

PRAKTISCHE ANWENDUNG UND ERGEBNISSE VON ARMAX ART MODELLIERUNG IN LAGERUNGSSYSTEMEN

J. PREZENSZKI—J. TOKODI

Lehrstuhl für Verkehrsbetrieb Fakultät der Verkehrswesen

Technische Universität, H-1521, Budapest

Eingangen am 2. Juni, 1989

Abstract

The fundamental duty of powerful organisation of the distribution is the high level developing — founding on a good working systemmodell — of the direction subsystem. The best method for the laying the foundation of the storage systems was established by earlier researches is the system indentification. The authors adapted and applied the identification techniques, for analysing internal and external processes of storage systems and for developing the proper control algorithm. The best results are described.

I. Einleitung

Bei der wirksamen Organisation räumlicher Verteilungssysteme besteht eine der grundlegenden Aufgaben in der auf einem gut funktionierenden Systemmodell fußenden Ausgestaltung des Steuerungsuntersystems. Aufgrund früherer Forschungsergebnisse der Verfasser ließ sich feststellen, daß sich für die Begründung des Steuerungsalgorithmus von TUL-Systemen — also auch von Lagerungssystemen — die Systemidentifikation unter Anwendung der Methoden der stochastischen Systemtheorie am besten eignet.

Die in Verbindung mit der Systemidentifikation entwickelten, modernen Verfahren leisten infolge ihres allgemeinen Charakters bei Erkenntnis und Beschreibung der verschiedenartigsten physikalischen Erscheinungen und Objekte Hilfe, und sind auch für die Nachbildung im Modell von sogenannten »schlecht stukturierten« Materialströmungssystemen geeignet.

2. Interpretation der Lagerungssystems aus der Sicht der Identifikation

Infolge der Beziehung zur Umwelt ist das Lagerungssystem eine Einheit mit selbständigen Input-Output-Prozessen (Einlagerung und Auslagerung). Lagerungssysteme haben im vollen Verteilungsprozeß eine selbständige Struktur (Mikrostruktur), deren Funktionsmechanismus in mikrologistischer Annäherung untersucht werden kann.

Von mikrologistischem Gesichtspunkt aus wird das Lager als ein durch Input-Output-Prozess strukturiertes System betrachtet. Daraus folgt, daß aus dieser Sicht der Betrieb des Lagers mathematisch mit Hilfe eines Input-Output-Vektorenpaars angenähert werden kann.

Die beiden Vektoren haben so viele Dimensionen, wie das Lager Input-Output-Prozesse hat. Zwischen den beiden muß ein funktioneller Zusammenhang bestehen, durch den der Input-Vektor in den Output-Vektor überführt wird. Diese Funktion ist das Transferfunktionsmodell, das im Optimalfall die gleiche mathematische Struktur haben soll wie die Struktur des Lagers aus mikrologistischer Sicht.

Die Transferfunktion ist *stochastisch*, da wegen der »schlechten Strukturierung« des Systems die einzelnen Prozesse nur als stochastische Prozesse behandelt werden können. Die Transferfunktion ist *diskret*, weil den Prozessen in Zeitintervallen Proben entnommen werden, und diese Proberihe die a priori (vorherige) Informationsmenge bildet. Die Transferfunktion ist *dynamisch*, weil sie dafür geeignet ist, die Verzögerung des Output im Verhältnis zu dem Input durch einen einzigen Parameter, die Totzeit zu berücksichtigen.

Neben dem Gesagten ist das System auch rauschvoll, weil die Umwelteinflüsse bei einem Lager im voraus nicht berücksichtigt werden können. Zur Verfeinerung der Modelle kann das Systemrauschen auch getrennt untersucht, und anhand der ermittelten Rauschstruktur ein selbständiges Rauschmodell gebildet werden. In diesem Falle wird das Systemrauschen auf ein allgemeines, — für den reellen Betrieb jedes Systems charakteristischen — sog. weißes Rauschen als Rauschquelle zurückgeführt (Abb. 1). Die so erhaltenen Modelle sind entweder,

- ökonomische Modelle, für die Ermittlung der Struktur in mikrologistischem Sinne, der Betriebskennwerte des Lagers durch die Untersuchung seines Verhaltens in der Vergangenheit, oder
- Real-time-Modelle, die gestatten, durch momentane Messungen der Größen der Prozesse im Lager für darauffolgende kurze Perioden Vorhersagen zu geben. In diesem Falle muß das Modell so gestaltet sein, daß in dessen nach

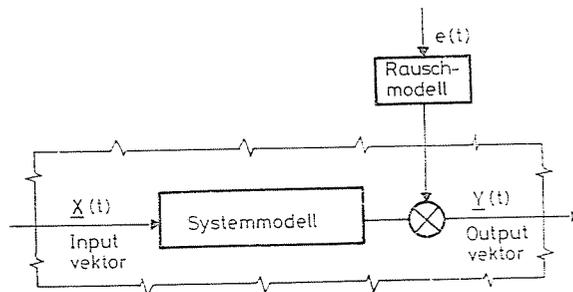


Abb. 1. Aufbau des mikrologistischen Modells

Outputprozeßwerten geordneter Form auf der rechten Seite nur vergangene Prozeßwerte vorkommen.

Für das Transferfunktionsmodell ist weiterhin *Linearität* kennzeichnend; das bedeutet, daß es als eine lineare Kombination von Input-Output Prozeßwerten entsteht. Inwiefern die genannten Eigenschaften für reelle Lagerungsprozesse gültig sind, wird durch die praktische Anwendung entschieden.

3. Übersicht der Kennwerte des untersuchten Lagers Beschreibung des Lagerungssystems

In der Abhandlung wird als Beispiel die Analyse der äußeren (Output- und Input Förderungs-) und inneren (Einlagerungs-) -prozesse des TUL-Systems im Falle eines Lebensmittel-Großhandellagers gezeigt. Von dem gewählten Lager werden 1260 Kleinverkaufseinheiten und Gaststätten in zehn Bezirken von Budapest mit 3000 Warensorten versorgt.

Die Waren werden mit Straßen- und Schienenfahrzeugen angeliefert, die Ausförderung erfolgt nur mit Straßenfahrzeugen. Das Lager gilt also hinsichtlich seiner äußeren Beziehungen als ein System mit zwei Eingängen und nur einem Ausgang. Mit Straßenfahrzeugen wird nur an Wochentagen, mit der Eisenbahn an jedem Tag der Woche transportiert. Die Anordnung des Lagers ist in Abb. 2 dargestellt.

Die Lieferungen werden überprüft und sortiert. Die sortierten Waren werden in drei Hauptteile des Lagers einbefördert:

- *im Lagerteil für Hochlagerung* (Hochlager) werden die Waren nach Artikelgruppen getrennt eingelagert; Auflademaschinenbedienung;
- *der Lagerteil für Blocklagerung auf Ladepaletten* wird durch Schußmaststapler bedient; das System beruht auf Besetzung der freien Plätze innerhalb der Zone;
- auch *der Lagerteil mit Reihenlagerung* wird durch Karren bedient, bei Besetzung der freien Plätze in den Reihen.

Sammeln und Vorbereitung von Datenreihen für die statistische Analyse. Für die Analyse des Betriebs des Lagerungssystems wurden die Tagesumsatzdaten der Periode von Anfang Mai 1984 bis Mitte Januar 1985 herangezogen.

Die Daten des *Einbeförderungsprozesses* werden anhand des sog. Abnahmebuches gesammelt, in dem Angaben über Masse, Umfang, Stückzahl angegeben sind. Um das mikrologistische Materialstrommodell herzustellen, mußten sämtliche Größen einheitlich auf Massendimension umgerechnet werden.

Die Daten des *Ausförderungsprozesses* konnten wegen des Betriebsmechanismus des Lagers nicht postenweise gesammelt werden, da die für Klein-

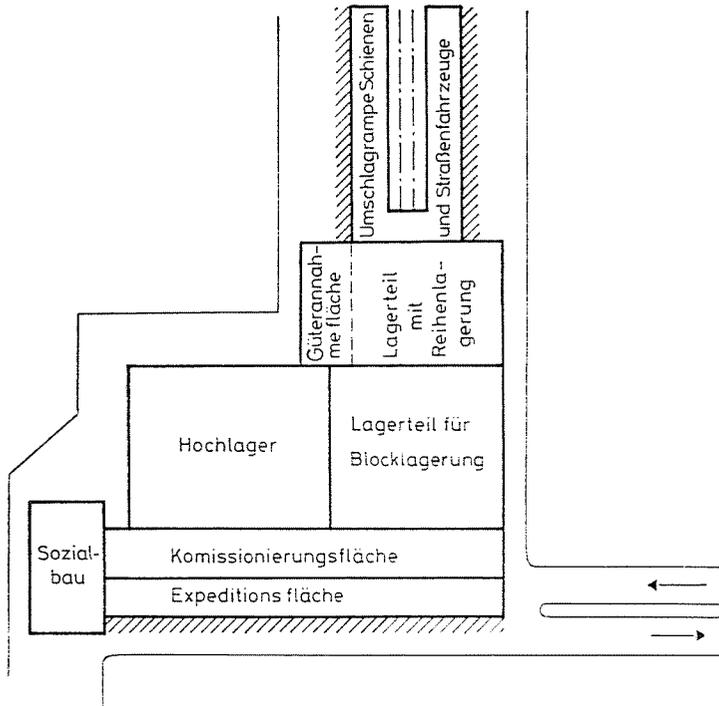


Abb. 2. Anordnung des Lagerungsbetriebs

handelseinheiten bestimmten Waren im Kommissionierungsraum gleichzeitig gesammelt werden.

Die vertriebenen Warenartikel wurden auf Grund der ABC Analyse der Lebensmittelkaufhäuser in 99 Artikelgruppen eingeordnet, aus denen vier Hauptgruppen gebildet wurden:

— elementare Verbrauchsartikel	55,5%
— Konserven	27,2%
— Gewürzwaren	4,9%
— Süßwaren	7,7%

(Die überbleibenden 4,7% waren sonstige Waren geringer Menge, die im weiteren in der Kategorie »Sonstiges« berücksichtigt wurden.)

Bezüglich der äußeren Beziehungen wurde das Lagerungssystem mit Hilfe des Modells in Abb. 3 angenähert.*

* In der Abhandlung wird das System in besonderen Abschnitten zuerst von außen, dann von innen betrachtet im Modell nachgebildet. Wo das möglich ist, wird zwischen den beiden Modellierungstechniken eine Parallele gezogen.

Wegen der *Stationaritätsanforderung* mußten an den ursprünglich angesetzten Zeitreihen Änderungen vorgenommen werden. Die Ursache war eine wesentliche Abweichung des Transportbetriebs am Wochenende von dem an dem Wochentage. Deshalb mußten bei allen Zeitreihen die einen verhältnismäßig geringen Verkehr darstellenden Transporte am Wochenende in die Wochentagswerte »eingeschmolzen« werden. Das wurde durchgeführt, in dem die Verkehrsdaten der Ausförderung zu dem Transportverkehr am letzten geleisteten Arbeitstag, die Verkehrsdaten der Einbeförderung zu dem Verkehr

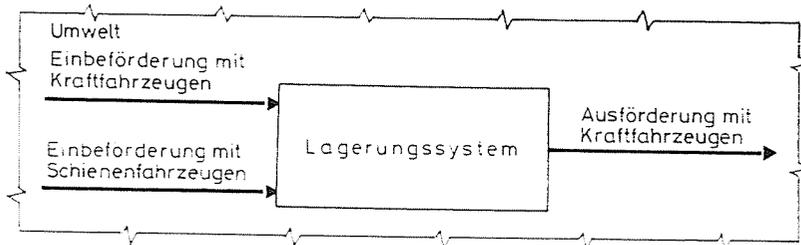


Abb. 3. Modell des untersuchten Lagerungssystems aus der Sicht der äußeren Beziehungen

am darauffolgenden ersten Arbeitstag hinzugesetzt wurden. Diese Arbeitstage waren im allgemeinen bei Ausförderung ein Freitag und bei Einbeförderung ein Montag. Diese Arbeitstage wurden gewählt, weil in der Verwaltungsarbeit des Lagers die Transporte am Wochenende an diese Tage angeschlossen wurden, wie sich auch die Kommissionierungs- und Speditionstätigkeiten an diese Tage knüpften. Abb. 4 zeigt die in dieser Weise modifizierten Zeitreihen der Transportprozesse.

4. Identifikations-Voruntersuchungen und Ergebnisse

Der *Nachbildung im Modell vorangehend* wurde die Normalität der Prozesse kontrolliert (Geary-Test); das Signifikanzniveau war befriedigend. Die *Linearität* wurde durch Berechnung des Kreuzdispersionskoeffizienten [1] nachgeprüft. Es wurden Meßzahlen unter 0,4 erhalten, die lineare Hypothese war also annehmbar. Infolge der Gesagten wurden die Materialstörsprozesse als für statistische Untersuchung geeignet betrachtet.

Korrelationsanalyse

Mit Hilfe der Korrelationsanalyse wurde die Struktur der Prozesse ermittelt. Im Rahmen derselben wurde eine Vorfilterung durchgeführt, die gestattete, charakteristische Periodizitäten abzuschätzen. Das gemeinsame Er-

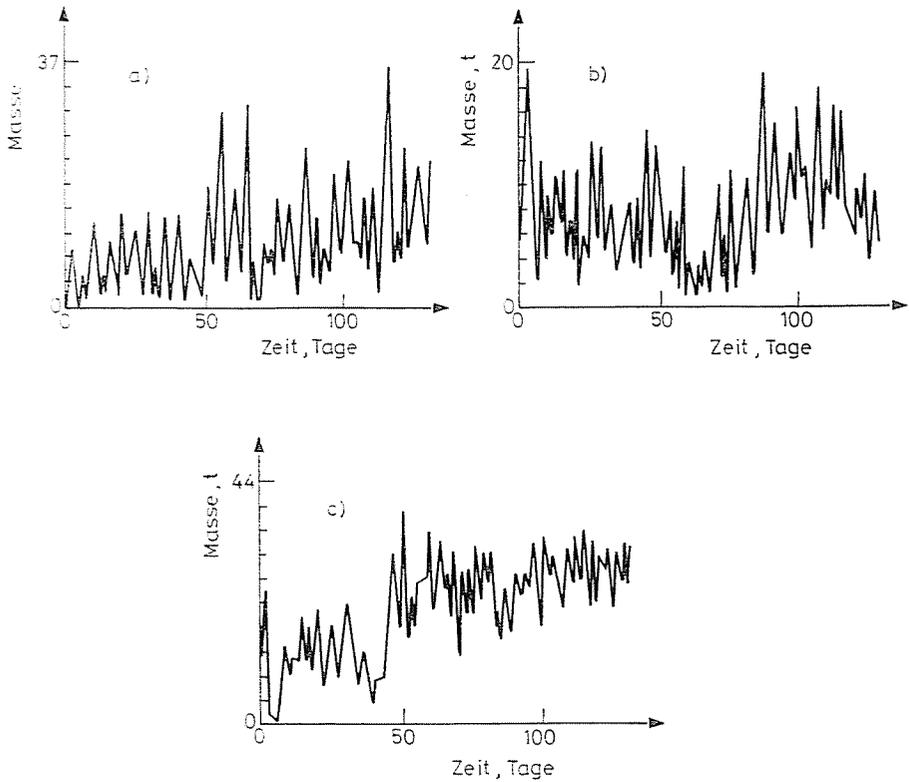


Abb. 4. Die modifizierten Zeitreihen der Ein- und Ausförderungsprozesse im Falle eines Lagers

gebnis der Filterung nach Einheits- und Periodenintervallen ist am günstigsten wenn die Streuung der erhaltenen Reihe minimal ist.

Die Autokorrelationsfunktion des *Ausförderungsprozesses* hat bei $T = 5, 3$ und 9 Tagen Spitzenwerte, daher wurde die Vorfilterung für diese Perioden durchgeführt. Die Streuungen der erhaltenen Reihen sind in Tabelle 1 zu sehen. Der kleinste Wert ergibt sich bei $D = 0, d = 1$, so wurde dem Einheitsintervall gemäß das einmal differenzierte Modell angenommen. Abb. 5 zeigt die

Tabelle 1

Streuungswerte der *Ausförderung* mit Kraftfahrzeugen

d \ D	D	1		
	0	$\tau = 3$	$\tau = 5$	$\tau = 9$
0	895,08	728,2	721,84	836,0
1	713,02	946,08	889,63	1001,07
2	1212,62	1574,92	1501,0	1725,97

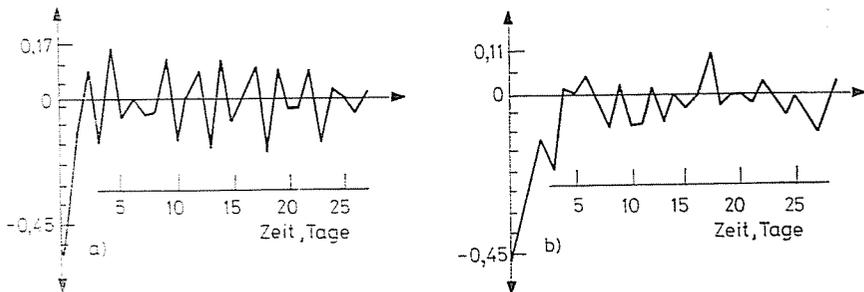


Abb. 5. Autokorrelations- (a) und partielle Autokorrelations- (b) Funktionen der gefilterten Zeitreihe ($d=1, D=0$) der Ausförderung mit Straßenfahrzeugen

Autokorrelations- und partialen Autokorrelationsfunktionen des in dieser Weise gefilterten Prozesses.

Die Untersuchung der Filterung nach $T = 2, 5$ und 9 war durch die Korrelationsanalyse der *Einbeförderung mit Straßenfahrzeugen* begründet. Die Ergebnisse einer der obigen ähnlichen Analyse sind in Tabelle 2 zusammen-

Tabelle 2
Streuungswerte der Einbeförderung mit Kraftfahrzeugen

d	D			
	0	1	1	1
		$\tau=2$	$\tau=5$	$\tau=9$
0	418,01	459,13	488,2	511,58
1	445,71	631,68	646,63	666,82
2	764,75	981,47	1123,79	1173,0

gefaßt. Die geringste Streuung ergibt sich bei $d = 0, D = 0$, es mußte jedoch die Filterung $d = 1, D = 0$ gewählt werden, weil sich die Autokorrelationsfunktion der ungefilterten Reihe mit der Struktur der Autokorrelationsfunktion keines einzigen genannten Zeitreihenmodells identifizieren ließ. Die Autokorrelations- und partialen Autokorrelationsfunktionen des in dieser Weise gefilterten Prozesses sind in Abb. 6 veranschaulicht.

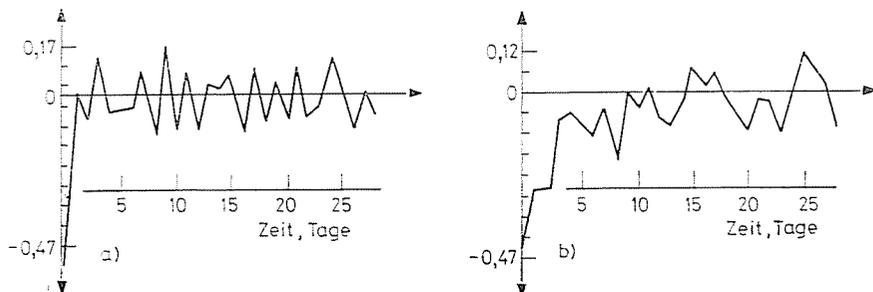


Abb. 6. Autokorrelations- (a) und partielle Autokorrelations- (b) -funktionen der gefilterten Zeitreihen ($d = 1, D = 0$) der Einbeförderung mit Straßenfahrzeugen

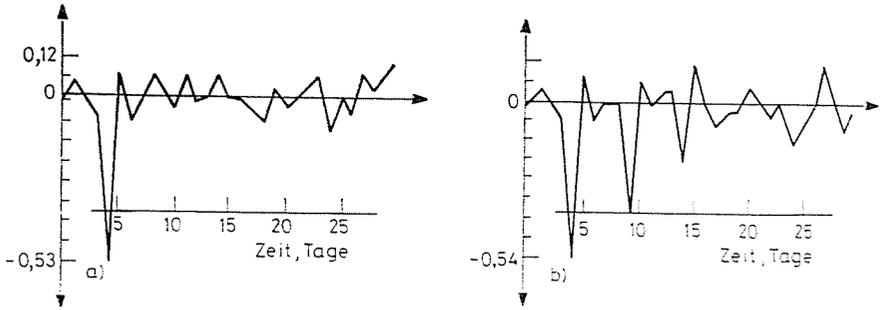


Abb. 7. Autokorrelations- (a) und partielle Autokorrelations- (b) -funktionen der gefilterten Zeitreihe der Einbeförderung mit der Eisenbahn

Für eine Korrelationsanalyse der *Einbeförderung mit Schienenfahrzeugen* war die Filterung nach $T = 5$ erforderlich. Die Autokorrelationsfunktionen der gefilterten Zeitreihen $d = 0$, $D = 0$ und $d = 0$, $D = 1$ waren gleich annehmbar. Die Streuungswerte sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Die weiteren

Tabelle 3

Streuungswerte der Einbeförderung mit Schienenfahrzeugen

d	D	
	0	1
	$\tau = 5$	
0	632,37	696,54
1	868,46	996,15
2	1451,03	1748,55

Untersuchungen mußten also für beide Filterungstechniken unternommen werden. Abb. 7 zeigt die Autokorrelations- und partialen Autokorrelationsfunktionen der nach $d = 0$, $D = 1$ gefilterten Zeitreihe. (Im weiteren wird das Modell für die in dieser Weise gefilterte Zeitreihe aufgestellt.)

Die partialen Autokorrelationsfunktionen der gefilterten Zeitreihen wurden abgeschätzt. Die erhaltenen Abschätzungen blieben innerhalb der Streugrenzen $\pm \frac{1}{\sqrt{N}}$, und folgten den theoretischen Kurven mit hinreichender Genauigkeit (siehe die Teile *b* in den Bildern 5, 6 und 7). So wurden also die oben genannten Filterungen aus der Sicht der Korrelationsanalyse als annehmbar betrachtet.

Anwendung der Spektralanalyse

Parallel zur Korrelationsanalyse wurde auch eine Spektralanalyse durchgeführt. Auf der Grundlage der Autospektralfunktionen darf die Filterung als befriedigend gelten, wenn die Autospektralfunktion bei einer charakteristischen Frequenz einen Spitzenwert hat, und im übrigen ausgeglichen ist.

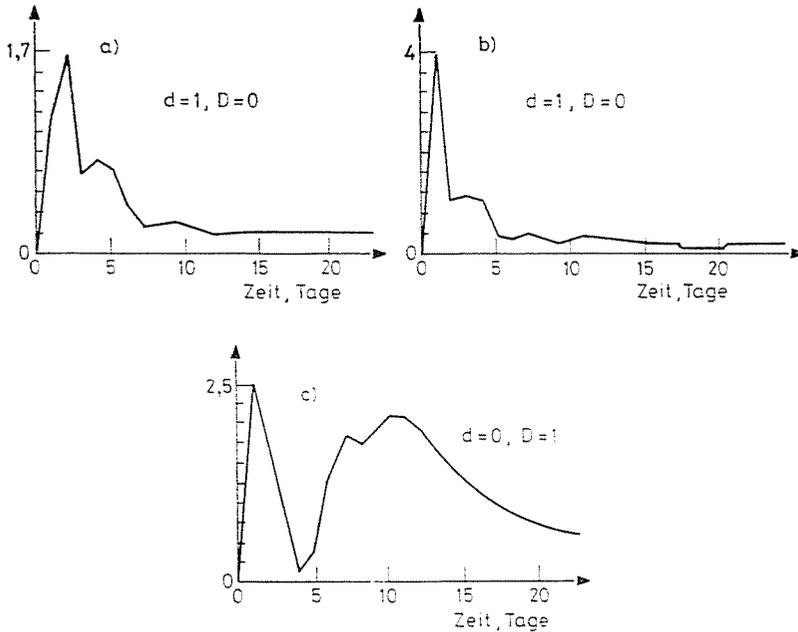


Abb. 8. Die Autospektralfunktionen der vorgefilterten Input und Output Prozesse
 a) Einbeförderung mit Kraftfahrzeugen; b) Input mit der Eisenbahn; c) Output mit Kraft-
 zeugen

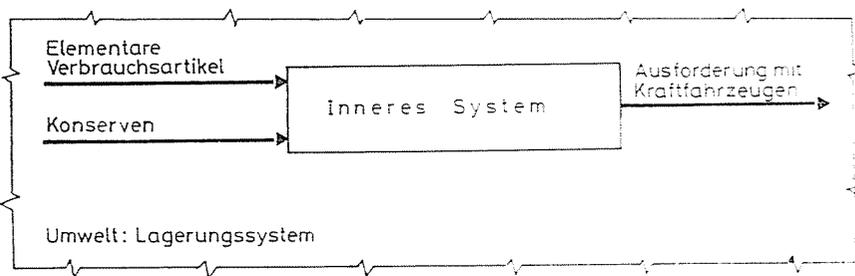


Abb. 9. Modell des untersuchten Lagerungssystems aus der Sicht der inneren
 Beziehungen

Abb. 8 zeigt die Autospektralfunktionen der mit Hilfe der im vorigen Punkt ausgewählten Differenzierungen gefilterten Zeitreihen. Nach diesem Bild kann die Strukturabschätzung der Ein- und Ausförderungsprozesse auf die Korrelations- und die Strukturanalyse gestützt angenommen werden.

Dieselben Untersuchungen wurden auch bezüglich des Betriebs des inneren Systems durchgeführt. In dieser Näherung wurde das Modell des Systems mit zwei Inputs und einem Output aufgestellt: Input sind die elementaren Verbrauchsartikel (Mehl, Zucker, Salz) und die Konserven (auch Gewürzwaren und

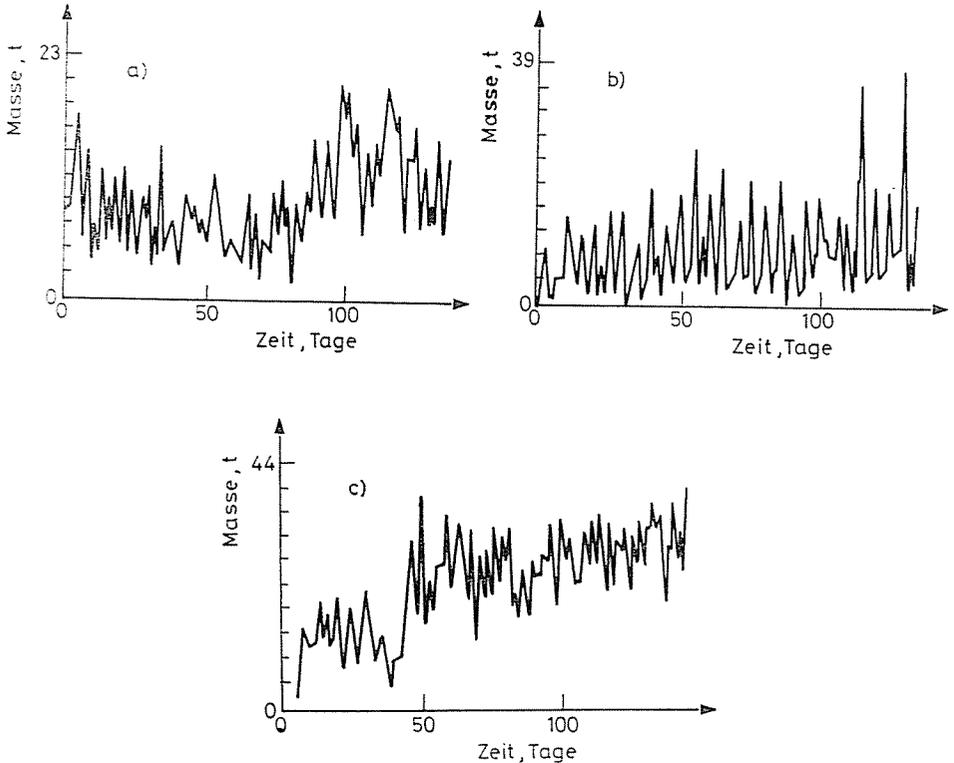


Abb. 10. Modifizierte Zeitreihen der Input und Output des inneren Systemmodells a) Prozeß der elementaren Verbrauchsartikel; b) Prozeß der Konserven; c) Output mit Kraftfahrzeugen

Süßwaren sowie sonstiges wurden zugerechnet); Output wird durch die *Ausförderung mit Straßenfahrzeugen dargestellt*. Die Zeitreihen wurden in gleicher Weise, wie im Falle des äußeren Prozesses modifiziert (Abb. 10).

Die Korrelationsanalyse des *Grundprozesses* zeigte, daß sich die theoretische Funktion am besten annähernde Autokorrelationsfunktion durch Ausfilterung des Periodenintervalls $t = 5$, d.h. durch die Filterung $d = 0$, $D = 1$ herstellen läßt (Abb. 11). Auch hier bleibt die partielle Autokorrelationsfunktion des Prozesses innerhalb der Streuungsgrenzen, und auch nach der Spektralanalyse scheint die Anwendung der Filterung $d = 0$, $D = 1$ am günstigsten zu sein. Abb. 12 zeigt das Autospektrum. Die Funktion stellt das Bild eines bei den kennzeichnenden Frequenzen gefilterten Prozesses dar.

Bei der Korrelationsanalyse des *Prozesses der Konserven* lieferte die Filterung nach einem einfachen Einheitsintervall die am leichtesten behandelbare Zeitreihe. Der Verlauf der Autokorrelationsfunktion bei $d = 1$, $D = 0$ ist in Abb. 13 zu sehen.

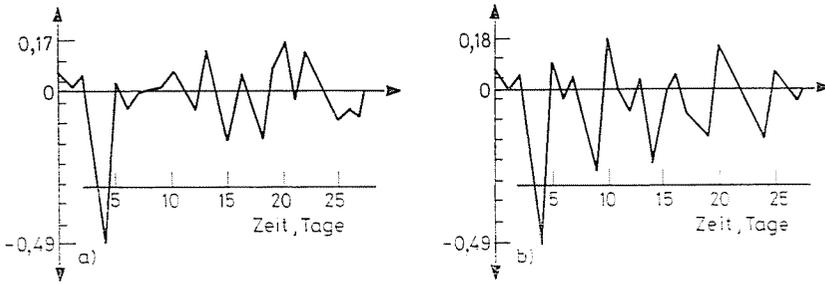


Abb. 11. Autokorrelations- (a) und partielle Autokorrelations- (b) = funktionen des Prozesses der elementaren Verbrauchsartikel

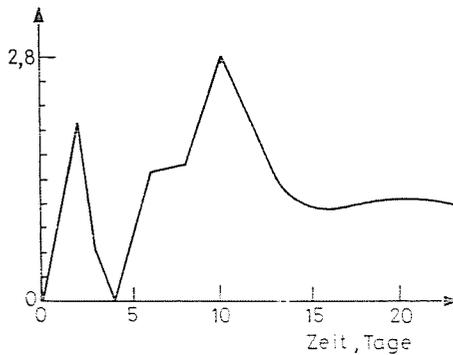


Abb. 12. Autospektrum der gefilterten Zeitreihe der elementaren Verbrauchsartikel

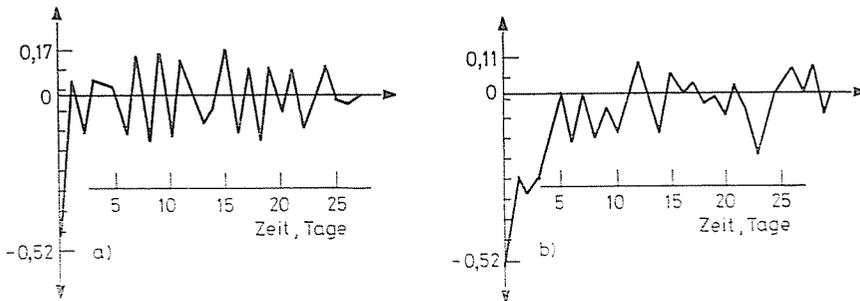


Abb. 13. Autokorrelations- (a) und partielle Autokorrelations- (b) -funktionen des Prozesses der Konserven

Die Spektralanalyse hatte den Gedanken der Prüfung des Periodenintervalls von $T = 5$ Tagen aufgeworfen, bei dieser Frequenz hat aber das Autospektrum keinen Spitzenwert und die Filterungen mit $D = 1$ ergeben schlechtere Korrelations- und Spektralfunktionen als die Filterungen bei $D = 0$. So wurden bei den weiteren Untersuchungen die Filterung $d = 1$, $D = 0$ benutzt, deren Autospektrum in Abb. 14 dargestellt ist.

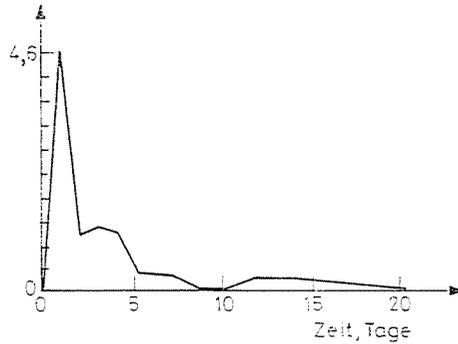


Abb. 14. Autospektrum der gefilterten Zeitreihe des Prozesses der Konserven

5. Parametrische Prozeßmodellierung

Strukturabschätzungsproblem

Um den Rang der autoregressiven und »Moving Average« Komponenten zu bestimmen, wurde von den in [1] beschriebenen charakteristischen Korrelationsfunktionstypen ausgegangen. Unter Anwendung derselben und mit Hilfe der ersten einigen Werte der Autokorrelations- ferner der partialen Autokorrelationsfunktionen der durch geeignete Vorfilterung modifizierten Zeitreihen läßt sich der Rang der Prozesse mit großer Sicherheit abschätzen.

Mit Hilfe der ersten zwei Autokorrelationswerte der theoretischen Prozesse lassen sich die Koeffizienten der autoregressiven Polynome und der »Moving Average -Polynome« der gemessenen Zeitreihen im voraus abschätzen. Die vorherigen Abschätzungen können einen so geringen Wert (z.B. von einigen Hundertsel Größenordnung) ergeben, daß die betreffenden Komponenten einfach vernachlässigt werden dürfen. In dieser Weise zusammengestellte Modelle werden *tentative* (auf vorheriger Abschätzung basierende) *Modelle* genannt.

Bei der Untersuchung von Lagerungssystemen liefert die tentative Technik Modelle, die nur einer geringen Verfeinerung bedürfen, den reellen Prozessen nahezu annehmbar folgen. Das rührt davon her, daß die Materialströmungssysteme in der Regel schlecht strukturiert sind, ihre genaue Beschreibung also auch im Prinzip unmöglich ist. Daher hat bei derartigen Prozessen die Anwendung der die theoretische Genauigkeit (ML — Maximum Likelihood: höchste Wahrscheinlichkeit) erreichenden, einen hohen geistigen Einsatz erfordernden Strategie keinen Sinn. Statt dessen wurde von den Verfassern ein wesentlich rascheres, einfacheres und auf einem Mikrocomputer durchführbares Parameterabschätzungsverfahren angewandt: die sog. *Trajektorienuntersuchung*. Das Wesen des Verfahrens liegt darin, daß den Punkten des Stabilitätsbereichs

der Form eines gleichschenkligen, rechtwinkligen Dreiecks der Prozesse zweiter Ordnung die Streuung des Fehlerprozesses zwischen dem mit punktweisen Parametern geschätzte und dem ursprünglichen Prozeß zugeordnet wird. Diese Streuungswerte werden in den Punkten des Dreiecks angeschrieben, und die annähernd gleichen Werte werden mit einer Vollinie verbunden. Dadurch wird der Optimalpunkt, wo die Streuungswerte minimal sind visuell erkennbar.

Es ist zweckmäßig, die Streuungen in den Gitterpunkten eines Quadratnetzes zu berechnen, wo die Teilung zwischen den Gittern in der Richtung verdichtet wird, wo die Trajektorien auf die Nähe des Optimums deuten. So lohnt es sich, die Untersuchung höchstens mit einer Genauigkeit von 2 Dezimalstellen in der Umgebung des Optimums durchzuführen. (Die Erfahrung zeigte, daß die Ergebnisse des tentativen Modells mit mindestens 0,1 bzw. 0,05 Genauigkeit in der Umgebung des Optimums liegen.)

Die im weiteren beschriebenen Parameter wurden mit Hilfe der dargelegten Trajektorienuntersuchung bestimmt.

SARIMA — Modellierung der Input — und Outputprozesse

Der Ausförderungsprozeß mit Straßenfahrzeugen hatte aufgrund der Korrelationsanalyse und der tentativen Modellierung eine Struktur AR(2), mit den Parametern

$$\varphi_1 = -0,57; \quad \varphi_2 = -0,44.$$

Daraus ergibt sich das für die Vorhersage geeignete Modell zu:

$$\begin{aligned} X_t &= X_{t-1} - 0,57X_{t-1} - 0,44X_{t-2} + 0,57X_{t-2} + 0,44X_{t-3} + a_t = \\ &= 0,43X_{t-1} + 0,13X_{t-2} + 0,44X_{t-3} + a_t \end{aligned}$$

Die Abschätzung der Parameter des *Einbeförderungsprozesses mit Straßenfahrzeugen* ergab ebenfalls einen Prozeß AR(2), mit den Parametern

$$\varphi_1 = -0,60; \quad \varphi_2 = -0,33.$$

Damit lautet die Vorhersagegleichung wie folgt

$$X_t = 0,4X_{t-1} + 0,27X_{t-2} + 0,33X_{t-3} + a_t.$$

Durch die Parameterabschätzung der *Einbeförderung mit der Eisenbahn* wurden die Strukturen AR(1) und AR(2) unterstrichen. Der Parameter AR(1) ergab sich aber zu $\varphi = -0,017$, einem sehr niedrigen Wert. Die Parameter von AR (2) hatten hingegen die Werte

$$\varphi_1 = -0,016; \quad \varphi_2 = 0,048$$

was eine etwas stärkere Struktur als die vorige bedeutet. Die Höhe des mittleren relativen Fehlers der Vorhersage brachte eine Entscheidung zugute von AR(2), so lautet die Vorhersagegleichung:

$$X_t = -0,016X_{t-1} + 0,048X_{t-2} + X_{t-5} + 0,016X_{t-6} - 0,048X_{t-7} + a_t.$$

Für die Berechnung der Vorhersage sind hier also die Ergebnisse der vorausgehenden 7 Tage erforderlich.

Bei dem inneren Prozeß wurde zuerst der Prozeß der *elementaren Verbrauchsartikel* untersucht. Aufgrund der Korrelationsanalyse und der vorherigen Parameterabschätzung erwies sich die Struktur AR(2) als die beste. Die Trajektorienuntersuchung ergab die Parameter

$$\varphi_1 = 0,06 \qquad \varphi_2 = 0,01.$$

(Der Parameter φ_2 kann praktisch auch weggelassen werden.) Die Vorhersagegleichung lautet:

$$X_t = 0,06X_{t-1} + 0,01X_{t-2} + X_{t-5} - 0,06X_{t-6} - 0,01X_{t-7} + a_t.$$

Die Strukturabschätzung des *Prozesses der Konserven* ergab, daß die Struktur AR(2) die beste mit den Parametern

$$\varphi_1 = -0,59; \qquad \varphi_2 = -0,23 \text{ sei.}$$

und die Vorhersagegleichung lautet:

$$X_t = 0,41X_{t-1} + 0,36X_{t-2} + 0,27X_{t-3} + a_t.$$

Die Anpassung des Modells AR(2) der *Ausförderung mit Straßenfahrzeugen* ist in Abb. 15 zu sehen. Das Modell folgt befriedigend der Zeitreihe, der relative Fehler beträgt 0,218, d.h. in Kenntnis der vorausgehenden 3 Tage läßt sich der Prozeß mit einer durchschnittlichen Sicherheit von 78,2% prognostizieren.

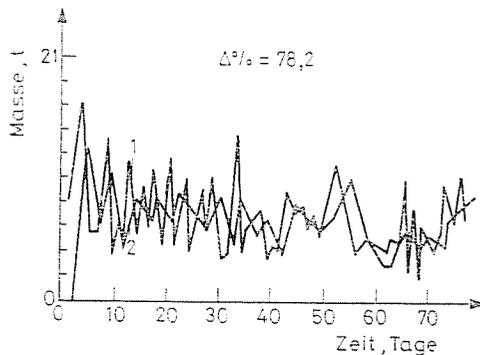


Abb. 15. Prognostizieren des Output-Prozesses mit Kraftfahrzeugen mit Hilfe des Modells AR(2) 1. tatsächlich; 2. schätzungsmäßig

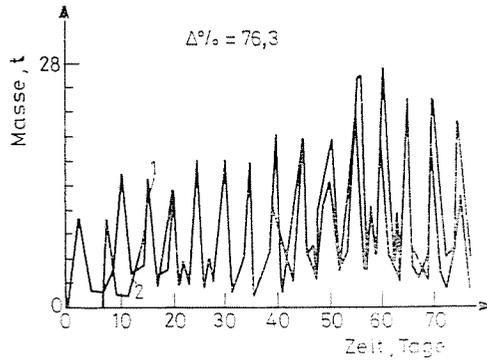


Abb. 16. Prognostizieren der Input- mit Kraftfahrzeugen mit Hilfe des Modells AR(2)

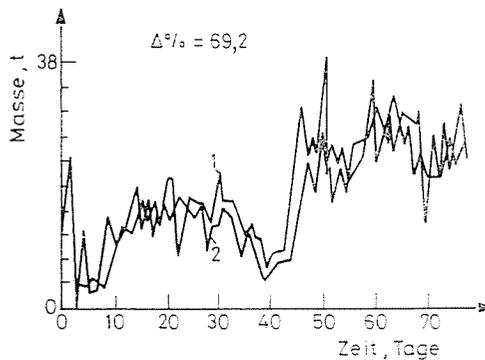


Abb. 17. Prognostizieren der Input mit Schienenfahrzeugen mit Hilfe des Modells AR(2)

Die Anpassung des Modells AR(2) der *Einbeförderung auf der Straße* zeigte, daß die Zuverlässigkeit der Vorhersage 76,3% beträgt. Für jede Vorhersage ist die Kenntnis der Transportleistungen an den drei vorausgehenden Tagen erforderlich. Abb. 16 zeigt die aufeinander gezeichneten gemessenen und prognostizierten Zeitreihen.

Das Modell AR(2) der *Einbeförderung auf dem Schienenweg* ist in Abb 17 dargestellt. Zur Vorhersage müssen die Verkehrsdaten der vorangehenden 7 Tage bekannt sein. Die Zuverlässigkeit der Prognose erreicht 69,2%.

Die Angleichung des *Grundprozesses* mit den Parametern AR(2) an die ursprüngliche Reihe ist in Abb. 18 dargestellt. Die Vorhersage hat eine durchschnittliche Zuverlässigkeit von 69%, und ist — von einigen Spitzen abgesehen — gut.

Die Abschätzung des *Prozesses der Konserven* mit Hilfe des Modells AR(2) ist in Abb. 19 zu sehen. Die Vorhersage hat eine durchschnittliche Zuverlässigkeit von 66%.

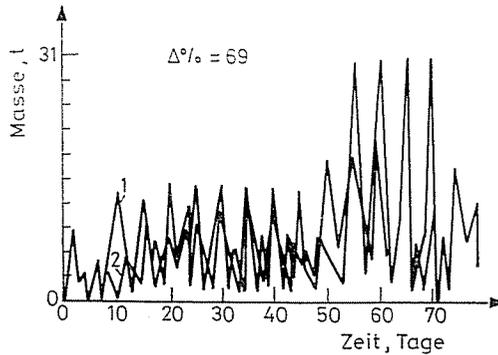


Abb. 18. Prognostizieren der Prozesses der elementaren Verbrauchsartikel mit Hilfe des Modells AR(2)

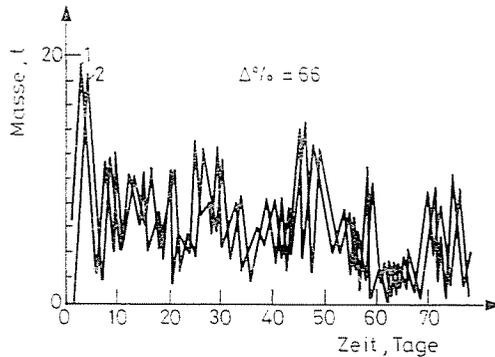


Abb. 19. Prognostizieren des Prozesses der Konserven mit Hilfe des Modells AR(2)

Als Ergebnis der Untersuchungen ließ sich feststellen, daß für Lagerungsprozesse das Anderson-Prinzip besonders gültig ist, nach dem jeder wirkliche Prozeß (nach geeigneter Vorfilterung) mit einer AR(2) Struktur angenähert werden kann, andererseits, daß die durchschnittliche Zuverlässigkeit der Prozeßmodelle von Lagerungssystemen um 70% liegt.

6. Identifikation der Transferfunktionen von Lagerungssystemen Aufbau der parameterischen Transferfunktionen (ARMAX)

Bisher wurden die äußeren und inneren Prozesse des Systems voneinander unabhängig behandelt, der gegenseitige Einfluß der Prozesse wurde also nicht berücksichtigt. Daraus folgt, daß die Prozeßmodelle die Dynamik des Systems nicht spiegeln und daher ihre Zuverlässigkeit von vorherein beschränkt ist. Im weiteren wurde das Ziel gesetzt, Modelle aufzustellen, mit deren Hilfe auch diese dynamischen Wirkungen behandelt werden können.

Die dynamischen Beziehungen wurden mit Hilfe der Kreuzkorrelations- und der Kreuzspektralanalyse ermittelt. Die höchste lineare Abhängigkeits-Meßzahl zwischen Einbeförderung mit der Eisenbahn und Ausförderung mit Straßenfahrzeugen beträgt $r_{yx\max} = 0,26$, das Kreuzspektrum ist bei der gemeinsamen siebentätigen Frequenz signifikant. $r_{yx\max} = 0,64$ deutet auf eine starke Beziehung zwischen Einbeförderung und Ausförderung mit Straßenfahrzeugen; die gemeinsame Frequenz liegt auch hier bei 7 Tagen. Auch bei der Untersuchung den inneren Prozesses wurden als gemeinsame Frequenz 7 Tage erhalten; die höchste lineare Abhängigkeits-Meßzahl zwischen Input und Output beträgt $r_{yx\max} = 0,48$ und deutet auf eine lineare Beziehung mittlerer Stärke.

Die ARMAX-Modelle werden anhand von Voruntersuchungen aufgestellt, für Lagerungssysteme kommen von diesen Modelle höchstens zweiten Ranges in Frage. Diese haben im Falle von SISO (single input-single output) die Struktur (Abb. 20):

$$Y(t) = u(t) + v(t),$$

wo $u(t)$ das Systemmodell und $v(t)$ das Zeichnungsmodell bedeuten:

$$u(t) = \frac{w_0 - w_1 z^{-1} - w_2 z^{-2}}{1 - \delta_1 z^{-1} - \delta_2 z^{-2}} X(t - b)$$

und

$$v(t) = \varphi \cdot \varepsilon(t)$$

Dabei bedeuten

- w_i den Einfluß der Input berücksichtigende
- δ_i den Einfluß der Output berücksichtigende Parameter
- b Totzeit
- φ Parameter zur Berücksichtigung der Wirkung des Umweltrausches

Es sollen für das vorgegebene System die Werte der Parameter w_i , δ_i , b und φ bestimmt werden. Die Inputzeitreihe des Modells ist die zusammengesetzte Inputförderung mit Straßen- und Schienenfahrzeugen, die Outputzeitreihe die Outputförderung mit Straßenfahrzeugen.

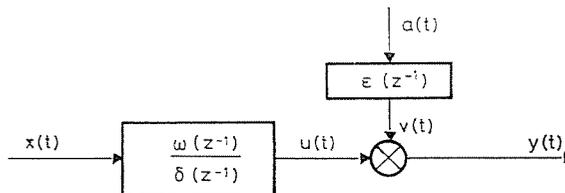


Abb. 20. Aufbau des SISO-Systemmodells

Struktur- und Parameterabschätzung

Die mit Hilfe der tentativen Technik erhaltenen Modelle stimmen mit den mit einer Genauigkeit von 2 Dezimalstellen berechneten Parametern gut überein, und in Anbetracht der schlechten Strukturiertheit des Systems ist das eine befriedigende Genauigkeit. Auf dieser Grundlage wurde auch bei der Modellierung des Systems die durch die tentativen Modelle gelieferte Genauigkeit angenommen.

Der erste Schritt der Technik ist Abschätzung der Impulsantwortfunktion. Dazu wird die Kreuzkorrelationsfunktion zwischen geweißtem Input-

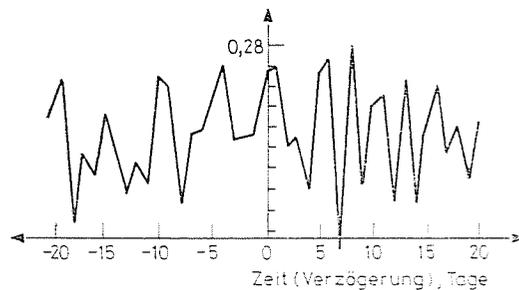


Abb. 21. Impulsantwortfunktion zwischen geweißtem Input und transformiertem Output

rauschen (Rauschen des Inputmodells) und dem nach der Gleichung des Input-transformierten Outputrauschen hergestellte die — theoretisch beweisbar — der Impulsantwortfunktion proportional ist. Das Maximum derselben ergab sich bei der Verschiebung 0, was darauf hinweist, daß $b = 0$. Zwischen den Impulsantwortgewichten und den Parametern ω_i , δ_i des Modells wird durch das Yule-Walker-Gleichungssystem eine Beziehung geschaffen; durch die Auflösung des Gleichungssystems erhält man die Parameter. Die Impulsantwortfunktion ist in Abb. 21 dargestellt.

Nach den aus dem Bild ersichtlichen lokalen Extremwerten $b = 0, 1, 7, 12$ wurde bei diesen die Lösung des Gleichungssystems erforderlich, von denen $b = 0$ die beste Vorhersage lieferte. Die Lösung des Gleichungssystems lautet dann:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= -0,0783 \\ \delta_2 &= 0,6339 \\ \omega_0 &= 0,1505 \\ \omega_1 &= -0,2566 \\ \omega_2 &= -0,1715\end{aligned}$$

Anpassungsprüfung, Rückkopplung

Mit den obengenannten Parametern ist das Modell des Systems wie folgt:

$$Y(t) = \frac{0,15 + 0,26z^{-1} + 0,17z^{-2}}{1 + 0,08z^{-1} - 0,63z^{-2}} X(t) + 0,007\varepsilon(t)$$

Der für $\varepsilon(t)$ erhaltene niedrige Wert verweist darauf, daß der Teil $u(t)$ des Modells, d.h. das Systemmodell, signifikanter ist als das Rauschmodell. Die für Vorhersage umgeordnete Form des Modells ist:

$$Y(t) = -0,08Y(t-1) + 0,63Y(t-2) + 0,15X(t) + 0,26X(t-1) + 0,17X(t-2) + 0,0007\varepsilon(t).$$

Abb. 22 zeigt die Anpassung des Modells mit den auf die ursprüngliche Ausgabe aufgetragenen, nach dem Input geschätzten Werten.

Die Zuverlässigkeit des Modells erreicht 78,1%

Was im Vergleich zu der Zuverlässigkeit der Prozeßmodelle eine Zunahme von etwa 8 bis 9% darstellt. Es hat aber den Vorteil den Prozeßmodellen gegenüber, daß es auch die dynamischen Eigenschaften des Systems enthält.

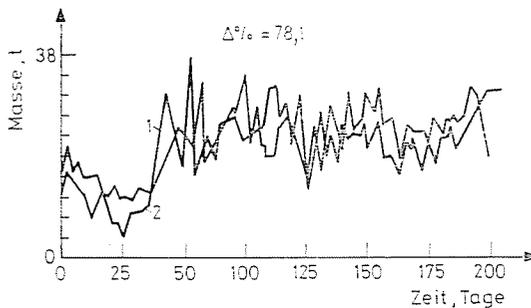


Abb. 22. Anpassung des SISO-Systemmodells

Die für die Dynamik des Systems kennzeichnenden Parameter wurden nach der tentativen Methode, also mit der Methode der kleinsten Quadrate angenähert. Zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit könnte die ML-Technik herangezogen werden, hier ist jedoch ein wesentlich höherer Rechen- und Zeitaufwand erforderlich, dabei wird die Zuverlässigkeit nur wenig erhöht.

Die Modellierung des inneren Systems stimmt mit jener des äußeren überein, weil auch hier nur zwischen den zusammengezogenen Prozessen ein Transferfunktionsmodell aufgestellt werden kann; Input ist die Summe der

elementaren Verbrauchsartikel und Konserven, die mit der Summe der Inputförderung mit Straßen- und Schienenfahrzeugen übereinstimmt; die Ausgabe ist die gemeinsame Outputförderung mit Straßenfahrzeugen.

7. Anwendungsmöglichkeiten der Identifikationstechnik und Erfahrungen bei der Planung der Steuerungsalgorithmen von Lagerungssystemen

Die statistische Analyse und Modellierung des Lagerungssystems trugen dazu bei, den Betrieb des Systems besser zu verstehen und seine Mängel aufzudecken. Ein Teil der Untersuchungen, vor allem die Anwendung der Korrelations- und Vorfilterungstechnik können dem oberflächlichen Leser selbstbezweckt scheinen. Es darf jedoch nicht außer acht gelassen werden, daß die Technik eine Methode liefert, die es ermöglicht, bezüglich der Kennwerte der Prozesse »objektive« Ergebnisse zu erhalten. Eine hinreichende Automatisierung — Anordnung von Meßfühlern, zentrale Mikroprozessorsteuerung der Maschinen usw. — gestattet, die Prozeßkennwerte im Real-time-Betrieb zu messen und auf einer verlässlichen mathematischen Grundlage in die Steuerung der Maschinen einzugreifen.

Das gegenwärtige Niveau der Praxis steht aber hinter diesen Anforderungen noch zurück. Die Prozesse in Lagern werden auf die maßgebende Belastung ausgelegt. Daraus ergeben sich bei geringerer Belastung unausgenutzte Kapazitäten, bei Überlastung Warteschlangen. Die Identifikationstechnik ermöglicht bei der Entstehung solcher extremer Situationen, diese zu prognostizieren.

Die im Laufe der Untersuchungen gemachten Erfahrungen zeigten, daß die Zuverlässigkeit fertiger Prozeßmodelle auch 70%, jene von Systemmodellen sogar 80% erreicht. Die Anwendung der Modelle ist sehr einfach. Es ist nichts weiter nötig, als eine einfache Handrechenmaschine, mit deren Hilfe eine 3...6-gliedrige, lineare Kombination berechnet wird, und die Abweichung des verwirklichten Wertes von der Prognose für denselben Tag gespeichert werden muß.

Die Berechnung der Vorhersagen ermöglicht eine der maßgebenden Belastung entsprechende rechtzeitige Tätigkeit z.B. können Maschinen und Arbeitskräfte der Tagesvorhersage entsprechend umgruppiert werden. Diese Möglichkeiten sind selbstverständlich nur dort vorhanden, wo das Förder-system des Lagers mit Hilfe traditioneller Betriebsorganisationsmethoden bereits optimal geplant wurde. Allein von der Identifikation darf also nicht die volle Planung eines Lagerungssystems erwartet werden. Diese Technik ist dazu bestimmt, im Betrieb eines gut funktionierenden Lagers der optimalen Ausnutzung der Kapazitäten Vorschub zu leisten.

Durch die Vorhersage des Ausförderungsverkehrs wird die genaue Bestimmung der Kraftfahrzeuge, deren Bedienungspersonals, der Maschinen und Arbeitskräfte im Expeditionsraum, durch die Vorhersage des Einbeförderungsverkehrs die vorherige Bestimmung und Vorhersage der erforderlichen Lagerkapazität ermöglicht.

In dem Algorithmus der Vorhersagen ist im wesentlichen die Überlagerung der Tendenzen eingebaut, deren selbständige Analyse oder deterministische Behandlung wegen der großen Zahl der Einflußfaktoren und der stochastischen Eigenschaften der Kenngrößen nahezu unmöglich ist. Daran muß gedacht werden, wenn sich in einer Vorhersagegleichung z.B. für den Koeffizienten von X_{t-5} 1 und für den Koeffizienten X_{t-6} 0,016 ergibt. Die Größe und die gegenseitige Wirkung der Tendenzen, d.h. die Dynamik des Systems, spiegelt sich in Struktur und Größe der Koeffizienten.

Die Vorhersagegleichungen sind also Träger der Eigenschaften des Lagers und seiner Umwelt. Dadurch geben sie im Falle eines Lagers eine reelle Basis für die Lösung folgender, wichtiger Organisationsaufgaben:

- vorherige Lkw-Beistellung zur bestimmten Zeit,
- Zuordnung von Arbeitskräften zu einer zeitlich bestimmten Aufgabe,
- anhand des schätzungsmäßigen Einbeförderungsverkehrs als Anspruch, Lenkung des Elektrokarren- und Arbeitskräftebedarfs im Kommissionierungsraum (an den voraussichtlich freiwerdenden Karren kann z.B. die Instandhaltung begonnen werden),
- in Kenntnis der Erwartungswerte des Ein- und Ausförderungsprozesses kann die voraussichtliche Besetzung der Lagerplätze prognostiziert werden, usw.

Durch Prognostizieren der Systemkennwerte lassen sich Stehzeiten vermindern, die Ausnutzung der Maschinen verbessern, Reparaturen, Instandhaltungsarbeiten auf weniger belastete Tage verlegen; im ganzen genommen läßt sich durch die Anwendung der Identifikation die Wirksamkeit des Lagerbetriebs erhöhen.

Notwendigenfalls können Prognosen auch für mehrere Tage im voraus aufgestellt werden. Infolge ihrer Zuverlässigkeit von 70—80% liefern sie aber nur für 3 . . . 4 Tage annehmbare Werte. Die Vorbereitung der Fördermittel erfordert in der Wirklichkeit auch keine längere Zeit.

Die klargelegten Zusammenhänge, Prozeß- und Systemsstrukturen bleiben bei einem bestimmten Lager im allgemeinen unverändert, nur die Parameterwerte ändern sich. Daher ist im späteren auch keine volle statistische Untersuchung erforderlich, nur die aktuellen Werte der Parameter müssen ermittelt werden. Die prognostischen Aufgaben können also parallel zur Entwicklung des Lagerbetriebs laufend erledigt werden, wodurch zu der womöglich wirksamen Funktionierung des Lagers beigetragen wird.

Literatur

1. BOX, G.—JENKINS, M.: Time Series Analysis. Forecasting and Control. Holden-Day, USA, San Francisco, 1970.
2. ERDEI, S.: A Dél-Budai Fűszért magasraktár belső anyagmozgatási folyamatainak elemzése. — Diplomarbeit, Budapest, 1985.
3. GÁSPÁR, P.: A Dél-Budai Fűszért magasraktár külső szállítási rendszerének elemzése. — Diplomarbeit, Budapest, 1985.
4. PREZENSZKI, J., — VÁRLAKI, P.: A rakodási folyamatok korszerű statisztikai elemzése. — Közlekedéstudományi Szemle. — Budapest 4. 1984. — S. 152—159.
5. PREZENSZKI, J.—VÁRLAKI, P.: Die Probleme der Systemidentifikation für Stochastischen Modelle von Logistischen Systemen. — Forschungsbericht von Verkehrswissenschaftlichen Tagen. — Dresden 1984. — Band III., S. 89—91.
6. PREZENSZKI, J.: Raktározástechnika. — Tankönyvkiadó, Budapest 1988.
7. TOKODI, J.: Mikrologisztikai anyagáramlási rendszerek indentifikációja ARMAX típusú modellekkel. — Forschungsbericht. Budapest, 1984.

Dr. Josef PREZENSZKI }
 Dr. Jenő TOKODI } H-1521 Budapest