

Prof. Dr.-Ing. S. Wendt

**Betrachtungen über Methoden
des Steuerungsentwurfs**

Dezember 1993

Inhalt

1. Das Modell des endlichen Automaten und seine Interpretation	1
1.1 Klassifikation der Kanäle für Ein- und Ausgabe	1
1.2 Der getaktete Automat	11
1.3 Konsequenzen nebenläufiger Ereigniseingaben	14
2. Das Steuerkreismodell	23
2.1 Einführung	23
2.2 Der getaktete Steuerkreis	26
3. Entwurf einer Fahrstuhlsteuerung als Beispiel eines Entwurfs auf der Grundlage des Steuerkreismodells	28
3.1 Realisierung mit einem getakteten Steuerkreis aus Schaltwerken	28
3.2 Realisierung mit einem extern getriggerten Steuerkreis	39
Literatur	43

1. Das Modell des endlichen Automaten und seine Interpretation

1.1 Klassifikation der Kanäle für Ein- und Ausgabe

Grundlage eines jeden Steuerungsentwurfs ist das Modell des endlichen Automaten, welches nach Mealy durch die folgenden beiden Funktionen gekennzeichnet ist:

$$\text{Ausgabefunktion:} \quad Y(n) = \omega [X(n), Z(n)]$$

$$\text{Übertragungsfunktion:} \quad Z(n+1) = \delta [X(n), Z(n)]$$

In diesen Formeln steht n als Variable für die diskrete Zeit. Es ist üblich, den Zustand, in dem sich der Automat bei Inbetriebnahme befindet, als $Z(1)$ zu bezeichnen. Die erste Eingabe nach Inbetriebnahme wird dementsprechend als $X(1)$ bezeichnet, und die Ausgabe, welche die unmittelbare Folge der Eingabe $X(1)$ ist, mit $Y(1)$ bezeichnet.

Solange man nur Automatentheorie betreibt, ist es nicht erforderlich, weitere Aussagen zum Automatenmodell zu machen. In diesem Fall genügen die intuitiven Vorstellungen, die man sich zu den Begriffen *Eingabe*, *Zustand* und *Ausgabe* macht. Wenn man aber das Automatenmodell zum methodischen Entwurf von Steuerungen heranzieht, muß man zu den Begriffen *Eingabe* und *Ausgabe* weitere Überlegungen anstellen. Durch die Betrachtung realer Automaten erkennt man sehr schnell, daß man sowohl auf der Eingabeseite als auch auf der Ausgabeseite jeweils zwischen zwei unterschiedlichen Arten von Kanälen unterscheiden muß.

Auf der Eingabeseite findet man zum einen immer Kanäle, welche für diejenigen Eingaben dienen, durch welche ein Zustandsübergang des Automaten ausgelöst werden kann. Im Falle von Schaltwerken handelt es sich um Kanäle für Binärsignale, deren Flanken Zustandsübergänge auslösen können. Im Falle von Automaten, in die man Geldstücke hineinwerfen kann, stellt der Einwurfschlitz einen Kanal dar, über den man einen Zustandswechsel auslösen kann. Alle Eingaben, über die man Zustandswechsel auslösen kann, werden im folgenden mit X_T bezeichnet, wobei man zu dem Index T die Wörter *Token*, *Trigger* oder *Takt* assoziieren kann.

Während jeder Automat mindestens einen Kanal für triggernde Eingaben haben muß, ist es nicht unbedingt erforderlich, daß er auch Kanäle für nichttriggernde Eingaben hat. Die Kanäle für nichttriggernde Eingaben dienen dazu, dem Automaten Signalverläufe anzubieten, die zum Zeitpunkt der Triggerung abgetastet werden. Man stelle sich einen Automaten zum Verkauf von Süßigkeiten vor, dem man den Auswahlwunsch nicht durch Drücken eines bestimmten Druckknopfes mitteilt, sondern dadurch, daß man einen Potentiometerknopf auf eine bestimmte Position stellt. Das Drehen dieses Potentiometerknopfes hat keine triggernde Wirkung, sondern die Triggerung erfolgt erst, wenn eine Münze eingeworfen wird. Die Stellung des Drehknopfes ist für das System erst zum Zeitpunkt des Münzeinwurfes relevant, d.h. zu diesem Zeitpunkt wird die Winkelstellung des Potentiometers abgetastet.

Während es nicht üblich ist, Verkaufsautomaten mit nichttriggernden Kanälen auszustatten, kommen solche Kanäle praktisch bei jedem getakteten Schaltwerk vor. Beim getakteten Schaltwerk gibt es nämlich nur einen einzigen Kanal für triggernde Eingabe, und auf diesem Kanal hat

das Eingaberepertoire die Mächtigkeit 1. Es handelt sich um die Takteingabe, mit der man nur der Triggerzeitpunkt, aber sonst keine weitere Information in das System eingeben kann. Alle anderen Informationen, die man in das System eingeben will, muß man über Kanäle für nichttriggernde Eingaben anbieten; sie werden zum Triggerzeitpunkt abgetastet.

Alle nichttriggernden Eingaben werden im folgenden mit X_S bezeichnet; mit dem Index S kann man Wörter wie *Signal*, *Sample*, *Statik* oder *Supplement* assoziieren.

Auch auf der Ausgabeseite kann man die Kanäle in zwei Klassen einteilen. Man denke hierzu an einen fahrkartenverkaufenden Automaten. Dieser Automat hat einerseits Ausgaben vom Typ Anzeige und andererseits Ausgaben vom Typ Ereignis. Die Ereignisse bestehen darin, daß eine Fahrkarte oder Münzen des Wechselgeldes in das Ausgabefach fallen. Angezeigt werden die Bereitschaft des Automaten, durch Druckknopfeingabe einen Fahrzielwunsch entgegenzunehmen, oder der Geldbetrag, der noch eingeworfen werden muß, bevor die Fahrkarte zu dem gewünschten Ziel ausgegeben werden kann. Eine Ereignisausgabe muß nicht immer mit der Ausgabe eines materiellen Elements verbunden sein; eine Ereignisausgabe liegt beispielsweise auch vor, wenn der Automat "Guten Morgen" sagt.

Die Ereignisausgaben werden im folgenden mit Y_T bezeichnet; zu dem Index T kann man wieder die Wörter *Token*, *Trigger* oder *Takt* assoziieren, denn diese Ausgaben folgen zeitlich immer unmittelbar auf eine Eingabe X_T . Die Ausgaben vom Anzeigetyp werden im folgenden mit Y_D bezeichnet; zum dem Index D kann man das Wort *Display* assoziieren.

Bei Automaten mit Kanälen für nichttriggernde Eingaben sind zwei unterschiedliche Verhaltensweisen möglich. Zum einen kann es sein, daß die nichttriggernden Eingaben tatsächlich wie oben dargestellt nur durch Abtastung zum Triggerzeitpunkt relevant werden. Zum andern kann es aber auch sein, daß es zwischen einer nichttriggernden Eingabe und einer Ausgabeanzeige einen Durchschalteeffekt gibt. Man stelle sich vor, daß zu dem oben betrachteten Automaten, der Süßigkeiten verkauft, ein Zeigerinstrument gehört, dessen Zeigerstellung unmittelbar durch das Drehen des Potentiometerknopfes beeinflusst werden kann. Man kann sich weiter vorstellen, daß die Art, wie die Zeigerstellung von der Drehknopfstellung abhängt, zustandsabhängig ist. In einem Zustand könnte es beispielsweise sein, daß sich die Zeigerstellung gleichsinnig mit der Drehknopfstellung verändert, d.h. daß sich der Zeiger im Uhrzeigersinne bewegt, falls auch der Drehknopf im Uhrzeigersinne verdreht wird. In einem anderen Zustand könnte es sein, daß die Zeigerstellung und die Drehknopfdrehung gegensinnig zueinander laufen. Die Veränderung der Zeigerstellung selbst kann nicht in einer Zustandsänderung begründet sein, da ja das Drehen des Potentiometerknopfes voraussetzungsgemäß keine triggernde Wirkung haben soll.

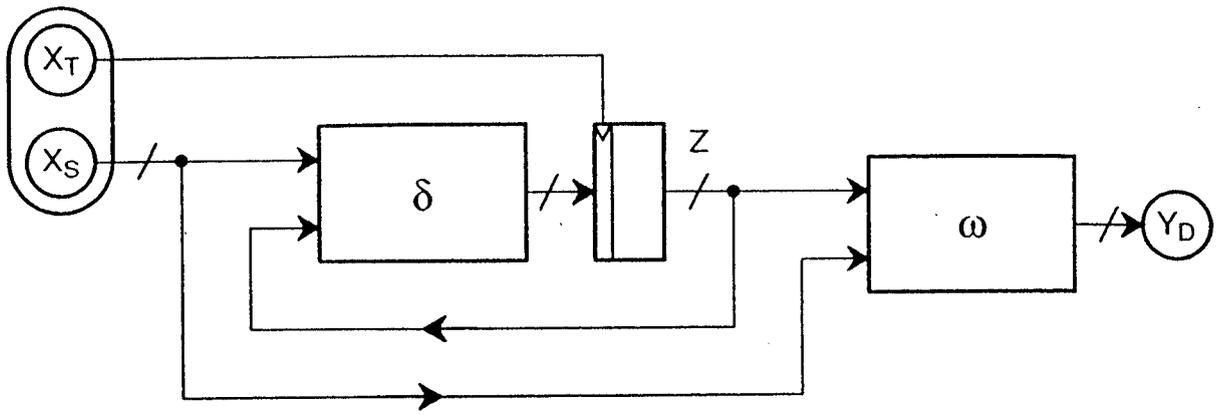


Bild 1 Blockschaltbild des getakteten Durchschaltewerkes (Typ 4a in der Klassifikation gemäß Bild 2)

Während das Beispiel des Verkaufsautomaten mit dem Potentiometer und dem Zeigerinstrument an den Haaren herbeigezogen ist, ist das Auftreten von Durchschalteeffekten im Bereich der getakteten Schaltwerke völlig normal. Man betrachte hierzu das Blockschaltbild in Bild 1. Die Ausgabe Y_D kann sich hier nicht nur ändern, wenn sich durch Taktung der Zustand Z ändert, sondern sie kann sich auch einfach dadurch ändern, daß das Binärwort X_S verändert wird.

Die Klassifikation der Eingabe- und der Ausgabekanäle sowie die Frage, ob ein Durchschalteeffekt auftritt oder nicht, ermöglichen eine Typisierung der Automaten, wie sie in Bild 2 dargestellt ist. Man kann acht unterschiedliche Fälle gegeneinander abgrenzen.

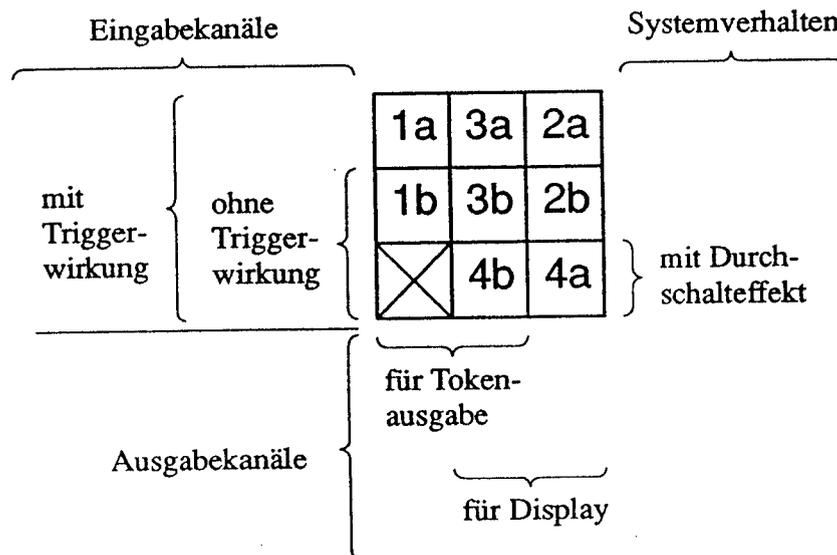


Bild 2 Klassifikation von Systemen, auf die das Automatenmodell angewandt werden soll

In Bild 3 sind die acht Fälle aus Bild 2 jeweils durch entsprechende Verhaltensverläufe in abstrahierender Symbolik dargestellt. Dabei sind jeweils zwei Fälle aus Bild 2 in einem einzigen Verlauf erfaßt; die Fälle *a* aus Bild 2 sind in Bild 3 jeweils diejenigen, bei denen die gestrichelt umrandeten Felder fehlen.

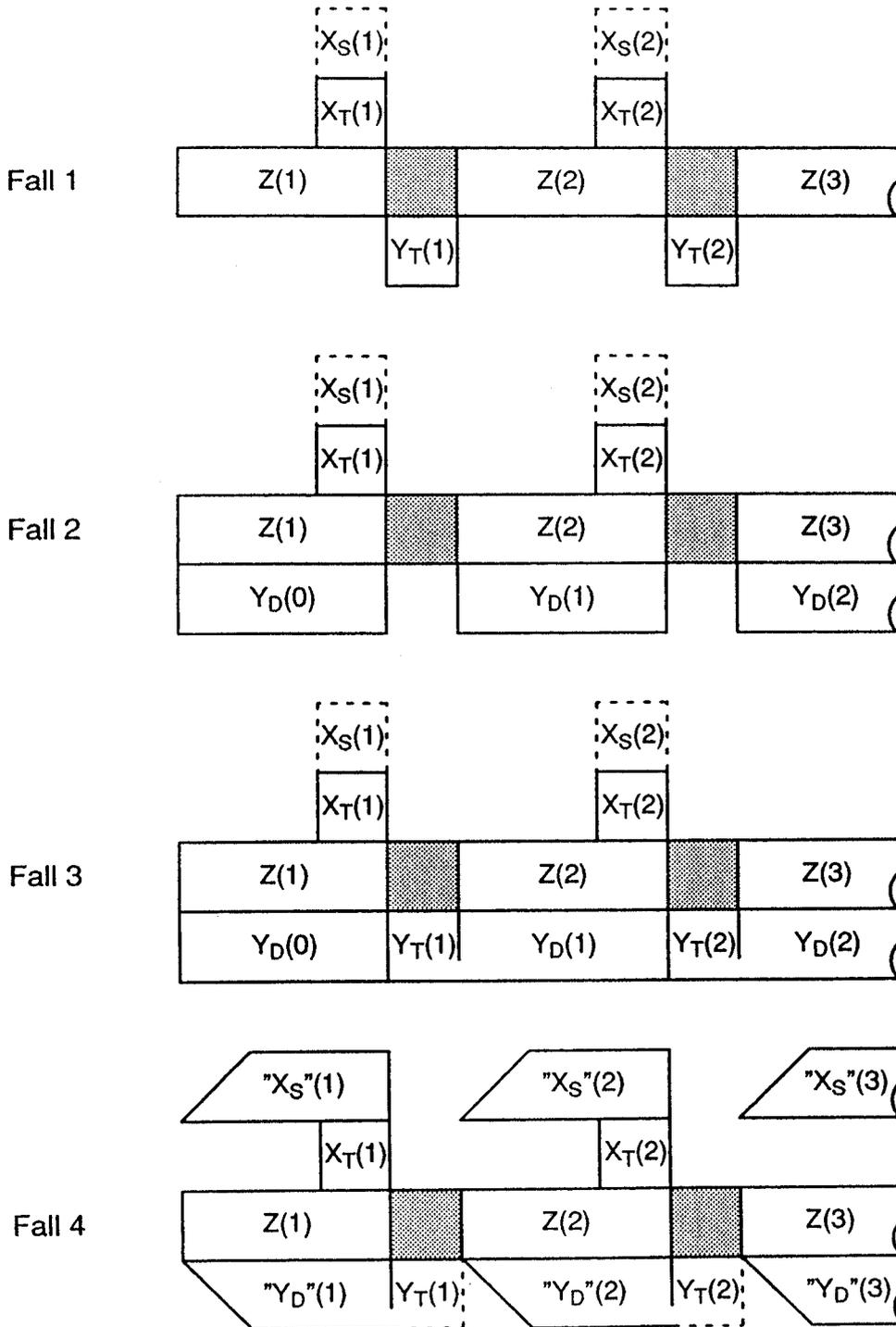


Bild 3 Veranschaulichung des Verhaltens der gemäß Bild 2 klassifizierten Systeme durch Verläufe längs der diskreten Zeit

Während die Numerierung der Eingaben und der Zustände kein Problem darstellt, gibt es bezüglich der Numerierung der Ausgaben Y_D einen Ermessensspielraum. Es muß nämlich die Frage entschieden werden, wie dasjenige Element Y_D numeriert werden soll, welches unter $Z(1)$ liegt. Wenn man sich auf den Standpunkt stellt, daß $Y(1)$ ursächlich mit $X(1)$ verbunden sein muß, dann muß man die Numerierung so wählen, wie sie in Bild 3 für den Verlauf des Falles 2 dargestellt ist. Für diesen Fall gilt die Beziehung

$$Y_{D(n-1)} = \mu [Z(n)]$$

Wenn dagegen – wie im Fall 4 – ein Durchschalteffekt vorliegt, dann hängt Y_D unter $Z(1)$ bereits ursächlich von $X_S(1)$ ab. Deshalb wird man in diesem Fall zweckmäßigerweise diejenige Numerierung wählen, die in Bild 3 für den Verlauf des Falles 4 dargestellt ist. Die für den Fall 4 sinnvolle Numerierung von Y_D könnte nun aber auch als Begründung genommen werden, sie auch für den Fall 2 zu übernehmen. Dies soll hier aber nicht geschehen, sondern die Numerierung wird im folgenden so beibehalten, wie sie in Bild 3 gezeigt ist.

Dem Leser ist möglicherweise aufgefallen, daß in dem symbolisierten Verlauf des Falles 4 in Bild 3 die Eingaben X_S und die Ausgaben Y_D mit Anführungszeichen versehen sind. Dadurch soll darauf hingewiesen werden, daß es sich hier im Unterschied zu den anderen Fällen, in denen auch Eingaben X_S und Ausgaben Y_D vorkommen, nicht um bestimmte Abtastergebnisse und Anzeigesituationen handelt, sondern um zeitliche Verläufe. Während man sich also unter Y_D eine bestimmte Anzeigesituation vorstellen muß, muß man sich unter " Y_D " eine Folge von Anzeigesituationen vorstellen. Am Beispiel des oben eingeführten Verkaufsautomaten für Süßigkeiten kann man sich ja vorstellen, daß man eine längere Zeit an dem Potentiometerknopf herumdreht und dadurch einen zeitlichen Verlauf " X_S " der Winkelstellung erzeugt, bevor man ein Ereignis X_T in Form des Einwerfens einer Münze liefert, welches einen Zustandsübergang auslöst. Als weiterer Hinweis darauf, daß es sich bei " X_S " und " Y_D " um Verläufe handelt, ist in Bild 3 die schräge Berandung zu deuten, die an einen Kurvenverlauf über einer Zeitachse erinnern soll.

In Bild 1 wurde bereits das *Durchschaltewerk* als typischer Vertreter des Falles 4a aus Bild 2 gezeigt. Als typischer Vertreter des Falles 2b aus Bild 2 ist in Bild 4 das sog. *Speicherwerk* gezeigt, dessen Ausgabe Y_D nur vom aktuellen Zustandwert Z abhängt.

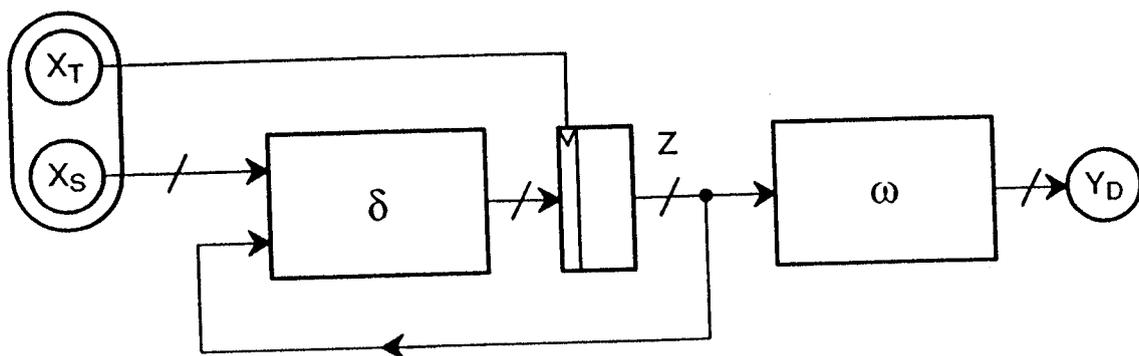


Bild 4 Blockschaltbild des getakteten Speicherwerkes
(Typ 2b in der Klassifikation gemäß Bild 2)

An dieser Stelle muß darauf hingewiesen werden, daß die Wahl des Zustandsrepertoires nur durch Zweckmäßigkeitsüberlegungen zu entscheiden ist und nicht durch physikalische Sachverhalte eindeutig entschieden wird. Es ist nämlich der Modellierer, der entscheidet, welche physikalischen Sachverhalte er als separierbare Zustände in sein Modell übernimmt.

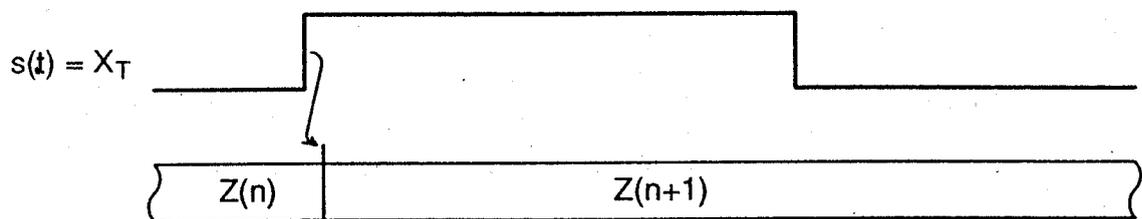
Man denke beispielsweise an einen Automaten zum Verkauf von Fahrkarten. In dem Zeitintervall zwischen dem Einwurf einer Münze und dem Auswerfen einer Fahrkarte durchläuft dieses System einen physikalischen Prozeß, und eine physikalische Situation, die zu einem bestimmten Zeitpunkt während dieses Prozesses auftritt, kommt in diesem Prozeß garantiert kein zweites Mal vor. Also ist es durchaus zulässig, jede dieser praktisch unendlich vielen unterschiedlichen physikalischen Situationen, die während dieses Prozesses irgendwann einmal auftreten, als separate Zustände in einem Modell zu verwenden. Dies wäre nicht falsch, sondern nur äußerst unzweckmäßig. Es ist viel zweckmäßiger, ein Modell zu machen, worin nur diejenigen physikalischen Situationen, in denen das System in Ruhe ist, als Zustände vorkommen. Diejenigen physikalischen Situationen, welche auftreten, wenn das System arbeitet und dabei von einem Ruhezustand in den nächsten Ruhezustand übergeht, bleiben bei dieser Modellierung irrelevant. Man sagt, es handele sich um Situationen im sog. Übergangsintervall. In der Symbolik des Bildes 3 sind die Übergangsintervalle schraffiert. Da solche Übergangsintervalle bei jeder Realisierung eines Automatenmodells vorkommen, hat man immer die Möglichkeit, zu einem realisierten Automatenmodell ein neues Modell anzugeben, worin Zustände vorkommen, die im bisherigen Modell durch das Übergangsintervall verdeckt wurden.

Aus diesen Überlegungen folgt, daß auch die Frage, ob ein System mit oder ohne Durchschalteeffekt vorliegt, nicht eindeutig durch physikalische Experimente entscheidbar ist, sondern erst als Konsequenz der Wahl des Zustandsrepertoires beantwortet werden kann.

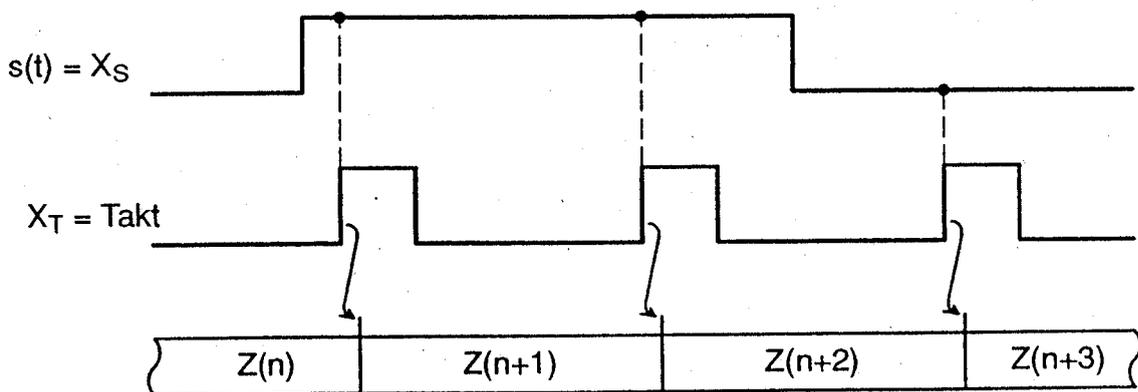
Auch die Klassifikation der Kanäle in X_T und X_S bzw. Y_T und Y_D kann nicht eindeutig dadurch entschieden werden, daß man die Vorgänge auf den Kanälen analysiert. Erst nachdem man die Vorgänge im Inneren des Automaten modelliert hat, indem man ein angemessenes Zustandsrepertoire gewählt hat, kann man eindeutig entscheiden, von welchem Typ die einzelnen Kanäle sind, die zum Automaten hinführen bzw. vom Automaten wegführen.

Man betrachte hierzu die beiden Teile des Bildes 5. In diesem Bild ist im oberen Teil und im unteren Teil jeweils der gleiche Signalverlauf $s(t)$ gezeigt. Es handelt sich um ein Binärsignal, welches zu einem bestimmten Zeitpunkt von Null nach Eins übergeht und nach einer bestimmten Zeit wieder auf den Wert Null zurückkehrt. Im oberen Teil des Bildes 5 ist gezeigt, was es bedeutet, wenn dieses Signal triggernde Wirkung hat. Es wurde willkürlich angenommen, daß die Triggerung durch die Vorderflanke des Signals geschieht. Diese Vorderflanke löst den Zustandsübergang von $Z(n)$ nach $Z(n+1)$ aus.

Im unteren Teil des Bildes 5 ist gezeigt, daß das gleiche Signal $s(t)$ ein abtastbares Signal X_S sein kann. In diesem Fall gibt es den Takt als Eingabe mit Triggerwirkung. Es wurde wieder angenommen, daß die Auslösung des Zustandsübergangs durch die Vorderflanke des binären Triggersignals geschieht. Der aktuelle Wert, den das Signal X_S zum jeweiligen Triggerzeitpunkt hat, kann in diesem Fall zwar mitentscheiden, in welchen Folgezustand der Automat im Falle der Triggerung übergeht, eine triggernde Wirkung hat dieses Signal in diesem Fall aber nicht.



Auswertung eines Eingangssignals $s(t)$ als Trigger



Auswertung eines Eingangssignals $s(t)$ durch Abtastung

Bild 5 Alternativen der Auswertung eines Eingangssignals durch einen Automaten

Es ist durchaus möglich und zulässig, daß zwei verschiedene Modellierer ein und dasselbe Signal unterschiedlich klassifizieren. Dieser Fall tritt insbesondere immer dann auf, wenn ein System für die Benutzer sehr viel einfacher modelliert werden kann als für den Implementierer. Diese Möglichkeit kann man durch Betrachtung des Bildes 6 sehr leicht einsehen. In diesem Bild ist oben ein Multiplikationsautomat gezeigt. Dieser Automat ist in der Lage, zwei Faktoren A und B, die jeweils als m -stellige Dualzahlen vorgegeben sind, zu multiplizieren und als $2m$ -stellige Dualzahl anzuzeigen. Man stelle sich vor, daß man die beiden Faktoren A und B mit Kippschaltern einstellt und anschließend durch Drücken einer Taste das Startereignis liefert. Die Binärstellen des Produkts kann man sich als Lampenanzeigen vorstellen, wobei eine leuchtende Lampe eine binäre Eins und eine dunkle Lampe eine binäre Null bedeuten.

Unten im Bild 6 ist gezeigt, wie der Benutzer des Automaten die Durchführung einer Multiplikation als Zeitverlauf erlebt. Nachdem er die beiden Faktoren eingestellt hat, drückt er auf die Starttaste und läßt diese nach wenigen Sekunden wieder los. Noch während er die Starttaste gedrückt hält, sieht er, daß die Lämpchen zur Anzeige des Produkts zu flackern beginnen und daß zeitlich nacheinander unterschiedliche Anzeigesituationen eintreten. Er wird diese Anzeigeänderungen aber als irrelevant werten, weil sie für ihn im Übergangsintervall des Automaten liegen. Erst wenn die Fertigmeldung kommt, weiß er, daß nun die Produktanzeige gültig ist. Die Fertigmeldung wird dadurch gegeben, daß das Fertigmeldelämpchen zwei Sekunden lang leuchtet.

Für den Benutzer stellt also der gesamte Multiplikationsvorgang einen einzigen Automaten-schritt dar, der durch das Startereignis ausgelöst wurde. Am Ende des Multiplikationsvorgangs befindet sich der Automat wieder in Ruhe, und sein Zustand ist derart, daß daraus die Produktanzeige eindeutig abgeleitet werden kann.

Es wäre sehr unrealistisch anzunehmen, daß ein Multiplikationsvorgang auch im Modell des Implementierers ein einziger Automaten-schritt ist. Realistischerweise muß man annehmen, daß der Multiplikationsautomat als periodisch getaktetes Speicherwerk (siehe Bild 4) realisiert wird. Dies bedeutet, daß das Startsignal im Implementierungsmodell gar keine triggernde Wirkung hat, sondern durch die Taktung abgetastet wird. Es könnte durchaus sein, daß der Multiplikationsautomat mit einer Taktfrequenz von 10 Hertz getaktet wird. Dann besteht ein Multiplikationsvorgang, der nach Bild 6 etwas über 10 Sekunden dauert, im Implementierungsmodell aus über 100 Taktschritten. Der Benutzer des Multiplikationsautomaten ist selbstverständlich viel besser bedient, wenn man für ihn den Multiplikationsvorgang als einen einzigen Automaten-schritt modelliert und ihm nicht das Implementierungsmodell vorstellt.

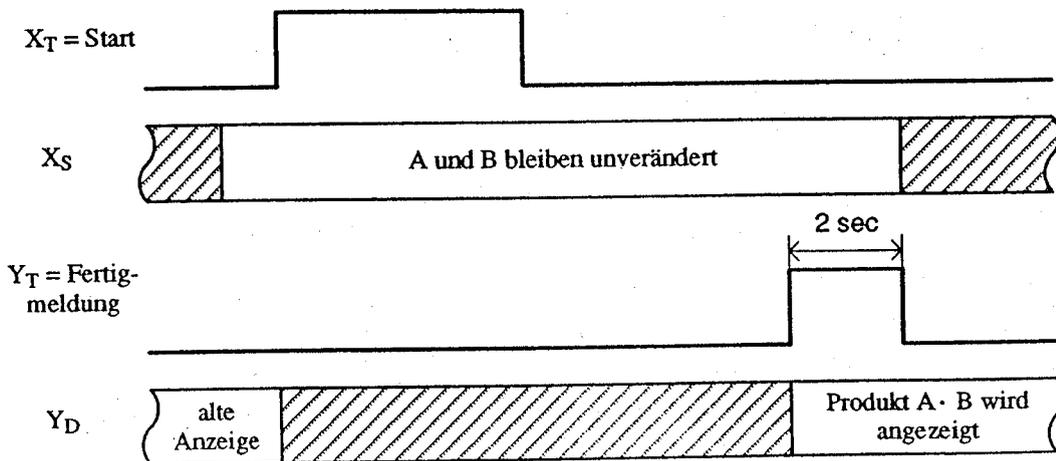
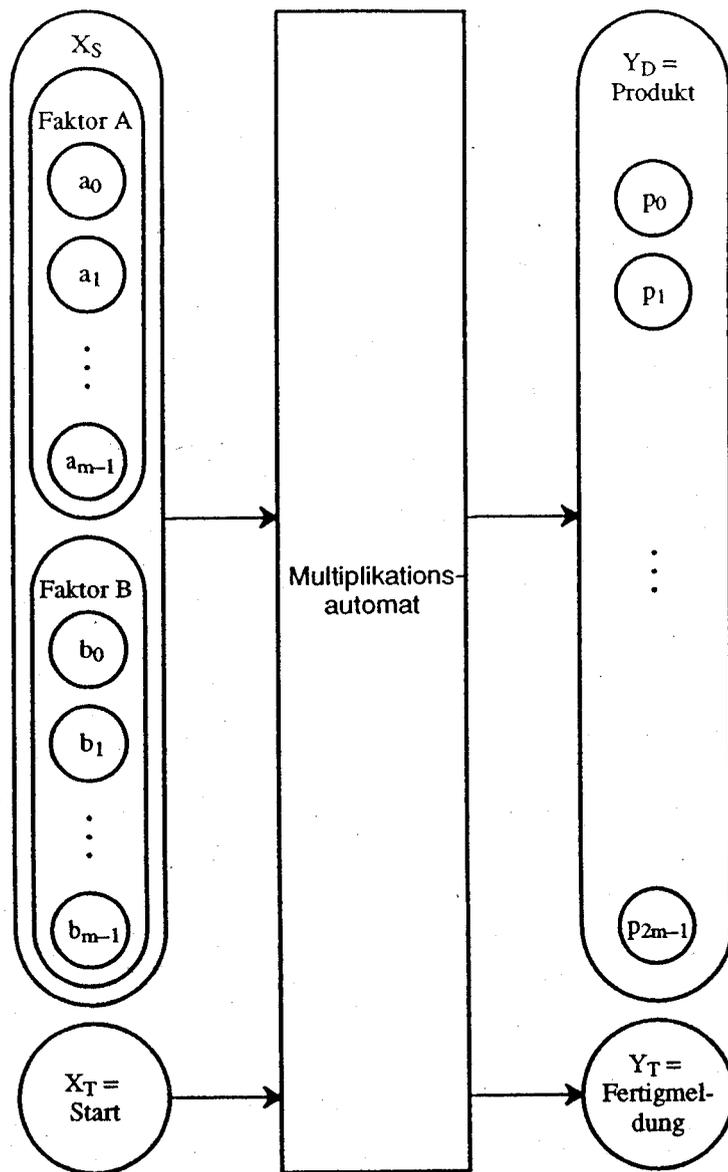


Bild 6 Anzeigender Multiplikationsautomat

1.2 Der getaktete Automat

Ein getakteter Automat hat nur einen einzigen X_T -Kanal, auf dem nacheinander nur Ereignisse ein und derselben Art auftreten. Die aufeinanderfolgenden Taktereignisse sind nur durch den Zeitpunkt ihres Auftretens, aber nicht durch irgendwelche anderen Merkmale voneinander unterscheidbar. Im allgemeinen Fall muß ein Ereigniskanal nicht derart beschränkt sein; man denke an einen akustischen Kanal, auf dem nacheinander drei unterschiedliche Ereignisse auftreten können, indem beispielsweise zuerst "Hallo", dann "Hoppla" und zum Schluß "Feierabend" gerufen wird. Demgegenüber gehört zu einem Taktkanal das kleinstmögliche Ereignisrepertoire, welches nur ein einziges Element enthält.

Es gibt grundsätzlich drei unterschiedliche Möglichkeiten für die Festlegung der Zeitpunkte für die Taktereignisse. Die erste Möglichkeit besteht darin, daß die Systemumgebung die Erzeugung eines Taktereignisses an die Bereitstellung der Werte auf den Kanälen X_S bindet. Man stelle sich hierzu einen Automaten zur Ausgabe von Süßigkeiten vor, bei dem man die Auswahl der gewünschten Süßigkeitenart durch Einstellen eines Drehknopfes angibt. Nachdem man den Drehknopf auf die gewünschte Position gestellt hat, drückt man auf eine Taste und triggert damit die Ausgabe der gewünschten Ware. In diesem Fall kommen die Taktereignisse nicht periodisch, sondern die Zeitabstände zwischen den Taktereignissen werden durch die Entwicklung des Süßigkeitenbedarfs bestimmt.

Die zweite Möglichkeit der Taktgewinnung besteht darin, daß die Ereignisse von einem freilaufenden Taktgenerator erzeugt werden, der in gleichbleibenden Zeitabständen Taktereignisse ausgibt. Dabei muß darauf geachtet werden, daß der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgenden Taktereignisse groß genug ist, damit alle durch ein Taktereignis angestoßenen dynamischen Vorgänge im Automaten garantiert zu Ende gekommen sind, bevor der nächste Anstoß erfolgt.

Die dritte Möglichkeit zur Gewinnung der Taktereignisse besteht darin, daß man einen Ereignis Ausgang des Automaten auf den Ereigniseingang rückkoppelt. Dies bedeutet, daß ein Ereignis, welches auf einem Kanal Y_T zum diskreten Zeitpunkt n auftritt, die Erzeugung eines Ereignisses auf dem Kanal X_T zum Zeitpunkt $n+1$ anstößt.

Das Taktereignis zum Zeitpunkt 1 kann in diesem Fall nicht durch ein Ausgabeereignis des Automaten ausgelöst werden, denn dann müßte dieses Ausgabeereignis den Zeitindex 0 haben. Nach Bild 3 gibt es aber gar keine Ausgabeereignisse mit dem Zeitindex 0. Deshalb muß das Taktereignis zum Zeitpunkt 1 woanders herkommen; es muß sich in diesem Fall um das Inbetriebnahmeereignis handeln. Das gleiche Problem gibt es bei jedem Oszillator; er braucht einen Anstoß, damit er zu schwingen beginnt. Bei einem elektronischen Oszillator erfolgt der Anstoß durch das Einschalten der Spannungsversorgung.

Daß die drei genannten unterschiedlichen Arten der Gewinnung der Taktereignisse sehr grundsätzlicher Natur sind und nicht von der Art und Weise abhängen, wie der getaktete Automat realisiert ist, erkennt man bei Betrachtung des Bildes 7. In diesem Bild sind drei Ablaufstrukturen gezeigt, unter denen man sich für eine entscheiden muß, wenn man den getakteten Automaten durch Programmierung eines universellen Prozessors realisieren will. In allen drei Ablaufstrukturen kommt in der Mitte eine Transition vor, die mit *Automatenschrittprozedur* bezeichnet ist.

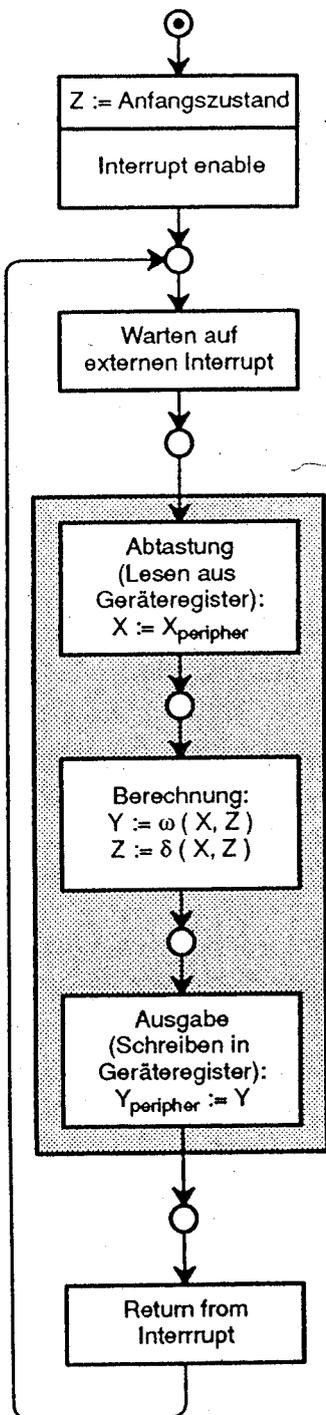
Im linken Ablauf ist diese Automatenschrittprozedur in drei aufeinanderfolgende Schritte zerlegt. Die Variablen X, Y und Z muß man sich als Datenvariable vorstellen, die im Arbeitsspeicher oder in Universalregistern des Prozessors abgelegt sind. Die Kommunikation mit der externen Welt geschieht dadurch, daß aus Gerätereigistern gelesen bzw. in Gerätereigister hineingeschrieben wird, wobei die Gerätereigister peripheriespezifische Quellen und Senken sind, die im Adreßraum des Prozessors identifiziert werden können. Während X_{peripher} hier immer als X_S zu deuten ist, hängt es vom jeweiligen peripheren Gerät ab, ob ein Kanal in der Menge Y_{peripher} vom Typ Y_T oder vom Typ Y_D ist.

- 1 Der am externen Bedarf orientierten Taktung entspricht in Bild 7 die programmierte Lösung in Form einer Interrupt-Routine. Durch ein Ereignis aus der Peripherie wird der Prozessor veranlaßt, mit der Abwicklung dieser Routine zu beginnen.
- 2 Die periodische Taktung wird bei der programmierten Realisierung dadurch erreicht, daß die Taskverwaltung des Betriebssystems unter Verwendung der Realzeituhr benutzt wird.
- 3 Die Takterzeugung durch Rückkopplung des Automaten ist für die programmierte Realisierung der einfachste Fall, wie man rechts in Bild 7 sieht. Das Inbetriebnahmeereignis entspricht dem Starten einer Task, welche nach dem Start in eine endlose Schleife gerät, die sie ohne Pause durchläuft.

Im Falle der Realisierung des getakteten Automaten in Form eines getakteten Schaltwerks (siehe Bild 1 bzw. 4) kann man sich die am Bedarf der Umgebung orientierte Taktung ebenso leicht vorstellen wie die periodische Taktung. Im einen Fall wird das Taktereignis im Rahmen der regulären Nutzung des Automaten in der Umgebung erzeugt, beispielsweise durch Drücken eines Knopfes; man denke an den Multiplikationsautomaten in Bild 6. Im anderen Fall kommen die Taktpulse aus einem Oszillator, der eine periodische Impulsfolge erzeugt.

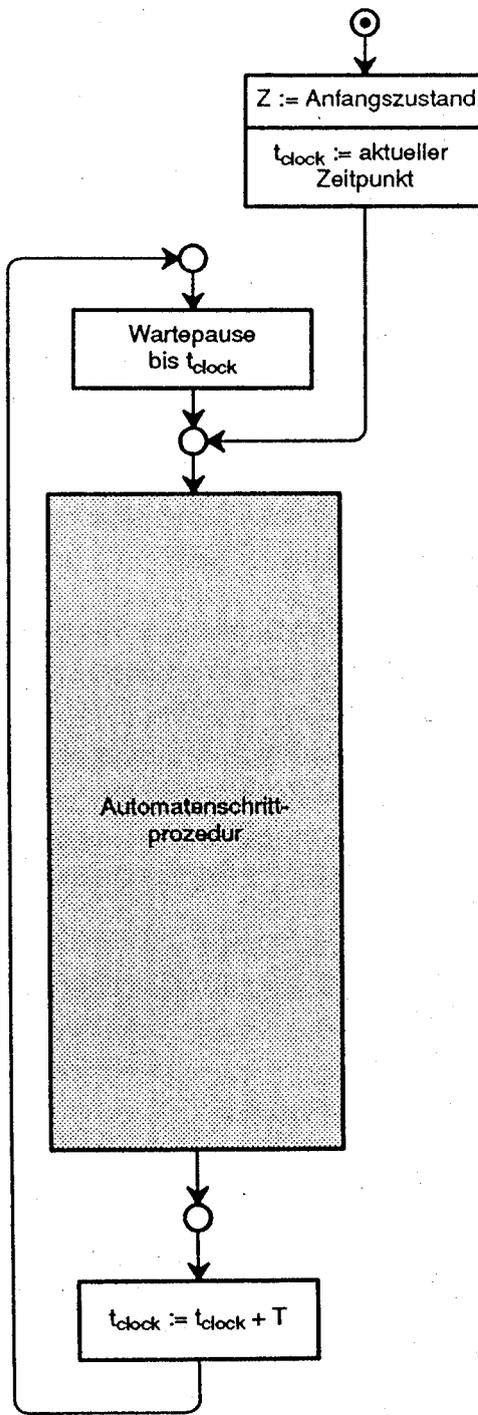
Eine Takterzeugung durch Rückkopplung des Automaten kann man sich im Falle der in den Bildern 1 und 4 gezeigten Schaltwerke nicht vorstellen, denn bei diesen Schaltwerksmodellen gibt es ja gar keine Kanäle Y_T . Man kann sich auch gar nicht vorstellen, wie in diesen Systemen ein Ereignis erzeugt werden könnte, welches meldet, daß die dynamischen Vorgänge im Zustandsübergangsschaltnetz und im Ausgabeschaltnetz zu Ende gekommen sind. Im Bereich der Schaltwerkstheorie tritt die Taktung durch Rückkopplung nur bei den sogenannten *asynchronen Schaltwerken* auf, die hier jedoch nicht weiter betrachtet werden, weil sie für die Realisierung komplexer Steuerungen im allgemeinen nicht in Frage kommen.

Takt kommt aus der Umgebung; Art der Takterzeugung bleibt offen



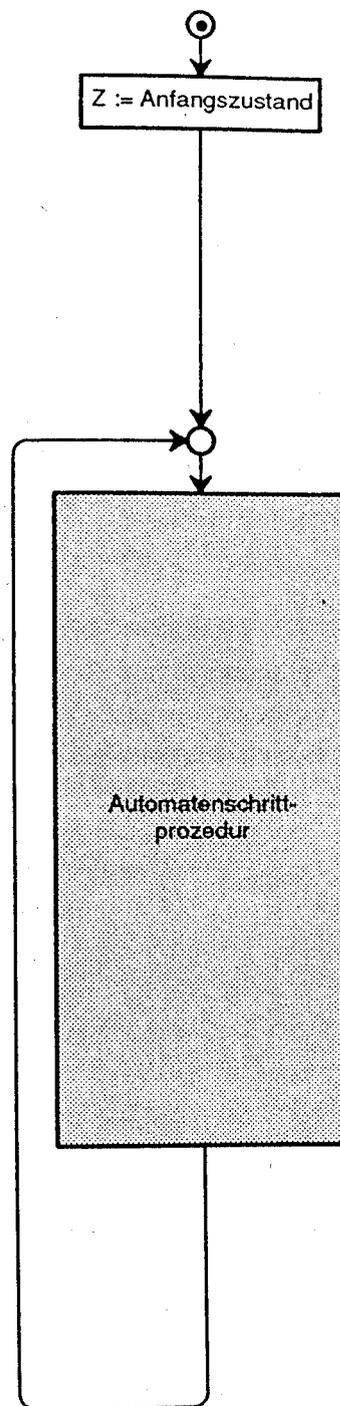
Interruptroutine

Taktgenerator ist Teil des internen Systems; Taktung erfolgt in konstanten Zeitabständen



Task mit Wartepause

Takt entsteht durch Rückkopplung: Ausgabeereignis bewirkt Taktung



Task ohne Warten

Bild 7 Alternativen der Taktung von Automaten, die durch Programmierung eines Universalprozessors realisiert werden

1.3 Konsequenzen nebenläufiger Ereignisseingaben

Auf getrennten X_T -Kanälen können Ereignisse nebenläufig zueinander auftreten, d.h. sie können kausal unabhängig voneinander sein. Man denke an zwei Personen, die auf unterschiedlichen Stockwerken einen Fahrstuhl rufen, indem sie jeweils auf einen bestimmten Knopf drücken. Jedem Druckknopf ist in einem zweckmäßigen Modell ein X_T -Kanal zugeordnet, und die Ereignisse auf diesen X_T -Kanälen sind nebenläufig zueinander. Man muß also damit rechnen, daß zwei oder mehr Ereignisse auf unterschiedlichen Kanälen gleichzeitig oder in beliebig kleinen Zeitabständen zueinander auftreten.

Man kann solche Kanäle, auf denen die Ereignisse nebenläufig zueinander auftreten, nicht als Eingabekanäle eines einzigen Automaten betrachten. Denn es gehört zum Wesen des Automatenmodells, daß die triggernden Eingaben einzeln nacheinander auftreten, wobei ein neues Ereignis erst kommen darf, wenn die Reaktion des Automaten auf das vorangegangene Ereignis vollständig abgeschlossen ist. Die folgenden Betrachtungen sollen zeigen, wie man das Problem der nebenläufigen Eingaben angemessen behandeln kann.

Zur Veranschaulichung der Problematik nebenläufiger Eingabeereignisse wird das in Bild 8 behandelte Beispiel betrachtet. In Bild 8.1 ist in Form eines Petrinetzes das Bedienungsprotokoll gezeigt, welches die Wechselwirkung zwischen dem System und seinem Bediener beschreibt. Der Bediener kann auf das System einwirken, indem er jeweils auf einen von zwei vorhandenen Knöpfen drückt. Das System hat vier Ausgabekanäle, wovon zwei für Ausgaben vom Anzeigentyp und zwei für Ereignisausgaben geschaffen sind. Die Anzeigeausgaben dienen dazu, dem Benutzer jeweils anzuzeigen, welche Stellen im Petrinetz (siehe Bild 8.1) aktuell markiert sind.

Der eine Kanal für Ereignisausgaben ist ein Lautsprecher, über den das System akustische Ausgaben liefern kann. Der andere Kanal für Ereignisausgaben dient dazu, einen Becher mit gezuckertem Kaffee auszugeben. Dabei sind die Bereitstellung des Bechers, das Einfüllen des Kaffees und das Hinzugeben des Zuckers drei unterschiedliche Ereignisausgaben, die jeweils für sich durch eine Ereignisseingabe getriggert werden müssen.

Nach Bild 8.1 besteht ein Bedienungszyklus aus dem dreimaligen Drücken des Knopfes 1 und dem zweimaligen Drücken des Knopfes 2. Nur wenn der Benutzer auf dem einen Anzeigekanal eine "1" und auf dem anderen Anzeigekanal eine "2" sieht, kann er einen Bedienungszyklus beginnen. Der Bedienungszyklus erlaubt eine Nebenläufigkeit; nebenläufig zum zweimaligen Drücken des Knopfes 1 kann auch der Knopf 2 zweimal gedrückt werden. Nur bezüglich des dritten Drückens des Knopfes 1 am Ende des Bedienungszyklus gibt es keine Nebenläufigkeit mehr. Der Bediener darf den Bedienungszyklus durch Drücken des Knopfes 1 erst abschließen, wenn er gleichzeitig auf dem einen Anzeigekanal eine "5" und auf dem anderen Anzeigekanal eine "6" sieht.

Man kann das System, dessen Verhalten in Bild 8.1 beschrieben ist, aus zwei Automaten aufbauen, wie dies in Bild 8.2 gezeigt ist. Da die beiden Druckknöpfe teilweise nebenläufig bedient werden können, müssen diese Eingabekanäle zu unterschiedlichen Automaten führen. Die beiden Automaten müssen nur deshalb verkoppelt sein, weil das Drücken des Knopfes 1 am Ende

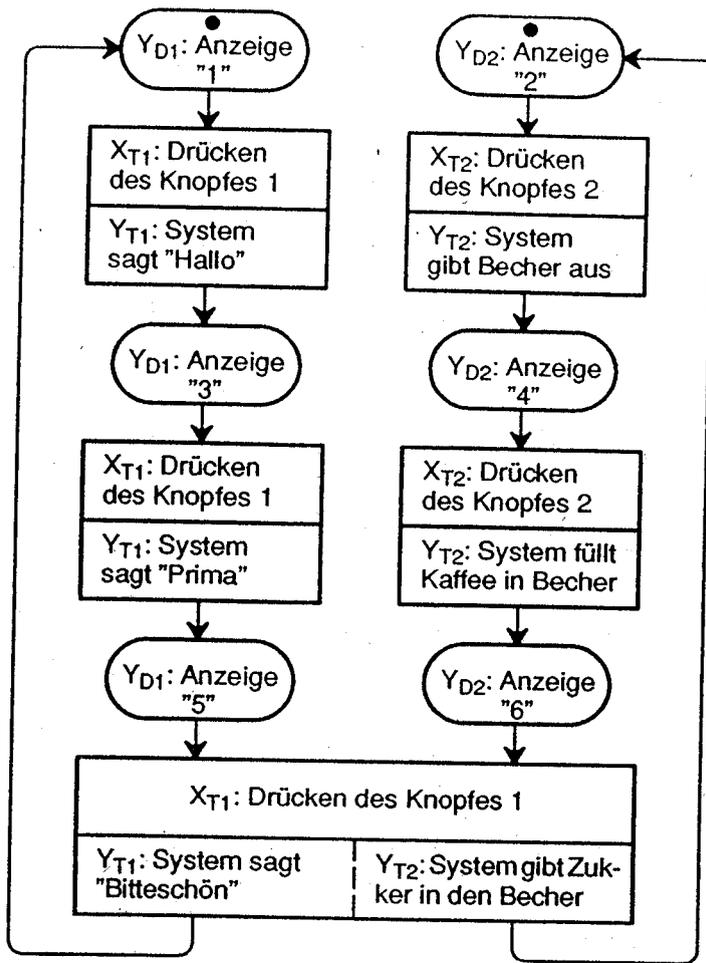


Bild 8.1 Beispiel eines Systems mit nebenläufigen Ein- und Ausgabevorgängen: Bedienungsprotokoll in Form eines Petrinetzes

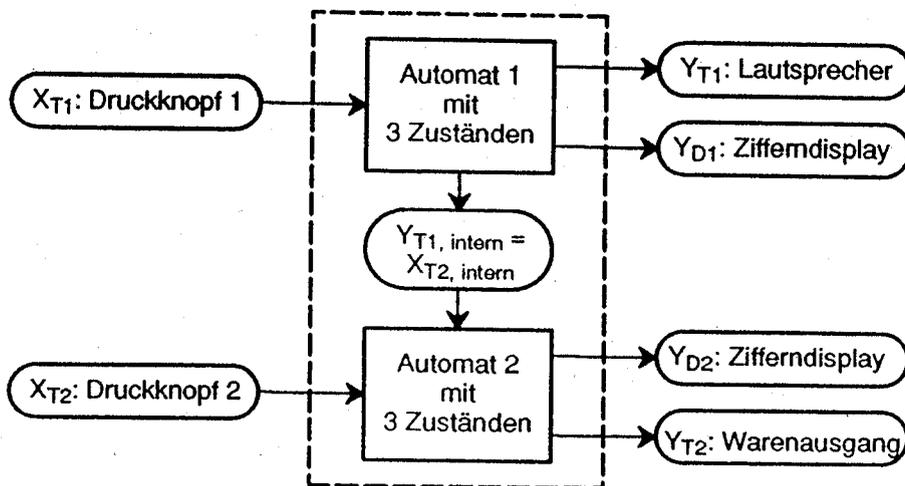


Bild 8.2 Beispiel eines Systems mit nebenläufigen Ein- und Ausgabevorgängen: Aufbaumodell

des Bedienungszyklus nicht nur eine Ausgabe des Automaten 1, sondern auch eine Ausgabe des Automaten 2 bewirken soll. Wenn der Automat 1 über seinen Ausgabekanal Y_{D1} eine "5" anzeigt und in dieser Situation der Bediener auf den Knopf 1 drückt, dann muß der Automat 1 nicht nur über den Lautsprecher "Bitte schön" sagen, sondern er muß auch über seinen Ereignisausgabekanal $Y_{T1, intern}$ ein Triggerereignis für den Automaten 2 ausgeben. Dieses Triggerereignis wird nicht mit einem Drücken des Knopfes 2 kollidieren, falls sich der Benutzer gemäß dem in 8.1 gegebenen Protokoll verhält.

In Bild 8.3 ist über der Zeitachse ein exemplarischer Verlauf eines Bedienungszyklus gezeigt. Aus diesem Verlauf muß man schließen, daß es nicht angemessen wäre, anstelle des Petrinetzes in Bild 8.1 den Markierungsübergangsgraphen in Bild 8.4 als Modell für das System zu wählen. Jeder Knoten im Markierungsübergangsgraphen repräsentiert eine bestimmte Belegung der Stellen des Petrinetzes. Welche Stellen jeweils als belegt zu denken sind, ist durch Eintragung der zugehörigen Anzeigeziffern angegeben. Eine durchgezogene gerichtete Kante im Markierungsübergangsgraphen repräsentiert das Schalten einer Transition. Eine gestrichelte gerichtete Kante repräsentiert das gleichzeitige Schalten zweier Transitionen, die nebenläufig schalten können.



Bild 8.3 Beispiel eines Systems mit nebenläufigen Ein- und Ausgabevorgängen:
Exemplarischer zeitlicher Verlauf der Ausgaben

Im Markierungsübergangsgraphen im Bild 8.4 sind diejenigen Markierungszustände grau unterlegt, die im Verlauf in Bild 8.3 gar nicht als beobachtbare Situationen vorkommen. Nur die beiden Markierungssituationen (5, 6) und (1, 2) sind pro Bedienungszyklus garantiert genau einmal beobachtbar, denn diese beiden Markierungssituationen bilden die Anfangsmarkierung und die Abschlußmarkierung der letzten Transition des Bedienungszyklus, zu der es keine nebenläufig schaltenden Transitionen gibt.

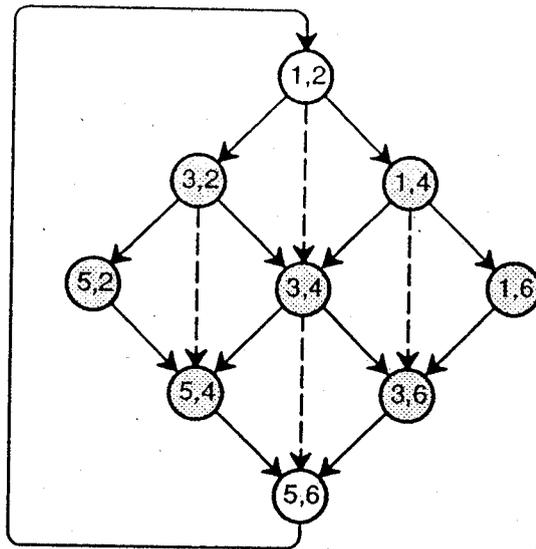


Bild 8.4 Beispiel eines Systems mit nebenläufigen Ein- und Ausgabevorgängen: Markierungsübergangsgraph zum Petrinetz in Bild 8.1

Zwar läßt sich zu jedem Petrinetz immer der zugehörige Markierungsübergangsgraph angeben, aber in vielen praktischen Fällen wäre es unrealistisch zu versuchen, den Markierungsübergangsgraphen als Aufgabenstellung für eine Automatenkonstruktion zu deuten. Man kann Nebenläufigkeit nur manchmal dadurch bewältigen, daß man formal vom Petrinetz zum Markierungsübergangsgraphen übergeht.

Die angemessene Behandlung von Nebenläufigkeit auf Eingabekanälen besteht immer darin, daß man die Eingabekanäle, auf denen nebenläufige Eingaben erfolgen können, auf separate Automaten führt. Ein System, zu dem mehrere Eingabekanäle hinführen, auf denen Ereignisse nebenläufig zueinander auftreten können, muß also immer mehrere Automaten enthalten. Es gibt grundsätzlich drei unterschiedliche Möglichkeiten, wie man von einer Aufgabenstellung zu einem Netz aus Automaten kommen kann.

- 1) Die erste Möglichkeit besteht darin, ein aufgabenspezifisches Automatennetz zu suchen. So wurde beispielsweise im Falle der Aufgabenstellung aus Bild 8.1 das aufgabenspezifische Automatennetz in Bild 8.2 gefunden. Die systematische Behandlung der Frage, wie man von einer gegebenen Aufgabenstellung zu einem aufgabenspezifischen Automatennetz kommen kann, würde den Rahmen der vorliegenden Betrachtung sprengen. Deshalb werden hier nur die beiden anderen Alternativen näher betrachtet.

Diesen beiden Alternativen ist gemeinsam, daß das zu wählende Automatennetz aufgabenunspezifisch ist. In beiden Fällen kann man also den grundsätzlichen Aufbau des Automatennetzes angeben, ohne auf eine bestimmte Aufgabenstellung Bezug zu nehmen.

2 Die erste Möglichkeit, ein aufgabenunspezifisches Automatenetz zu gestalten, ist in Bild 9 gezeigt. Dieses Automatenetz besteht aus einer Menge sog. Wandlerautomaten und einem einzigen zentralen Automaten. Die Menge aller Kanäle für Ereigniseingaben $X_{T, \text{extern}}$ ist in zwei disjunkte Teilmengen partitioniert, wobei als Partitionskriterium die Frage nach der Nebenläufigkeit entscheidend ist. Auf den Kanälen in der oberen Teilmenge sollen nebenläufige Ereignisse möglich sein, wogegen es auf den Kanälen in der unteren Teilmenge keine Nebenläufigkeit geben soll. Alle Eingangskanäle, auf denen nebenläufige Eingabeereignisse möglich sind, sind jeweils individuell auf ihren zugeordneten Wandlerautomaten geführt, der nur einen einzigen Ausgabe-kanal hat, über den das Auftretensein eines Ereignisses angezeigt werden kann.

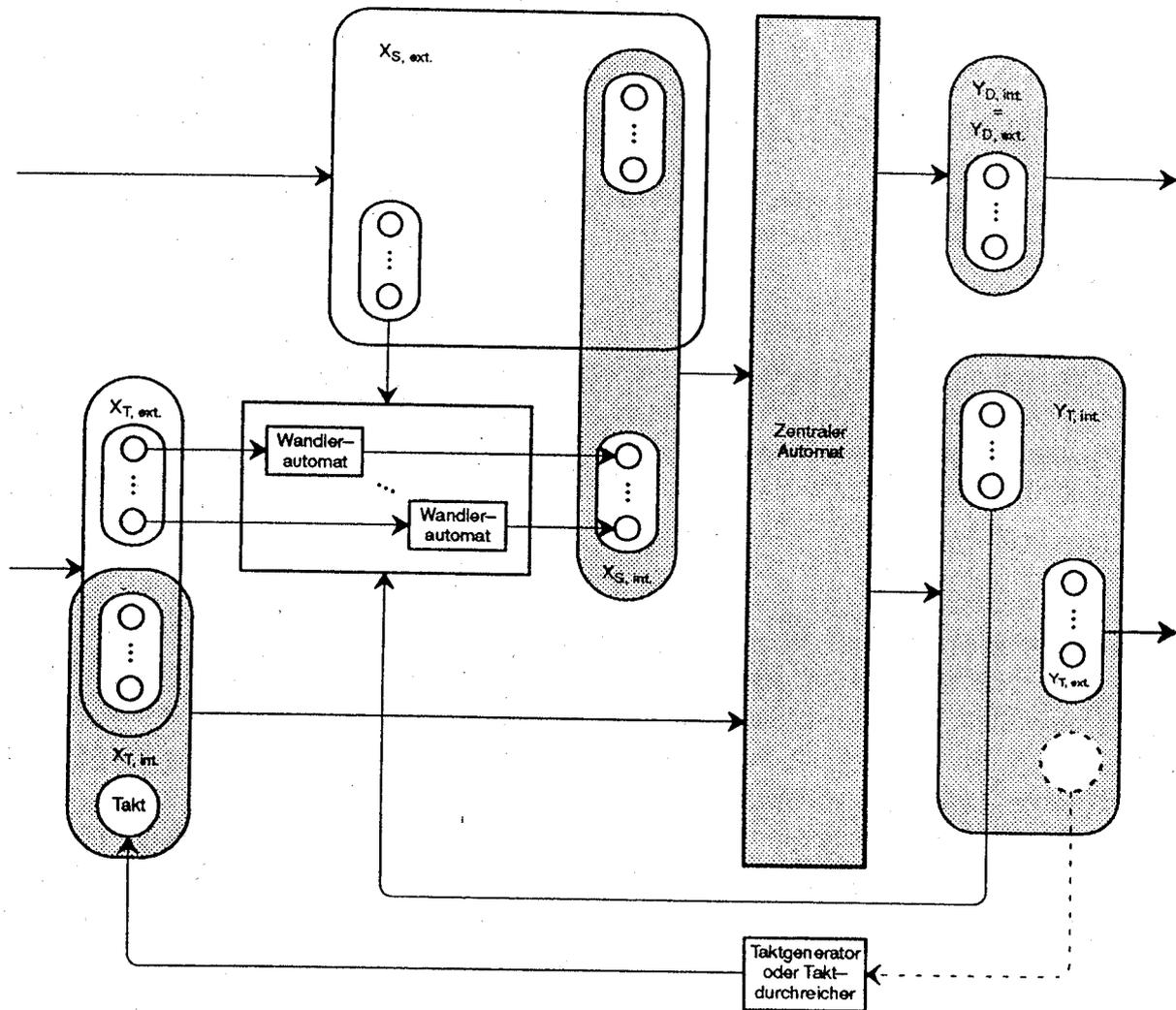


Bild 9 System mit nebenläufigen Eingaben und einem abtastenden zentralen Automaten

Die Ausgänge der Wandlerautomaten sind vom Anzeigetyp und gehören deshalb zur Menge der Kanäle $X_{S, \text{intern}}$, die vom zentralen Automaten zum Zeitpunkt seiner Triggerung abgetastet werden können.

In Bild 10 ist der einfachste Fall für das Verhalten eines Wandlerautomaten dargestellt. Das externe Ereignis besteht in einem Impuls auf einem Binärkanal $X_{T, \text{extern}}$. Die Vorderflanke dieses Impulses setzt ein Flipflop, dessen Ausgang durch die Impulse auf dem Binärkanal $X_{T, \text{intern}}$ ab-

getastet wird. Wenn der zentrale Automat im zweiten Abtastzeitpunkt in Bild 10 erkennt, daß ein Ereignis auf dem Kanal $X_{T, \text{extern}}$ aufgetreten ist, wird er auf dem Binärsignalkanal $Y_{T, \text{intern}}$ einen Reset-Impuls ausgeben, der das Flipflop zurücksetzt und es damit zum Auffangen des nächsten Ereignisses auf $X_{T, \text{extern}}$ bereitmacht.

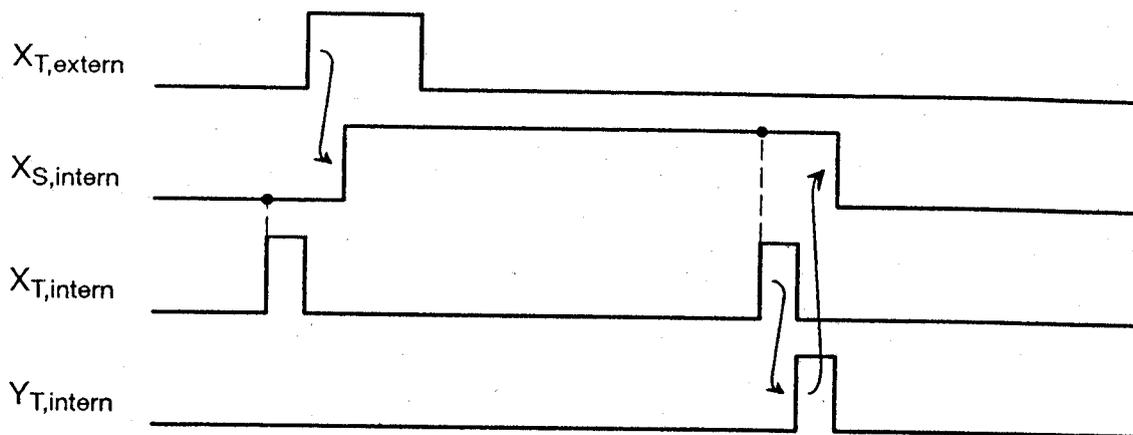


Bild 10 Prinzip der Wandlung einer externen Triggereingabe in ein intern abtastbares Signal

Nicht nur im Falle des Beispiels in Bild 10, sondern grundsätzlich immer muß der zentrale Automat, nachdem er die Ausgänge der Wandlerautomaten abgetastet hat, diese Automaten wieder zum Auffangen neuer Ereignisse auf ihren Eingangskanälen bereit machen. Dazu muß er Kanäle in der Menge $Y_{T, \text{intern}}$ verwenden, die nicht als Kanäle in der Menge $Y_{T, \text{extern}}$ nach außen geführt werden.

In Bild 9 ist die Möglichkeit gezeigt, daß ein Teil der Kanäle $X_{S, \text{extern}}$ nicht dem zentralen Automaten zur Abtastung zugeführt wird, sondern daß diese Kanäle bereits anlässlich der Wandlung von $X_{T, \text{extern}}$ nach $X_{S, \text{intern}}$ abgetastet werden. Dagegen werden die Kanäle $X_{S, \text{intern}}$, zu denen auch die Ausgangskanäle der Wandlerautomaten gehören, durch Ereignisse abgetastet, die auf den Kanälen $X_{T, \text{intern}}$ auftreten.

Da es auf den Kanälen in der unteren Teilmenge von $X_{T, \text{extern}}$ keine Nebenläufigkeit gibt, können diese Kanäle unmittelbar zum zentralen Automaten geführt werden, d.h. sie gehören zur Menge der Kanäle $X_{T, \text{intern}}$.

Neben den Kanälen, die im Durchschnitt der Mengen $X_{T, \text{extern}}$ und $X_{T, \text{intern}}$ liegen, gehört zur Menge der Kanäle $X_{T, \text{intern}}$ noch der sog. Taktkanal, der entweder aus einem freischwingenden Taktgenerator oder durch Rückkopplung des zentralen Automaten versorgt wird. Ein Taktgenerator kann nur eingesetzt werden, wenn der Durchschnitt der Mengen $X_{T, \text{extern}}$ und $X_{T, \text{intern}}$ leer ist. Bei nichtleerem Durchschnitt ist die Erzeugung eines Taktereignisses auf dem Rückkopplungsweg immer dann erforderlich, wenn der zentrale Automat durch seine Ausgabe die Umgebung derart beeinflußt hat, daß von dort aktuell nur noch Ereignisse kommen können, die auf Wandlerautomaten geführt werden. Der zentrale Automat sorgt in diesem Fall durch Einspeisung eines Ereignisses in den Rückkopplungspfad selbst dafür, daß er getriggert wird, damit er die Ausgänge der Wandlerautomaten abtasten kann.

3

Mit Bild 11 wird die zweite Möglichkeit vorgestellt, ein System mit nebenläufigen Eingabern durch ein aufgabenunspezifisches Automatenetz zu realisieren. Die Grundidee, die dem Bild 11 zugrunde liegt, ist die Zwangssequentialisierung der möglicherweise nebenläufigen Eingabeereignisse. Es wurde ja bereits im Zusammenhang mit dem Markierungsübergangsgraphen in Bild 8.4 darauf hingewiesen, daß man die Möglichkeit in Erwägung ziehen könnte, den Markierungsübergangsgraphen als Grundlage des Automatenentwurfs zu wählen. Dies bedeutet anschaulich, daß man die möglicherweise nebenläufig zueinander auftretenden Eingabeereignisse in einer Warteschlange aufsammelt, aus der man die Ereignisse nacheinander an den zentralen Automaten weitergibt.

Der zentrale Automat befindet sich rechts in Bild 11. Zu diesem Automaten führt nur ein einziger Kanal für Eingabeereignisse, nämlich der Kanal $X_{T,2}$. Dieser Kanal ist ein Ereignisausgabekanal des Automaten zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange. Welche Ereignisse sich in der Warteschlange jeweils aktuell befinden, kann dieser Automat durch Abtastung der Kanäle $X_{S,1}$ feststellen. Zum Speichern einer Ordnung dieser wartenden Ereignisse muß der Automat seinen inneren Zustandsspeicher benutzen

Man sieht in Bild 11, daß in dieser Struktur alle Kanäle $X_{T, \text{extern}}$ in abzutastende Kanäle gewandelt werden, so daß keine Ereignisse aus $X_{T, \text{extern}}$ zur Triggerung des zentralen Automaten oder des Automaten zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange benutzt werden können. Die Triggerung des Automaten zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange geschieht in Abhängigkeit von seinem Zustand entweder über die eigene Rückkopplung oder über die Fertigmeldung des zentralen Automaten. Bei Inbetriebnahme des Systems nach Bild 11 muß das Inbetriebnahmeereignis zur ersten Triggerung des Automaten zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange benutzt werden. Danach werden solange Abtastereignisse über die Rückkopplungsschleife erzeugt, bis zum ersten Mal bei der Abtastung erkannt wird, daß die Ereigniswarteschlange nicht mehr leer ist. In diesem Falle wird das erste Ereignis aus der Warteschlange entnommen und über $X_{T,2}$ an den zentralen Automaten weitergegeben.

Immer wenn der Automat zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange ein Ereignis über $X_{T,2}$ ausgibt, verzichtet er auf die Ausgabe eines Abtastauftrags. Denn in diesem Falle kann er sicher sein, daß der über $X_{T,2}$ getriggerte zentrale Automat am Ende seines Automaten schritts eine Fertigmeldung über einen Kanal in der Menge $Y_{T,2}$ ausgeben wird, die zur nächsten Triggerung des Automaten zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange benutzt wird. Sollte bei dieser Triggerung wieder festgestellt werden, daß die Ereigniswarteschlange nicht leer ist, dann wird das nächste Ereignis über $X_{T,2}$ ausgegeben. Wenn dagegen bei einer Triggerung durch die Fertigmeldung des zentralen Automaten festgestellt wird, daß die Ereigniswarteschlange leer ist, dann wird der Automat zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange bei dieser Triggerung einen Abtastauftrag ausgeben. Denn es muß ja sichergestellt sein, daß die Ereigniswarteschlange $X_{S,1}$ immer wieder abgetastet wird, damit ein Ereignis, welches bei $X_{T, \text{extern}}$ auftritt, erkannt werden kann.

Im Falle einer Realisierung der Steuerung mittels Programmierung eines Universalprozessors ist die Zwangssequentialisierung nebenläufiger Eingabeereignisse sehr leicht zu erreichen. Man betrachte hierzu das Bild 12. Ein Schritt eines Wandlerautomaten wird durch den einmaligen Ablauf einer Interruptroutine realisiert. Die Schritte des Automaten zur Ausgabe aus der Ereignis-

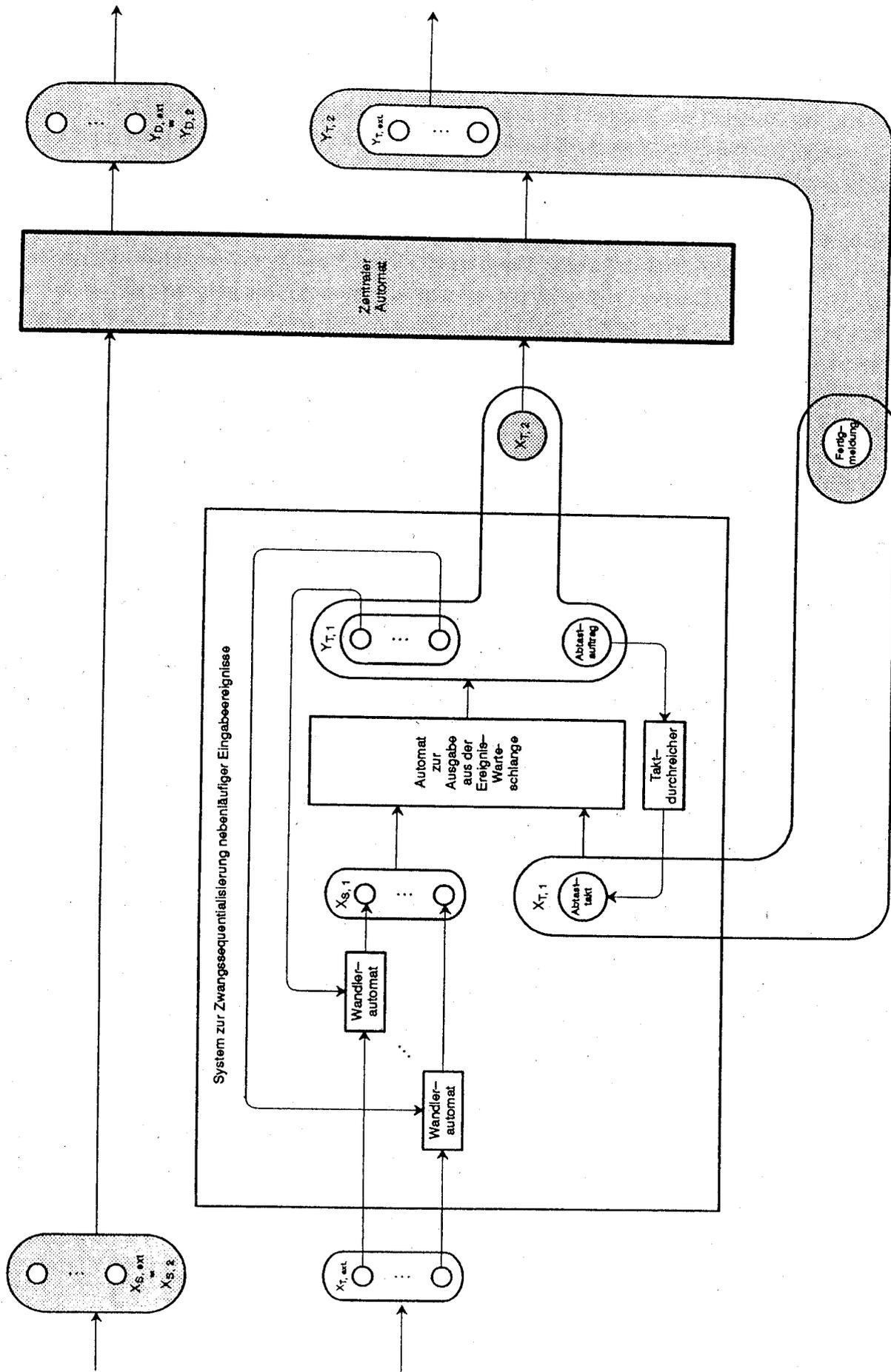


Bild II System mit nebenläufigen Eingaben und Zwangssequentialisierung

warteschlange und die Schritte des zentralen Automaten werden von einer Task ausgeführt, die durch das Auftreten von Eingabeereignissen unterbrochen werden kann. Da die Interruptroutinen und der Automat zur Ausgabe der Ereigniswarteschlange auf den gleichen Daten, nämlich $X_{S,1}$ operieren, muß verhindert werden, daß während eines Schrittes des Automaten zur Ausgabe aus der Ereigniswarteschlange eine Interruptroutine laufen kann.

Die beiden in den Bildern 9 und 11 dargestellten Systemstrukturen eignen sich nicht gleichermaßen für beliebige Aufgabenstellungen. Das System in Bild 9 ist das umfassendere, d.h. daß man mit diesem System eine umfassendere Menge von Aufgabenstellungen lösen kann als mit der Struktur in Bild 11. Man sieht dies leicht ein, indem man sich fragt, wie man die Aufgabenstellung aus Bild 8.1 mit einer Struktur nach Bild 9 oder nach Bild 11 realisieren könnte.

Man erkennt unmittelbar, daß ein zeitlicher Verlauf, wie er in Bild 8.3 gezeigt ist, mit der Systemstruktur in Bild 11, bei der die Ereignisse zwangssequentialisiert werden, nicht realisierbar ist. Der zeitliche Verlauf aus Bild 8.3 ist jedoch mit der Struktur in Bild 9 realisierbar. Denn man kann ja den Takt mit einer verhältnismäßig hohen Frequenz erzeugen und auf diese Weise in den schattierten Übergangsintervallen in Bild 8.3 jeweils eine große Zahl von Schritten des zentralen Automaten unterbringen.

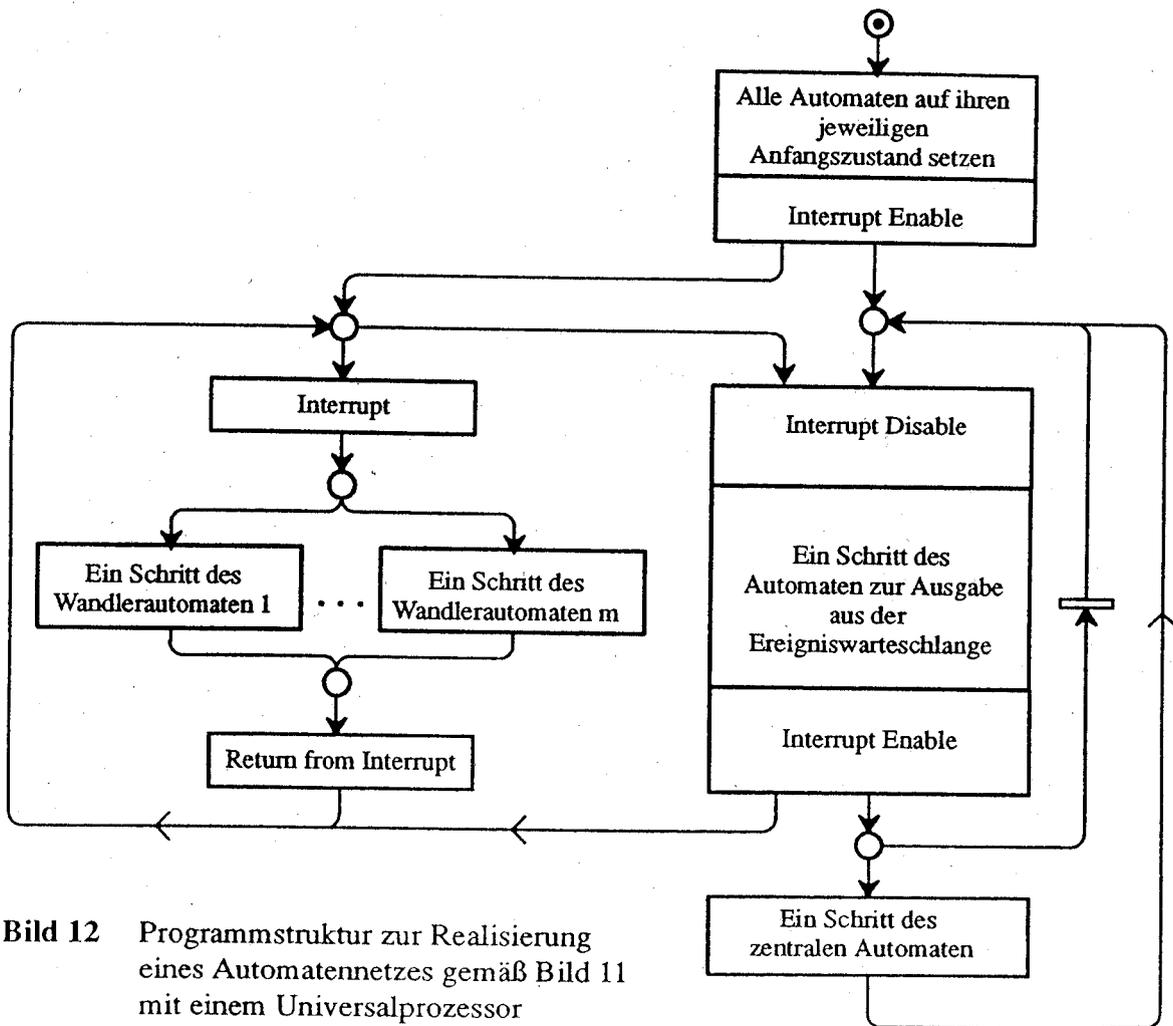


Bild 12 Programmstruktur zur Realisierung eines Automatennetzes gemäß Bild 11 mit einem Universalprozessor

2. Das Steuerkreismodell

2.1 Einführung

Das Steuerkreismodell, wie es in Bild 13 dargestellt ist, wurde in der Mitte der sechziger Jahre entwickelt [WE 70]. Anlaß zur Suche nach einem angemessenen Modell war die Existenz sehr vieler komplexer Steuerungen, deren Entwurf nicht systematisch nachvollzogen werden konnte, weil sie von den Entwicklern ohne lenkende Modellvorstellung durch das intuitive Verbinden von Schaltnetzen und Speichergliedern entworfen worden waren. Diese komplexen Steuerungen enthielten so viele Speicherzellen, daß die Menge der potentiellen Zustände trotz ihrer Endlichkeit so mächtig war, daß eine explizite Aufzählung der Zustände völlig unmöglich war.

Bei dem Versuch, solche Steuerungen so zu beschreiben, daß beim Leser ein intuitives Verständnis der gesamten Steuerung entsteht, stellte sich die Erkenntnis ein, daß man die Speicherzellen der Steuerung zweckmäßigerweise in zwei Klassen unterteilt. In die eine Klasse fallen die sog. ¹Operationsspeicher, die dazu dienen, irgendwelche ²Zwischenergebnisse für die spätere Verwendung aufzubewahren. In die andere Klasse fallen die Speicherzellen, die dazu dienen, die jeweils aktuelle Position in einem Ablaufdiagramm zu kennzeichnen, welches den abzuwickelnden Algorithmus beschreibt.

Diese Unterteilung der Speicherzellen in der Steuerung bildet die Grundlage für die Aufteilung des zentralen Automaten aus den Bildern 9 und 11 in zwei kommunizierende Automaten, wie es das Bild 13 zeigt. Der jeweilige Zustand des Operationsautomaten ist durch die Inhalte der operationellen Speicher bestimmt. Der jeweilige Zustand des Steuerautomaten ist durch die aktuelle Position im Ablaufdiagramm bestimmt.

Es stört überhaupt nicht, wenn die Anzahl der Speicherzellen im Operationsautomaten so groß ist, daß die Menge der potentiellen Operationszustände nicht mehr praktikabel aufgezählt werden kann. Der Operationsautomat braucht nämlich nicht durch eine Automatentafel oder einen Automatengraphen beschrieben zu werden. Er wird vielmehr durch Angabe eines endlichen, praktikabel aufzählbaren Repertoires von Operationsschritten charakterisiert. Das Repertoire der Operationsschritte ist vergleichbar mit dem Befehlsrepertoire eines Prozessors. Beispiele für Operationsschritte sind das Erhöhen eines Zählers um 1 oder das Rücksetzen eines Flipflops, welches das Aufgetretensein eines bestimmten Ereignisses angezeigt hatte.

Es ist die Aufgabe des Steuerautomaten, für jeden Automatenschritt vorzugeben, welche Teilmenge aus dem Repertoire der möglichen Operationsschritte parallel ausgeführt werden soll. Die parallele Ausführung von Operationsschritten in einem Automatenschritt ist ja durchaus möglich. So kann beispielsweise in einem getakteten Schaltwerk ein Zähler um 1 erhöht werden, und parallel dazu kann ein Meldeflipflop zurückgesetzt werden. Bei der Realisierung eines getakteten Automaten durch einen programmierten Universalprozessor gemäß Bild 7 werden das Erhöhen des Zählers und das Rücksetzen des Meldeflipflops zwar nacheinander ausgeführt, aber die Reihenfolge für diese zwangssequentialisierten Schritte kann willkürlich gewählt werden, weil diese beiden Operationsschritte kausal voneinander entkoppelt sind. Auch bei der programmierten Realisierung gehören deshalb diese beiden Operationsschritte zum selben Automatenschritt.

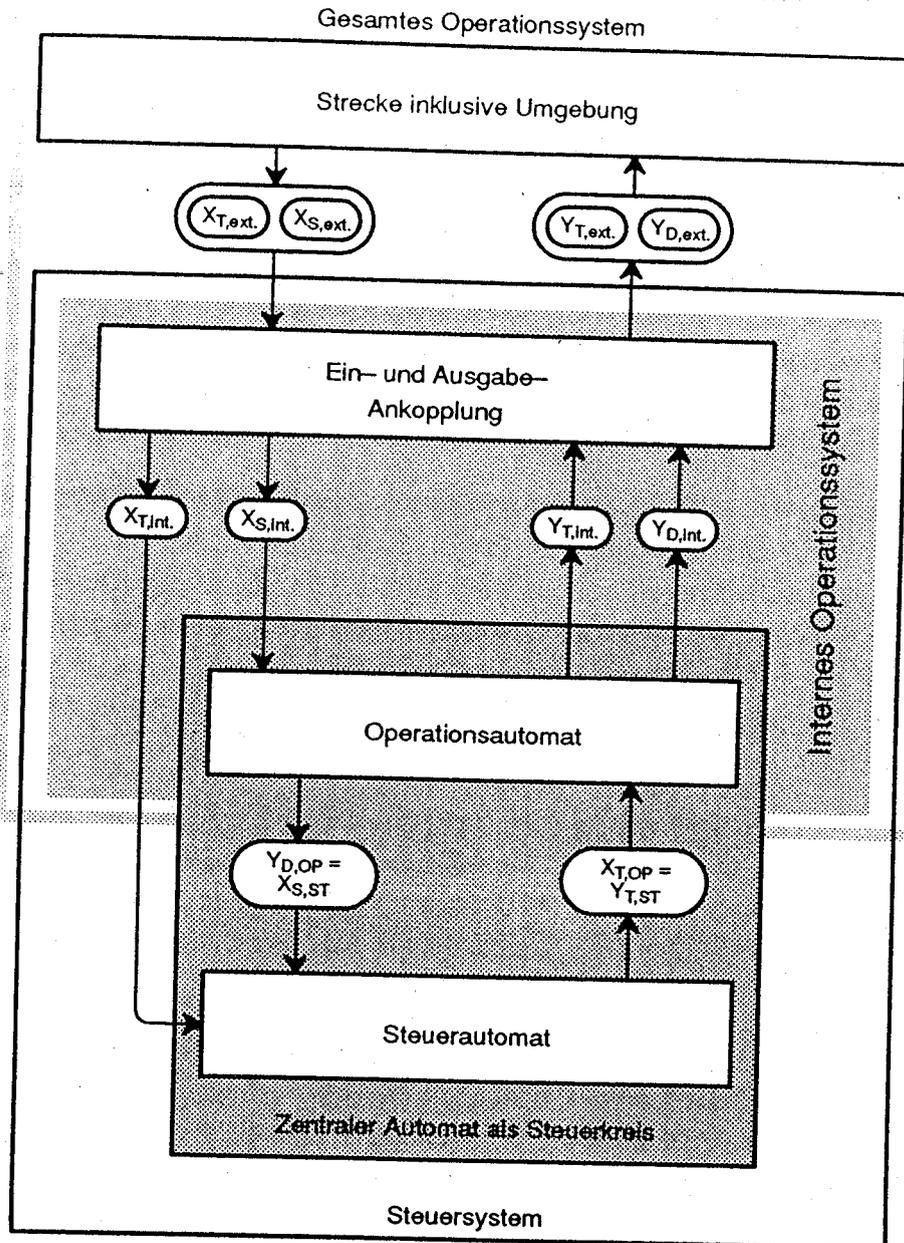


Bild 13 Das Steuerkreismodell

Damit der Steuerautomat jeweils weiß, welche Operationsschrittmenge im nächsten Takt ausgeführt werden muß, muß er sich über aktuelle Inhalte von operationellen Speichern informieren können. Deshalb gibt es in Bild 13 nicht nur den Kanal vom Steuerautomaten zum Operationsautomaten, über den der Steuerautomat dem Operationsautomaten die als nächste auszuführende Operationsschrittmenge mitteilt. Es gibt vielmehr auch den Kanal, der vom Operationsautomaten zum Steuerautomaten führt und auf dem die für den Steuerautomaten wissenswerten Inhalte operationeller Speicherzellen oder ein daraus gewonnenes Verknüpfungsergebnis angezeigt werden.

Im Gegensatz zum Operationsautomaten, dessen Zustände nicht aufgezählt werden und für den deshalb kein Automatengraph und keine Automatentafel angegeben werden, wird der Steuerau-

tomat durch Angabe eines Automatengraphen oder einer Automatentafel spezifiziert. Bild 14 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Automatentabelle für einen Steuerautomaten. In diesem Fall wurde angenommen, daß es zwei unterschiedliche Triggerereignisse a und b gibt, die jeweils einen Automaten schritt auslösen können. Jedem Paar $[Z(n), X_T(n)]$ ist eine nichtleere endliche und explizit aufgezählte Menge unterschiedlicher Fälle zugeordnet. Jeder dieser Fälle ist charakterisiert durch ein Prädikat, welches auf die aktuelle Abtastsituation von $X_S(n)$ angewandt wird. Dieses X_S ist die Anzeige $Y_{D, OP}$ des Operationsautomaten (siehe Bild 13), die im Falle der Triggerung vom Steuerautomaten abgetastet wird. In jedem einzelnen Fall liegt eindeutig fest, welche Operationsschritte der Steuerautomat im Operationsautomaten anstoßen muß und in welchen Zustand der Steuerautomat selbst übergehen soll.

		$X_T(n)$	
		a	b
Z(n)	I	$P_{I.a.1} [X_S(n)] \rightarrow \{OPS_1, OPS_4\}$, I	$P_{I.b.1} [X_S(n)] \rightarrow \{OPS_2, OPS_5, OPS_6\}$, III
		$P_{I.a.2} [X_S(n)] \rightarrow \{OPS_1\}$, II	sonst $\rightarrow \{OPS_4\}$, I
		sonst $\rightarrow \{OPS_2, OPS_3\}$, I	
	II	$\{OPS_4, OPS_5, OPS_6\}$, I	$P_{II.b.1} [X_S(n)] \rightarrow \{ \}$, II
			$P_{II.b.2} [X_S(n)] \rightarrow \{OPS_3, OPS_6\}$, III
			$P_{II.b.3} [X_S(n)] \rightarrow \{OPS_5\}$, IV
			sonst $\rightarrow \{OPS_2, OPS_4\}$, III

Bild 14 Prinzip der Automatentabelle eines Steuerautomaten

Man betrachte beispielsweise die Situation, daß sich der Steuerautomat im Zustand II befindet und durch ein Triggerereignis der Sorte b angestoßen wird. Im Bild 14 sind für das Paar (II, b) die drei Prädikate $P_{II.b.1}$, $P_{II.b.2}$ und $P_{II.b.3}$ angegeben. Von diesen Prädikaten kann höchstens eines auf $X_S(n)$ zutreffen, denn sonst wäre ja nicht eindeutig festgelegt, wie sich der Steuerautomat verhalten soll. Man nehme an, das Prädikat $P_{II.b.2}$ sei wahr. Dann muß der Steuerautomat gemäß der Tabelle in Bild 14 die beiden Operationsschritte OPS_3 und OPS_6 anstoßen und in den Zustand III übergehen.

Da der Kanal, der vom Steuerautomaten zum Operationsautomaten führt, ausschließlich dafür da ist, Operationsschritte im Operationsautomaten anzustoßen, handelt es sich hier um einen Ereigniskanal bzw. um eine Menge von Ereigniskanälen. In Bild 13 ist dies durch die Angabe $Y_{T, ST}$ bzw. $X_{T, OP}$ zum Ausdruck gebracht.

In Bild 13 sind verschiedene Systemteile zu höheren Einheiten zusammengefaßt. Das *Steuersystem* enthält neben dem *Steuerkreis* auch noch die Teilsysteme zur *Ankopplung* der externen Eingabe bzw. Ausgabe. Das Steuersystem umfaßt also sämtliche Systemteile, die bereits in Bild 9 bzw. Bild 11 eingeführt wurden. Durch Zusammenschaltung des Steuersystems mit der um ihre Umgebung erweiterten Strecke entsteht ein geschlossenes System. Man kann dieses geschlos-

sene System aber auch als Zusammenschaltung des Steuerautomaten mit einem *gesamten Operationssystem* sehen. Diejenigen Teile des gesamten Operationssystems, die als Teile des Steuersystems entworfen werden müssen, sind zum *internen Operationssystem* zusammengefaßt.

Diejenigen Teilsysteme in Bild 13, die explizit als *Systeme* bezeichnet wurden, wurden bewußt gegen diejenigen Teilsysteme abgegrenzt, die als *Automaten* bezeichnet sind. Für die Automaten gilt die Modellbegriffswelt, die im Kapitel 1 vorgestellt wurde. Wenn dagegen im vorliegenden Kontext von Systemen geredet wird, dann wird damit immer die Möglichkeit von nebenläufigen Vorgängen impliziert. Es ist ganz selbstverständlich, daß sich in dem geschlossenen System in Bild 13 nebenläufige Vorgänge abspielen. Solche nebenläufigen Vorgänge finden sich auch noch in bestimmten Teilsystemen wieder, nämlich im gesamten Operationssystem, im internen Operationssystem und im Steuersystem. Lediglich im Steuerkreis gibt es keine Nebenläufigkeit mehr. Deshalb ist der Steuerkreis das einzige Teilsystem in Bild 13, welches vollständig mit den Begriffen des Automatenmodells beschrieben werden kann.

2.2 Der getaktete Steuerkreis

Das Modell in Bild 13 erfaßt selbstverständlich auch die Möglichkeit, daß der Steuerkreis getaktet ist. In diesem Fall gibt es nur einen einzigen Kanal $X_{T, \text{intern}}$, auf dem nur Ereignisse eines einzigen Typs vorkommen können.

Für die Realisierung eines Steuerkreises durch die Zusammenschaltung zweier getakteter Schaltwerke (siehe Bilder 1 und 4) ist jedoch die Modellierung in Bild 13 nicht angemessen. In Bild 13 haben nämlich sowohl der Steuerautomat als auch der Operationsautomat Ausgabekanäle vom Ereignistyp. Es ist aber ein wesentliches Merkmal der getakteten Schaltwerke in Bild 1 und Bild 4, daß sie nur Ausgabekanäle vom Anzeigetyp haben.

Für den Fall, daß der Steuerautomat und der Operationsautomat durch getaktete Schaltwerke realisiert werden, wie sie in den Bildern 1 und 4 dargestellt sind, ist das angemessene Modell in Bild 15 angegeben. In diesem Modell übermittelt der Steuerautomat dem Operationsautomaten die im aktuellen Automaten-schritt auszuführende Menge von Operationsschritten nicht dadurch, daß er dem Operationsautomaten ein Ereignis auf einem Kanal $Y_{T, ST}$ schickt, aus dem die Operationsschrittmenge eindeutig folgt. Vielmehr wird in Bild 15 die aktuelle Teilmenge der Operationsschritte durch eine Anzeige $Y_{D, ST}$ angegeben, die vom Operationsautomaten zum Zeitpunkt des Taktereignisses abgetastet wird.

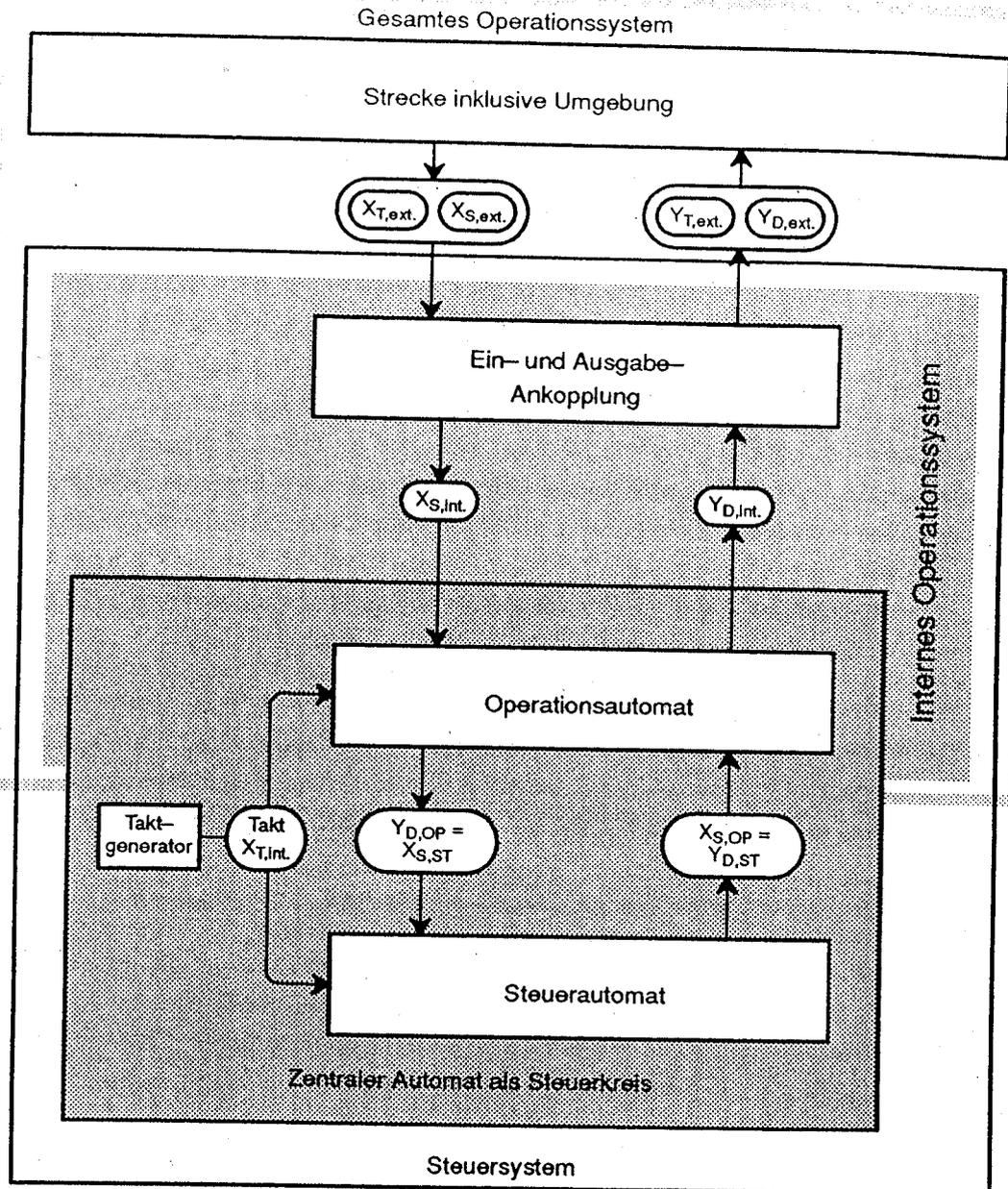


Bild 15 Das Steuerkreismodell für die Realisierung mit getakteten Schaltwerken

3. Entwurf einer Fahrstuhlsteuerung als Beispiel eines Entwurfs auf der Grundlage des Steuerkreismodells

3.1 Realisierung mit einem getakteten Steuerkreis aus Schaltwerken

In Bild 16 ein Fahrstuhlssystem als geschlossenes System dargestellt. Die um ihre Umgebung erweiterte Strecke findet man als Einheit in Bild 16 nicht; man muß sie sich aus den vier grau unterlegten Komponenten zusammengesetzt denken. Zu der um ihre Umgebung erweiterten Strecke gehören also der Fahrstuhlschacht mit seinen Kontakten in der linken Bildmitte, die Fahrstuhlkabine links unten im Bild, die Motorsteuerung links oben im Bild und schließlich noch in der rechten Bildmitte die Stockwerke, aus denen die Kabine gerufen werden kann. Mit dieser Festlegung, welchen Umfang die um ihre Umgebung erweiterte Strecke haben soll, wurde also festgelegt, daß sowohl die Motorsteuerung als auch die Türsteuerung für die Kabine als Teile der Strecke vorgegeben sein sollen. Es ist allgemein üblich, bei Steuerungsentwürfen derartige Zerlegungen vorzunehmen, weil dadurch ein modularer Entwurf möglich wird.

Die nicht zur Strecke zählenden Systemkomponenten in Bild 16 bilden zusammengenommen das Steuersystem im Sinne der Bilder 13 oder 15. Dabei ist die Einheit, die in Bild 16 als Zentralsteuerwerk bezeichnet ist, mit dem Steuerautomaten aus Bild 13 oder 15 identisch. Eine Unterteilung des internen Operationssystems in die Ankoppelkomponenten und den Operationsautomaten wurde in Bild 16 nicht vorgenommen. Eine derartige Unterteilung wird erst möglich, wenn die inneren Strukturen der Operationsschaltwerke für die Stockwerke betrachtet werden.

Der Systemteil, der in den Bildern 13 und 15 als internes Operationssystem bezeichnet ist, wird in Bild 16 aus den sieben in der Mitte des Bildes übereinanderliegenden Komponenten gebildet. Da das Bild 16 keine reine Aufgabenspezifikation darstellt, sondern bereits Entwurfsergebnisse zum Ausdruck bringt, kann man bestimmte in Bild 16 gezeigte Sachverhalte erst verstehen, nachdem man die in den Bildern 17 bis 20 dargestellten Strukturen verstanden hat. Im Augenblick sollte sich der Leser damit begnügen, eine ungefähre Vorstellung davon zu bekommen, was die Rolle der einzelnen Komponenten in Bild 16 ist.

Es liegt auf der Hand, daß man eine Fahrstuhlsteuerung so konzipieren sollte, daß die aktuelle Anzahl der vorhandenen Stockwerke für die Entwurfsüberlegungen keine Rolle spielt. Dies ist nur dadurch machbar, daß man im Operationssystem pro Stockwerk eine Komponente vorsieht, wobei diese stockwerksbezogenen Operationsschaltwerke für alle Stockwerke die gleiche innere Struktur haben können. Es ist leicht einzusehen, daß ein Operationsschaltwerk für ein bestimmtes Stockwerk mit seinen beiden Nachbarn, also mit dem Operationsschaltwerk des oberhalb liegenden Stockwerks und mit dem Operationsschaltwerk des unterhalb liegenden Stockwerks Information austauschen können muß.

Da angenommen wurde, daß alle Operationsschaltwerke die gleiche innere Struktur haben, müssen selbstverständlich die Kanäle, die der Kommunikation zwischen Nachbarn dienen, beim untersten Stockwerk und beim obersten Stockwerk, die ja jeweils nur einen Nachbarn haben, auf geeignete Weise abgeschlossen werden. Ein solcher Abschluß kann darin bestehen, daß auf einen

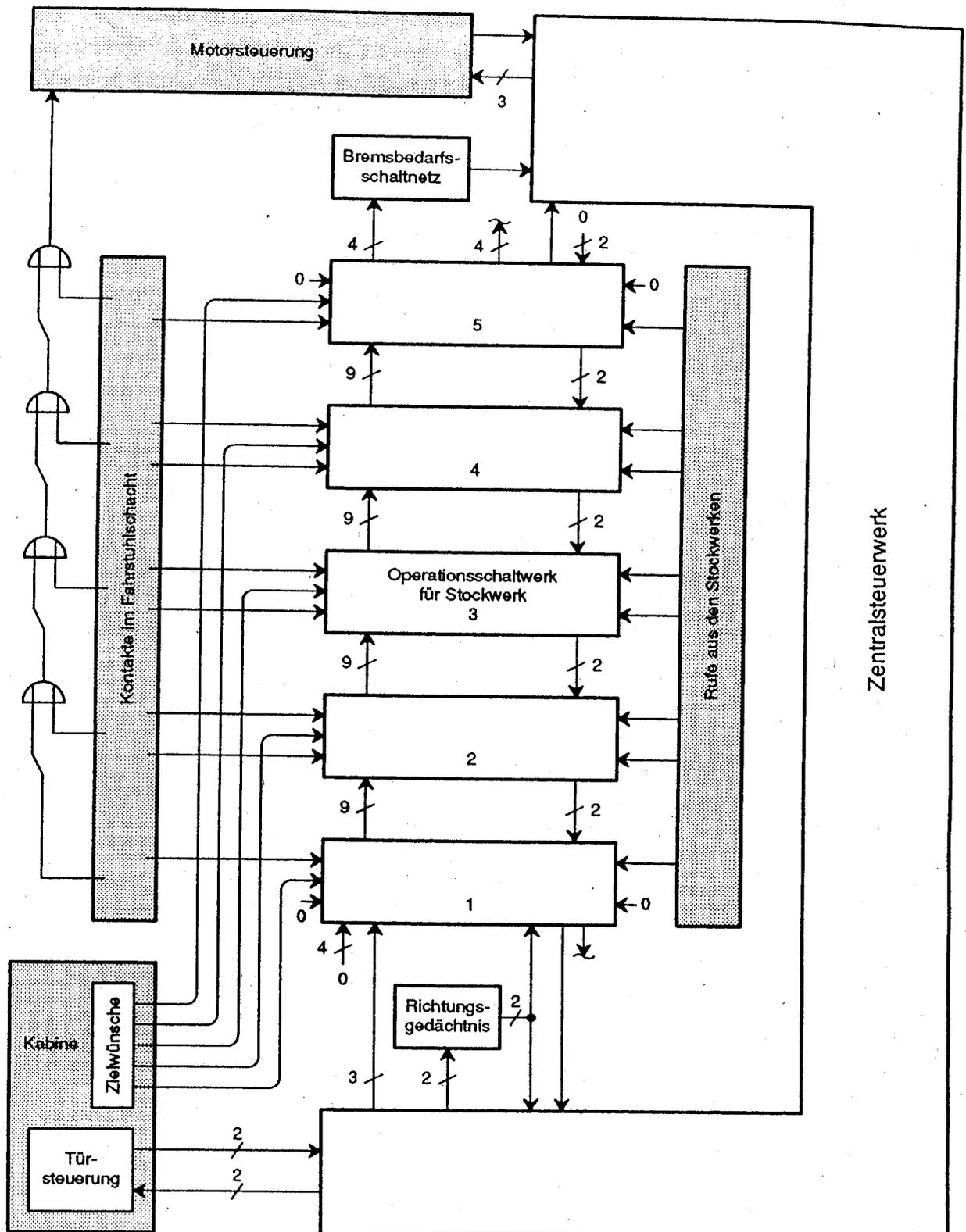


Bild 16 Blockstruktur des gesamten Fahrstuhlsystems

binären Eingangskanal eine konstante 0 gelegt wird, oder daß ein binärer Eingangskanal aus dem Zentralsteuerwerk oder aus einer andersartigen Operationskomponente versorgt wird. Bezüglich der Ausgangskanäle kann der Abschluß darin bestehen, daß man die darauf angelieferte Information unbenutzt ins Leere laufen läßt oder daß man diese Kanäle als Eingangskanäle für andersartige Operationskomponenten oder für das Zentralsteuerwerk benutzt. Die konkrete Festlegung des Abschlusses der Kanäle am unteren und am oberen Rand der Kette der stockwerksbezogenen Operationsschaltwerke in Bild 16 wird erst weiter unten verständlich.

Die Operationsschaltwerke haben nicht nur Kanäle am unteren und am oberen Rand, sondern auch Eingangskanäle, die von links und von rechts kommen. Von rechts kommen die Rufe aus den Stockwerken. Es wurde angenommen, daß richtungsbezogene Rufe abgegeben werden können, so daß jedes Operationsschaltwerk zwei von rechts kommende Eingänge hat. Da man im obersten Stockwerk nicht wünschen kann, weiter nach oben zu fahren, und im untersten Stockwerk nicht wünschen kann, weiter nach unten zu fahren, muß bei diesen beiden Operationsschaltwerken jeweils einer der beiden von rechts kommenden Kanäle mit 0 abgeschlossen werden.

Da auch die Zielwünsche, die in der Kabine abgegeben werden, stockwerksbezogen sind, gibt es in Bild 16 für jedes Operationsschaltwerk auf der linken Seite einen Kanal, über den der Zielwunsch gemeldet werden kann.

Die anderen beiden Kanäle auf der linken Seite eines Operationsschaltwerkes kommen von den Intervallkontakten aus dem Fahrstuhlschacht. Zu jedem Stockwerk, von dem aus man in beide Richtungen fahren kann, gibt es zwei Intervallkontakte; der eine Kontakt liefert eine Meldung, wenn die Kabine einen Meter oberhalb der Stockwerkshalteposition vorbeikommt, und der andere Intervallkontakt liefert eine Meldung, wenn die Kabine einen Meter unterhalb der Stockwerkshalteposition vorbeikommt. Diese Meldungen werden in den Operationsschaltwerken gebraucht, damit festgestellt werden kann, wo sich der Fahrstuhl befindet und ob bei der aktuellen Wunschsituation ein Bremsauftrag an die Motorsteuerung gegeben werden muß.

Neben den Intervallkontakten, die in Bild 16 rechts im Fahrstuhlschacht liegen, gibt es auch noch die Haltepositionskontakte links im Fahrstuhlschacht. Die Meldung, daß eine Halteposition erreicht ist, geht jeweils unmittelbar zur Motorsteuerung; sie wird dort aber nur relevant, falls die Motorsteuerung zuvor vom Zentralsteuerwerk einen Bremsauftrag erhalten hatte. Die Meldungen sämtlicher Haltepositionen sind ODER-verknüpft, weil es die Motorsteuerung nicht interessiert, in welchem Stockwerk sich die Kabine befindet.

Das Verhalten der Motorsteuerung, soweit es für das Zentralsteuerwerk relevant ist, ist in Form eines Zustandsgraphen in Bild 17 angegeben. Der Graph hat drei Zustände und vier Zustandsübergänge. Jeder Zustandsübergang wird durch ein Ereignis ausgelöst, wobei für jede Ereignisart ein eigener Kanal zur Verfügung steht. Die Meldung eines Stopkontaktes kommt aus dem ODER-Gatter links oben in Bild 16, während die drei anderen Ereignismeldungen über die drei Kanäle vom Zentralsteuerwerk kommen. Wenn der Motor steht, kann er durch einen Startauftrag in Bewegung gesetzt werden. Das Zentralsteuerwerk wird selbstverständlich entscheiden, ob es einen Startauftrag für Abwärtsfahrt oder für Aufwärtsfahrt gibt, aber das Zentralsteuerwerk braucht aus der Motorsteuerung keine Rückmeldung darüber, ob der Motor die Kabine aufwärts oder abwärts bewegt. Der einzige Kanal, der von der Motorsteuerung zum Zentralsteuerwerk

führt, ist ein Zustandsanzeigekanal, dem das Zentralsteuerwerk entnehmen kann, ob der Motor steht oder nicht.

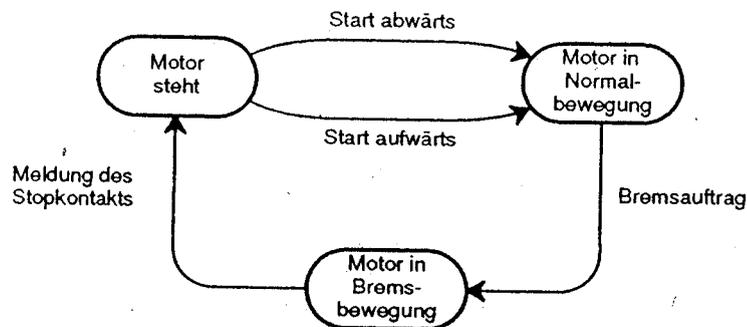


Bild 17 Automatengraph der Motorsteuerung

In Bild 18 ist der Zustandsgraph für die Türsteuerung dargestellt. Zwischen der Türsteuerung und dem Zentralsteuerwerk gibt es zwei Binärkanäle für die Zustandsanzeige, weil das Zentralsteuerwerk wissen muß, ob die Türe im Zustand *vollständig geöffnet* oder im Zustand *vollständig geschlossen* ist oder keines von beiden. Zur Erteilung eines Schließauftrages und zur Erteilung eines Öffnungsauftrages benutzt das Zentralsteuerwerk jeweils einen der beiden Ereigniskanäle, die vom Zentralsteuerwerk zur Türsteuerung laufen. Die beiden Endstellungskontakte, die melden können, ob die Türe vollständig geöffnet bzw. vollständig geschlossen ist, sind in Bild 16 nicht gezeigt, sondern müssen innerhalb der Türsteuerung befindlich gedacht werden.

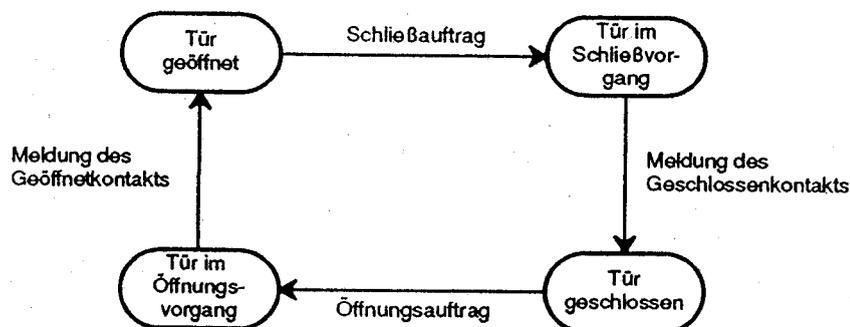


Bild 18 Automatengraph der Türsteuerung

Neben den Kanälen für die beiden Endstellungsmeldungen muß es noch weitere Meldekanäle für die Türsteuerung geben, die ebenfalls in Bild 16 nicht gezeigt sind. Denn während des Schließvorganges kann es ja vorkommen, daß der im Schließen begriffenen Tür ein Widerstand entgegengesetzt wird oder daß eine zwischen Tür und Rahmen verlaufende Lichtschranke durchbrochen wird. In diesen Fällen muß die Tür gestoppt und wieder ganz geöffnet werden, und nach einer kurzen Wartezeit kann dann ein erneuter Schließversuch unternommen werden. Nachdem die Zentralsteuerung den Schließauftrag ausgegeben hat, interessiert sie sich nicht dafür, was alles mit der Tür geschieht bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die Tür endgültig geschlossen ist. Die Möglichkeit erfolgloser Schließversuche braucht beim Entwurf des Zentralsteuerwerks nicht berücksichtigt zu werden. Das gleiche gilt für die selbstverständlich notwendige Verzögerung zwischen dem Erteilen eines Schließauftrags und dem tatsächlichen Beginn der Türbewegung. Diese Erfordernisse müssen beim Entwurf der Türsteuerung berücksichtigt werden.

In Bild 19 ist die innere Struktur eines stockwerksbezogenen Operationsschaltwerks gezeigt. Es wurde bereits gesagt, daß für alle fünf Stockwerke die Operationsschaltwerke in Bild 16 gleich sein sollen. Die folgende Begründung der Struktur in Bild 19 soll deutlich machen, daß diese Struktur nicht einfach eine intuitive Zusammenschaltung von logischen Gattern und Flipflops ist, sondern daß diese Struktur als systematischer modularer Aufbau verstanden werden kann.

Zuerst werden das RS-Flipflop in der Mitte des Bildes und das Schaltnetz zu seiner Ansteuerung betrachtet. Dieses RS-Flipflop dient dazu, die Meldungen einzufangen, die von den Intervallkontakten des zugehörigen Stockwerks kommen. Es müssen vier unterschiedliche Meldungssituationen unterschieden werden: (1) Der obere Intervallkontakt wird bei Abwärtsfahrt erreicht. (2) Der untere Intervallkontakt wird bei Abwärtsfahrt erreicht. (3) Der obere Intervallkontakt wird bei Aufwärtsfahrt erreicht. (4) Der untere Intervallkontakt wird bei Aufwärtsfahrt erreicht.

Wenn der Fahrstuhl in die Intervallzone eines Stockwerks einfährt, soll das RS-Flipflop für dieses Stockwerk auf Eins gesetzt werden, und wenn der Fahrstuhl die Intervallzone wieder verläßt, soll das Flipflop wieder auf Null gesetzt werden. Dies wird durch das Ansteuerschaltnetz des RS-Flipflops erreicht. Die vier horizontal nebeneinanderliegenden UND-Gatter des Ansteuernetzes dienen dazu, die oben aufgeführten vier Situationen zu erfassen. Den UND-Gattern sind in der Reihenfolge von links nach rechts die Situationen (1), (2), (3) und (4) zugeordnet.

Die drei getakteten JK-Flipflops oberhalb des RS-Flipflops dienen dazu, die Wünsche bezüglich dieses Stockwerks festzuhalten. In der Mitte wird der Zielwunsch festgehalten, der durch Drücken eines Knopfes in der Kabine geäußert wird. In den beiden äußeren Flipflops werden die Wünsche festgehalten, die durch Drücken eines Rufknopfes auf dem Stockwerk geäußert werden können.

An dieser Stelle durften keine ungetakteten RS-Flipflops eingesetzt werden, weil es hier im Gegensatz zum Positions-Flipflop zu Kollisionen zwischen der Setzansteuerung und der Rücksetzansteuerung kommen kann. Beim Positions-Flipflop kann es keine Kollision zwischen R und S geben, weil ja nicht beide Intervallkontakte gleichzeitig erreicht sein können. Das Drücken einer Wunschaste ist aber jederzeit möglich und kann deshalb mit der Absicht des Zentralsteuerwerks kollidieren, das Wunsch-Flipflop zurückzusetzen. Die Kollision wird dadurch eindeutig entschieden, daß man getaktete JK-Flipflops nimmt.

Durch die UND-Verknüpfung des Zielwunsches mit dem Komplementärausgang des Positions-Flipflops wird erreicht, daß Zielwünsche nur angenommen werden, solange sich die Kabine außerhalb des Intervallbereichs des gewünschten Stockwerks befindet. Die Wünsche, die aus dem Stockwerk kommen, werden dagegen zu jeder Zeit angenommen. Man hätte die Entscheidung bezüglich des Annehmens oder Zurückweisens von Wünschen auch anders entscheiden können; es handelt sich hier um eine Spezifikationsentscheidung, die man findet, indem man sich überlegt, welches Verhalten die Fahrstuhlbenutzer als "vernünftig" empfinden werden.

(ausklappbar am Ende dieser Schrift)

Bild 19 Aufbau eines stockwerksbezogenen Operationsschaltwerks und seine Einbindung in das Fahrstuhlssystem in Bild 16

Die Rücksetzung der Wunsch-Flipflops erfolgt gezielt aus dem Zentralsteuerwerk, wobei dieses nicht wissen muß, in welchem Stockwerk sich der Fahrstuhl aktuell befindet. Dies wird ja in dem jeweiligen Operationsschaltwerk durch das Positions-Flipflop angezeigt. Deshalb kann eine Reset-Aufforderung aus dem zentralen Steuerwerk an alle Operationsschaltwerke gleichzeitig gegeben werden. Wegen der UND-Verknüpfung der Reset-Anforderung mit der Positionsanzeige wird sichergestellt, daß nur dasjenige Wunsch-Flipflop zurückgesetzt wird, welches tatsächlich zurückgesetzt werden soll.

Man sieht in Bild 19, daß fünf Leitungen für Binärinformationen von unten nach oben durch alle Operationsschaltwerke durchlaufen. Es handelt sich um die drei Leitungen für die Reset-Aufforderungen aus dem Steuerwerk sowie um die beiden Leitungen, auf denen der Inhalt des Richtungsgedächtnisses angezeigt wird. Das Richtungsgedächtnis ist ein JK-Flipflop, welches aus dem Zentralsteuerwerk angesteuert wird. Wenn das Zentralsteuerwerk die Entscheidung fällt, daß der Fahrstuhl abwärts fahren soll, dann wird dieses Flipflop auf Null gesetzt, was bedeutet, daß auf dem komplementären Ausgang dann eine Eins erscheint. Entsprechend wird das Flipflop auf Eins gesetzt, wenn das Steuerwerk die Entscheidung fällt, daß nun der Fahrstuhl aufwärts fahren soll. Man wird später bei der Betrachtung des Ablaufes in Bild 20 sehen, daß die Entscheidung über die zukünftige Fahrtrichtung schon gefällt wird, bevor der entsprechende Startauftrag an die Motorsteuerung gegeben wird.

Neben den fünf Leitungen, die von unten nach oben durch alle Operationsschaltwerke durchlaufen, gibt es im Zwischenraum zwischen zwei Operationsschaltwerken noch sechs weitere Leitungen, die nicht gerade durchgezogen sind, sondern die einen leichten Richtungsversatz erfahren. In der Fachsprache der Hardware-Technik spricht man hier von sog. Daisy-Chain-Verbindungen ("Kette aus Gänseblümchen"). Der Richtungsversatz ist eine Konsequenz des Sachverhalts, daß es sich hier nicht um Kanäle für Binärinformationen handelt, die von unten nach oben oder von oben nach unten über alle Operationsschaltwerke durchgereicht werden. Es handelt sich vielmehr um Kanäle, die jeweils nur paarweise zwei Operationsschaltwerke miteinander verbinden. Ein solcher Kanal führt jeweils von einem Gatterausgang des einen Operationsschaltwerks zum entsprechenden Gattereingang seines Nachbarn. Solche Daisy-Chain-Strukturen werden immer dann eingesetzt, wenn es darum geht, Informationen zu gewinnen, die iterativ bzw. rekursiv definiert sind.

Die sechs Daisy-Chain-Verbindungen im Zwischenraum zwischen zwei Operationsschaltwerken gehören jeweils paarweise zusammen, wobei jeweils die beiden ein Paar bildenden Kanäle symmetrisch zur Mittelachse liegen. Es gehören also der ganz links außen verlaufende Kanal und der ganz rechts außen verlaufende Kanal zusammen. In entsprechender Weise bildet der Kanal, der als zweiter von links verläuft, mit dem Kanal, der als zweiter von rechts verläuft, ein Paar. Das dritte Paar wird durch die beiden innersten Daisy-Chain-Kanäle gebildet.

- ① Die beiden innenliegenden Daisy-Chain-Kanäle dienen dazu festzustellen, ob es oberhalb des aktuellen Stockwerks oder unterhalb des aktuellen Stockwerks noch unbefriedigte Wünsche gibt. Ein Wunsch ist so lange als unbefriedigt zu betrachten, so lange das zugehörige JK-Flipflop noch auf Eins steht. Deshalb sind die Ausgänge der Wunsch-Flipflops im Operationsschaltwerk durch ODER-Gatter zusammengefaßt. Wenn das über dem Zielwunsch-Flipflop liegende ODER-Gatter eine Eins liefert, dann gibt es in dem aktuellen Stockwerk noch mindestens einen unbefrie-

digten Wunsch. Man sieht nun, daß diese Wunschexistenzaussage sowohl nach links oben als auch nach rechts unten durch ODER-Verknüpfung in einen Daisy-Chain-Kanal eingebracht wird. Auf diese Weise wird über die linke Daisy-Chain dieses Paares jeweils nach oben gemeldet, ob es weiter unten noch unbefriedigte Wünsche gibt, und über die rechts verlaufende Daisy-Chain dieses Paares wird nach unten gemeldet, ob es weiter oben noch unbefriedigte Wünsche gibt.

- 2) Als nächstes Daisy-Chain-Paar wird dasjenige betrachtet, dessen Kanäle als zweiter von links bzw. als zweiter von rechts verlaufen. Dieses Daisy-Chain-Paar dient dazu festzustellen, ob es einen Bedarf für eine Abwärtsfahrt oder für eine Aufwärtsfahrt gibt. Einen *Bedarf für eine Abwärtsfahrt* kann es nur geben, wenn sich die Kabine aktuell im Stockwerk *i* befindet und unterhalb dieses Stockwerks *i* unbefriedigte Wünsche vorliegen. Entsprechend kann es einen *Bedarf für eine Aufwärtsfahrt* nur geben, wenn sich der Fahrstuhl im Stockwerk *i* befindet und es oberhalb von *i* noch unbefriedigte Wünsche gibt.

Die beiden UND-Gatter jeweils am linken und am rechten Ende der horizontal verlaufenden Leitung, auf der die Position *i* angezeigt wird, liefern an ihren Ausgängen die Aussagen, ob aufgrund der aktuellen Fahrstuhlposition und der aktuellen Wunschsituation im gesamten System ein Bedarf für eine Abwärtsfahrt oder ein Bedarf für eine Aufwärtsfahrt besteht. Es kann selbstverständlich gleichzeitig ein Bedarf für eine Abwärtsfahrt und ein Bedarf für eine Aufwärtsfahrt bestehen.

- 3) Das Daisy-Chain-Paar, bei dem der eine Kanal ganz links außen und der andere Kanal ganz rechts außen nach oben führen, dient dazu, den Bremsbedarf festzustellen. Ein Bremsbedarf kann nur in einem solchen Augenblick festgestellt werden, in dem die Kabine einen Intervallkontakt berührt. Wenn ein oberer Intervallkontakt bei Abwärtsfahrt berührt wird und die Wunschsituation derart ist, daß der Fahrstuhl in diesem Stockwerk halten soll, dann liegt ein Bremsbedarf vor. Ein Bremsbedarf bei Aufwärtsfahrt liegt vor, wenn der Fahrstuhl bei Aufwärtsfahrt einen unteren Intervallkontakt berührt und die Wunschsituation für das erreichte Stockwerk derart ist, daß der Fahrstuhl anhalten soll.

Die Wunschsituation, die ein Halten verlangt, ist bei Aufwärtsfahrt eine andere als bei Abwärtsfahrt. Der Bremsbedarf ergibt sich jeweils durch ODER-Verknüpfung dreier Sachverhalte. Im Falle der Abwärtsfahrt sind dies die folgenden drei Sachverhalte: (1) Das erreichte Stockwerk wurde als Ziel gewünscht. (2) Aus diesem Stockwerk wurde ein Wunsch für Abwärtsfahrt gemeldet. (3) Unterhalb des erreichten Stockwerks gibt es keine unbefriedigten Wünsche.

Im Falle der Aufwärtsfahrt müssen zur Bestimmung des Bremsbedarfs folgende drei Sachverhalte ODER-verknüpft werden: (1) Das erreichte Stockwerk wurde als Ziel gewünscht. (2) Aus diesem Stockwerk wurde ein Wunsch nach Aufwärtsfahrt gemeldet. (3) Oberhalb des erreichten Stockwerks gibt es keine unbefriedigten Wünsche.

Es wäre ein unnötiger Aufwand, bei der Bestimmung des Bremsbedarfs die aktuelle Fahrtrichtung in jedem Operationsschaltwerk als Bedingung einzubringen. Es ist viel aufwandsgünstiger, die Fahrtrichtung erst am Ende der beiden Daisy-Chains einzubringen. Das aus zwei UND-Gattern und einem ODER-Gatter bestehende Schaltnetz oben in der Mitte des Bildes 19 ist mit dem in Bild 16 vorkommenden Bremsbedarfsschaltnetz identisch. Ein Bremsbedarf besteht, wenn es

einen Bremsbedarf bei Abwärtsfahrt gibt und tatsächlich eine Abwärtsfahrt vorliegt oder wenn es einen Bremsbedarf bei Aufwärtsfahrt gibt und tatsächlich eine Aufwärtsfahrt vorliegt.

Die Beschaltung der Operationsschaltwerke für das unterste und das oberste Stockwerk, die in Bild 19 gezeigt ist, macht es grundsätzlich möglich, im untersten und im obersten Operationsschaltwerk jeweils bestimmte Verknüpfungsglieder wegzulassen. Man betrachte beispielsweise den links oben liegenden Daisy-Chain-Ausgang des untersten Operationsblocks. Aufgrund des Sachverhalts, daß diese Daisy-Chain von unten her mit einer 0 vorbelegt ist, kann das ODER-Glied in der Daisy-Chain durch eine einfache Verbindung ersetzt werden. Da auch die Daisy-Chain, die den *Wunsch unter i* liefert, von unten her mit einer 0 vorbelegt ist, kann das ODER-Glied links oben, welches einen invertierenden Eingang hat, durch eine konstante Eins ersetzt werden. Da diese konstante Eins auf das UND-Glied führt, kann schließlich dieses wieder durch eine einfache Verbindung ersetzt werden. Das bedeutet, daß im Operationsschaltwerk des untersten Stockwerks der *Kontakt über i* unmittelbar zum Daisy-Chain-Ausgang oben links geführt werden kann, ohne daß dazwischen irgendwelche logischen Verknüpfungsglieder gebraucht werden.

In entsprechender Weise findet man noch weitere Möglichkeiten zum Vereinfachen der Operationsschaltwerke ganz unten und ganz oben. Es muß aber nicht unbedingt sinnvoll sein, diese möglichen Vereinfachungen tatsächlich durchzuführen. Es ist häufig viel sinnvoller, möglichst lauter einheitliche Blöcke im System zu haben.

Nachdem nun alle Teilfunktionen der Struktur in Bild 19 besprochen sind, kann die Beschreibung der Fahrstuhlsteuerung mit der Vorstellung des Steuerablaufs abgeschlossen werden. In Bild 20 ist der Steuerablauf in einer speziellen Symbolik für getaktete Abläufe dargestellt. Jedes große Rechteck symbolisiert eine Taktperiode, und jedes flache Rechteck, welches entweder isoliert vorkommt oder als Streifen am oberen Rand eines großen Rechtecks liegt, symbolisiert ein Übergangsintervall, in welchem ein Zustandsübergang erfolgen kann.

Da das Ablaufdiagramm acht unterschiedliche Zustände des Steuerautomaten verlangt, benötigt man im Falle einer Schaltwerksrealisierung drei Flipflops zur Speicherung des Steuerwerkszustands. In Bild 20 ist eine mögliche Codierung der Steuerzustände eingetragen. Der Einfluß der asynchronen Ereignisse auf diese Zustandskodierung wird weiter unten diskutiert.

Man nehme an, der Fahrstuhl stehe im dritten Stock mit offener Tür, im gesamten System liege kein einziger Wunsch vor, und der Steuerautomat befinde sich im Zustand 000. Dann wird sich an der Zustandssituation so lange nichts ändern, bis irgendwo ein Wunsch durch Drücken eines Knopfes zum Ausdruck gebracht wird. Wenn nun mindestens ein Wunsch-Flipflop im gesamten

(ausklappbar am Ende dieser Schrift)

Bild 20 Getakteter Steuerablauf zum Fahrstuhlssystem in Bild 16

System auf Eins gekippt ist, dann liegt eine der vier Situationen vor, die zum Verlassen des Steuerzustands 000 führen. Die eine Situation ist gegeben, wenn es nur Bedarf für eine Abwärtsfahrt gibt; dann wird selbstverständlich diese Abwärtsfahrt ausgeführt. Die zweite Möglichkeit besteht darin, daß nur Bedarf für eine Aufwärtsfahrt besteht; dann wird selbstverständlich diese Aufwärtsfahrt begonnen. Es kann aber auch sein, daß gleichzeitig aus dem ersten Stock und dem fünften Stock der Fahrstuhl gerufen wird. In diesem Fall muß entschieden werden, ob der Aufwärtsfahrt oder der Abwärtsfahrt die Priorität gegeben werden soll. Die Entscheidung wird gefällt aufgrund der aktuellen Stellung des Richtungsgedächtnisses. Falls dieses im Konfliktfalle auf abwärts steht, dann wird abwärts gefahren, andernfalls aufwärts.

Die Konfliktentscheidung mittels eines Richtungsgedächtnisses ist das einzig Interessante am Fahrstuhlalgorithmus; alles andere ist trivial. Dadurch, daß man immer derjenigen Richtung, in die man zuletzt gefahren ist, im Falle des Konflikts die Priorität gibt, wird vermieden, daß irgend jemand auf einem Stockwerk extrem lange warten muß, weil der Fahrstuhl dauernd über ihm oder unter ihm hin und her fährt.

Wenn der Zustand 000 verlassen wird, wird die Entscheidung, in welche Richtung gefahren werden soll, im Richtungsgedächtnis festgehalten. Im gleichen Takt wird auch noch der Schließauftrag an die Türsteuerung gegeben. Nach diesem Takt befindet sich der Steuerautomat im Zustand 001, und in diesem Zustand wartet er darauf, daß ihm die Türsteuerung das Geschlossenein der Tür anzeigt.

Sobald die Tür geschlossen ist, geht der Steuerautomat in den Zustand 011 und von dort im nächsten Takt gleich weiter in den Zustand 100. Bei diesem Übergang erfolgt eine Ausgabe in Abhängigkeit von der zuvor festgehaltenen Richtungsentscheidung. In dem einen Fall erhält die Motorsteuerung einen Startauftrag für Abwärtsfahrt und gleichzeitig wird das Abwärtswunsch-Flipflop desjenigen Stockwerks zurückgesetzt, von dem der Fahrstuhl nun abfahren wird. Im anderen Fall erhält die Motorsteuerung einen Startauftrag für Aufwärtsfahrt, und es wird entsprechend das Flipflop für Aufwärtswunsch zurückgesetzt. Anschließend befindet sich der Steuerautomat im Zustand 100, und in diesem Zustand verweilt er solange, bis ein Bremsbedarf gemeldet wird.

Mit dem Auftreten des Bremsbedarfs geht der Steuerautomat in den Zustand 101 über, und im anschließenden Taktschritt erteilt er der Motorsteuerung einen Bremsauftrag. Im anschließenden Zustand 110 wartet das Zentralsteuerwerk auf die Anzeige der Motorsteuerung, daß der Motor steht. Wenn die Zentralsteuerung erkennt, daß der Motor steht, geht sie in den Zustand 111 über. In dem zugehörigen Taktschritt wird das Zielwunsch-Flipflop des erreichten Stockwerks zurückgesetzt, und an die Türsteuerung wird ein Öffnungsauftrag gegeben. Im anschließenden Zustand 010 wartet das Zentralsteuerwerk darauf, daß die Türsteuerung den Zustand geöffnet anzeigt. In diesem Falle wird der Zustand 000 wieder erreicht.

Während der Fahrt des Fahrstuhls konnten selbstverständlich sehr viele Knöpfe innerhalb der Kabine und auf den verschiedenen Stockwerken gedrückt worden sein. Alle diese Wünsche wurden in den Flipflops der Operationsschaltwerke festgehalten. Sie werden aber nun erst, nachdem das Steuerwerk wieder im Zustand 000 ist, von der Steuerung ausgewertet. Das Zentralsteuerwerk braucht sich offensichtlich nur um den sequentiellen Prozeß einer einzigen Fahrstuhlfahrt zu kümmern; alles andere wird ohne Zutun des Zentralsteuerwerks im Operationssystem erle-

digt. Diese elegante Verteilung der Aufgaben ist eine unmittelbare Konsequenz des in den Bildern 13 und 15 dargestellten Steuerkreismodells. Dieses Modell hat den Entwickler der Steuerung derart gelenkt, daß er seine Steuerung in ein Zentralsteuerwerk und ein Operationssystem unterteilt hat.

Es wurde schon gesagt, daß die Codierung der Steuerwerkszustände im betrachteten Falle durch die Asynchronität bestimmter Ereignisse beeinflußt wurde. Das sog. Asynchronitätsproblem bei getakteten Schaltwerken ist gegeben, wenn man damit rechnen muß, daß Wertsprünge bei abzutastenden Binärsignalen zum Zeitpunkt der Abtastung auftreten. Das Asynchronitätsproblem wird dadurch gelöst, daß man jedem abzutastenden Binärsignal jeweils pro Abtastzeitpunkt eindeutig ein Flipflop zuordnet, in welchem das Abtastergebnis festzuhalten ist. Falls das abzutastende Binärsignal genau zum Zeitpunkt der Abtastung einen Wertsprung hat, kann nicht vorhergesagt werden, welchen Binärwert das Flipflop nach der Abtastung gespeichert haben wird; man kann aber immer davon ausgehen, daß das Flipflop nach der Abtastung einen der beiden möglichen Binärzustände eingenommen haben wird.

Im konkreten Falle des Zentralsteuerwerks für die Fahrstuhlsteuerung sind es vier Binärsignale, deren Wertsprünge unabhängig von der zeitlichen Lage der Takt Ereignisse auftreten können. Es sind dies (1) die Anzeige, ob die Tür vollständig geschlossen ist, (2) die Anzeige, ob die Tür vollständig geöffnet ist, (3) die Anzeige, ob der Motor steht und (4) der Ausgang des Bremsbedarfschaltnetzes. Überall dort, wo im Ablaufdiagramm in Bild 20 eines dieser Signale abgefragt wird, muß eindeutig festgelegt sein, in welcher der drei Binärstellen des Steuerzustandswortes das Abtastergebnis für dieses Binärsignal aufgefangen werden soll. Man betrachte hierzu die Abfrage, ob die Tür vollständig geschlossen ist. Diese Abfrage erfolgt im Zustand 001. Als Flipflop zum Auffangen des Abtastergebnisses ist offensichtlich das mittlere der drei Flipflops des Steuerzustandsregisters festgelegt, denn wenn die Tür geschlossen ist, springt der Steuerzustand aufgrund der Abtastung von 001 auf 011.

Wenn auf den Bremsbedarf gewartet wird, ist das rechte der drei Flipflops zum Auffangen des Abtastergebnisses vorgesehen; ein aufgetretener Bremsbedarf wird dadurch erkannt, daß der Steuerzustand von 100 nach 101 springt.

Das rechte Flipflop dient auch dazu, das Abtastergebnis der Motorsteuerungsanzeige aufzunehmen. Solange diese Anzeige bei Abtastung als Null erkannt wird, bleibt der Steuerzustand 110 erhalten, und wenn dann bei Abtastung dieser Anzeige das erste Mal eine Eins erkannt wird, springt der Steuerzustand auf 111.

Als viertes abzutastendes asynchrones Binärsignal wird die Anzeige betrachtet, die angibt, ob die Türe vollständig geschlossen ist oder noch nicht. Diese Abtastung erfolgt im Zustand 010. Als Flipflop zum Auffangen des Abtastergebnisses ist das mittlere Flipflop vorgesehen. Dieses Flipflop bleibt solange auf 1 stehen, bis bei der Abtastung der Anzeige erkannt wird, daß die Türe vollständig geöffnet ist. In diesem Fall kippt das mittlere Flipflop auf 0, was bedeutet, daß der Steuerzustand von 010 nach 000 übergeht.

Nun soll die bisher noch offengelassene Frage beantwortet werden, welche Teile des Operationssystems in den Bildern 16 und 19 dem Operationsautomaten gemäß Bild 15 zuzurechnen sind und welche Teile als Ankopplungskomponenten betrachtet werden müssen.

Da die Taktversorgung nur für den Steuerkreis gilt, müssen sämtliche getakteten Flipflops des Operationssystems dem Operationsautomaten zugerechnet werden. Nach Bild 19 sind dies jeweils die drei Wunsch-Flipflops pro Stockwerk und das Flipflop für das Richtungsgedächtnis. Die stockwerksbezogenen Positions-Flipflops dagegen dürfen nicht dem Steuerkreis zugerechnet werden, weil diese Flipflops nicht getaktet sind. Die Triggerung dieser Flipflops geschieht ja unmittelbar durch die Ereignisse, welche über die Intervallkontakte gemeldet werden. Diese Flipflops samt ihrem jeweiligen Ansteuerschaltnetz müssen als Ereignisfängerautomaten aufgefaßt werden, die in der Komponente zur Eingabeankopplung sitzen. Man hätte diese Positions-Flipflops durchaus takten können; dann hätte man sie dem Operationsautomaten zuordnen müssen. Die Entscheidung, ob diese Positions-Flipflops getaktet werden oder ohne Takt direkt durch externe Ereignisse getriggert werden sollen, steht im Ermessen des Systementwicklers. Es gibt in diesem Fall keine zwingenden Gründe, die Entscheidung in der einen oder der anderen Richtung zu fällen.

Das Beispiel der ungetakteten Positions-Flipflops zeigt die Möglichkeit, in der Komponente zur Eingabeankopplung auch dann Ereignisfängerautomaten einzusetzen, wenn die Ereignisse nicht nebenläufig auftreten. Im Falle der von den Intervallkontakten gemeldeten Ereignisse gibt es ja keine Nebenläufigkeit; trotzdem ist es möglich und sinnvoll, diese Ereignisse in einem ungetakteten Flipflop aufzufangen.

Die Art und Weise, wie die Intervallkontaktsignale nach Bild 19 ausgewertet werden, verdeutlicht eine Möglichkeit, auf die bisher noch nicht hingewiesen wurde. Man sieht in Bild 19, daß die Intervallkontaktsignale nicht nur das Positions-Flipflop triggern, sondern auch als Eingangssignale für das Schaltnetz zur Bestimmung des Bremsbedarfs benutzt werden. Da der Bremsbedarf ein durch den Takt abgetastetes Signal ist, wie man im Ablauf in Bild 20 sieht, werden also die Intervallkontaktsignale im vorliegenden Steuerungsentwurf sowohl zur Triggerung benutzt als auch durch Abtastung ausgewertet. Im allgemeinen Steuerkreismodell in Bild 13 bzw. 15 darf es somit vorkommen, daß es für ein und dasselbe Signal sowohl einen Kanal in X_T , *extern* als auch einen Kanal in X_S , *extern* gibt.

Es wurde schon gesagt, daß man die Verknüpfungsglieder zur Ansteuerung der Positions-Flipflops der Komponente zur Eingabeankopplung zurechnen muß. Alle anderen Verknüpfungsglieder in Bild 19 sind dem Operationsautomaten zuzurechnen.

Obwohl es keine praktische Bedeutung hat, kann man nach der Menge der potentiellen Zustände des Operationsautomaten oder auch der gesamten Steuerung fragen. Zum Operationsautomaten gehören sämtliche getakteten Flipflops in Bild 19, also $5 * 3 + 1 = 16$ Flipflops. Da alle Belegungskombinationen dieser Flipflops vorkommen können, hat die Menge der potentiellen Zustände des Operationsautomaten die Mächtigkeit 2^{16} . Diese große Zustandszahl hat aber keinen Einfluß auf die Komplexität des Entwurfs. Denn man braucht die Zustandsmenge des Operationsautomaten ja nicht explizit aufzuzählen, sondern sie kommt nur implizit in Form von Zustandsvariablen bei der Beschreibung der möglichen Operationsschritte vor.

3.2 Realisierung mit einem extern getriggerten Steuerkreis

Zu der Realisierung der Steuerung mit einem getakteten Steuerkreis aus Schaltwerken, wie sie im vorangegangenen Abschnitt 3.1 dargestellt ist, gehört das in Bild 15 gezeigte Steuerkreismodell. Nun kann man aber selbstverständlich die Steuerung auch gemäß dem in Bild 13 dargestellten Steuerkreismodell realisieren. Dieses Modell verlangt eine Partitionierung der Kanäle für triggernde Eingaben $X_{T, \text{extern}}$ in zwei Teilmengen, wobei die Partitionierung durch die Frage nach der möglichen Nebenläufigkeit von Ereignissen auf diesen Kanälen entschieden wird (s. Bild 9).

Im vorliegenden Falle der Fahrstuhlsteuerung erkennt man leicht, daß Nebenläufigkeit nur bei den Wunschereignissen möglich ist. Das Auftreten der Wunschereignisse ist keinerlei kausalen Zwängen unterworfen, denn zu jedem Zeitpunkt ist es möglich, durch Drücken eines Knopfes in der Kabine oder auf einem Stockwerk einen Wunsch zu äußern. Alle anderen Ereignisse sind kausal in eine Sequenz gezwungen. Die Motorsteuerung wird keine Stopmeldung bringen, wenn ihr nicht zuvor ein Bremsauftrag erteilt wurde. Die Türsteuerung wird keine Geöffnetmeldung bringen, wenn ihr nicht zuvor ein Öffnungsauftrag erteilt wurde, und in entsprechender Weise wird sie keine Geschlossenmeldung bringen, wenn ihr nicht zuvor ein Schließauftrag erteilt wurde. Da die Aufträge an die Tür nur bei stehendem Fahrstuhl erteilt werden, können die Meldungen der Türsteuerung nicht mit Meldungen der Intervallkontakte oder der Motorsteuerung kollidieren. Auch die Stopmeldung der Motorsteuerung kann nicht mit den Meldungen der Intervallkontakte kollidieren. Und schließlich ist es nicht möglich, daß von mehreren Intervallkontakten nebenläufig Meldungen geschickt werden, denn die Kabine kann sich zu einem Zeitpunkt immer nur an einem bestimmten Ort befinden.

Wenn man nun gemäß dem in Bild 9 gezeigten Modell die Wunschereignisse wegen der möglichen Nebenläufigkeit mit Hilfe von Wandlerautomaten in abzutastende Signale umwandelt, dann ergibt sich für den zentralen Automaten ein Triggerungsproblem. Man stelle sich vor, die Kabine stehe mit geöffneter Tür im dritten Stock, und es liege kein einziger Wunsch vor. In diesem Fall ist es das nächste auftretende Wunschereignis, welches einen Bewegungsprozeß des Fahrstuhles auslösen müßte. Die Wunschereignisse sind aber modellgemäß in abzutastende Signale umgewandelt worden, so daß sie bezüglich des zentralen Automaten gar keine triggernde Wirkung haben können. Deshalb muß für diesen Fall eine Ereignisrückkopplung realisiert sein, damit eine Abtastung erfolgen kann. Man betrachte hierzu die Aufbaustruktur in Bild 21. Man sieht, daß zur Menge der Kanäle $X_{T, \text{intern}}$ nicht nur die Kanäle der Intervallkontakte sowie die Meldekanäle der Motorsteuerung und der Türsteuerung gehören, sondern daß es auch noch einen Kanal für einen Abtasttakt gibt, der über eine Rückkopplungsverbindung versorgt wird. Die Funktion des zentralen Automaten muß derart sein, daß er nur dann einen Abtastauftrag ausgibt, wenn er sicher sein kann, daß in der aktuellen Situation des Gesamtsystems in $X_{T, \text{intern}}$ kein anderes triggerndes Ereignis auftreten kann.

Das Verhalten des zentralen Automaten in Bild 21 wird durch den Zustandsgraphen in Bild 22 beschrieben. Die in diesem Graphen vorkommenden fünf Wartezustände kann man sich als Zustände des Steuerautomaten vorstellen, der eine Komponente des zentralen Automaten ist. Gemäß dem in Bild 13 gezeigten Modell besteht ja der zentrale Automat aus einem Steuerautomaten und einem Operationsautomaten zusammensetzt.

Die Operationsschritte, die den Operationsautomaten charakterisieren, findet man in Bild 22 jeweils im rechten Teil der Transitionen, denn die dort eingetragenen Ausgaben des Steuerautomaten sind ja nichts anderes als Festlegungen bestimmter Operationsschritte. Aus diesen Operationsschritten folgt für den aktuellen Fall, daß der Operationsautomat einerseits das Flipflop für das Richtungsgedächtnis und andererseits die Positions-Flipflops für die verschiedenen Stockwerke enthalten muß. Andere Speicherzellen enthält der Operationsautomat nicht, denn die ebenfalls in den Ausgabefeldern der Transitionen in Bild 22 angesprochenen Wunsch-Flipflops gehören ja nach Bild 21 zur Ankoppelkomponente.

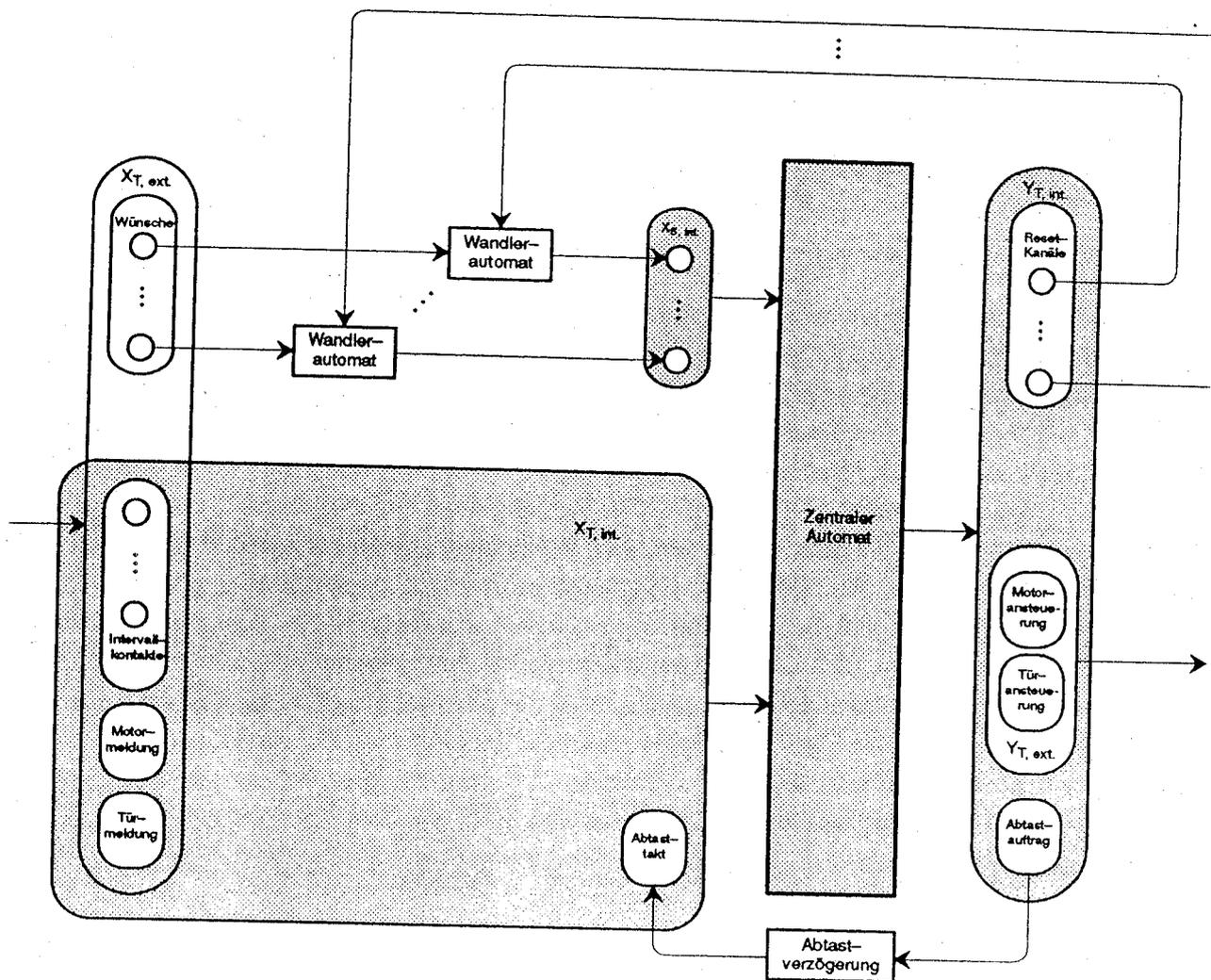


Bild 21 Blockstruktur der Fahrstuhlsteuerung für den Fall der externen Triggerung

Obwohl der Steuerablauf in Bild 22 fünf Steuerzustände enthält, muß der Steuerautomat in der tatsächlichen Realisierung keine fünf Zustände enthalten. Man kann nämlich alle fünf Zustände zu einem einzigen Zustand verschmelzen. Dies erkennt man in Bild 22 daran, daß den fünf Zuständen umkehrbar eindeutig fünf Eingabeereignistypen zugeordnet sind, denn in jedem Zustand können jeweils nur Eingabeereignisse eines bestimmten Typs auftreten. So ist es beispielsweise im Zustand 3 garantiert, daß nur eine Intervallkontaktmeldung auftreten kann; weder ein Abtastereignis noch eine Geschlossenmeldung oder eine Stopmeldung oder eine Geöffnetmeldung sind in diesem Zustand möglich. Wenn man die Zahl der Steuerzustände auf einen einzigen reduziert, degeneriert der Steuerautomat zu einem reinen Zuordner. Bei einem Zuordner wird einer Eingabe bestimmten Typs jeweils die gleiche Ausgabe zugeordnet unabhängig davon, in welcher Phase des Eingabeprozesses die aktuelle Eingabe erfolgt.

Literatur

- [WE 70] Wendt, S.: Eine Methode zum Entwurf komplexer Schaltwerke unter Verwendung spezieller Ablaufdiagramme. Elektron. Rechenanlagen 12 (1970), H. 6, S. 314–323.
- [WE 74] Wendt, S.: Entwurf komplexer Schaltwerke. Springer, Berlin, 1974.
- [ST 82] Steinbuch, K., Rupprecht, W. (Hrsg.): Nachrichtentechnik, 3. Auflage. Band III: Nachrichtenverarbeitung (Autor: S. Wendt). Springer, Berlin, 1982.
- [WE 91] Wendt, S.: Nichtphysikalische Grundlagen der Informationstechnik, 2. Auflage. Springer, Berlin, 1991.

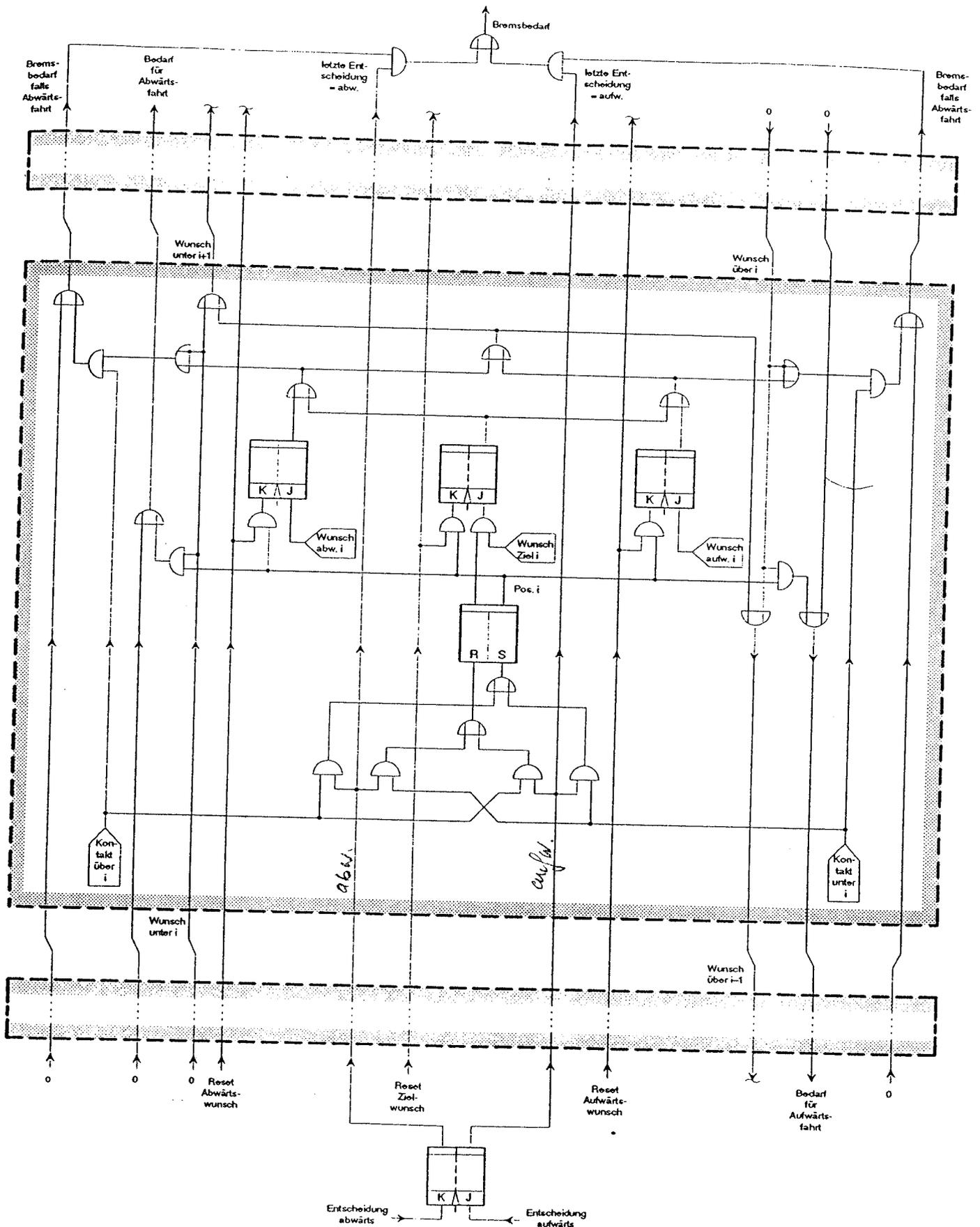


Bild 19 Aufbau eines stockwerksbezogenen Operationsschaltwerks und seine Einbindung in das Fahrstuhlssystem in Bild 16

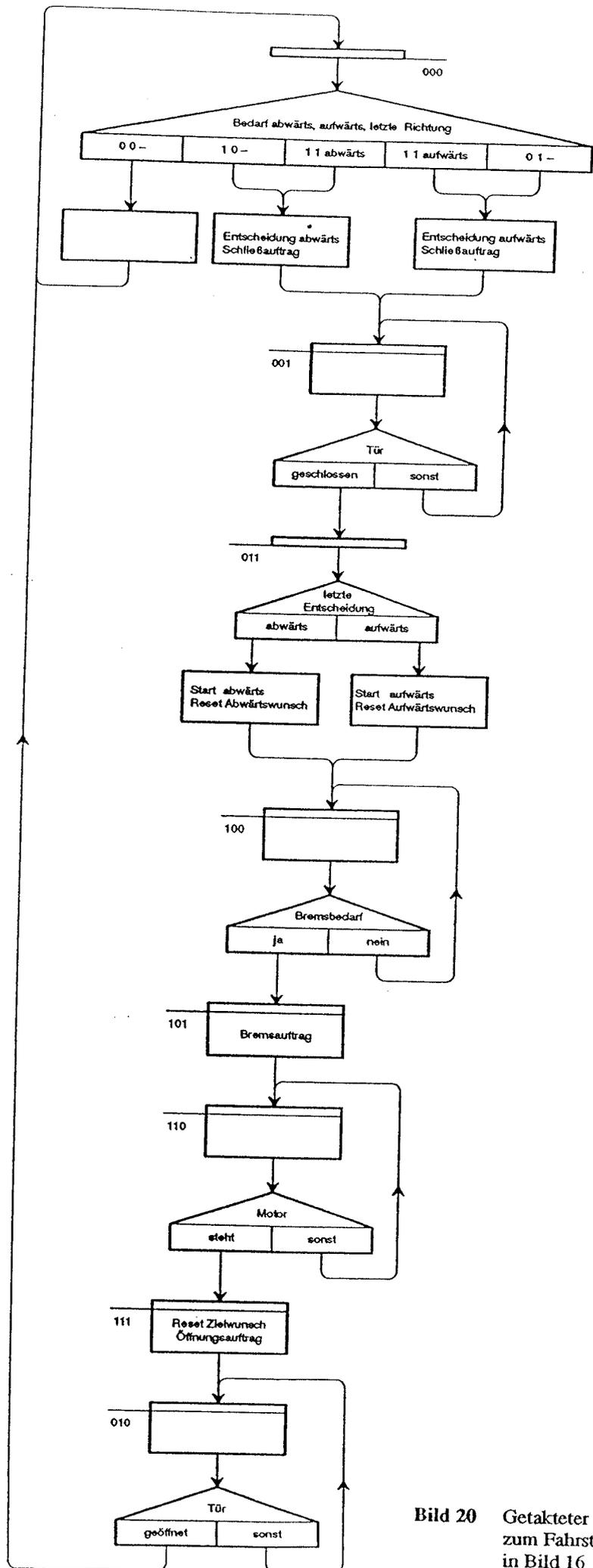


Bild 20 Getakteter Steuerablauf zum Fahrstuhlssystem in Bild 16