

Regelungsstruktur für eine Klasse von Förder- und Bearbeitungsprozessen und Anwendung in der Postautomatisierung

Boris Lohmann, Konstanz



Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann leitet die mechanische Entwicklung für Brief-, Paket- und Kleingutsortiermaschinen bei der AEG Electrocom, Konstanz, und ist verantwortlich für allgemeine Fragen der Systemdynamik. Seine weiteren Interessenschwerpunkte liegen bei der Theorie linearer und nichtlinearer Systeme, bei der praktischen Anwendung moderner Entwurfsverfahren und bei Fragen der Modellbildung und Simulation.

AEG Electrocom, Abteilung PE4, D-78459 Konstanz, Tel.: (07531) 86-3047, Fax: (07531) 86-2421.

Die Zufuhr eines Stück- oder Schüttgutes oder auch eines flüssigen Gutes in einen Förder- und Bearbeitungsprozeß bedarf in vielen Fällen einer sorgfältigen Einstellung, um die zur Verfügung stehende Bearbeitungsleistung voll zu nutzen, den Gesamtprozeß aber nicht zu überfordern. Die damit umrissene Regelungsaufgabe tritt zum Beispiel in der Fertigungstechnik auf – in der konkreten Anwendung des Autors bei der Bearbeitung von Postgut in einer Anschriftenlesemaschine. Im vorliegenden Beitrag wird für diese Aufgabe eine spezielle Regelungsstruktur vorgeschlagen, die Optimalitätseigenschaften aufweist und sich in der Praxis bestens bewährt. Gleichzeitig wirft der Beitrag Fragen auf, die zur weiteren Beschäftigung mit der betrachteten Klasse von Systemen mit variablen Totzeiten anregen mögen.

Control structure for a class of transport processes and application to postal automation systems

The feeding rate of items or bulk goods to a transport and processing system in many cases requires a careful setting in order to take advantage of the full processing capacity and to not overload the process. The corresponding control task occurs for example in the field of automated manufacturing – in the application of the author the processing of mail items in an automatic address reading machine is concerned. In this contribution a special control structure is presented, which has some optimality properties and which has

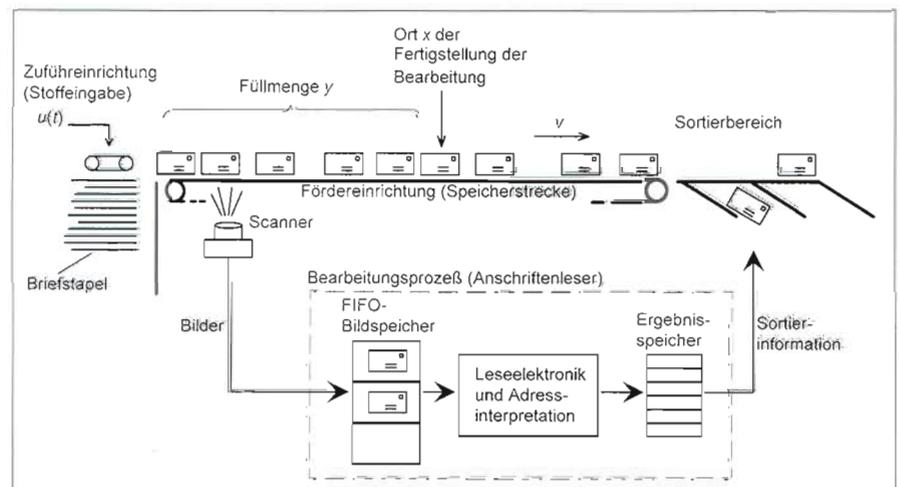
proven to be well suitable in practice. At the same time questions arise which may motivate to further investigate the considered class of systems with varying delay.

1 Einleitung

Moderne Briefsortiermaschinen sind mit elektronischen Anschriftenlesern ausgestattet, so daß die Sortierinformation in der Mehrzahl der Fälle automatisch ermittelt werden kann. Bild 1 zeigt das Prinzip: Durch die *Stoffeingabe* werden Sendungen von einem Stapel abgezogen, vereinzelt und aufrecht stehend an konstant bewegte Transportbänder übergeben. Sie passieren sodann einen Scanner, der die Bildinformation an den *Anschriftenleser* weitergibt. Der Anschriftenleser beschäftigt sich in der Reihenfolge des Eintreffens der Bilder mit dem Entziffern der Adressen, während sich die Briefe mit konstanter Geschwindigkeit durch eine *Speicherstrecke* bewegen. Deren Aufgabe ist es, dem Anschriftenleser Zeit zu verschaffen, damit das Leseergebnis vorliegt, bevor der Brief in den Bereich der *Sortierfächer* gelangt. Über Weichen können die Sendungen hier in bis zu 500 Fächer sortiert werden.

Da die Verarbeitungsleistung des Anschriftenlesers zeitlichen Schwankungen unterliegt, genügt es nicht, die Stoffeingabe mit konstanter Leistung zu betreiben. Bei leicht zu entziffernden Adressen, also hoher Leistung des Anschriftenlesers, befänden sich nämlich

Bild 1: Funktionseinheiten des betrachteten Förder- und Bearbeitungsprozesses am Beispiel einer Briefsortiermaschine mit automatischem Anschriftenleser.



schnell nicht mehr genügend unbearbeitete Sendungen in der Speicherstrecke, und der Anschriftenleser wäre unausgelastet. Im umgekehrten Fall, bei schwer zu entziffernden Adressen und somit niedriger Adressleseleistung, würde sich die Speicherstrecke schnell mit unbearbeiteten Sendungen füllen, und Briefe würden ohne Leseergebnis in den Bereich der Sortierfächer gelangen. Beide Fälle sollen durch eine geeignete Steuerung der Stoffeingabe unterbunden werden, mit dem Ziel, den Durchsatz so hoch wie möglich einzustellen, unbearbeitete Sendungen in den Sortierfächern aber zu verhindern.

Allgemein lassen sich System und Regelungsaufgabe folgendermaßen beschreiben:

System: Einer mit konstanter Geschwindigkeit betriebenen *Fördereinrichtung* wird das zu verarbeitende *Fördergut* mit vorgebar Menge pro Zeiteinheit zugeführt, und zwar durch eine am Anfang der Fördereinrichtung installierte *Zuführeinrichtung*. Während der Förderung wird das Gut (nach dem FIFO-Prinzip) durch einen örtlich nicht fixen *Bearbeitungsprozeß* behandelt, dessen Leistung zeitlich schwankt.

Regelung: Aufgabe der Regelung ist es, die Leistung der Zuführeinrichtung so zu steuern, daß der Gesamtdurchsatz möglichst hoch ist und möglichst kein Gut unbearbeitet das Ende der Fördereinrichtung erreicht.

In dieser allgemeinen Formulierung ist die Aufgabe auf vielerlei Anwendungen mit Stofftransport übertragbar. Hat beispielsweise eine Arbeitskraft an einem konstant bewegten Fließband Arbeiten an einem Stückgut auszuführen, so tritt exakt die beschriebene Situation ein: Ist die Arbeitsleistung höher als die Förderleistung, so wird sich die Arbeitskraft *entgegen* der Transportrichtung voranarbeiten, ist die Arbeitsleistung niedrig, so muß die Arbeitskraft sich *mit* der Transportrichtung bewegen und droht das Ende der Fördereinrichtung zu überschreiten. Durch eine geeignete Regelung soll dies verhindert werden. Tückisch ist dabei, daß die Zuführleistung zwar verstellbar ist, daß einmal zugeführtes Gut aber nicht mehr gestoppt werden kann, da die Fördergeschwindigkeit konstant ist.

Zieht man zur Beschreibung des *Transportvorganges* die Literatur zu Rate, z. B. [1; 2], so stößt man zunächst auf die partielle Differentialgleichung erster Ordnung

$$\frac{\partial c(s, t)}{\partial t} + v \frac{\partial c(s, t)}{\partial s} = u_1(s, t). \quad (1)$$

Darin bezeichnen

- $c(s, t)$ die *Konzentration* des Transportgutes im Förderprozeß (in Einheiten Fördergut pro Meter, hier also die Zahl von Briefen pro Meter)
- v die konstante *Fördergeschwindigkeit*,
- $u_1(s, t)$ die durch (evtl. mehrere) Zuführstellen bedingte *Quellenfunktion*. Beim hier betrachteten System verschwindet diese Funktion identisch.
- t die Zeit,
- s die Ortskoordinate in Transportrichtung.

Für dynamische Untersuchungen sind zusätzlich die Randbedingungen

$$c(0, t) = \frac{u(t)}{v} \quad (2)$$

und der Anfangszustand

$$c(s, 0) = c_0(s) \quad (3)$$

zu berücksichtigen. Darin bedeuten

- $u(t)$ die Zuführleistung, also die am Anfang der Fördereinrichtung zugeführten Einheiten Fördergut je Sekunde; dies ist die Stellgröße.
- $c_0(s)$ die Anfangsbelegung der Förderstrecke mit Fördergut.

Die Stellgröße $u(t)$ des Systems geht also ausschließlich über die Randbedingung ein, schließlich ist bekannt, daß die Konzentration c am Anfang der Förderstrecke direkt aus der Zufuhr $u(t)$ resultiert. Allerdings reichen die Gleichungen (1) bis (3) zur vollständigen Beschreibung des Systems nicht aus, da Maßzahlen für die Auslastung der Maschine oder für den Füllzustand der Fördereinrichtung darin nicht vorkommen. Im folgenden Abschnitt treten deshalb weitere Gleichungen hinzu.

Ein Transport- und Bearbeitungsprozeß ähnlichen Typs wurde in [3] vorgestellt. Allerdings tritt dort die Bearbeitungsleistung als Stellgröße und nicht als Störgröße auf, während die Verteilung c des Gutes auf dem Förderband als vorgegeben und nicht beeinflussbar angesehen wird. Die Ergebnisse sind daher kaum auf die hier betrachtete Aufgabe übertragbar.

Die Literatur zur Behandlung von *Warteschlangenproblemen*, z. B. [4; 5; 6; 7], und zur Steuerung von *Produktionseinrichtungen*, z. B. [8; 9; 10], bietet verschiedenartige Alternativen zum hier gewählten FIFO-Prinzip bei der Abarbeitung des Fördergutes an. Die FIFO-Strategie wurde in der oben formulierten Aufgabenstellung aber der Regelstrecke zugeschlagen und steht somit nicht als Freiheitsgrad beim Entwurf einer Regelung zur Verfügung. Erst im fünften Abschnitt werden Alternativen zum FIFO-Prinzip nochmals angeschnitten.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst eine vollständige Modellbildung des vorliegenden Systems durchgeführt und die Regelungsaufgabe präzisiert. Abschnitt 3 bringt einen Regelungsentwurf in zwei Schritten: das System wird durch Rückführung einer Hilfsregelgröße zunächst stabilisiert, wodurch gleichzeitig zeitoptimales Führungsverhalten für diese Hilfsgröße eintritt, so dann kann die eigentliche Regelgröße durch eine Störgrößenaufschaltung stationär genau eingestellt werden. Abschnitt 4 geht auf einige Besonderheiten des Briefsortierprozesses ein, insbesondere wird eine Erweiterung der Regelungsstruktur vorgeschlagen, die Bildschirmarbeitsplätze zur manuellen Bearbeitung nicht maschinenlesbarer Briefe berücksichtigt. Abschnitt 5 gibt einen Ausblick und stellt offene Fragen zur Diskussion.

2 Modellbildung

Regelgröße des Systems ist der Ort x innerhalb der Förderstrecke, an dem das Fördergut vom Zustand „unbearbeitet“ in den Zustand „fertig bearbeitet“ springt, siehe auch Bild 1. Gelingt es, diesen Ort x der Fertigstellung ungefähr in der Mitte der Förderstrecke zu halten, so ist der Bearbeitungsprozeß stets ausgelastet und kein Fördergut verläßt unbearbeitet die Fördereinrichtung. Die Geschwindigkeit $\dot{x}(t)$ des Ortes der Fertigstellung folgt dann der Gleichung¹

$$\dot{x}(t) = v - \frac{z(t)}{c(x, t)}, \quad (4)$$

denn es wirkt die Fördergeschwindigkeit v nach rechts, und ihr entgegen arbeitet sich der Bearbeitungsprozeß mit der Leistung $z(t)$ (Einheit 1/s) voran. Diese Leistung ist noch durch die Konzentration c des Fördergutes an der betrachteten Stelle zu dividieren, so daß die zugehörige nach links gerichtete Geschwindigkeit resultiert.

Zusammen mit Gleichung (1) liegen die systembeschreibenden Differentialgleichungen damit vor. Die beiden Beziehungen sind einseitig verkoppelt, denn c geht in Gleichung (4) ein, jedoch x nicht in Gleichung (1). Es liegt daher nahe, zunächst nach einer Lösung von Gleichung (1) zu suchen. Aus der Anschauung ist klar, daß die Konzentration c an der Stelle x zum Zeitpunkt t gleich der Konzentration an der Stelle $Null$ zum vergangenen Zeitpunkt $t - x/v$ ist. Mit (2) folgt also

$$c(x, t) = c(0, t - x/v) = \frac{u(t - x/v)}{v}, \quad (5)$$

und durch Einsetzen verifiziert man, daß dies tatsächlich eine Lösung der partiellen Differentialgleichung (1) ist. Damit läßt sich die Differentialgleichung (4) anschreiben

$$\dot{x}(t) = v \left(1 - \frac{z(t)}{u(t - x/v)} \right). \quad (6)$$

Bild 2 zeigt das Strukturbild der Regelstrecke. Die Stellgröße u wirkt über eine variable Totzeit auf das nichtlineare Glied, das unter Einbeziehung der Bearbeitungsleistung $z(t)$ die Geschwindigkeit $\dot{x}(t)$ liefert. Die Zustandsvariable x wirkt zurück und legt die Totzeit fest.

Welche Eigenschaften hat diese Strecke? Zum einen ist sie *instabil*, denn bei konstanten aber verschiedenen Werten u und z wächst x über alle Grenzen. Weiterhin erschwert die beträchtliche zustandsabhängige Totzeit einen Reglerentwurf. Im Falle der Briefsortiermaschine wurden bei der Fa. AEG Electrocom in der Vergan-

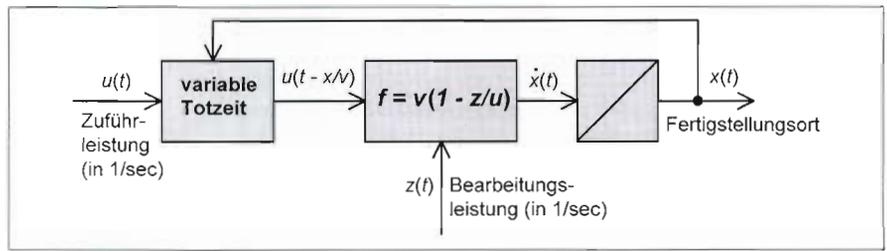


Bild 2: Strukturbild der Regelstrecke.

genheit verschiedene Versuche unternommen, das System durch Rückführung der Regelgröße x auf die Stellgröße zu beherrschen. Aufgrund der veränderlichen Totzeit stellte sich aber stets unbefriedigendes Verhalten ein, das entweder in Schwingneigung oder zu langsamem Regelverhalten zum Ausdruck kam. Als Alternative wurde die Einführung einer *verstellbaren* Transportgeschwindigkeit angedacht, was sich aber aus anderen Gründen als nicht realisierbar erwies.

Im folgenden Abschnitt wird deshalb ein anderer Weg beschrrieben, der vorbereitend die Einführung einer weiteren Zustandsgröße erforderlich macht. Von Interesse ist neben der Regelgröße x der *Füllzustand* y der Fördereinrichtung mit unbearbeitetem Gut, im Falle der Briefsortieranlage also die Zahl nicht fertig bearbeiteter Sendungen. Der Füllzustand y folgt der einfachen Beziehung

$$\dot{y}(t) = u(t) - z(t) \text{ für } y \geq 0. \quad (7)$$

Allerdings zeigt y nicht an, ob sich das System in einem zulässigen Zustand im Sinne des Entwurfsziels befindet. So kann der Fertigstellungsort x das Ende der Fördereinrichtung bereits überschritten haben, obwohl der Füllzustand y gering ist, und andererseits kann x selbst bei großen Werten y noch innerhalb der Förderstrecke liegen.

Das im letzten Abschnitt formulierte Regelziel wird deshalb unter Einbeziehung des Fertigstellungsortes folgendermaßen präzisiert:

Die Zuführeinrichtung ist so zu steuern, daß der Fertigstellungsort x stets innerhalb der Fördereinrichtung gehalten wird, also zwischen dem *Ort der frühestmöglichen Fertigstellung* und dem *Ende der Fördereinrichtung*.

Die Forderung, x hinter dem *Ort der frühestmöglichen Fertigstellung*² zu halten, stellt sicher, daß sich stets auf Bearbeitung wartendes Gut in der Fördereinrichtung befindet, der Bearbeitungsprozeß also voll ausgelastet wird. Die zweite Forderung, x vor dem Ende der Fördereinrichtung zu halten, verhindert, daß Gut unbearbeitet die Anlage verläßt. Das Regelziel hat also *Optimalitätscharakter* und beschreibt nicht nur *einen* optimalen Betriebspunkt, sondern ein Kontinuum, eine *Zielmannigfaltigkeit*.

¹ Für die Modellbildung wird das Fördergut weiterhin als kontinuierlich und nicht als Stückgut betrachtet. Bei hinreichend großer Aufnahmekapazität der Fördereinrichtung bedeutet dies keine wesentliche Vergrößerung.

² Die *exakte* Lage dieses Ortes ist für den weiteren Entwurf nicht wichtig. In der Anordnung nach Bild 1 läßt sich bedingt durch die nur ungenau bekannte Durchlaufzeit durch den Block „Leseelektronik und Adressinterpretation“ sagen: der Ort liegt „kurz hinter“ dem Scanner.

3 Entwurf einer Regelung

Häufig wird ein zeitkontinuierliches System mit Totzeiten zur Erleichterung des Reglerentwurfs zunächst in eine *zeitdiskrete* Darstellung überführt, so daß eine einheitliche Beschreibung durch Differenzgleichungen entsteht. Dieser Weg führt hier zu Schwierigkeiten, weil die Totzeit zeitveränderlich ist.

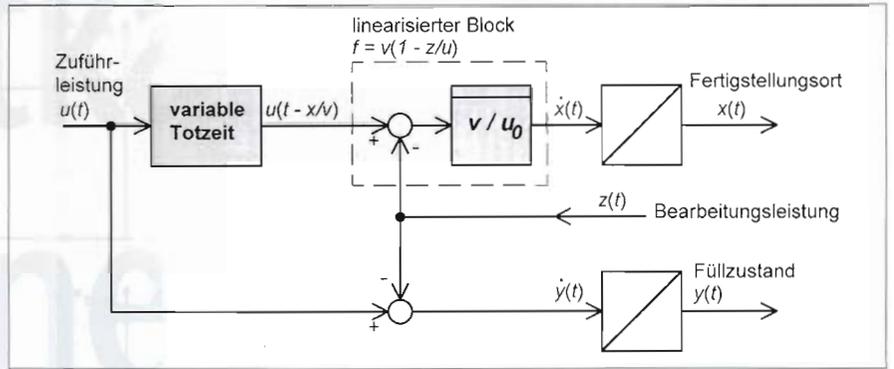


Bild 3: Linearisierung des Blocks $f(z, u)$ zeigt: Regelgröße x und Hilfsregelgröße y sind eng verwandt.

Stabilisierung durch Rückführung einer Hilfsregelgröße

Zur Stabilisierung des Systems hat es sich als günstig erwiesen, nicht die Regelgröße x , sondern die Hilfsgröße y rückzuführen. Dieses ungewöhnliche Vorgehen läßt sich folgendermaßen motivieren: Für einen sinnvollen Betrieb müssen Bearbeitungsleistung z und Zuführleistung u im Mittel gleich sein. Um das sicherzustellen, liegt es nahe, die Differenz $u - z$ zu integrieren und die resultierende Größe y durch eine Regelung auf einem konstanten Wert zu halten. Die Größe y ist aus Gleichung (7) schon bekannt und bezeichnet gerade den Füllzustand der Fördereinrichtung. Daß eine Rückführung von y auch eine günstige Auswirkung auf x erwarten läßt, wird deutlich, wenn man den nichtlinearen Block in Bild 2 um einen stationären Punkt $u_0 = z_0$ linearisiert. Wie in Bild 3 zu sehen, hängen x und y durch gleiche Strukturen mit u und z zusammen; lediglich die Totzeit fehlt im unteren Zweig. Wird nun y durch geeignetes $u(t)$ konstant gehalten, so nimmt auch x spätestens nach Verstreichen der Totzeit einen konstanten Wert an. Diese Aussage gilt auch *ohne* Linearisierung: Für konstantes y gilt $z = u$ wegen (7), daraus folgt $\dot{x} = f(z, u) = 0$ laut (6), also eine konstante Regelgröße x .

Um die Hilfsregelgröße y zu stabilisieren und die Schwankungen der Störgröße z auszuregulieren, eignet sich ein einfacher *Zweipunktregler*. Er schaltet die Zuführeinrichtung auf volle Leistung, wenn der Füllzustand y der Fördereinrichtung kleiner als ein Sollwert w ist, und stoppt die Zuführeinrichtung, wenn der Sollwert w erreicht ist. Bild 4 zeigt den Hilfsregelkreis, bestehend aus einem I-Glied mit vorgeschalteter Summationsstelle gemäß (7) und dem Zweipunktregler. Durch Einsetzen des Regelgesetzes in (7) erhält man für den geschlossenen Kreis

$$\dot{y}(t) = u_{\max} \sigma(w(t) - y(t)) - z(t) \text{ für } y \geq 0. \quad (8)$$

Wie verhält sich der Füllzustand y mit diesem Regler? Mit den realistischen Annahmen $w > 0$ und $z \geq 0$ sind vier Fälle zu unterscheiden:

- Fall 1: $z(t) = 0$. Die Förderleistung $u(t)$ ist entweder sofort gleich Null oder springt auf Null, nachdem y den Sollwert w erreicht hat. Dieser Zustand bleibt erhalten, y ist konstant.
- Fall 2: $z(t) = u_{\max}$. Die Förderleistung $u(t)$ nimmt dauerhaft den Wert u_{\max} an (sofort oder nachdem y den Sollwert unterschreitet). Dieser Zustand bleibt erhalten, y ist konstant.

Fall 3: $z(t) > u_{\max}$, das heißt die Bearbeitungsleistung ist höher als die höchstmögliche Zuführleistung u_{\max} . Die Förderstrecke wird leergearbeitet, und y wird zu Null, kann aber offensichtlich nicht kleiner als Null werden (was in Bild 4 nicht wiedergegeben ist).

Fall 4: $0 < z(t) < u_{\max}$. Dies ist der normale Betriebszustand. Ist $y < w$, so wird die Förderstrecke innerhalb der kürzestmöglichen Zeit mit $\dot{y} = u_{\max} - z$ befüllt, bis w erreicht ist. Ist $y \geq w$, so wird die Förderstrecke in kürzestmöglicher Zeit mit $\dot{y} = -z$ entleert, bis w unterschritten wird³.

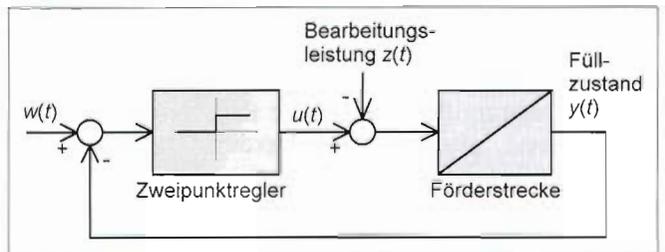


Bild 4: Hilfsregelkreis mit Zweipunktregler.

Im normalen Betrieb folgt die Hilfsregelgröße y einer sprunghaften Änderung der Führungsgröße w also in der kürzestmöglichen Zeit; der Regelkreis arbeitet *zeitoptimal* [11] und ist *stabil*.

Einstellen der Regelgröße durch Störgrößen-aufschaltung

Durch die Stabilität des Hilfsregelkreises wird sichergestellt, daß die Menge zugeführten Gutes im Mittel gleich der Menge bearbeiteten Gutes ist. Darüber hinaus sagen die Eigenschaften des Hilfsregelkreises zunächst nichts über die Regelgröße x aus, deren Verhalten ja im Mittelpunkt des Interesses steht. Für *stationäre Zustände* des Systems, das heißt für eine beliebige zeitkonstante Störgröße $z(t) = z_{\text{stat}}$, läßt sich aber ein einfacher Zusammenhang zwischen y und x herleiten: Aus $\dot{y} = 0$ folgt zunächst $u(t) = z_{\text{stat}}$ und spätestens nach Verstreichen der maximalen Totzeit

³ Um zu häufiges Schalten von $u(t)$ zu vermeiden, kann im Zweipunktregler eine Hysterese vorgesehen werden.

$c(x, t) = z_{\text{stat}}/v$ gemäß (5). Die Konzentration c ist also konstant bezüglich Zeit und Ort. Demzufolge verteilt sich die Füllmenge y_{stat} *gleichmäßig* über die Länge x_{stat} , und es gilt $c(x, t) = y_{\text{stat}}/x_{\text{stat}}$. Gleichsetzen dieser beiden Beziehungen für c liefert

$$\frac{z_{\text{stat}}}{v} = \frac{y_{\text{stat}}}{x_{\text{stat}}} \quad (9)$$

Berücksichtigt man noch, daß y für beliebiges konstantes z auf $y(t) = y_{\text{stat}} = w$ einschwingt, erhält man daraus

$$x_{\text{stat}} = v \frac{w}{z_{\text{stat}}} \quad (10)$$

Die Regelgröße x nimmt also einen *hyperbelförmigen* Verlauf in Abhängigkeit von z_{stat} . Der Fertigstellungs-ort x liegt bei hoher Bearbeitungsleistung nah an der Zuführeinrichtung und bei niedriger Bearbeitungsleistung weit weg. Bild 5a verdeutlicht das Gesagte: unabhängig von z_{stat} ist $y_{\text{stat}} = w = \text{const}$, der Ort x_{stat} dagegen gehorcht Gleichung (10). Daran ist unbefriedigend, daß der Ort x für kleine Verarbeitungsleistung z stark anwächst und das Ende der Fördereinrichtung zu überschreiten droht. Abhilfe könnte durch sehr kleine Wahl von w geschaffen werden, mit dem Nachteil, bei mittlerer und hoher Bearbeitungsleistung die Kapazität der Förderstrecke ungenutzt zu lassen.

Gleichung (10) legt ein anderes Vorgehen nahe: Wenn es gelänge, die Führungsgröße w nicht konstant, sondern proportional zu z_{stat} vorzugeben, dann würde sich ein *konstanter*, von z_{stat} unabhängiger Ort x_{stat} einstellen. Dazu müßte die aktuelle Bearbeitungsleistung bekannt sein, also gemessen werden. Das wiederum wird in vielen Fällen möglich sein; insbesondere bei der Postgutsortierung kann die Leistung des Anschritflensers relativ leicht z. B. durch Zählen der verarbeiteten Bilder innerhalb eines geeigneten Zeitintervalls ermittelt werden. Mit der Wahl

$$w(t) = k z(t) \quad (11)$$

stellt sich dann stationär der feste Ort der Fertigstellung

$$x_{\text{stat}} = v k \quad (12)$$

ein, siehe Bild 5b. Die Rückführung gemäß (11) ist als *Störgrößenaufschaltung* aufzufassen, denn die unvorhersehbar schwankende Einflußgröße z wird gemessen und als Führungsgröße aufgeschaltet. Bild 6 zeigt die Struktur des nunmehr vollständigen Regelsystems.

Wählt man k so, daß x_{stat} ungefähr in der *Mitte der Förderstrecke* zu liegen kommt, so ist man für unvorhergesehene Schwankungen der Störgröße z bestens gerüstet: In beiden Richtungen steht die halbe Förderlänge als Puffer bereit, um x am Verlassen der im Regelziel formu-

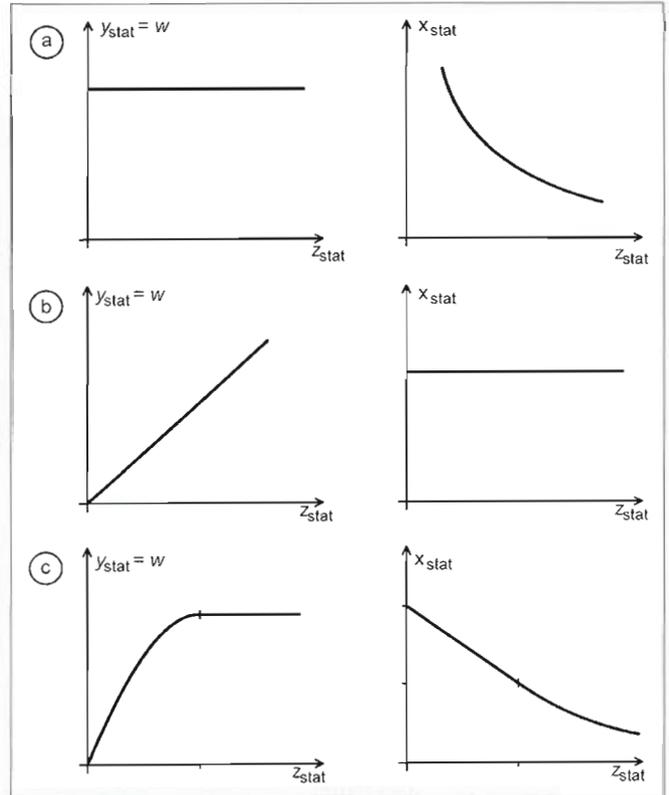
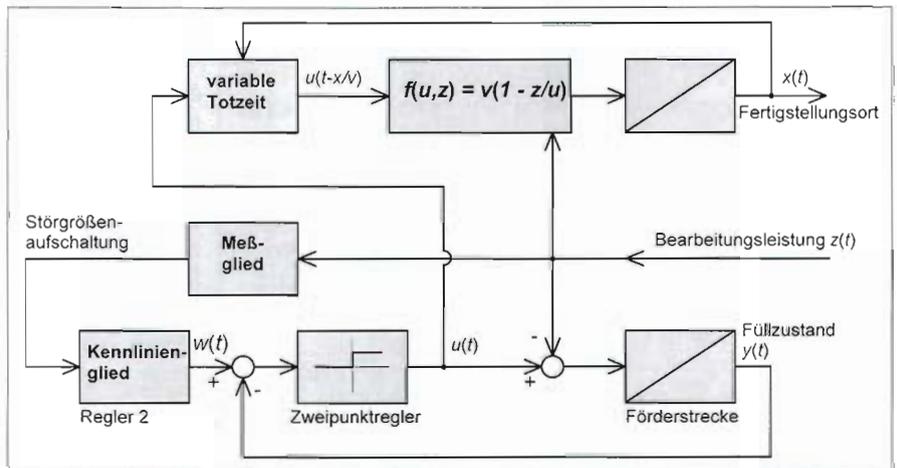


Bild 5: Stationäres Verhalten der Hilfsregelgröße y und der Regelgröße x in Abhängigkeit von der stationären Störgröße z_{stat} : a) für konstante Führungsgröße w , b) und c) mit w als Funktion der Störgröße z .

lierten Zielmannigfaltigkeit zu hindern. Bei einer derartigen Wahl von k wird also angenommen, daß die aktuell gemessene Bearbeitungsleistung z gleichzeitig die günstigste Schätzung für *zukünftige* $z(t)$ ist.

Diese Annahme muß nicht richtig sein. Ist bekannt, daß z innerhalb *fester Grenzen* schwankt, so wird man dieses Wissen in die Prognose einbeziehen wollen. Dazu kann die Kennlinie (11) entsprechend verfeinert werden, wie beispielhaft im linken Teil von Bild 5c dargestellt. Gemäß Bild 5c liegt der stationäre Fertigstellungsort x_{stat} für *kleine* z nahe am Ende der Förder-

Bild 6: Vollständige Regelung mit Hilfsregelkreis und Störgrößenaufschaltung.



strecke, was unbedenklich ist, da z kaum weiter fallen kann. Für *großes* z dagegen rückt x_{stat} nahe an den Anfang der Förderstrecke, was ebenfalls unbedenklich ist, da $y_{\text{stat}} > 0$ gilt, die Förderstrecke also nicht leergearbeitet wird.

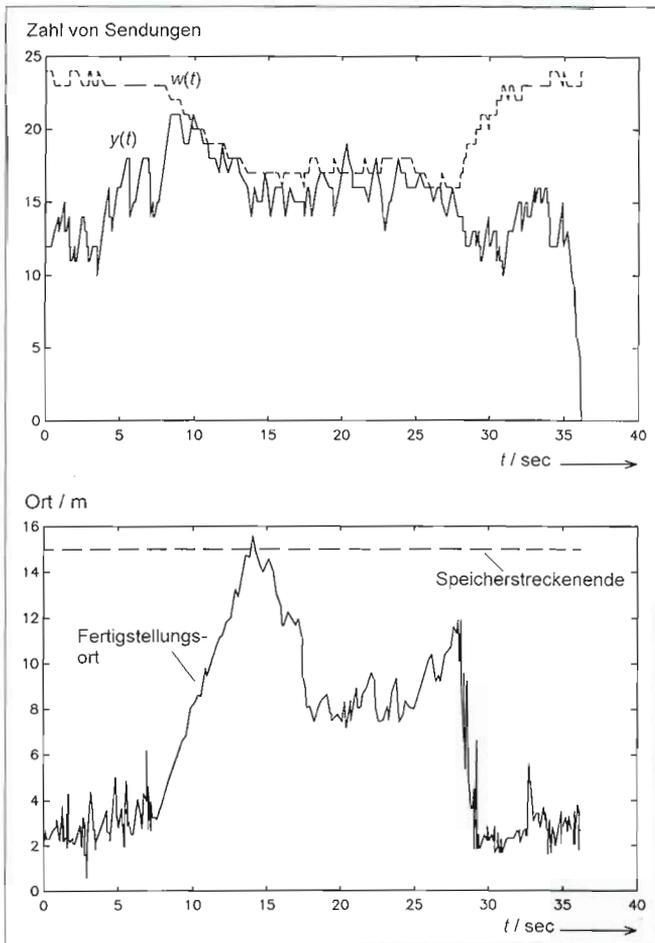
In beiden Varianten der Störgrößenaufschaltung arbeitet das Gesamtsystem optimal im folgenden Sinne:

Nach einer sprunghaften Änderung der Bearbeitungsleistung z überführt der Zweipunktregler, geführt durch die Störgrößenaufschaltung, den Ort x der Fertigstellung in der *kürzestmöglichen Zeit* in einen Punkt, der auf der *Zielmannigfaltigkeit* liegt, also *optimalen Betrieb* gemäß der Definition in Abschnitt 1 erlaubt.

Dabei kann dieser Punkt der Zielmannigfaltigkeit wie gesagt durch Gleichung (11) *konstant* vorgegeben werden, oder es kann a-priori-Wissen über das Verhalten von z einfließen und z. B. eine Kennlinie nach Bild 5c verwendet werden.

Bild 7 verdeutlicht die Vorzüge der Störgrößenaufschaltung. In einem Experiment an einer Briefsortieranlage wurde ein Stapel von 300 Briefen verarbeitet, die ersten 100 sehr leicht lesbar, die nächsten schwer lesbar, dann wieder 100 leicht lesbare Sendungen. Unabhängig vom Leseergebnis sinkt die Leistung des Anschriftenlesers bei den schwer entzifferbaren Adressen stark. Im oberen Teil des Bildes ist das Verhalten der Führungsgröße w und die tatsächlich sich einstellende

Bild 7: Meßschriebe des Fertigstellungsortes x in einer Briefsortieranlage.



Zahl y von unbearbeiteten Briefen zu sehen. Im Anfangsbereich und im Endbereich des Plots liegt die Leistung z des Anschriftenlesers höher als die höchstmögliche Leistung u_{max} der Stoffeingabe, und y kann w nicht folgen, was aber keinen Nachteil darstellt. Im mittleren Bereich, bei der Verarbeitung der schwer entzifferbaren Adressen, sinkt die Leistung des Anschriftenlesers, die Führungsgröße w wird gemäß der Kennlinie nach Bild 5c zurückgenommen auf einen Wert um 17; y kann w nunmehr folgen. Der Fertigstellungsort x folgt dem Verlauf im unteren Teil des Bildes. Wesentlich ist, daß der Ort x beim Leistungseinbruch des Anschriftenlesers nur kurzzeitig das Ende der Speicherstrecke überschreitet und sich dann dauerhaft ungefähr auf die Mitte der Speicherstrecke einstellt. Führt man das gleiche Experiment *ohne* Störgrößenaufschaltung (mit konstanter Führungsgröße $w = 23$ gemäß Bild 5a) durch, so kommt der Ort x dauerhaft in der Nähe des Speicherstreckenendes zu liegen, und eine große Zahl von Sendungen verläßt unbearbeitet die Speicherstrecke.

Die Struktur mit Hilfsregelkreis und Störgrößenaufschaltung ist inzwischen in einer beträchtlichen Zahl von Briefsortieranlagen implementiert und bewährt sich sehr gut [12]. Die Besonderheit des Entwurfes ist der Verzicht auf Messung und Rückführung der Regelgröße; stattdessen werden Füllzustand y und Bearbeitungsleistung z zurückgeführt, die eine *totzeitfreie Reaktion* erlauben.

4 Besonderheiten von Briefsortiermaschinen

In einer weiteren Ausbaustufe der beschriebenen Briefsortiermaschine werden diejenigen Bilder, zu denen der Anschriftenleser keine gültige Adresse ermitteln konnte, auf *Bildschirmarbeitsplätze* aufgeschaltet, und die Sortierinformation – in der Regel die Postleitzahl – wird von Hand eingegeben. Diese sogenannte *Videocodierung* ist in der Anordnung nach Bild 8 berücksichtigt. Gegenüber Bild 1 kommt ein Bildspeicher hinzu, der die vom Anschriftenleser erfolglos bearbeiteten Bilder (*Rejects*) hält, bis sie von einem Video-Arbeitsplatz angefordert werden. Die eingetippte Sortierinformation wird wiederum in den Ergebnisspeicher eingetragen. Als neue Regelgröße ist der Ort x' der Videobearbeitung zu berücksichtigen, der wie schon der Ort x innerhalb der Speicherstrecke gehalten werden soll. Das Konzept der Hilfsregelkreise mit Störgrößenaufschaltung läßt sich auch für diese komplizierte Anordnung konsequent fortsetzen. Allerdings tritt als weitere Störgröße nicht nur die *Bearbeitungsleistung z' der Videocodierkräfte* hinzu, sondern zusätzlich die unvorhersehbar schwankende *Leserate L des Anschriftenlesers*⁴. Auch sie wird gemessen und geht als Prognosewert \bar{L} in die Störgrößenaufschaltung ein.

⁴ Die Leserate bezeichnet den Quotienten aus der Zahl *erfolgreich* vom Anschriftenleser bearbeiteter Briefe durch die *Gesamtzahl* bearbeiteter Briefe. Sie spielte in den vorigen Abschnitten keine Rolle.

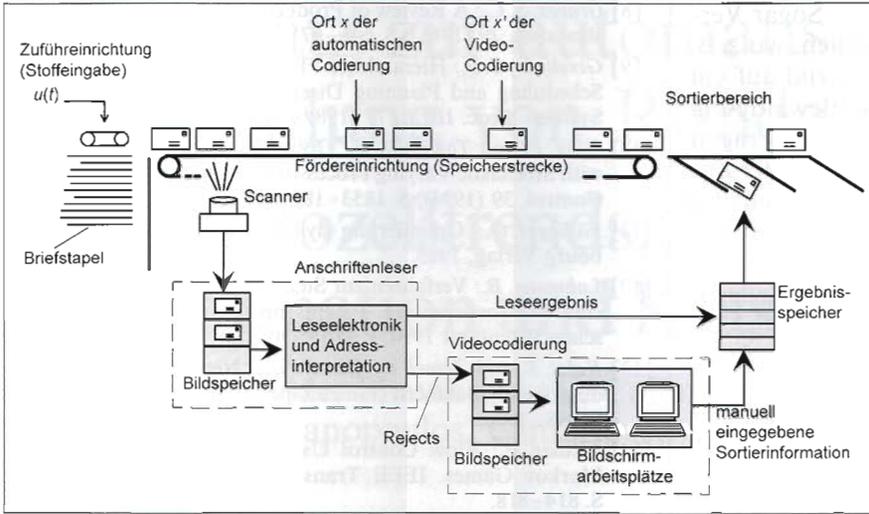


Bild 8: Funktionseinheiten der Maschine mit Anchriftenleser und Videocodierplätzen.

Ziele verfolgt werden, nämlich y und y' auf günstige Werte einzustellen, hierzu jedoch nur *eine* Stellgröße verfügbar ist, nämlich die Zuführleistung u , muß aus den Ausgängen der beiden Zweipunktregler ein einziges Stellsignal generiert werden. Das kann zum Beispiel durch die eingezeichnete *Minimumbildung* geschehen. Diese „vorsichtige Wahl“ bietet die größte Sicherheit gegen unbearbeitete Sendungen am Ausgang der Speicherstrecke und hat sich in der Praxis bewährt.

5 Ausblick

Es wurde eine Regelungsstruktur für eine allgemeine Klasse von Förder- und Bearbeitungsprozessen angegeben, die ein typisches Problem von Förderprozessen, die Totzeit, elegant umgeht. Die vergrößerte Betrachtung von Stückgut als Fließgut erweist sich als zulässig, da die Aufnahmekapazität der Förderstrecke hinreichend groß ist und die Bearbeitungszeiten klein gegenüber der Förderstreckenlänge sind.

Trotz der diskutierten Optimalitätseigenschaften bleibt aber die Frage offen, ob nicht andere Regelungsstrukturen zu ähnlich guten oder besseren Ergebnissen führen können, oder ob nicht andere Modellbeschreibungen, z. B. als Stückgutprozeß mit Hilfe eines Petri-

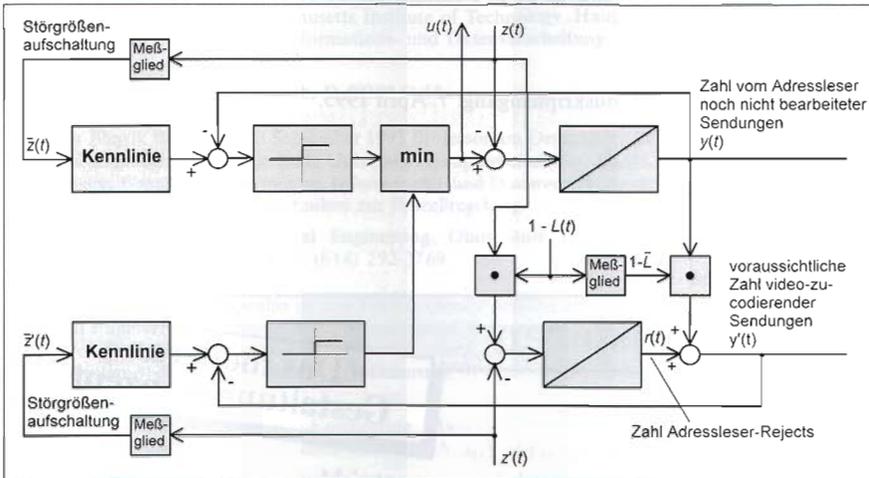


Bild 9: Hilfsregelkreise mit Störgrößenaufschaltung für Anchriftenleser und Videocodierung mit den Störgrößen z , z' und L und den Hilfsregelgrößen y und y' .

Bild 9 zeigt die Struktur der beiden Hilfsregelkreise mit Störgrößenaufschaltungen; die Modellierung der Fertigstellungsorte x und x' des Anchriftenlesers und der Videocodierer sind der Übersichtlichkeit halber weggelassen. Im oberen Teil des Bildes findet sich die Anordnung nach Bild 6 wieder, die die Zahl y der vom Anchriftenleser noch nicht bearbeiteten Sendungen auf günstige Werte einstellt. Die *voraussichtliche Gesamtzahl video-zu-codierender Sendungen* $y'(t)$ setzt sich aus den Rejects $r(t)$ und den noch unbearbeiteten Sendungen $y(t)$ multipliziert mit der prognostizierten Reject-Rate $1 - \bar{L}$ zusammen. Die Rejects $r(t)$ gehorchen einer Gleichung von Typ (7), wobei zu berücksichtigen ist, daß die Rejects aus der Leseleistung $z(t)$ multipliziert mit der Reject-Rate $1 - L(t)$ entstehen, also

$$\dot{r}(t) = (1 - L(t)) z(t) - z'(t) \tag{13}$$

Darin bezeichnet $z'(t)$ die Gesamtbearbeitungsleistung der Videocodierkräfte. Die Anordnung des Zweipunktreglers und des Kennliniengliedes im Videocodier-Zweig erfolgt wie schon in Bild 6. Da nun *zwei*

Netzes, erfolgversprechend sind. Ebenso ist heute unklar, welche Verbesserungen der Störgrößenaufschaltung durch *dynamische* Maßnahmen anstelle der Kennlinienglieder möglich sind. Im Bereich der Briefsortierung bei Durchsatzzahlen von 40000 Sendungen/h lohnt hier jedes Quäntchen Verbesserung. Aber auch allgemeinere Fragen drängen sich auf, z. B. nach einer *systematischen Wahl* von Meß- und Rückführungsgrößen in Systemen mit verteilten Parametern. Schließlich wurde die Hilfsregelgröße y in diesem Beitrag heuristisch eingeführt.

Einen weiteren Ansatzpunkt für Verbesserungen stellt die Abarbeitungsstrategie der im Speicher wartenden Bilder dar (siehe Bild 1). Neben der FIFO-Strategie wird zur Zeit folgendes bedingtes LIFO-FIFO-Prinzip eingesetzt: „Wähle das älteste Bild, das noch mindestens 3 Sekunden Zeit bis zum Ende der Förderstrecke hat. Existiert kein solches, so wähle das jüngste Bild“ (vergleiche insbesondere [6]). Solche *Warteschlangenprobleme* berühren die Disziplinen der Informatik und der Signal- und Datenübertragung, aber

auch das Gebiet der Produktionsplanung. Sogar Verbindungen zur Spiel-Theorie sind zu nennen, wo z. B. ein „guter“ und ein „böser“ Spieler steuernd auf ein System einwirken können [13; 14]. Zur Bewältigung anspruchsvoller automatisierungstechnischer Fragen sind von solchen interdisziplinären Ansätzen in der Zukunft sicherlich interessante Impulse zu erwarten.

Literatur

- [1] *Franke, D.*: Systeme mit örtlich verteilten Parametern. Springer-Verlag, 1987.
- [2] *Gilles, E.-D.*: Systeme mit verteilten Parametern. R. Oldenbourg Verlag, 1973.
- [3] *Sandweg-Kohmann, A.*: Regelung eines ereignisdiskreten Stückprozesses. *Automatisierungstechnik* 40 (1992), S. 357–361.
- [4] *Kleinrock, L.*: Queueing Systems. Verlag John Wiley & Sons, 1974.
- [5] *Lazar, A. A.*: Optimal Flow Control of a Class of Queueing Networks in Equilibrium. *IEEE Trans. autom. Control*, 28 (1983), S. 1001–1007.
- [6] *Panwalkar, S. S. und Iskander, W.*: A Survey of Scheduling Rules. *Operations Research*, 25 (1977), S. 45–61.
- [7] *Seidman, T. I.*: ‚First Come, First Served‘ Can be Unstable. *IEEE Trans. Autom. Control*, 39 (1994), S. 2166–2171.
- [8] *Graves, S. C.*: A Review of Production Scheduling. *Operations Research*, 29 (1981), S. 646–675.
- [9] *Gershwin, S. B.*: Hierarchical Flow Control: A Framework for Scheduling and Planning Discrete Events in Manufacturing Systems. *Proc. IEEE*, 77 (1989), S. 195–209.
- [10] *Nain, P. und Towsloey, D.*: Optimal Scheduling in a Machine with Stochastic Varying Processing Rate. *IEEE Trans. Autom. Control*, 39 (1994), S. 1853–1855.
- [11] *Föllinger, O.*: Optimierung dynamischer Systeme. R. Oldenbourg Verlag, 1985.
- [12] *Lohmann, B.*: Verfahren zur Steuerung der Eingabestation für eine Briefsortieranlage. Patentschrift, eingereicht beim deutschen Patentamt 1994, P 44 19 430.7
- [13] *Kalai, E. und Zemel, E.*: Generalized Network Problems Yielding Totally Balanced Games. *Operations Research*, 30 (1982), S. 998–1008.
- [14] *Altman, E.*: Flow Control Using the Theory of Zero Sum Markov Games. *IEEE Trans. Autom. Control*, 39 (1994), S. 814–818.

Der Beitrag ist ein erweitertes Manuskript eines Vortrages beim Festkolloquium anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. O. Föllinger am 28.10.1994 in Karlsruhe.

Manuskripteingang: 7. April 1995.