

Untersuchungen zur Elimination des Rechenzeiteinflusses auf die Regelgüte in Prozeßregelungssystemen unter Verwendung der prozeßorientierten Programmierungssprache PEARL

Dipl.-Ing. U. Mohr, Erlangen; Prof. Dr.-Ing. D. Popović, Bremen; Dr.-Ing. G. Thiele, Bremen

Zusammenfassung

Die notwendige Zeit zur Berechnung der Stellgröße wirkt sich in der Verschlechterung der Regelgüte aus, insbesondere wenn eine Software-Gleichkommaarithmetik angewendet wird. Dies kann nachträglich berücksichtigt werden, wenn die Stellgröße mit Hilfe eines Prädiktor- oder Filter-Algorithmus berechnet wird. Dadurch kann - bis auf die Verzögerung durch das Betriebssystem - die Stellgröße unverfälscht ausgegeben werden. Die Untersuchungen hierzu wurden auf dem Prozeßrechner PDP-11/45 mit der BBC-PEARL-Version PAS 2 durchgeführt.

Schlüsselworte: PEARL, Abtastregelung, Kalman-Filter, Prädiktor

Summary

The time necessary for computation of the actuating value of the controller can deteriorate its performance-index, especially when a floating point software package is used for computation. This can be compensated by computing the control-signal by the use of a predictor or of a filter algorithm. In this way the actuating value can be outputted with no distortion save the one caused by the time-delay due to the operating system. The relevant studies were done by the use of a PDP-11/45 process-computer, programmed in the BBC-version of PEARL.

Key words: PEARL, DDC, Kalman-Filter, Predictor

Einführung

Mit der Entwicklung moderner Systemtheorie entstand der Bedarf an der unmittelbaren Beobachtung sog. Zustandsgrößen des zu regelnden bzw. steuernden dynamischen Systems. Die optimale Steuerung und Regelung von Mehrgrößensystemen stützt sich auf die Zu-

standsraum-Methode, die die Rückführung des gesamten Zustandsvektors verlangt, der bei technischen Systemen nicht direkt meßbar ist. Deswegen werden die sog. Beobachter benötigt, die an Hand des gemessenen Ausgangssignals des Systems seinen Zustandsvektor errechnen. Sind Störgrößen bzw. Meßrauschen vorhanden, so wird die rein deterministische Beobachtungsaufgabe eine statistische Komponente enthalten, die zum Einsatz eines Zustandsschätzers führt. Die Aufgabenstellung dieser Arbeit besteht in der Beobachtung der "realen technischen Welt", d.h. eines technischen Prozesses, mit Hilfe eines Prozeßrechners (PDP-11/45), um den technischen Prozeß zu regeln. Zur Implementierung dieser Aufgabe wird die Realzeit-prozeßorientierte Programmierungssprache PEARL (BBC-Version PAS 2) eingesetzt. Der technische Prozeß selbst (die Lagerregelung mit einem Gleichstrommotor) wird auf einem Analogrechner (RA 770) nachgebildet.

Um der meßtechnischen Realität näher zu kommen, werden dem Prozeßrechner verrauschte, d.h. stochastisch gestörte Meßsignale seitens des Analogrechners geliefert, so daß hier eine statistische Lösung der Zustandsbeobachtung notwendig ist. Als Zustandsbeobachter wird der Kalman-Filter gewählt, und zwar zwei seiner Versionen: der Prädiktor und der Filter selbst.

Die Programmierungssprache PEARL wurde gewählt, weil sie blockorientiert und somit relativ einfach zu programmieren ist. Andererseits bietet die Sprache die Möglichkeit der Programmierung von parallelen Realzeit-Prozessen und deren zeitliche Einplanung und, was nicht vernachlässigt werden darf, der Selbstdokumentation.

Andererseits sollten dadurch einige als nachteilhaft zu betrachtende PEARL-Eigenschaften näher untersucht werden, wie z.B.

die mögliche Verringerung der Optimalität der Programme nach ihrer Übersetzung und der Verlängerung der Rechenzeit der programmierten Algorithmen durch das benötigte Betriebssystem.

Mathematische Problemdefinition

Die im vorhergehenden Abschnitt bereits gestellte Aufgabe wird, wie im Bild 1 gezeigt, mathematisch definiert.

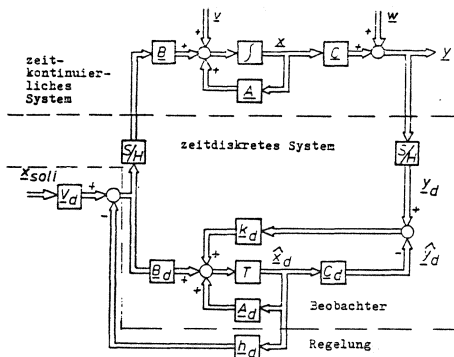


Bild 1: Darstellung der Zusammenschaltung eines Beobachters und des zu beobachtenden Systems

Der technische Prozeß wird als ein dynamisches Mehrgrößensystem im Zustandsraum durch

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A}(t) \cdot \underline{x}(t) + \underline{B}(t) \cdot \underline{u}(t) + \underline{v}(t) \quad (1)$$

und

$$\underline{y}(t) = \underline{C}(t) \cdot \underline{x}(t) + \underline{w}(t) \quad (2)$$

dargestellt, wobei $\underline{x}(t)$, $\underline{u}(t)$, $\underline{y}(t)$, $\underline{w}(t)$ und $\underline{v}(t)$ der Zustands-, Eingangs-, Ausgangs-, Meßstörungen- und Systemstörungsvektor, und $\underline{A}(t)$, $\underline{B}(t)$ und $\underline{C}(t)$ die System-, Steuer- und Beobachtungsmatrix sind.

Da die Ein- und Ausgangsgrößen des Systems vom Prozeßrechner fortlaufend abgetastet werden, so benötigt man seine zeitdiskrete Beschreibung im Zustandsraum:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A}(k) \cdot \underline{x}(k) + \underline{B}(k) \cdot \underline{u}(k) + \underline{v}(k) \quad (3)$$

und

$$\underline{y}(k) = \underline{C}(k) \cdot \underline{x}(k) + \underline{w}(k), \quad (4)$$

die im Prozeßrechner als ein Programm implementiert wird.

Die Aufgabe des Rechners ist:

1. den Schätzwert des Zustandsvektors $\underline{x}(k)$ fortlaufend zu errechnen, d.h. für $k=1,2,3,\dots$, und
2. durch Rückführung des errechneten Zustandsvektors eine Regelung des Systems

durchzuführen.

Die Zustandsgrößen des gewählten technischen Systems, d.h. des Gleichstromantriebes, (Bild 2) sind

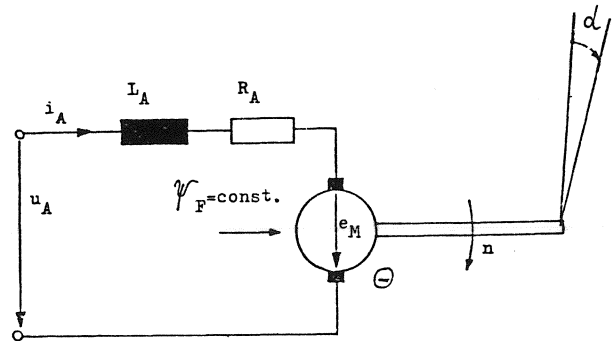


Bild 2: Schematische Darstellung eines Gleichstromantriebes

der Ankerstrom i_A , die Drehzahl n , die Lage und die Stellgröße u_A . Die mathematischen Beziehungen zwischen diesen sind

$$\dot{i}_A = -\frac{c \cdot \Psi_F}{L_A} \cdot n - \frac{R_A}{L_A} \cdot i_A + \frac{1}{L_A} \cdot u_A \quad (5)$$

$$\dot{n} = \frac{k \cdot \Psi_F}{\Theta} \cdot i_A \quad (6)$$

$$\dot{\alpha} = k_\alpha \cdot n, \quad (7)$$

wobei R_A , L_A den Widerstand und Induktivität des Ankerkreises, Ψ_F den als konstant angenommenen Fluß der Erregungswicklung und c , k und k_α gewisse Konstante darstellen. Im Zustandsraum kann das System durch

$$\dot{\underline{x}}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & -\frac{c \cdot \Psi_F}{L_A} & 0 \\ \frac{k \cdot \Psi_F}{\Theta} & 0 & 0 \\ 0 & k_\alpha & 0 \end{bmatrix} \underline{x}(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_A} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_A(t) \quad (8)$$

und

$$\underline{y}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}(t) \quad (9)$$

beschrieben werden, wobei der Zustandsvektor $\underline{x}(t)$ wie folgt definiert ist

$$\underline{x}(t) = (i_A \quad n \quad \alpha)^T. \quad (10)$$

Als Beobachter (Bild 1) wurde hier, bedingt durch die verrauschten Meßdaten, der Kalman-Filter gewählt.

Problemlösung

Bei dem Einsatz des Kalman-Filters zur Errechnung der Stellgröße eines Regelsystems mit dem geschätzten Wert des Zustandsvek-

tors in der Rückführung kann man folgende zwei Algorithmen unterscheiden:

1. den Prädiktor-Algorithmus, bei dem die Stellgröße $u(k)$ nur von dem vorhergesagten Schätzwert $\hat{x}^*(k)$ abhängig ist, d.h. es gilt

$$u(k) = V \alpha_{\text{soll}} - \underline{h}^T \cdot \hat{x}^*(k) \quad (11)$$

mit $\underline{h}$ als Rückführungsvektor und

2. den Filter-Algorithmus, bei dem der Meßwert $y(k)$ zusätzlich berücksichtigt wird, so daß die Stellgröße $u(k)$ unter Ansatz des korrigierten Schätzwertes $\hat{x}(k)$ berechnet wird als

$$u(k) = V \alpha_{\text{soll}} - \underline{h}^T \cdot \hat{x}(k) \quad (12)$$

Vorteil des erstgenannten Algorithmus ist die kurze Zeitspanne Δt , die zwischen der Messung und der Ausgabe der Stellgröße liegt (Bild 3). Von Nachteil ist die große Varianz des Schätzfehlers des vorhergesagten Schätzwertes $\hat{x}^*(k)$, da die Einwirkung einer Störung erst beim übernächsten Schritt berücksichtigt wird (Bild 3). Dagegen vergeht zur Korrektur des vorhergesagten Schätzwertes $\hat{x}^*(k)$ und zur Berechnung der Stellgröße $u(k)$ beim reinen Filter-Algorithmus eine recht große Zeitspanne, in der sich natürlich das zu regelnde System weiterbewegt (Bild 3). Hier wird jedoch der Schätzwert mit weit kleinerer Fehlervarianz errechnet, da die Einwirkung einer Störung bereits im nächsten Abtastschritt berücksichtigt wird (Bild 3).

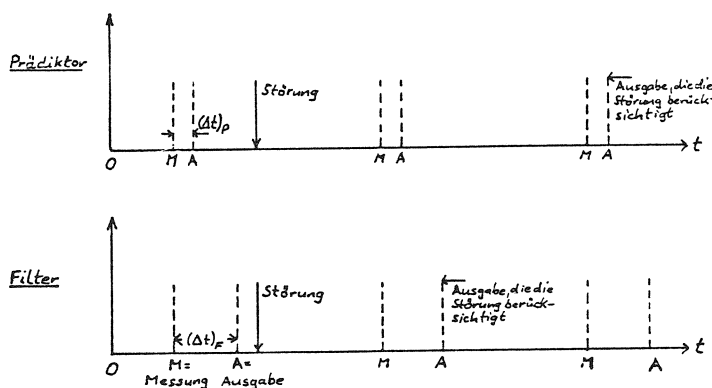


Bild 3: Zeitdiagramm des Prädiktors und des Filters

Besondere Vorteile des durch Prädiktion korrigierenden Kalman-Filters werden aus folgenden Überlegungen deutlich. Bei dieser Filter-Version wird die Stellgröße $u(k)$ nicht zum Zeitpunkt t_k , sondern um Δt verzögert ausgegeben, bis zu welchem Zeitpunkt der Wert $u(k-1)$ gilt, d.h. es gilt, generell,

$$\hat{x}^*(k+1) = \underline{A}(t_{k+1}, t_k) \hat{x}(k) + \underline{B}(t_k + \Delta t, t_k) u(k-1) + \underline{B}(t_{k+1}, t_k + \Delta t) \cdot u(k). \quad (13)$$

Sind die Stellgrößenamplituden relativ klein, so kann der Einfluß von Δt vernachlässigt werden; trotzdem ist aber die Korrektur nach (13) problematisch. Um die auszugebende Stellgröße dem Uhrtakt des Betriebssystems von 5 ms anzupassen, wird die Bewegung des Systems im Intervall $[t_k, t_{k+1}]$ in die Abschnitte $[t_k, t_k + \Delta t]$ und $[t_k + \Delta t, t_{k+1}]$ aufgeteilt und geschrieben

$$\hat{x}^*(t_k + \Delta t) = \underline{A}(t_k + \Delta t, t_k) \hat{x}(t_k) + \underline{B}(t_k + \Delta t, t_k) \cdot u(k-1) \quad (14)$$

und

$$\hat{x}^*(t_{k+1}) = \underline{A}(t_{k+1}, t_k + \Delta t) \hat{x}(t_k + \Delta t) + \underline{B}(t_{k+1}, t_k + \Delta t) \cdot u(k). \quad (15)$$

Somit wird die aktuelle Stellgröße $u(k)$ mit Hilfe von (11) und (14) errechnet und ausgegeben, und anschließend die Bewegung der Regelstrecke im Zeitintervall $[t_k + \Delta t, t_{k+1}]$ geschätzt.

Bei der Feststellung des Ausgabezeitpunktes von $u(k)$ muß berücksichtigt werden, daß

1. der geschätzte Zustandsvektor korrigiert,
2. bis zur Ausgabe eine Prädiktion durchgeführt und

3. die Stellgröße berechnet werden muß.

Diese zur Korrektur notwendige Rechenzeit kann mit Hilfe der TIME-Prozedur bestimmt werden. In unserem Beispiel der Lageregelung beträgt sie 45 ms. Unsererseits wurde eine Verzögerung von 50 ms gewählt, um eventuell noch die Abspeicherung von Zwischenergebnissen zu ermöglichen. Unter Berücksichtigung der Verzögerung der D/A-Wandler-Ausgabe durch das Betriebssystem ergibt sich schließlich eine Aufteilung des gewählten Zeitintervalles $t_k - t_{k-1} = 1$ s in $t = 50,35$ ms und $t_k - t_{k-1} - \Delta t = 949,65$ ms. Zusammenfassend ausgedrückt wird zum Zeitpunkt t_k zur Korrektur von $\hat{x}^*(t_k)$ durch

Messung

$$\hat{\underline{x}}(k) = \hat{\underline{x}}^*(k) + \underline{K}(k) [\underline{y}(k) - \underline{c}^T \hat{\underline{x}}^*(k)] \quad (16)$$

für die Prädiktion bis zum Ausgabezeitpunkt (15) und zur Berechnung der Stellgröße

$$u(t_k + \Delta t) = V \cdot \alpha_{\text{soll}} - \underline{h}^T \hat{\underline{x}}^*(t_k + \Delta t) \quad (17)$$

benutzt. Anschließend wird gemäß (16) die Vorhersage des Zustandsvektors für den nächsten Abtastzeitpunkt t_{k+1} berechnet. Bei den Berechnungen wurden zur Ermittlung des Fehlerverstärkungsfaktors $\underline{K}(k)$ die von Kalman definierten Gesichtspunkte berücksichtigt.

Es ist zu bemerken, daß die Berechnungen nach (14), (16) und (17) innerhalb von Δt abgeschlossen werden müssen, und daß anschließend nach (15) eine Prädiktion bis zum nächsten Abtastpunkt vorgenommen werden muß. Dabei kann die Berechnung von $\underline{K}(k)$ auch off-line erfolgen.

Experimentelle Ergebnisse

Wie bereits erwähnt, stellt

bei der Regelung mit Prozeß-

rechnern, wenn der aktuelle Wert $\underline{y}(k)$ zur Berechnung der Stellgröße $\underline{u}(k)$ eingesetzt wird, die Zeitdifferenz zwischen der Messung und der Ausgabe der Stellgröße ein prinzipielles Problem dar. Es hat sich gezeigt, daß mit einem gemäß (15) modifizierten Kalman-Filter, insbesondere bei stochastischen Meßstörungen, ein verallgemeinerter Beobachtungsfehler auf etwa 50% des Wertes ohne diese Korrektur reduziert werden kann. Um den Einfluß dieser Rechenzeit zu verdeutlichen, wurde die Ausgabe der Stellgröße um $\Delta t = 50, 70, 120, 220, 320$ und 520 ms verzögert. Die entsprechenden Kurvenscharen für die unkorrigierte Filter-Version sind im Bild 4 dargestellt.

Bei dem Einsatz von Beobachtungsalgorithmen wurde folgende Definition eines verallgemeinerten Beobachtungsfehlers eingeführt:

$$K_0 = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n \|\tilde{\underline{x}}_{\text{norm}}(k)\|^2} \quad (18)$$

mit

$$\tilde{\underline{x}}_{\text{norm}}(k) = \underline{x}_{\text{norm}}(k) - \hat{\underline{x}}_{\text{norm}}(k) \quad (19)$$

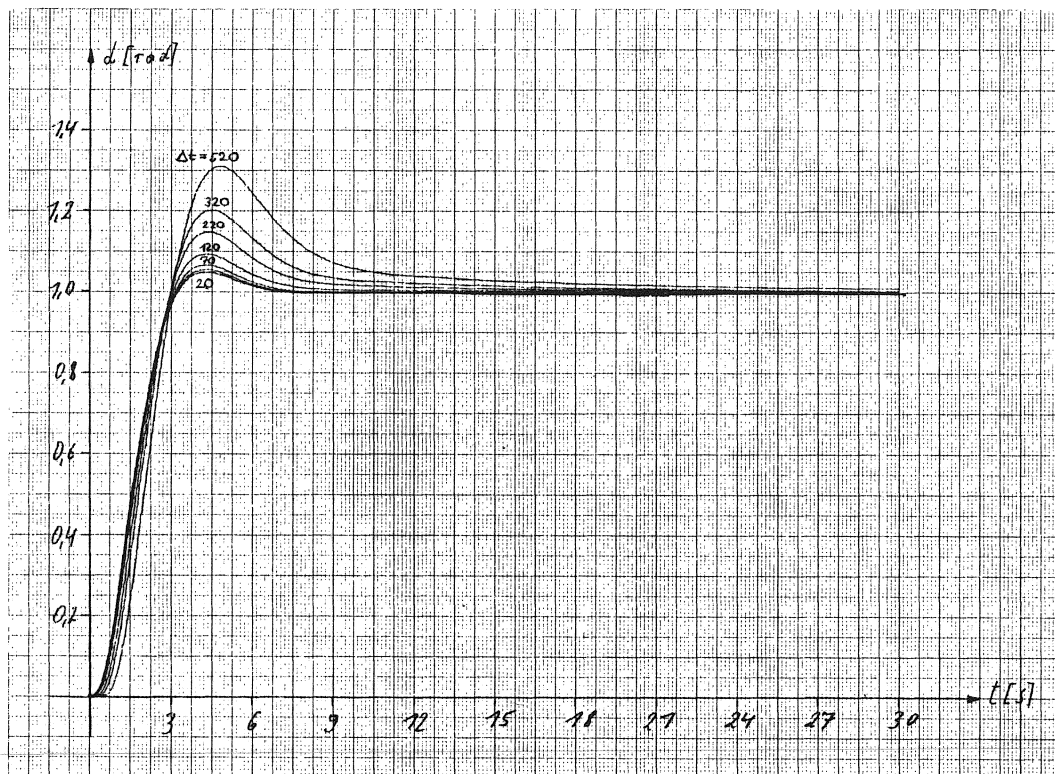


Bild 4: Einfluß der Ausgabe-Verzögerungszeit Δt auf das Regelverhalten eines dynamischen Systems

wobei die durch "norm" gekennzeichneten Größen die auf den jeweiligen Maximalwert bezogenen Systemgrößen sind.

Für den Fall, daß bei Berechnung der Stellgröße gemäß dem (1-Schritt-) Prädiktor-Algorithmus (11)

direkt der bereits bekannte Prädiktionswert $\hat{x}(t_k)$ verwendet, d.h. der Meßwert $y(t_k)$ noch nicht berücksichtigt wird, wurde eine Rechenzeit von 0,2 ms (meßtechnisch mittels Oszillograph) festgestellt, die sich auf mehr als 15 ms vergrößert, wenn gemäß dem Filter-Algorithmus (16) die Zustandschätzung zunächst korrigiert und anschließend die Stellgröße gemäß (12) errechnet wird, d.h. der aus regelungstechnischen Gründen wegen der um ein Intervall früheren Berücksichtigung von Störungen vorteilhafte Schätzalgorithmus angewandt wird.

In Bild 5 wird die Regelung gemäß dieser beiden Schätzalgorithmen mit der gemäß dem modifizierten Kalman-Filteralgorithmus nach (14) und (17) verglichen.

$y(0)/_{\text{rad}}$	-0,5	0	0,5	Mittelwert
$K_0(\text{Präd.})$	0,241	0,345	0,242	0,2759=100%
$K_0(\text{Filt.})$	0,547	0,443	0,644	0,5449=197,5%
$K_0(\text{Pr./Filt.})$	0,369	0,349	0,138	0,2853=103,4%

Bild 5: Vergleich des Prädiktor-, Filter- und modifizierten Filteralgorithmus an Hand des verallgemeinerten Beobachtungsfehlers K_0 für Sprungantworten des Regelungssystems

Im Vergleich zu dem Prädiktor ist der Beobachtungsfehler, bedingt durch die Berücksichtigung des aktuellen Meßwertes, bei einem Filter etwa doppelt so groß. Dagegen kann dieser Fehler durch zusätzliche Korrektur um etwa 50% reduziert werden. Dabei ist die Erfassung der Daten, die Durchführung der Berechnungen, sowie die Einplanung der Ausführung der Ausgabe der Stellgröße $u(k)$ zu einem festen, bekannten Zeitpunkt mit einfachen PEARL-Anweisungen auch nachträglich möglich.

PEARL-Programme

In Bild 6 ist die programmtechnische Realisierung der Regelung mittels modifiziertem Kalman-Filter-Algorithmus in PEARL veranschaulicht.

```
1  MODULE KALFIL OPTIONS (/40,MM3,EFPI);
2  SYSTEM;
.
.
14  SYSEND;
15  PF2ELEM;
.
/* TASK-DEKLARATIONEN */
26  DCL HAUTP      TASK PF12(8) OPTI2NS(MAIN);
27  DCL EE2EACHTF  TASK PF12(9);
28  DCL AUSGAE     TASK PF12(10);
.
80  HAUTP:TASK;
.
/* EINPLANUNG DER TASK EE2EACHTF */
90  EVERY TA DURING SIMT ACTIVATE (EE2EACHTF);
.
.
107  END; /* ENDE DEF TASK EE2EACHTF */
108  EE2EACHTF:TASK;
.
/* MESSUNG*/
113  D0 I=0 T0 3;
114  TAKE (ADV(I)) INTO (AX(I));
115  END;
/* EINPLANUNG DER TASK AUSGAE */
116  AFTEF 50 MILSEC ACTIVATE (AUSGAE);
/* BERECHNUNG VON U(TK+DELTA) */
.
.
132  U= . . .
/*ENDE DEF BERECHNUNG VON U(K+DELTA) */
133  . . .
/* TASK AUSGAE WIRD NICHT VON U */
/* STATEMENT 133 AKTIV */
.
.
177  END; /* ENDE DEF TASK EE2EACHTF */
178  AUSGAE:TASK;
179  SEND (DAV(0)) PF2M (U);
181  END; /* ENDE DEF TASK AUSGAE */
.
.
412  PF2EEND;
413  M2EEND;
```

Bild 6: PEARL-Programm zur Regelung mittels modifiziertem Kalman-Filter

Die Zeit zur Berechnung der Stellgröße $u(t_k+\Delta t)$ ist kürzer als die feste Zeit von 50 ms, nach der die mit Statement 116 jeweils in der Task BEOBACHTER eingeplante Task AUSGABE aktiviert wird. Die Task BEOBACHTER wird in der Task HAUTP zyklisch zu den Zeitpunkten $k \cdot T_a$, $k=0,1,2,\dots$, eingeplant, die weiterhin die Steuerung des Analogrechners und die Protokollausgabe übernimmt.

In Bild 7 ist das Programm angegeben, das zur Bestimmung der Ausgabeverzögerung durch das Betriebssystem verwendet wurde. Die Messung wurde dabei so durchgeführt, daß die Zeitverzögerung auf einem Oszillographen abgelesen werden konnte. Dieser wurde durch das über das Digitalausgabe-Interface DR 11-C ausgegebene Singal getriggert und die Zeit zwischen 2 folgenden Analogausgaben gemessen. Bis auf eine Verzögerung durch die Ausgabe-Hardware und die bei dieser Messung nicht eingehende Zeit für die

Zeitverwaltung ist der Abstand zwischen den 2 Digitalausgaben die gesuchte Zeitverzögerung der Ausgabe. Durch zyklische Wiederholung konnte die Zeitdifferenz an einem stehenden Oszillographenbild abgelesen werden.

```

1  MODULE TEST2 OPTIONS(/40,MM0,EFP);
2  SYSTEM;
3  DEVADF AD01009=0;
4  .
5  DAW(0:1)M0DE(12): <- AD01009*(0:1);
6  DEVADF DF11C=167770L;
7  DIGAUS EIT(2): <-> DF11C*2*14;
8  .
10 SYSEND;
11 PF0ELEM;
12 DCL A EIT(2)INIT('11'E);
13 DCL B BIN FL0AT(24)INIT(-0.5);
14 DCL C EIN FIXED(15);
15 .
21 DCL HAUPT TASK OPTIONS(MAIN);
22 DCL T1 TASK;
23 DCL T2 TASK;
24 DCL T3 TASK;
25 HAUPT:TASK;
26 EVEFY 100 MILSEC ACTIVATE (T1);
27 END; /* HAUPTTASK */
28 T1:TASK;
29 A:=\A;
30 E:=-E;
31 /* FL0ATING T3 INTEGER */
32 CALL FDAW(E,C);
33 SEND(DIGAUS)FF0M(A);
34 ACTIVATE(T2);
35 ACTIVATE(T3);
36 END; /* TASK T1 */
37 T2:TASK;
38 SEND (DAW(0)) FF0M (C);
39 END; /* TASK T2 */
40 T3:TASK;
41 SEND (DAW(1)) FF0M (C);
42 END; /* TASK T3 */
43 PF0BEND;
44 M0DEND;

```

Bild 7: Testprogramm zur Ermittlung der durch das PEARL-Betriebssystem verursachten Ausgabeverzögerung

Adressen der Autoren:

Dipl.-Ing. U. Mohr, Siemens AG, Ingenieurkreis Erlangen

Prof.Dr.-Ing. D. Popović, Universität Bremen, 28 Bremen 33, Postfach 330 440

Dr.-Ing. G. Thiele, Universität Bremen, 28 Bremen 33, Postfach 330 440

Literatur

- [1] BBC-PEARL-Subset, Sprachbeschreibung, 1977
- [2] Ludyk, G., Theorie dynamischer Systeme Elitera-Verlag, Berlin, 1977
- [3] Föllinger, O., Regelungstechnik, 3. Auflage, AEG-Telefunken, Berlin, 1980
- [4] Brammer, K., Siffling, G., Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung, R. Oldenbourg Verlag, München, 1975
- [5] Mohr, U., Kalman-Filter: Probleme der Implementierung der Genauigkeit und der Stabilität Diplom-Arbeit, Universität Bremen, 1982