2-2513

automatisierungstechnischer Anlagen vertraut. Der im methodischen Denken geschulte Physiker konnte sich dabei ein bemerkenswert breites praktisches Wissen erwerben.

Die günstige technische und wirtschaftliche Entwicklung unseres Fachgebietes in den zurückliegenden Jahren erforderte auch im Hause Siemens organisatorische Veränderungen. Dr. *Urbach* hat diese nicht nur überlebt, sondern sie in seiner besonders ausgeprägten pragmatischen Denkungsweise wirkungsvoll und nachhaltig mitgestaltet. Als Generalbevollmächtigter Direktor der Siemens AG leitet er heute den Geschäftsbereich Meß- und Prozeßtechnik und ist damit der Exponent der Meß- und Regelungstechnik des Unternehmens.

Diese Position ist für *Walter Urbach* Verpflichtung, der Industrie unseres Fachgebietes in größerem Rahmen zu dienen. So wirkt er als Vorsitzender des Fachverbandes 15 „Meßtechnik und Prozeßautomatisierung" im Zentralverband der Elektrotechnischen Industrie (ZVEI), als Mitglied des Präsidentenkomitees vom Comité des Industries de la Mesure Électrique et Électronique de la Communauté (CIMEC), als Mitglied des Vorstandes der Arbeitsgemeinschaft INTERKAMA und als Kuratoriumsmitglied des Haus der Technik e. V., Essen. Zwei Hauptziele kennzeichnen dabei seine gegenwärtige Arbeit: Das Durchsetzen kombinierter Regelungs- und Steuerungssysteme mit modernen Technologien einerseits sowie das Halten und Fördern einer elektronischen Meßtechnik andererseits.

Daß sich *Walter Urbach* nicht nur zu so klaren technischen Zielsetzungen, sondern auch zu privaten Hobbies bekennt, die außer Kondition noch Zeit, Talent und musische Neigungen voraussetzen, das beweist Intelligenz und Mut. Beides sind sicher gute Voraussetzungen für seine Tätigkeit als Herausgeber der *Regelungstechnik* und der *Regelungstechnischen Praxis*.

Herzlichst Ihr
Hans Sartorius

Lieber Herr Sartorius!

Sie haben den festen Entschluß kundgetan, das Amt des Herausgebers unserer Zeitschrift abzugeben und in jüngere Hände zu legen. Fast dreißig Jahre haben Sie sich dieser Aufgabe mit großem Erfolg gewidmet. Wie gut verstehe ich daher Ihre Entscheidung. Sie ist Ihnen gewiß nicht leicht geworden und ich darf Ihnen versichern, daß ich diesem unausweichlichen Tag mit Unruhe und Sorge entgegengesehen habe.

Wir dürfen in Anspruch nehmen, daß die Begründung der *Regelungstechnik* unsere Idee war und daß sie den Schritt von der Idee zur Realität nicht ohne unsere gemeinsame Initiative bestanden hätte. Die Freude an diesem Fachgebiet und die Begeisterung, die uns geleitet hat, ist in einer vorangegangenen vieljährigen beruflichen Zusammenarbeit gewachsen, an die ich immer gerne zurückdenken werde. Als ich mich dann dem Verlagsmetier zugewandt hatte, konnte ich Ihnen daher mit großer Zuversicht die herausgeberische Verantwortung für unsere Zeitschrift anvertrauen. Beide können wir dankbar bestätigen, daß uns Wohlwollen und tätige Mitwirkung einer Reihe von Fachkollegen von Anfang an begleiteten.

Sie haben mit sicherem Urteilsvermögen die redaktionellen Richtlinien gesetzt und großes Geschick bei der Suche nach interessanten Autoren und Themen bewiesen. Sichtbar und unsichtbar haben Sie sich immer sorglich und umsichtig für die Interessen der Zeitschrift eingesetzt, wichtige Verbindungen hergestellt und Gefahren abgewendet. Vor allem Ihrer Initiative ist es zu verdanken, daß wir schon sechs Jahre nach Begründung der *Regelungstechnik* die Tochterzeitschrift *Regelungstechnische Praxis* ins Leben rufen und damit den Interessentenkreis für unser Fachgebiet wesentlich erweitern konnten. Bei all Ihrem erfolgreichen Bemühen aber sehe ich Ihren wichtigsten Beitrag in der Auswahl der Persönlichkeiten, die Sie als Mitarbeiter für beide Zeitschriften gewonnen haben.

Die schönste Bestätigung für Ihr erfolgreiches Wirken ist das Ansehen, das die *Regelungstechnik* und die *Regelungstechnische Praxis* in der deutschen und ausländischen Fachwelt genießen. Ich habe die ehrenvolle Aufgabe, Ihnen für all Ihre langjährigen Dienste und Verdienste den aufrichtigen Dank des Verlages auszusprechen, nicht zuletzt auch für Ihre Bereitschaft, sich im Kreise des wissenschaftlichen Beirates für die gemeinsame Sache weiter einzusetzen. Auch im Auftrage der Redaktion und insbesondere im Namen des Chefredakteurs, Herrn *K. F. Früh*, darf ich Ihnen Dank sagen für nunmehr 22 Jahre gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Sie haben den Rahmen gesetzt und den Freiraum gegeben, in dem fruchtbare Redaktionsarbeit geleistet werden konnte. Persönlich bitte ich Sie, meinen herzlichen Dank für immer faire Partnerschaft und freundschaftliche Gesinnung entgegenzunehmen.

Ihr *R. C. Oldenbourg*

Einführungsaufsatz • Tutorial Paper

Einführung in die Begriffswelt allgemeiner Netzsysteme

Introduction to the terminology of general network systems

Von S. WENDT, Kaiserslautern

Bei dem Stichwort Netzsysteme denkt man üblicherweise an elektrische Netzwerke, an Blockschaltbilder von Regelstrecken oder ähnliches. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff des Netzsystems so allgemein definiert, daß auch ganz andere Systeme, wie z. B. Schaltwerke oder kommunizierende Programme der Datenverarbeitung, darunter passen. Es wird zwischen Gleichungsbausteinen und Zuweisungsbausteinen für Netze unterschieden. Aus letzteren entstehen die sogenannten Instanzennetze. Die Erfassung der Dynamik in Instanzennetzen mit diskreten Wertebereichen der Beobachtungsvariablen geschieht mit den sogenannten Kausalnetzen, einer Interpretation der Petri-Netze.

Under the keyword network systems one commonly thinks of electric networks, block diagrams of control systems and so forth. In this paper the term network systems is defined in a general way so that even very different systems like switching networks or communicating programs from data processing are encompassed. Equation modules and assignment modules for networks are distinguished. From the latter the so called staged networks arise. The description of the dynamics of networks with discrete range of the observation variables is achieved by means of socalled causal networks, an interpretation of the Petri-nets.

1. Einführende Übersicht

Wegen der digitalen Steuerungen und der Prozeßrechner, die in zunehmendem Maße seinen Alltag bestimmen, muß sich der Automatisierungstechniker längst schon mit zwei Klassen von Systemen befassen, nämlich einerseits mit solchen, deren Dynamik durch Differentialgleichungen erfaßt wird, und andererseits mit solchen, deren Beobachtungsvariablen diskrete Werte haben und deren Dynamik deshalb als Beziehung zwischen Wertänderungsereignissen dargestellt werden muß. Der Unterschied zwischen den kontinuierlichen und den diskreten Systemen erscheint so fundamental, daß dadurch eine andere, systematisch sicher ebenso relevante Klassenbildung verdeckt wird: In die Klasse der *Instanzennetze* fallen sowohl die Analogrechenschaltungen als auch die digitalen Steuerungen, während ein elektrisches Netzwerk aus zwei- und mehrpoligen Bauelementen kein Instanzennetz ist. Das Kennzeichen einer Instanz ist ihre – manchmal zeitvariante – Zuständigkeit für Werteverläufe an ihren Anschlußklemmen. Während es beispielsweise sinnlos ist, von der Zuständigkeit eines Widerstandes für seinen Strom zu sprechen, da ihm dieser jederzeit von außen eingeprägt werden kann, darf man sehr wohl von der Zuständigkeit eines Integrators für seine Ausgangsspannung sprechen.

Prozesse in Instanzennetzen mit ausschließlich diskreten Wertebereichen werden durch *Petrinetze* erfaßt, die selbst elementare Instanzennetze sind. Sie stellen den Kausalzusammenhang zwischen Wertänderungen dadurch dar, daß sie das Geflecht der Kausalketten veranschaulichen. Man kann die Petrinetze in dieser Interpretation als Ablaufdiagramme für nichtsequentielle Prozesse bezeichnen.

Der technische Nutzen der hier vorgestellten Abstraktionen liegt in der Schaffung von Transparenz im Bereich von Systemen, deren Komplexität bisher nicht befriedigend beherrscht wird.

2. Netzsysteme

Als Systemtechniker ist man gewohnt, ein System als ein Netz aus Komponenten zu betrachten, wobei an den Verbindungsstellen zwischen den Komponenten Variablenwerte beobachtet werden. Der in dem System sich abspielende interessierende Prozeß kann dadurch beschrieben werden, daß man die Werte aller Variablen über der Zeit aufzeichnet. Beispiele für solche Netze sind elektrische Netze aus elementaren Bauelementen oder Strukturbilder für Regelstrecken, die als Analogrechenschaltungen realisiert werden können. Diesen Beispielen ist gemeinsam, daß die beobachtbaren Werte alle – zumindest in der Vorstellung – aus dem Kontinuum der reellen Zahlen stammen, selbst wenn sie bei der Beobachtung quantisiert werden.

Ein solches Beispiel zeigt Bild 1; es handelt sich um ein elektrisches Netzwerk. Die Darstellung dieses Netzwerks weicht etwas ab von der gewohnten Form, indem neben den sogenannten *Bausteinknoten* – hier Spannungsquelle,

Manuskripteingang: 7. Juli 1981.

Prof. Dr.-Ing. S. Wendt, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Elektrotechnik, Postfach 3049, D-6750 Kaiserslautern.

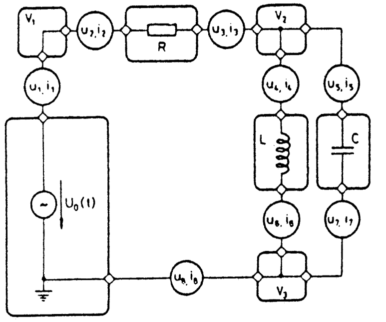

Bild 1. Elektrisches Netzwerk als Beispiel eines Netzsystems.

Widerstand, Spule und Kondensator – noch formal drei sogenannte *Verbindungsknoten* V_1, V_2 und V_3 als Netzelemente gekennzeichnet wurden. Jeder Anschlußpunkt eines Bausteinknotens ist mit genau einem Anschlußpunkt eines Verbindungsknotens verbunden, und jeder dieser Brücken zwischen Bausteinknoten und Verbindungsknoten ist eine vektorielle Beobachtungsvariable (u_k, i_k) zugeordnet. Dabei sei festgelegt, daß der Stromwert positiv ist für Ströme, die in Bausteinknoten hineinfließen, und daß die Spannungen gegen Masse gemessen werden.

In diesem Netzsystem spielt sich ein Prozeß ab, der sich als zeitliche Änderung der Werte der Beobachtungsvariablen äußert. Damit dieser Prozeß eindeutig festgelegt ist, müssen neben den funktionalen Eigenschaften der Knoten noch die Anfangswerte der variablen Bausteinzustände vorgegeben werden.

Die Zustandsvariable für die Spule ist der magnetische Fluß Φ; die Beziehung zwischen dieser Zustandsvariablen und den Beobachtungsvariablen an den Bausteinanschlüssen lautet

$$\Phi = L \cdot i_4 .$$

Als Anfangswert sei festgelegt

$$\Phi(0) = 0 ,$$

woraus folgt

$$i_4(0) = 0 .$$

Die Zustandsvariable für den Kondensator ist die elektrische Ladung Q; die Beziehung zwischen dieser Zustandsvariablen und den Beobachtungsvariablen an den Bausteinanschlüssen lautet

$$Q = C \cdot (u_5 - u_7) .$$

Als Anfangswert sei festgelegt

$$Q(0) = 0 ,$$

woraus folgt

$$u_5(0) - u_7(0) = 0 .$$

Die funktionalen Eigenschaften der Bausteine werden durch folgende Gleichungen festgelegt:

Spannungsquelle

$$u_1 = u_0(t) , \quad u_8 = 0 ,$$

Widerstand

$$(u_2 - u_3) = R \cdot i_2 , \quad i_2 + i_3 = 0 ,$$

Induktivität

$$\Phi = L \cdot i_4 , \quad (u_4 - u_6) = \frac{d\Phi}{dt} , \quad i_4 + i_6 = 0 ,$$

Kapazität

$$Q = C \cdot (u_5 - u_7) , \quad i_5 = \frac{dQ}{dt} , \quad i_5 + i_7 = 0 .$$

Die funktionalen Eigenschaften der Verbindungsknoten sind für alle drei Verbindungsknoten strukturell gleich. Die Summe aller Ströme an den Anschlüssen eines Verbindungsknotens ist Null, und die Spannungswerte an allen Anschlüssen eines Verbindungsknotens sind gleich. Angewandt auf das vorliegende Netz ergibt sich:

für V_1

$$u_1 = u_2 , \quad i_1 + i_2 = 0 ,$$

für V_2

$$u_3 = u_4 = u_5 , \quad i_3 + i_4 + i_5 = 0 ,$$

für V_3

$$u_6 = u_7 = u_8 , \quad i_6 + i_7 + i_8 = 0 .$$

Mit diesem Beispiel wurden alle Elemente eingeführt, die ein allgemeines Netzsystem kennzeichnen:

- Es gibt eine Menge $\mathbb{B}$ von Bausteinknoten, wobei jedem Bausteinknoten B eine Menge $\mathbb{A}(B)$ von Anschlußpunkten zugeordnet ist. Außerdem ist jedem Bausteinknoten B eine Zustandsvariable mit dem Wertebereich $\mathbf{Z}(B)$ zugeordnet. Jedem Anschlußpunkt $A(B)$ eines Bausteinknotens B ist ein Wertebereich $\mathbb{W}(A)$ für eine Beobachtungsvariable zugeordnet. Die Bausteine haben funktionale Eigenschaften, die darin bestehen, daß von den Prozessen, die auf der Basis der Wertebereiche auf den Anschlußvariablen und der Zustandsvariablen denkbar sind, ein Teil ausgeschlossen wird.

(Letzteres sei am Beispiel kurz veranschaulicht: Die funktionale Eigenschaft des Widerstands im Bild 1 besteht darin, von den auf den Variablen u_2, i_2, u_3 und i_3 denkbaren Prozessen alle diejenigen auszuschließen, bei denen zu irgendeinem Zeitpunkt t der Sachverhalt

$$(u_2 - u_3) \neq i_2 \cdot R$$

oder

$$i_2 + i_3 \neq 0$$

zutrifft.)

1.: Bausteinknoten mit Anschlüssen, denen jeweils ein Wertebereich zugeordnet ist
2. Verbindungsknoten mit Anschlüssen
3. Eindeutige Zuordnung Bausteinanschlüsse – Verbindungsanschlüsse
4. Definition von Z_0 aller Bausteine

- Neben der Menge $\mathbb{B}$ der Bausteinknoten gibt es die Menge $\mathbb{V}$ der Verbindungsknoten, wobei jedem Verbindungsknoten V eine Menge $\mathbb{A}(V)$ von Anschlußpunkten zugeordnet ist. Allen Anschlußpunkten eines Verbindungsknotens V ist ein gemeinsamer Wertebereich $\mathbb{W}(V)$ für die Beobachtungsvariablen zugeordnet. Die Verbindungsknoten haben funktionale Eigenschaften, die – genau wie bei den Bausteinknoten – darin bestehen, daß von den denkbaren Prozessen auf den Anschlußvariablen ein Teil ausgeschlossen wird. Die funktionalen Eigenschaften lassen sich jeweils allgemeingültig für alle Verbindungsknoten eines Netztyps – z. B. elektrisches Netzwerk oder Analogrechnerschaltbild – formulieren.
- Aus der Menge $\mathbb{B}$ der Bausteinknoten und der Menge $\mathbb{V}$ der Verbindungsknoten wird das Netz aufgebaut, indem Bausteinanschlüsse und Verbindungsknotenanschlüsse umkehrbar eindeutig einander zugeordnet werden. Dabei müssen die Wertebereiche zweier einander zugeordneter Anschlüsse gleich sein, da durch die Verbindung zweier Anschlüsse eine Beobachtungsvariable des Netzes entsteht.
- Damit der im Netzsystem beobachtbare Prozeß eindeutig festgelegt ist, müssen die Anfangswerte für die Zustandsvariablen aller Bausteinknoten vorgegeben werden, was sich aufgrund der funktionalen Eigenschaften der Bausteine auch als Vorgabe von Anfangswerten von Anschlußvariablen äußern kann. (So folgt beispielsweise aus einem vorgegebenen Wert für die Zustandsvariable eines Kondensators, nämlich der elektrischen Ladung, eine bestimmte Spannungsdifferenz zwischen den beiden Anschlüssen.).

Daß diese allgemeine Kennzeichnung eines Netzsystems nicht nur für Systeme zutrifft, wie man sie üblicherweise in der Regelungstechnik vor Augen hat, soll mit dem nächsten Beispiel veranschaulicht werden (siehe Bild 2a).

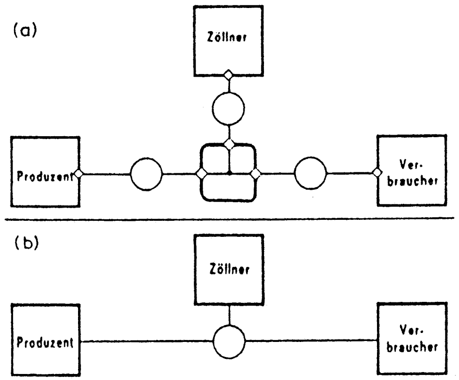

Bild 2. Einfaches Instanzennetz als Beispiel eines Netzsystems.

Die Menge $\mathbb{B}$ der Bausteinknoten enthält drei Elemente.

$$\mathbb{B} = \{\text{Produzent, Zöllner, Verbraucher}\} .$$

Jedem Baustein ist ein Anschlußpunkt zugeordnet, und zu allen drei Anschlußpunkten gehört der gleiche diskrete Wertebereich mit drei Elementen.

$$\mathbb{W}(A_i) = \{\text{leer, unverzollt belegt, verzollt belegt}\} .$$

Der Zustandswertebereich des Zöllners ist einelementig und damit irrelevant, während die Zustandswertebereiche des Produzenten und des Verbrauchers jeweils zwei Elemente enthalten.

$$\mathbf{Z}(\text{Produzent}) = \{\text{lieferunfähig, lieferbereit}\} ,$$
$$\mathbf{Z}(\text{Verbraucher}) = \{\text{abnahmeunfähig, abnahmebereit}\} .$$

Die Bausteinfunktionen sind teilweise indeterminiert. Nur die Wertefolgen sind determiniert, die Zeitintervalle zwischen Wertänderungen dagegen sind indeterminiert.

Produzent

Die Kombination „Zustand lieferbereit und Anschluß leer" geht sofort sprunghaft über in die Kombination „Zustand lieferunfähig und Anschluß unverzollt belegt". Die Situation „Zustand lieferunfähig" geht irgendwann sprunghaft über in „Zustand lieferbereit".

Zöllner

Die Situation „Anschluß unverzollt belegt" geht irgendwann sprunghaft über in „Anschluß verzollt belegt".

Verbraucher

Die Kombination „Zustand abnahmebereit und Anschluß verzollt belegt" geht sofort sprunghaft über in „Zustand abnahmeunfähig und Anschluß leer". Die Situation „Zustand abnahmeunfähig" geht irgendwann sprunghaft über in „Zustand abnahmebereit".

Die Menge der Verbindungsknoten enthält nur ein Element mit drei Anschlüssen, zu denen der gleiche dreielementige Wertebereich wie zu den Bausteinanschlüssen gehört.

Die funktionalen Eigenschaften der Verbindungsknoten für diesen Netztyp lauten:

Die Werte der Beobachtungsvariablen sind an allen Anschlüssen eines Verbindungsknotens gleich. In diesem Fall lassen sich die Beobachtungsvariablen den Verbindungsknoten selbst zuordnen und nicht mehr nur ihren Anschlüssen. Deshalb kann das Netz aus Bild 2a vereinfacht dargestellt werden, wie es Bild 2b zeigt. Dies entspricht auch unmittelbar der Anschauung. Die Beobachtungsvariable entspricht hier dem Platz, auf den der Produzent die Ware unverzollt legt, wo sie vom Zöllner verzollt wird und von wo sie der Verbraucher wegnimmt.

Der Anfangszustand des Systems sei für den Zeitpunkt $t = 0$ wie folgt vorgegeben:

Zustand des Produzenten

„lieferbereit",

Zustand des Verbrauchers

„abnahmebereit",

Wert der verbundenen Anschlußvariablen

„leer".

3. Instanzennetze

Ein Instanzennetz ist ein Netzsystem mit folgenden einschränkenden Eigenschaften:

1) Die funktionale Eigenschaft der Verbindungsknoten besteht darin, jeweils Wertegleichheit an allen ihren Anschlüssen zu garantieren.

2) Die Bausteinfunktionen, die hier Instanzenfunktionen heißen, lassen sich wie folgt darstellen:

Zu jeder Anschlußvariablen a_j gibt es formal immer zwei Funktionen, die *Zuständigkeitsfunktion* G und die *Wertezuweisungsfunktion* F. Die Zuständigkeitsfunktion legt die Zeiten fest, zu denen die Wertezuweisungsfunktion gilt. Die Bezeichnung „Zuständigkeitsfunktion" wurde gewählt, weil zu den Zeiten, zu denen die Wertezuweisungsfunktion gilt, die Instanz für die Zuweisung von Werten zur Variablen a_j zuständig ist. Der Ergebniswertebereich von G ist binär und enthält die Werte „a_j liegt im Zuständigkeitsbereich der Instanz" und „a_j liegt außerhalb des Zuständigkeitsbereichs der Instanz".

Das Argument von G besteht aus der Zeit t und den aktuellen Werten aller Anschlußvariablen $a_k(t)$ und der Zustandsvariablen $z(t)$.

(Zuständigkeit der Instanz für ihre Anschlußvariable a_j)

Zuständigkeits-funktion

$$= G_j[t, a_1(t), a_2(t), \ldots, a_m(t), z(t)].$$

Die Wertezuweisungsfunktion F gibt an, wie sich der Wert einer Anschlußvariablen a_j, welche seit dem Zeitpunkt t_G ununterbrochen im Zuständigkeitsbereich der Instanz lag, zum Zeitpunkt t bei $t_G \leq t$ bestimmen läßt. In das Argument dieser Funktion F müssen verschiedene Informationen eingehen, die man formal in Zustands- und Eingabeinformationen unterteilen kann. Der sogenannte totale Zustand S der Instanz zum Zeitpunkt t_G besteht aus den Werten aller Anschlußvariablen und der Zustandsvariablen zum Zeitpunkt t_G.

Totaler Zustand

$$S(t_G) = [a_1(t_G), a_2(t_G), \ldots, a_m(t_G), z(t_G)].$$

Die Eingabeinformation $E(t_G, t)$ besteht aus dem Werteverlauf aller Anschlußvariablen in denjenigen Teilen des Intervalls

$$t_G \leq \tau \leq t,$$

in denen sie außerhalb des Zuständigkeitsbereichs der Instanz lagen, also fremdbestimmt waren; nur in diesen Intervallen fließt über die Anschlußvariablen Information auf die Instanz zu. Mit diesen Festlegungen lautet die Wertezuweisungsfunktion einer Instanz für ihre Anschlußvariable a_j:

$$a_j(t) := F_j[t, S(t_G), E(t_G, t)].$$

Wertezuweisungs-funktion

Durch die Verwendung des Zuweisungssymbols „:=", wie es in Programmiersprachen üblich ist, anstelle eines bloßen Gleichheitszeichens wird zum Ausdruck gebracht, daß es sich hier um einen irreversiblen Zuweisungsvorgang und nicht um eine nach jeder vorkommenden Variablen auflösbare Gleichung handelt.

Zusätzlich zu den auf die Anschlußvariablen bezogenen beiden Funktionen G und F muß noch die Zustandsüberführungsfunktion H angegeben werden. Da die Zustandsvariable wie eine Anschlußvariable betrachtet werden kann, die immer im Zuständigkeitsbereich der Instanz liegt und an die keine andere Instanz angeschlossen ist, hat H die gleiche Form wie F. Als t_G ist hier jeder beliebige Wert zulässig, denn von jedem Zeitpunkt t_G an liegt die Zustandsvariable ununterbrochen im Zuständigkeitsbereich der Instanz.

$$z(t) := H[t, S(t_G), E(t_G, t)].$$

Zustandsübergangs-funktion

Die abstrakten Aussagen zu den Instanzenfunktionen müssen nun durch Beispiele veranschaulicht werden. Der einfachste Fall liegt vor, wenn die Zuständigkeiten zeitinvariant sind, d.h. wenn jede Anschlußvariable fest einer Instanz zugeordnet bleibt, die immer für die Wertzuweisung zuständig ist. In diesem Fall läßt sich jeder Anschluß einer Instanz klassifizieren. Für einen Eingang ist die Instanz nie zuständig, für einen Ausgang immer. Instanzen mit zeitinvarianten Zuständigkeiten sind beispielsweise logische Gatter oder Elemente in Analogrechenschaltungen wie Integratoren oder Multiplizierer.

Bsp.

Am Beispiel des Integrators kann anschaulich argumentiert werden, daß der Begriff der Zuständigkeit und die Verwendung des Zuweisungssymbols „:=" untrennbar zusammengehören. Würde man den Integrator einfach als Baustein beschreiben, der zwischen den Spannungsverläufen an seinen Klemmen die Beziehung

$$u_2(t) = u_2(0) + \int_0^t u_1(\tau) \cdot \frac{d\tau}{T}$$

garantiert, dann spräche nichts dagegen, daß man ihn bei eingeprägtem $u_2(t)$ als Differenzierer einsetzen könnte. Durch die Verwendung des Zuweisungssymbols dagegen wird die Auflösung der Gleichung nach $u_1(t)$ verboten. Die formale Wertezuweisungsfunktion des Integrators, bei der nur noch die relevanten Komponenten im Argument angegeben sind, sieht für $t_G = 0$ wie folgt aus:

$$u_2(t) := F[t, u_2(0), u_1(\tau) \text{ im Intervall } 0 \leq \tau \leq t].$$

Bei den Bausteinen des elektrischen Netzwerkes im Bild 1 dagegen gibt es keine Zuständigkeiten und somit keine Zuweisungen. Im Gegensatz zu den Instanzen, die man auch Zuweisungsbausteine nennen könnte, könnte man Bausteine der Art, wie sie im Bild 1 vorkommen, *Gleichungsbausteine* nennen. Selbst wenn es noch andere Bausteintypen für Netzsysteme geben sollte, sind doch bisher diese beiden Typen die einzigen relevanten in der Systemtechnik.

Zuweisungsbausteine versus Gleichungsbausteine

gedachte Komponenten

In dem Beispiel im Bild 2 gibt es zeitvariante Zuständigkeiten. Die drei Zuständigkeitsfunktionen lauten:

Der Produzent ist für seine Anschlußvariable $\begin{cases} \text{zuständig,} & \text{falls sie den Wert „leer" hat,} \\ \text{nicht zuständig} & \text{sonst.} \end{cases}$

Der Zöllner ist für seine Anschlußvariable $\begin{cases} \text{zuständig,} & \text{falls sie den Wert „unverzollt belegt" hat,} \\ \text{nicht zuständig} & \text{sonst.} \end{cases}$

Der Verbraucher ist für seine Anschlußvariable $\begin{cases} \text{zuständig,} & \text{falls sie den Wert „verzollt belegt" hat,} \\ \text{nicht zuständig} & \text{sonst.} \end{cases}$

Als relevantes Argument der Zuständigkeitsfunktionen tritt hier jeweils nur der aktuelle Wert der Anschlußvariablen auf. Obwohl das vorliegende Netz konfliktfrei ist, wird der Leser an dieser Stelle möglicherweise die Problematik des Zuständigkeitskonflikts erkennen. Ein solcher liegt vor, wenn Instanzen derart zu einem Netz verschaltet sind, daß sich Zuständigkeitsbereiche überschneiden. Dies wäre beispielsweise gegeben, wenn man die Ausgänge zweier Integratoren miteinander verbände, oder wenn man an den Übergabeplatz im Bild 2 einen zweiten Verbraucher anschließen würde. Auf die Konfliktproblematik wird im Zusammenhang mit Unstetigkeitsstellen noch näher eingegangen.

Weil im betrachteten Beispiel sämtliche Wertebereiche diskret sind, haben die Funktionen F und H zwangsläufig Unstetigkeitsstellen. Daß bei der Auswertung der Funktionen F und H an solchen Unstetigkeitsstellen eine zusätzliche Vorschrift beachtet werden muß, erkennt man, wenn man beispielsweise F und H für den Produzenten betrachtet. Die Funktion F für seine einzige Anschlußvariable lautet:

Wert der Anschlußvariablen des Produzenten $:= \begin{cases} \text{„leer",} & \text{falls Zustand „lieferunfähig",} \\ \text{„unverzollt belegt",} & \text{falls Zustand „lieferbereit".} \end{cases}$

Man vergesse dabei nicht, daß F nur gilt, wenn die Anschlußvariable im Zuständigkeitsbereich des Produzenten liegt. Die Zustandsüberführungsfunktion H des Produzenten lautet:

Zustand des Produzenten $:= \begin{cases} \text{„lieferbereit",} & \text{falls (Zustand „lieferbereit" und Anschlußvariable nicht „leer") oder (Zustand „lieferunfähig" und Indeterminismus entsprechend entschieden),} \\ \text{„lieferunfähig",} & \text{falls (Zustand „lieferbereit" und Anschlußvariable „leer") oder (Zustand „lieferunfähig" und Indeterminismus entsprechend entschieden).} \end{cases}$

In der Situation „Zustand lieferbereit und Anschlußvariable leer" ergibt die F-Zuweisung den Wert „unverzollt belegt" für die Anschlußvariable und die H-Zuweisung den Wert „lieferunfähig" für den Zustand. Da nun der Wert der Anschlußvariablen im Argument von H und der Zustandswert im Argument von F abgefragt werden, sind die Zuweisungsergebnisse davon abhängig, in welcher Reihenfolge man die Zuweisungen ausführt. Entweder

Ausgangssituation: Zustand lieferbereit, Anschlußvariable leer.

Nach F-Zuweisung: Zustand lieferbereit, Anschlußvariable unverzollt belegt.

Nach H-Zuweisung: Zustand lieferbereit, Anschlußvariable unverzollt belegt.

oder

Ausgangssituation: Zustand lieferbereit, Anschlußvariable leer.

Nach H-Zuweisung: Zustand lieferunfähig, Anschlußvariable leer.

Nach F-Zuweisung: Zustand lieferunfähig, Anschlußvariable leer.

Nach der im vorigen Abschnitt angegebenen Funktion des Produzenten ist keiner der beiden Fälle korrekt; vielmehr sind F und H gar nicht als getrennt nacheinander ausführbare Zuweisungen zu betrachten, sondern als Komponenten einer einschrittig auszuführenden Zuweisung, durch welche der Variablenvektor $(a_1, a_2, \ldots, a_m, z)$ einen neuen Wert erhält. Die Vereinigung aller F_j und H einer Instanz zu einer Vektorzuweisung ist selbstverständlich zulässig, da es sich hier ja um die Funktion eines einzigen Bausteins handelt. Das Problem der Zuweisungsreihenfolge tritt aber nicht nur innerhalb einer Instanz auf, sondern auch zwischen verschalteten Instanzen. Dieser Fall tritt einerseits bei dem bereits erwähnten Zuständigkeitskonflikt auf, andererseits kann dieses Problem auch in Netzen ohne Zuständigkeitskonflikte vorkommen. Zum letzteren sei ein Beispiel betrachtet: An den Übergabeplatz des Netzes im Bild 2 sei eine vierte Instanz angeschlossen mit der Aufgabe zu zählen, wie oft der Platz verzollt belegt wird. Diese Instanz ist nie für ihre Anschlußvariable zuständig, es gibt also hier nur eine Zustandsüberführungsfunktion H. Der Zustand ist ein Vektor mit den beiden Komponenten

$$z_1 \in 0, 1, 2, 3, \ldots;$$
$$z_2 \in \{\text{blockiert, zählbereit}\}.$$

Die Funktion H lautet:

Zustand des Zählers $:= \begin{cases} (z_1, \text{blockiert}), & \text{falls Zustand blockiert und Anschlußvariable verzollt belegt,} \\ (z_1, \text{zählbereit}), & \text{falls Anschlußvariable nicht verzollt belegt,} \\ (z_1 + 1, \text{blockiert}), & \text{falls Zustand zählbereit und Anschlußvariable verzollt belegt.} \end{cases}$

Es sei nun folgende Situation betrachtet: Der Übergabeplatz sei gerade durch Zuweisung vom Zöllner verzollt belegt worden. Der Zähler muß im Zustand zählbereit sein, der Verbraucher sei im Zustand abnahmebereit. In dieser Situation besteht eine Reihenfolgeabhängigkeit zwischen der Funktion H des Zählers und der Funktion F des Verbrauchers. Wenn zuerst der Verbraucher zuweist, wird der Übergabeplatz leer, und der Zähler hat die Zählung „verpaßt". Wollte man dieses Problem dadurch lösen, daß man H des Zählers und F des Verbrauchers zu einer Vektorzuweisung zusammenfaßt, müßte man die beiden Instanzen zu einer einzigen verschmelzen, denn nur innerhalb eines Bausteins ist eine solche Zuweisungszusammenfassung realisierbar.

Zusammenfassend sei festgehalten:

Erkennungs-konflikte

Ein Instanzennetz ist konfliktbehaftet, wenn der Prozeßverlauf von der Ausführungsreihenfolge der Zuweisungen unterschiedlicher Instanzen abhängt. Konflikte, die keine Zuständigkeitskonflikte sind, werden *Erkennungskonflikte* genannt.

4. Kausalnetze

Die Darstellungen in den Bildern 1 und 2 zeigen den jeweiligen statischen Systemaufbau, die sogenannte Systemstruktur. Die Dynamik des Systems, die sogenannte Prozeßstruktur ist jeweils aus der Systemstruktur und den Knotenfunktionen ableitbar. Im Falle von Netzen aus Gleichungsbausteinen wie im Beispiel im Bild 1 ergibt sich die Prozeßstruktur meist als Differentialgleichungssystem, aus welchem dann ein Instanzennetz in Form eines Analogrechenschaltbildes abgeleitet werden kann. Es soll nun die Erfassung von Prozeßstrukturen für Instanzennetze mit ausschließlich diskreten Wertebereichen behandelt werden.

Jede Ausführung einer Zuweisung, die zu einer Werteänderung führt, wird als *Ereignis* bezeichnet. Die Ausführung einer Wertezuweisung zu einem Variablenvektor, bei der sich mehr als eine Komponente ändert, ist nur ein einziges Ereignis. Jedem Ereignis ist der Zeitpunkt seines Auftretens zugeordnet, aber ein Protokoll der Ereignisse mit Zeitangabe gibt ebensowenig Einsicht in die Prozeßstruktur wie eine Aufzeichnung des Verlaufs der Variablenwerte in Diagrammform für ein kontinuierliches Netzsystem wie im Bild 1. Die Prozeßstruktur soll nämlich nicht nur einen Prozeß, sondern eine Prozeßklasse erfassen, d. h. sie soll alle durch Parametervariation in einem System realisierbaren Prozesse charakterisieren - wie dies beispielsweise ein Differentialgleichungssystem tut. Also interessiert gar nicht so sehr die absolute Zeitlage eines Ereignisses, sondern seine Beziehung zu anderen Ereignissen. Diese Beziehung kann nur eine Kausalbeziehung sein. Entweder haben zwei Ereignisse kausal etwas miteinander zu tun oder nicht. Im Falle der kausalen Abhängigkeit müssen die beiden Ereignisse nacheinander auftreten, wobei die Reihenfolge durch Ursache und Wirkung bestimmt ist. Im Falle der kausalen Unabhängigkeit dagegen ist ihre Reihenfolge beliebig. Das beste Beschreibungsmittel zur Erfassung der Kausalbeziehungen zwischen Ereignissen ist das *Petri-Netz*.

Ein Petri-Netz ist ein elementares Instanzennetz, d. h. ein Netz, in welchem alle Instanzen von einheitlichem, einfachem Typ sind. Die Tatsache, daß die Darstellung der Prozeßstruktur zu einem gegebenen Instanzennetz selbst wieder ein Instanzennetz ist, mag verwundern; aber man sollte bedenken, daß die Darstellung der Prozeßstruktur zu einem gegebenem Netz aus Gleichungsbausteinen auch ein Instanzennetz, nämlich eine Analogrechenschaltung ist. An ein Instanzennetz, mit dem man die Prozeßstruktur eines anderen Netzes darstellen will, muß man die Forderung stellen, daß es selbstbeschreibend bezüglich seiner eigenen Prozeßstruktur ist, die ja identisch mit der darzustellenden ist. Dies ist dann gegeben, wenn die Instanzennetze zur Prozeßstrukturdarstellung aus einem allgemein bekannten Repertoire möglichst weniger einfacher Instanzentypen aufgebaut sind. Dies gilt sowohl für Analogrechenschaltungen als auch für Petri-Netze.

Der einzige Instanzentyp im Petri-Netz ist die sogenannte Transition. Ihr Zustandswertebereich ist einelementig und damit irrelevant, und alle Anschlußpunkte, die hier *Stellen* genannt werden, haben den gleichen binären Wertebereich

$$W(\text{Stelle}) = \{\text{leer, belegt}\}.$$

Es gibt auch die sogenannten verallgemeinerten Petri-Netze, bei denen umfangreichere Wertebereiche für Stellen zugelassen sind, aber diese bleiben hier außer Betracht.

Die Stellen einer Transition lassen sich in drei Klassen einteilen:

> Eingangsstellen sind solche, bei denen die Instanz ausschließlich Wertänderungen von „belegt" nach „leer" durchführt; Ausgangsstellen sind solche, bei denen die Instanz ausschließlich Wertänderungen von „leer" nach „belegt" durchführt; Lesestellen sind solche, die nie in die Zuständigkeit der Instanz fallen.

Man beachte, daß hier die Bezeichnungen „Eingang" und „Ausgang" nicht in gleicher Bedeutung verwendet werden wie bei Instanzen mit zeitinvarianter Zuständigkeit. Dort war ein Eingang ein Anschlußpunkt, der nie in die Zuständigkeit der Instanz fällt, und ein Ausgang war ein Anschlußpunkt, der immer in der Zuständigkeit der Instanz liegt. Bei der Transition liegt zeitvariante Zuständigkeit sowohl für die Eingangs- als auch für die Ausgangsstellen vor. Die Bezeichnungen „Eingang" und „Ausgang" beruhen hier auf der Vorstellung eines Markenflusses. Eine Stelle ist entweder mit einer Marke belegt oder leer. Solche Stellen, von denen eine Transition immer nur Marken wegnehmen kann, heißen Eingangsstellen, weil von hier die Marken in die Transition hineinfließen. Solche Stellen, auf die eine Transition immer nur Marken hinlegt, heißen Ausgangsstellen, weil hierhin die Marken aus der Transition herausfließen.

Die Zuständigkeitsfunktion G einer Transition lautet:

$$\text{Eine Transition ist für alle ihre Eingangs- und Ausgangsstellen} \begin{cases} \text{zuständig,} & \text{falls alle ihre Eingangs- und Lesestellen belegt sind,} \\ \text{nicht zuständig} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Wertezuweisungsfunktion F einer Transition für alle Eingangs- und Ausgangsstellen zusammen lautet:

Alle Stellen behalten ihre Werte, falls der Indeterminismus so entscheiden wird, oder alle Eingangsstellen werden geleert und alle Ausgangsstellen werden belegt, falls der Indeterminismus so entschieden wird. Letzteres wird als *Schalten der Transition* bezeichnet. Die Zuständigkeit der Transition für ihre Eingangs- und Ausgangsstellen wird deshalb auch *Schaltbereitschaft* genannt.

Der Fall, daß eine durch das Schalten zu belegende Ausgangsstelle schon vor dem Schalten belegt ist, wird als *Netzunsicherheit* bezeichnet. Dieser Fall kann bei korrekter Erfassung von Kausalbeziehungen nicht vorkommen.

Bild 3 zeigt ein Beispiel eines Petri-Netzes. Die Transition A hat eine Eingangsstelle und zwei Ausgangsstellen; die Transition F hat zwei Eingangsstellen und eine Ausgangsstelle; die Transitionen B, C und E haben jeweils eine Eingangs- und eine Ausgangsstelle; die Transition D hat eine Eingangsstelle, eine Ausgangsstelle und eine Lesestelle. Dadurch, daß die Verbindung der Lesestelle mit der Instanz als Schleife dargestellt wird, wird die Vorstellung nahegelegt, daß beim Schalten der Transition sowohl eine Marke von der Stelle weggenommen als auch eine Marke auf die Stelle hingelegt wird, was natürlich gleichbedeutend ist mit der Tatsache, daß die Belegung der Stelle durch das Schalten der Transition nicht verändert wird. Leere Stellen werden in der Graphik als leere Kreise, belegte Stellen als Kreise mit einem eingetragenen Markierungspunkt dargestellt.

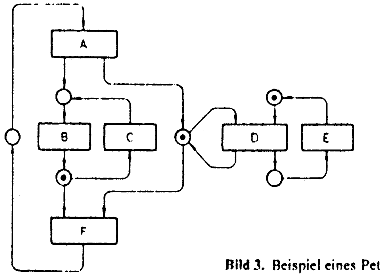

Bild 3. Beispiel eines Petri-Netzes.

Ein Konflikt im Petri-Netz ist immer dadurch gekennzeichnet, daß das Schalten einer Transition die vorher gegebene Schaltbereitschaft einer anderen Transition wieder zerstört. Bei der gegebenen Stellenbelegung oder -markierung bestehen Konflikte zwischen den Transitionen C, D und F, und zwar ein Zuständigkeitskonflikt zwischen C und F und ein Erkennungskonflikt zwischen D und F. Der Zuständigkeitskonflikt besteht darin, daß bei der gegebenen Markierung die belegte Ausgangsstelle von B sowohl in der Zuständigkeit von C als auch in der Zuständigkeit von F liegt. Das Schalten von C würde die Schaltbereitschaft von F zerstören, und umgekehrt würde das Schalten von F die Schaltbereitschaft von C zerstören. Der Erkennungskonflikt besteht darin, daß die belegte Ausgangsstelle von A eine Lesestelle von D ist und gleichzeitig als Eingangsstelle in der Zuständigkeit von F liegt. Das Schalten von F würde die Schaltbereitschaft von D zerstören, aber umgekehrt würde das Schalten von D nicht die Schaltbereitschaft von F zerstören.

Es ist offensichtlich, daß ein Sonderfall des Petri-Netzes der *Zustandsgraph* ist, in welchem genau eine Marke herumwandert. Weil die Transitionen dort trivial sind, weil sie nämlich nur einen Eingang und einen Ausgang haben, läßt man sie einfach weg.

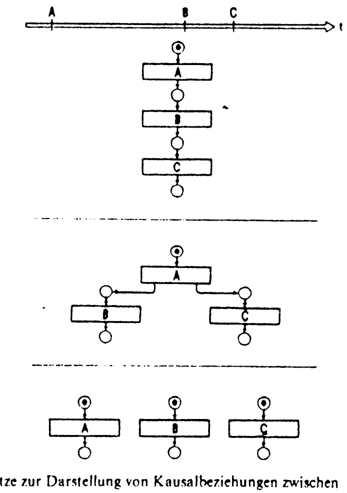

Bild 4. Petri-Netze zur Darstellung von Kausalbeziehungen zwischen Ereignissen.

Die Petri-Netze eignen sich deshalb so gut zur Darstellung von Prozeßstrukturen über Ereignismengen, weil man damit die Verflechtung von Kausalketten sichtbar machen kann. Dies sei anhand des Beispiels im Bild 4 erläutert. Ein Prozeßprotokoll bestehe in der Aufzeichnung einer Sequenz von drei Ereignissen A, B und C. Zuerst sei der Fall angenommen, daß diese Reihenfolge kausal zwingend sei; das ist beispielsweise bei folgender Interpretation gegeben: Ein Blumentopf fällt aus einem Fenster des 5. Stocks (A), kommt am 3. Stock vorbei (B) und schlägt auf der Straße auf (C). Das Petri-Netz zeigt die Kausalkette; jede Transition steht für ein Ereignis. Bei einer anderen Interpretation ist die Reihenfolge aber nur noch teilweise kausal zwingend: Der Startschuß fällt (A), Läufer b kommt durchs

Ziel (B), und Läufer c kommt durchs Ziel (C). Die zugehörige Kausalstruktur verkoppelt zwei zweigliedrige Kausalketten am Ereignis A, die Ereignisse B und C sind kausal unabhängig voneinander. Schließlich könnten alle drei Ereignisse auch kausal völlig unabhängig voneinander sein, dann besteht die Kausalstruktur aus drei nicht verkoppelten eingliedrigen Ketten.

Die Petri-Netze im Bild 4 haben eine strukturelle Gemeinsamkeit, die auch bei den in der Organisationstechnik gebräuchlichen Netzplänen zu finden ist: Es kommen keine Schleifen vor, und alle Stellen haben höchstens einen Eingang und höchstens einen Ausgang.

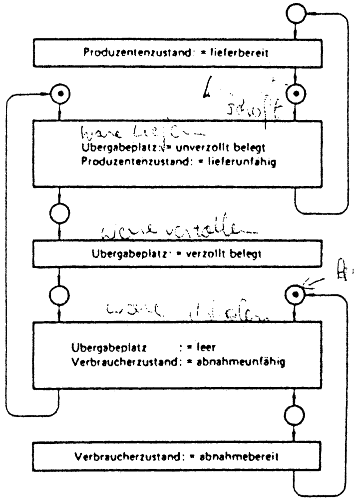

Bild 5. Kausalnetz zum Beispiel im Bild 2.

In praktisch interessierenden Fällen sind nicht einige wenige Ereignisse zu erfassen wie hier im Beispiel, sondern die Zahl der Ereignisse ist meistens quasi unendlich. Das bedeutet einerseits, daß man nicht mehr das einzelne Ereignis betrachten kann, sondern viele Ereignisse zu einer Ereignisklasse zusammenfassen muß, und das bedeutet andererseits, daß es nun Schleifen und mehrere Eingänge und Ausgänge bei den Stellen im Kausalnetz geben kann. Das Kausalnetz im Bild 5 stellt die Prozeßstruktur zu dem Instanzennetz im Bild 2 dar: es handelt sich um drei verkoppelte zyklische Kausalketten. Jede Transition steht für eine Ereignisklasse, in der alle Ereignisse zusammengefaßt sind, welche die gleiche Wertänderung von Anschluß- oder Zustandsvariablen bedeuten.

5. Ausblicke auf Anwendungen

Die Systemtechnik dient dem Entwurf technischer Systeme durch

1) Bereitstellung von Beschreibungsverfahren zur Darstellung des Gewünschten und der verfügbaren Bausteine, und
2) durch Bereitstellung von Synthesemethoden zur Realisierung des Gewünschten durch Einsatz verfügbarer Bausteine.

Das erste ist Voraussetzung für das zweite. Die vorliegende Arbeit ist eindeutig dem ersten Punkt zuzuordnen.

Es gibt zwei Bereiche, wo die Erfassung der Systemstatik durch Instanzennetze und der Systemdynamik durch Kausalnetze bereits deutlich erkennbare Vorteile gegenüber anderen Vorgehensweisen gebracht hat. Das eine ist der Bereich kommunizierender programmierter Instanzen, und das andere ist der Bereich kommunizierender asynchroner Schaltwerke. Jedes Prozeßrechnerprogrammsystem und jede Steuerungsrealisierung mit einem oder mehreren Mikroprozessoren läßt sich als Netz kommunizierender programmierter Instanzen darstellen, wodurch die Systeme extrem transparent werden und die Eigenschaft der kaum mitteilbaren Komplexität verlieren. Im Bereich kommunizierender asynchroner Schaltwerke sind die Ereignisse die Flanken binärer Signale. Man denke beispielsweise an ein Gleisbildstellwerk. Hier sind die Kausalnetze als sogenannte Signalflankengraphen das ideale Mittel, mit dem man die Struktur der an der Schnittstelle zwischen Werk und Umgebung beobachtbaren Ereignisprozesse formuliert, um dadurch das zu entwerfende Werk zu spezifizieren. Der Weg von einer solchen Spezifikation zu einem realen Werk ist heute schon weitgehend algorithmisiert.

Literatur

[1] *Petri, C. A.*, et al.: Net Theory and Applications. Springer Verlag, Berlin 1980.
[2] *Wendt, S.*: Petri-Netze und asynchrone Schaltwerke. Elektronische Rechenanlagen 16 (1974), S. 208–216.
[3] *Wendt, S.*: The programmed action module: an element for system modelling. Digital Processes 5 (1979), S. 213–222.
[4] *Wendt, S.*: On the partitioning of computing systems into communicating agencies. Springer-Verlag, Berlin 1980.
[5] *Pohl, W.*: Petrinetz-Modelle der Dynamik diskreter technischer Systeme. Dissertation, Universität Kaiserslautern 1980.

Anwendungsaufsatz • Application Paper

Ein Beitrag zur Optimierung von Regelkreisen mit Tänzerwalzen bei kontinuierlichen Fertigungsanlagen

A contribution to the optimization of control loops with compensating rollers for continuous assembly plants

Von G. BRANDENBURG, München, und N. KARBACHER, Erlangen

(Teil 2, Fortsetzung von Heft 12/1981)

Während bei Annahme einer starren Bahn die Übertragungsfunktionen $\hat{\varepsilon}_{23}/\hat{v}_{u1}$ *und* $\hat{\varepsilon}_{23}/\hat{v}_{u3}$ bei Trägheitskompensation zu Null werden, ist dies bei der hier angenommenen elastischen Bahn nur für $\hat{\varepsilon}_{12}/\hat{v}_{u3}$ der Fall, wie man aus den Gln. (12) bis (14) erkennen kann. Auf die Übertragungsfunktion $\hat{\varepsilon}_{23}/\hat{v}_{u1}$ nach Gl. (12) läßt sich jedoch ein erheblicher Einfluß erwarten, da der Koeffizient bei s^1 zu Null wird. Die weiteren Übertragungsfunktionen (Gln. (14) bis (16)) werden durch die Trägheitskompensation nur unwesentlich beeinflußt.

Zur genaueren Untersuchung des Übertragungsverhaltens wurde das System zunächst am Analogrechner simuliert. Die sich bei sprungförmigen Änderungen von v_{u1} ergebenden Übergangsfunktionen sind im Bild 5 dargestellt. Wie aus Bild 5a zu ersehen ist, weist die Übergangsfunktion $\hat{\varepsilon}_{12}/\hat{v}_{u1}$[1]) einen integralen Verlauf auf, dem für kleine Zeiten Schwingungen überlagert sind. Infolge derselben Charakteristischen Gleichung, Gl. (17), schwingen auch die Bahndehnungen ε_{12} und ε_{23} mit dieser Frequenz um die Nullachse (Bild 5b). Für

$$T_{n2} \neq T_{M2}$$

und gleiche Bahnlängen $L_{12} = L_{23}$, also gleiche Zeitkonstanten $T_{12} = T_{23}$ haben die Hüllkurven von $\hat{\varepsilon}_{12}/\hat{v}_{u1}$ und $\hat{\varepsilon}_{23}/\hat{v}_{u1}$ denselben Verlauf, wie man erkennt. Durch eine trägheitskompensierte Ausführung der Tänzerwalze,

$$T_{n2} = T_{M2}\,,$$

ändert sich dieses Bild, und zwar läßt sich der Maximalwert $\hat{\varepsilon}_{23\,max}$ der Bahndehnung $\hat{\varepsilon}_{23}$ um etwa die Hälfte reduzieren, wie die Simulation zeigt. Eine weitaus größere Verringerung von $\hat{\varepsilon}_{23\,max}$ tritt jedoch erst dann auf, wenn zusätzlich die freien Bahnlängen beiderseits der Tänzerwalze und damit die Zeitkonstanten T_{12} und T_{23} ungleich groß gemacht werden (Bild 5c).

Die Maximalwerte der Übergangsfunktionen $\hat{\varepsilon}_{23}/\hat{v}_{u1}$ und $\hat{\varepsilon}_{12}/\hat{v}_{u1}$ in Abhängigkeit von den Bahnlängen L_{12} und L_{23} sind im Bild 6 zusammen mit den Maximalwerten der Übergangsfunktion $\hat{\varepsilon}_{23}/\hat{v}_{u3}$ aufgetragen. Man erkennt an Kurve 1, daß sich die infolge von Änderungen $\hat{v}_{u1}$ auftretende maximale Dehnungsamplitude $\hat{\varepsilon}_{23\,max}$ bereits durch verhältnismäßig wenig unterschiedliche Bahnlängen

$$L_{12} \neq L_{23}$$

stark reduzieren läßt. Um auch bei Änderungen $\hat{v}_{u3}$ eine Verminderung von $\hat{\varepsilon}_{23\,max}$ zu erreichen, ist es zweckmäßig, L_{12} *kleiner* als L_{23} zu machen, wie Kurve 2 zeigt. Infolge dieser Maßnahme bleibt die Dehnung ε_{23} sowohl bei Änderungen $\hat{v}_{u1}$ als auch bei Änderungen $\hat{v}_{u3}$ weitmöglichst unbeeinflußt. Die Untersuchungen zeigten, daß diese Entkopplungswirkung der Tänzerwalze nur bei ungleichen Bahnlängen *und* Trägheitskompensation auftritt. Ungleiche Bahnlängen *allein* wirken sich erst bei

$$L_{12} \ll L_{23} \quad \text{bzw.} \quad L_{23} \ll L_{12}$$

merklich auf $\hat{\varepsilon}_{23\,max}$ aus.

Genauere Aussagen über die Dynamik der Anordnung erlaubt das Bodediagramm. Im Bild 7a ist das mit Hilfe einer digitalen Simulation [6][2]) ermittelte Bodediagramm der

Manuskripteingang: 11. Juni 1981.

Prof. Dr.-Ing. habil. G. Brandenburg, Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik (Leitung: Prof. Dr. G. Kessler), Arcisstraße 21, D-8000 München 2.
Dipl.-Ing. N. Karbacher, Siemens AG, Abteilung ESTE 11, Günther Scharowskystraße 2, D-8520 Erlangen.

[1]) Das Symbol $\hat{}$ kennzeichnet die Amplitude einer Sprungfunktion. Die Sprungfunktion einer Größe g lautet damit im Zeitbereich

$$g(t) = \hat{g}\,\sigma(t),$$

wenn $\sigma(t)$ die Einheitssprungfunktion ist. Im Bildbereich der Laplace-Transformation gilt

$$g(s) = \hat{g}/s\,.$$

Dann ist $h(t)/\hat{g}$ der auf $\hat{g}$ bezogene zeitliche Verlauf der Übergangsfunktion einer Größe h, die durch g angeregt wird.

[2]) Das vollständige Literaturverzeichnis wurde im Heft 12/1981, Seite 433 veröffentlicht.