

Interner Bericht  
DESY K-76/01  
März 1976

**DESY-Bibliothek**  
14. MAI 1976

ENDSTUFEN-SIMULATION DER QUADROPOL-STROMVERSORGUNG FÜR LANGSAME EJEKTION

von

I. Borchardt und M. Levy



ENDSTUFEN-SIMULATION DER QUADROPOL-STROMVERSORGUNG FÜR LANGSAME EJEKTION

von

I. Borchardt und M. Levy<sup>+)</sup>

---

<sup>+) Herr M. Levy ist technischer Leiter einer Fachschule in Israel</sup>

## Inhaltsverzeichnis

### Einleitung

#### 1. Beschreibung des Modells

##### 1.1 Der elektrische Kreis

##### 1.2 Das mathematische Modell

##### 1.5 Mathematische Beschreibung der Trioden-Dynamik

#### 2. Das Hybridprogramm

##### 2.1 Das Analogprogramm

##### 2.2 Das Digitalprogramm

#### 3. Ergebnisse und Diskussion

##### Literatur

## Einleitung

Die Stromversorgung für die langsame Quadrupol-Ejektion besteht bei DESY aus einer elektrischen Anlage mit einer Sender-Triode in der Endstufe. Dieser Bericht beschreibt die Simulation des elektrischen Kreises und einer zusätzlichen Regelung. Ziel dieser Regelung ist es, den zeitlichen Verlauf des Laststromes zu verbessern und dem Verlauf des Gitterspannungspulses anzupassen unter Berücksichtigung des Energiewirkungsgrades.

Im ersten Kapitel wird das elektrische Netzwerk beschrieben und es werden die beiden Methoden behandelt, mit denen sich die dynamischen Eigenschaften der Triode beschreiben lassen. Die Simulation auf der hybriden Rechenanlage HRS 860 enthält zwei Teile : den Analogteil und den in FORTRAN IV-HYBRID-geschriebenen Digitalteil. Diese beiden Programme und ihre zeitliche Verknüpfung werden in Kapitel 2 ausführlich dargestellt. Das dritte Kapitel enthält die Rechenergebnisse und Verbesserungsvorschläge für die Anwendung in der Praxis.

## 1. Beschreibung des Modells

### 1.1 Der elektrische Kreis

Die Endstufe der Stromversorgungsanlage für langsame Quadrupol-Ejektion, die zur Zeit bei DESY existiert, kann durch das folgende Blockdiagramm beschrieben werden :

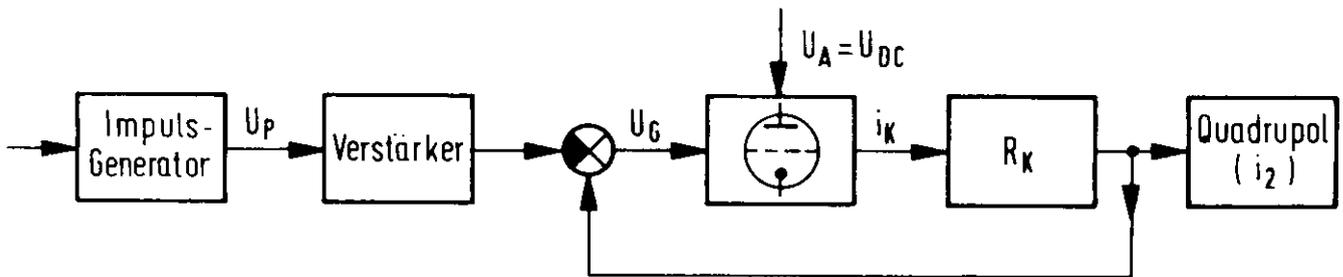


Bild 1: Endstufe der Stromversorgung für Quadrupol-Ejektion

In diesem System wird ein Quadrupollaststrom  $i_2$  mit Sollamplitude erzeugt, dessen zeitlicher Verlauf nur annähernd dem Verlauf der Gitterspannung folgt. Dafür ist der Kathoden-Rückkopplungswiderstand  $R_K$  verantwortlich, der gleichzeitig den Wirkungsgrad des Kreises bestimmt.

Um den zeitlichen Verlauf von  $i_2$  zu verbessern ohne den Wirkungsgrad zu reduzieren, wurde ein neues Verfahren vorgeschlagen, das folgendermaßen arbeitet :

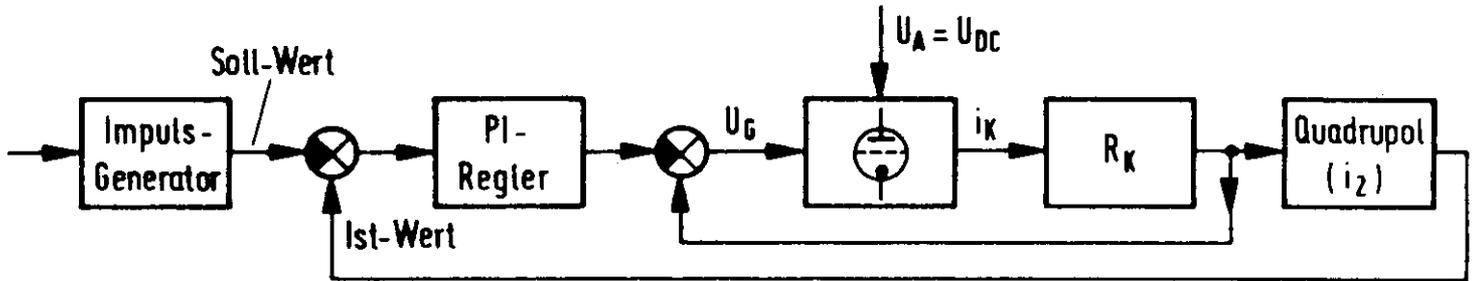


Bild 2: Entwurf für eine verbesserte Endstufe

Der neue Vorschlag soll vor den Laborversuchen mit Hilfe hybrider Simulationstechnik geprüft werden.

### 1.2 Das mathematische Modell

Die neue Endstufe wird durch das folgende elektrische Netzwerk beschrieben :

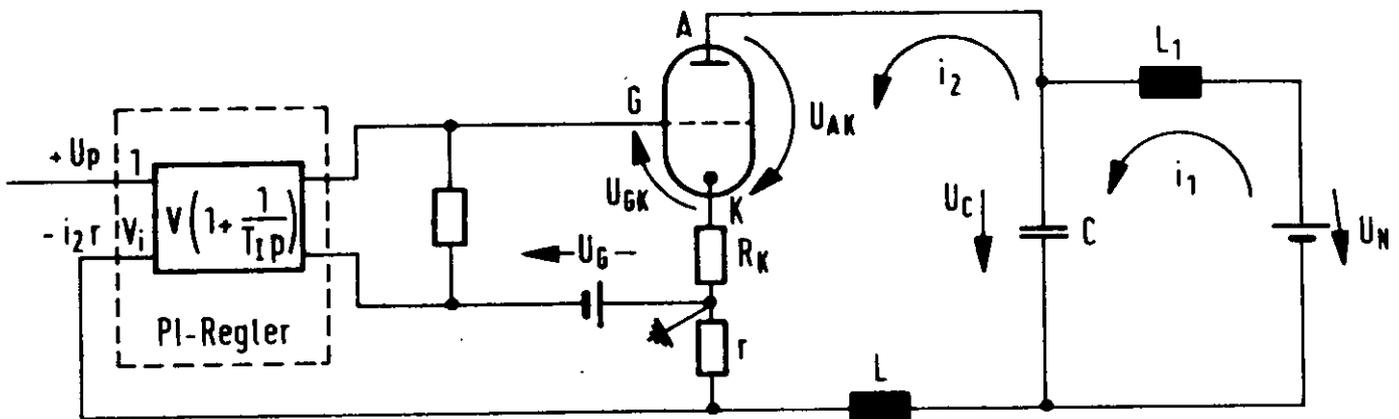


Bild 3: Elektrisches Netzwerk der neuen Endstufe

Daraus werden folgende Gleichungen abgeleitet, die das Modell vollständig beschreiben :

$$U_N = U_C + L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

$$i_1 - i_2 = C \frac{dU_C}{dt} \quad (2)$$

$$U_C = U_{RK} + i_2 R_K + i_2 \tau + L \frac{di_2}{dt} \quad (3)$$

$$U_{RK} = f(i_2, U_{GK}, g_1, g_2) \quad (4)$$

Für den Gitterkreis einschließlich Regler ergibt sich :

$$U_{GK} = V \left( U_d + \frac{1}{T_I} \int U_d dt \right) + U_G - i_2 R_K \quad (5)$$

wobei

$$U_d = U_p - V_i \tau i_2 \quad (6)$$

In Gleichung (5) entspricht der Klammerausdruck einem PI-Regler.  $V$  ist der P-Anteil,  $V/T_I$  der I-Teil. In Gleichung (6) wird der Anpassungsparameter  $V_I$  so justiert, daß  $U_d$  klein bleibt und der P-Anteil (Parameter  $V$ ) groß werden kann.

Der Wert von  $V$  wird nach oben hin begrenzt durch die Forderung  $U_{GK} \text{ überwiegend } \leq 0$  (es soll kein Gitterstrom fließen).

Die in den Gleichungen verwendeten Größen haben folgende Bedeutung:

- $U_N$  - Versorgungsgleichspannung
- $L_I$  - Glättungs-Induktivität
- $C$  - Kapazität
- $R_K$  - Gegenkopplungs-Kathoden- Widerstand
- $L$  - Quadrupol-Induktivität
- $r$  - Meßwiderstand für Istwert erfassung
- $U_G$  - Gitter-Gleichspannungsquelle (  $U_G < 0$  )
- $U_P$  - Ausgangsspannung des Puls generators
- $U_d$  - Differenz zwischen Ist- und Sollwert
- $T_I$  - I-Anteil des PI-Reglers
- $V$  - P-Anteil des PI-Reglers
- $V_I$  - Verstärkung des Meßwertes

$g_1$  und  $g_2$  in der Röhrenfunktion  $f$  beschreiben den leitenden bzw. gesperrten Zustand der Röhre. Die binäre Größe  $g_j$  kann nur die Werte 0 oder 1 annehmen. Sie wird bei der Simulation meistens durch Relais oder Schalter realisiert.

### 1.5 Mathematische Beschreibung der Trioden-Dynamik

Die Funktion  $f(i_2, U_{GK})$  gibt das dynamische Verhalten der Anodenspannung der Triode wieder. Es wurden zwei Methoden untersucht, um diese Funktion mathematisch zu formulieren:

#### a) Das " 3/2 - Gesetz "

Das aus der Literatur bekannte Gesetz [ 1 ] gibt den Zusammenhang zwischen Spannung  $U_{AK}$  und Strom  $i_2$  des Anodenkreises und der

Gitterspannung  $U_{GK}$ . Es kann geschrieben werden als

$$i_2 = \frac{1}{\mathcal{G}} (U_{AK} + \mu \cdot U_{GK})^{3/2} \quad (7)$$

für den Fall, daß die Triode leitet ( $g_1 = 1, g_2 = 0$ ).

Wir lösen Gleichung (7) auf nach  $U_{AK}$  und erhalten

$$U_{AK} = \mathcal{G} \cdot i_2^{2/3} - \mu \cdot U_{GK} \quad (8)$$

Die Faktoren  $\mathcal{G}$  und  $\mu$  können aus der Röhrencharakteristik (Siemens RS 2041) berechnet werden. Wir erhalten damit für Gleichung (4)

$$U_{AK} = 530 \cdot \sqrt[3]{i_2^2} - 34 \cdot U_{GK}$$

#### b) Ersatzspannungsquelle für den Gitterkreis

Methode a) wird empfohlen für Anwendungsfälle, in denen die Gitterspannung eine Wechselspannung mit verhältnismäßig kleiner Amplitude ist. Da aber in unserem Fall die Eingangsspannung zum Gitterkreis impulsartig ist, können wir nach [2] folgendes Ersatzschaltbild verwenden :

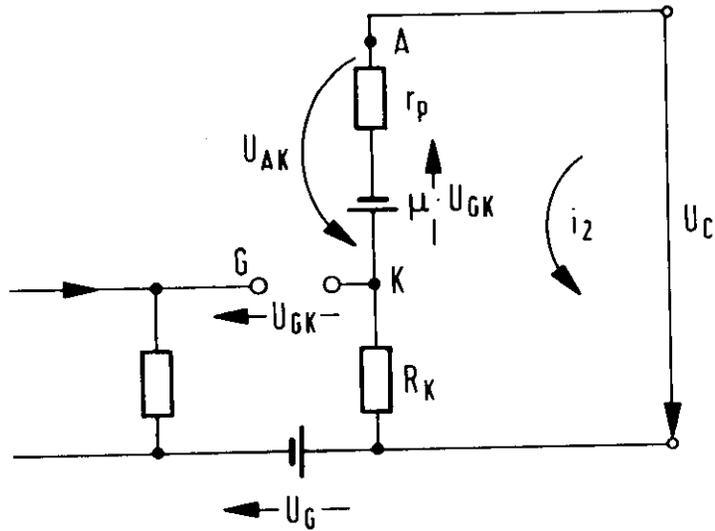


Bild 4: Trioden-Ersatzschaltbild

Aus dem Bild geht hervor, daß die Anodenspannung wie folgt beschrieben werden kann :

$$\left. \begin{aligned} U_{AK} &= r_p \cdot i_2 - \mu U_{GK} \quad \text{für } U_{AK} < U_C \\ U_{AK} &= U_C \cdot \left[ + r_i i_2 \right] \quad \text{für } U_{AK} \geq U_C \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Im Falle  $U_{AK} > U_C$  geht  $i_2$  gegen Null mit einer bestimmten Zeitkonstanten, deren Wert theoretisch nicht bekannt ist, die aber aus Oszillogrammen bestimmt werden kann, die an der bestehenden Anlage aufgenommen wurden. Diese Eigenschaft berücksichtigen wir in der obigen Gleichung durch einen zusätzlichen Innenwiderstand  $r_i$ , der wirksam wird, wenn die Triode nicht mehr leitet.

Wir schreiben (9) mit Hilfe der binären Größen  $g_1$  und  $g_2$  als geschlossenen Ausdruck:

$$\begin{aligned}
 U_{AK} &= g_1 (\tau_p i_2 - \mu U_{GK}) + g_2 (\tau_i i_2 + U_c) \\
 g_1 &= 1, \quad g_2 = 0 \quad \text{für } U_{AK} < U_c \\
 g_1 &= 0, \quad g_2 = 1 \quad \text{für } U_{AK} \geq U_c
 \end{aligned} \tag{9a}$$

Aus dem linearen Teil der Röhrencharakteristik können  $\mu$  und  $r_p$  bestimmt werden. Wir erhalten

$$\mu = 34, \quad r_p = 200 \text{ Ohm}$$

Das Systemverhalten wurde für beide Methoden untersucht und dabei ergaben sich übereinstimmende Resultate. Die Erklärung liegt darin, daß in unserer Problemsituation die Triode in einem sehr schmalen Strombereich ( $i_2 < 6 \text{ A}$ ) arbeitet mit  $U_{GK} < 0$ , in dem die Kennlinien linear und äquidistant sind. Da die erste Methode wegen der Exponentialfunktion nicht rein analog verwirklicht werden kann und die Lösungsgeschwindigkeit der Differentialgleichungen sehr stark von der Ausführungszeit für digitale Funktionsberechnungen abhängt, wurde die zweite Methode in unserem Simulationsverfahren verwendet.

## 2. Das Hybridprogramm

Grundsätzlich könnte man das Gleichungssystem mit der in Kapitel 1.3 beschriebenen 2. Triodendarstellung rein analog lösen. Da aber zunächst beide Triodensimulationsmethoden untersucht und verglichen werden mußten und für Methode 1 nur ein hybrides Lösungsverfahren in Frage kommt, wurde die hybride Programmform beibehalten.

Das Analogprogramm löst wie gewohnt die Differentialgleichungen und simuliert die Röhrenfunktion und den PI-Regler. Das Digitalprogramm übernimmt alle die Aufgaben, die vom Analogrechner nur ungenügend ausgeführt werden: die Steuerung des Rechenlaufs,

die zeitliche Steuerung des Impulsgenerators, Berechnung der Anfangs- und Parameterwerte, Potentiometereinstellung, Datenein- und ausgabe und Dialog mit dem System im Fehlerfall.

### 2.1 Das Analogprogramm

Führt man Gleichung (9a) in Gleichung (4) ein und löst man das ganze Gleichungssystem nach den höchsten Ableitungen auf, so erhält man

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1} (U_N - U_C) \quad (1a)$$

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} (i_1 - i_2) \quad (2a)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L} U_C - \frac{R_K + r}{L} i_2 - \frac{1}{L} U_{RK} \quad (3a)$$

$$U_{RK} = g_1 (\pi_p i_2 - \mu U_{GK}) + g_2 (\pi_i i_2 + U_C) \quad (4a)$$

$$U_{GK} = V (U_d + \frac{1}{T_I} \int U_d dt) + U_G - i_2 R_K \quad (5a)$$

$$U_d = U_p - V_I r i_2 \quad (6a)$$

mit den Anfangswerten  $i_1(0) = i_2(0) = 0$ ,  $U_C(0) = U_N$ .

Wir verwenden folgende Werte für die Parameter

$$U_N = 6 - 10 \text{ KV}; \quad L_1 = 4 \text{ H}; \quad C = 50 \mu\text{F}$$

$$L = 0,55 H \quad ; \quad R_K = 6 - 24 \Omega \quad ; \quad \tau = 0,1 \Omega$$

$$\tau_p = 200 \Omega \quad ; \quad \mu = 34 \quad ; \quad V \leq 400$$

$$U_G = -400 V$$

$u_p$  wird als Rechteckimpulsgenerator simuliert. Die Amplitude ist 2 V, die Impulsbreite 4 msec, die Pulsfolgefrequenz 20 msec.

Für die Regelparameter  $V$  und  $T_I$  sollen im Verlaufe der Rechnung geeignete Werte ermittelt werden. Sie werden deshalb mit Handpotentiometern so eingestellt, daß der Flankenabfall des Stromes  $i_2$  den Oszillographenbildern entspricht.

Für die analoge Simulation müssen die mathematischen Gleichungen in ein System von normierten Differentialgleichungen überführt werden. Die Amplitudennormierung erfolgt mit Hilfe der Bezugsgleichungen

$$i = i^* \cdot \hat{i} \quad , \quad U_j = u^* \cdot \hat{u}_j \quad \text{mit} \quad j = C, N, AK \quad (10a)$$

$$V = V^* \cdot \hat{V} \quad , \quad U_m = u_m^* \cdot \hat{u}_m \quad \text{mit} \quad m = GK, d, G$$

und die Zeitnormierung mit

$$t = B \cdot \tau \quad , \quad (10b)$$

wobei die mit \* bezeichneten Größen Bezugsgrößen sind und die mit  $\hat{\phantom{x}}$  bezeichneten Variablen normierte Maschinenvariablen sind.

$\tau$  ist die Maschinenzeit. Der Faktor  $B$  gibt das Verhältnis von Echtzeit zu Maschinenzeit an. Er wurde so gewählt, daß etwa 10 Perioden pro Rechenlauf in ca. 20 sec abgebildet wurden und dabei alle Normierungspotentiometer im erlaubten Bereich lagen.

Durch Umschaltung der Integriererzeitkonstanten konnte man dann jederzeit eine um den Faktor 10 schnellere Rechengeschwindigkeit für Ausgabe auf dem Oszillographen erreichen, die auch ein Triggern

auf einzelne Impulse erlaubte.

Führt man die Bezugsgleichungen (10) in die Differentialgleichungen (1a) bis (6a) ein, so erhält man :

$$\frac{d\hat{u}}{d\hat{\tau}} = \frac{\beta}{i^* L_1} u_N - \frac{\beta u^*}{i^* L_1} \hat{u}_c \quad (1b)$$

$$\frac{d\hat{u}_c}{d\hat{\tau}} = \frac{\beta i^*}{u^* C} \hat{i}_1 - \frac{\beta i^*}{u^* C} \hat{i}_2 \quad (2b)$$

$$\frac{d\hat{i}_2}{d\hat{\tau}} = \frac{\beta u^*}{L i^*} \hat{u}_c - \frac{\beta (R_K + r)}{L} \hat{i}_2 - \frac{\beta u^*}{L i^*} \hat{u}_{AK} \quad (3b)$$

$$\hat{u}_{AK} = g_1 \left( \frac{\tau_p i^*}{u^*} \hat{i}_2 - \frac{\mu u_i^*}{u^*} \hat{u}_{OK} \right) + g_2 \left( \hat{u}_c + \frac{\tau_A i^*}{u^*} \hat{i}_2 \right) \quad (4b)$$

$$\hat{u}_{OK} = \hat{V} \left( \hat{u}_d + \frac{\beta}{T_I} \int \hat{u}_d dt \right) + \frac{u_0}{u_1^*} - \frac{R_K i^*}{u_1^*} \hat{i}_2 \quad (5b)$$

$$\hat{u}_d = V^* \hat{u}_d = \frac{V^* |u_p|}{u_1^*} E(t) - \frac{V^* V_I r i^*}{u_1^*} \hat{i}_2 \quad (6b)$$

Im analogen Schaltplan Bild 5 werden die Parameter durch Servo- bzw. Handpotentiometer  $P_i$ , Eingangsbewertungsfaktoren  $S_i$  für die Verstärker/Integrierer und die Integriererzeitkonstanten dargestellt. Deshalb führen wir für die Parameterwerte Abkürzungen der Form ein :

$$\text{Wert} = P_i \times S_i$$

so daß wir die obigen Gleichungen verkürzt schreiben können :



$$\frac{d\hat{i}_1}{dt} = P_{20} S_{20} - P_{21} S_{21} \hat{u}_c \quad (1c)$$

$$\frac{d\hat{u}_c}{dt} = P_{31} S_{31} \hat{i}_1 - P_{30} S_{30} \hat{i}_2 \quad (2c)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_2}{dt} = & -P_{11} S_{11} \hat{i}_2 + g_3 \left( P_{10} S_{10} \hat{u}_c - P_{15} S_{15} \left\{ P_{12} S_{12} \hat{i}_2 + \right. \right. \\ & \left. \left. - P_{22} S_{22} \hat{u}_{GK} \right\} \right) - g_4 P_{13} S_{13} \hat{i}_2 \end{aligned} \quad (3c)$$

$$\hat{u}_{GK} = P_{42} S_{42} \left( \hat{u}_d + \int P_{45} S_{45} \hat{u}_d dt \right) + P_{40} S_{40} - P_{43} S_{43} \hat{i}_2 \quad (5c)$$

$$\hat{u}_d = P_{41} S_{41} E(t) - P_{44} S_{44} \hat{i}_2 \quad (6c)$$

Die Schaltfunktion  $g_3$  und  $g_4$  sind im Analogprogramm Digital-analog-Schalter, die von einem Analog-digital-Schalter angesteuert werden (Komparator-Schaltung). Es gilt :

$$\begin{aligned} \hat{u}_{AK} + \hat{u}_c > 0 & : g_3 = 1, g_4 = 0 \\ \hat{u}_{AK} + \hat{u}_c < 0 & : g_3 = 0, g_4 = 1 \end{aligned}$$

Anfangsbedingungen bei  $t = 0$  :

$$\begin{aligned} \hat{i}_1(0) = 0; \quad \hat{i}_2(0) = 0; \quad \hat{u}_c(0) = \frac{u_N}{u^*} \\ E(0) = 0; \quad \text{d. h. Registerbit PA2.6} = 0 \end{aligned}$$

Die Werte  $P_j \times S_j$  sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1 : Parameterliste

| $j$    | $P_j S_j$                     | $j$    | $P_j S_j$                        |
|--------|-------------------------------|--------|----------------------------------|
| 20, 21 | $\frac{\beta u^*}{i^* L_1}$   | 10, 15 | $\frac{\beta u^*}{L i^*}$        |
| 30, 31 | $\frac{\beta i^*}{C u^*}$     | 41     | $\frac{V^* u_p}{u_1^*}$          |
| 11     | $\frac{\beta(R_k + \tau)}{L}$ | 44     | $\frac{V^* V_I \tau i^*}{u_1^*}$ |
| 12     | $\frac{\tau_p i^*}{u^*}$      | 45     | $\frac{\beta}{T_I}$              |
| 13     | $\frac{\beta \tau_i}{L}$      | 40     | $\frac{u_G}{u_1^*}$              |
| 22     | $\frac{\mu u_1^*}{u^*}$       | 43     | $\frac{R_k i^*}{u_1^*}$          |
|        |                               | 42     | $\hat{V}$                        |

Die Bezugsgrößen bekommen folgende Werte :

$$u^* = 15 \text{ kV} \quad / u_1^* = 1 \text{ kV}$$

$$i^* = 10 \text{ A}$$

$$\beta = 10^{-2} \quad V^* = 400$$

Damit werden im Digitalprogramm Potentiometerwerte ausgerechnet.  
Ein Protokollbeispiel zeigt Bild 8.

## 2.2 Das Digitalprogramm

Für Hybridprogramme, bei denen der Analogrechner Differentialgleichungen löst und der Digitalrechner komplizierte, analog nicht darstellbare Funktionen löst, wurde bei DESY eine Standardprogrammform entwickelt, die den Namen "Standard-Dialogversion S1" (abgekürzt SD 1) trägt (Einzelheiten hierzu in [ 3 ] ).

```

PROBLEM: STRIMMVERS. F. QUAD. F. LANGSAME EJEKTION      11.03.76
SYSTEM - COMMON ( ES,ADR,P1,...;)
L1 , L2 , C , R / 1- 4/  4.000    0.550    50.000    0.100
RK , UN , UP , UG / 5- 8/  6.000    8.000     2.000    -0.300
UST1,RES1,PETA, IST/ 9-12/  1.000    0.000     0.002    10.000
UST , VST , PHO , MY /13-16/ 15.000   400.000   200.000   34.000
ARBEITS- COMMON ( EA,ADR,P1,...;)
DAU0,DAU1,DAU2,DAU3/ 1- 4/  0.0000    0.0000    0.0000   -0.0500
ADU0,ADU1,ADU2,ADU3/ 5- 8/  0.0000    0.0000    0.0000    0.0000
PO01,PO02,PO05,PO10/ 9-12/  0.0267    0.0750    0.0400    0.0545
PO11,PO12,PO15,PO16/13-16/ 0.0022    0.3000    0.0600    0.0545
PO20,PO00,PO52,PO51/17-20/ 0.0800    0.0267    0.2267    0.1333
TAM1, TL , MESA, MES1/45-48/ 20.00     4.00         2         800
MES2                / 49 /      200
COMMAND/ STEUER /
IR , IW , IGER, KO /      /      0         4         6         1
WERTE DER HANDPOTENTIALMETER
PO13 = 0.4503  PO14 = 0.9834  PO83 = 0.0885  PO84 = 0.0366
AUS HANDPOTENTIALMETERWERTEN BERECHNETE GRÖSSEN
V =  0.18E+03  R1 =  0.27E+05  V1 =   2.2      TI =  0.55E-01

```

Bild 8 : Datenprotokoll

Das SDI-Programm wird dem Programmierer in Lochkartenform zur Verfügung gestellt. Es enthält in vorprogrammierter Form ein Hauptprogramm, das aus verschiedenen Segmenten besteht und die Programmablaufsteuerung durchführt, und eine Reihe von Unterprogrammen, die über Standard-Kommandos aufgerufen werden können.

Dem Programmierer wird dadurch eine Menge Programmier- und Locharbeit abgenommen. Er kann sich voll auf die problemspezifischen digitalen Anweisungen konzentrieren und entwirft dafür

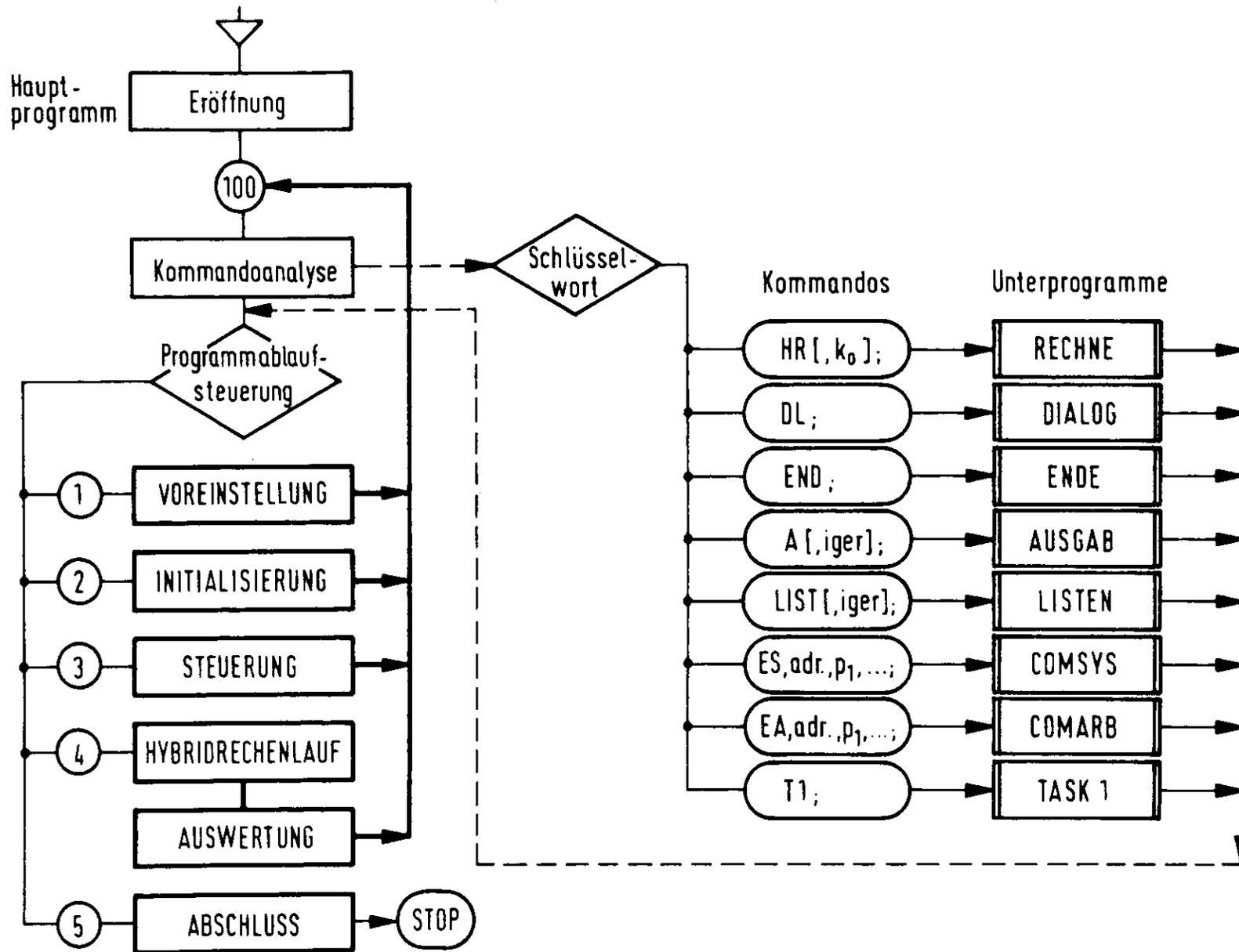
- benannte COMMON-Bereiche, in denen die physikalischen und programmintern benötigten Parameter definiert werden.
- digitale und hybride Anweisungen, die den hybriden Rechenlauf vorbereiten, steuern und die Berechnung der Funktionswerte ausführen, und die in die einzelnen Segmente des Hauptprogramms eingefügt werden
- digitale Anweisungen für den anwendungsspezifischen Dialogverkehr, insbesondere die Datenein/ausgabe, mit denen die Kommando- unterprogramme ergänzt oder definiert werden.

Bild 6 zeigt den Aufbau des Digitalprogramms. Im folgenden wird beschrieben, welche Aufgaben die drei wichtigsten Segmente und die Kommando- unterprogramme innerhalb des Hybridprogramms erfüllen.

#### Segment VOREINSTELLUNG

Hier werden nach den in Tabelle 1 zusammengestellten Beziehungen Potentiometerwerte berechnet und die zugehörigen Servopotentiometer eingestellt, falls sie nicht bereits den richtigen Wert anzeigen.

Nach der Voreinstellung des Digital-analog-Umsetzers, der für den Zeitablenkungssägezahn (für xy-Schreiber und Oszillograph) benötigt wird, wird das Analogprogramm in den Grundzustand gebracht und die Rechenablaufsteuerung vorbereitet.



**Bild 6** Aufbau des Digitalprogramms

Segment STEUERUNG

Die Maschinenzeit  $\tau$  wird im Hybridsystem diskretisiert und mit dem sogenannten Phasenzähler gemessen. Für diesen Zweck wird sie als Produkt von Zählwert ZW und Grundtakt GT dargestellt.

$$\tau = \frac{t}{B} = GT \times ZW$$

Im Segment STEUERUNG werden nun alle Zeitintervalle in diese Darstellung umgerechnet.

Die Länge der Rechenzeit wird durch B und die vorgegebene analoge Rechenzeit  $\tau_{\max}$  bestimmt

$$t_{\max} = B \cdot \tau_{\max}$$

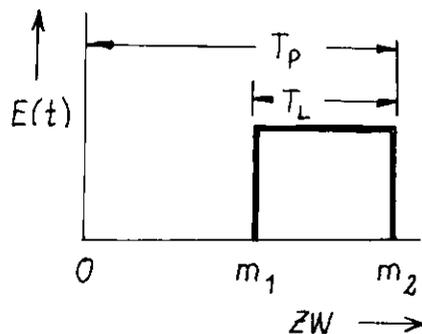
$t_{\max}$  wird durch den Impulsgenerator  $U_p$  in Perioden  $T_p = 20$  msec geteilt.  $U_p$  wird mit einem Einheitsrechteckgenerator und einem amplitudenproportionalen Potentiometer dargestellt :

$$U_p = u_p^* \cdot |\hat{u}_p| \cdot E(t)$$

Die Länge des Impulses ist  $T_L \approx 4$  msec (variabel).  $E(t)$  wird von einem Schalter erzeugt, der vom Registerbit PA 1.6 angesteuert wird (siehe Bild 5).

$$PA\ 1.6 : = 1 \quad E(t) \neq 0$$

$$PA\ 1.6 : = 0 \quad E(t) = 0, \text{ also } U_p = 0$$



Aus  $T_p$  und  $T_L$  werden gemäß nebenstehender Abbildung zwei zeitproportionale Zählwerte  $m_1$  und  $m_2$  berechnet. Dafür wird ein Grundtakt GTR für die Phase RECHNEN festgelegt.

$$m_2 = \frac{T_L \text{ [msec]}}{\beta \cdot GTR \text{ [msec]}}$$

$$m_1 = \frac{\bar{T}_\rho \text{ [msec]}}{\beta \cdot GTP \text{ [msec]}}$$

In der Maschinenzeit  $\tau_{\max}$  werden

$$m_a = \frac{\beta \cdot \tau_{\max}}{T_\rho}$$

Perioden  $T_p$  abgebildet.

Die Phasenablaufsteuerung verkettet die Integriererphasen und verwaltet die Betriebsarten "Einmal-Rechnen mit Pause" (ERP) oder "repetierendes Rechnen" (REP). ERP wird mit langsamer Rechengeschwindigkeit durchgeführt und ist für Kurvenausgabe auf dem XY-Schreiber geeignet. In REP soll ein möglichst stehendes Bild auf dem 6-Kanal-Oszillographen entstehen, also auf 10 x schnellere Rechengeschwindigkeit umgeschaltet werden. Als Umschaltkriterium gilt der vom Programm benutzer über das Kommando HR,  $k_0$ ; eingetippte Wert  $k_0 = 1$  oder 10. Umgeschaltet werden dadurch die Zeitkonstanten der Integrierer und gleichzeitig der Grundtakt GTR der Rechenphase.

Die Dauer der Integriererphasen PAUSE und HALT

in der Betriebsart ERP : PAUSE - RECHNEN - PAUSE

(Wiederholung nur nach Kommando HR)

und

in der Betriebsart REP : PAUSE - RECHNEN - PAUSE - RECHNEN ...

(Abbruch durch Kommando DL)

wird ebenfalls im Segment STEUERUNG festgelegt. Tabelle 2 zeigt die Größenordnung dieser Steuerparameter.

Tabelle 2 : Hybride Steuerparameter

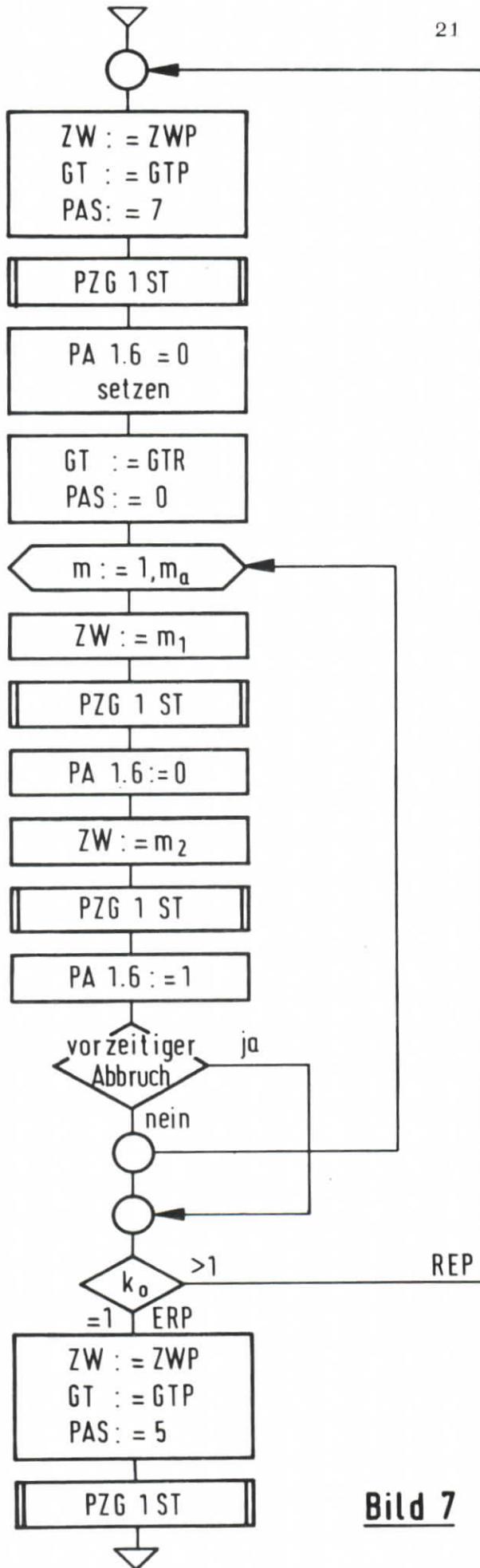
|                               |               | $K_o = 1$   | $k_o = 10$    |
|-------------------------------|---------------|-------------|---------------|
| Maschinenzeit                 | $\tau_{\max}$ | 20 sec      | ergibt sich   |
| Pausen-Grundtakt              | GTP           | 1 msec      | 1 msec        |
| Pausen-Zählwert               | ZWP           | 1000        | 300           |
| Rechen-Grundtakt              | GTR           | 1 msec      | 100 $\mu$ sec |
| Zählwert für $T_p$ -Intervall | $m_1+m_2$     | $\sim 2000$ | $\sim 2000$   |
| Anzahl der Perioden           | $m_a$         | $\sim 10$   | $\sim 10$     |
| halt-Grundtakt                | GTP           | 1 msec      | 1 msec        |
| halt-Zählwert                 | ZWP           | 1000        | --            |

#### Segment HYBRIDRECHENLAUF

Bild 7 zeigt ein schematisches Flußdiagramm, aus dem die Steuerung des Hybridrechenlaufs zu ersehen ist. Jeder Zeitabschnitt wird zunächst mit Definitionsanweisungen vorbereitet und dann durch das Standardunterprogramm PZGIST gestartet. PZGIST arbeitet eng mit dem Phasenzeitgeber zusammen und synchronisiert dabei den Ablauf des Digitalprogramms mit dem Ablauf des Analogprogramms. Einzelheiten über die Phasensteuerung entnehme man [5].

#### Kommandounterprogramme

Vom Standpunkt des an analoges Rechnen gewöhnten Programmierers geht beim Übergang vom analogen zum hybriden Rechnen ein großer Teil an Interaktivität (= Eingriffsmöglichkeiten) verloren. Erhalten bleibt zwar die Möglichkeit, während des Rechenlaufs Schaltplanänderungen vorzunehmen. Die Steuerung des Rechenlaufs übernimmt jedoch der Digitalrechner, d.h. alle manuellen Bedienungsvorgänge über das Bedienfeld des Analogrechners wie Potentiometer-einstellen, Betriebsartenwahl usw. werden bei der Rechnerkopplung wirkungslos.



Vorbereitung Pausenphase:  
 Dauer der Phase definieren  
 Kennzeichen für Phasenart  
 PAUSE setzen  
 Phasenstart

$E(\sim)$  initialisieren

Vorbereitung Rechenphase:  
 Dauer der Phase definieren  
 Kennzeichen für Phasenart  
 RECHNEN setzen  
 Perioden /Rechenzeit zählen

Länge des 1. Periodenabschnitts  
 definieren  
 Phasenstart

$E(\sim) = 0$

Länge des 2. Periodenabschnitts  
 definieren  
 Phasenstart

$E(\sim) = 1$

Abbruch des Rechenlaufs über  
 Handschalter

Betriebsart ERP oder REP ?

Vorbereitung Haltphase :  
 Dauer der Phase definieren  
 Kennzeichen für Phasenart  
 HALT setzen  
 Phasenstart

**Bild 7 Segment HYBRIDRECHENLAUF**

Dieser Interaktivitätsverlust wird erst dann wieder - und im umfangreicheren Maße - wettgemacht, wenn das Hybridprogramm dialogfähig ist. Der Programmbenutzer kann über die Tastatur einzelne Parameterwerte ändern und seine Datensätze protokollieren lassen. Die Rechnungen sind reproduzierbar, da Bedienfehler oder Rechenfehler ausgeschlossen sind, nachdem das Hybridprogramm einmal getestet wurde.

In der nachfolgenden Liste werden die Bedeutungen der Kommandos erläutert.

KOMMANDOLISTE / ANGABEN IN ( ) SIND OPTIONAL

| AKTION                                   | * KOMMANDO       |
|--|------------------|
| * * * * *                                | * * * * *        |
| HYBRIDRECHNEN MIT GESCHW. KO=11101100    | * HR (,KO);      |
| ÜBERGANG IN DEN STATIONÄREN ZUSTAND      | * DL;            |
| BEFIEH DES PROGRAMMS                     | * END;           |
| PROTOKOLLIERUNG DER PHYS. U. ANALOGEN    | *                |
| EINGABEDATEN AUF GER=211716              | * A (,GER);      |
| AUSGABE DER KOMMANDOLISTE AUF GER=211716 | * LIST (,GER);   |
| EINGABE DER SYSTEMPARAMETER IN           | *                |
| SYSTEM - COMMON                          | * ES,ADR,P1,...; |
| EINGABE DER ARBEITSPARAMETER IN          | *                |
| ARB. - COMMON                            | * EA,ADR,P1,...; |
| POTENTIALMETERWERTE AUSWERTEN            | * T1;            |
| * * * * *                                | * * * * *        |

Das Programm und ausführliche Programmprotokolle werden im hybriden Rechenzentrum unter dem Namen "Quadrupolstromversorgung für langsame Ejektion" aufbewahrt und können dort eingesehen werden.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Bild 9 zeigt den Quadrupolstrom  $i_2$  für den unregulierten Fall, wie er jetzt bei DESY vorhanden ist.

In den beiden nächsten Bildern (10 und 11) wird der Strom nur von einem P-Regler (I-Anteil ausgeschaltet, siehe Bild 5) bzw. einem PI-Regler beeinflusst. Dabei hat der Rückkopplungswiderstand  $R_K$  den gleichen Wert wie im unregulierten Fall.

In den nächsten Bildern wurde  $R_K$  auf 12 Ohm (Bild 12) und 6 Ohm (Bild 13) gesetzt. Die Regelparameter wurden nach den in Abschnitt 1.2 aufgestellten Kriterien neu optimiert. Bild 14 zeigt, daß die zu Bild 13 gehörende Gitterspannung  $U_{GK}$  im zulässigen Bereich  $U_{GK} < 0$  liegt.

Eine noch bessere Anpassung des Strompulses (Bild 15) an die Rechteckimpulsform von  $U_p$  erhalten wir, wenn die Gitterspannung infolge höherer Verstärkung kurzzeitig positiv wird (Bild 16).

Die Ergebnisse, die wir aus dieser Bildfolge ablesen, führen zu folgenden Erkenntnissen :

Der PI-Regler verbessert die Form des Stromimpulses. Dadurch entsteht die Möglichkeit, den Rückkopplungswiderstand  $R_K$  zu verkleinern und damit den Energiewirkungsgrad erheblich zu vergrößern. Die Forderung  $U_{GK} < 0$  begrenzt diese Verbesserungsmöglichkeiten.

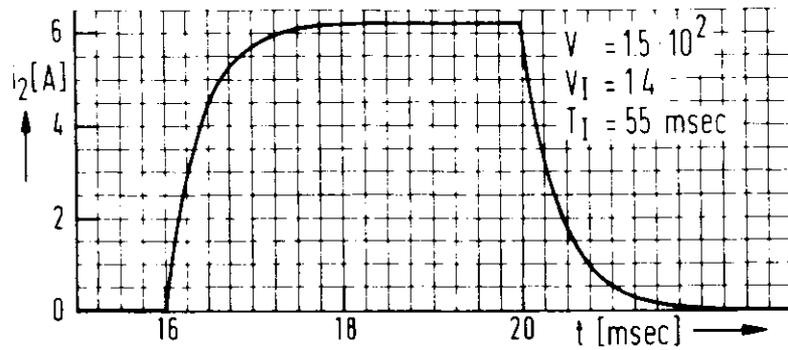


Bild 12 Quadrupolstrom mit  $R_k = 12 \Omega$

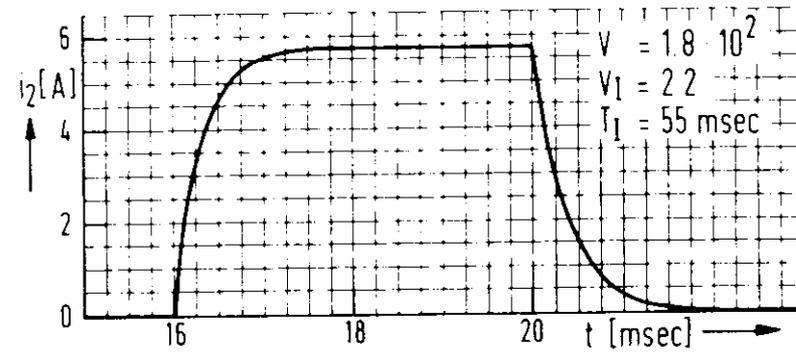


Bild 15 Quadrupolstrom bei höherer Verstärkung

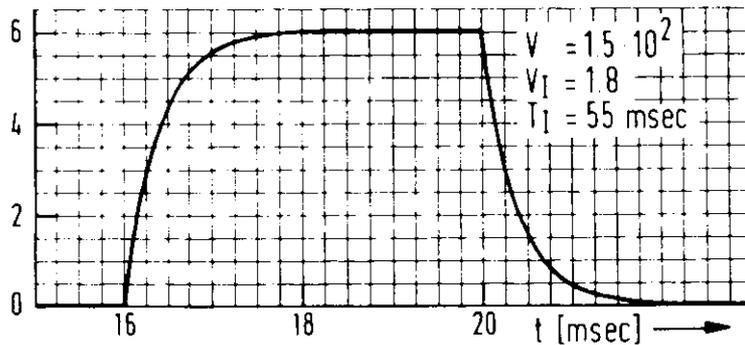


Bild 13 Quadrupolstrom mit  $R_k = 6 \Omega$

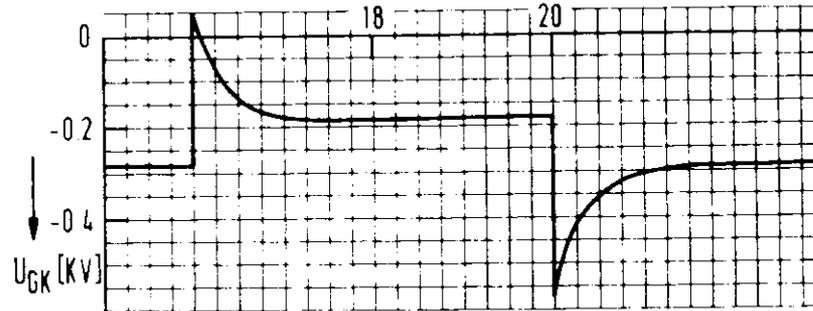


Bild 16 Gitterspannung bei höherer Verstärkung

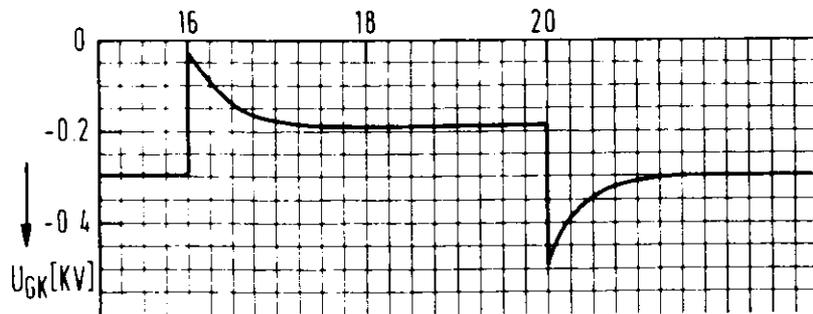
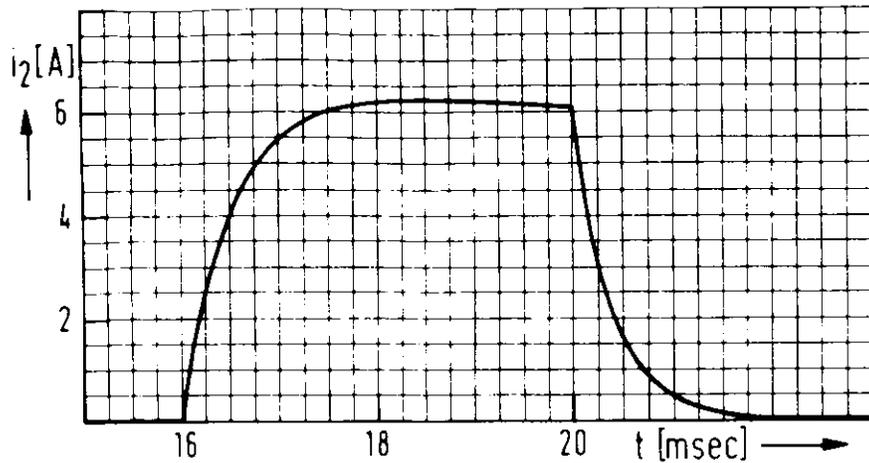
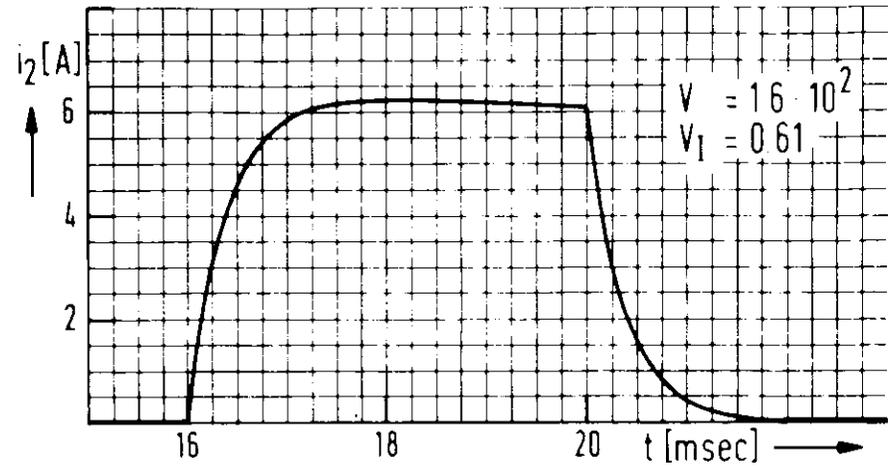


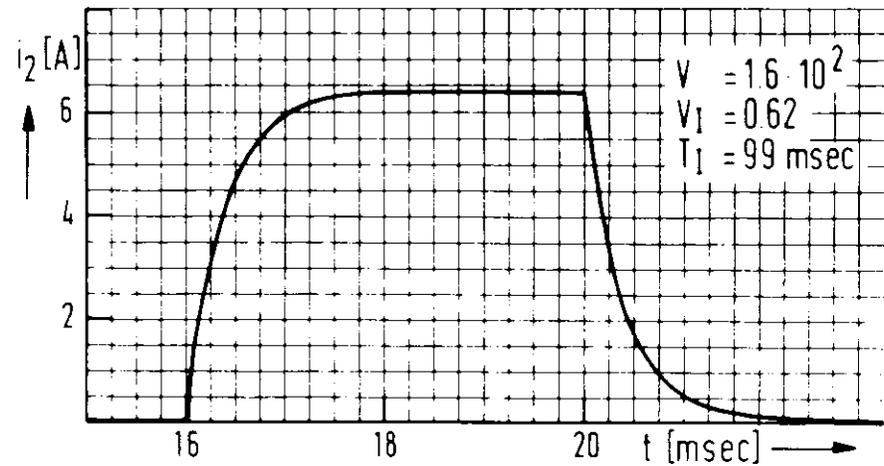
Bild 14 Gitterspannung bei  $R_k = 6 \Omega$



**Bild 9** Ungeregelter Quadrupolstrom mit  $R_K = 24 \Omega$



**Bild 10** Quadrupolstrom mit P-Regler



**Bild 11** Mit PI-Regler

Wir möchten Herrn Bothe und Herrn Pillat für Hilfe und anregende Diskussionen danken. Unser Dank gilt außerdem Herrn Maaß, der als Mitglied des Rechenzentrums bei der praktischen Durchführung der Aufgaben geholfen hat. Herr M. Levy möchte sich an dieser Stelle beim DESY-Direktorium bedanken für die Einladung, als Gastwissenschaftler an dieser Aufgabe mitwirken zu können.

#### Literatur

- [ 1 ] S. Seely : Electrontube circuits, McGraw-Hill, 1958
- [ 2 ] P.A. Neetson : Röhren in der Impulstechnik,  
Philips-Technische Bibliothek, 1961
- [ 3 ] I. Borchardt : Hybridrechnen bei DESY I,  
Interner Bericht DESY R1-76/1.