimpuls z kippt den Komparator um und legt die Spannung an die Last. Der Strom beginnt zu fließen und hält den Komparator bei Wegfall der Zündimpulse leitend. Zur Nachbildung der Ventilwirkung dient der mit den Dioden beschaltete Rechenverstärker.

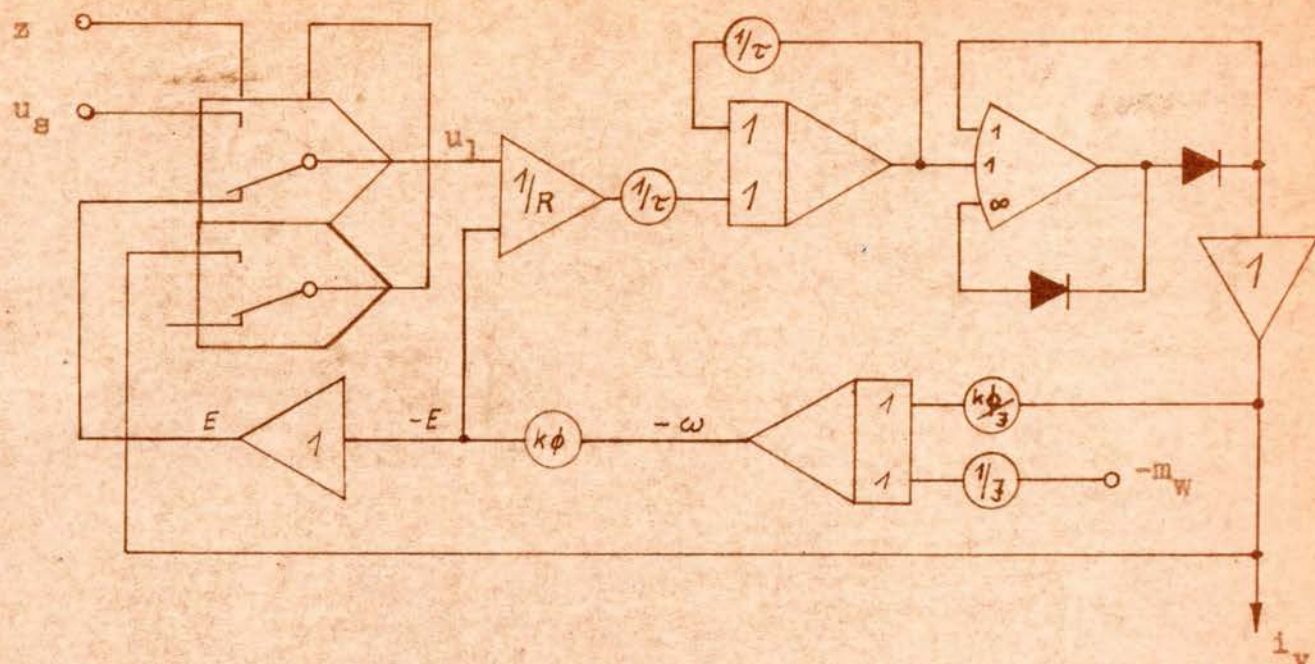


Abb. 14

Die Rechenschaltung simuliert das System nach Abb. 15.

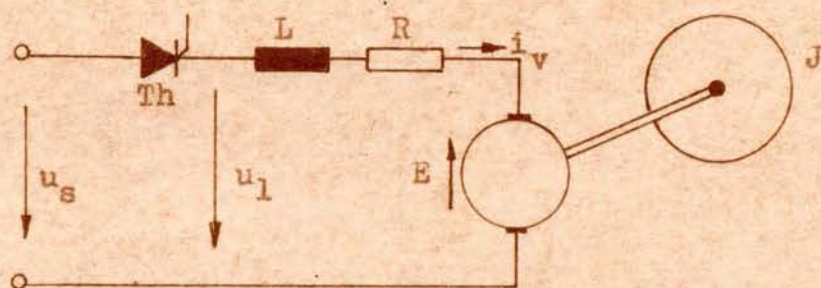


Abb. 15

Die Schaltung zur Erzeugung der Zündimpulse ist im Abschnitt 4.7.2. beschrieben. Zur Erzeugung der Zündimpulse ist ein problemorientiertes Zusatzgerät erstellt worden, welches im Anhang B beschrieben wird. Es ist für sechspulseige Schaltungen ausgelegt und arbeitet auf semielektronischer Grundlage. Bezugnehmend auf /10/ kann hier noch eine Schaltung zur Nachbildung eines Ventils angegeben werden, die die Erzeugung der Zündimpulse teilweise selbst übernimmt (Abb. 16).

Am Eingang des ersten Komparators wird eine sägezahnförmige, mit der Spannung u_s synchronisierte Spannung angelegt.

2.2.2. Ventilaufbildung durch getriggerten Einseitenintegrierer

Der getriggerte Einseitenintegrierer nach /12/ hat eine wesentliche Vereinfachung der Programme zur Simulation höherpulsiger Stromrichterschaltungen zur Folge. Abb. 17 zeigt das Prinzip desselben. Bereits diese einfache Schaltung simuliert das Betriebsverhalten

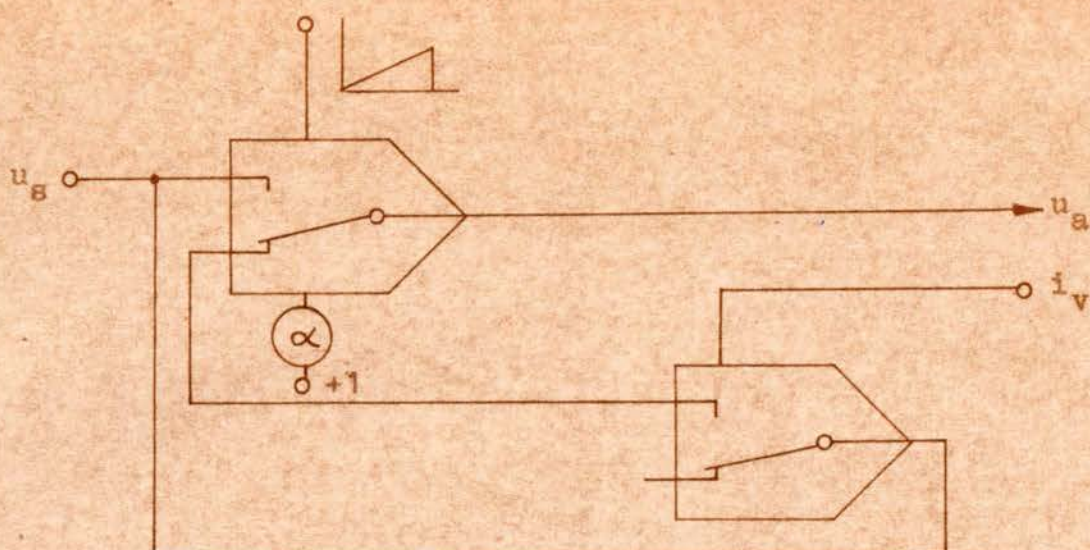


Abb.16

eines einpulsigen Stromrichters mit passiver Last nach Abb.18.

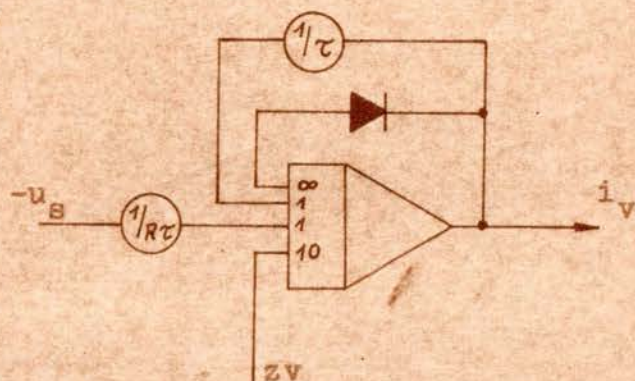


Abb.17

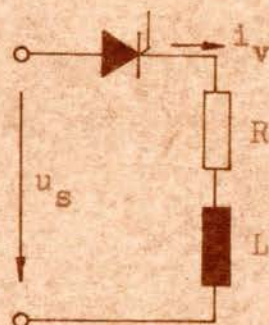


Abb.18

Der Triggerimpuls entspricht hier nicht einem Zündimpuls, sondern einem Zündverzögerungsimpuls, der solange anliegt, wie bei positiver Spannung über dem Ventil kein Strom fließen soll. Da aber der Zündverzögerungsimpuls auch anliegen darf, wenn die Spannung über dem Ventil negativ ist, kann als logische Verknüpfung für das Signal angegeben werden:

$$zv = \bar{z} \wedge \bar{i} \quad (2.2.1)$$

Hierbei stellt z den logischen Wert für den Zündimpuls dar und i den logischen Wert für Strom ja oder nein.

Das bereits erwähnte Steuergerät liefert auch die benötigten Zündverzögerungsimpulse über Relaiskontakte entsprechend der Vereinbarung (2.2.1).

Die Abb.19 zeigt den Aufbau eines Modellstromrichters für eine dreipulsige Mittelpunktsschaltung mit Motorlast.

Aus dem Prinzip des "Schnörr"-Integrators folgen auch sofort seine Nachteile. Wie auch aus dem beiliegenden Diagramm 3 ersichtlich,

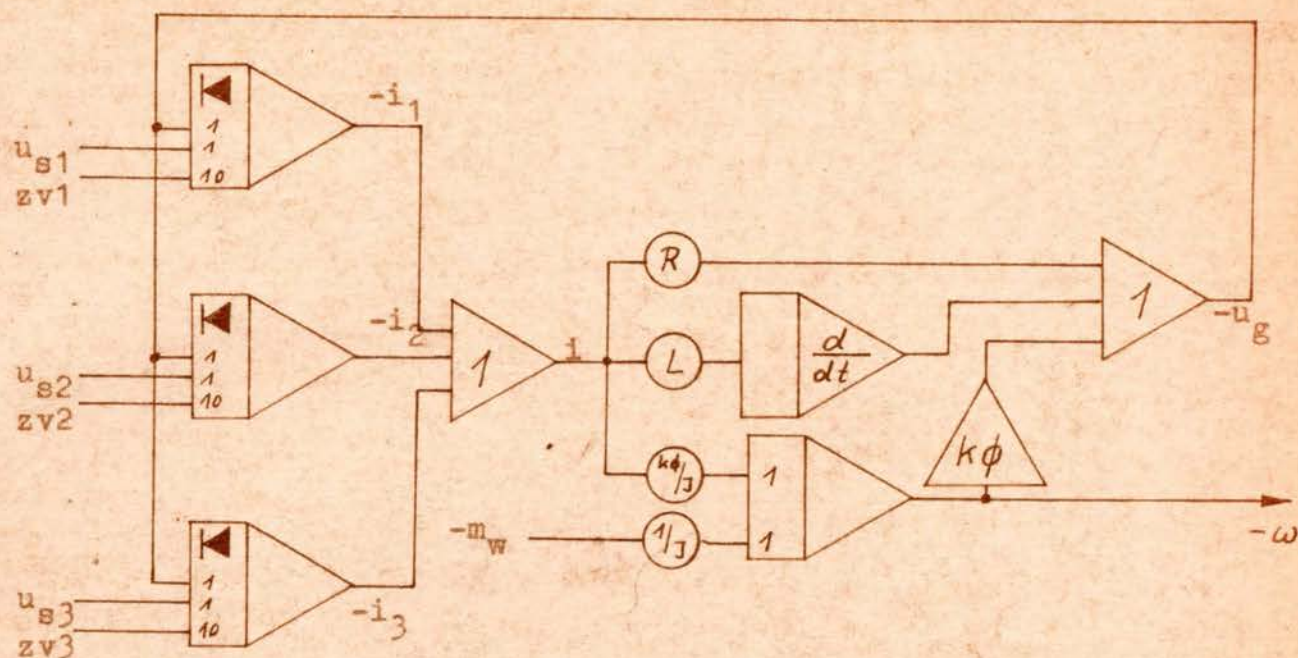


Abb.19

tritt als "Reststrom" in Sperrrichtung ein "Strom" auf, der der Schleusenspannung der Dioden proportional ist. Dies kann bei Verwendung der Schaltung nach Abschnitt 4.3.7. vermieden werden. Weiterer Nachteil des "Schnörr"-Integrators ist das Auftreten einer algebraischen Schleife oder eines Differentiergliedes in der Rechenschaltung.

Besonders betont werden muß noch die Möglichkeit der Simulation von Gegenparallel-mittelpunktsschaltungen, wodurch der Kreisstrom nachgebildet werden kann.

Durch Einsatz zweier Differenzierglieder ist die Simulation einer Sechphasensaugdrosselschaltung möglich.

2.2.3. Ventilnachbildung mit gesteuerten Integratoren

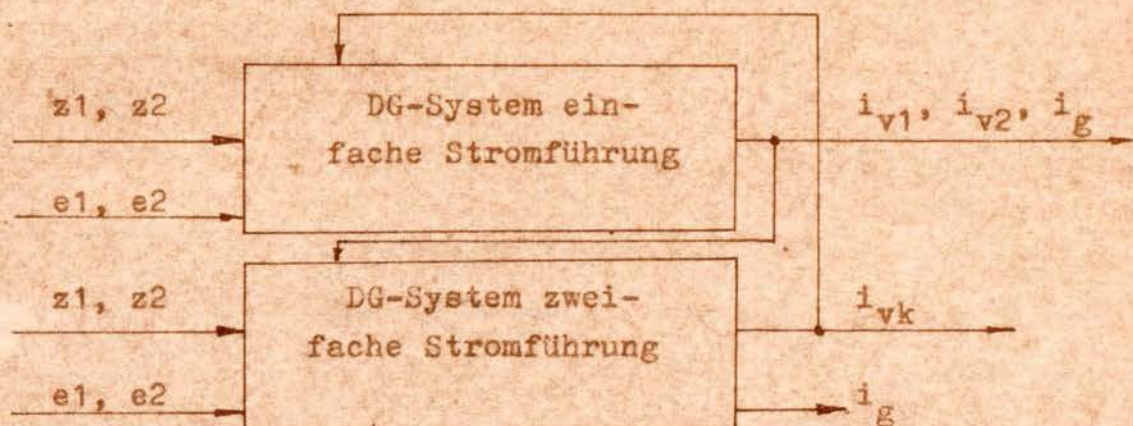
Der Nachteil des "Schnörr"-Integrators des "Reststromes" wird durch diese Methode vermieden. Hier gibt es zwei Möglichkeiten. Einmal wird die Diode durch einen Schaltkontakt ersetzt, wobei dazu, wie auch im zweiten Fall, der Nulldurchgang des Stromes sehr genau, d.h. durch einen Komparator, erfaßt werden muß. Der kurzgeschlossene Integrierer verhindert das Auftreten eines Stromes in negativer Richtung. Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung eines gesteuerten Integrierers wie er etwa im Rechner MEDA 40 TC enthalten ist. Hier wird, im Gegensatz zum Abschalten durch die Steuerbuchse beim TA bzw. TB, die Eingangsspannung mit abgeschaltet.

Das Signal, das die Schalthandlungen bewirkt, muß zur Erzielung einer Steuerbarkeit des Modells, dem Zündverzögerungsimpuls entsprechen. Die Genauigkeit hängt weitgehend von der Genauigkeit

der Nulldurchgangserfassung ab.

2.2.4. Stromrichtersimulation durch iterative Lösung von Differentialgleichungssystemen(nach /6/)

"Die Vorgänge im Stromrichter und der angeschlossenen Last entsprechen auf Grund der Schaltvorgänge der Ventile einer periodischen Folge von Anfangswertproblemen. Bei einem zweipul-



Takt	I	II	Schaltbedingungen	Anfangswerte
1	R	V	$i_{vk} = i_g$	i_{vk}
2	V	R	$z2$	i_{v1}
3	R	V	$i_{vk} = i_g$	i_{vk}
4	V	R	$z1$	i_{v2}
1	R	V	$i_{vk} = i_g$	i_{vk}

Abb.20(nach /6/)

sigen Stromrichter wechseln sich z.B. die Stromführungszeiten eines Ventils mit den Kommutierungszeiten ab, wenn nichtlückender Betrieb vorhanden ist. Programmiert man die einzelnen Zustände in Schaltungsblöcken, deren Integrierer frei steuerbar sind und gemeinsam durch eine Blocksteuerung betätigt werden, so kann ein Programmsteuergerät auf Grund vorgegebener Zündtakte und auf Grund von Zuständen in der Schaltung (z.B. Ende der Kommutierung) den Ablauf des Rechenganges selbsttätig steuern. Abb.20 gibt schematisch die Blockstruktur und den Steuerplan für eine Zweipulsschaltung an. Besonders zu betonen ist noch, daß bei dieser Methode keine Differenzierglieder benötigt werden." (nach /6/).

Diese Programmiermethode entspricht der zweiten Methode zur Aufstellung eines Digitalprogrammes. In Abschnitt 4.3.5. wird noch ein detailliert programmiertes Beispiel einschließlich Steuer-

Schaltung gezeigt. Zur Realisierung ist der Analogrechner MEDA 80 T geeignet, da sich beide Rechnerhälften getrennt steuern lassen.

Das im Abschnitt 2.4. gezeigte Programm entspricht auch diesem Prinzip.

2.2.5. Stromrichtersimulation durch Nachbildung der Spannungs-kurvenform (nach /6/)

"Ein gänzlich anders geartetes Prinzip liegt einer sehr erfolgreichen Programmierungsmethode zugrunde, die davon ausgeht, daß der Stromverlauf der Last allein durch die vom Stromrichterstellglied gebildete Spannungs-kurvenform bestimmt wird. Wichtig ist hierbei jedoch, daß die vorhandenen Rückwirkungsbeziehungen zwischen Laststrom und Stellgliedspannungs-kurvenform vollständig erkannt und richtig programmiert werden." Dies ist jedoch für den Fall der Simulation von Störungen mit Schwierigkeiten verbunden. Abb.21 zeigt das angeführte Programmierprinzip.

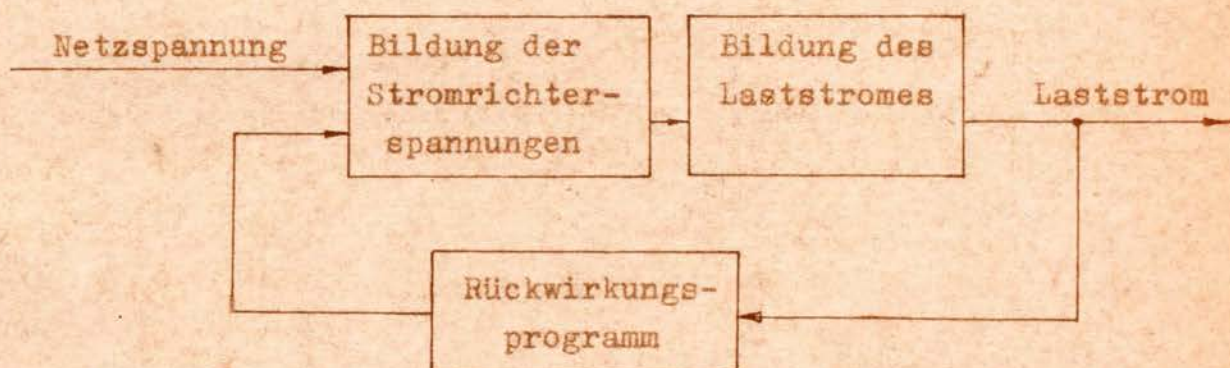


Abb.21 (nach /6/)

"Ein Vorteil dieser Methode ist es, daß sie auch bei Reihenschaltungen kommutierender Ventilgruppen Anwendung finden kann." (nach /6/). In /6/ ist das Beispiel der Simulation einer Drehstrombrückenschaltung angegeben, die aber nur den ersten Arbeitsbereich (einfache Kommutierung) nachbildet.

2.3. Simulation auf dem Hybridrechner

Der Abschnitt 2.3.1. wurde vollständig /13/ entnommen.

2.3.1. Hybride Rechnersysteme und hybride Programmstrukturen

Kennzeichnend für das hybride Rechnen im engeren Sinne ist die Verarbeitung von analogen und digitalen Signalen im Rechner-system. Wir wollen als hybrides Rechnen im weiteren Sinn neben dem Betrieb kombinierter analoger und digitaler Rechenanlagen auch jede Art der Simulation dieses Rechenbetriebes auf digitalen Rechenanlagen auffassen. Abb.22 gibt eine Übersicht über die Möglichkeiten des hybriden Rechnens. Wir wollen im weiteren

die Möglichkeiten kurz beschreiben.

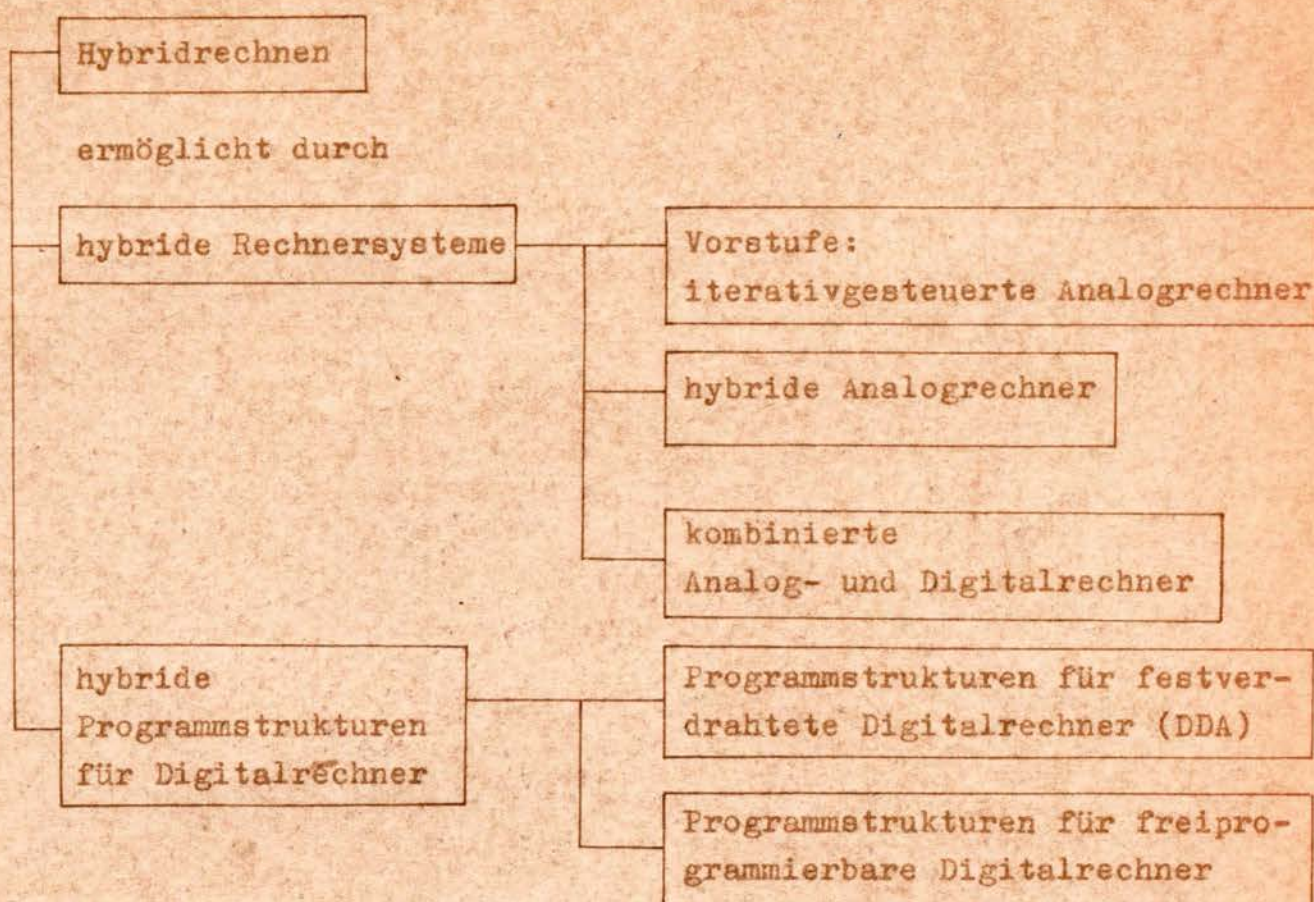


Abb.22

2.3.1.1. Vorstufe: iterativgesteuerter Analogrechner

Kennzeichnend für diesen Rechnertyp sind

- beliebige Ansteuerbarkeit aller oder wenigstens einiger Integratoren
- digitale Bausteine und Komparatoren zum Aufbau spezieller Steuerschaltungen für die Steuerung der Integratoren und einfache logische Entscheidungen
- Verwendung von Integratoren als Kurzzeitspeicher.

Durch die Steuerung kann im Vergleich zum Parallelbetrieb des klassischen Analogrechners ein Serienbetrieb der Rechenelemente, ähnlich wie beim Digitalrechner, erfolgen. Damit verbunden ist eine Mehrfachausnutzung der Rechenelemente. Der Serienbetrieb ist Voraussetzung für die Realisierung von Iterationsverfahren.

Die angegebenen rechentechnischen Eigenschaften des iterativarbeitenden Analogrechners stellen in Verbindung mit der Realisierung effektiver Algorithmen einige Forderungen an die Grenzfrequenz von Operationsverstärkern, an die Geschwindigkeit der Steuerung und an die Genauigkeit der Rechenelemente (einschließlich Kurzzeitspeicher).

2.3.1.2. Hybride Analogrechner

Hybride Analogrechner sind iterativgesteuerte Analogrechner mit A/D- und D/A-Wandlern. Sie bieten im Vergleich zum einfachen iterativgesteuerten Analogrechner die Möglichkeit der Verarbeitung analoger und digitaler Signale. Da der Umfang der digitalen Bausteine und somit der rechentechnischen Möglichkeiten beim iterativgesteuerten Analogrechner gering im Vergleich zum universellen Digitalrechner, können nur einfache Algorithmen verwandt werden.

Das Abb.23 zeigt ein vollständiges Blockschaltbild für den hybri-

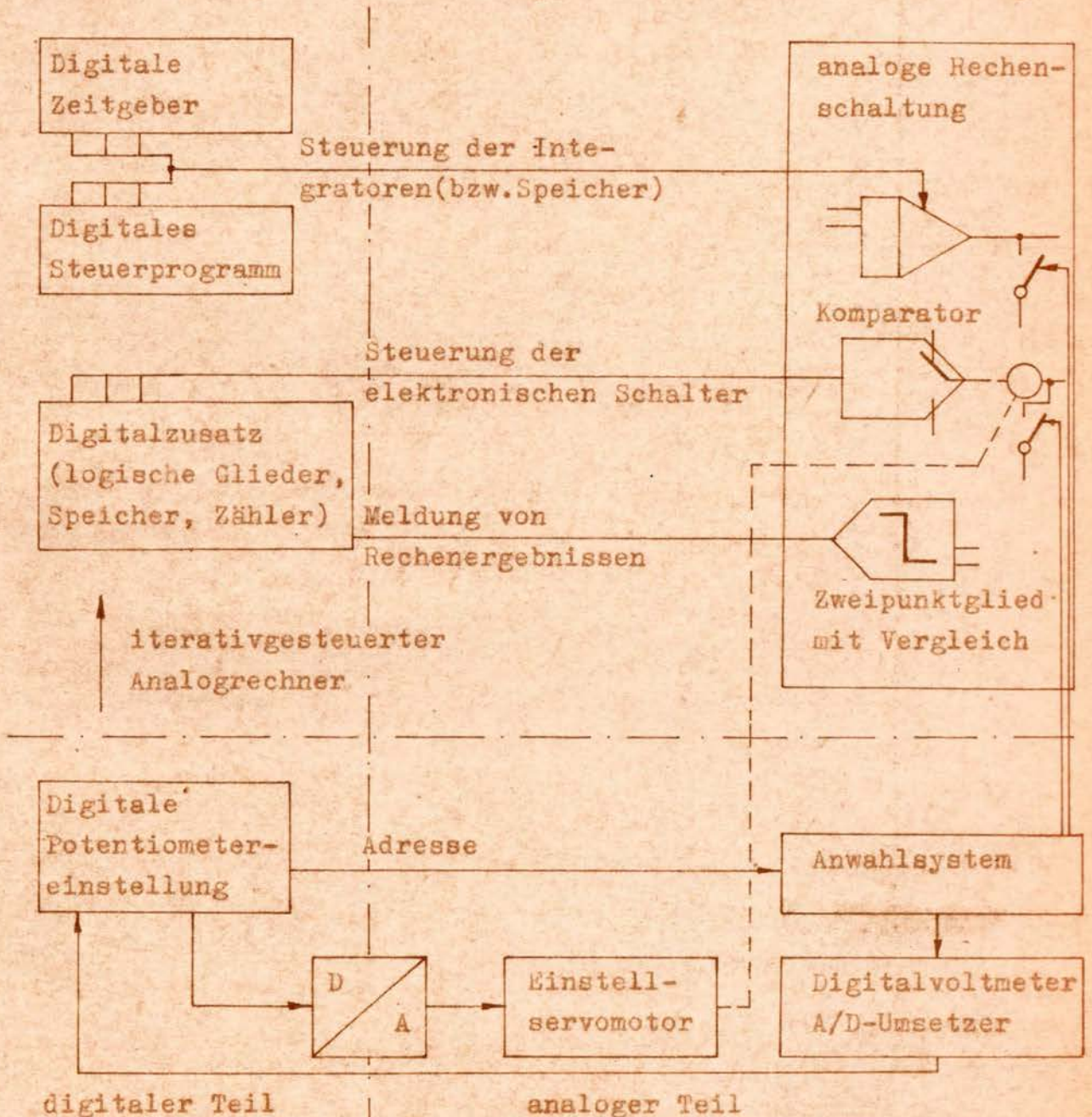


Abb.23

den Analogrechner. Es enthält für den oberen Teil dargestellten iterativgesteuerten Analogrechner ein digitales Steuerteil für die Steuerung der Integratoren (bzw. Speicher) in der analogen

Rechenschaltung. Weiterhin kann von dem digitalen Zusatz der Komparator mit einem Binärsignal gesteuert werden. Der Komparator dient hier als Koppelglied zwischen Digitalzusatz und analoger Rechenschaltung. Weiterhin kann von der analogen Rechenschaltung über einen Komparator, der nur binäre Signale abgibt, auf den Digitalzusatz eingewirkt werden. Somit dient hier der Komparator mit binärem Ausgangssignal als Kopplungsglied zwischen analoger Rechenschaltung und Digitalzusatz.

Die Ergänzung des iterativarbeitenden Analogrechners zu einem hybriden Analogrechner kann z.B. durch digitale Potentiometersteuerung über D/A-Wandler, Servomotor in Verbindung mit einem Anwahlsystem für die Potentiometer erfolgen.

Ein wesentlich größeres Spektrum an Einsatzmöglichkeiten bieten die folgenden Möglichkeiten des hybriden Rechnens.

2.3.1.3. Kombinierte Analog- und Digitalrechner

Diese höchste Entwicklungsstufe des Hybridrechners baut gerätemäßig auf dem hybriden Analogrechner auf. Sie erfordert externe Steuerbarkeit des Analogrechners durch den Digitalrechner und evtl. auch umgekehrt des Digitalrechners durch den Analogrechner. Dabei ist ein System an Geräten erforderlich, dessen Zusammenwir-

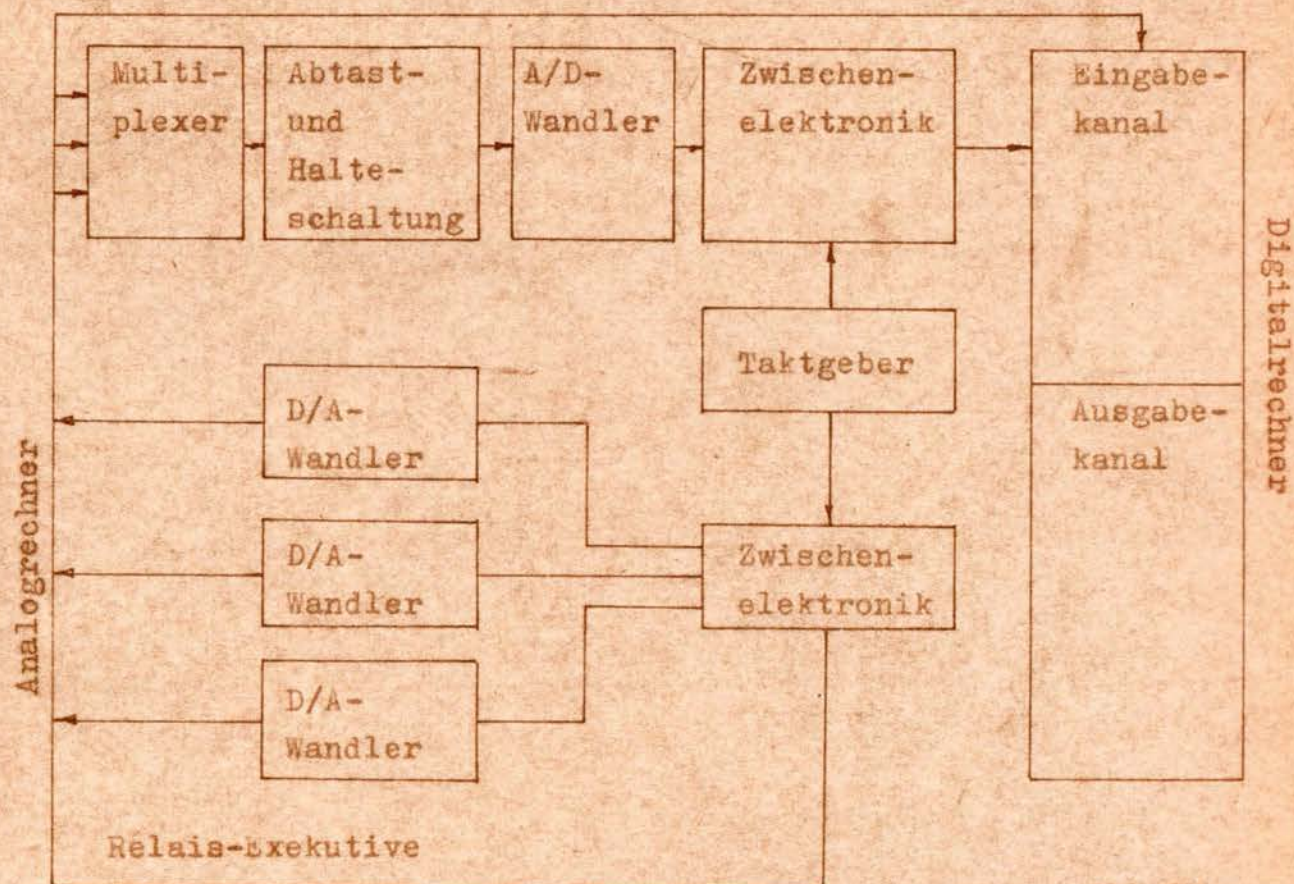


Abb. 24

ken in Abb. 24 dargestellt ist.

Zur Übertragung von Daten vom Analogrechner in den Digitalrechner benötigt man mehrere Kanäle. Um die zu übertragenden Größen in die richtige Signalform zu bringen, müssen die entsprechenden Wandler verwendet werden.

Aus Preisgründen verwendet man im Eingabekanal des Digitalrechners nur einen A/D-Wandler. Die entsprechenden Stellen der Analogrechengaltung werden zyklisch oder in einer programmierten Reihenfolge (mit Adresse der abzufragenden Stelle vom Digitalrechner vorgegeben) durch einen sogenannten Multiplexer (Verteiler, Schrittschalter) abgefragt. Zwischen zwei Abfragezeiten wird der im Moment der ersten Abfragezeit gemessene Wert durch eine sogenannte Abtast- und Haltevorrichtung gehalten. Der gehaltene Wert kann nun durch den A/D-Wandler in einen digitalen konvertiert werden und über eine Zwischenelektronik kann die Weiterleitung in den Digitalrechner erfolgen. Oftmals muß eine Zwischenspeicherung auf einem Pufferspeicher vorgenommen werden, da die Eingabe in das Eingaberegister nicht immer im Rhythmus der Anlieferung der konvertierten Werte des A/D-Wandlers erfolgt. Im Pufferspeicher erfolgt die Zusammensetzung der konvertierten Analogwerte, meistens 10 bis 14 bit, zu einem Maschinenwort. Bei der Ausgabe verwendet man in der Regel für jeden Kanal einen D/A-Wandler, weil der D/A-Wandler nicht so aufwendig ist wie ein A/D-Wandler. Somit spart man den Multiplexer und insbesondere die Halteglieder ein, da die D/A-Wandler auch die Werte speichern. Üblich sind hier bis 20 Ausgabekanäle. Die gesamte Steuerung für Wandler, Multiplexer, Zwischenelektronik u.a. erfolgt durch den Grundtakt der zentralen Uhr. Die Steuerung der Betriebszustände des Analogrechners erfolgt durch die sogenannte Relais-Exekutive. Über den Interruptkanal kann in Abhängigkeit vom Analogrechner das Digitalprogramm beeinflusst werden.

Grundsätzlich spielt bei der Arbeit der hybriden Rechenanlage die Wahl der Zeit zwischen zwei Abtastungen eine entscheidende Rolle, weil sie maßgebend für die anderen Verarbeitungszeiten wie für Konvertierung, Rechenzeiten u.a. ist.

Die klassischen Anwendungen für hybride Rechnersysteme sind Simulationsaufgaben der Luftfahrt- und Raumfahrttechnik. Hierbei werden z.B. die Gleichungen der Flugkörperdynamik auf dem Analogrechner und die Algorithmen für die Flugbahnberechnung und den Führungsrechner auf dem Digitalrechner simuliert.

Weitere aktuelle Anwendungen bieten die Aufgaben der Steuerung

größerer komplexer industrieller Prozesse, Optimierungs- und Randwertaufgaben der Technik, Physik, Ökonomie und Mathematik.

2.3.1.4. Hybride Programmstrukturen für festverdrahtete

Digitalrechner (Ziffern-Integrieranlagen, DDA)

Programmstrukturen, die die Simulation von hybriden Rechnersystemen erlauben, wollen wir als hybride Programmstrukturen bezeichnen. Sie werden auf universellen Digitalrechnern und festverdrahteten Digitalrechnern realisiert.

Die Ziffernrechenanlage (Digital-Differential-Analyser DDA genannt) ist wie folgt gekennzeichnet:

Sie besitzt Rechenelemente für die Integration (als Stieltjes-Integrale ausgebildet), für die Multiplikation, die Erzeugung beliebiger Funktionen und die Simulation. Die Arbeitsweise der Integration beruht auf der Summation von sogenannten Inkrementen, d.h. das bestimmte Integral

$$I = a \int_{x_0}^x y \, dx$$

wird approximiert durch

$$S_n = a \sum_{i=1}^n y_i \Delta x_i = \sum_{i=1}^n \Delta z_i$$

Δz_i Inkremente

bzw. durch bessere Approximationsformeln wie Trapezregel u.a..

Die Multiplikation kann nach der bekannten Regel durch zwei Integrationen ausgeführt werden.

Die digitale Integrieranlage besitzt eine höhere Rechengenauigkeit als der Analogrechner, Rechengeschwindigkeit und Kosten sind jedoch ungünstiger als beim Analogrechner.

Mit der Weiterentwicklung der Digitalrechner ist die folgende Möglichkeit des hybriden Rechnens von größter Bedeutung.

2.3.1.5. Hybride Programmstrukturen für frei programmierbare

Digitalrechner

Diese Programmstrukturen enthalten Unterprogramme für die verschiedensten Übertragungsfunktionen, so daß eine blockorientierte Programmierung, ähnlich wie beim Analogrechner, möglich wird. Die blockorientierte Programmierung geht von Blockbildern für dynamische Systeme aus und verknüpft im Programm die Unterprogramme für die einzelnen Grundoperationen entsprechend dem Gesamtblockbild. In der Regel werden dabei wenigstens Unterprogramme für die Grundrechenoperationen des Analogrechners vorgesehen. Zur Anwendung für den Regelungstechniker werden Unterpro-

gramme für die wichtigsten regelungstechnischen Übertragungsfunktionen wie PID-Glieder, Verzögerungsglieder 1. Ordnung u.a. angegeben. Bei der Entwicklung von Unterprogrammen für den Integrator kann man z.B. die Trapezregel benutzen, d.h.

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_0^t x(\tau) d\tau$$

wird durch

$$y_n = y_{n-1} + \frac{1}{2T} (x_n + x_{n-1})$$

approximiert, wobei der Index sich auf die Taktzeiten bezieht. Das Verzögerungsglied erster Ordnung könnte durch Anwendung dieser Trapezregel auf das Faltungsintegral

$$y(t) = \int_{-\infty}^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau$$

gewonnen werden, wobei die sogenannte Gewichtsfunktion wie folgt gegeben ist

$$g(\tau) = \frac{1}{T} e^{-\frac{\tau}{T}}.$$

Um die auftretenden Abtastfehler bei Verzögerungsgliedern höherer Ordnung mit verschiedenen Zeitkonstanten klein zu halten, erfolgt die Umformung in eine Parallelschaltung von mehreren Verzögerungsgliedern erster Ordnung durch Partialbruchzerlegung.

Die Programmnotierung muß in einfacher Weise die Lage der Glieder im Gesamtblockbild und die Parameter der Glieder charakterisieren. Art und Lage der Glieder kann durch eine geeignete Nummerierung oder Namensgebung erfolgen. Grundsätzlich gibt es beim Aufbau eines Programmierverfahrens die beiden Möglichkeiten:

1. Schaffung einer direkten problemorientierten Programmsprache und eines dazugehörigen Compilers
2. Ergänzung einer Programmsprache durch geeignete Makrobefehle für die genannten Unterprogramme

2.3.2. Anwendungsmöglichkeiten eines hybriden Rechnersystems

Der Abschnitt 2.3.1. machte deutlich, daß es sich bei den angeführten Methoden zur Simulation von Stromrichterschaltungen zwar um hybride Zusatzgeräte zum Analogrechner (auch beim "Schnörr"-Integrator wird die Integration nur unterbrochen) handelt, daß aber entsprechend der Definition in/13/ und /14/ iterativer Betrieb vorliegt.

Andererseits handelt es sich bei den Rechenmethoden des Abschnittes

2.1.2. um hybride Programmstrukturen auf einem freiprogrammierbaren Digitalrechner. Auch das in der Einführung des Abschnittes 2.1. angedeutete Programm nach /16/ hat diesen Charakter. Unter Berücksichtigung der bekannten Vor- und Nachteile des analogen Rechnens und der Vor- und Nachteile des digitalen Rechnens bietet sich zur Simulation von Stromrichterschaltungen eine Methode an, bei der die logischen Entscheidungen etwa des Programmes von Abschnitt 2.1.2.6.4. mit Hilfe des Digitalrechnerteiles repetierend wiederholt werden und auf dem Analogrechnerteil die Differentialgleichungssysteme gelöst und laufend überwacht werden. Nach Beendigung eines Abschnittes wird die Rechnung auf dem Analogrechner gestoppt, das neue Gleichungssystem auf dem Digitalrechner ausgewählt, die Anfangswerte dieses Systemes dem vorhergehenden entnommen und entsprechend zugeordnet dem Analogrechenteil wieder zugeführt. Durch Veränderung der Programmstruktur des digitalen Teiles ist eine Simulation von Störungen leicht möglich.

Der Rechner MEDA 40 TC läßt sich dazu nicht verwenden, da er nur iteratives Rechnen gestattet (ihm fehlt der digitale Teil und die Kopplungsglieder; siehe aber Abschnitt 2.4.). Ein bekannter Rechner dieser Art ist das hybride Rechnersystem EAI 8900, das sich aus dem Analogrechner EAI 8800 und dem Digitalrechner EAI 8400 zusammensetzt. (Hersteller: European Computation Center, Electronic Associates, Inc. Brüssel) /17/.

Die Theorie dieser Schaltungen und dieser Rechnersysteme wird in /13/ behandelt. /13/ kann auch ein ausführliches Literaturverzeichnis entnommen werden.

Mit Hilfe des Rechners MEDA 40 TC wäre eine Realisierung des gesteuerten Integrators nach Abschnitt 2.2.3. leicht möglich. Auch vereinfacht sich die Übernahme von Werten durch die vorhandenen elektronischen Schalter und die gesteuerten Analogspeicher wesentlich. Die Realisierung einer Stromrichtersimulationsschaltung nach den Abschnitten 2.2.4. und 2.2.5. wird dadurch in ihren höchsten Stufen (alle Arbeitsbereiche) erst mit vertretbarem Aufwand ermöglicht. /14/ verdeutlicht noch einmal diese Möglichkeiten.

2.4. Erweiterung des MEDA 120 T zum Hybridrechner durch einen verdrahtungsprogrammierten Digitalzusatz

In diesem Abschnitt sollen Hinweise zum Aufbau eines verdrahtungsprogrammierten Digitalzusatz zur Simulation der Drehstrombrückenschaltung auf dem erweiterten Analogrechner gegeben werden. Grundlage ist das in den Abschnitten 2.1.2.1. bis 2.1.2.6. beschriebene Digitalprogramm. Voraussetzung ist die Möglichkeit der getrennten Steuerung der Integrierer und Analogspeicher und das Vorhandensein von Digital-Analog-Schaltern. Als Symbolik werden die Hinweise in /24/ benutzt. (An Stelle der Digital-Analog-Schalter sind auch Komparatoren verwendbar.)

2.4.1. Analoger Teil

Es werden die im Abschnitt 2.1.2.1. berechneten Differentialgleichungssysteme programmiert. Für die in den einzelnen Teilen angegebenen Rechenschaltungen werden Symbole eingeführt.

2.4.1.1. Allgemeiner Teil

Im allgemeinen Teil sind der Dreiphasengenerator, der Steuersatz (nach Anhang B) und der mechanische Teil des Motors sowie einige allgemeine Verknüpfungen (Regelung, Zeitachse) enthalten. Der Steuersatz muß, wie auch im Anhang B angedeutet, steuerbar (er muß ähnlich wie die Integratoren Betriebszustände "Rechnen" und "Halt" haben) sein, d.h. der Vorgang der Erzeugung der Zündimpulse muß zusammen mit dem Dreiphasengenerator anhaltbar sein. Es ist aus Gründen der Genauigkeit zweckmäßig auch den Steuersatz zusammen mit dem digitalen Teil auf die übliche Art und Weise mit Zählern und Koinzidenzschaltungen digital auszuführen. In diesem Fall muß durch den Einbau einer Regelung ein A/D-Wandler aufgebaut werden. Die Aufgabe desselben kann auch das in den MEDA 40 TB eingebaute Digitalvoltmeter, eventuell über einen Code-Wandler, übernehmen.

Das Programmschema zeigt Abb.25.

Sämtliche Steuerleitungen S_1 und S_2 werden parallel geschaltet (Blocksteuerung) und der allgemeine Teil durch das in Abb.26 gezeichnete Symbol ersetzt. Es werden sieben analoge und zwei binäre Größen eingegeben und elf analoge und sechs binäre Signale entnommen.

2.4.1.2. Die Brücke ist stromlos

Hier müssen nur die Spannungen über den Ventilen berechnet werden. Die ausführliche Rechenschaltung zeigt Abb.27 und das Symbol Abb.28. Es werden sieben analoge Signale eingegeben und sechs analoge Werte ausgegeben.

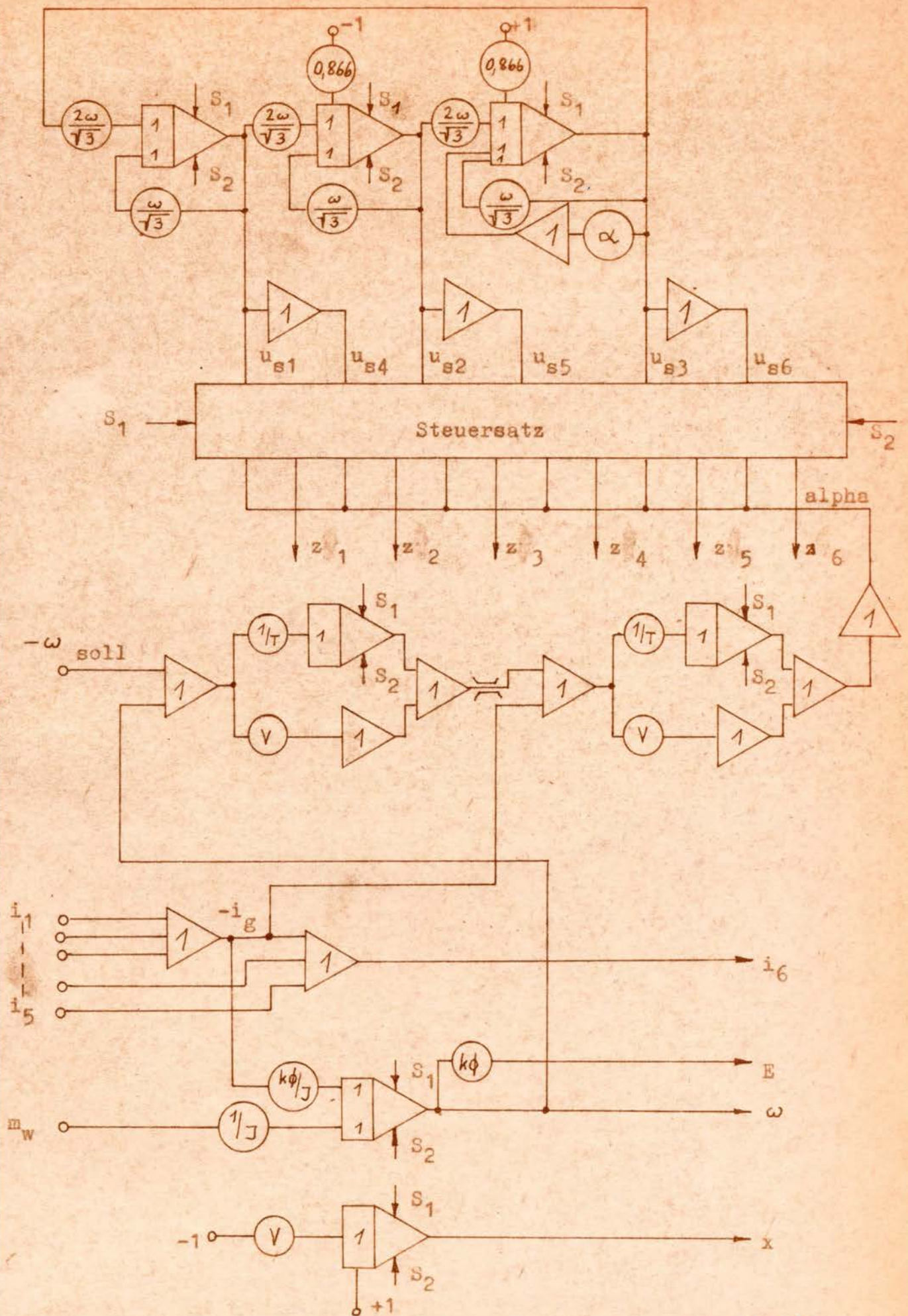


Abb. 25

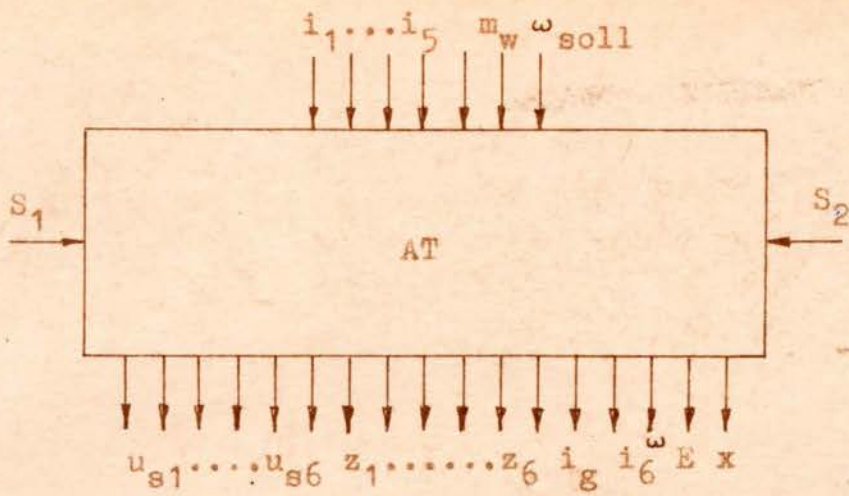


Abb.26

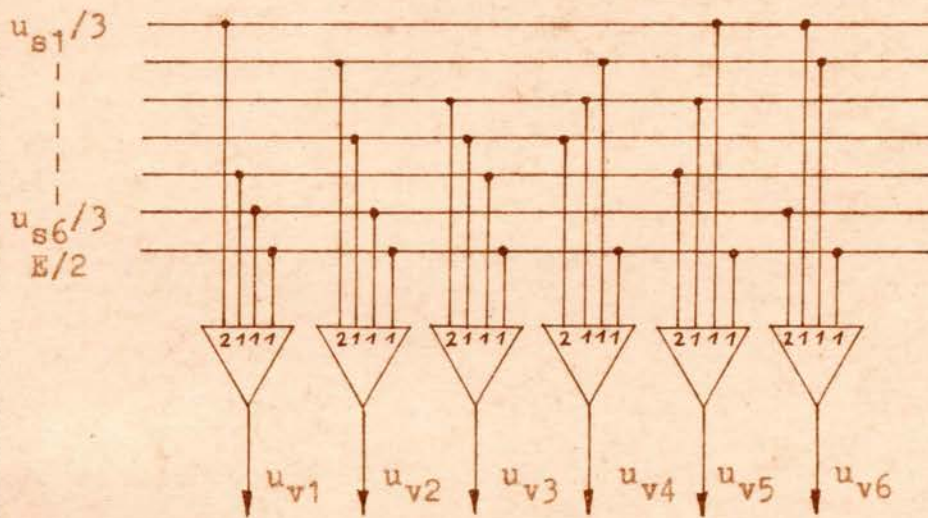


Abb.27

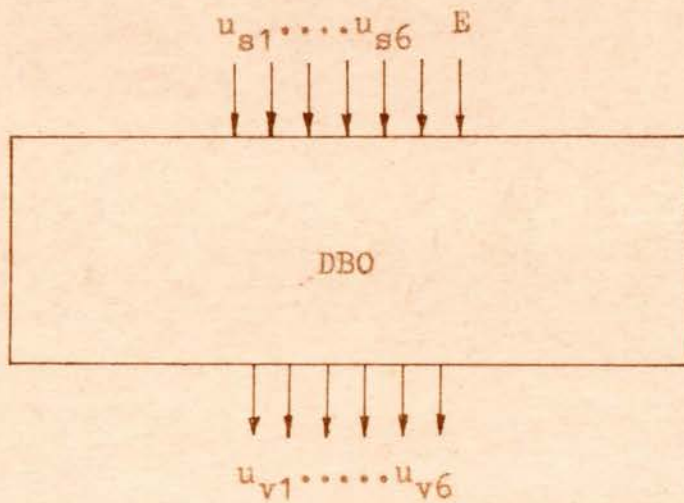


Abb.28

2.4.1.3. Zwei Ventile führen Strom

Abb.29 zeigt die Schaltung und Abb.30 das entsprechende Symbol. Es werden sieben Signale eingegeben und fünf Signale ausgegeben.

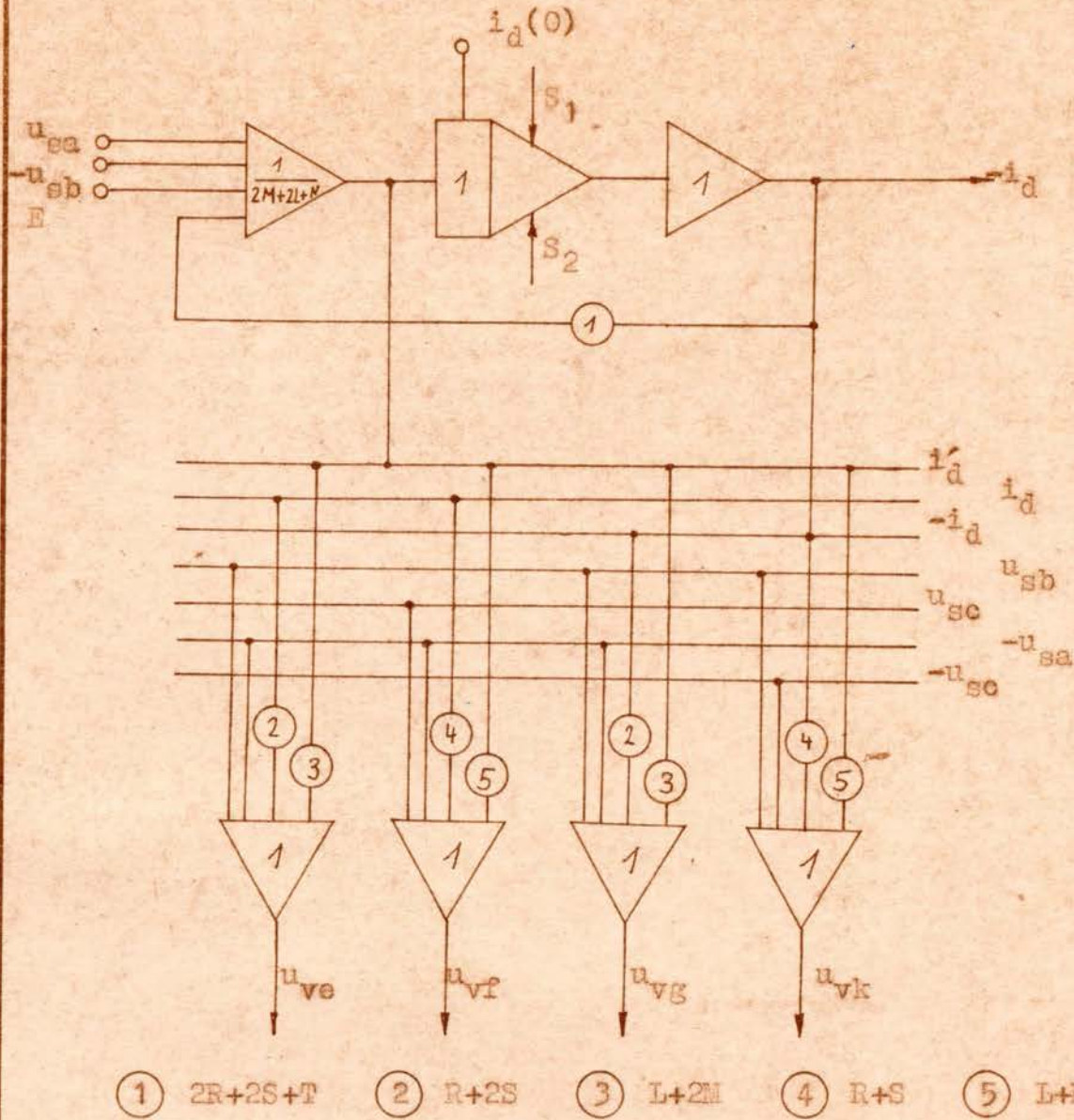


Abb.29

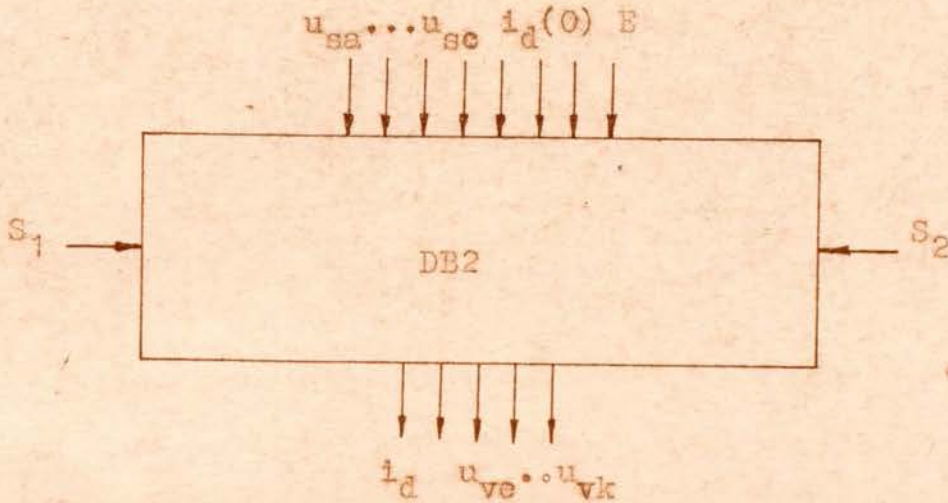


Abb.30

2.4.1.4. Kommutierungsbereiche 1...3

Durch Programmierung der einzelnen Arbeitsbereiche ergeben sich ähnliche, mit einander verkoppelte Analogrechenprogramme. Eingeben werden jeweils die sechs Spannungen $u_{sa} \dots u_{sc}$, die EMK E und die Anfangswerte der Ströme unabhängig von den Steuerbefehlen. Ausgegeben werden die Ströme und die Spannungen über den gesperrten Ventilen, also insgesamt fünf Größen.

Um diese Differentialgleichungssysteme programmieren zu können, müssen die Matrizen ähnlich wie in dem ALGOL-Programm invertiert werden. Da dies, zumindestens bei den Programmen höherer Ordnung, auf Schwierigkeiten stoßen würde können die Potentiometereinstellungen mit einem Digitalrechner berechnet werden.

2.4.1.5. Kommutierungsbereich 4

Hier führen alle sechs Ventile Strom. Die berechnete Matrix hat die Form

$$\begin{pmatrix} i_1' \\ i_2' \\ i_3' \\ i_4' \\ i_5' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{s1} \\ u_{s2} \\ u_{s3} \\ E \end{pmatrix}$$

Unter diesen Bedingungen hat das Rechenschema die Form von Abb.31. Eine grobe Abschätzung ergibt einen Aufwand von ca. 80 Rechenverstärkern und 22 Integriernetzwerken für den analogen Teil des Programmes.

2.4.2. Digitaler Teil

Der digitale Teil hat die Aufgabe die Spannungen und Ströme zuzuordnen und die Differentialgleichungssysteme richtig auszuwählen. Zur Steuerung des Analogrechners erscheinen fünf Takte als zweckmäßig:

1. Takt: Unterbrechung der laufenden Rechnung
2. Takt: Speichern der analogen Werte
3. Takt: Zuordnung der Ströme und Spannungen
4. Takt: Anfangswertvorbereitung der Integratoren
5. Takt: Rechenbeginn

Die Takte dienen zur Bereitstellung der Zeit zum Umschalten der Relais und zum "Einschwingen" der mit einer Zeitkonstante behafteten Vorbereitungseingänge der Speicher und Integratoren.

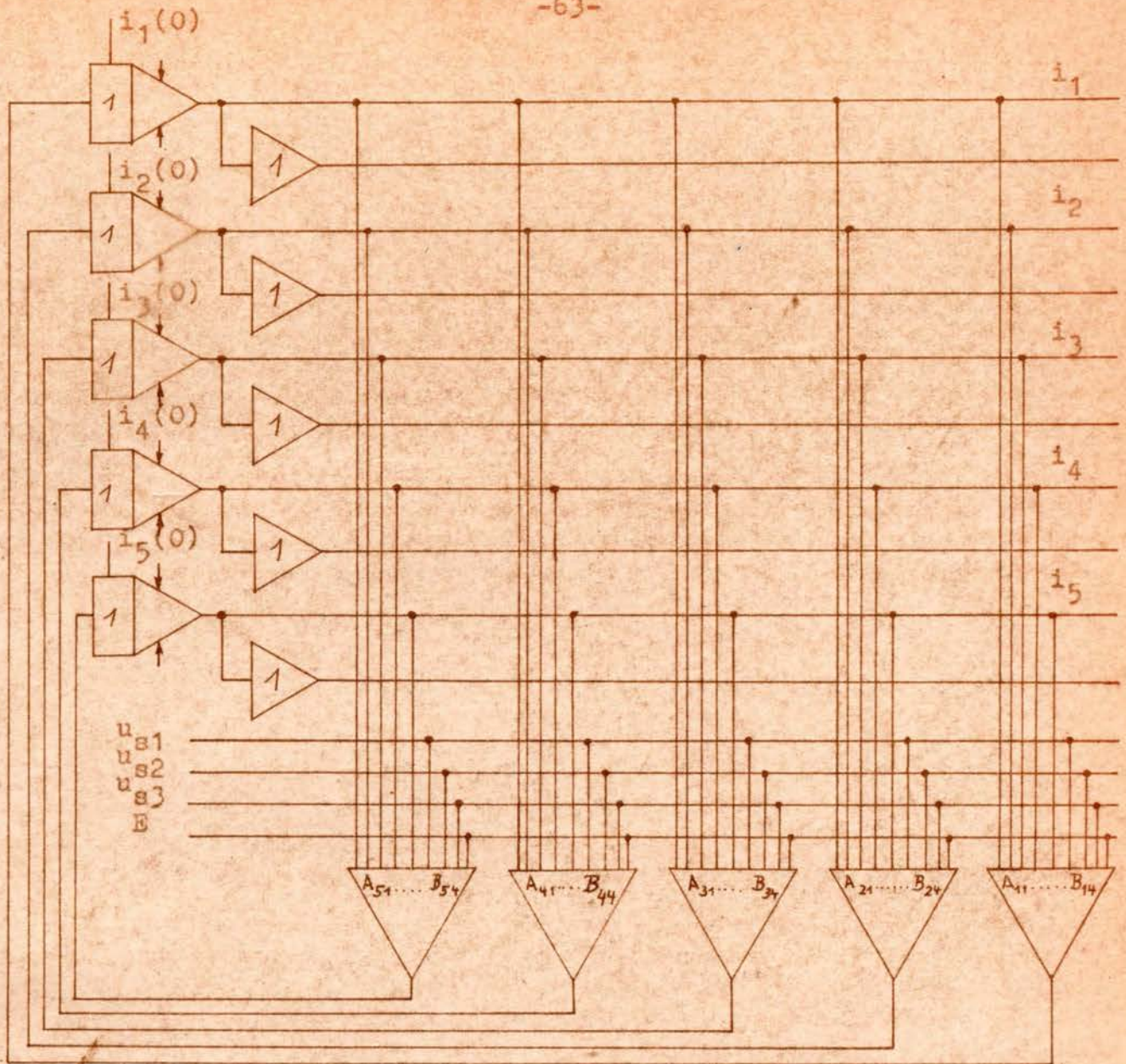


Abb.31

Dementsprechend ist die Taktzeit zu wählen. Bei der zu empfehlenden Anwendung von Geko-Relais dürfte eine Taktzeit von 200ms (bedingt durch die Integratorzeitkonstante von 50ms) ausreichend sein. In der Tabelle werden die erforderlichen Schaltzustände

Takt	AT		neue Dgl.		alte Dgl.		Speicher	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
5	1	1	0	0	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	1	0	1	0
3	1	0	0	0	0	0	1	0
4	1	0	0	0	0	0	1	0
5	1	1	1	1	0	0	0	0

aufgezeigt. Zur Zuordnung werden $3 \times 3 + 6 \times 6 + 6 \times 6 = 81$ Relais mit zwei Arbeitskontakten und sechs andere Relais bzw. Digital-Analog-

Schalter benötigt.

Weiterhin müssen noch Bauelemente zur Bereitstellung der Fehler-signale (Durchbruchbefehl oder Zündimpulsausfall usw.), die dem allgemeinen Teil zugeordnet werden, bereitgestellt werden.

Abb.32 zeigt das Schaltbild des digitalen Teiles und Abb.33 das Symbol.

2.4.3. Speicherteil

Zur Speicherung werden Analogspeicher verwendet. Da nur maximal fünf Werte gespeichert werden müssen ist der Aufwand nicht zu hoch. Abb.34 zeigt die Schaltung; Abb.35 zeigt das entsprechende Symbol.

2.4.4. Zusammenfassung

Die Integratoren brauchen nicht unbedingt steuerbar zu sein, wenn gleichzeitig mit der Erdung der Steuerbuchse die Integriereingänge abgeschaltet werden.

Unter den gegebenen Umständen erscheint mir diese Methode der Simulation als die günstigste, weil einerseits die Vorgänge exakt beschrieben werden (die Genauigkeit ist durch den Verzicht auf Differenzierglieder relativ groß), andererseits der Aufwand gegenüber dem Digitalrechner in Bezug auf den Preis wesentlich geringer ist.

In Abb.36 ist die Zusammenschaltung der einzelnen Teile angedeutet.

3. Qualitative Betrachtungen der Störungen

3.1. Allgemeines

Die Anzahl der auftretenden Störungen in Stromrichterschaltungen ist sehr vielfältig. Auch interessiert die genauere Untersuchung von unsymmetrischen Betriebszuständen in Stromrichterschaltungen. Ich möchte besonders betonen, daß unsymmetrische Betriebszustände vor allen Dingen dann interessant sind, wenn die bestehenden Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Besonders ist hier auf Sättigungserscheinungen in Stromrichtertransformatoren und in Drehfeldmaschinen (hier bei Speisung über einen Drehstromsteller) sowie auch in der Saugdrossel von Saugdrosselschaltungen zu achten. Dies sind Erscheinungen, die bisher noch nicht untersucht wurden, aber auch in dieser Arbeit nicht untersucht werden.

In /1/ wird betont, daß bereits durch rasche Steuerwinkeländerungen vorübergehende Unsymmetrien in der Magnetisierung der Maschine bzw. des Trafos (dort bei Drehstromsteller) entstehen, die hohe Spitzen im Magnetisierungsstrom zur Folge haben und die Thyristo-

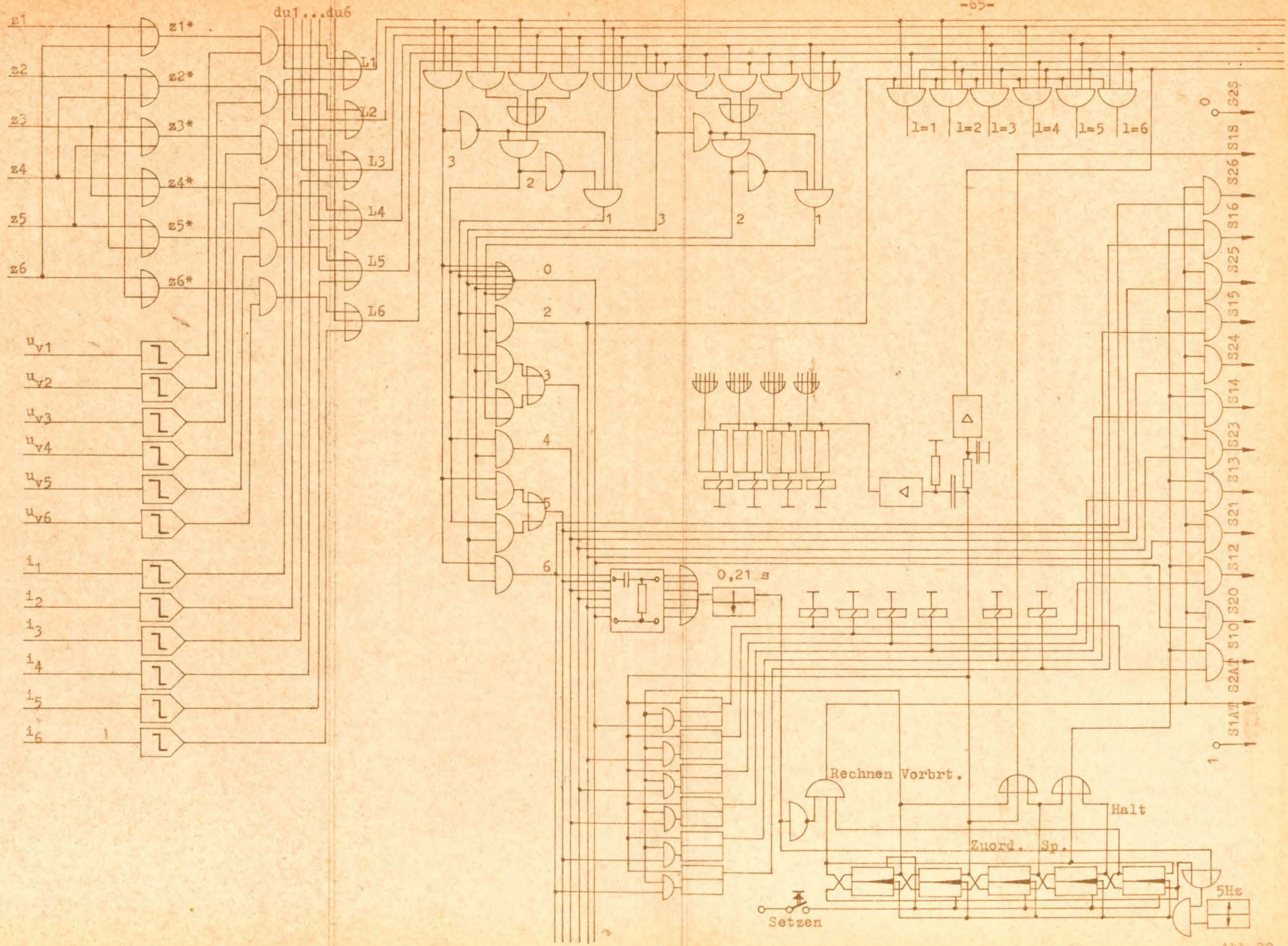


Abb. 32

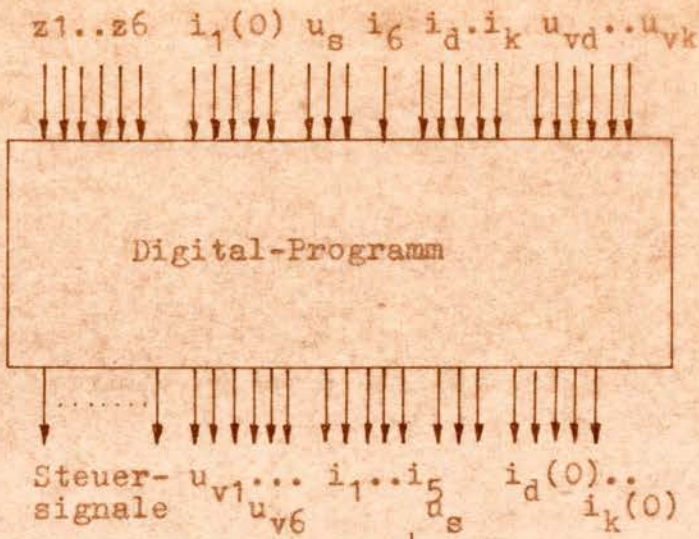


Abb.33

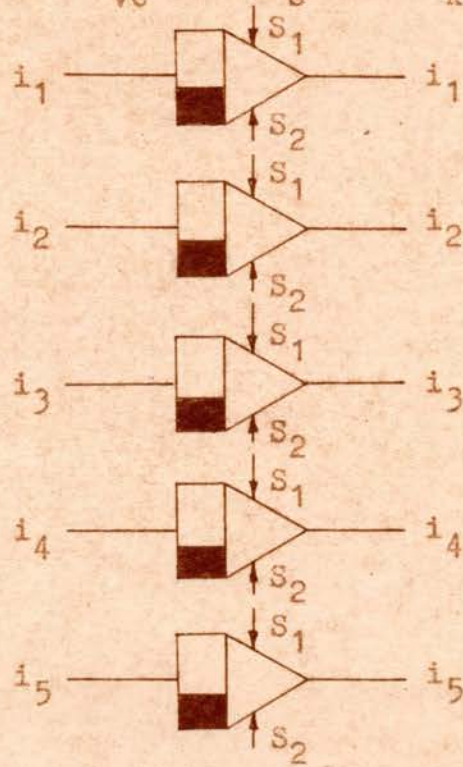


Abb.34

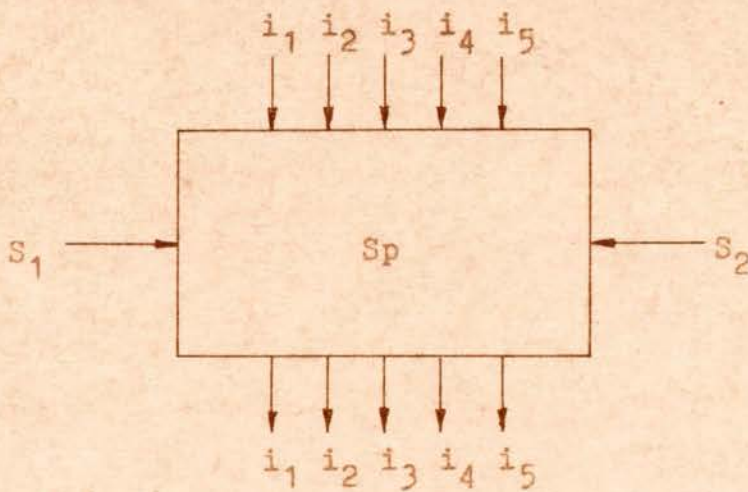


Abb.35

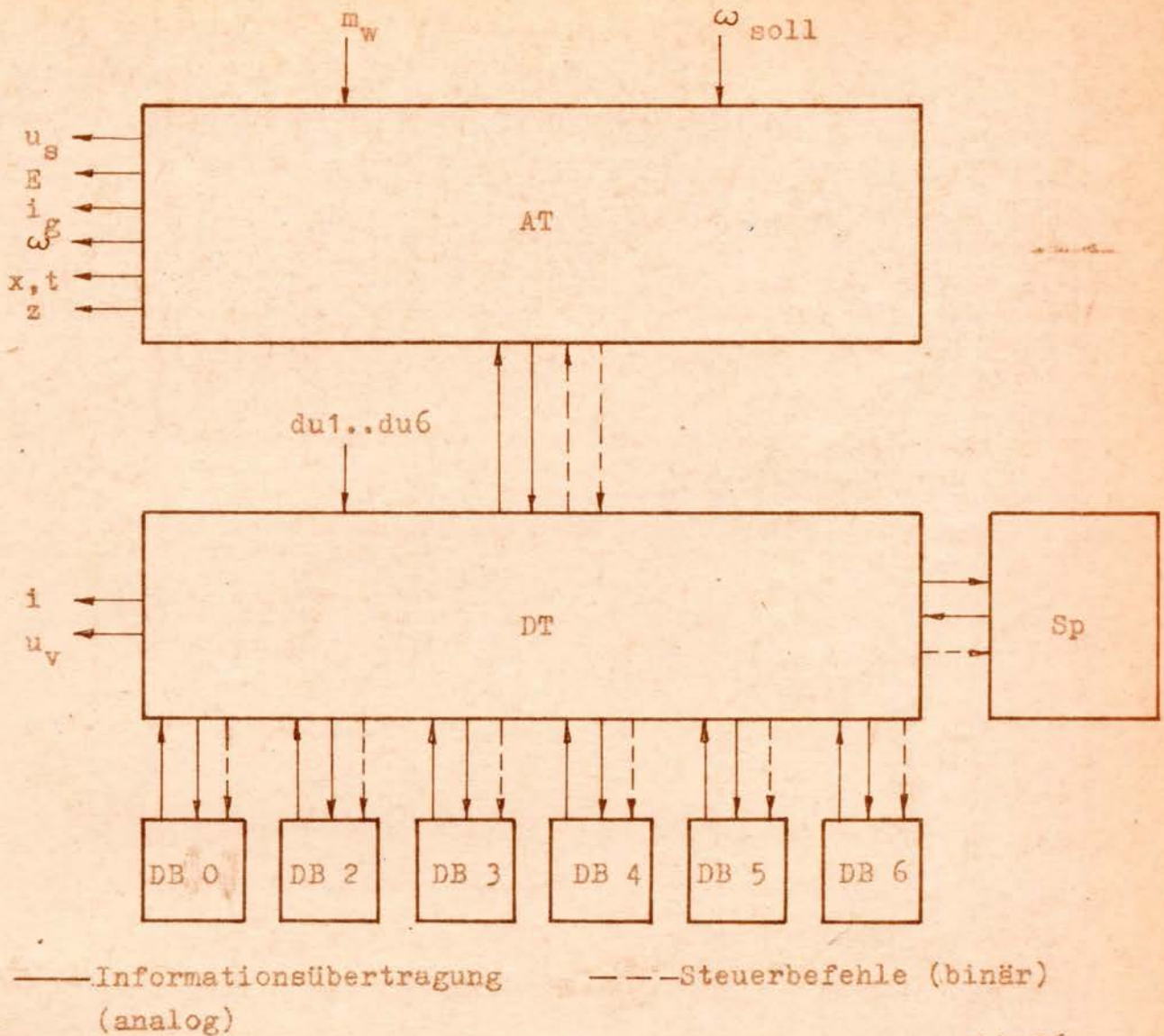


Abb. 36

ren gefährden können. Auch Einschaltvorgänge von über Halbleiter-ventilen gespeiste Wechselstromverbraucher unter Berücksichtigung der Sättigung sind nur wenig untersucht (Rush-Effekt, siehe /18/). Diese Dinge bedürfen noch einer genauen Klärung.

Hier möchte ich noch einmal an die Simulation von Schaltgeräten (siehe Abschnitt 2.1.2.4.) erinnern, wobei noch zu bemerken ist, daß die Programmierung von Schaltgeräten auf dem Analogrechner mit größeren Schwierigkeiten verbunden ist. Die Simulation von Stromunterbrechungen (siehe Abschnitt 4.6.) ist nur schwer realisierbar.

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation von Störungen folgender Art, wobei die Betrachtungen auf eine Dreiphasenmittelpunktsschaltung (als Grundbaustein der Drehstrombrücke) beschränkt bleiben:

1. Zerstörung von Thyristoren
(Durchbruch, dauernd leitend in beiden Richtungen)

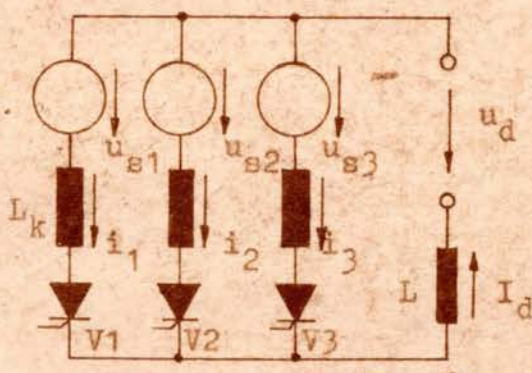
2. Ausfall von Zündimpulsen
3. Verschiebung von Zündimpulsen und Auftreten zusätzlicher bzw. falscher Zündimpulse
4. Netzausfall
 - 4.1. kurze Zeiten (< 1 Periodendauer)
 - 4.2. längere Zeiten (> 1 Periodendauer)
5. Spannungsschwankungen (ein- und mehrphasig)
6. Kurzschluß an der Last
7. Laststöße großer Amplitude

Die Vernachlässigung der Sättigungserscheinungen beim Untersuchen besonders der Fälle 3 und 7 setzen den Wert der Untersuchungen auf dem Analogrechner herab.

3.2. Zerstörung von Thyristoren (Durchbruch)

Kennzeichnend für den Durchbruch ist die dauernde Leitfähigkeit der durchgebrochenen Ventile in beiden Richtungen.

Die Glättungsdrossel sei so groß, daß für die Dauer des betrachteten Vorganges der Strom durch sie konstant sei.



$$u_{s1} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$u_{s2} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi)$$

$$u_{s3} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t + \varphi_1 + \frac{4}{3}\pi)$$

Strom fließe durch Ventil V1. Im Zeitpunkt $\omega t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi = \frac{\pi}{3} + \alpha$ beginnt die Kommutierung. α sei gleich 0 und $\varphi_1 = -\frac{\pi}{3}$. Damit ist

$$u_{s1} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t - \frac{\pi}{3}) \text{ und}$$

$$u_{s2} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t + \frac{\pi}{3}) \text{ usw.}$$

Abb.37

Die Zeit wird also vom Beginn der Kommutierung an gezählt. Die Kommutierung wird durch die drei Gleichungen

$$u_{s1} = u_d + L_k \frac{di_1}{dt}$$

$$u_{s2} = u_d + L_k \frac{di_2}{dt} \text{ und}$$

$$i_1 + i_2 = I_d \text{ beschrieben.}$$

Gleichzeitig wird angenommen, daß V1 seine Sperrfähigkeit verliert. Von diesen Gleichungen leiten wir ab

$$u_{s1} - u_{s2} = 2L_k \frac{di_1}{dt}$$

Da für $t=0$ $i_1 = I_d$ ist, ergibt die Integration

$$i_1 = I_d - \frac{\sqrt{2} U_s \sqrt{3}}{2 \omega L_k} (1 - \cos \omega t)$$

und

$$i_2 = \frac{\sqrt{2} U_s \sqrt{3}}{2 \omega L_k} (1 - \cos \omega t)$$

Beide Ströme bestehen also während der Kommutierung aus einer konstanten und einer sinusförmigen Komponente. Die Gleichspannung während dieser Zeit ergibt sich zu

$$u_d = (u_{s1} - u_{s2})/2$$

Wenn $u_d = (u_{s1} - u_{s2})/2 = u_{s3}$ ist,

dann beginnt die Kommutierung des Stromes von V2 auf V3. Dies ist zur Zeit

$$\omega t_k = \pi/2 \text{ der Fall.}$$

Die Ströme i_1 und i_2 haben dann die Größe

$$i_1(t_k) = I_d - \frac{\sqrt{6} U_s}{2 \omega L_k}$$

$$i_2(t_k) = \frac{\sqrt{6} U_s}{2 \omega L_k}$$

Die abgegebene Gleichspannung während dieser Zeit ist

$$u_d = (u_{s1} + u_{s2} + u_{s3})/3 = 0$$

Jetzt gilt folgendes Gleichungssystem

$$u_{s1} = u_d + L_k \frac{di_1}{dt}$$

$$u_{s2} = u_d + L_k \frac{di_2}{dt}$$

$$u_{s3} = u_d + L_k \frac{di_3}{dt}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = I_d$$

und mit $u_d = 0$ ergibt sich

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} U_s}{\omega L_k} \left[\sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) - \frac{1}{2} (\sqrt{3} + 1) \right] + I_d$$

$$i_2 = \frac{\sqrt{2} U_s}{\omega L_k} \left[\sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{2} (\sqrt{3} - 1) \right]$$

$$i_3 = \frac{\sqrt{2} U_s}{\omega L_k} \left[\sin(\omega t + \pi) + 1 \right]$$

Der Nulldurchgang des Stromes i_2 erfolgt bei

$$\omega t = \arcsin \left[-\frac{1}{2} (\sqrt{3} - 1) \right] - \frac{\pi}{3} = 2,470$$

Die Anfangswerte für das neue Gleichungssystem sind

$$i_1 (\omega t = 2,470) = -0,377 \frac{\sqrt{2} U_s}{\omega L_k} + I_d$$

$$i_3 (\omega t = 2,470) = 0,377 \frac{\sqrt{2} U_s}{\omega L_k}$$

Jetzt gilt das Gleichungssystem

$$u_{s1} = u_d + L_k \frac{di_1}{dt}$$

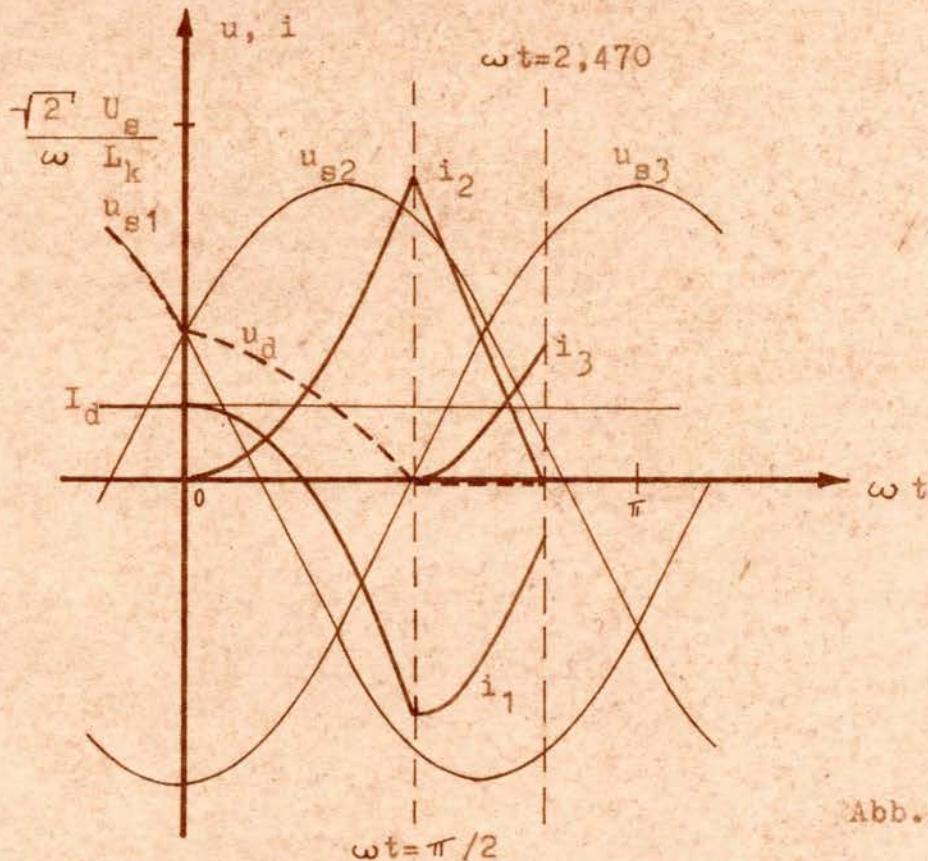
$$u_{s3} = u_d + L_k \frac{di_3}{dt}$$

$$i_1 + i_3 = I_d$$

Analog ergibt sich

$$u_{s1} - u_{s3} = 2L_k \frac{di_1}{dt}$$

Die Abb.38 zeigt den bis hierhin berechneten Stromverlauf.



Eine weitere Berechnung dürfte kaum noch sinnvoll sein. Es ist zu erkennen, daß ausgehend von dieser Berechnung ein Digitalprogramm zur genaueren Berechnung aufgestellt werden kann. Bei der zur Zeit zur Verfügung stehenden Rechenkapazität (in bezug auf Rechengeschwindigkeit und Speicherkapazität) erscheint es als sinnvoll, derartige Fehlerprogramme aufzustellen und zu berechnen.

Eine rein qualitative Betrachtung dieses Fehlers ergibt für den Fall der Dreipulsmittelpunktsschaltung, daß der gespeiste Motor

einen Strom durch das defekte Ventil zurückspeist. Gleichzeitig speisen die anderen Ventile, nur begrenzt durch die Streuinduktivität des Stromrichtertrafos, bzw. die Kommutierungsinduktivitäten, einen Strom durch das defekte Ventil.

Für die Drehstrombrückenschaltung ist ein derartiges Verhalten der Rückspeisung des Motors nicht zu erwarten, da dies durch die zweite Brückenhälfte verhindert wird.

3.3. Ausfall von Zündimpulsen

Hier ist ein Übergang von einer dreipulsigen Mittelpunktsschaltung in eine zweipulsige zu erwarten, wobei sich als Besonderheit die Speisung durch zwei um 120° el. phasenverschobene Spannungen ergibt.

Abb.39 zeigt den zu erwartenden Spannungs- und Stromverlauf der

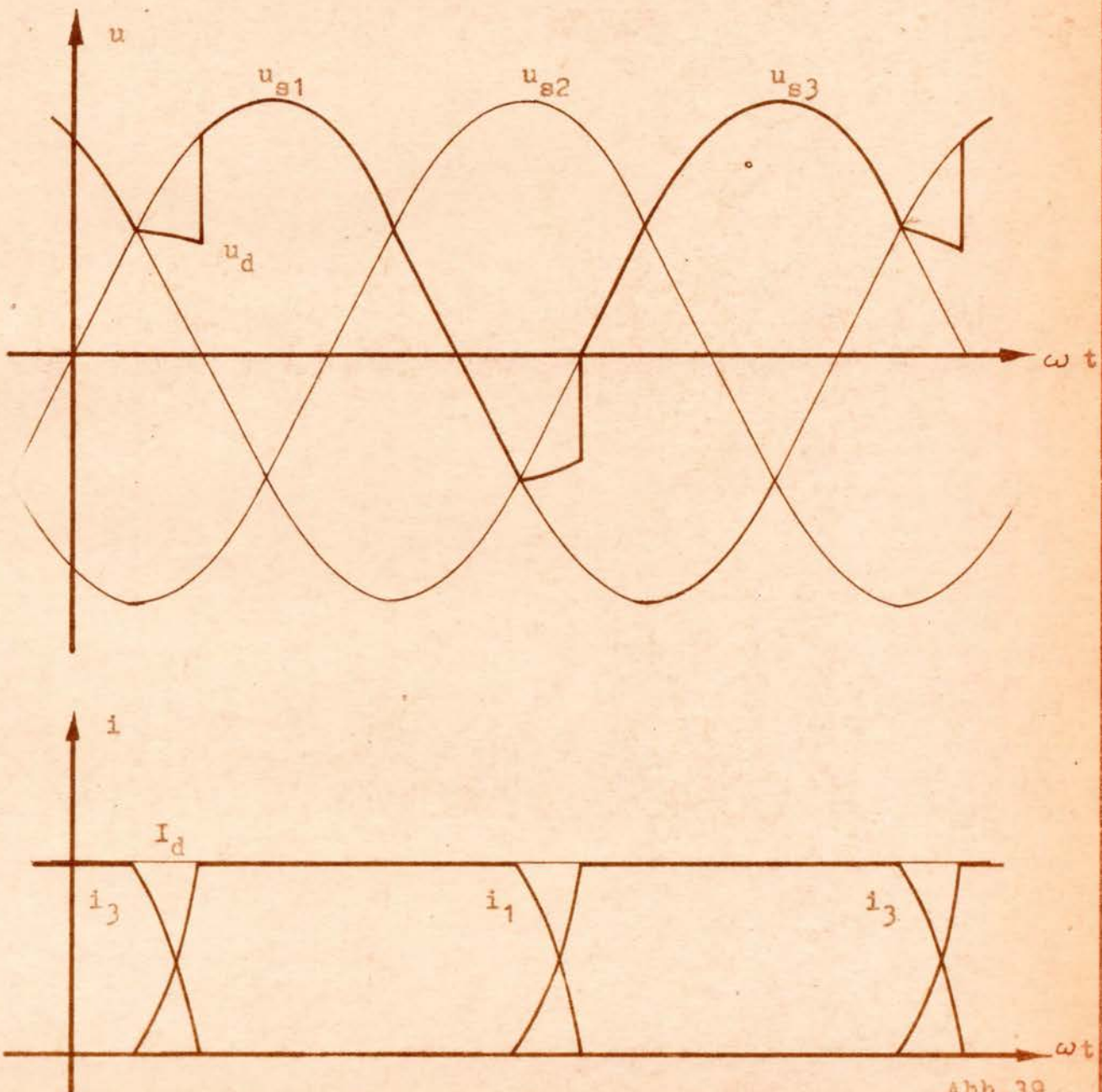


Abb.39

Dreipulsmittelpunktsschaltung für ungesteuerten Betrieb bei einem angenommenen Überlappungswinkel von 30° el. (bei abgeschmolzener Sicherung tritt dieser Betriebsfall auf). Die abgegebene Gleichspannung ist

$$U_{dio} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_s \int_{\pi/6}^{\pi/6} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} U_s = 0,779 U_s .$$

Der Stromflußwinkel durch die noch im Betrieb befindlichen Ventile ist $\lambda = \pi + u$. Unter Vernachlässigung der Überlappung ist

$$I_{va} = I_{da} / 2 \quad \text{und}$$

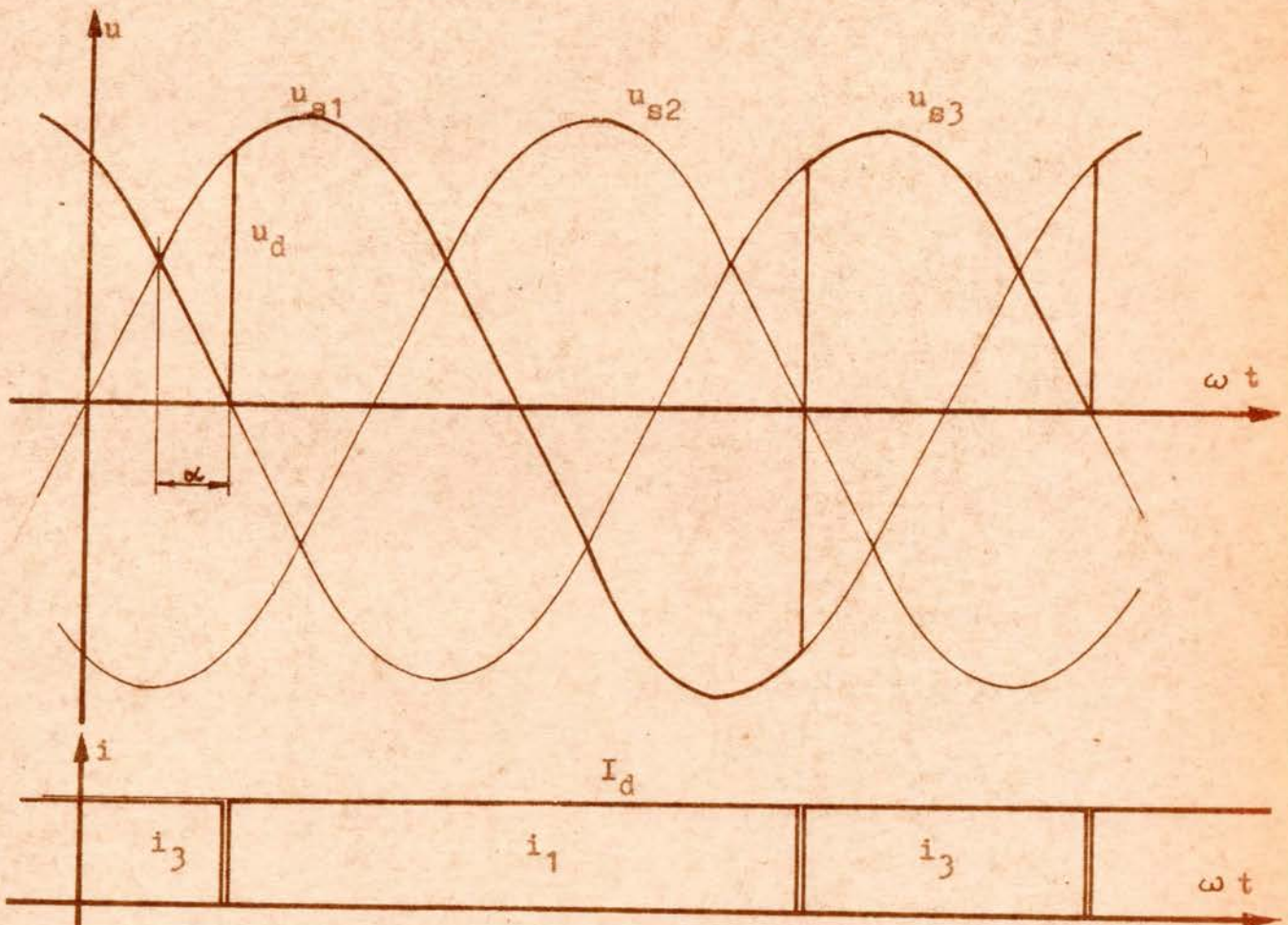
$$I_{ve} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{da} \quad \text{sowie}$$

$$I_{vm} = 2 I_{va} = I_{da} .$$

Der Formfaktor ist

$$f = \sqrt{2} = 1,414 .$$

Im gesteuerten Betrieb liegen die Verhältnisse etwas anders. Abb. 40 zeigt Strom- und Spannungsverlauf.



Die abgegebene Spannung ist

Abb.40

$$U_{dio} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} U_s \left[\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} \sin \vartheta d\vartheta + \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sin \vartheta d\vartheta \right]$$

$$U_{dio} = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} U_B (3\sqrt{3} \cos \alpha - 3 \sin \alpha)$$

Abb.41 zeigt die Steuerkennlinie, die, wie zu erwarten unsymmetrisch ist.

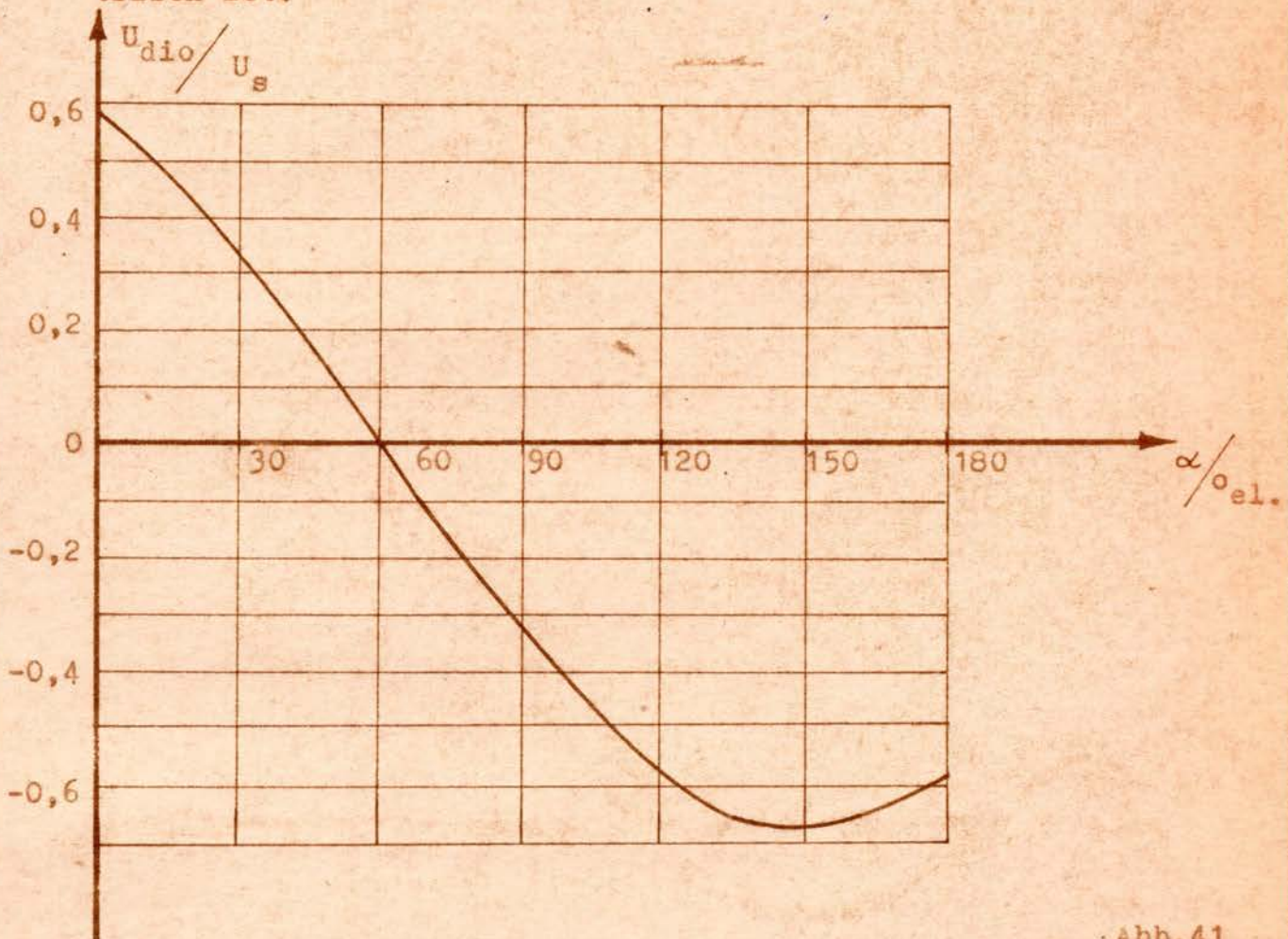


Abb.41

Die auftretenden Stromflußwinkel sind unterschiedlich. Während das eine Ventil normal belastet wird, steigt bei dem anderen, welches in der Phasenfolge direkt vor dem Gestörten liegt der Stromflußwinkel auf $\lambda = \frac{4\pi}{3}$ an. Unter Vernachlässigung der Überlappung ist

$$\begin{aligned} I_{va} &= \frac{2}{3} I_{da} \quad \text{und} \\ I_{ve} &= \frac{\sqrt{6}}{3} I_{da} \quad \text{sowie} \\ I_{vm} &= \frac{3}{2} I_{va} = I_{da} \end{aligned}$$

Der Formfaktor ist

$$f = \frac{\sqrt{6}}{2} = 1,223$$

Im Fall der Drehstrombrücke addieren sich die Spannungen, die in beiden Brückenhälften entstehen.

Fallen die Zündimpulse von zwei Ventilen auf einer Brückenseite

aus, so ist die entstehende Spannung Null (der Mittelwert) und es gilt $I_{va} = I_{ve} = I_{vm} = I_{da}$ und $f = 1$.

Zwangsläufig wird nach einer gewissen Zeit der Strom zu lücken beginnen und die Spannung wieder ansteigen. Dann treten dieselben Verhältnisse wie bei einer einpulsigen Schaltung auf.

Bei einer Drehstrombrückenschaltung braucht der Strom nicht zu lücken, da die andere Brückenhälfte die Verluste decken kann.

Die gemachten Angaben gelten für nichtlückenden Betrieb und die Angaben für die Belastung der Ventile für ideal geglätteten Strom.

Die bisher gemachten Bemerkungen machen deutlich, daß es prinzipiell möglich ist, Antriebe zu entwerfen, die bei Ausfall von einem Zündimpuls bzw., was dem gleich kommt, Ausfall einer Sicherung oder Verlust der Leitfähigkeit eines Ventils unter Wirkung der Regelung noch weiterarbeiten. Hier taucht aber die Frage der Zweckmäßigkeit auf.

3.4. Verschiebung von Zündimpulsen

Die Verschiebung von Zündimpulsen und das Auftreten zusätzlicher Zündimpulse sind im Normalbetrieb nicht kritisch. Sie kommen einer Steuerwinkelveränderung gleich oder sind wirkungslos. Allerdings soll das Auftreten der Steuerimpulse, während das Ventil in negativer Richtung beansprucht wird, aus Verlustfragen vermieden werden.

Kritisch ist das Auftreten zusätzlicher Zündimpulse im Wechselrichterbetrieb, da hier Wechselrichterkippen auftreten kann.

Die hier auftretenden Ströme sind für die Ventile kritisch. Eine Bedämpfung durch Vergrößerung der Glättungs-drossel ist möglich.

3.5. Netzausfall

Beim Netzausfall müssen zwei Fälle unterschieden werden. Einerseits kann das Netz seine EMK verlieren und gleichzeitig seine Leitfähigkeit (Abschaltvorgang) und andererseits nur seine EMK verlieren. Zur Untersuchung des ersten Falles müssen die Schaltergeräte näher untersucht werden. Der zweite Fall ist möglich, wenn das Netz durch entsprechend viele Verbraucher, keine elektrischen Maschinen, belastet ist.

Dann ist ein weiterer Stromfluß durch die jeweilige Phase möglich. Dies gilt auch, wenn der Stromrichter über einen Transformator gespeist wird. Hier ist den Sättigungserscheinungen besondere Beachtung zu widmen. Desgleichen muß das Verhalten des Trafos in bezug auf Überspannungen untersucht werden.

Wenn die Spannung der Phase, an der kein Ausfall ist, kleiner Null

wird, dann kommutiert der Strom, sofern ein Zündimpuls vorliegt auf diese Phase, sonst treten Verhältnisse ähnlich Abschnitt 3.3. auf. Hier wird also der Stellbereich des Stromrichters, wie auch bei Zündimpulsanfall eingeschränkt.

Fällt die Spannung in zwei Phasen aus, dann sind die Ströme in beiden Phasen, ungesteuerter Betrieb vorausgesetzt, gleich groß. Im gesteuerten Betrieb tritt Einpulsbetrieb auf.

3.6. Kurzschluß, an der Last

An dieser Stelle soll nur auf die einschlägige Literatur /1/, /2/, /8/, /9/, /12/, /22/ und /23/ verwiesen werden.

3.7. Laststöße großer Amplitude

Laststöße großer Amplitude können in zwei Fälle unterschieden werden. Einmal kann der Motor "schlagartig" gestoppt werden (Festfahren eines Walzwerkes). Dieser Fall kommt einem Kurzschluß hinter der Glättungsdrossel gleich. Als Unterschied ist der noch vorhandene Ankerwiderstand zu werten.

Zum anderen kann das geforderte Moment am Motor rapide ansteigen. Hier sinkt die EMK des Motors langsam ab, bis ein Ausgleich stattgefunden hat. Sofern das geforderte Moment den ihm proportional zulässigen Laststrom nicht überschreitet, sind hier keine außergewöhnlichen Beanspruchungen zu erwarten, sofern die Strombegrenzungsregelung ihren Dienst erfüllt.

4. Rechenschaltungen

An dieser Stelle soll eine Zusammenfassung für die programmierten und die zu empfehlenden Rechenschaltungen erfolgen.

4.1. Grundsaltungen

4.1.1. Dreiphasengenerator /19/

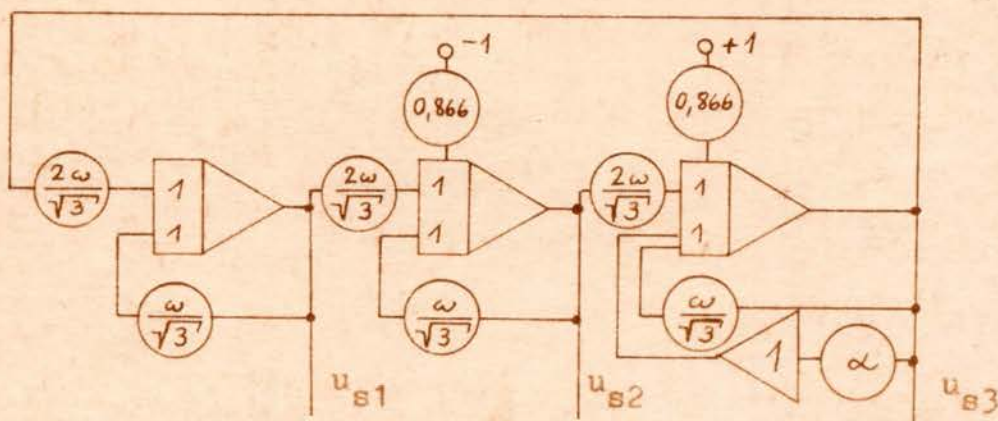


Abb. 42

4.1.2. Differenzierglied /19/

Abb. 43 zeigt ein zu empfehlendes Differenzierglied. Das Übertragungsverhalten hat die Funktion

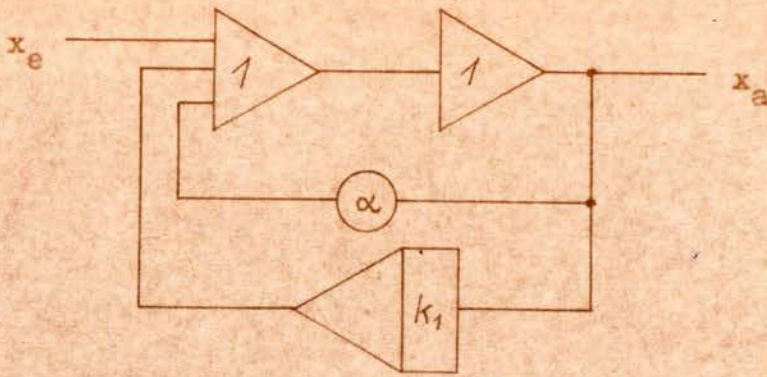


Abb. 43

$$x_a = \frac{d_o p}{1 + p \frac{1-\alpha}{k_1}} x_e$$

$$d_o = \frac{1}{k_1}$$

$$\alpha = 0,998$$

$$k_1 = 1s^{-1}$$

Das Differenzierglied wird im folgenden durch das Symbol

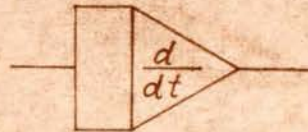


Abb. 44

dargestellt. Falls Verwechslungen möglich sind, wird der Integrator durch das Symbol

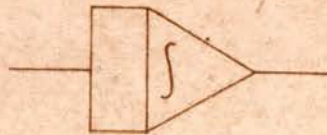


Abb. 45

dargestellt.

4.1.3. Ideale Diode /19/

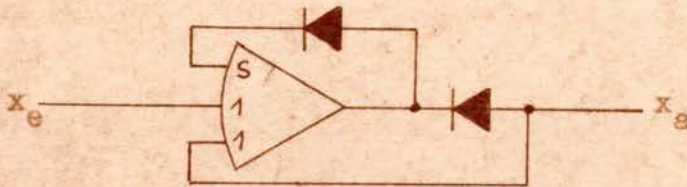


Abb. 46

4.1.4 Extremwertauswahl /19/

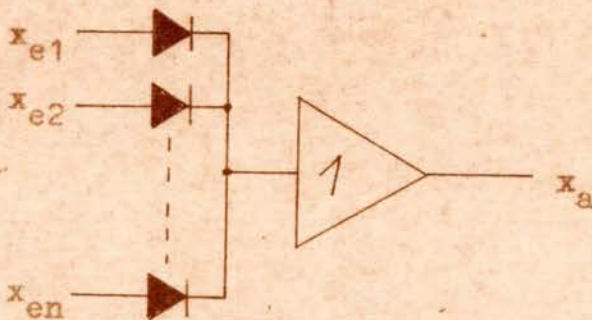


Abb. 47

4.1.5. Maximalwertspeicher/19/

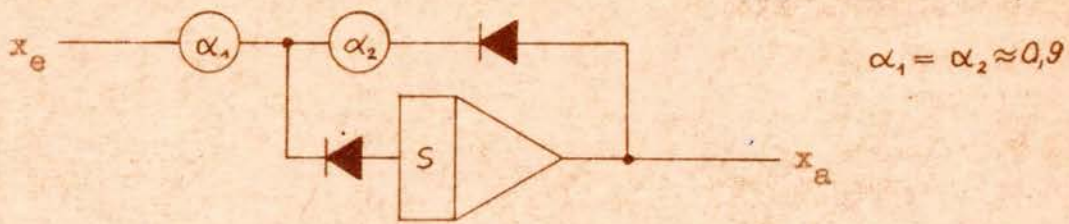


Abb.48

4.1.6. $\int i(t)dt$ - und $\int i^2(t)dt$ - Schaltung

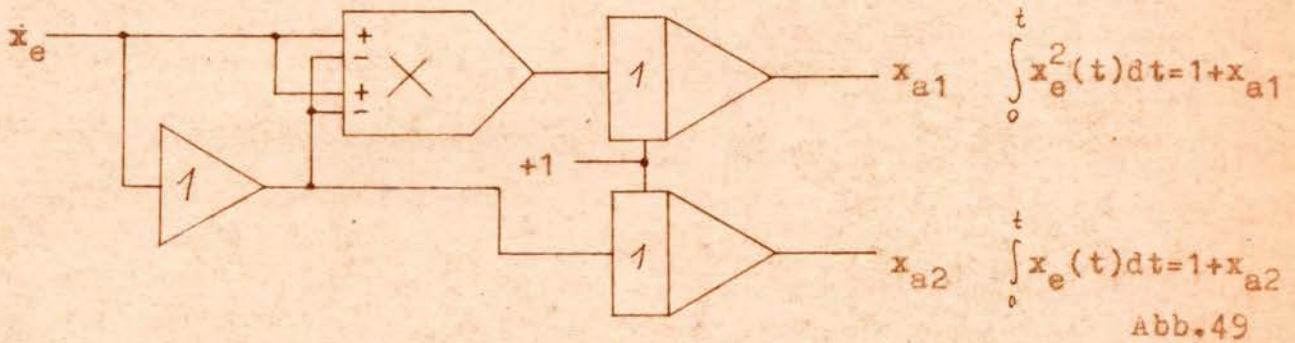


Abb.49

4.2. Lastschaltungen

4.2.1. Nachbildung einer ohmsch-induktiven Last

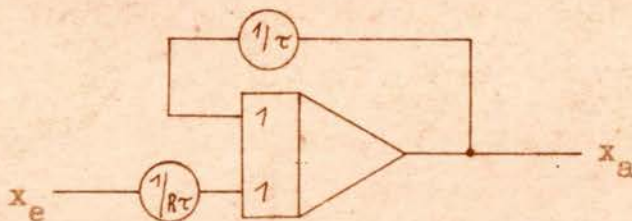


Abb.50

4.2.2. Nachbildung einer Gleichstromnebenschlußmaschine

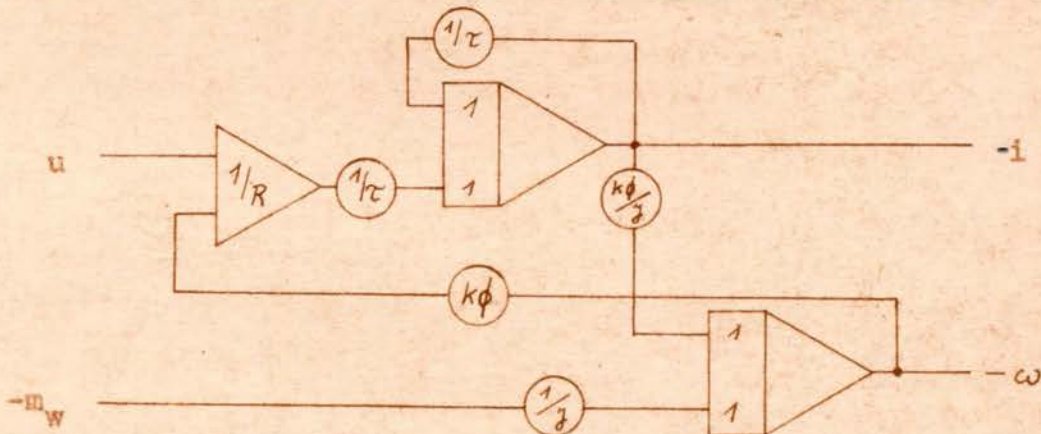


Abb.51

4.2.3. Nachbildung einer Gleichstromnebenschlußmaschine mit Vorgabe des Stromes

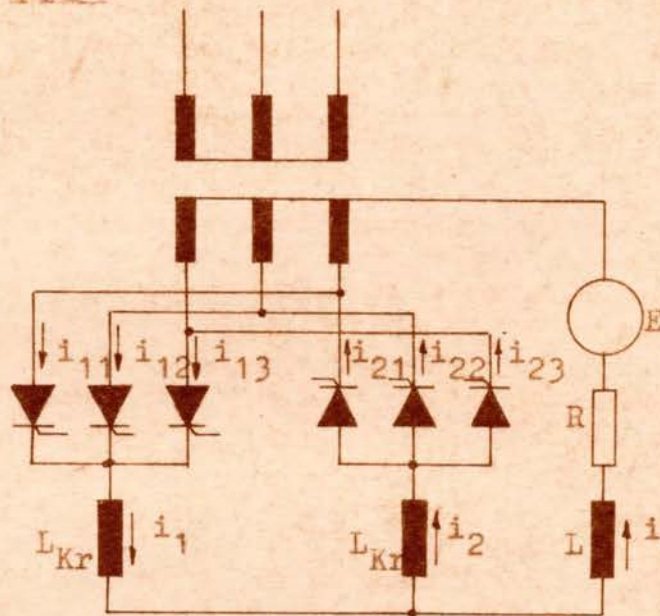
Für bestimmte Zwecke wird ein derartiges Analogprogramm benötigt. Abb.52 zeigt die entsprechende Schaltung. Die Verwendung eines Differenziergliedes ist in diesem Fall nicht zu umgehen.

wenn ihm eine ideale Diode in Reihe geschaltet wird.

Mit dieser Schaltung wurden die im Abschnitt 5. berechneten Werte ermittelt und die Diagramme erstellt.

4.3.2. Gegenparallelmittelpunktsschaltung (dreipulsig)

Mit dem folgenden Programm nach Abb.56 wird die Schaltung



simuliert.

Abb.55

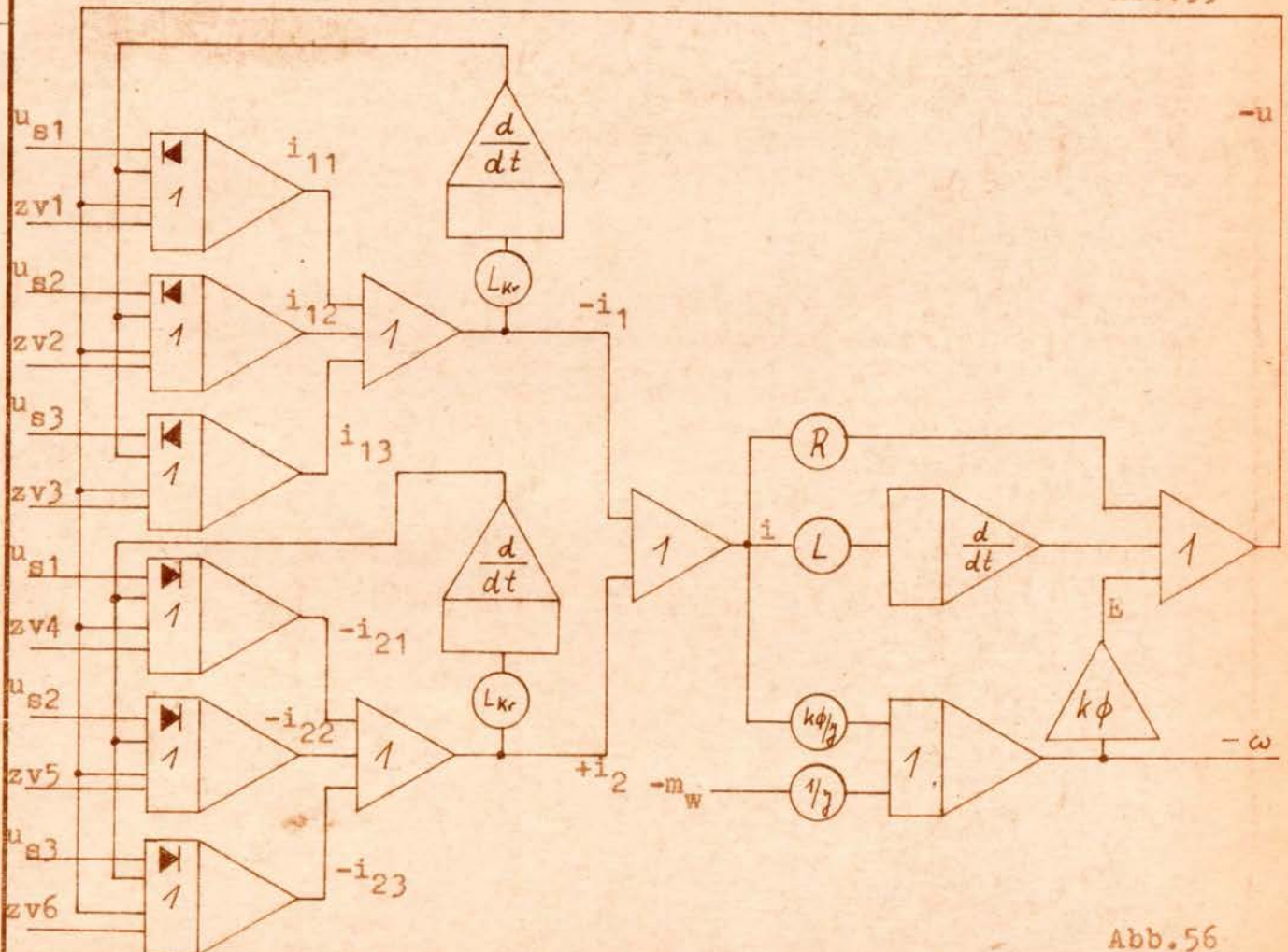


Abb.56

4.3.3. Sechphasensaugdrosselschaltung

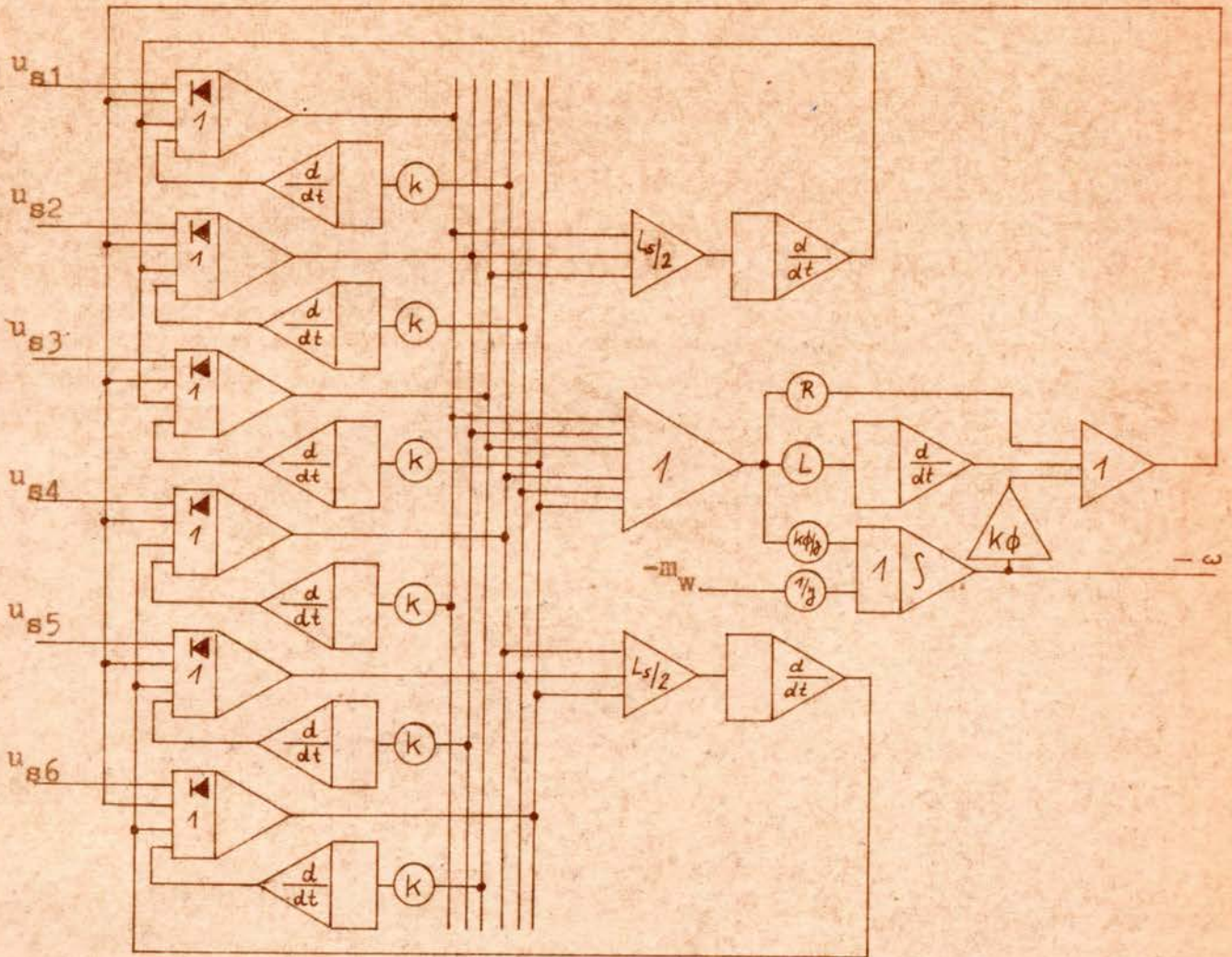


Abb. 57

4.3.4. Gesteuerter Integrator

Hier soll nur eine zweiphasige Schaltung angedeutet werden. Die bereits skizzierten Schaltungen mit dem "Schnörr"-Integrator können dadurch sinngemäß ergänzt werden.

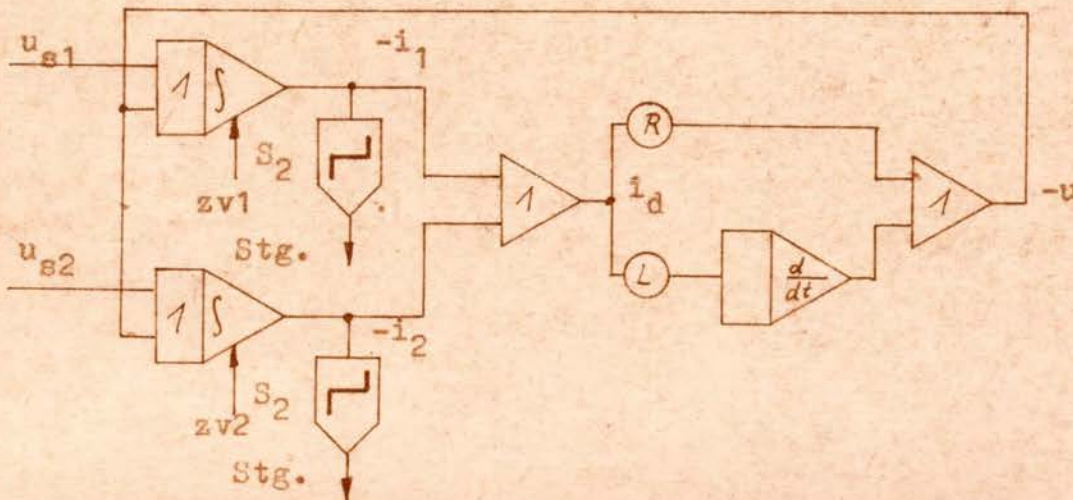


Abb. 58

Mit dem geschalteten Integrator ergibt sich ein Schaltbild nach Abb.59 :

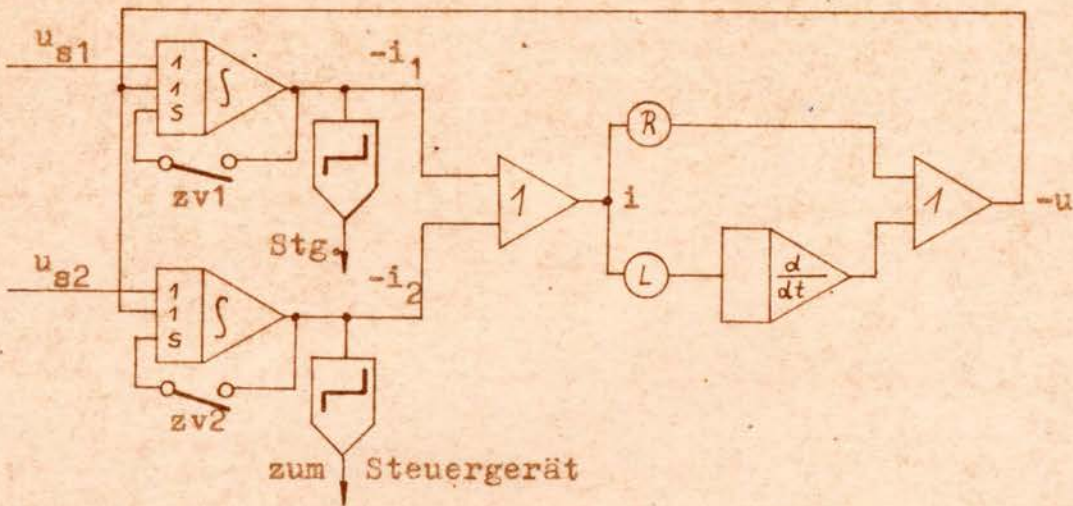


Abb.59

4.3.5. Beispiel zur iterativen Lösung von Dgl.-Systemen

Nach /25/ gilt für eine Zweipulsmittelpunktsschaltung während der Kommutierung:

$$u_{s1} - u_{s2} = L_k \frac{di_1}{dt} - L_k \frac{di_2}{dt}$$

$$(L + \frac{L_k}{2}) \frac{d}{dt}(i_1 + i_2) + R(i_1 + i_2) = -E.$$

Nach Umformung erhält man

$$\frac{di}{dt} = -\frac{2R}{2L+L_k} i - 2 \frac{E}{2L+L_k} \quad \tau_2 = \frac{2L+L_k}{2R}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{u_{s1}}{L_k} + \frac{1}{2} \frac{di}{dt}$$

bzw.

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{u_{s2}}{L_k} + \frac{1}{2} \frac{di}{dt}$$

Diese beiden Gleichungen lassen sich leicht programmieren:

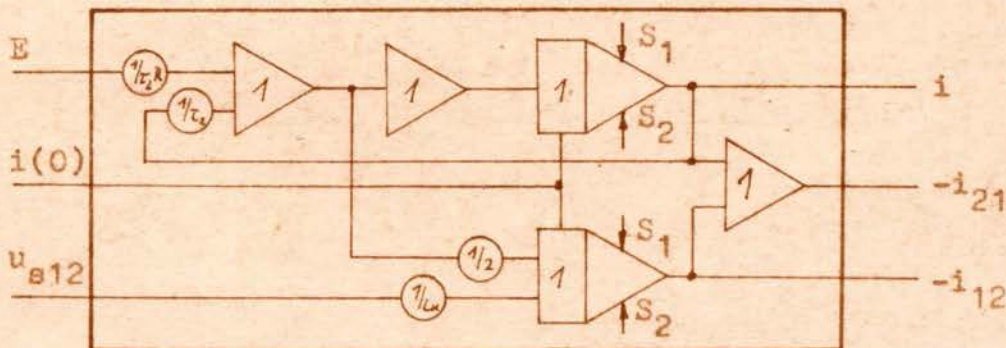


Abb.60

Weiterhin muß die einfache Stromführung nach Abb.61 programmiert werden. Hierzu wird die direkte Nachbildung mit Komparatormodell verwendet. Abb.62 zeigt die Zusammenfassung.

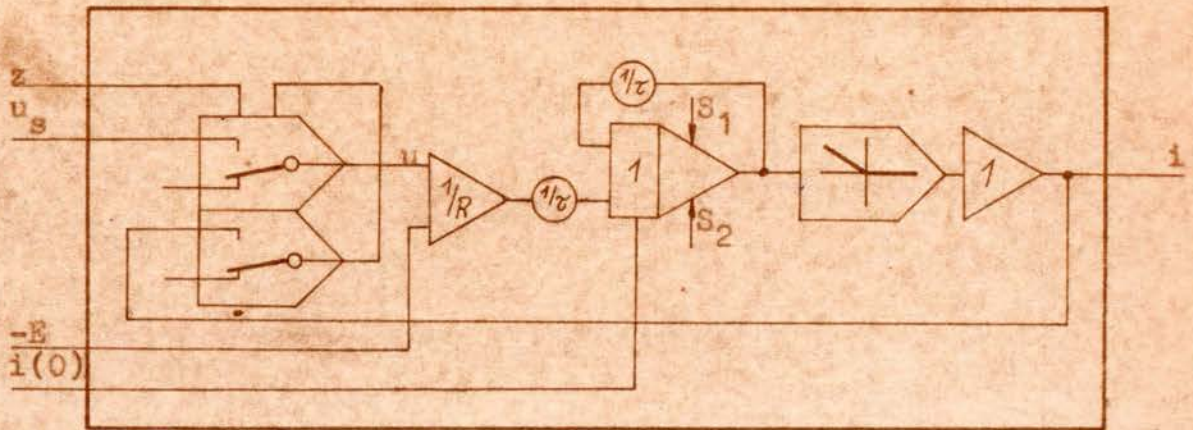


Abb. 61

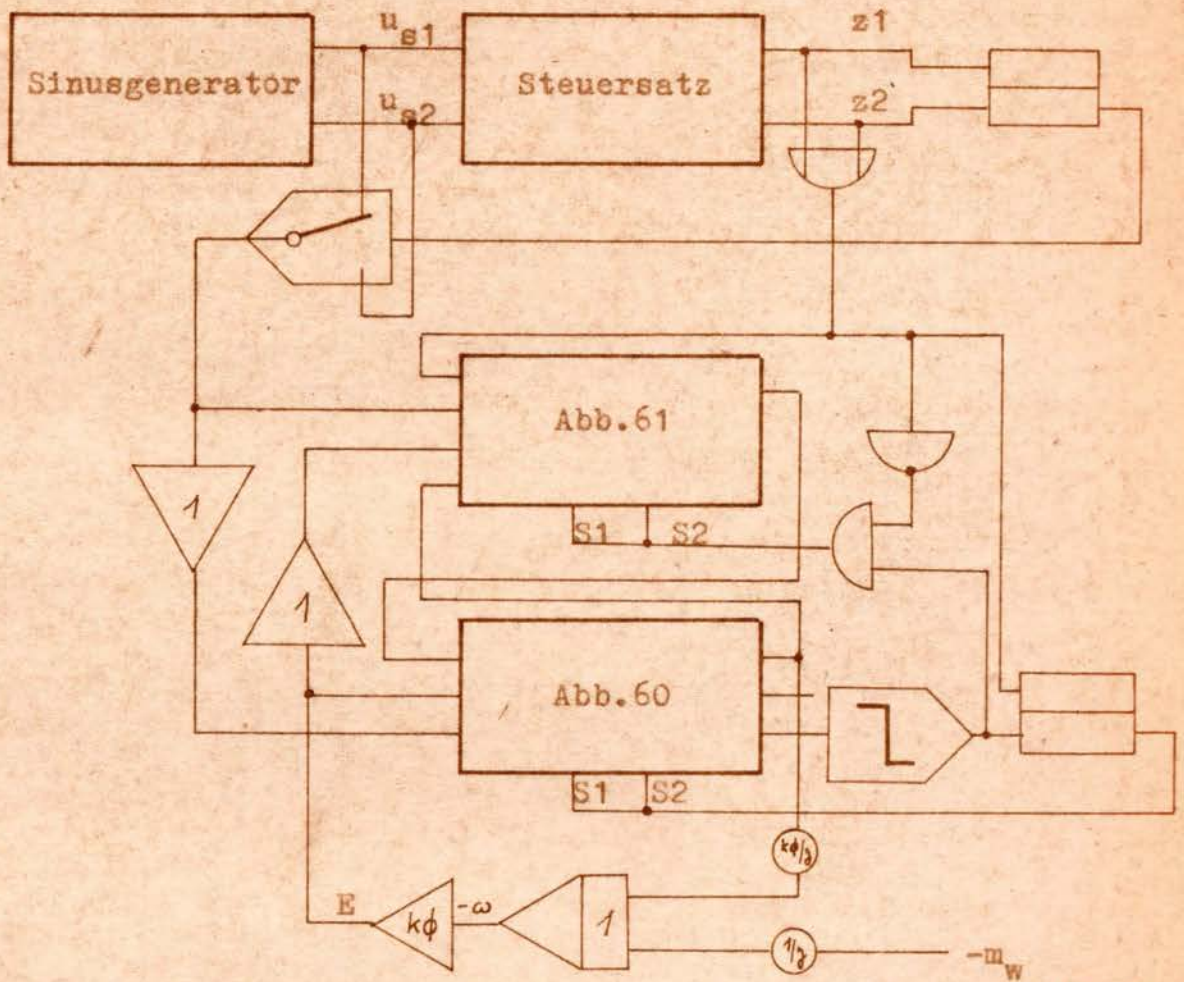


Abb. 62

4.3.6. Nachbildung einer Dreipulsmittelpunktsschaltung ohne Verwendung eines Differenziergliedes

Voraussetzung für die Einsparung des Differenziergliedes ist, wie auch für die Simulation der Drehstrombrückenschaltung, daß am Ausgang des Stromrichtermodelles die Spannung vorhanden ist. Dies ist durch Anwendung der impliziten Funktionstechnik möglich. Um die allgemeine Form der impliziten Gleichung

$$F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, y) = 0$$

zu lösen, ergibt sich ein Prinzipschaltbild nach Abb.63 .

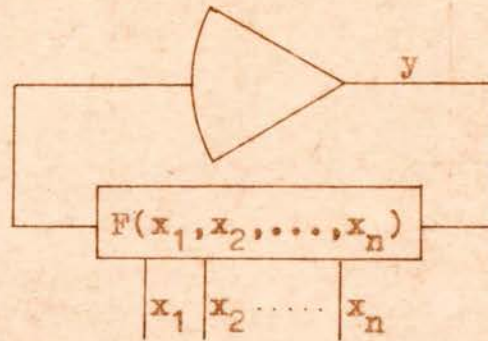


Abb.63

Man erhält am Ausgang des offenen Verstärkers die Funktion y, wenn an seinem Eingang die Bedingung

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n, y) = -\frac{y}{V} \approx 0$$

erfüllt ist. Dies kann auch für den "Schnörr"-Integrator angewandt werden.

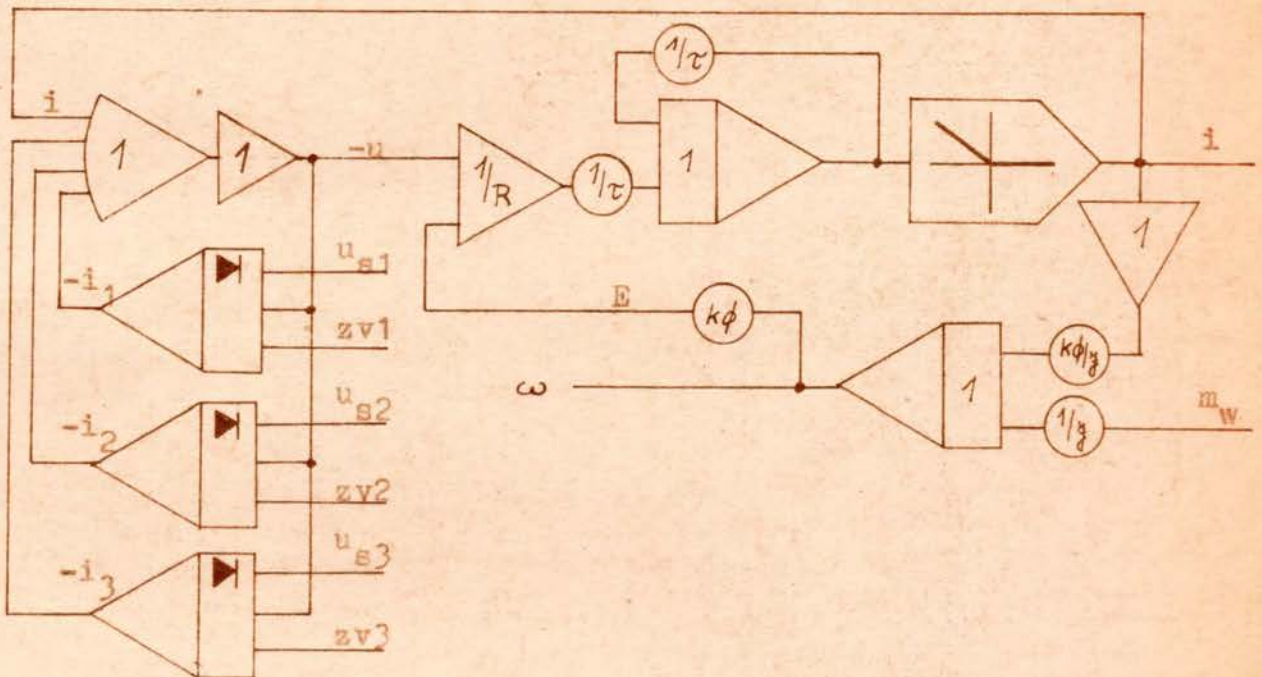


Abb.64

Es ist möglich, dass die Schaltung zur Instabilität neigt.

4.3.7. Verbesserung des "Schnörr"-Integrators

Durch Anwendung einer idealen Diode kann der negative Reststrom vermieden werden. Die in Abb.65 gezeigte Schaltung entspricht der Schaltung aus Abschnitt 2.2.2. (Abb.17).

4.3.8. Modell einer Drehstrombrückenschaltung

Das im Abschnitt 4.3.6. gezeigte Modell einer dreipulsigen Mittelpunktsschaltung kann leicht zu einer Drehstrombrückenschaltung erweitert werden. Die Last, die mit der Last aus Abb.64 identisch ist, wird in Abb.66 nur als Kasten dargestellt.

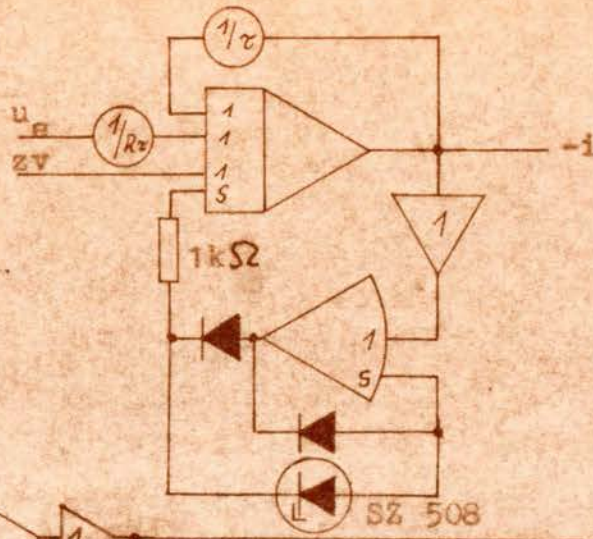


Abb. 65

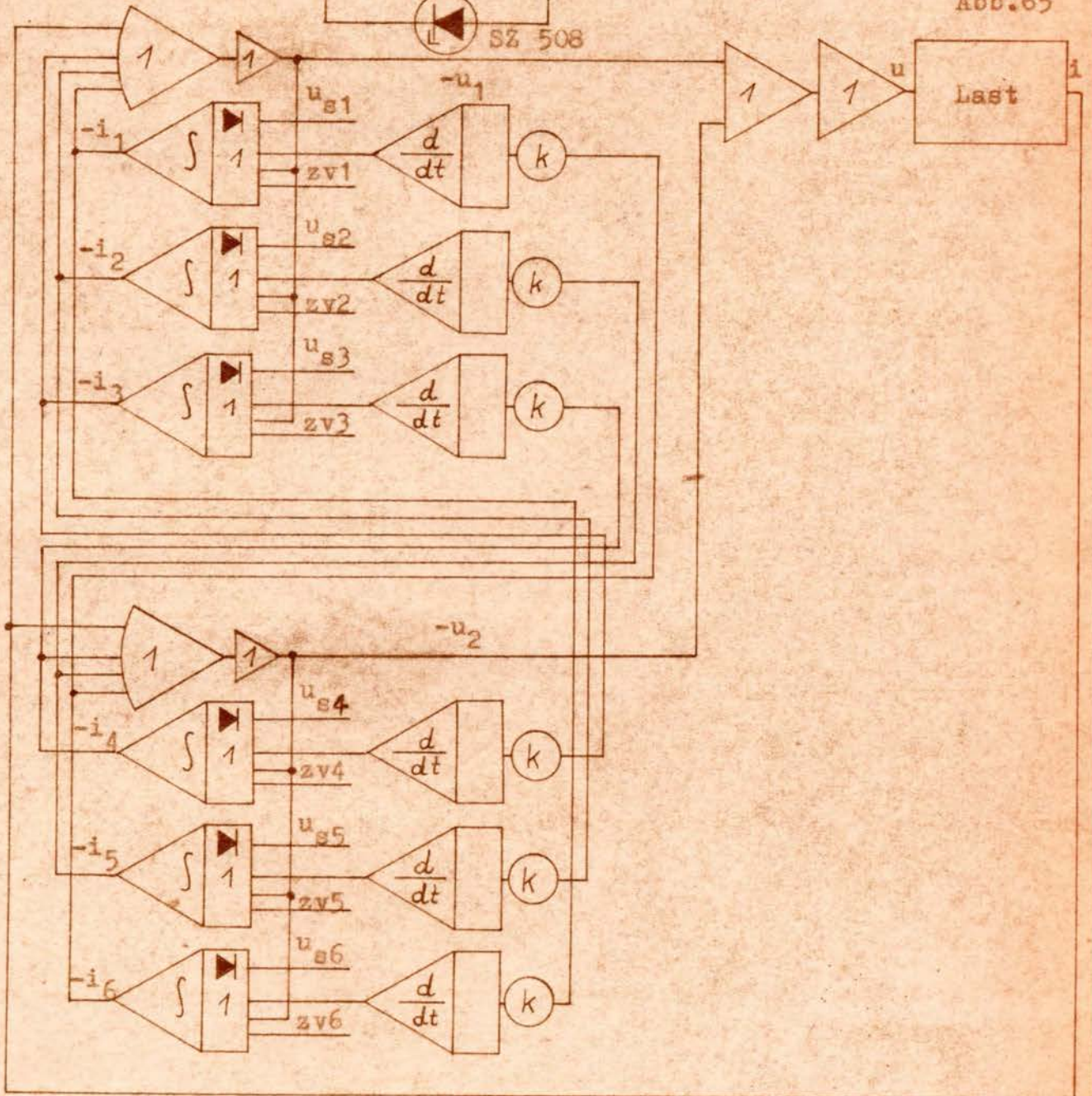


Abb. 66

Der Faktor k entspricht dem Verhältnis M/L der Drehstrombrücke nach Abb.6. Die Widerstände R und S sind vernachlässigt, können aber noch leicht berücksichtigt werden. Der Aufwand für diese Schaltung beträgt ca. 45 Rechenverstärker bei Verwendung von "Schnörr"-Integratoren nach Abb.65.

4.4. Regelungsschaltungen

Hier soll nur eine Drehzahlregelung mit unterlagerter Stromregelung mit Strombegrenzung gezeigt werden. Kreisstromregelungen

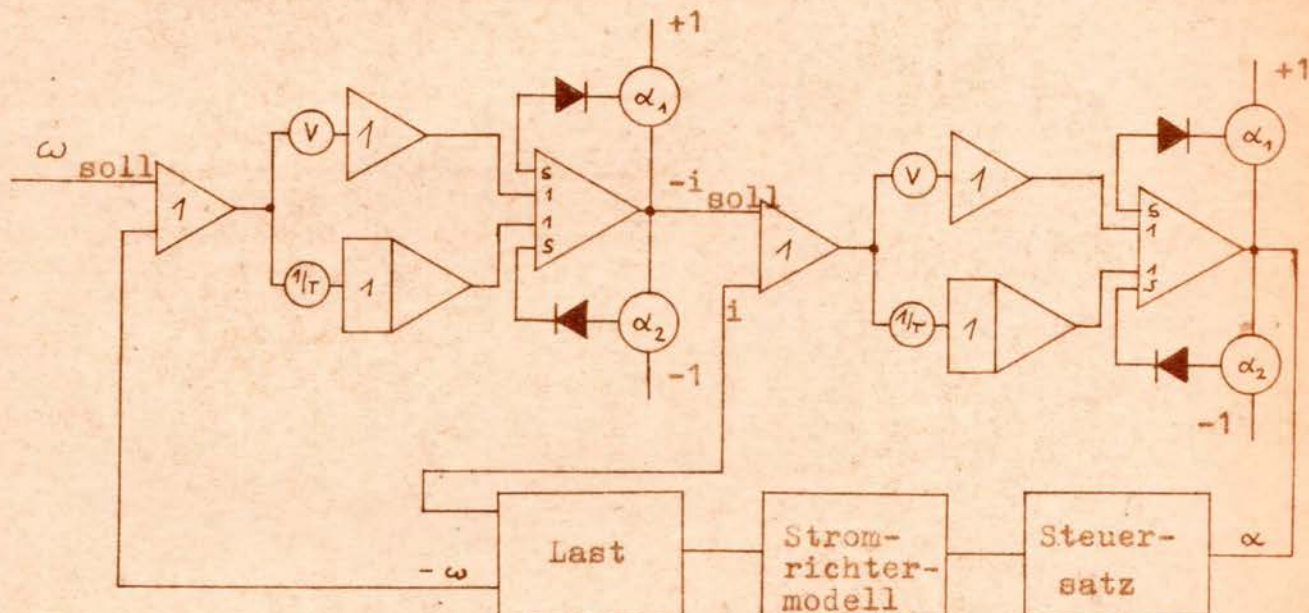


Abb.67

u.a. können analog aufgebaut werden.

Wenn als Ausgang des Stromrichtermodelles der Strom erscheint ("Schnörr"-Integrator), dann kann dieser auch sofort zurückgeführt werden.

4.5. Simulation von Wechsel- und Drehstromstellern

In bezug auf Fehler in Drehstromsteller und ihre Auswirkungen können Hinweise aus /18/ entnommen werden. Da die Strom- und

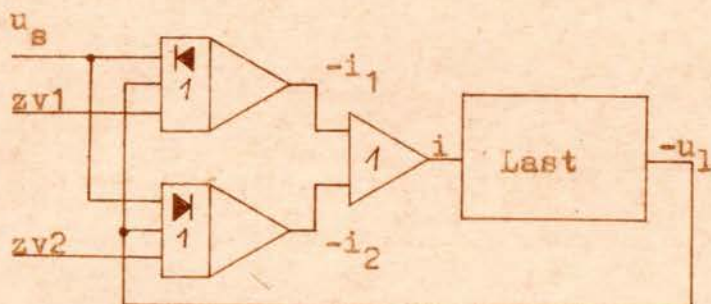


Abb.68

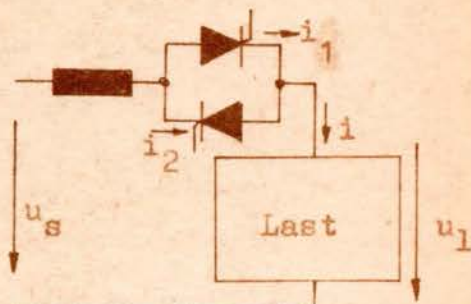


Abb.69

Spannungsverhältnisse beim Drehstromsteller mit Motor- und Gleichrichterlast noch nicht definitiv geklärt sind, sind hier sogar stationäre Untersuchungen von Interesse. Für passive Last

sind die Verhältnisse in /26/ geklärt worden.

Abb.69 zeigt das Schaltbild eines Wechselstromstellers, der mit Hilfe der in Abb.68 gezeigten Schaltung simuliert wird.. Aufbauend auf diesem Prinzip läßt sich das Schaltbild für einen Drehstromsteller ableiten. Abb.70 zeigt die entsprechende Schaltung. Die Umwandlung in α , β , 0-Komponenten erfolgt, da sich darauf aufbauend Asynchronmaschinen leichter realisieren lassen. In /27/ und /28/ werden entsprechende Modelle angegeben; /28/ gibt auch die Schaltbilder für die Wandler an.

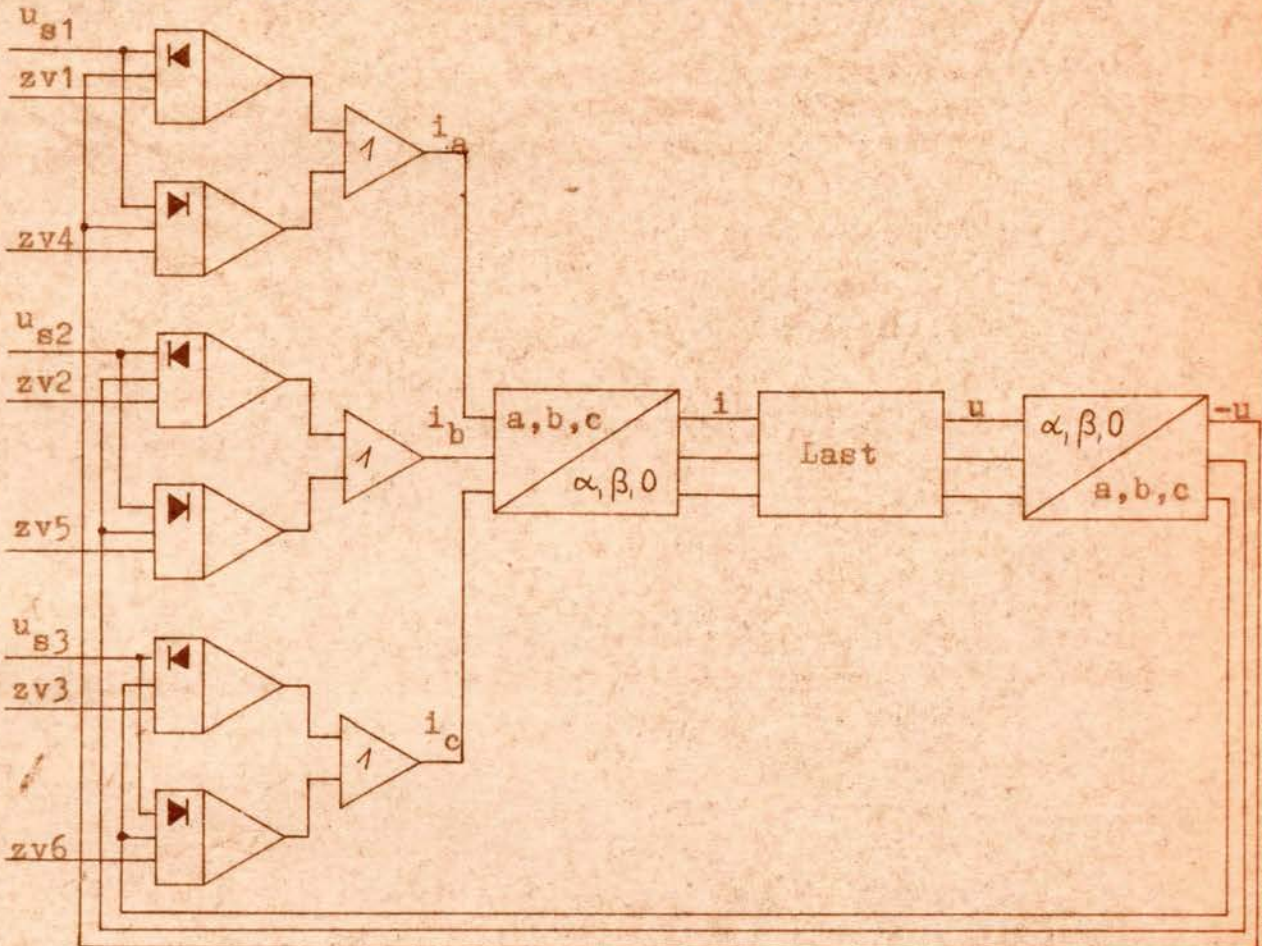


Abb.70

4.6. Realisierung von Stromunterbrechungen

Stromunterbrechungen lassen sich relativ günstig realisieren; wenn der Strom als Eingangsgröße für ein System vorhanden ist. Ein Leistungsschalter hat die Eigenschaft, den Wechselstrom im Nulldurchgang zu unterbrechen. Dies ist relativ einfach möglich, wie im Abschnitt 4.5. gezeigt wurde (der Drehstromsteller kann als Wechselstromschalter aufgefaßt werden).

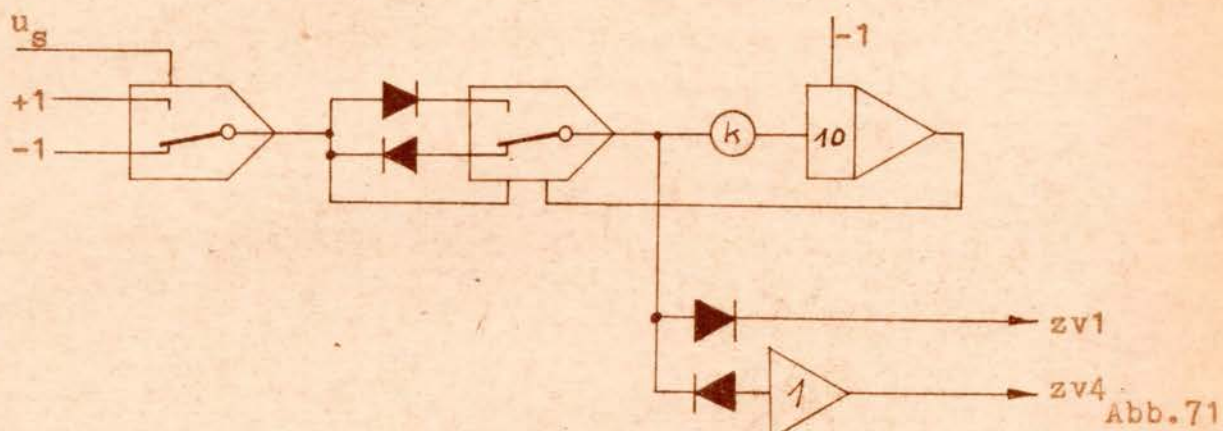
Bei Gleichströmen kann eine simulierte Abschaltung vorgenommen werden, wenn man die Stromanstiegsgeschwindigkeit als konstant oder irgendwie vorgegeben voraussetzt. Dann kann durch einen Integrator der Strom zu Null gemacht und dort gehalten werden.

4.7. Steuerschaltungen

Es ist mit Hilfe von Komparatoren möglich, die benötigten Steuerimpulse auf dem Analogrechner selbst zu erstellen. Die Einbeziehung des Stromes in die Impulse bereitet auf grund der begrenzten Zahl von Komparatoren Schwierigkeiten.

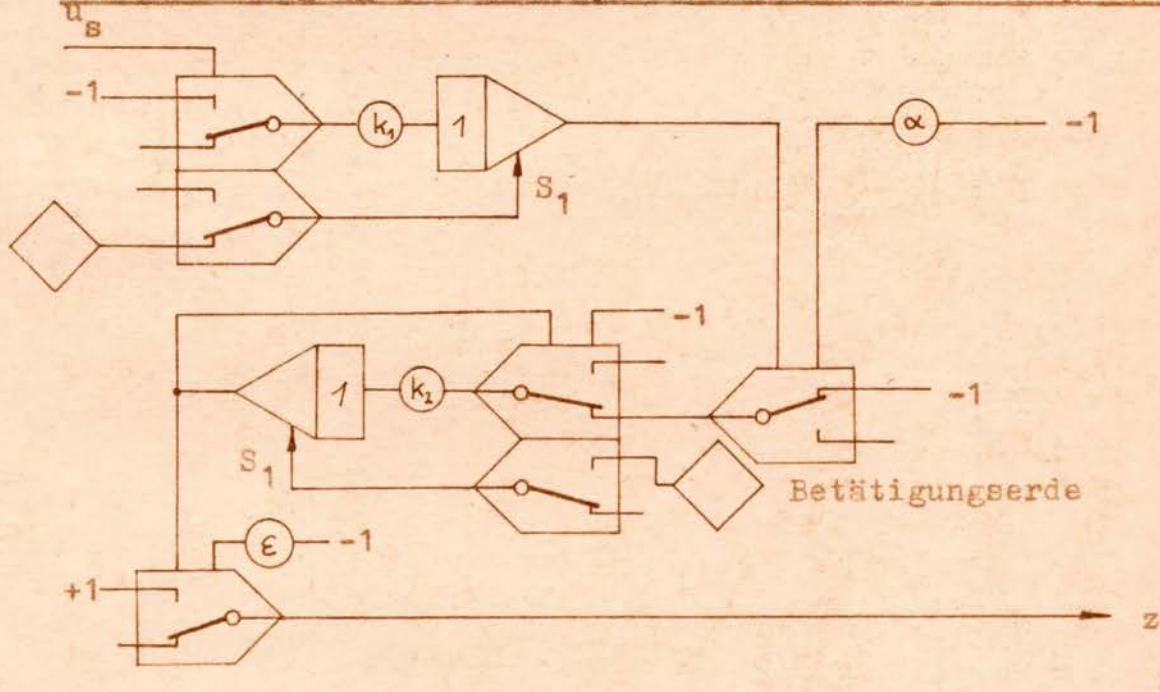
4.7.1. Erzeugung von Zündverzögerungsimpulsen (nach /15/)

Mit einem solchen Aufbau werden die Zündverzögerungsimpulse für



zwei, um 180° el. versetzt arbeitende Ventile erstellt.

4.7.2. Erzeugung von Zündimpulsen einstellbarer Länge (nach /15/)



5. Simulierte Störungen

Zur Rechnung stand ein transistorisierter Analogrechner MEDA 80 T der Firma Aritma, N.P., Praha zur Verfügung /20/ /21/. Für die hier durchgeführten Rechnungen wurde die Schaltung nach Abschnitt 4.3.1. außer bei den in den Diagrammen 1...3 dargestellten Vorgängen verwendet.

Die Dreipulsmittelpunktsschaltung ist als Grundbaustein für die

Drehstrombrückenschaltung zu betrachten und wurde deshalb verwendet. Die Schaltung hat den Vorteil, daß sie ohne Schwierigkeiten alle Betriebszustände des Stromrichters auch im Störfall exakt nachbildet.

Bei den Simulationen wurde im allgemeinen vom Normalbetrieb ausgegangen. Es wurde zwei Normalbetriebszustände eingeführt:

1. der ungesteuerte Betrieb
2. gesteuerter Betrieb mit einem Steuerwinkel $\alpha \approx 90^\circ$ el.

5.1. Bemerkungen zu den Diagrammen 1 ... 3

In Diagramm 1 wird eine Einpulsschaltung mit Komparator in Selbsthaltung entsprechend Abschnitt 2.2.1., nur ohne EMK-Rückführung, gezeigt. Die Zeitkonstante der Last ist

$$\tau = 0,53 \frac{1}{f}.$$

Diagramm 2 zeigt den Anlauf einer unbelasteten Gleichstromnebenschlußmaschine mit Fremderregung nach Abb.14 wiederum mit Komparator in Selbsthaltung.

$$\tau_a = 0,354 \frac{1}{f}$$

$$\tau_M = 3,98 \frac{1}{f}.$$

Diagramm 3 zeigt die versuchsweise Simulation eines Durchbruches mit Hilfe des "Schnörr"-Integrators. Deutlich sind die großen, die Brauchbarkeit der Schaltung fragwürdig machenden, "Restströme" zu sehen.

5.2. Ungestörter Betrieb der Dreipulsmittelpunktsschaltung

In Diagramm 4 ist ein Sechphasensystem mit Zündverzögerungsimpulsen, die mit der in Abschnitt 4.7.1. beschriebenen Schaltung erzeugt wurden, dargestellt.

Den Anlauf einer unbelasteten Gleichstrommaschine mit typisch schwingenden Verhalten an einem Dreipulsstromrichter zeigt Diagramm 5.

$$\tau_a = 63,8 \frac{1}{f},$$

$$\tau_M = 128 \frac{1}{f},$$

$$L_k = \frac{u_B}{i_B \cdot \omega_0},$$

$$L_{G1} = 20 L_k.$$

In Diagramm 6 ist der eingeschwungene Zustand einer im Nennbetrieb laufenden Gleichstrommaschine zu sehen. Der Steuerwinkel α ist Null. Sämtliche, nun folgenden Zahlenangaben sind auf

dieses Diagramm bezogen:

$$\tau_a = 3,18 \frac{1}{f}$$

$$\tau_M = 15,9 \frac{1}{f}$$

$$R = 0,5 \frac{u_B}{i_B}$$

$$L_k = \frac{u_B}{i_B \cdot \omega_o}$$

$$L = 10 L_k$$

$$\frac{k \phi}{J} = 0,005 \frac{\omega_B \omega_o}{i_B}$$

$$k \phi = \frac{\omega_B}{u_B}$$

$$m_{wN} = 0,4 J \omega_B \omega_o .$$

Die Nenndrehzahl des Motors ist

$$\Omega_N = 0,385 \omega_B .$$

bei einer Nennspannung von

$$U_N = 0,713 u_B .$$

Der Nennstrom ist

$$I_N = 0,55 i_B .$$

Demzufolge ist der Ventilstrommittelwert

$$I_{va} = 0,183 i_B .$$

Daraus ergibt sich der Formfaktor zu

$$f = I_{ve} / I_{va} = 1,51$$

mit einem Effektivwert des Ventilstromes (gemessen) von

$$I_{ve} = 0,276 i_B .$$

Der Spitzenwert des Ventilstromes ist

$$I_{vm} = 0,6 i_B .$$

Das Belastungsverhältnis des Ventiles ergibt sich zu

$$I_{vm} / I_{va} = 3,28 .$$

Auf die Berechnung spezieller Zahlen wurde verzichtet, um möglichst allgemeine Werte zu erhalten.

Diagramm 7 zeigt den eingeschwungenen Zustand für den gesteuerten Betrieb. Die Motorkonstanten sind die gleichen wie im

vorhergehenden Diagramm. Nur das belastende Moment wurde auf den Wert

$$m_w = 0,2 J \omega_B \omega_0$$

gesenkt. Die Drehzahl des Motors ist

$$\Omega = 0,047 \omega_B .$$

Der Strom durch den Motor hat die Größe

$$I = 0,247 i_B .$$

Die anderen Ströme ergeben sich zu

$$I_{va} = 0,082 i_B ,$$

$$I_{ve} = 0,126 i_B \text{ und}$$

$$I_{vm} = 0,418 i_B .$$

Demzufolge ergeben sich die Faktoren zu

$$f = 1,54 \text{ und}$$

$$I_{vm} / I_{va} = 5,11 .$$

Die ungünstigeren Faktoren sind auf die größere Welligkeit des Stromes zurückzuführen.

5.3. Durchbruch von Ventilen

Die Verhältnisse beim Durchbruch eines Ventile zeigt das Diagramm 8. Der Durchbruch wurde durch Abschalten der Zündverzögerungsimpulse, Auftrennen der Bienenrückführung und Umschalten der

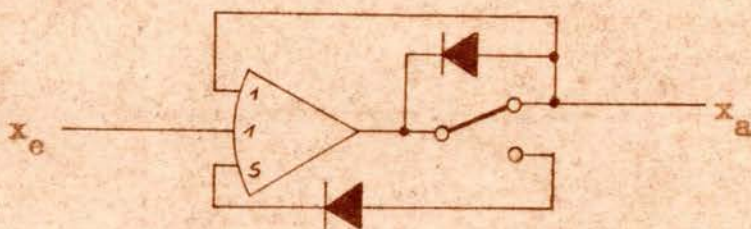


Abb.73

idealen Diode entsprechend Abb.73 realisiert.

Die Belastung der nicht defekten Ventile ergibt sich zu

$$I_{va} = 0,933 i_B ,$$

$$I_{ve} = 1,17 i_B \text{ und}$$

$$I_{vm} = 2,00 i_B .$$

Die Faktoren folgen daraus zu

$$f = 1,25 ,$$

$$I_{vm} / I_{va} = 2,12 ,$$

$$\int_0^T i dt = 5,87 \frac{1}{\omega_0} \cdot i_B \text{ und}$$

$$\int_0^T i^2 dt = 8,62 \frac{1}{\omega_0} i_B^2$$

Die Belastungsfaktoren sind unabhängig vom Durchbruchswinkel. Im gesteuerten Betrieb sind die auftretenden Belastungen geringer:

$$I_{va} = 0,4 i_B$$

$$I_{ve} = 0,526 i_B$$

$$I_{vm} = 1,88 i_B$$

$$f = 1,47$$

$$I_{vm} / I_{va} = 4,7$$

$$\int_0^T i dt = 2,52 \frac{1}{\omega_0} i_B$$

$$\int_0^T i^2 dt = 2,17 \frac{1}{\omega_0} i_B^2 \quad (\text{Diagramm 9})$$

Die Verhältnisse beim gleichzeitigen Durchbruch von zwei Ventilen zeigt Diagramm 10. Die Belastungsfaktoren des ungestörten Ventiles sind

$$\int_{T_0}^T i dt = 6,68 \frac{1}{\omega_0} i_B$$

$$\int_0^T i^2 dt = 10,3 \frac{1}{\omega_0} i_B^2 \quad \text{und}$$

$$I_{vm} = 1,67 i_B$$

Auch diese Werte sind vom Durchbruchswinkel unabhängig.

Diagramm 11 verdeutlicht die Verhältnisse beim gleichzeitigen Durchbruch aller drei Ventile.

5.4. Ausfall der Zündfähigkeit von Ventilen

Fließt durch ein Ventil kein Strom, so ergeben sich die Verhältnisse von Diagramm 12.

$$I_{va} = 0,203 i_B$$

$$I_{ve} = 0,244 i_B$$

$$I_{vm} = 0,425 i_B$$

$$f = 1,20$$

$$I_{vm} / I_{va} = 2,09$$

Diagramm 13 zeigt den Zustand im gesteuerten Betrieb.

Im Diagramm 14 fallen die Zündimpulse von zwei Ventilen aus.

Hier beginnt der Strom zu lücken, weil der Stromrichter in Einpulsbetrieb übergeht.

5.5. Netzspannungssprung

Die Diagramme 15 ... 17 verdeutlichen die Übergangsvorgänge bei Netzspannungssprüngen. Wie zu erwarten treten trotz Verdopplung der Netzspannung wesentliche Überströme nicht auf.

5.6. Lastsprung

Diagramm 18 zeigt den Vorgang eines Lastsprunges auf das 5,88fache Nennmoment. Durch das Absinken der Drehzahl und damit verbunden, der EMK des Motors, steigt der Strom durch den Motor an.

5.7. Äußere Kurzschlüsse

Diagramm 19 zeigt die Verhältnisse beim Klemmenkurzschluß des speisenden Stromrichters. Die Belastung der Ventile ist

$$\begin{aligned} \int_0^T i dt &= 6,98 \frac{1}{\omega_o} i_B \\ \int_0^T i^2 dt &= 10,5 \frac{1}{\omega_o} i_B^2 \\ I_{vm} &= 3,12 i_B. \end{aligned}$$

Die Diagramme 20 und 21 zeigen einen Kurzschluß hinter der Glättungsdrossel. Nach Erreichung des eingeschwungenen Zustandes sind die Belastungswerte denen des Klemmenkurzschlusses gleich, da der Strom durch die Glättungsdrossel annähernd konstant ist. Der Gesamtkurzschlußstrom erreicht die Größe

$$I_k = 2,88 i_B.$$

5.8. Netzausfälle

Die Diagramme 22 ... 24 zeigen die Verhältnisse bei kurz- und langzeitigen, ein- und zweiphasigen Netzausfällen. Es gelten die in Abschnitt 3.5. gemachten Bemerkungen.

5.9. Gegenüberstellung

In Form einer Tabelle sollen die kritischen Fälle einander gegenübergestellt werden.

	I_{vm}/i_B	$\int_0^T i dt / \frac{\omega_o}{i_B}$	$\int_0^T i^2 dt / \frac{\omega_o}{i_B^2}$
Durchbruch eines Ventils	2,00	5,87	8,62
Durchbruch von zwei Ventilen	1,67	6,68	10,3
Kurzschluß	1,98	6,98	10,5
Normalbetrieb	0,6	1,15	0,48

5.10. Diskussion der Eignung der verschiedenen Stromrichtermodelle zur Simulation von Störungen

Wie aus den Diagrammen ersichtlich ist der "Schnörr"-Integrator zur Simulation von Störungen ganz hervorragend geeignet. Dasselbe läßt sich von der Stromrichtersimulation durch iterative Lösung von Dgl.-Systemen auch sagen. Die Stromrichtersimulation durch Nachbildung der Spannungskurvenform dürfte m.E. Schwierigkeiten bei der Nachbildung der Störungen machen. Hier wird i.a. der Spannungsabfall über den Kommutierungsinduktivitäten, so auch in /6/, vernachlässigt, welcher gerade im Störfall das Verhalten maßgeblich beeinflusst. Auch müssen zur Aufstellung des Rückwirkungsprogrammes die Verhältnisse während der Störung schon genauer bekannt sein, deren Erarbeitung aber nicht geringe Schwierigkeiten bereitet.

6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden verschiedene Möglichkeiten zur Simulation von netzgelöschten Stromrichterschaltungen und deren Störungen diskutiert. Dabei wird die prinzipielle Verwendbarkeit sowohl des Digitalrechners als auch des Analogrechners nachgewiesen.

Beim Digitalrechner bieten sich drei verschiedene Simulationsmöglichkeiten an:

1. Vorausberechnung der Ströme
2. iterative Lösung von Differentialgleichungssystemen
3. spezielle Fehlerprogramme

Der Analogrechner erlaubt fünf verschiedene Varianten:

1. direkte Nachbildung der Ventileigenschaften
2. Verwendung des "Schnörr"-Integrators
3. Verwendung von gesteuerten Integratoren
4. iterative Lösung von Differentialgleichungssystemen
5. Nachbildung der Spannungskurvenform

Nicht alle Simulationsmöglichkeiten entsprechen den Bedingungen, die zur Simulation von Störungen an sie gestellt werden müssen. So ist das Verfahren 5 auf dem Analogrechner dazu nur unter ganz bestimmten Bedingungen geeignet.

Hauptgesichtspunkte für die Verwendung der einen oder der anderen Möglichkeit sind die geforderte Genauigkeit und ökonomische Fragen.

Die billigste und zugleich die mit dem größten Fehler behaftete Möglichkeit ist die Verwendung des "Schnörr"-Integrators. Hier ist der Aufwand für Programmierung und Rechenzeit am niedrigsten. Die erreichbare Genauigkeit liegt, bedingt durch die Verwendung von Differenziergliedern, bei 2%.

Den größten Aufwand für die Erstellung des Programms und etwa gleichen Rechenzeitbedarf wie das vorher beschriebene Verfahren erfordert der festverdrahtete Digitalzusatz. Die Schaltung nutzt die zur Verfügung stehende Rechengenauigkeit des Analogrechners voll aus.

Einen mittleren Aufwand zur Erstellung des Programms und einen sehr hohen Aufwand zur laufenden Rechnung erfordert das digitale Verfahren 2. Die erreichbare Genauigkeit hängt weitgehend von der Schrittweite und damit von der Rechenzeit ab.

Unter den gegebenen Umständen erscheint es als zweckmäßig, einen verdrahtungsprogrammierten Digitalzusatz zum Analogrechner trotz

des erheblich erscheinenden Aufwandes zu erstellen. Er vereint die Vorteile des Digitalrechners mit dem Analogrechner zumindestens teilweise.

Es werden Schaltungsvorschläge zur Simulation einiger netzgelöschter Schaltungen gemacht.

Nach einigen qualitativen Bemerkungen werden die Störungsfälle

1. Ventildurchbruch
2. Zündimpulsausfall
3. Netzspannungssprung
4. Lastsprung
5. Äußere Kurzschlüsse
6. Netzausfall

für Gleichrichterbetrieb näher untersucht. Dabei wird herausgestellt, daß die Fälle 1 und 5, wie zu erwarten, die größten Belastungen hervorrufen.

Ein Betrieb mit gestörten Ventilen ist u.U. möglich. Interessant in diesem Zusammenhang dürften Fälle mit Parallelschaltung von Ventilen sein.

Zur Untersuchung sind noch Fälle mit Regelung zu empfehlen, wobei hier Störungen, wie Ausfall der Strombegrenzung denkbar sind. Weiterhin sind vom Wechselrichterbetrieb interessante Ergebnisse zu erwarten. Gerade in bezug auf Störsicherheit könnte hier einiges erreicht werden, was in Hinblick auf die untersynchrone Stromrichter-kaskade interessiert.

Das Betriebsverhalten einer mit einem Drehstromsteller gesteuerten Asynchronmaschine läßt sich vorteilhaft mit Hilfe des "Schnörr"-Integrators untersuchen.

7. Formelzeichenverzeichnis

7.1. Formelzeichen

C	Konstante	u	Spannungsaugenblicks-
E	EMK		wert
f	Formfaktor	u	Überlappungswinkel
i	Stromaugenblickswert	U	Spannung
I	Strom	z	Zündimpuls
J	Trägheitsmoment	zv	Zündverzögerungsimpuls
k	Maschinenkonstante	α	Steuerwinkel
L	Induktivität	ε	Steuerwinkelbreite
m	Moment	δ	bezogene Zeit
M	Induktivität	λ	Stromflußwinkel
N	Induktivität	π	Konstante
R	Widerstand	τ	Zeitkonstante
stib	Steuerimpulsbreite	φ	Phasenwinkel
S	Steuersignale	ϕ	Fluß
S	Widerstand	ω	Kreisfrequenz
t	Zeit	ω	Winkelgeschwindigkeit
T	Widerstand	Ω	Winkelgeschwindigkeit

Die in den ALGOL-Programmen enthaltenden Formelzeichen entsprechen den normalen, nur daß sie mit hochgestellten Indizes geschrieben werden. Griechische Buchstaben werden durch ihre deutsche Bezeichnung ersetzt. Unabhängig davon wurden noch einige Hilfsgrößen vereinbart.

7.2. Indizesverzeichnis

a	Anfangswert	i	ideeler Wert
a	arithmetisches Mittel	k	Kommutierungs-
a...k	allgemeine Parameter	l	Last-
B	Bezugsgröße	m	Maximalwert
d	Gleichgröße	s	Stern-
d	eingeschwungen	v	Ventil-
e	Effektivwert	w	Widerstands-
f	flüchtig	o	im Zeitpunkt 0
g	Gleichgröße	o	Leerlauf

8. Quellenverzeichnis

- /1/ Hoffmann, Stocker: Thyristor-Handbuch
SIEMENS-Aktiengesellschaft Berlin, Erlangen 1965
- /2/ Möltgen: Thyristoren in der technischen Anwendung
Band 2: Netzgeführte Stromrichter
SIEMENS-Aktiengesellschaft Berlin, Erlangen 1967
- /3/ Lappe: Stromrichter
VEB Verlag Technik Berlin 1967
- /4/ Lappe, u.a.: Thyristor-Stromrichter für Antriebsregelungen
VEB Verlag Technik Berlin 1970
- /5/ Heumann, Stumpe: Thyristoren
B. G. Teubner Stuttgart 1969
- /6/ Büchner: Methoden zur analogen Simulation von Stromrichter-
stellgliedern
zur Veröffentlichung vorbereitetes Manuskript
- /7/ Ralston, Wilf: Mathematische Methoden für Digitalrechner
R. Oldenbourg Verlag München-Wien 1967
- /8/ Schulze-Buxloh: Die Stromspannungsverhältnisse eines
Gleichrichters in Drehstrombrückenschaltung
Dissertation Technische Universität Berlin 1960
- /9/ Pfotenhauer: Digitale Berechnung von Kurzschlußströmen in
Stromrichteranlagen in Drehstrombrückenschaltung
Elektrie Heft 6 (1968)
- /10/ Kronberg, Stribling: Simulation und Berechnung von Schal-
tungen der Leistungselektronik auf dem Analogrechner
XXIV. Kolloquium der Sektion Automatisierungstechnik
der TH Karl-Marx-Stadt 23. Juni 1970
- /11/ Bachmann: ALGOL-Programmierung mit Variante für Robotron300
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1969

- /12/ Schnörr: Strom-Spannungstheorie von Sechspuls-Stromrichtern
bei beliebiger Verteilung der Reaktanzen
Dissertation Technische Hochschule Karlsruhe 1962
- /13/ Sydow: Numerische Analysis des Hybridrechnens
VEB Verlag Technik Berlin 1970
- /14/ Bub: Hybrid-Rechenanlagen
elektronische datenverarbeitung Heft 1/1966 8.Jahrg.
- /15/ Büchner: unveröffentlichtes Manuskript
- /16/ Leonhard: Digitalrechner-Untersuchung dynamischer Vorgänge
bei der Gleichstromkopplung von Drehstromnetzen
Elektrotechnische Zeitschrift Ausgabe A 91.Jahrgang
Heft 2 Februar 1970
- /17/ Bub: Das hybride Rechnersystem EAI 8900
elektronische datenverarbeitung Heft 1/1966 8.Jahrg.
- /18/ Roth, Reif, Reschke: programmbibliothek für elektronische
analogrechner
Technische Hochschule Ilmenau 1968
- /19/ Schwarz: Einige Betrachtungen zur Anwendung eines halb-
gesteuerten (dreipulsigen) Drehstromstellers
E-Mitteilung Nr. 36/233/70 VEB Kombinat Elektropro-
jekt und Anlagenbau Berlin 16. Januar 1970
- /20/ Valenta, Škoor, Kotva: Programmierung und Lösung von Auf-
gaben auf den transistorisierten Analogrechnern
MEDA-T
Aritma, N.P., Praha Bratislava 1967
- /21/ Biener, Suschke: Praxis des analogen Rechnens
Reihe Automatisierungstechnik Band 91
VEB Verlag Technik Berlin 1969

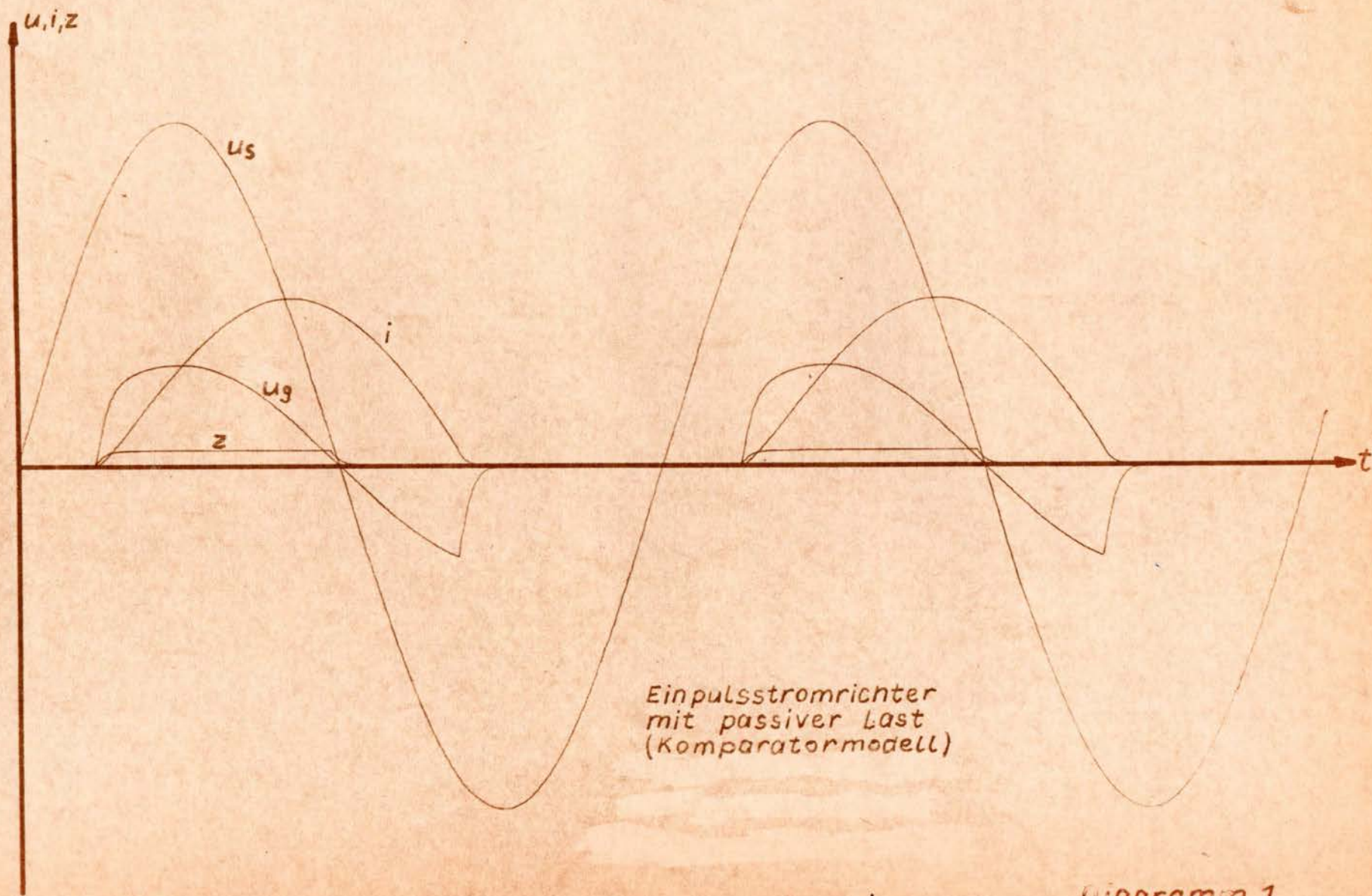
- /22/ Anschütz: Stromrichteranlagen der Starkstromtechnik
Springer-Verlag Berlin 1963
- /23/ anonym: Richtlinie für die Berechnung von Kurzschlußströmen
in stromrichtergespeisten Gleichstrom-Anlagen
Teil III: Äußerer Gleichstromkurzschluß in Strom-
richteranlagen in Drehstrombrückenschaltung
TE-Mitteilung 35/155/68 und
TB 0494/68 Beilage 3
- /24/ anonym: Symbolik des hybriden Analogrechnens
Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt
Sektion Automatisierungstechnik
Bereich Technische Kybernetik
Institut für Regelungstechnik Berlin
Bereich Organisations- und Rechentechnik
- /25/ Wasserab: Schaltungslehre der Starkstromtechnik
Springer-Verlag Berlin 1965
- /26/ Michel: Die Strom- und Spannungsverhältnisse bei der
Steuerung von Drehstromlasten über antiparallele
Ventile
Dissertation Technische Universität Berlin 1966
- /27/ Neumann: Betriebsverhalten der frequenzgesteuerten
Drehstromasynchronmaschine bei eingepprägtem
Ständerstrom
Diplom-Arbeit Technische Universität Dresden 1969
- /28/ Büchner: Theoretische Analyse und Simulation des Systems
indirekter Drehstromumrichter - Last
Dissertation Technische Universität Dresden 1968

Beilage A

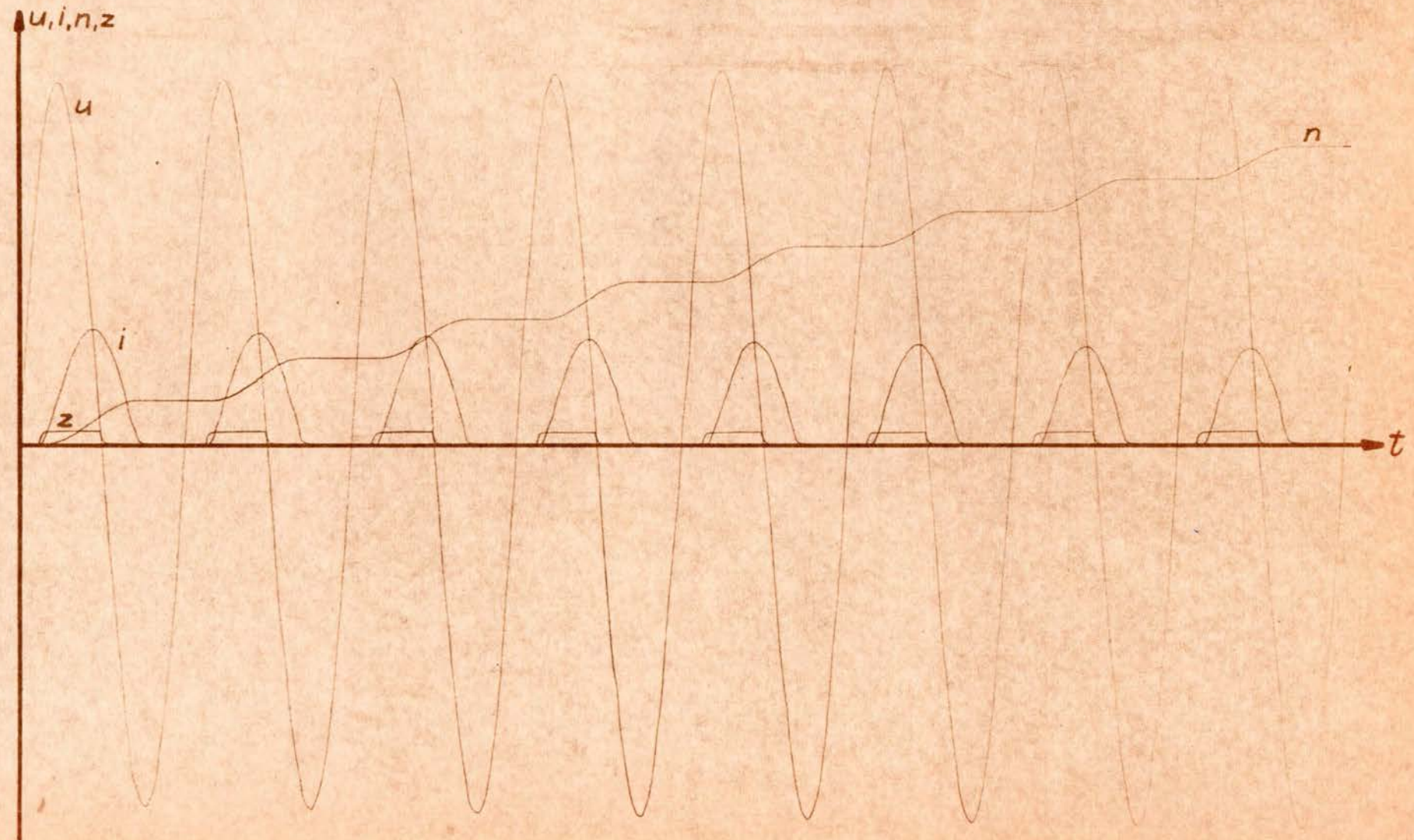
Beilage A: Diagramme

Inhaltsverzeichnis:

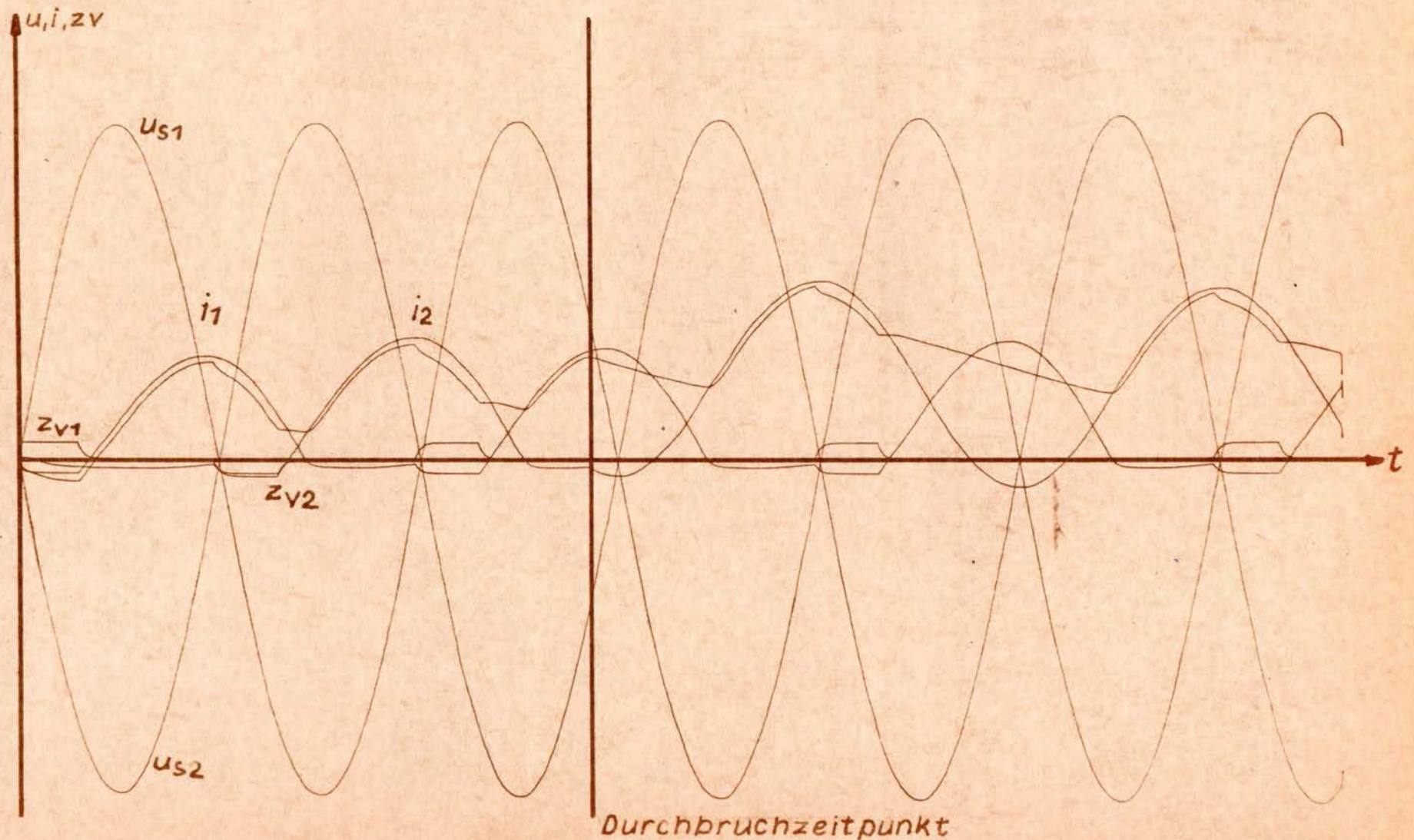
- Diagramm 1: Einpulsstromrichter mit passiver Last
(Komparatormodell)
- Diagramm 2: Einpulsstromrichter (Komparatormodell) mit
Motorlast (Leerlauf)
- Diagramm 3: Zweipulsmittelpunktsschaltung mit "Schnörr"-
Integrator Durchbruch eines Ventils
- Diagramm 4: Sechphasensystem mit Zündverzögerungsimpulsen
- Diagramm 5: Anlauf einer leerlaufenden Maschine an einem
Dreipulsstromrichter
- Diagramm 6: Definierter Nennbetrieb ungesteuert
- Diagramm 7: eingeschwungener Zustand gesteuerter Betrieb $\alpha \approx 90^\circ$
- Diagramm 8: Durchbruch eines Ventils
- Diagramm 9: Durchbruch eines Ventils (gesteuerter Betrieb)
- Diagramm 10: Durchbruch von zwei Ventilen
- Diagramm 11: Dreifacher Durchbruch
- Diagramm 12: Verlust der Zündfähigkeit eines Ventils
- Diagramm 13: Ausfall der Zündimpulse eines Ventils
- Diagramm 14: Zündimpulsausfall von zwei Ventilen
- Diagramm 15: Netzspannungssprung (dreiphasig)
- Diagramm 16: zweiphasiger Netzspannungssprung
- Diagramm 17: einphasiger Netzspannungssprung
- Diagramm 18: Lastsprung
- Diagramm 19: Klemmenkurzschluß des speisenden Gleichrichters
- Diagramm 20: Kurzschluß hinter Glättungs-drossel
- Diagramm 21: Kurzschluß hinter der Glättungs-drossel
eingeschwungener Zustand
- Diagramm 22: ein- und zweiphasiger kurzzeitiger
Netzspannungsausfall
- Diagramm 23: einphasiger Netzausfall
- Diagramm 24: zweiphasiger Netzausfall



Einpulsstromrichter (Kompara-
tormodell) mit Motorlast
(Leerlauf)

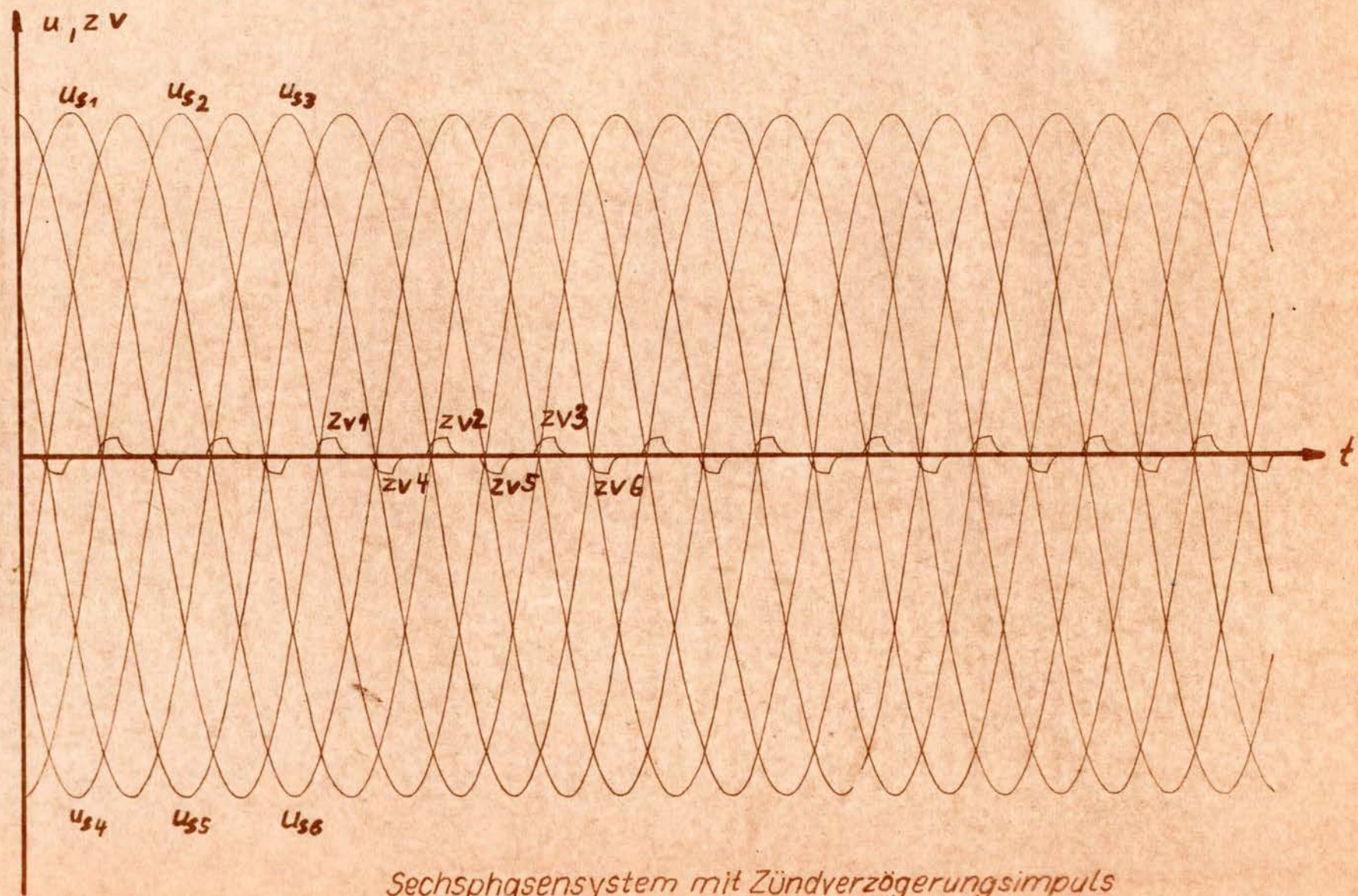


Zweipuls-Mittelpunktschaltung mit „Schnörr“-Integrator



Durchbruch eines Ventils

Diagramm 3



Sechsphasensystem mit Zündverzögerungsimpuls

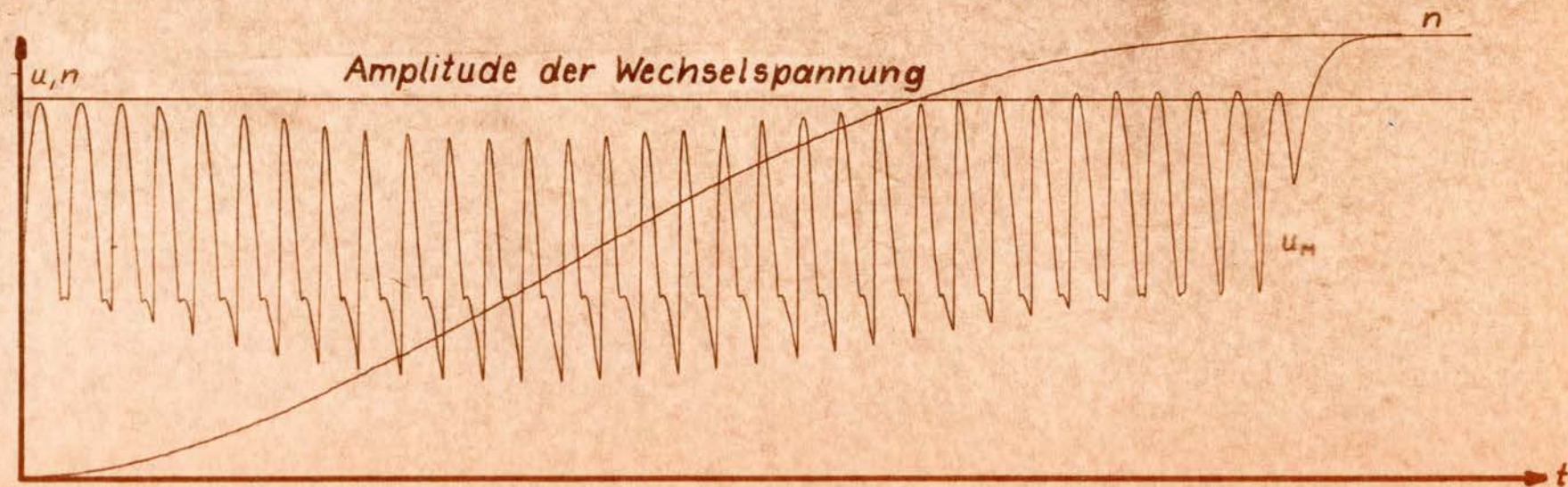
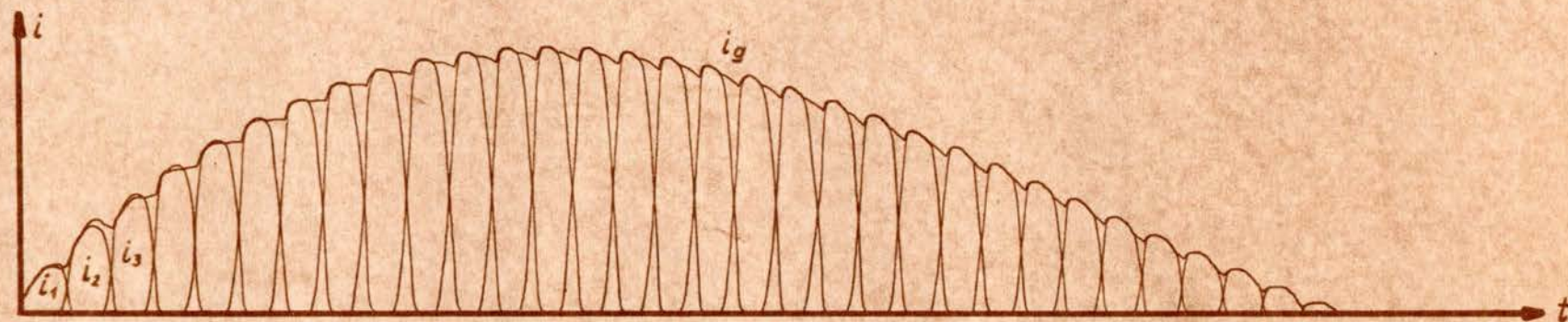
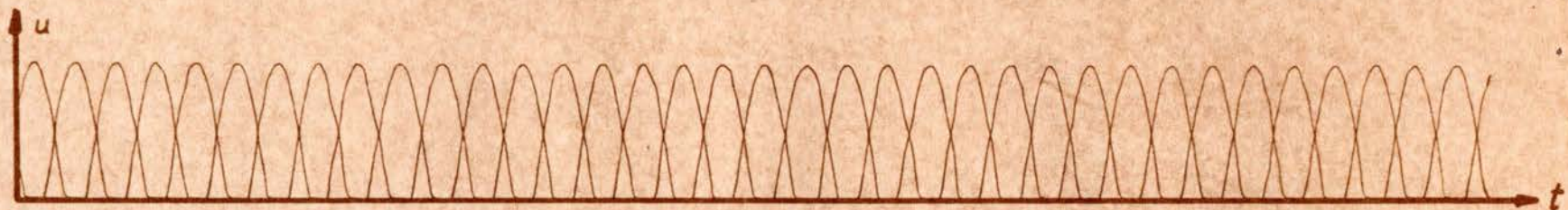


Diagramm 5

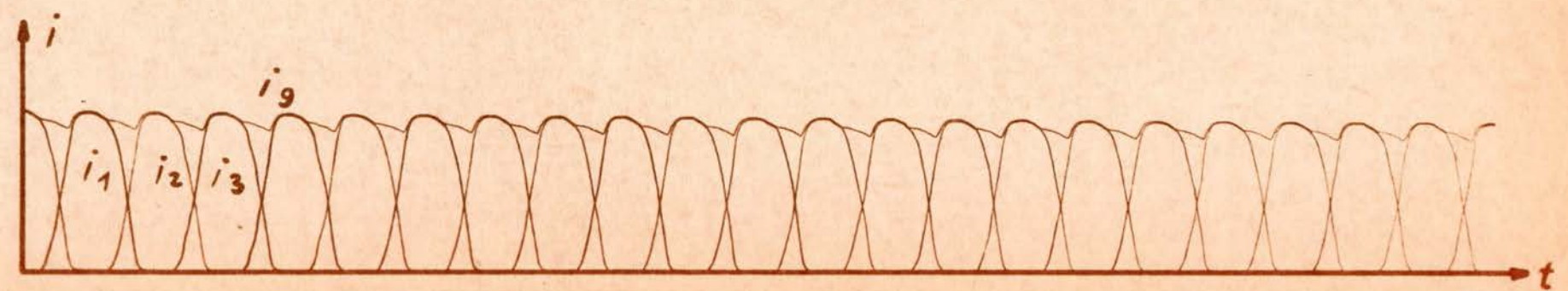
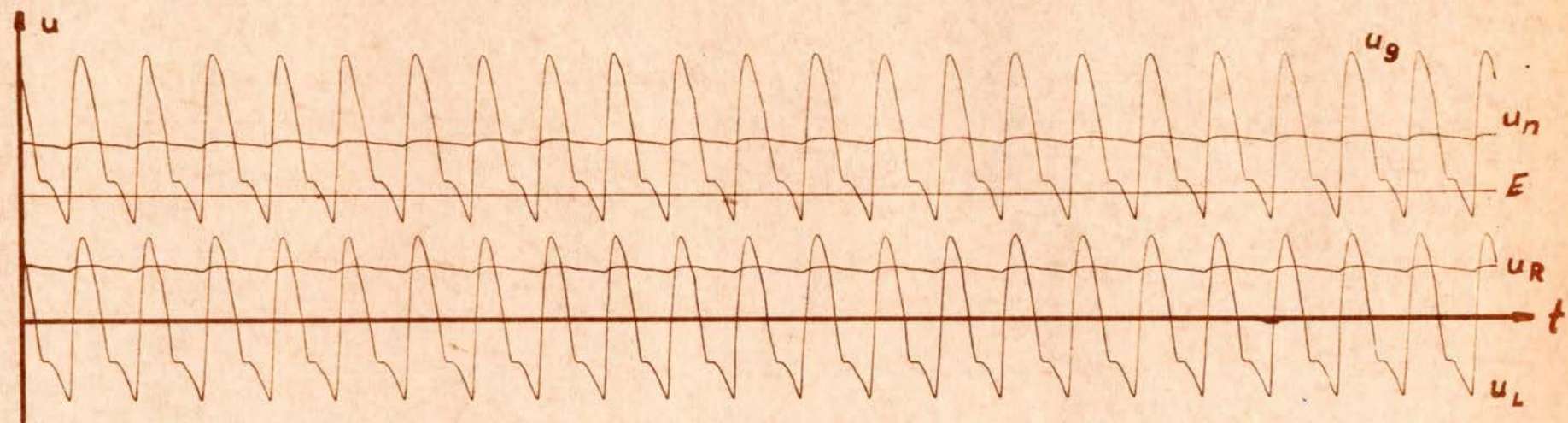
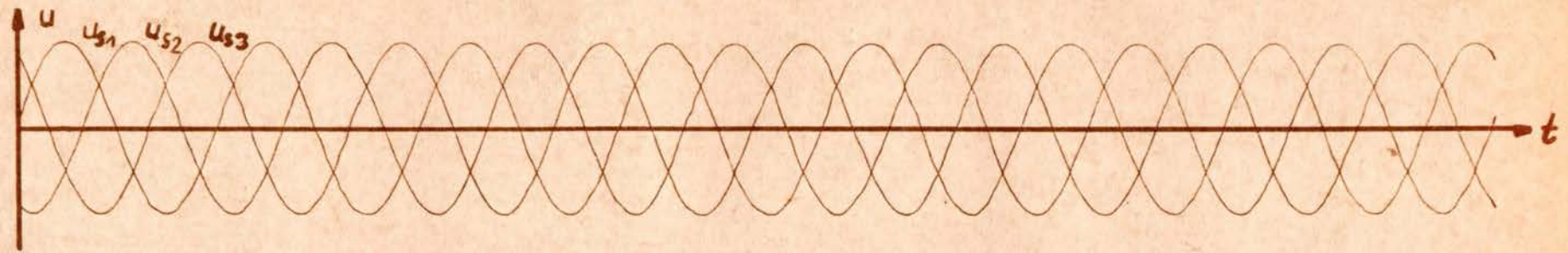
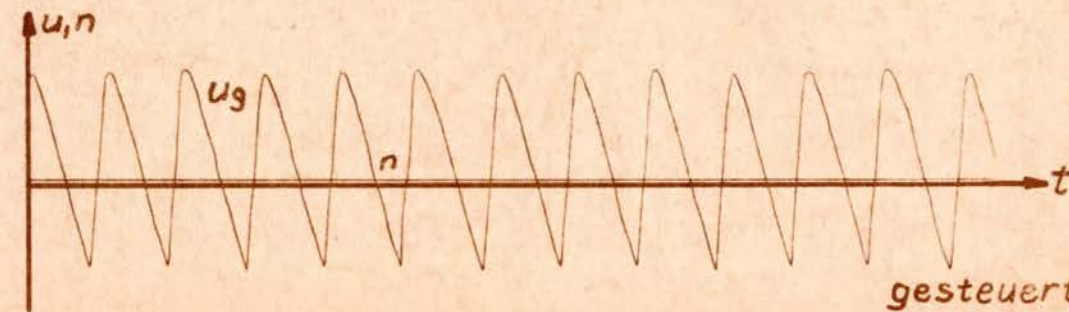
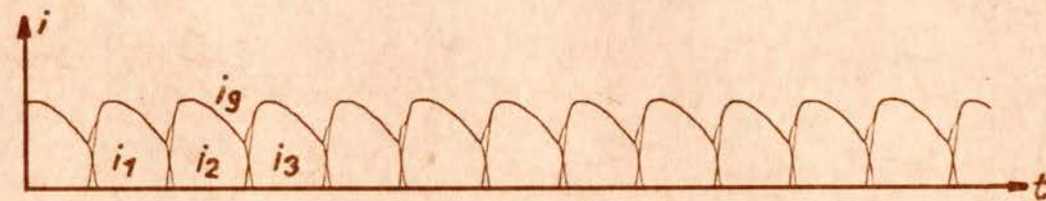
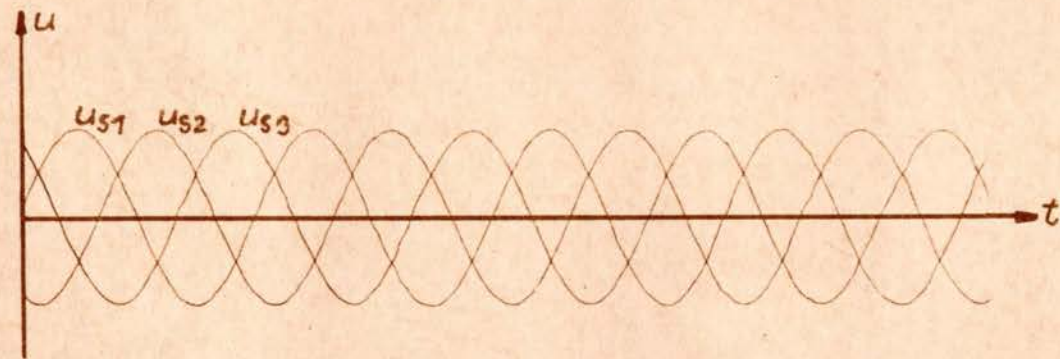


Diagramm 6



$\angle \approx 90^\circ \text{el.}$
gesteuerter Betrieb

eingeschwungener Zustand

Diagramm 7

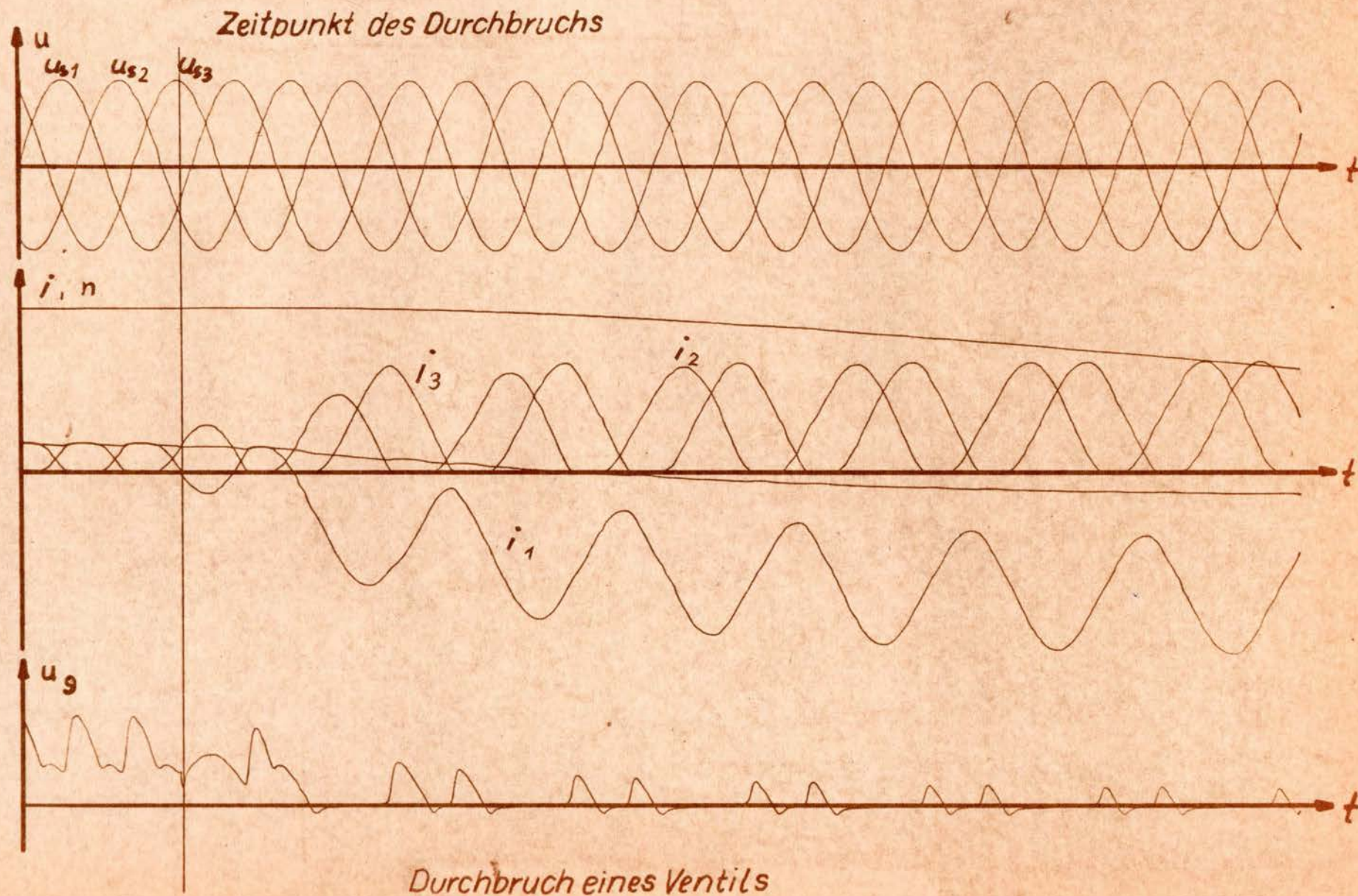
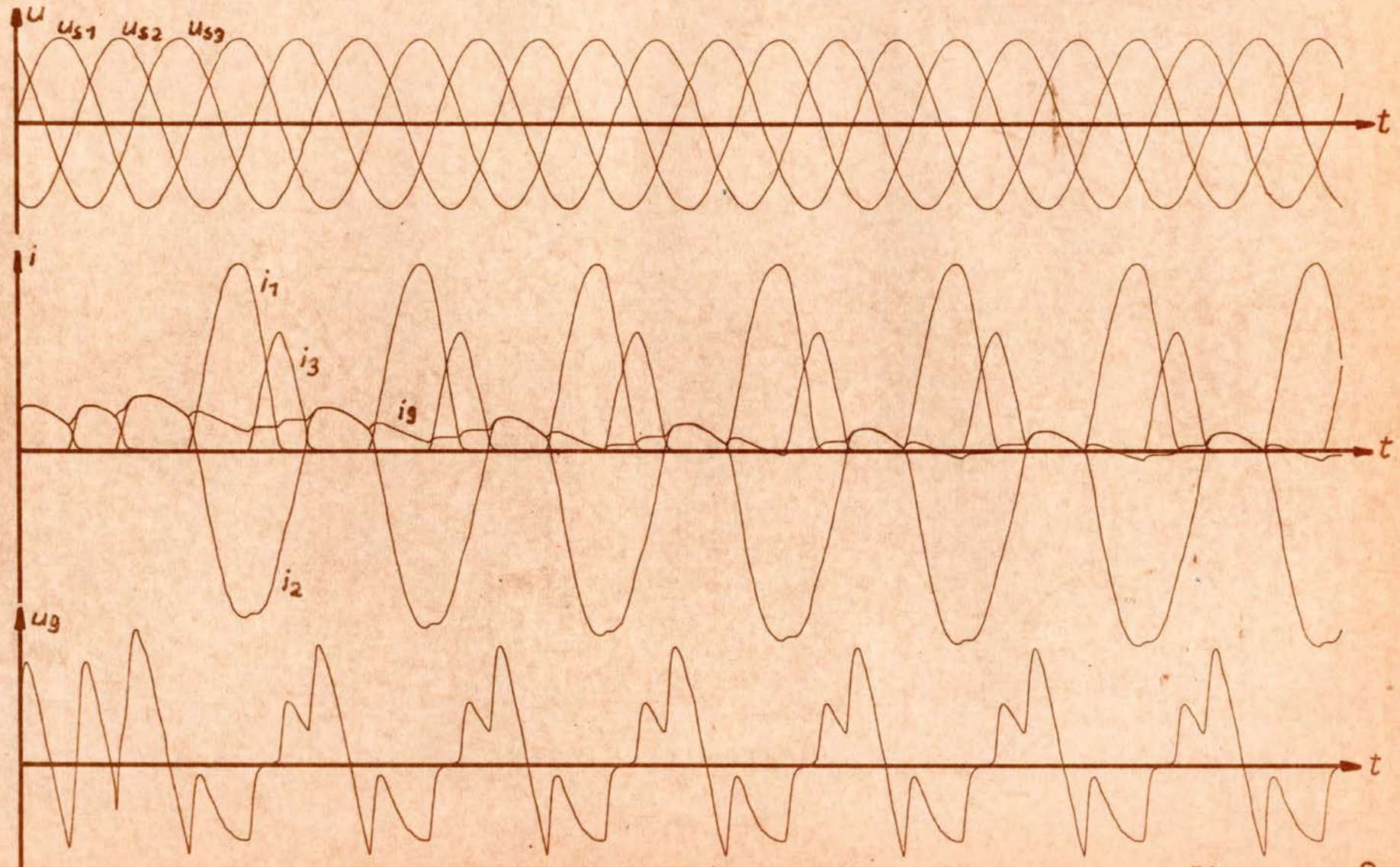


Diagramm 8

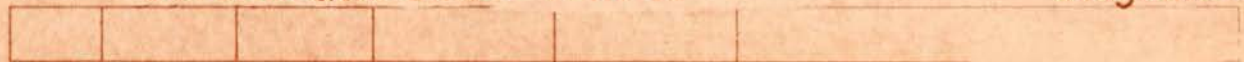
gesteuerter Betrieb

$\alpha \approx 90^\circ \text{el.}$

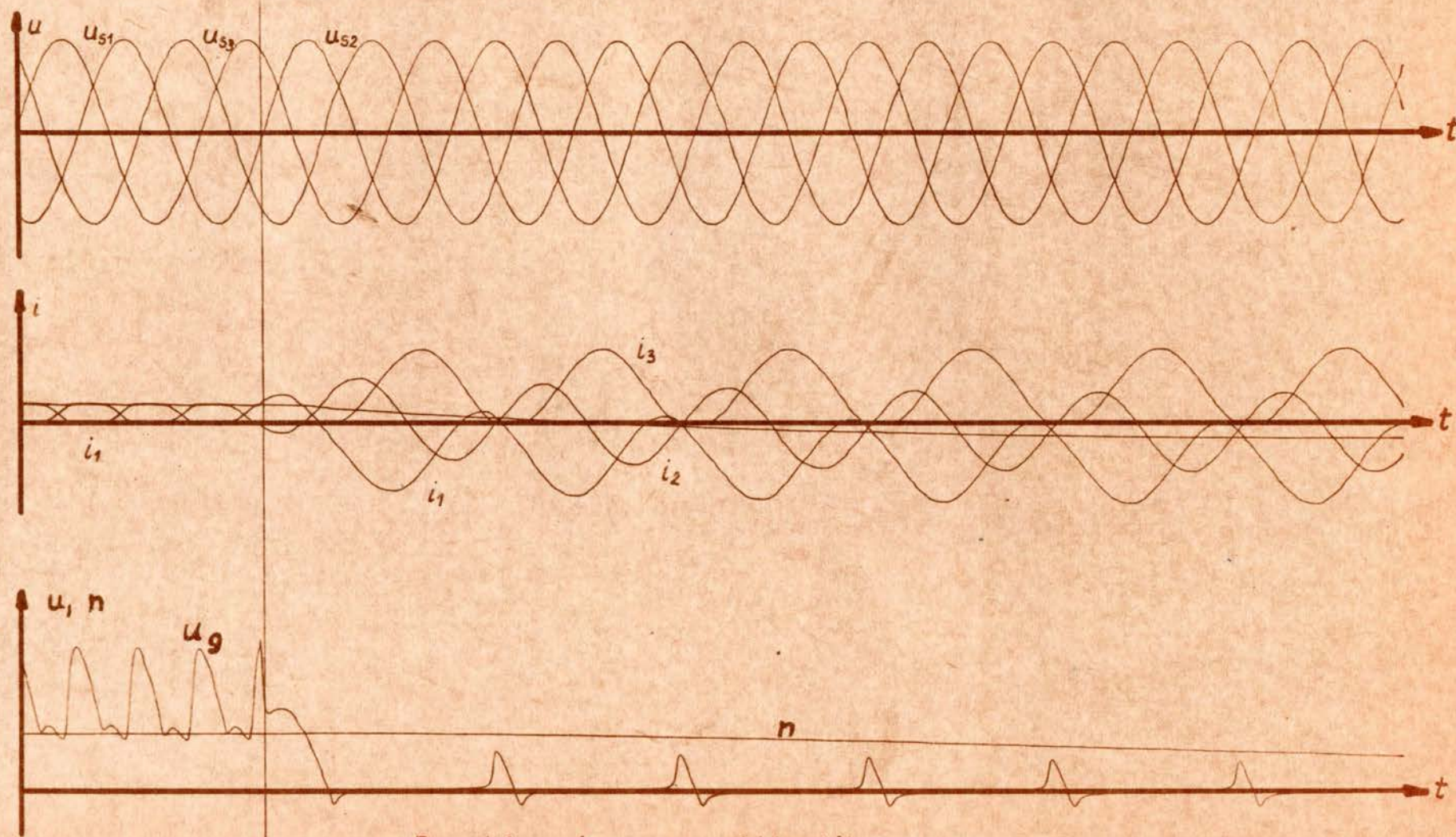


Durchbruch eines Ventils

Diagramm 9



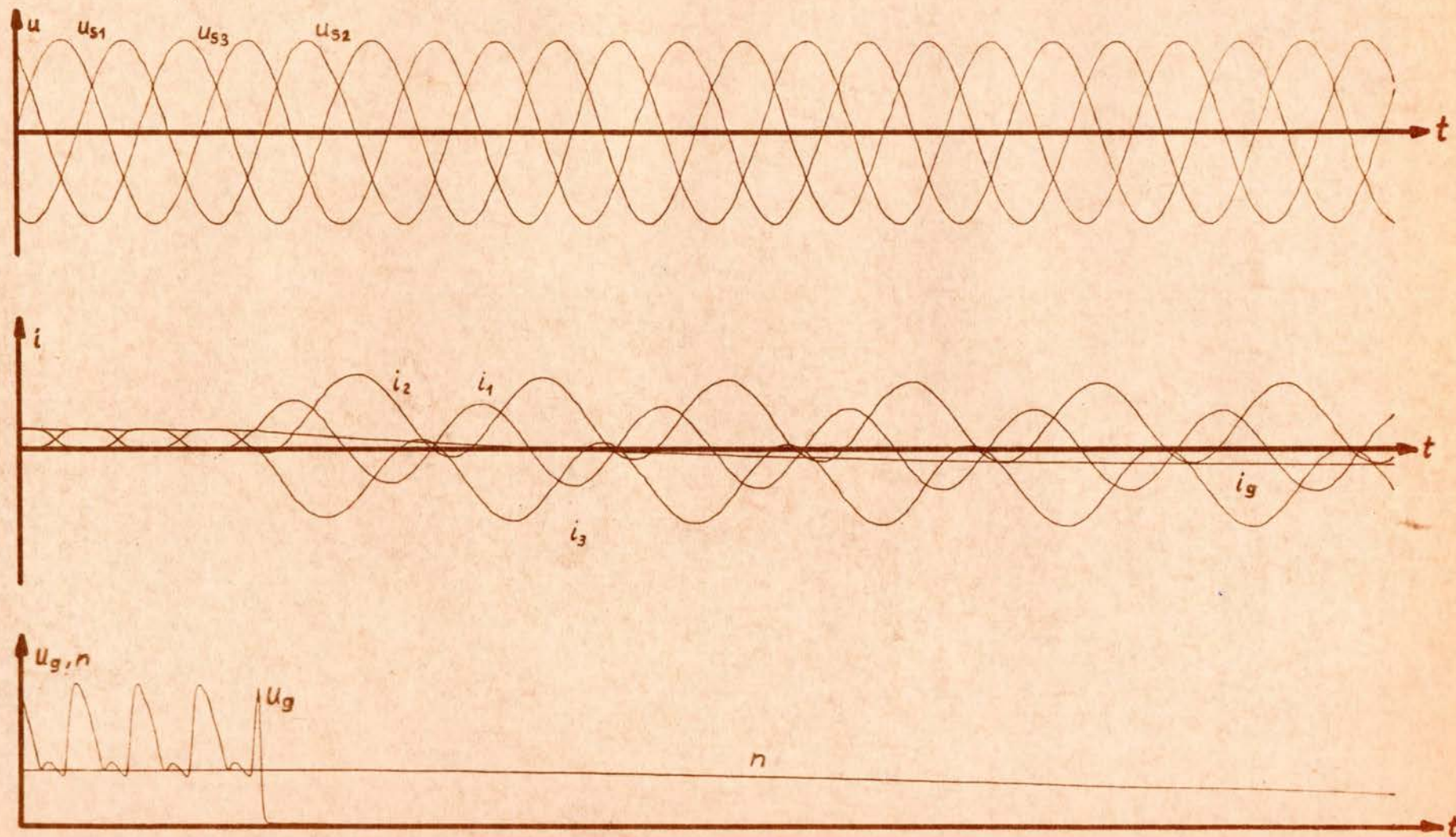
Zeitpunkt des Durchbruchs



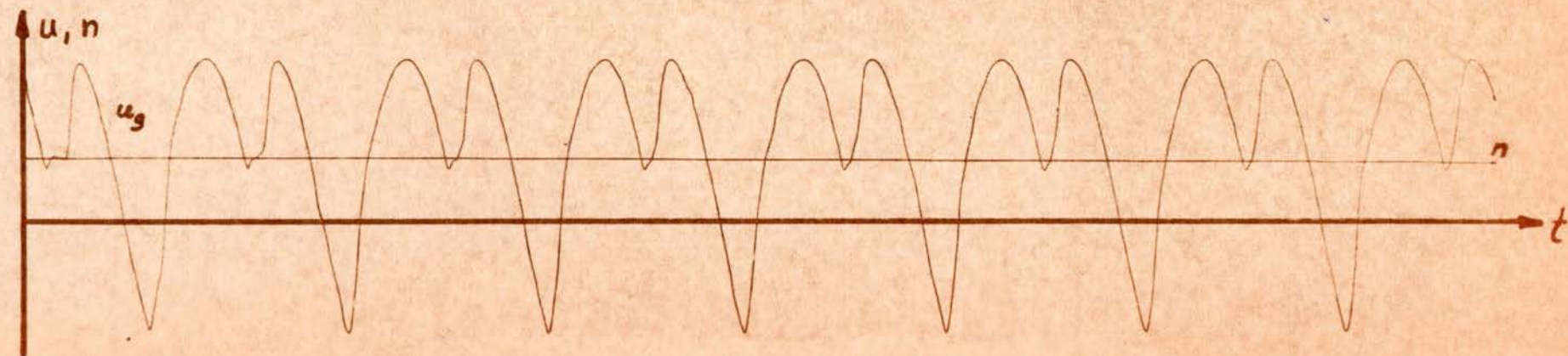
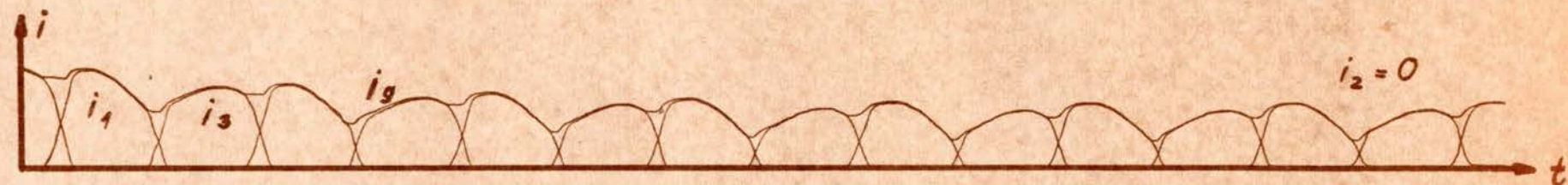
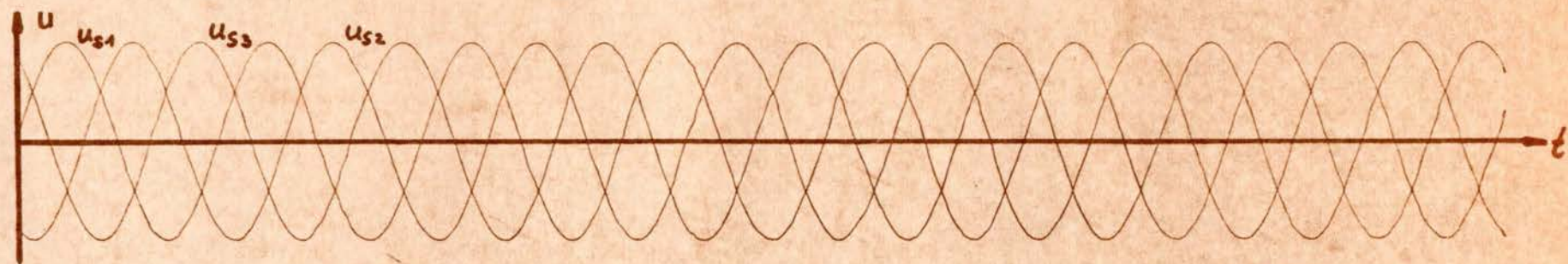
Durchbruch von zwei Ventilen

Registrierpapier
2200

Diagramm 10

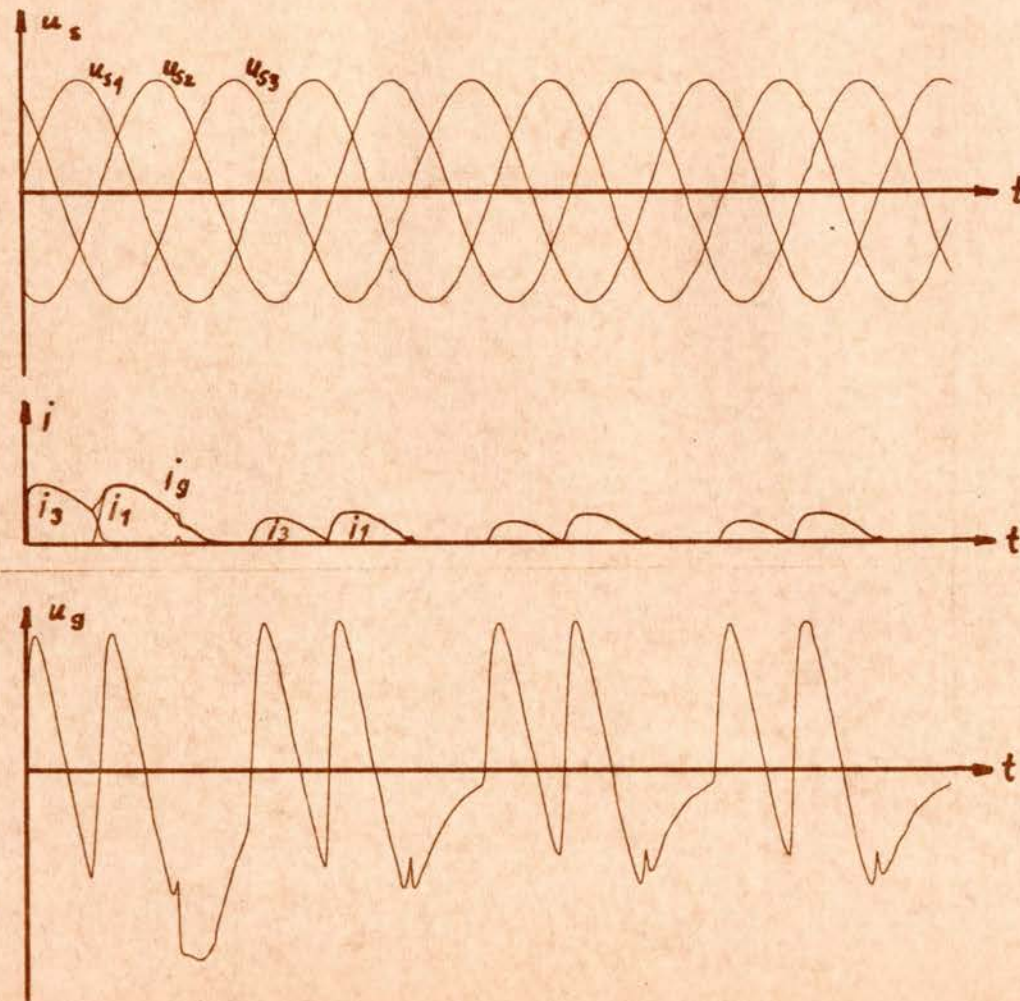


Dreifacher Durchbruch

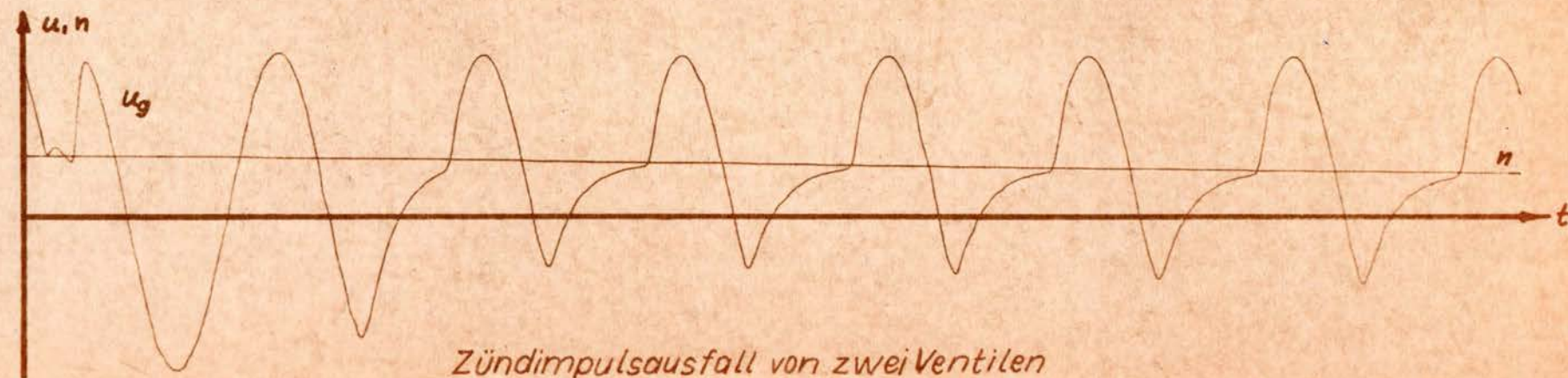
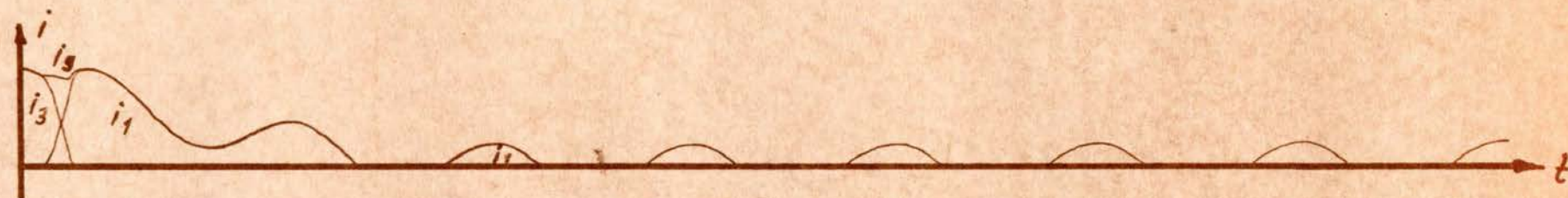
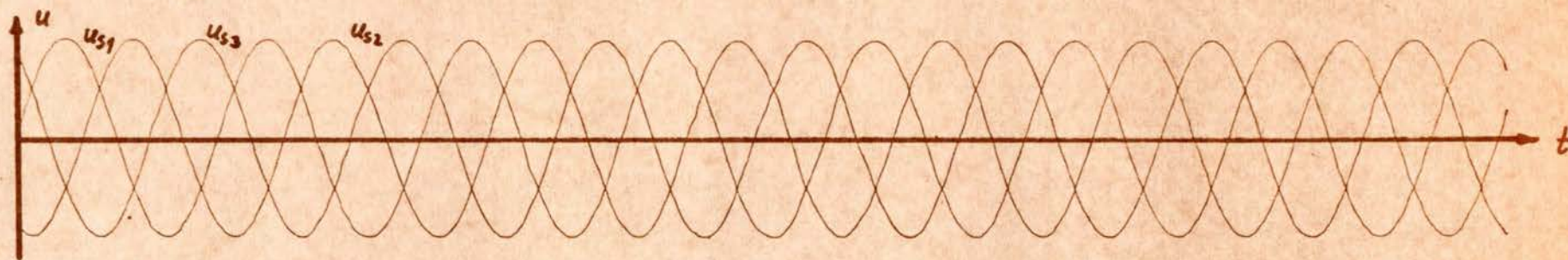


Verlust der Zündfähigkeit

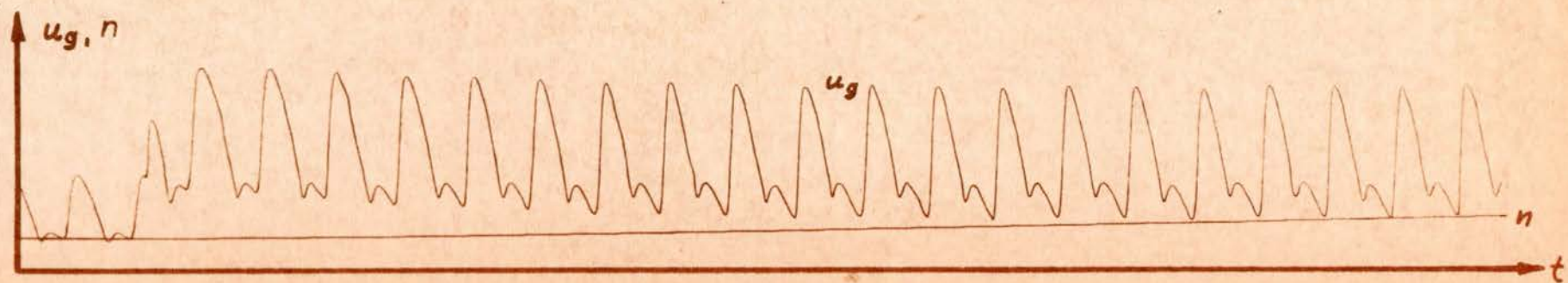
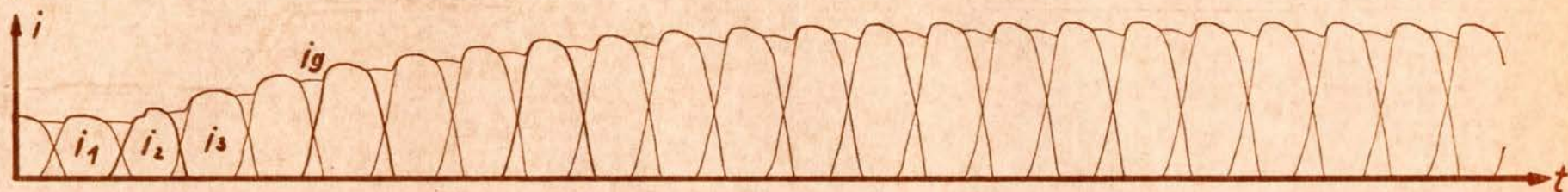
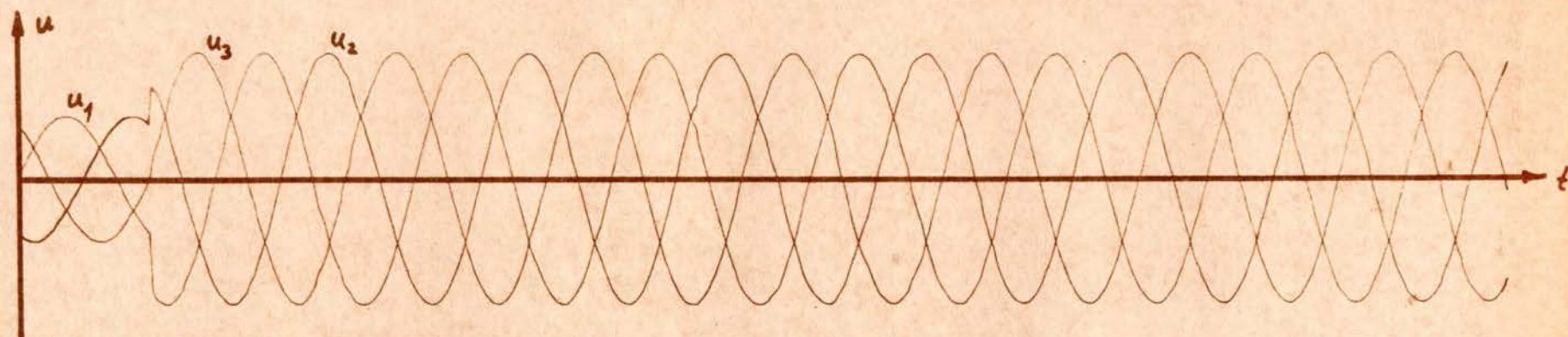
Diagramm 12



Ausfall der Zündimpulse eines Ventils

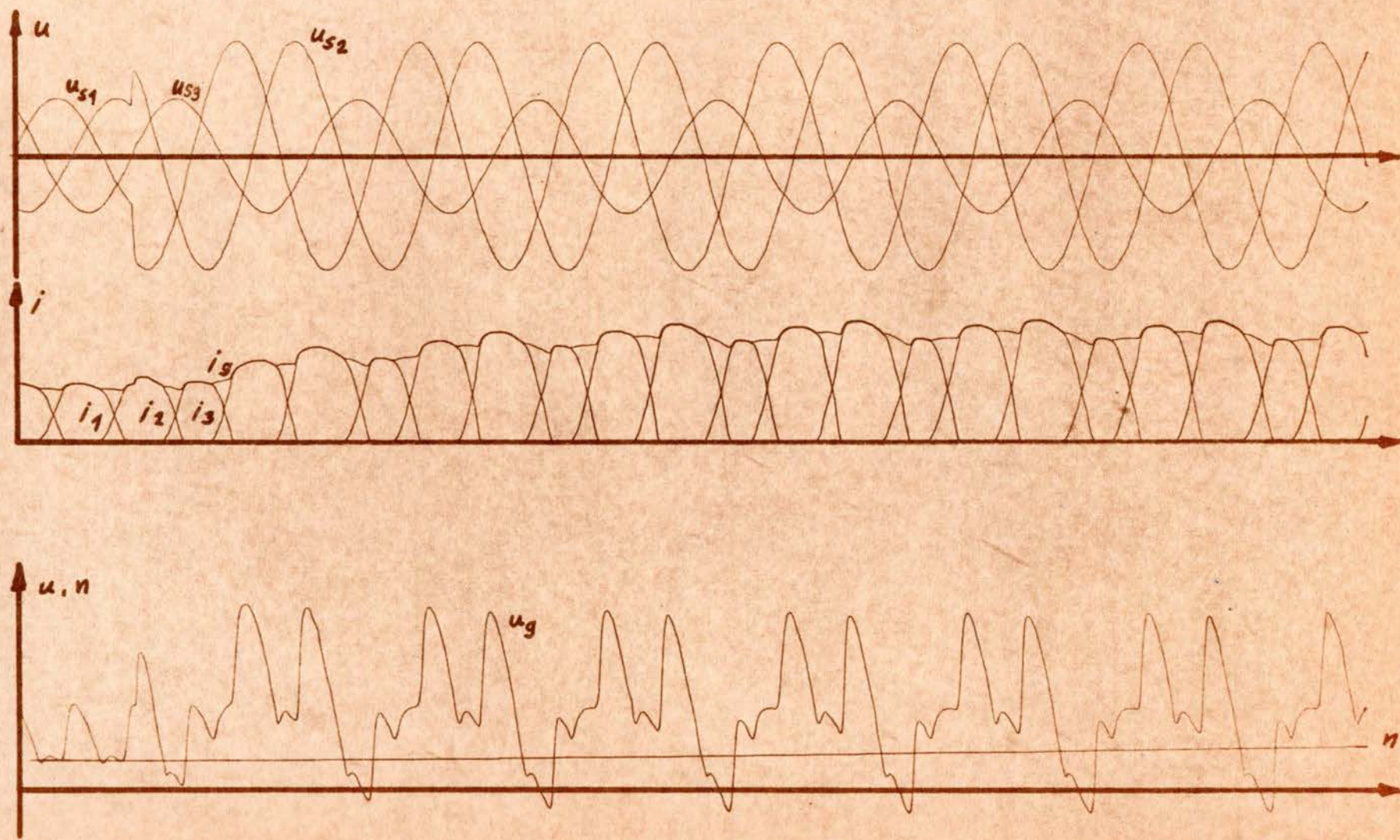


Zündimpulsausfall von zwei Ventilen

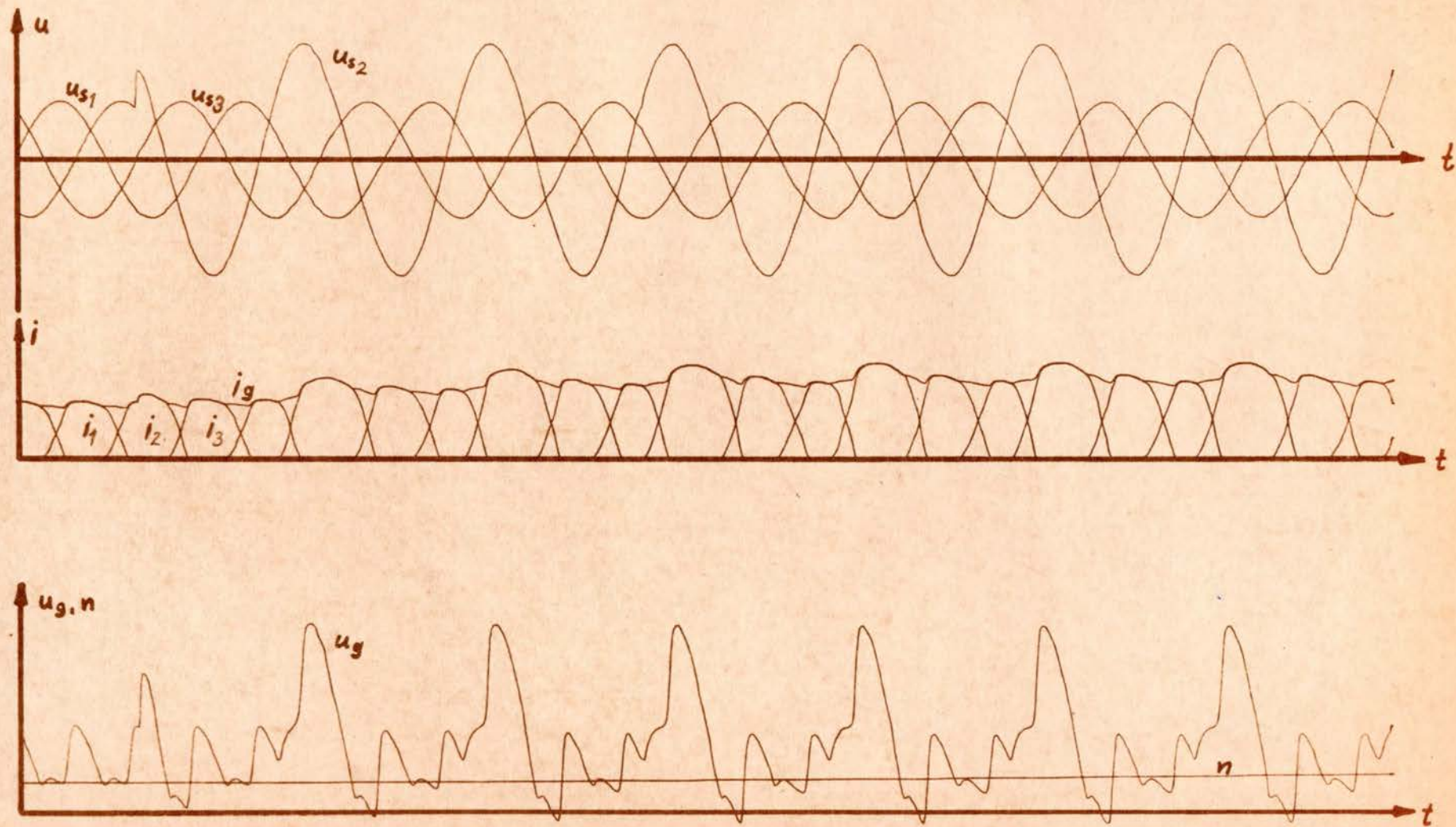


Netzspannungssprung

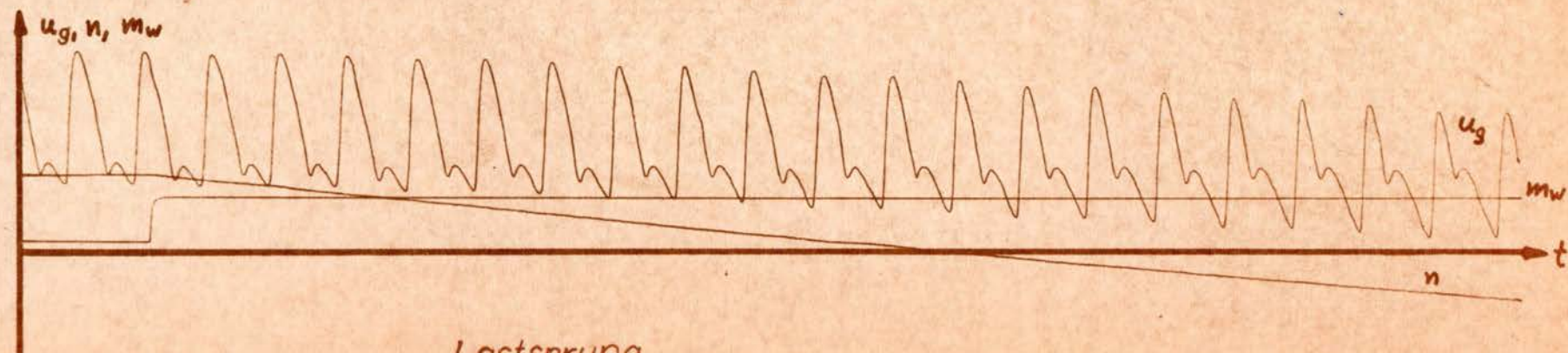
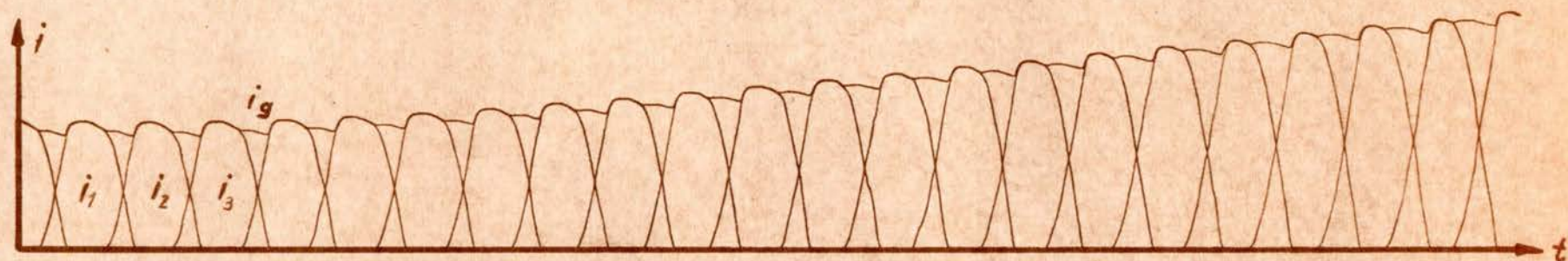
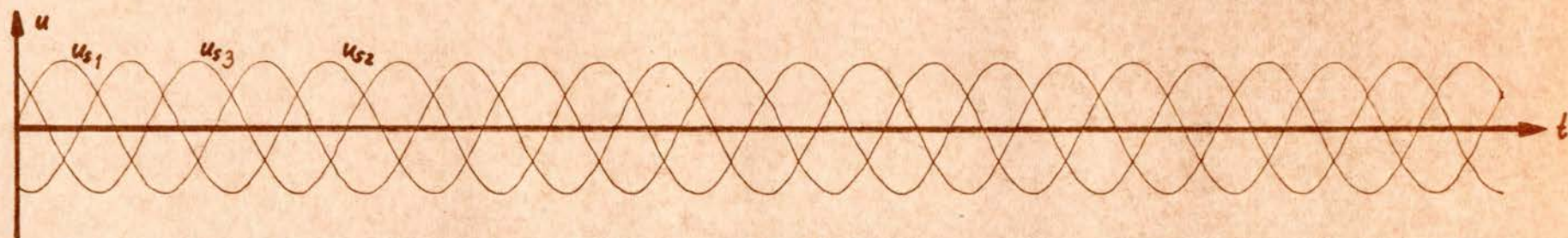
Diagramm 15



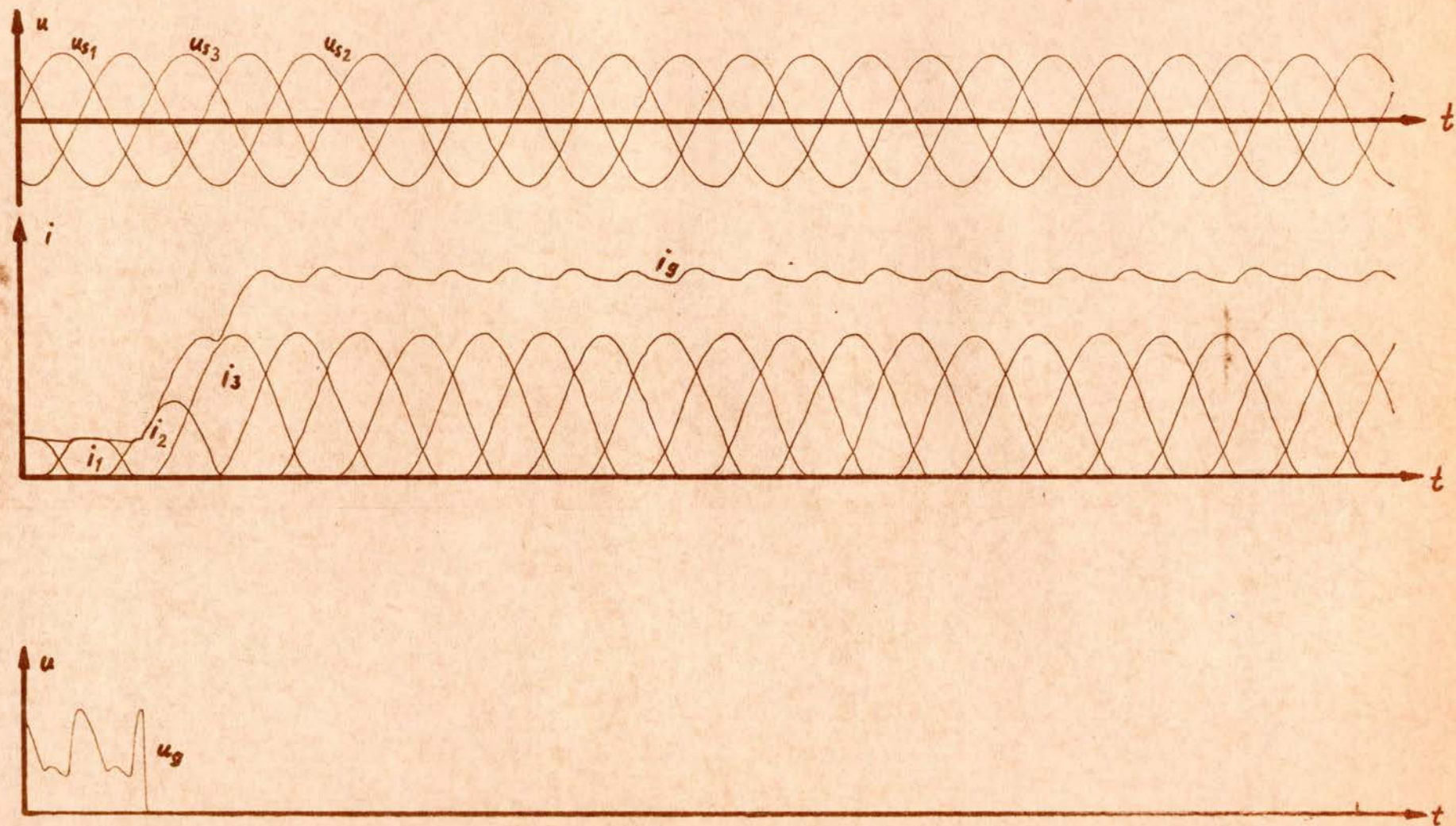
zweiphasiger Netzspannungssprung



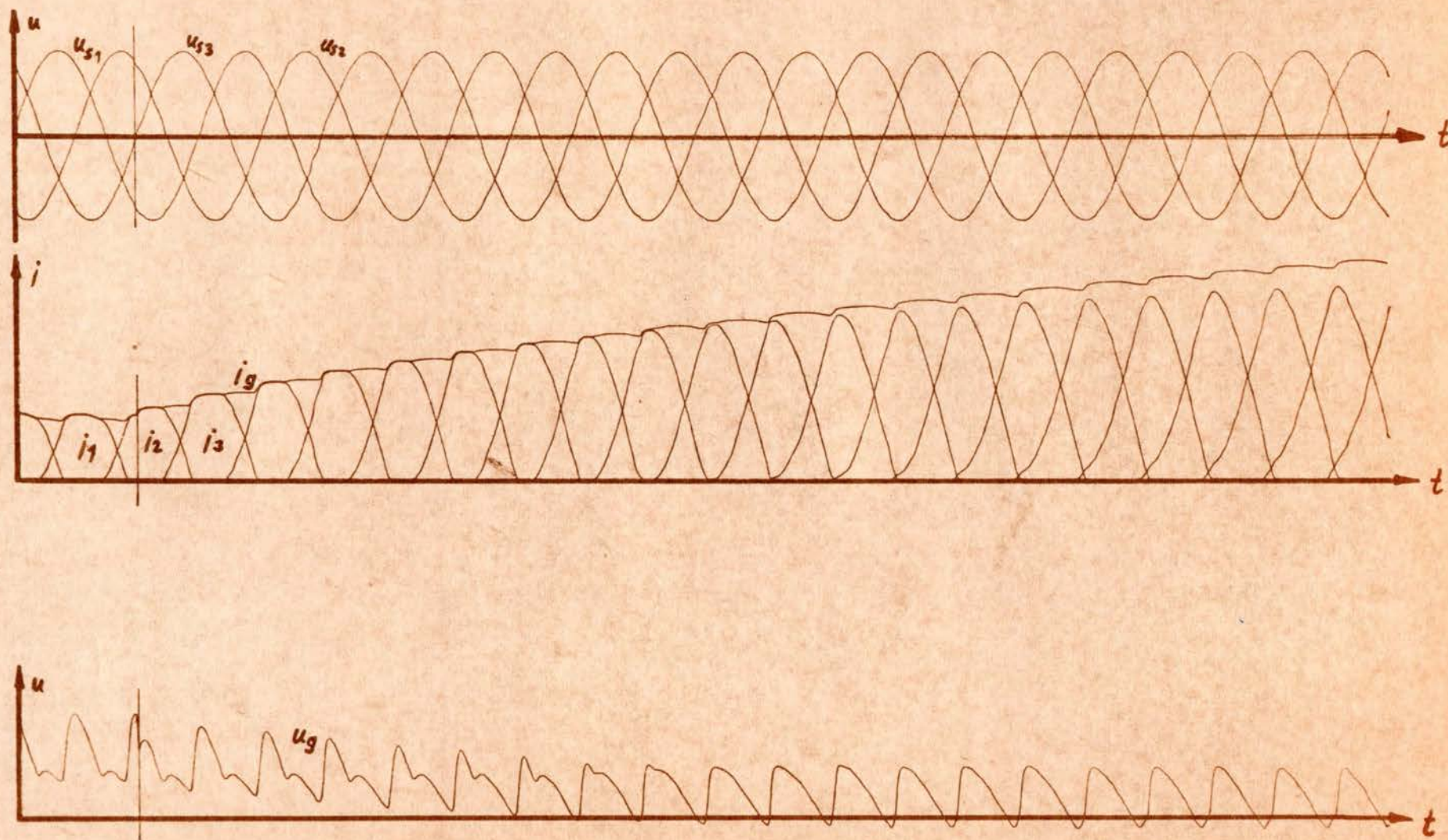
einphasiger Netzspannungssprung



Lastsprung

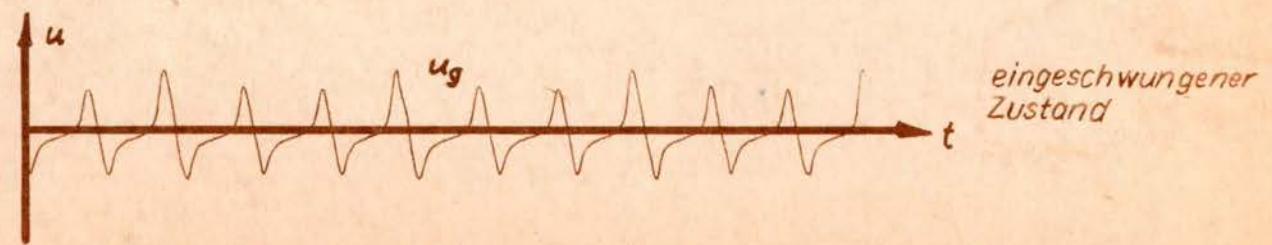
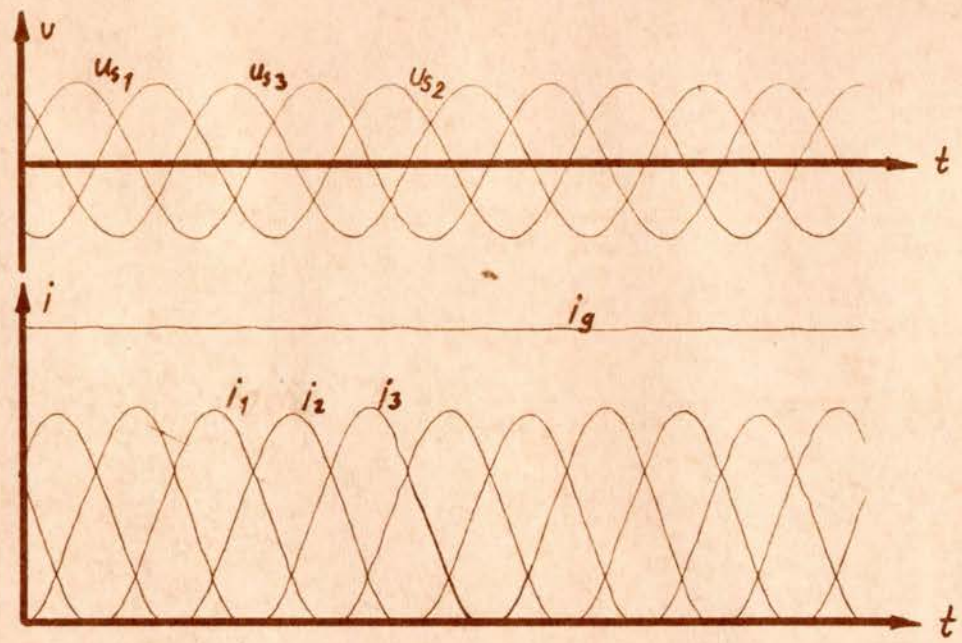


Klemmenkurzschluß des speisenden Gleichrichters

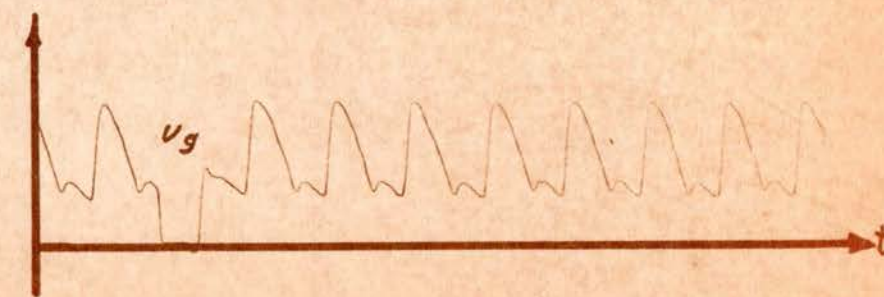
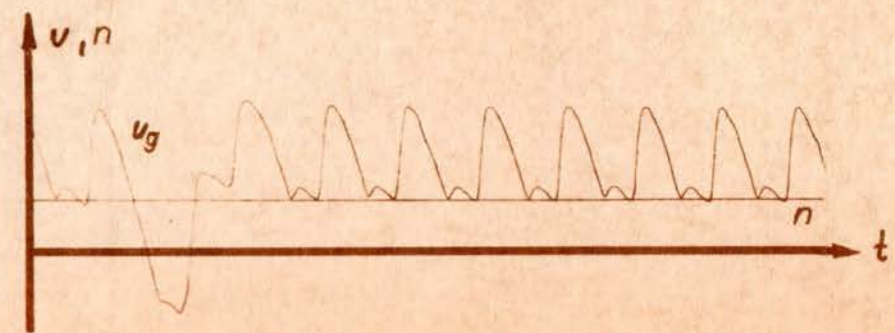
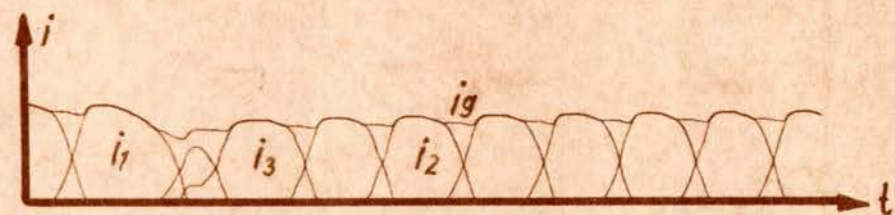
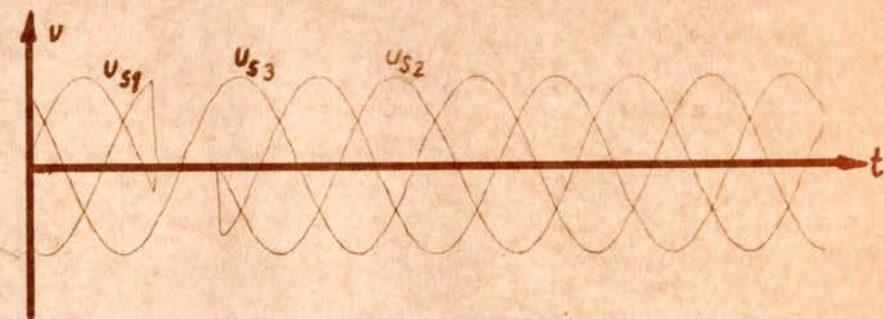
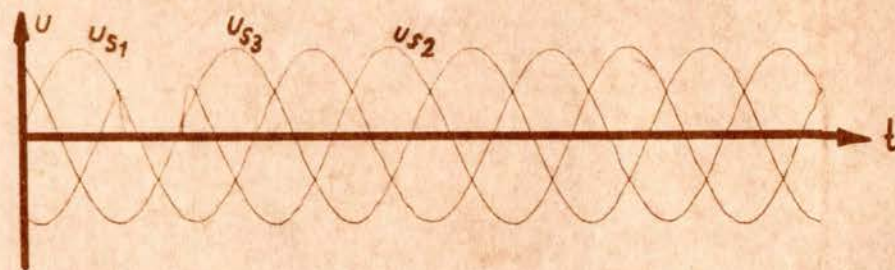


Kurzschluß hinter der Glättungsdrössel

Diagramm 20



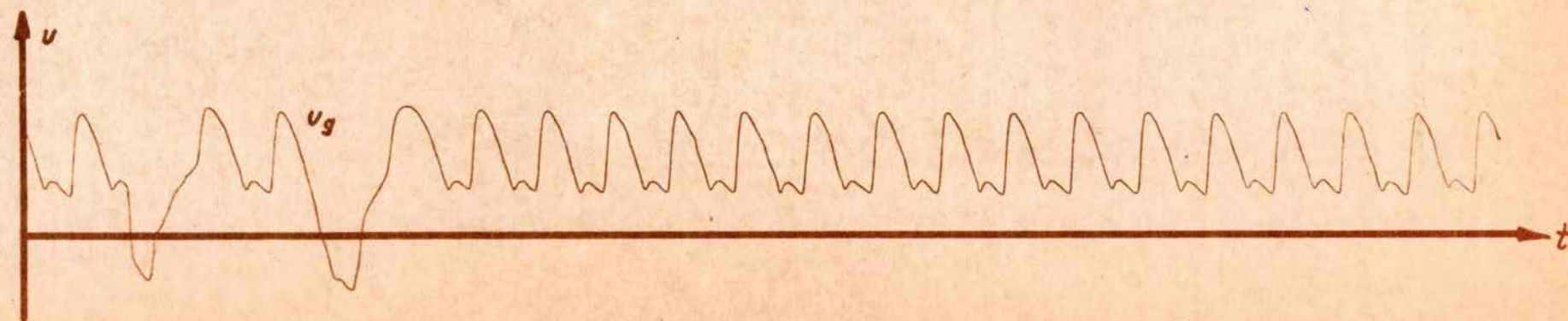
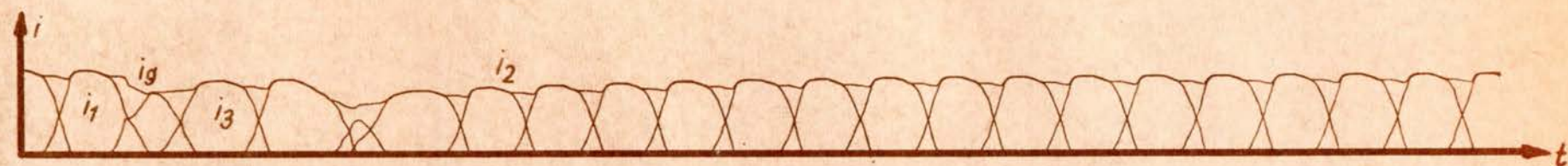
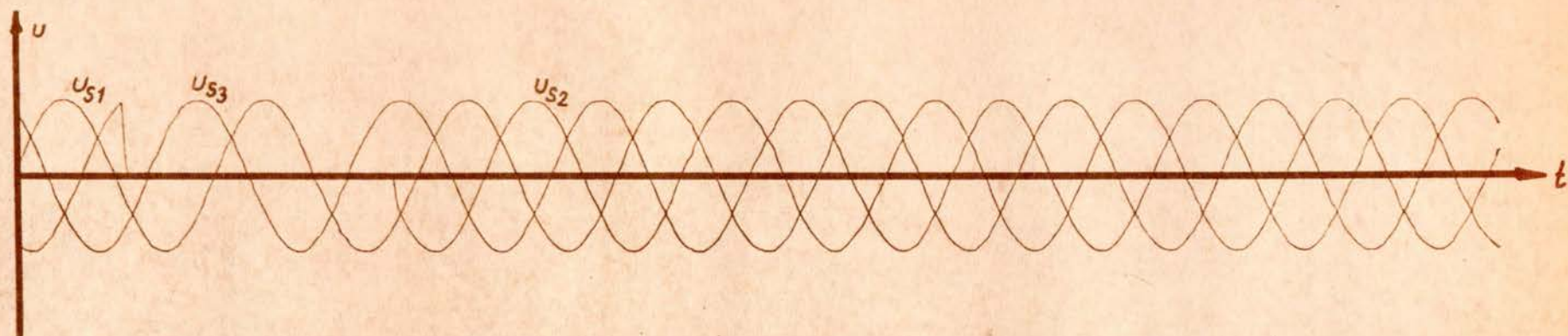
Kurzschluß hinter der Glättungsdrossel



ein- und zweiphasiger kurzzeitiger Netzspannungsausfall

Registrierpapier
2200

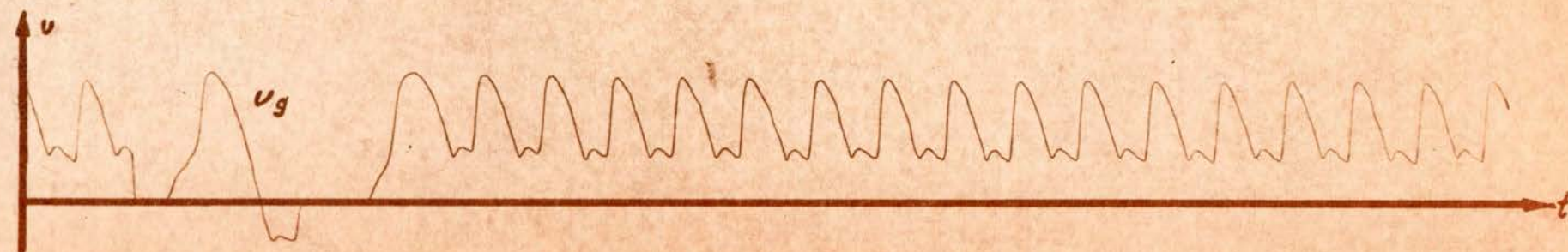
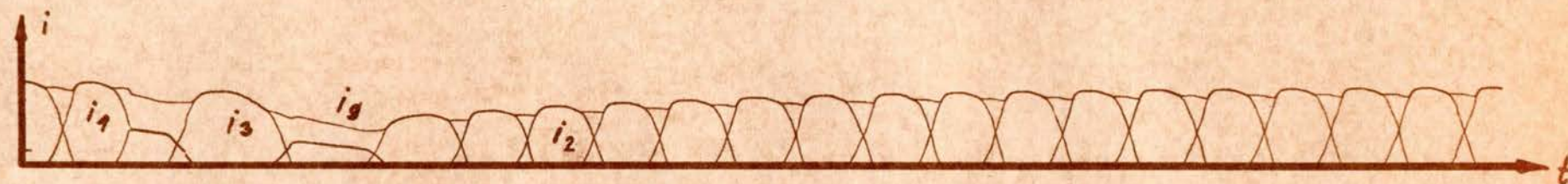
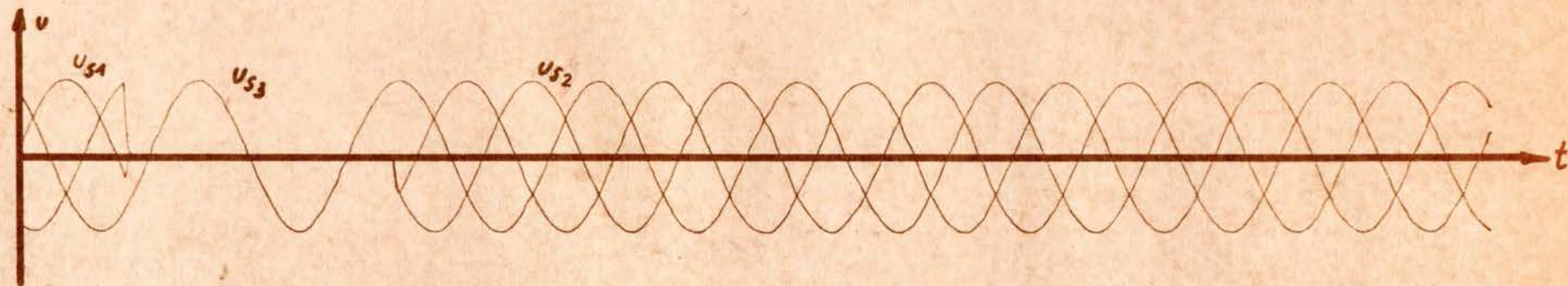
Diagramm 22



einphasiger Netzausfall

Reguliertpapier
2200

Diagramm 23



zweiphasiger Netzausfall

Regulirpapier
2200

Diagramm 24

A n h a n g B

Zeichnungs-Nr.

Blott-Nr.

Anhang B: Beschreibung des semielektronischen Steuergerätes zur Stromrichtersimulation

Inhaltsverzeichnis:

Seite B

1.	Einleitung	3
2.	Prinzipieller Aufbau	4
3.	Hergestellte Bausteine	4
3.1.	Relaisverstärker EB-RV (1)	4
3.2.	Nullindikator EB-NK (1)	5
4.	Hergestellte Leiterplatten	6
4.1.	Schaltstufen EB-SS (2)	6
4.2.	Relaisverstärker EB-RV (6)	7
4.3.	Verbindungsplatte EB-VB	7
4.4.	Nachimpulsplatte EB-NI	7
4.5.	Ausgabebaustein EB-AG (6)	8
5.	Stromversorgung	10
6.	Gesamtschaltung	10
7.	Diagramme zur Benutzung	10
8.	Möglichkeiten der Verbesserung und Erweiterung	10
8.1.	Methoden zur Steuerbarkeit des Steuersatzes	10
8.2.	Einsatz von Komparatoren	12
8.3.	Beispiel der Anwendung	13
8.4.	Bemerkungen zur Übertragungsfunktion	13
9.	Quellenverzeichnis	14

1. Einleitung

Zur Simulation von Stromrichterschaltungen auf dem Analogrechner ist der Aufbau eines Steuergerätes zweckmäßig /1/, welches die benötigten Zünd- und Zündverzögerungsimpulse bereitstellt. Das hier beschriebene Gerät ist sechspulsig aufgebaut und gestattet die Entnahme der logischen Signale direkt und auch über Relaiskontakte (Umschaltkontakte). Die Erzeugung von Doppelimpulsen (Nachimpulse), die zum Betrieb von Drehstrombrückenschaltungen und Drehstromtellern notwendig sind, ist durch Wechsel einer Leiterplatte möglich.

Der Aufbau des Gerätes erfolgte mit Bausteinen und Baugruppen des URSALOG G-Systems und dem Gefäßsystem URS. Bild 1 zeigt das Steuergerät auf dem Analogrechner stehend und Bild 2 zeigt die Gesamtansicht des Analogrechners MEDA 80 T mit Steuergerät.

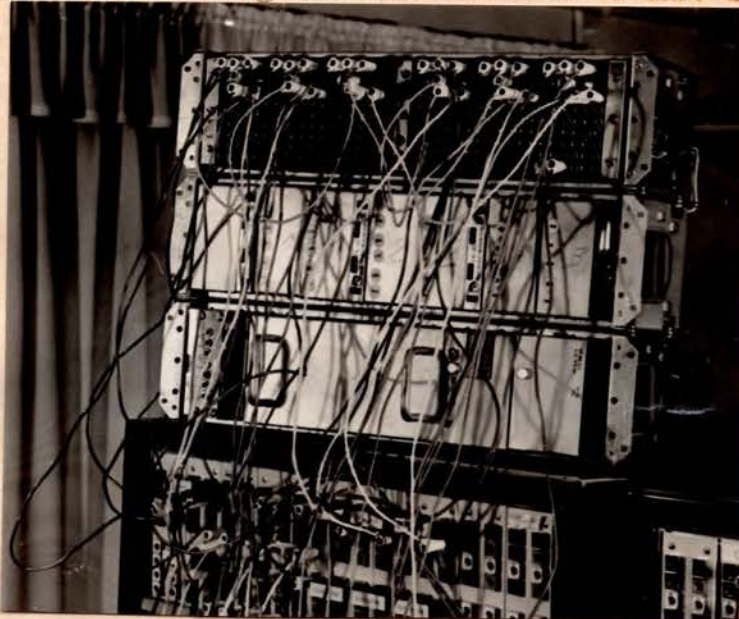


Bild B1

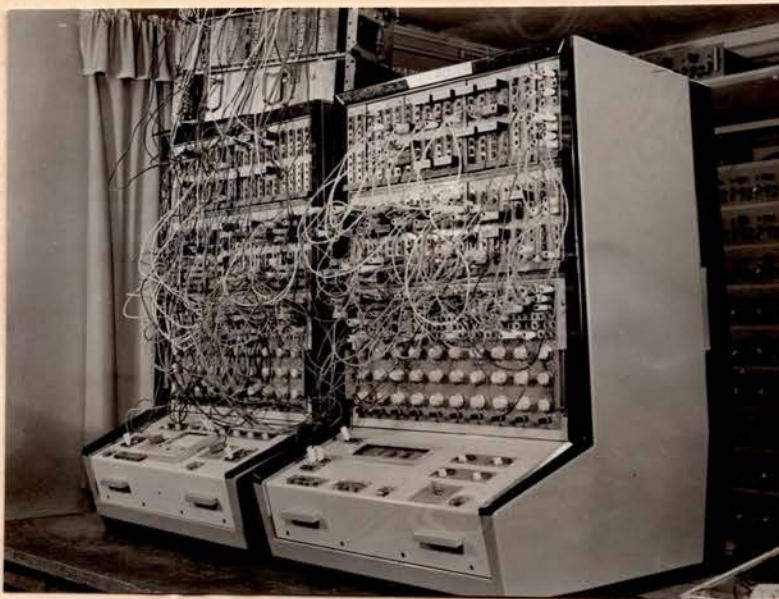


Bild B2

2. Prinzipieller Aufbau

Das Prinzipschaltbild des Steuergerätes zeigt Abb. B1.

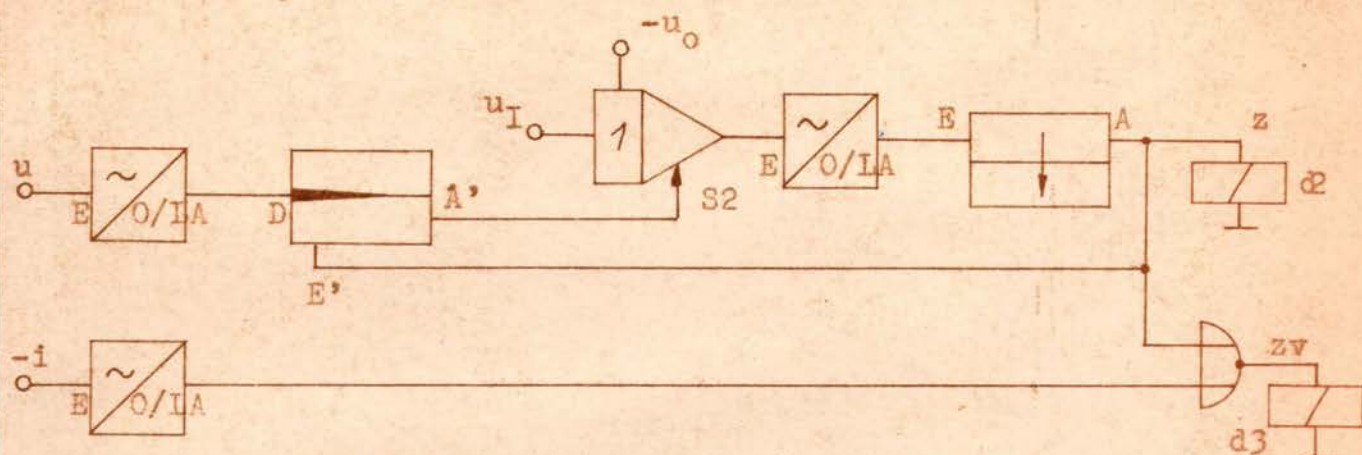


Abb. B1

Der Nulldurchgang der Spannung u wird mit einem Nullindikator ausgewertet. Dieser gibt L-Signal ab, wenn die Spannung am Eingang negativ ist. Im Nulldurchgang der Spannung wird der folgende bistabile Multivibrator umgesteuert und bewirkt das Anziehen des Relais $d1$. Als Folge beginnt der Integrator in positive Richtung zu integrieren. Den Nulldurchgang der Ausgangsspannung des Integrators erfaßt wiederum ein Nullindikator, der den Zündimpuls am Ausgang des monostabilen Multivibrators bewirkt. Mit dem Zündimpuls wird der bistabile Multivibrator und damit auch der Integrator zurückgestellt. Durch die Verknüpfung

$$zv = i \vee z = i \wedge z \quad (B1)$$

wird der Zündverzögerungsimpuls erstellt. Die Überwachung des Stromes erfolgt auch über einen Nullindikator.

Die Ausgabe der Steuerbefehle erfolgt über Relais mit 7 Umschaltkontakten. Zur Kontrolle für jeden Steuerbefehl ist eine Kontrolllampe vorgesehen.

3. Hergestellte Bausteine

Das zur Verfügung stehende Bausteinsystem konnte nicht alle geforderten Bedingungen erfüllen. Aus diesem Grunde mußten die Bausteine teilweise selbst entwickelt und hergestellt werden.

3.1. Relaisverstärker EB-RV (1)

Abb. B2 zeigt die Schaltung des Relaisverstärkers. Zwei Transistoren sind in Darlingtonschaltung verbunden. Bei anliegendem L-Signal ist das Relais angezogen. Die Z-Diode SZ 505 dient zur sicheren Sperrung des Endtransistors bei anliegendem O-Signal. Abb. B3 zeigt das Anschlußschema des EB-RV (1).

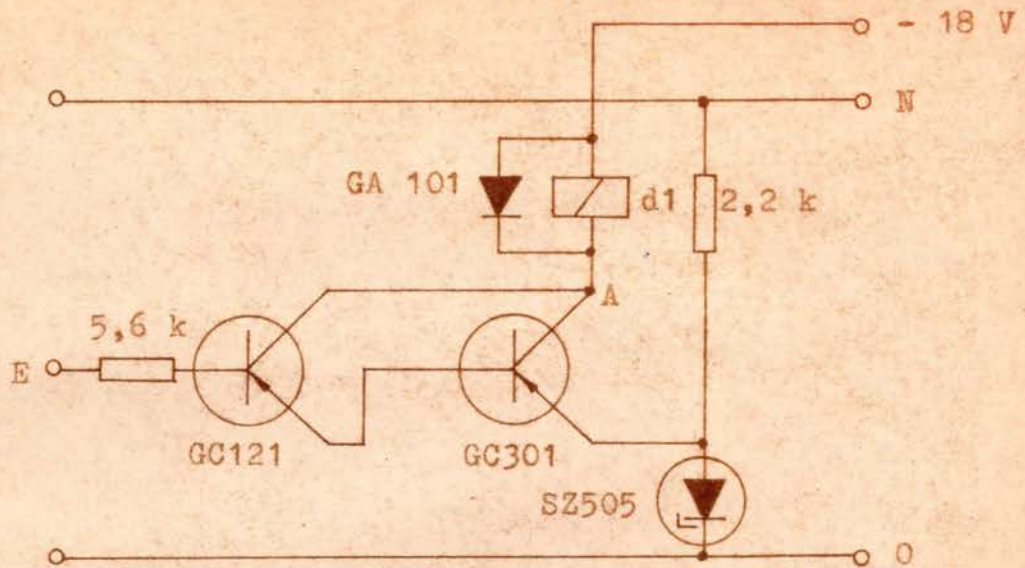


Abb. B2

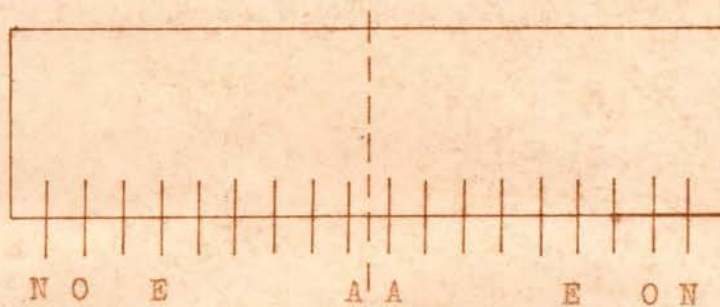


Abb. B3

3.2. Nullindikatoren EB-NK (1)

Der Nullindikator arbeitet nach dem Prinzip eines unsymmetrisch angesteuerten bistabilen Multivibrators /2/. Mit Hilfe des Einstellreglers ist es möglich die Umschaltspannung um den Nullpunkt zu verschieben. Abb. B4 zeigt das Schaltbild und Abb. B5 das Anschlußschema des Bausteins.

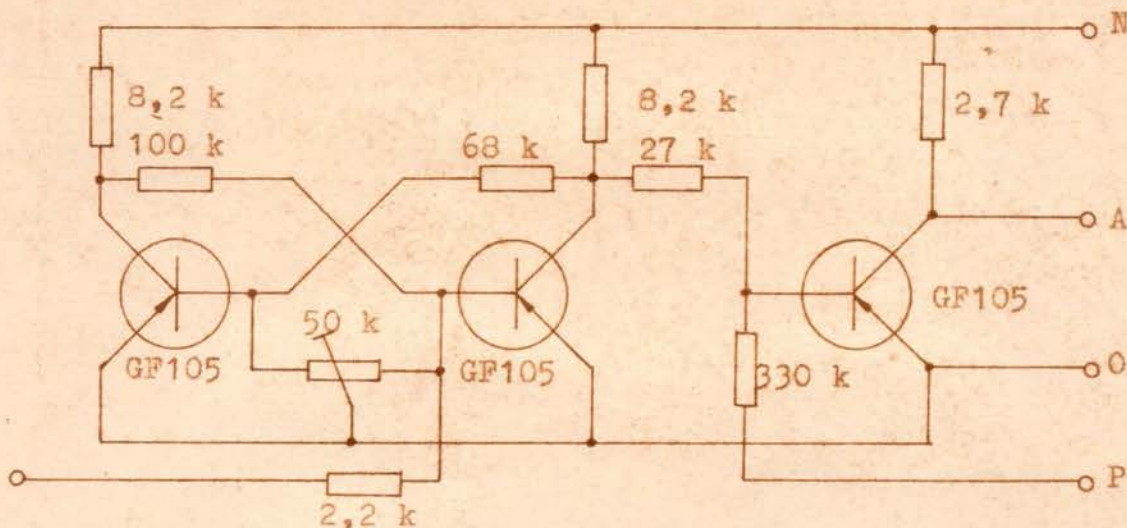


Abb. B4

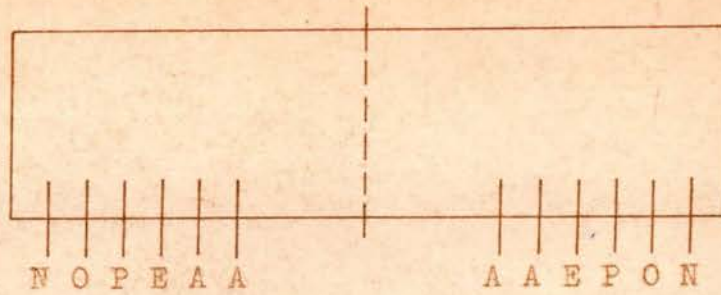


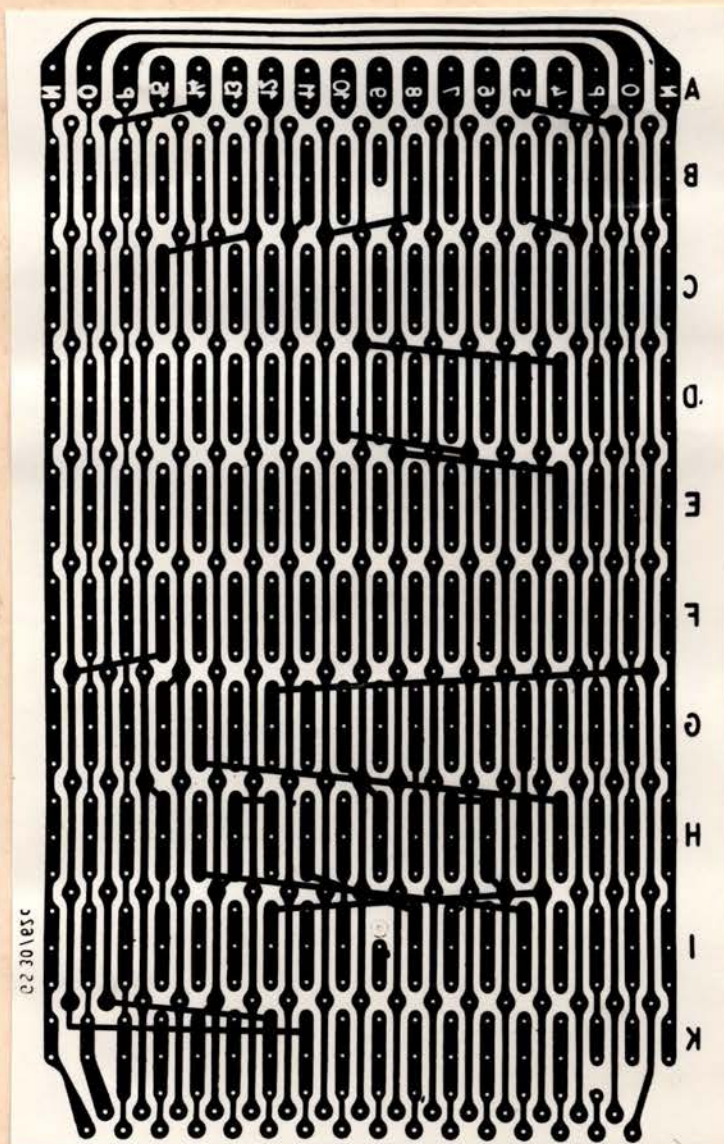
Abb. B5

4. Hergestellte Leiterplatten

Als Leiterplatten wurden die Universalleiterplatten GS 30/62c verwendet.

4.1. Schaltstufen EB-SS (2)

Abb. B6 zeigt den Aufbau der Schaltstufen. Die Kondensatoren der monostabilen Multivibratoren wurden zu $50 \mu F$ bemessen, so daß sich eine Zündimpulsdauer von 0,2 s ergibt.



E-N 5/2(2)

E-30 (2)

EB-NK (1)

E-MM

E-MM

EB-NK (1)

E-BM 5/5

E-IG (4)

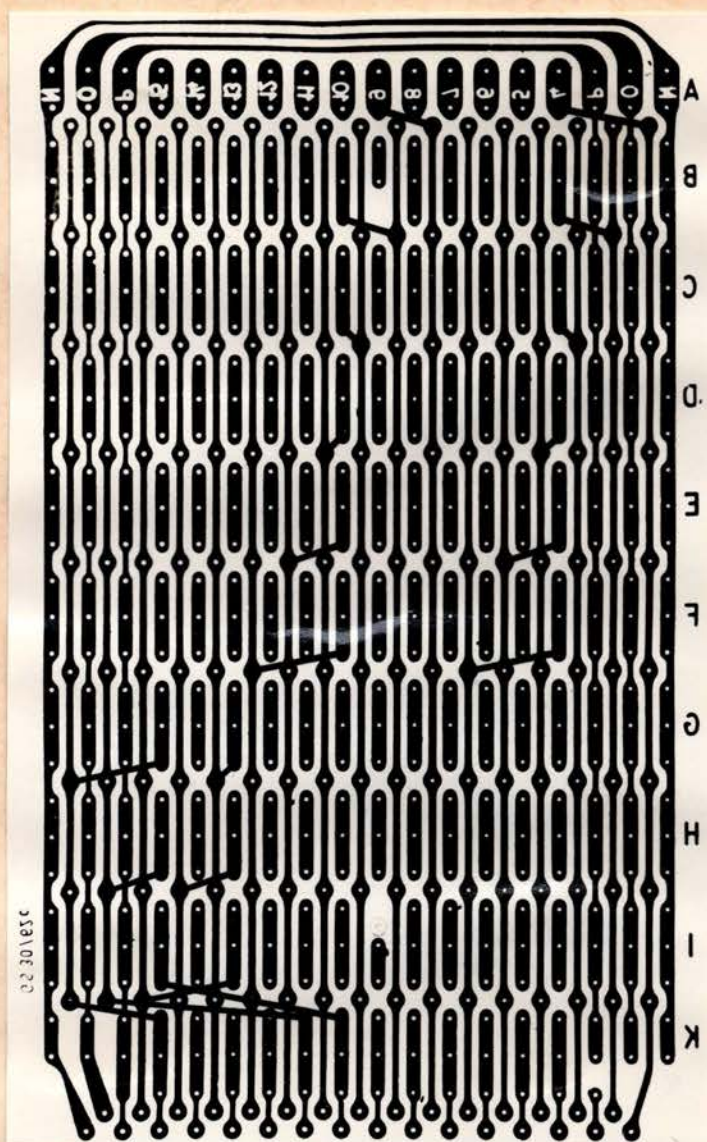
E-BM 5/5

EB-NK (1)

Abb. B6

4.2. Relaisverstärker EB-RV (6)

Abb. B7 zeigt den Aufbau der Relaisverstärkerplatte.



EB-RV (1)

EB-RV (1)

EB-RV (1)

EB-RV (1)

EB-RV (1)

EB-RV (1)

EB-NK (1)

EB-NK (1)

EB-NK (1)

E-N 5/2 (2)

Abb. B7

4.3. Verbindungsplatte EB-VB

Abb. B8 zeigt den Aufbau der Verbindungsplatte. Wird diese in das Steuergerät gesteckt, dann werden die Zündimpulse ohne Nachimpulse ausgegeben.

4.4. Nachimpulsplatte EB-NI

Die Nachimpulsplatte zeigt Abb. B9. Sie wird wahlweise, in Austausch mit der Verbindungsplatte EB-VB verwendet.

Die Schmitt-Trigger verhindern die Rückwirkung der sonst direkt hintereinandergeschalteten ODER-Gatter. Die Nachimpulsplatte gewährleistet die Verknüpfungen

$$z_1^* = z_1 \vee z_6 \quad (B2)$$

$$z_2^* = z_2 \vee z_4 \quad (B3)$$

$$z_3^* = z_3 \vee z_5 \quad (B4)$$

$$z_4^* = z_4 \vee z_3 \quad (B5)$$

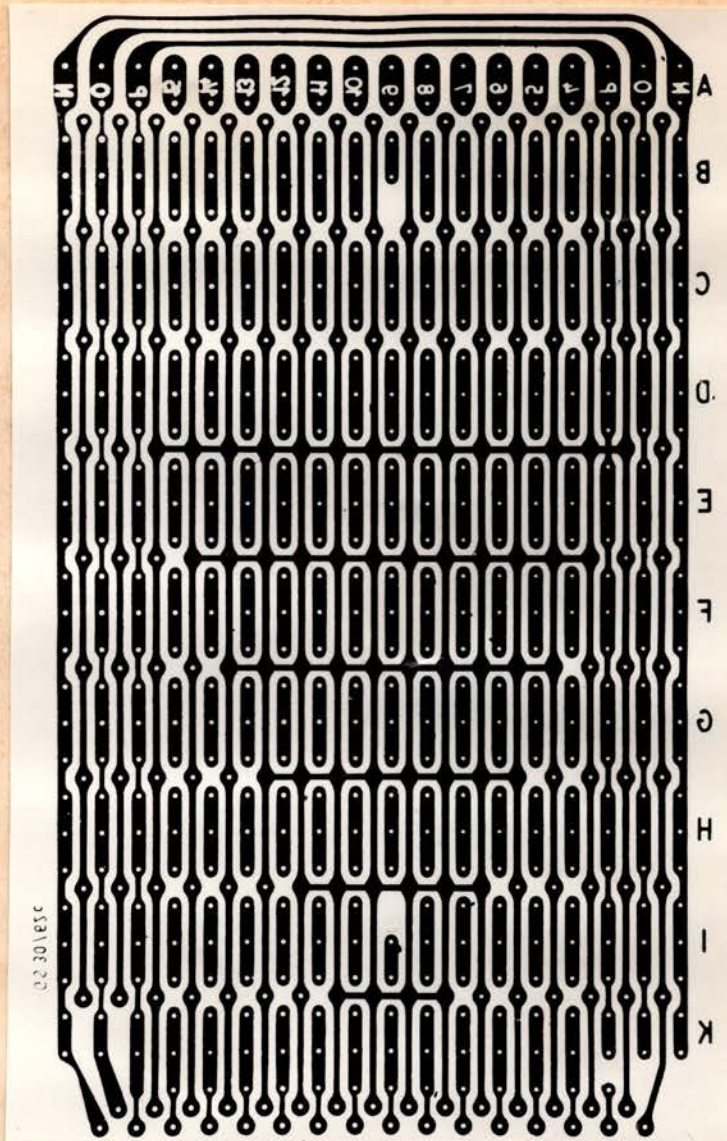


Abb. B8

$$z_5^* = z_5 \vee z_1 \quad (B6)$$

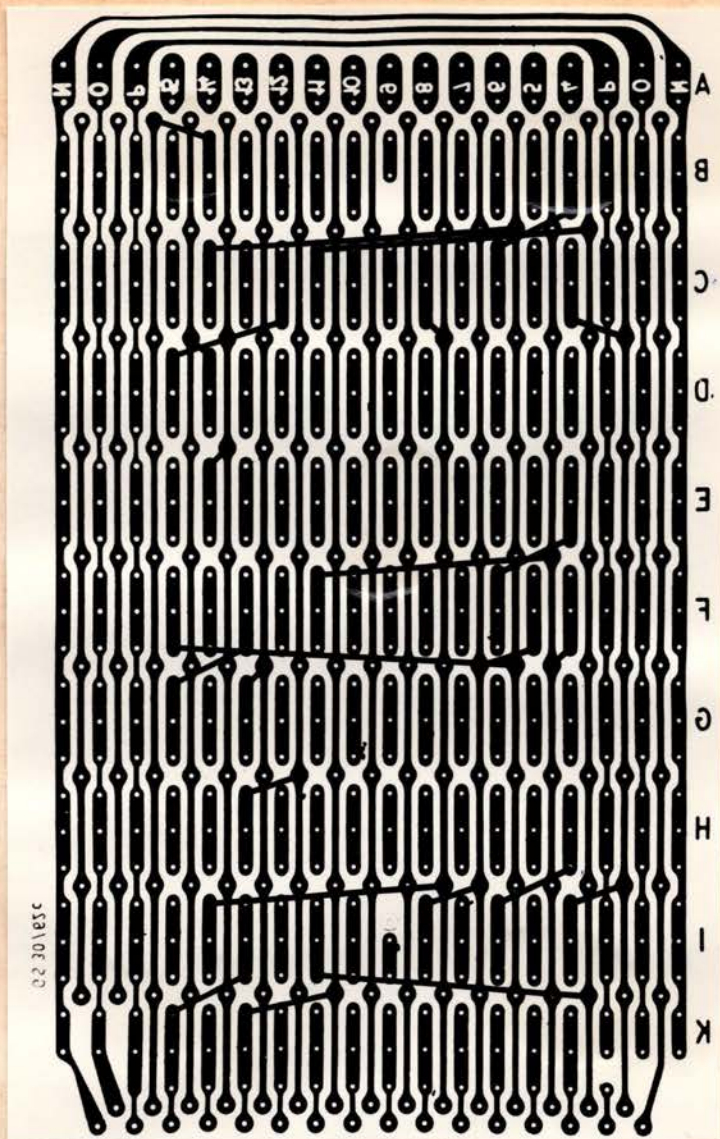
$$z_6^* = z_6 \vee z_2, \quad (B7)$$

d.h. dem eigentlichen Zündimpuls folgt im Abstand von 60° el. ein weiterer Zündimpuls (Doppelimpuls).

4.5. Ausgabebaustein EB-AG (6)

Dieser Baustein nimmt eine ganze Kassette ein. In ihm befinden sich die Relais und die Kontrolllampen. Die Ansicht eines Ausgabefeldes zeigt Abb. B10. Die Kontakte des Bausteines sind wie folgt belegt:

3/4a }	+ 12 V
4/4b }	
3/10a }	- 12 V
4/10b }	
1 a,b	+ 0 V
13 a,b	Erde
12 a,b	Integratorausgang AV
5 a,b	d1 (Integr.-Steuerung)
6 a,b	d2 (Zündimpuls)



E-ST (1)

E-30 (2)

E-ST (1)

E-ST (1)

E-30 (2)

E-ST (1)

E-ST (1)

E-30 (2)

E-ST (1)

Abb. B9

7 a, b

6/2 a, b

3 a

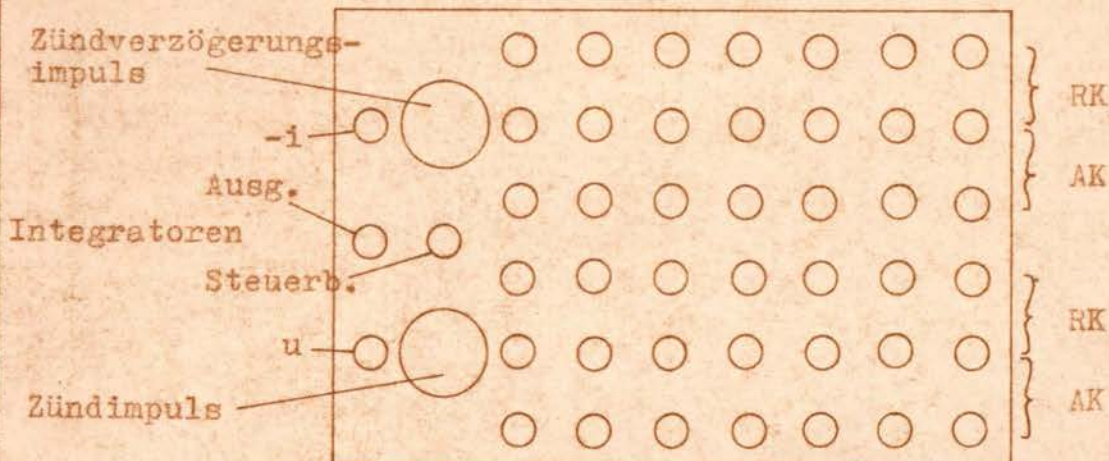
3bb

d3 (Zündverzögerungsimpuls)

Lampenspannung

Spannung u

Strom i



-1

Ausg.

Integratoren

Steuerb.

u

Zündimpuls

RK

AK

RK

AK

Abb. B10

5. Stromversorgung

Die Bausteine benötigen zur Stromversorgung eine Betriebsspannung von ± 12 V mit Ausnahme der Relaisverstärker, die eine solche von -18 V benötigen.

Ein Drehstromnetzteil AE 1,0-B1 stellt zwei galvanisch getrennte Spannungen von 18 V zur Verfügung, die für die Speisung der Relaisverstärker direkt verwendet wird. Außerdem werden dem Netzteil zwei Stabilisierungsbausteine AC 2,5-B1V nachgeschaltet, die die Stromversorgungsspannung auf 12 V stabilisieren. Der positiven Spannungsquelle können 1 A, der negativen Spannungsquelle 2,5 A entnommen werden.

Ist eine weitere Verwendung der Spannung erwünscht, so kann diese dem Ausgabebaustein entnommen werden.

6. Gesamtschaltung

Abb. B11 zeigt die Schaltung des Steuergerätes. Stellvertretend ist, da alle Stufen gleich aufgebaut sind, nur eine Stufe gezeichnet. Daten und Schaltung des Netzteils und der Stabilisierungsbausteine sind den einschlägigen INTRON-Unterlagen zu entnehmen.

7. Diagramme zur Benutzung

Abb. B12 zeigt die Zeit, die nach dem Nulldurchgang der Spannung vergeht in Abhängigkeit von der Vorbereitungsspannung der Integratoren mit der Integrationsspannung als Parameter.

Es ist darauf zu achten, daß die Zeitdauer t nicht größer als die Periodendauer T der steuernden Spannung wird. Wird sie größer, dann ist die Funktion des Steuergerätes nicht mehr gewährleistet.

8. Möglichkeiten der Verbesserung und Erweiterung

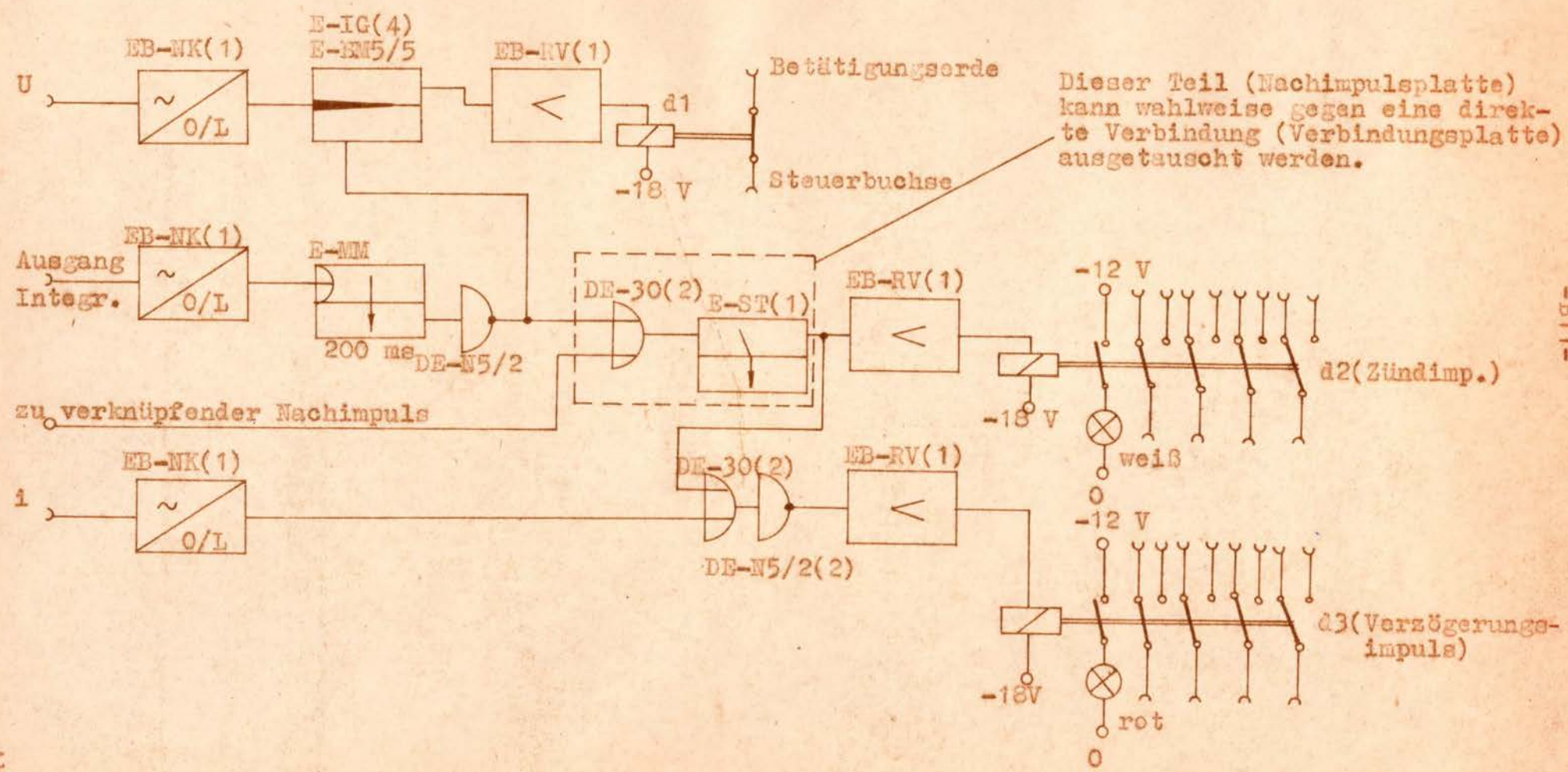
8.1. Methoden zur Steuerbarkeit des Steuersatzes

In /1/ wird in Zusammenhang mit einem verdrahtungsprogrammiertem Digitalzusatz zu dem Analogrechner MEDA 120 T die Steuerbarkeit des Steuersatzes gefordert, d.h. sämtliche Impulse müssen weiterhin über eine beliebige Zeit anliegen und der Betrieb muß danach, wie ohne vorhergehende Unterbrechung, weitergehen. Diese Forderung wird zwar durch die Verwendung der Integratoren des Analogrechners einerseits erfüllt, nur die Zündimpulse gehen nach 200 ms "verloren". Dies kann durch sechs bistabile Multivibratoren mit vorgeschalteten UND-Gattern in geeigneter Weise verhindert werden.

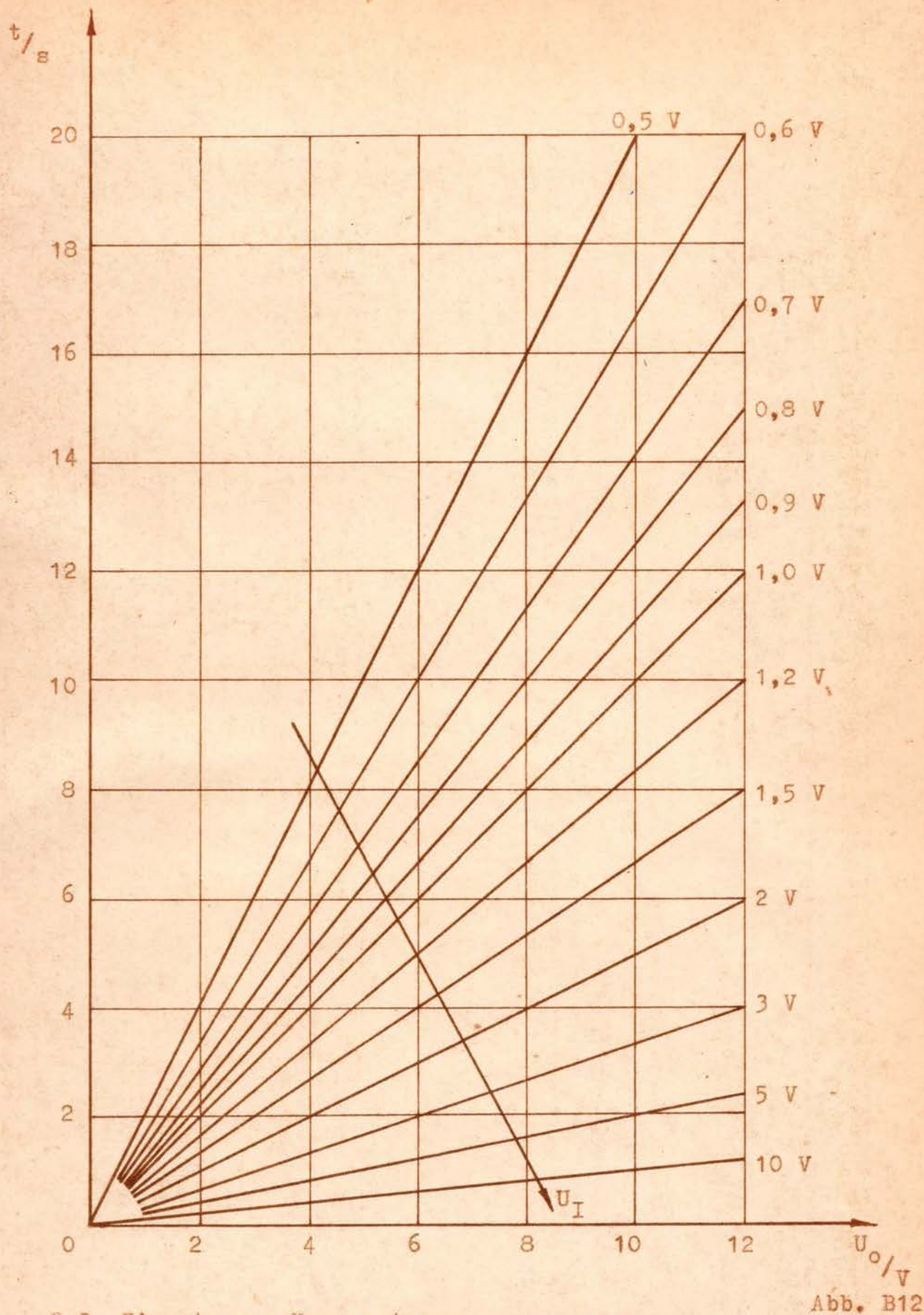
Zeichnungs-Nr. A TOL 200-5045

Blatt-Nr.

Abb. B11



-B11-



8.2. Einsatz von Komparatoren

Die eingebauten Nullindikatoren schalten bei ca. - 0,15 V. Unter Umständen ist diese Ansprechschwelle zu groß. Dann kann man die Nullindikatoren durch geeignet beschaltete Rechenver-

stärker nach Abb. B13 ansteuern.

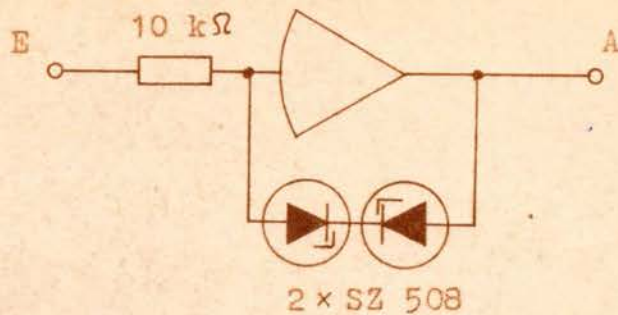


Abb. B13

Die Z-Dioden begrenzen die Spannung auf ein zulässiges Maß.

8.3. Beispiel der Anwendung

Als Beispiel der Anwendung soll ein modifizierter "Schnörr"-Integrator, der sich als Stromrichtermodell erweitern läßt, gezeigt werden. Abb. B14 zeigt das ausführliche Rechenschema.

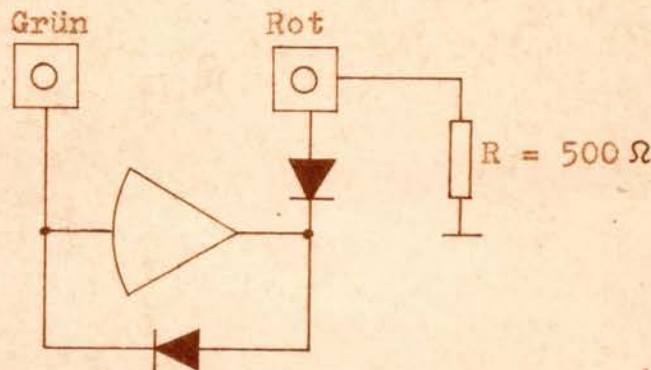


Abb. B14

8.4. Bemerkungen zur Übertragungsfunktion

Bekannterweise stellt ein Stromrichter ein Glied mit Abtastquarakteristik dar. So wird im Zeitpunkt des Auftretens des Zündimpulses der Ausgang des Stromreglers (bei Verwendung einer Stromregelung) abgetastet. Dies ist hier nicht der Fall. Hier erfolgt die Abtastung bereits im Nulldurchgang der Spannung. Das heißt, das zusätzlich eine steuerungswinkelabhängige Totzeit

$$T_t = \frac{1}{f} \left(\frac{\alpha}{2\pi} + \frac{1}{12} \right) \quad (B8)$$

auftritt. Außerdem tritt ein Verzögerungsglied erster Ordnung mit einer Zeitkonstante τ_{st} von

$$\tau_{st} = 50 \text{ ms}, \quad (B9)$$

bedingt durch die Zeitkonstante der Vorbereitungseingänge der Integratoren, auf.

Die Übertragungsfunktion kann durch Veränderung der Schaltung auf dem Analogrechner nach Abb. B15 dem realen Vorbild wieder

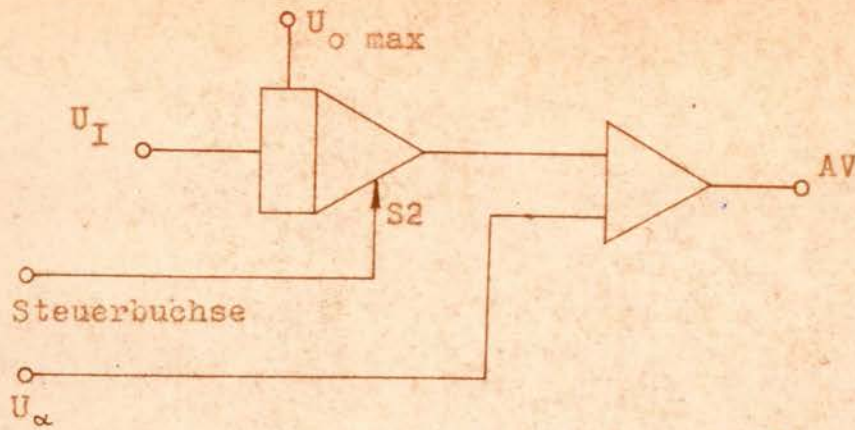
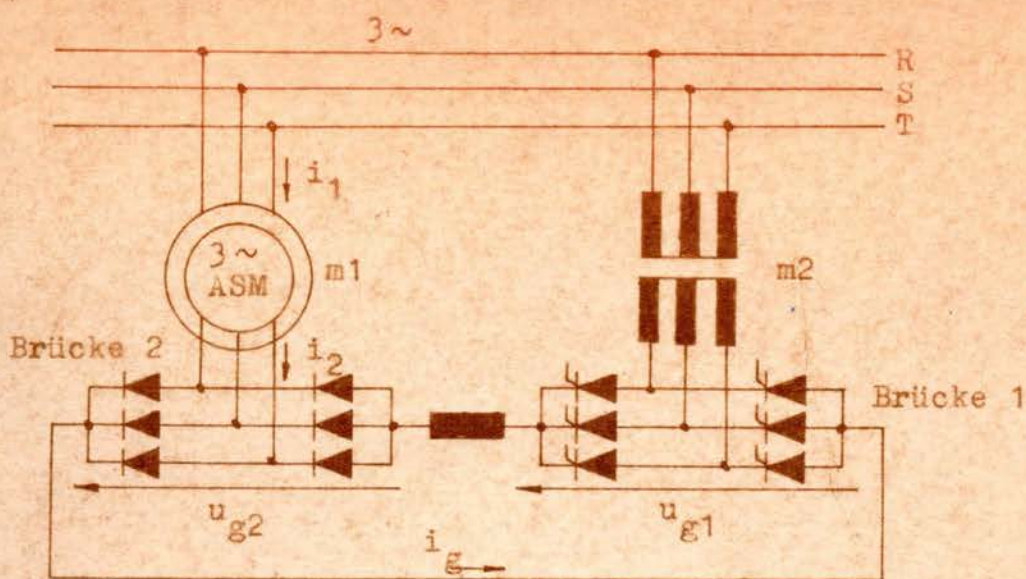


Abb. B15

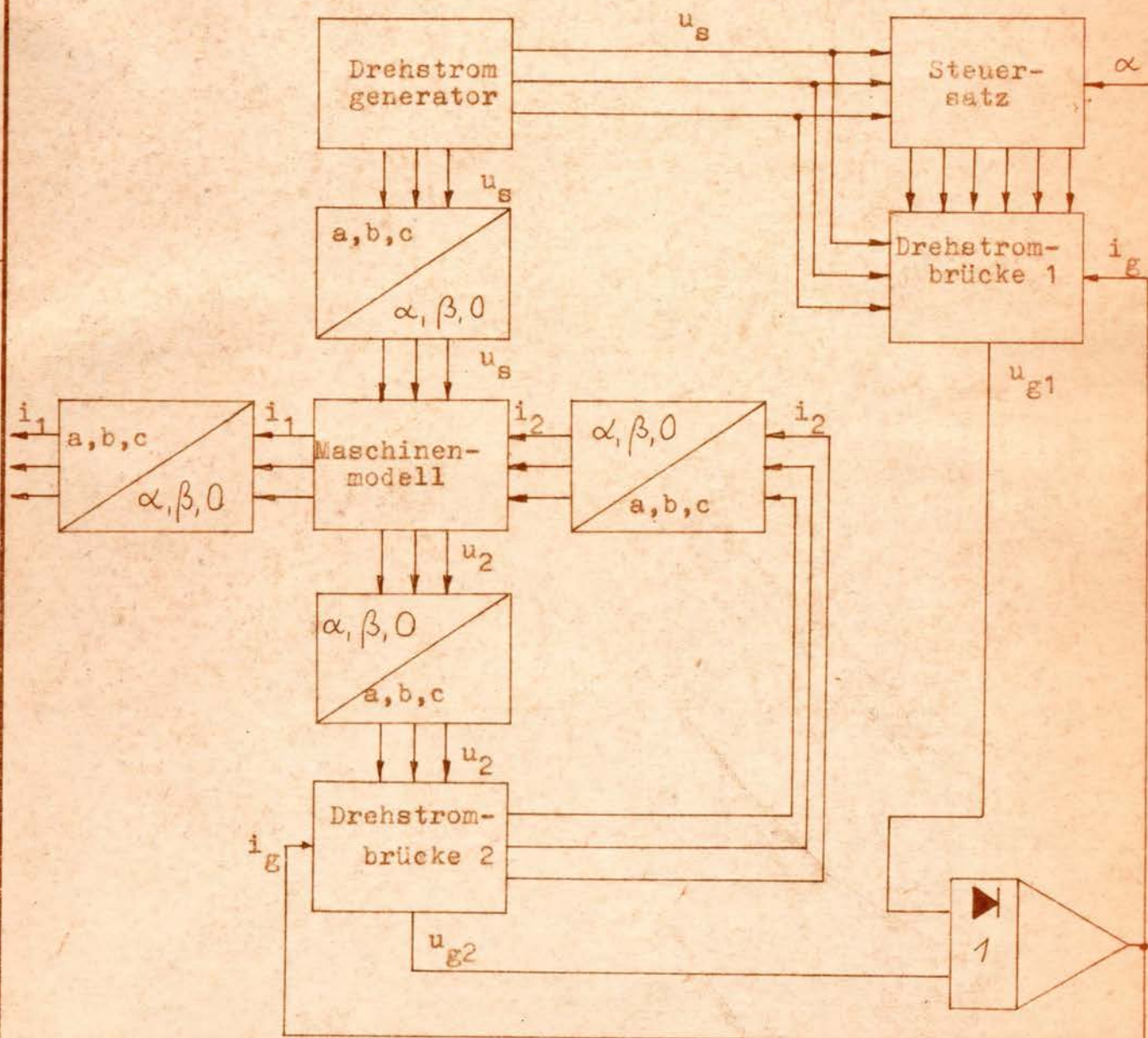
angepaßt werden. Zu beachten ist die Veränderung der Polarität der Spannungen gegenüber dem Ursprünglichen.

9. Quellenverzeichnis

- /1/ Schwarz, Jürgen : Untersuchung und Simulation von Störungen im Stellglied netzgeführter Stromrichter-antriebe
Diplomarbeit TU Dresden 1970
- /2/ Schönfeld, Rolf : Elektrische Antriebe
Lehrbriefe der TU Dresden
VEB Verlag Technik Berlin 1969



Prinzipschaltbild einer unterschynchronen Stromrichter-kaskade



Modell einer unterschynchronen Stromrichter-kaskade