<table>
<tr><td colspan="2">Nur zum internen Gebrauch bestimmt</td></tr>
<tr><td>Ministerium
für Elektrotechnik
und Elektronik</td><td rowspan="2">Herausgeber: Ingenieurschule für Maschinenbau und Elektrotechnik Berlin

Lehrgebiet: Digitale Schaltungstechnik</td></tr>
<tr><td>Blatt-Nr. 1 ...40</td></tr>
</table>

Arbeitsblätter

für die Ingenieurausbildung

Struktur und Steuerungsprinzipe sequentieller Schaltungen

Veröffentlicht:

Institut für Rationalisierung der Elektrotechnik/Elektronik
Zentralstelle für Aus- und Weiterbildung
Dresden

Die Arbeitsblätter wurden erarbeitet
von

Dipl.-Ing. Günther Koß

Verwendete und weiterführende Literatur:

/1/ Stürz, H.; Cimander, W.: Logischer Entwurf digitaler Schaltungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1976.

/2/ Philippow, E.: Taschenbuch Elektrotechnik in sechs Bänden, Bd. 2. Grundlagen der Informationstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1977, S. 650-689

/3/ Unger, S.H.; Asynchronous sequential switching circuits. Übersetzung ins Russische. Moskau: Verlag Nauka 1977

Druckgenehmigungs-Nr.: Ag 682/062/80
Druck und Herstellung: Druckkombinat Berlin 204
Redaktionsschluß : 30.03.1980
Bestell-Nr. : T.2.22.0044

Inhaltsverzeichnis

1. Begriff und Struktur sequentieller Schaltungen

1.1. Begriff der sequentiellen Schaltung

Zur Erkennung des Wesens der sequentiellen Schaltung oder Folgeschaltung erinnern wir uns zunächst des Begriffs der kombinatorischen Schaltung (Lehrbrief 1, Pkt. 4.1.):

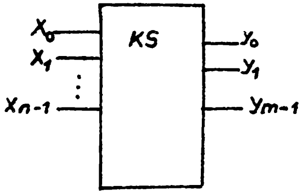


Bild 1 Kombinatorische Schaltung

Eine kombinatorische Schaltung ist ein Schaltnetzwerk, bei dem einem bestimmten Eingangszustand

$$X_i = [x_{n-1}, \ldots, x_1, x_0]$$

eindeutig ein Ausgangszustand

$$Y_i = [y_{m-1}, \ldots, y_1, y_0]$$

zugeordnet ist (Bild 1).

Wir betrachten jetzt zwei Beispiele, die der Begriffsdefinition der kombinatorischen Schaltungen nicht entsprechen.

1. Beispiel:

Ein Schaltnetzwerk mit einer Eingangsvariablen x und einer Ausgangsvariablen z soll so arbeiten, daß z bei jedem zweiten Eingangsimpuls (x = 1) den Wert 1 annimmt und sonst den Wert 0 hat (Bild 2).

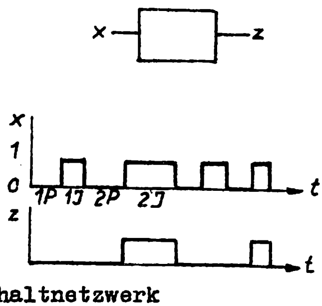


Bild 2 Schaltnetzwerk und sein Impulsdiagramm

Wir erkennen: Dieser Typ eines Schaltnetzwerkes hat keine eindeutige Zuordnung des Ausgangswertes z zum Eingangswert x.

Denn für x = 1 ist der Ausgang im 1. Fall z = 0 und im 2. Fall z = 1.

Wir müssen also die Frage beantworten, wodurch denn der Wert des Ausgangs z bestimmt wird.
In unserem Beispiel soll der Ausgang z mit jedem zweiten Eingangsimpuls den Wert 1 annehmen. D.h., ein bestimmter Ausgangszustand wird erst nach Anliegen einer bestimmten Folge von Eingangswerten (Eingangszuständen) erreicht; in unserem Fall lautet die Folge "1. Pause (1 P)","1. Impuls (1 I)", "2. Pause (2 P)", "2. Impuls (2 I)".

Wir erkennen: Der Ausgangszustand unseres Schaltnetzwerkes wird durch eine bestimmte Folge von Eingangzuständen bestimmt.

In unserem Beispiel nimmt der Ausgang den Zustand z = 1 mit dem Anliegen des 2. Impulses an. Damit das möglich ist, muß in der Schaltung irgendwie "notiert" sein, daß "1 P", "1 I" und "2 P" bereits angelegen haben. Dieses "Notieren" oder "Merken" der bereits abgelaufenen Folge der Eingangszustände müßte offenbar im Innern der Schaltung durch Annehmen bestimmter binärer Signalkombinationen erfolgen. In Anlehnung an die Begriffe "Eingangszustand" und "Ausgangszustand" könnte man die innere Signalkombination auch den <u>inneren Zustand</u> der Schaltung nennen.

<u>2. Beispiel:</u>

Ein Schaltnetzwerk soll die Funktion eines Speichers für ein Bit übernehmen. Ein solcher Elementarspeicher muß die grundsätzlichen Funktionen
- Einschreiben einer logischen 1 ("Setzen"),
- Einschreiben einer logischen 0 ("Rücksetzen", "Löschen") und
- Speichern einer logischen 0 oder 1 ("Speichern")

erfüllen.

Das Schaltnetzwerk besitzt einen Setzeingang s und einen Rücksetzeingang r. Der jeweilige Speicherzustand (d.h. sein Inhalt)

Bild 3 Elementarspeicher

wird durch den Ausgang z dargestellt (Bild 3).
Der Eingangszustand ist also X = [r, s] und der Ausgangszustand lautet Z = [z]. Die zu realisierende konkrete Funktionsweise ist in Tab. 1 angegeben. Mit dem Eingangssignal s = 1 (und r = 0) wird das Schaltnetzwerk auf z = 1 gesetzt. Mit r = 1 (und s = 0) erfolgt seine Rücksetzung auf z = 0.
Wenn weder ein Setz- noch ein Rücksetzbefehl am Eingang liegt, d.h. X = [0, 0], dann soll der Ausgang den beim vorherigen Eingangssignal (rücksetzen oder setzen) erreichten Zustand beibehalten (speichern).

Eingangszustand verbal	X: r	X: s	Ausgangszustand z
Einschreiben einer "1" (Setzen)	0	1	1
Einschreiben einer "0" (Rücksetzen)	1	0	0
kein Setz- o. Rücksetzbefehl (Speichern)	0	0	0 oder 1

Tab. 1 Funktionen eines Elementarspeichers

Wir erkennen auch für dieses 2. Beispiel:

Für das zu entwerfende Schaltnetzwerk gibt es mindestens in einem Falle (letzte Zeile der Tab. 1) keine eindeutige Zuordnung des Ausgangszustandes Z = [z] zum Eingangszustand X = [r, s] . Die Aufgabenstellung kann daher <u>nicht</u> mit einem kombinatorischen Schaltnetzwerk befriedigt werden.

Wir fragen, wodurch denn bei Anliegen von X = [0, 0] der Ausgangswert z = 1 oder z = 0 bestimmt wird.
Die Antwort lautet natürlich, daß z = 1 durch einen <u>vorherigen</u> Setzbefehl X = [0, 1] und z = 0 durch einen <u>vorherigen</u> Rücksetzbefehl X = [1, 0] bestimmt wird.

D.h. die Eingangs-Zustands-Folge 0 1
0 0 ergibt z = 1

und die Folge 1 0
0 0 ergibt z = 0 .

Wir erkennen wie im 1. Beispiel:

Der Ausgangszustand des Schaltnetzwerkes wird durch eine bestimmte Folge von Eingangszuständen bestimmt.

Solche Schaltungen heißen Folgeschaltungen oder sequentielle Schaltungen (sequor, lat.: folgen).
Wie für das 1. Beispiel gilt auch hier die Forderung, daß das Schaltnetzwerk über ein inneres Gedächtnis verfügen muß, mit dessen Hilfe es sich die bisherige Folge der Eingangszustände (hier speziell nur des vorherigen Eingangszustandes erforderlich) merken kann, um auf den Eingangszustand $X = [0, 0]$ mit dem jeweils erforderlichen Ausgangszustand Z reagieren zu können.

Wir fassen unsere bisherigen Erkenntnisse zusammen:

- Wenn in der Funktion eines Schaltnetzwerkes jedem Eingangszustand
  $$X = [x_{n-1}, \ldots, x_1, x_0]$$
  nicht eindeutig ein Ausgangszustand
  $$Z = [z_{e-1}, \ldots, z_1\ z_0]$$
  zugeordnet ist, kann diese Funktion nicht als kombinatorische Schaltung, sondern muß sie als Folge- oder sequentielle Schaltung (SS) realisiert werden (Bild 4).

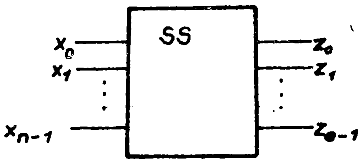


Bild 4

- Der Ausgangszustand Z einer sequentiellen Schaltung hängt nicht nur vom jeweiligen Eingangszustand X ab, sondern auch von der bisherigen Folge der Eingangszustände.
- Eine sequentielle Schaltung muß also beim Anliegen eines neuen Eingangszustandes über den auszugebenden Ausgangszustand entscheiden, indem sie die "gemerkte" vorherige Eingangs-Zustandsfolge berücksichtigt. Sie besitzt daher die Fähigkeit des "Merkens" bisheriger Eingangs-Zustände, d.h. sie hat in einer noch zu überlegenden Weise Speicherverhalten.
- Das "Merken" oder "Speichern" der Eingangszustandsfolge kann in der Schaltung nur in Form bestimmter binärer Signalkombinationen erfolgen. Man nennt sie den inneren Zustand.

1.2. Struktur einer sequentiellen Schaltung

Wir stellen die Frage nach der grundsätzlich notwendigen inneren Struktur einer sequentiellen Schaltung. D.h., wir wollen den Block SS des Bildes 4 weiter untergliedern. Die Antwort ergeben bereits unsere bisherigen Überlegungen. Die sequentielle Schaltung SS gliedert sich in (siehe Bild 5)

- eine Teilschaltung I zum Merken der bisherigen Folge der Eingangszustände (innerer Zustand Y) und in
- eine Teilschaltung II zur Bildung des Ausgangszustandes Z aus
  a) der gemerkten bisherigen Folge der Eingangszustände, d.h. dem inneren Zustand Y und
  b) dem neuen Eingangszustand X

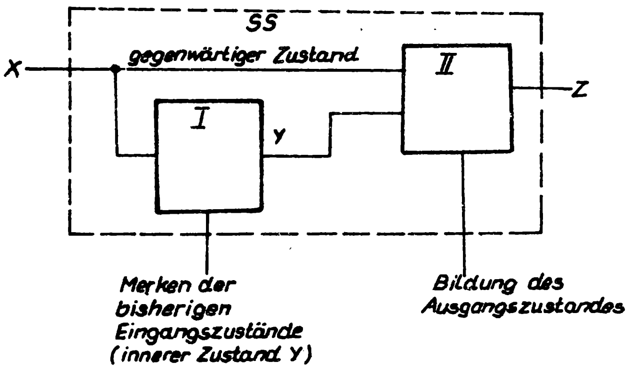


Bild 5 Sequentielle Schaltung (Mealy-Struktur)

Der strukturelle Aufbau einer sequentiellen Schaltung kann gegenüber der in Bild 5 dargestellten (sog. Mealy-Struktur) mit gleichem Recht auch etwas anders gedacht werden (Bild 6). Danach besteht die Struktur

- aus einer Teilschaltung I zum Merken der bisherigen Folge der Eingangszustände <u>einschließlich des gegenwärtigen, aktuellen Eingangszustandes</u> (Bildung des inneren Zustandes Y) und
- aus einer Teilschaltung II zur Bildung des Ausgangszustandes Z aus dem erreichten inneren Zustand Y.

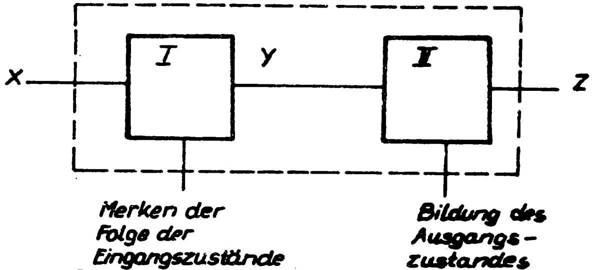


Bild 6 Sequentielle Schaltung (Moore-Struktur)

Diese Struktur heißt in der Automatentheorie auch Moore-Struktur.
Zum weiteren Kennenlernen der sequentiellen Schaltung überlegen wir, in welcher Weise das Merken, d.h. das Speichern der Eingangszustandsfolgen konkret erfolgen und wie daraus der Ausgangszustand gebildet werden kann.

1.2.1. Innerer Zustand

Wir haben festgestellt, daß die bisherige Folge der Eingangszustände (einschl. dem gegenwärtigen Eingangszustand)[x)] durch einen bestimmten inneren Zustand in der Schaltung gespeichert werden muß. Der innere Zustand wird durch eine bestimmte Anzahl von binären Signalvariablen (schaltungstechnisch von Signalen auf einer entsprechenden Anzahl von Leitungen) gebildet:

$$Y = [y_{m-1}, \ldots, y_1, y_0]$$

Die Anzahl der inneren Signalvariablen y_i $(i = 0, 1, \ldots, m-1)$ hängt natürlich davon ab, wieviele verschiedene innere Zustände gebildet werden müssen.
Wir überlegen das konkret an unserem 1. Beispiel (Bild 2).
Wir gehen davon aus, daß die Schaltung mit Beginn der 1. Pause "1 P" (d.h. $x = 0$) einen inneren Zustand eingenommen hat, den wir Y_0 nennen wollen. Der folgende Eingangszustand, der 1. Impuls "1 I" (d.h. $x = 1$) wird in Form eines zweiten inneren Zustandes Y_1 gespeichert. Die 2. Pause (d.h. $x = 0$) ergibt einen Zustand Y_2, der 2. Impuls (d.h. $x = 1$) führt auf Y_3.

x) Wir beziehen uns in den weiteren Überlegungen auf die Moore-Struktur gemäß Bild 6

(Der Sinn des Durchlaufens der vier Zustände ist es ja, daß die Schaltung erst mit Erreichen des inneren Zustandes Y_3 den Wert z = 1 ausgibt!)

Diese vier inneren Zustände können durch zwei Signalvariable dargestellt werden:

$Y = [y_1, y_0]$ mit z.B. der <u>Kodierung</u>

$$
\begin{aligned}
Y_0 &= [0, 0] \\
Y_1 &= [0, 1] \\
Y_2 &= [1, 1] \\
Y_3 &= [1, 0]
\end{aligned}
$$

Die allgemeine Blockstruktur in Bild 6 könnten wir dann für dieses 1. Beispiel bereits etwas präzisieren und als Bild 7 angeben ($X = [x]$, $Y = [y_1, y_0]$, $Z = [z]$).

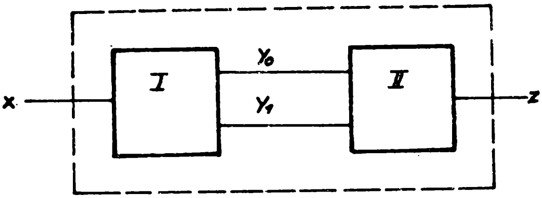
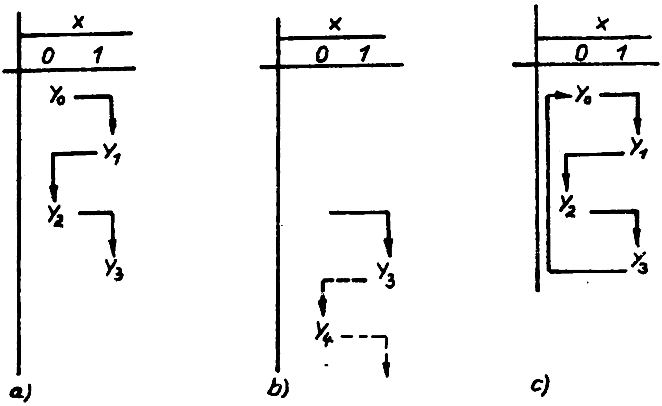


Bild 7 Blockbild zum 1. Beispiel

Die Erzeugung der inneren Zustände in Abhängigkeit von der Folge der Eingangszustände ist auch tabellarisch darstellbar (Tab. 2 a). Man könnte die



Tab. 2 Folge der inneren Zustände in Abhängigkeit von x

Tab. 2 a entsprechend fortsetzen (3. Pause ergibt Y_4, 3. Impuls ergibt Y_5 usw.) (Tab. 2 b).
Die 3. Pause ist jedoch bezüglich der Ausgangssituation der 1. Pause gleichwertig. Damit ist auch Y_4 mit Y_0 identisch, d.h. auf Y_3 folgt wieder Y_0 (Tab. 2 c).

In einer echten tabellarischen Schreibweise fehlen natürlich die in Tab. 2 zur Veranschaulichung der Übergänge von einem inneren Zustand in den folgenden angedeuteten Pfeile. Die reine Tabellendarstellung zeigt Tab. 3. Sie stellt das Zustandsverhalten des Blockes I der sequentiellen Schaltung (Bild 7) vollständig dar.

Bisheriger innerer Zustand	Eingangszustand $x = 0$	$x = 1$
Y_0	Y_0	Y_1
Y_1	Y_2	Y_1
Y_2	Y_2	Y_3
Y_3	Y_0	Y_3

Tab. 3 Überführungstabelle
(Schaltfolgetabelle)

Z.B. lesen wir aus Zeile 2 folgendes ab:

Ist der bisher erreichte Zustand Y_1, dann

- bleibt er weiterhin Y_1, wenn der Eingangszustand $x = 1$ ist, oder
- er geht in den Zustand Y_2 über, wenn der Eingangszustand $x = 0$ ist.

Die Verallgemeinerung der Überlegungen zu Tab. 2 und 3 bringt uns die folgende Erkenntnis:

> Der folgende innere Zustand hängt vom bisherigen inneren Zustand und vom Eingangszustand ab.

Dieser Zusammenhang lautet im mathematischen Ausdruck

$$Y^k = f\,(Y^{k-1}, x^k). \qquad (1)$$

Dabei ist

Y^k der zum Zeitpunkt t_k entstehende innere Zustand;
Y^{k-1} der vor dem Zeitpunkt t_k gewesene innere Zustand;
x^k der zum Zeitpunkt t_k existierende Eingangszustand.

Statt des "f" für "Funktion von ..." in Gl. (1) wird in der Literatur oft " " geschrieben:

$$Y^k = \delta(Y^{k-1}, X^k) \qquad (1a)$$

Da Tab. 3 ebenso wie Gl. (1) bzw. (1a) die Überführung des bisherigen in den folgenden inneren Zustand angeben, heißen sie auch <u>Überführungstabelle</u> (oder Schaltfolgetabelle) und Überführungsfunktion.

Nach dem jetzt erreichten Stand unserer Erkenntnis müssen das Bild 6 und Bild 7 weiter präzisiert werden. Denn innerhalb des Blockes I wirken ja lt. Gl. (1) als unabhängige Variable nicht nur der Eingangszustand, sondern auch der bisherige innere Zustand. Der bisherige, am Ausgang des Blockes I vorhandene Zustand Y^{k-1} wird auf den Eingang von Block I a zurückgeführt und ergibt nach logischer Verknüpfung mit dem Eingangszustand X^k den neuen Zustand Y^k am Ausgang von Block I (Bild 8 und 9).

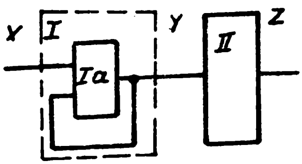


Bild 8 Blockbild, allg.

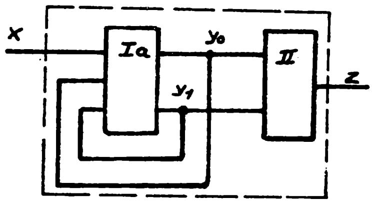


Bild 9 Blockbild zum 1. Beispiel

Diese in Gl. (1) und im Blockbild (Bild 8) sehr anschaulich zum Ausdruck kommende Rückführung des inneren Zustandes ist ein wesentliches Charakteristikum sequentieller Schaltungen.

Im nächsten Schritt ist die Frage zu beantworten, welchen schaltungstechnischen Inhalt denn der Block I a besitzt. Wir klären das wieder in Weiterführung unseres 1. Beispiels (Bild 9).

Der logische Inhalt des Blockes I a ist durch die Überführungsfunktion, Gl. (1 a), beschrieben. Danach und gemäß Bild 9 fungieren X und Y^{k-1} als Eingangsvariable und Y^k als Ausgangsvariable. Wir schreiben die Zuordnung von "Ausgangszustand"

$X = [x]$	$Y^{k-1} = [y_1, y_0]$		$Y^k = [y_1, y_0]$	
x^k	y_1^{k-1}	y_0^{k-1}	y_1^k	y_0^k
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
1	0	0	0	1
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Tab. 4 Überführungstabelle

und "Eingangszustand" des Blockes I a in der uns bekannten Form einer Schaltbelegungstabelle (Tab. 4). (Leiten Sie Tab. 4 selbständig aus Tab. 3 und der festgelegten Kodierung für Y_i ab!) Der Begriff "Schaltbelegungstabelle" wurde bei der Beschreibung kombinatorischer Schaltungen verwendet. Bei sequentiellen Schaltungen ergibt sich, wie wir erkannten, ein Teil der "Eingangsvariablen" aus der Rückführung der "Ausgangsvariablen". Zur Unterscheidung ist es üblich, Tab. 3 auch als Überführungstabelle zu bezeichnen. Das ist gerechtfertigt, da Tab. 4 die nur etwas anders angeordnete Tab. 3 ist, wobei für die Y_i die für unser Beispiel angenommene Kodierung eingesetzt wurde.

Die Bestimmung des konkreten logisch-schaltungstechnischen Inhalts des Blockes I a erfolgt nun mit den uns vom Entwurf kombinatorischer Schaltungen bekannten Methoden:
Aufstellen des Karnaugh-Plans, Auslesen der minimalen "Schaltfunktionen" für y_0 und y_1 und ggf. ihre Darstellung als Signalflußplan. Da der Begriff "Schaltfunktion" bereits den kombinatorischen Schaltungen zugeordnet ist, verwendet man hier den mit Gl. (1) bereits genannten Begriff "Überführungsfunktion".

y_0^k: (y_0^{k-1} über Spalten 2–3, x^k unter Spalten 3–4)

	0	0	1	1
y_1^{k-1}	0	0	1	1

y_1^k: (y_0^{k-1} über Spalten 2–3, x^k unter Spalten 3–4)

	0	1	0	0
y_1^{k-1}	1	0	1	1

Bild 10 Karnaughpläne

Die Karnaugh-Pläne in Bild 10 führen auf die Überführungsfunktion (als DNF) $y_0^k = x^k$ und $y_1^k = x^k\, y_1^{k-1} \vee y_1^{k-1}\, \overline{y_0^{k-1}} \vee \overline{x^k}\, \overline{y_1^{k-1}}\, y_0^{k-1}$

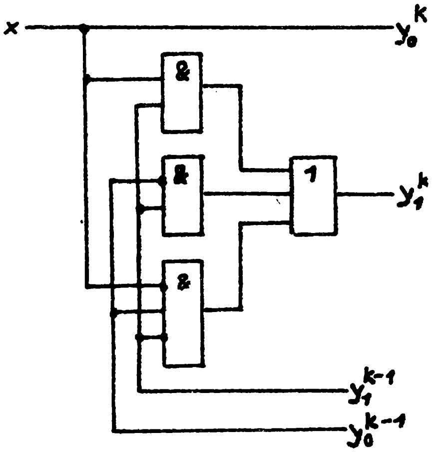


Bild 11 Signalflußplan

und damit auf den Signalflußplan in Bild 11.
Der Signalflußplan zeigt sehr anschaulich das Charakteristikum von Überführungsfunktionen, wonach der neue Zustand $Y^k = [y_1^k, y_0^k]$ außer aus $X^k = [x^k]$ aus dem bisherigen Zustand $Y^{k-1} = [y_1^{k-1}, y_0^{k-1}]$ gebildet wird. Um an den Ausgangsklemmen den neuen Zustand Y^k bilden zu können, muß also an den Eingängen der UND-Glieder der bisherige Zustand zur Verfügung stehen, und zwar mindestens so lange nach der Änderung des Eingangszustandes von X^{k-1} in X^k, wie die UND-Glieder für die notwendigen Umschaltungen benötigen. Daraus folgt die Notwendigkeit des Einfügens eines speichernden Elementes Sp (Bild 12).

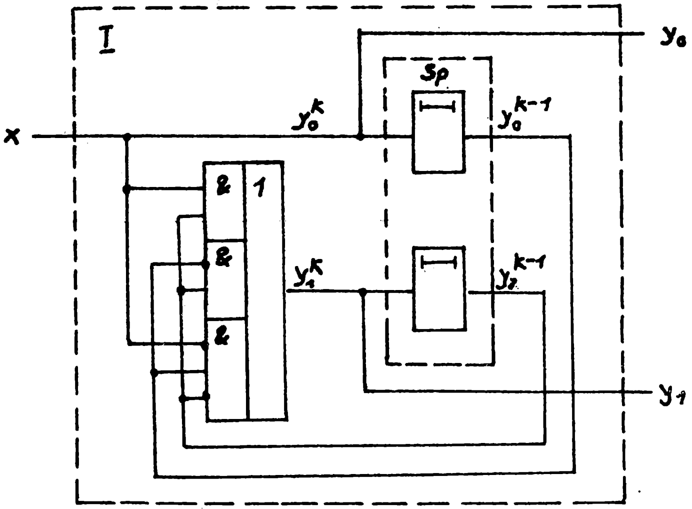


Bild 12 Signalflußplan aus Bild 11 mit Speicherblock Sp

Für unser Beispiel (Bild 12) ist der Speicher als Verzögerungsglied dargestellt. Die Verzögerungszeit ist die Speicherzeit für den bisherigen Zustand Y^{k-1}. Sie muß der Schaltverzögerungszeit der UND-Glieder entsprechen. In der praktischen Ausführung kann der Speicher Sp gebildet werden durch z.B.

- zeitverzögernde RC-Glieder,
- Wiederholglieder ($y = x$) bzw. eine Kettenschaltung zweier Negatoren mit entsprechender Schaltverzögerungszeit,
- ggf. reicht bereits die Schaltverzögerungszeit der logischen Glieder aus, so daß das Verzögerungsglied für y_1 in der realen Schaltung gar nicht benötigt wird,
- Einsatz eines speichernden Schaltnetzwerkes.

Die Bestimmung der notwendigen Eigenschaften des Speichers Sp ist in Abhängigkeit von der jeweiligen sequentiellen Schaltung theoretisch relativ kompliziert. Sie hängt u.a. mit dem Auftreten von Signal-Wettläufen zusammen. Wir werden uns daher später auf einen speziellen Schaltungstyp, die sog. <u>synchrone sequentielle Schaltung</u> (s. Pkt. 2.2.) beschränken, bei deren Entwurf diese Schwierigkeiten weitgehend entfallen.

Wir fassen unsere Erkenntnisse über die Notwendigkeit, Bildung und Realisierung der inneren Zustände einer sequentiellen Schaltung verallgemeinernd zusammen.

- Der Ausgangszustand Z^k einer sequentiellen Schaltung zum Zeitpunkt t_k hängt <u>nicht nur vom</u>, zum gleichen Zeitpunkt vorhandenen, <u>Eingangszustand X^k</u> ab, <u>sondern auch von der</u> vorher vorhandenen <u>Folge der Eingangszustände</u>.

- <u>Zur Speicherung der bisherigen Folge von Eingangszuständen</u> bis einschließlich zum Zeitpunkt t_{k-1} bildet die sequentielle Schaltung intern den sog. <u>inneren Zustand</u> Y^{k-1} (Bild 8).

- Mit Eintreffen eines neuen Eingangszustandes X^k wird aus diesem und dem bisherigen inneren Zustand Y^{k-1} der neue innere Zustand Y^k gebildet (Bild 8).
  Diese Abhängigkeit des neuen inneren Zustandes vom bisherigen inneren Zustand und dem neuen Eingangszustand drückt die Überführungsfunktion als allgemeines mathe-

matisches Modell aus:

$$Y^k = \delta(X^k, Y^{k-1}) \quad . \tag{1 a}$$

Wir merken uns hier zusätzlich, daß die Überführungsfunktion auch mit der in der Programmiertechnik von EDVA üblichen Schreibweise ausgedrückt werden kann:

$$Y := \delta(X, Y) \tag{1 b}$$

- Die Überführungsfunktion wird in der Schaltungsstruktur als Block I (Bild 8) realisiert. Der Block I besteht, wie Bild 12 zeigt, aus einer kombinatorischen Schaltung, an deren Ausgang der innere Zustand Y^k gebildet wird, einem Speicherblock Sp, der den bisherigen inneren Zustand Y^{k-1} aufbewahrt, und einer Rückführung von Y^{k-1} auf den Eingang der kombinatorischen Schaltung. Das sich ergebende allgemeine Strukturbild zeigt Bild 13. Die kombinatorische Schaltung wollen wir mit KS 1 bezeichnen

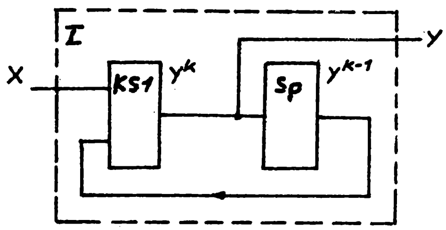


Bild 13 Schaltungsstruktur zur Realisierung der Überführungsfunktion

- Die Anzahl m der Signalvariablen von

$$Y = [y_{m-1}, \ldots, y_1, y_0]$$

wird durch die Anzahl der notwendig zu unterscheidenden inneren Zustände bestimmt.

1.2.2. Bildung des Ausgangszustandes

Der Ausgangszustand Z wird gemäß Bild 6 aus dem inneren Zustand Y gebildet:

$$Z^k = f\ (Y^k) \qquad (3)$$

Diese Funktion heißt <u>Ausgangsfunktion</u>. Sie wird in der Fachliteratur auch als

$$Z^k = \lambda\,(Y^k) \qquad (3\ a)$$

geschrieben. Gl. (3 a) besagt, daß aus dem inneren Zustand Y zum Zeitpunkt t_k eindeutig und zum gleichen Zeitpunkt ein bestimmter Ausgangszustand Z gebildet werden soll.
Die Ausgangsfunktion (3 a) ist also eine kombinatorische Schaltfunktion. D.h. der Block II in Bild 6 (sowie in den Bildern 7, 8, 9) wird durch eine kombinatorische Schaltung gebildet. Wir nennen ihn daher künftig KS 2.

Für unser 1. Beispiel gilt mit der von uns festgelegten Zuordnung der inneren Zustände zur Eingangs-Impuls-Folge und ihrer Kodierung für die KS 2 die Schaltbelegungstabelle (Tab. 5). Sie heißt auch Ausgangstabelle. Daraus erhalten wir (ggf. über Karnaugh-Plan) die Ausgangsfunktion

$$z = y_1\ y_0.$$

Y	Z		y_1	y_0	z
Y_0	Z_0		0	0	0
Y_1	Z_0	=	0	1	0
Y_2	Z_0		1	0	0
Y_3	Z_1		1	1	1

Tab. 5 Schaltbelegungstabelle (Ausgangstabelle)

Damit entspricht der endgültige Signalflußplan für das 1. Beispiel dem Bild 14.

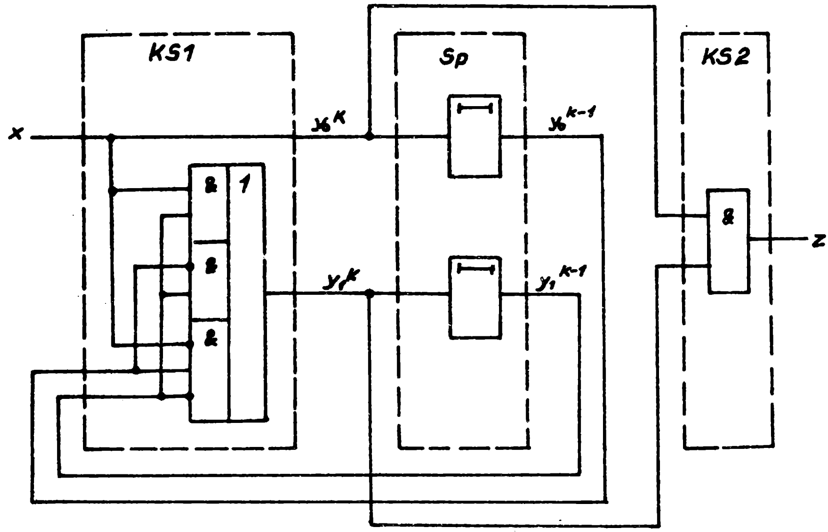


Bild 14 Sequentielle Schaltung des 1. Beispiels

1.2.3. Allgemeine Gesamtstruktur der sequentiellen Schaltungen

Wir beschränken uns hier auf die zusammenfassende verallgemeinerte Struktur auf der Grundlage der Moore-Struktur (Bild 6) einer sequentiellen Schaltung. Es sei erwähnt, daß man sequentielle Schaltungen in ihrer Verallgemeinerung (d.h., wenn man von der speziellen elektrischen Schaltung abstrahiert) auch Automaten nennt. Unser hier betrachteter Typ heißt dann Moore-Automat.

Wenn wir das für das 1. Beispiel in Bild 14 erhaltene Ergebnis dieser speziellen sequentiellen Schaltung verallgemeinern, so stellen wir fest, daß eine sequentielle Schaltung immer besteht aus

- einer kombinatorischen Schaltung KS 1, die den bisherigen inneren Zustand und den neuen Eingangszustand zum neuen inneren Zustand verknüpft;

- einer Speichereinrichtung SP, die den bisherigen inneren Zustand noch eine bestimmte Zeit Δt nach Erscheinen eines neuen Eingangszustandes für die KS 1 bereitstellt;
- einer kombinatorischen Schaltung KS 2 zur Bildung des Ausgangszustandes aus dem inneren Zustand.

Gibt es allgemein

n Eingangssignalvariable, d.h. $X = [x_{n-1}, \dots, x_1, x_0]$,
m innere Signalvariable, d.h. $Y = [y_{m-1}, \dots, y_1, y_0]$,
l Ausgangssignalvariable, d.h. $Z = [z_{l-1}, \dots, z_1, z_0]$,

dann kann man die allgemeine Struktur wie in Bild 15 angeben.

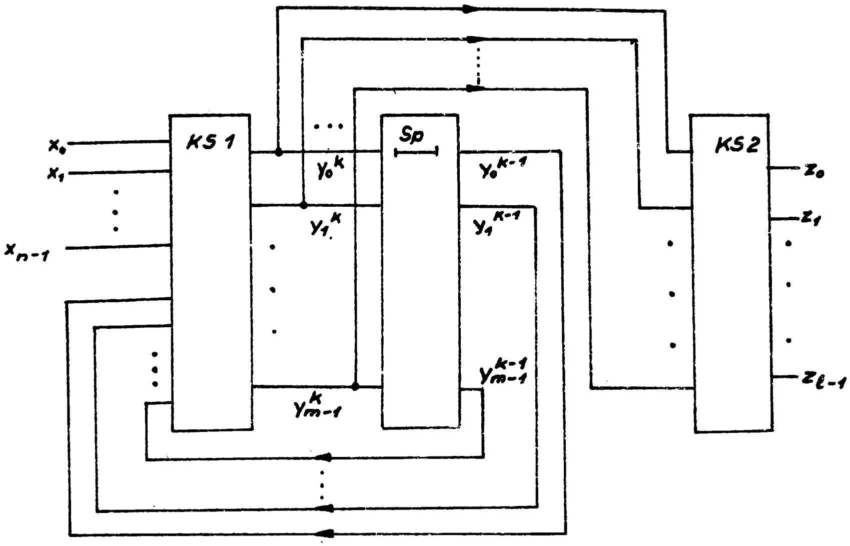


Bild 15 Allgemeine Struktur der sequentiellen Schaltung (Moore-Automat)

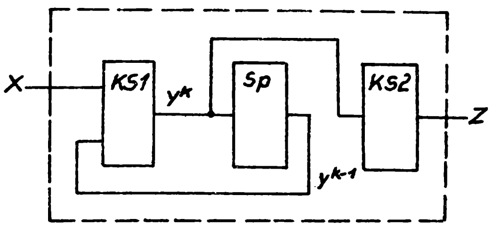


Bild 16 Allg. Struktur der sequentiellen Schaltung

Stellt man die Menge der Signalvariablen jedes Zustandes (X, Y, Z) durch je eine Leitung dar, erhält man aus Bild 15 das vereinfachte Blockbild in Bild 16.

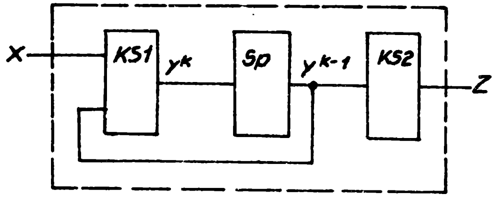


Bild 17 Allg. Struktur der sequentiellen Schaltung

Nimmt man die Verzögerungszeit Δt des Speichers Sp in Kauf, dann kann man auch die Struktur gemäß Bild 17 angeben. Der Ausgangszustand erscheint dann zusätzlich um Δt verzögert. Falls Δt vernachlässigbar klein ist, sind die Strukturen in Bild 16 und 17 gleichwertig.

1.3. Beschreibungsformen sequentieller Schaltungen

Nachfolgend betrachten wir verschiedene Möglichkeiten, den funktionellen Inhalt, d.h., das Verhalten sequentieller Schaltungen zu beschreiben.

1.3.1. Mathematische Beschreibung

Die mathematische Beschreibung besteht aus der uns schon bekannten

Überführungsfunktion $\quad Y^k = \delta(X^k, Y^{k-1})$

und der

Ausgangsfunktion $\quad Z^k = \lambda(Y^k)$.

Wir bedenken, daß diese allgemeinen Ausdrücke für Funktionenbündel stehen. Wir hatten sie im Pkt. 1.2. für das eingangs gegebene 1. Beispiel bestimmt. Für diese spezielle sequentielle Schaltung lauteten

- die Überführungsfunktionen

$$y_1^k = x^k\, y_1^{k-1} \vee y_1^{k-1}\, \overline{y_0^{k-1}} \vee \overline{x^k}\, \overline{y_1^{k-1}}\, y_0^{k-1} ,$$

$$y_0^k = x^k \quad \text{und}$$

- die Ausgangsfunktion

$$z = y_1\, y_0 .$$

1.3.2. Automatentabelle

Analog zur Schaltbelegungstabelle (Wertetabelle) bei kombinatorischen Schaltungen stellt die Automatentabelle eine vollständige Beschreibung der Funktion der sequentiellen Schaltung dar. Entsprechend der Überführungsfunktion und der Ausgangsfunktion besteht die Automatentabelle aus den beiden Teilen <u>Überführungstabelle</u> und <u>Ausgangstabelle</u>. Tab. 6 zeigt ein Beispiel.

Y^{k-1} \ X^k	X_0	X_1	X_2	X_3
Y_0	Y_0	Y_1	Y_0	Y_0
Y_1	Y_2	Y_1	Y_1	Y_2
Y_2	Y_2	Y_2	Y_2	Y_1

Y	Z
Y_0	Z_0
Y_1	Z_1
Y_2	Z_0

Tabelle 6 Überführungstabelle (links) und Ausgangstabelle

Die Überführungstabelle bedeutet:

Kopfzeile: mögliche Eingangszustände
Kopfspalte: mögliche vorherige innere Zustände
Matrix: sich ergebende neue innere Zustände

Beispiel für das Matrixfeld 00 (0. Zeile, 0. Spalte):
Wenn der bisherige innere Zustand Y_0 war und der Eingangszustand X_0 ist, ist der neue Zustand wieder Y_0.

Beispiel für das Matrixfeld 13:
Für $Y^{k-1} = Y_1$ und $X^k = X_3$ wird $Y^k = Y_2$.

Die Ausgangstabelle ist, wie wir schon wissen, eine Schaltbelegungstabelle, da KS 2 (Bild 15) eine kombinatorische Schaltung darstellt.

Für das 1. Beispiel hatten wir in Pkt. 1.2. die Schaltfolgetabelle (siehe Tab. 4) und die Ausgangstabelle (siehe Tab. 5) bereits aufgestellt. Für die praktische Handhabung zur Berechnung der Überführungsfunktion und der Berechnung des Signalflußplans der KS 1 (Bild 15) schreibt man die Überführungstabelle in Form einer Schaltbelegungstabelle (Tab. 7)

Eingangszustand				bisheriger innerer Zustand				neuer innerer Zustand			
X_{n-1}	...	X_1	X_0	Y^{k-1}_{m-1}	...	Y_1^{k-1}	Y_0^{k-1}	Y^k_{m-1}	...	Y_1^k	Y_0^k
0		0	0	0		0	0	0		0	0
0	⋮	0	1	0	⋮	0	0	0	⋮	1	1

Tab. 7 Praktische Überführungstabelle

Diese Schreibweise entspricht dem strukturellen Zusammenhang (Bild 15), nach dem Eingangszustand und bisheriger innerer Zustand als Eingangssignale und der neue innere Zustand als Ausgangssignal des KS 1 fungieren. Als Beispiel siehe Tab. 4!

Paßt man Überführungstabelle und Ausgangstabelle (Tab. 6) zu einer gemeinsamen Tabelle zusammen, so spricht man von der Automatentabelle (Tab. 8)

Y^{k-1} \ X^k	X_0	X_1	X_2	X_3	Z
Y_0	Y_0	Y_1	Y_0	Y_0	Z_0
Y_1	Y_2	Y_1	Y_1	Y_2	Z_1
Y_2	Y_2	Y_2	Y_2	Y_1	Z_0

Tab. 8 Automatentabelle

1.3.3. Zustandsgraph

Ein Graph besteht aus Knoten und Kanten (Bild 18). In unserem Zustandsgraphen, der die Funktion der sequentiellen Schaltung grafisch veranschaulichen soll, werden den Knoten die inneren Zustände Y und den Kanten die Eingangszustände X als notwendige Bedingung für den Übergang vom alten in den neuen inneren Zustand zugeordnet (Bild 19). Lt. Bild 19 bedingt also der Eingangszustand X_j die innere Zustandsänderung von Y_l nach Y_p. Der dabei erreichte Ausgangszustand Z_r wird neben dem inneren Zustand und der dazugehörigen Kante vermerkt.

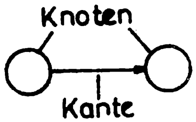


Bild 18 Graph

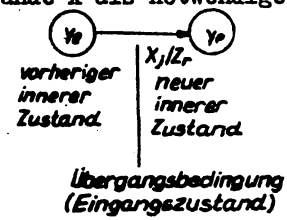
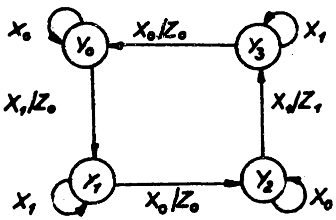


Bild 19

Bezogen auf unser 1. Beispiel (Tab. 3 und 5) ergibt sich mit



$X_0 = [0]$, $X_1 = [1]$, $Y_0 = [0, 0]$, $Y_1 = [0, 1]$, $Y_2 = [1, 1]$, $Y_3 = [1, 0]$,

und

$Z_0 = [0]$
$Z_1 = [1]$

Bild 20 Zustandsgraph

der Zustandsgraph nach Bild 20. Die "geschleiften" Kanten, die zum Ausgangszustand zurückkehren, bedeuten, daß z.B. der einmal erreichte Zustand Y_2 solange erhalten bleibt, solange der Eingangszustand X_0 ist (sog. stabiler Zustand).

Als weitere Beschreibungsformen gelten natürlich die von den kombinatorischen Schaltungen bekannten, wie Impulsdiagramm, Signalflußplan und Stromlaufplan.

1.4. Beispiel eines Schaltungsentwurfs

In dem folgenden Beispiel soll der Entwurf des Signalflußplans einer sequentiellen Schaltung nach Lösungsschritten gegliedert gezeigt werden. Dabei üben wir den Umgang mit den Strukturen und Beschreibungsformen. Wir gehen von der verbalen Aufgabenstellung aus.

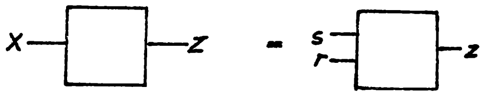
- Aufgabenstellung

  Es ist der Signalflußplan eines elementaren Speichers für ein Bit zu entwerfen. Die Schaltung soll folgende Funktionen haben:

  - Ein Setzeingang $s = 1$ soll zum Ausgangszustand $z = 1$ führen;
  - ein weiterer Rücksetzeingang $r = 1$ soll zum Ausgangszustand $z = 0$ führen.
  - Sind beide Eingänge $s = 0$ und $r = 0$, dann soll der Ausgang z seinen bisherigen Wert nicht verändern.
  - Der Eingangszustand $[r, s] = [1, 1]$ kommt nicht vor.

  (Vgl. auch 2. Beispiel in Pkt. 1.1.)

- 1. Lösungsschritt: Blockbild



Es gilt mit Bild 21
$X = [r, s]$ und
$Z = [z]$.

Bild 21 Blockbild

- 2. Lösungsschritt: Impulsdiagramm (Bild 22)

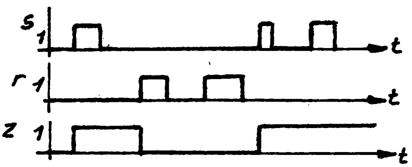


Bild 22 Impulsdiagramm

- 3. Lösungsschritt: Aufstellen der Automatentabelle

Wir wissen, daß die allgemeine Struktur dem Bild 16 entspricht. Dieser Lösungsschritt befaßt sich mit der Bestimmung der inneren Zustände und dem sich daraus ergebenden Ausgangszustand. Dabei sind folgende Fragen zu beantworten:

a) Wieviel verschiedene innere Zustände sind notwendig?

b) Wie hängt der folgende innere Zustand vom bisherigen und vom Eingangszustand ab?

c) Welcher Ausgangszustand ergibt sich aus dem jeweiligen inneren Zustand?

Diese Fragen werden mit dem Aufstellen der Automatentabelle gelöst.

Wir schreiben zunächst die Tabelle gemäß Tab. 8 für unsere Aufgabe hin (Tab. 9 a). In die Kopfzeile tragen wir die möglichen Eingangszustände ein.

Y^{k-1}	$X = [r, s]$: 0 0	0 1	1 0	z

a)

Y^{k-1}	0 0	0 1	1 0	z
Y_0	Y_0			0

b)

Tab. 9 Automatentabelle

Die Kopfspalte können wir noch nicht schreiben, da die Anzahl der inneren Zustände noch unbekannt ist. Die Ausfüllung der Tabelle erfolgt durch schrittweise Überlegung:

- Wir nehmen z.B. an, daß unser Speicher rückgesetzt wurde (s. Beginn des Impulsdiagramms, Bild 22). Dabei habe er einen inneren Zustand eingenommen, den wir als Y_0 (willkürlich!) bezeichnen. Solange kein weiterer Befehl als $X = [0, 0]$ am Eingang eintrifft, wird dieser Zustand beibehalten. Der Ausgangszustand ist $z = 0$ (Tab. 9 b).
- Trifft ein Setzbefehl ein ($X = [0, 1]$), ergibt sich aus Y_0 ein neuer innerer Zustand Y_1. Wir schreiben das in die 1. Zeile ein (Tab. 9 c). Ist Y_1 erreicht und dauert $X = [0, 1]$ weiter an, wird Y_1 weiter beibehalten. Wir schreiben das in die 2. Zeile ein (Tab. 9 c). Der Ausgangszustand z nimmt den Wert 1 an.

Y^{k-1}	0 0	0 1	1 0	z
Y_0	Y_0	Y_1		0
Y_1		Y_1		1

c)

Y^{k-1}	0 0	0 1	1 0	z
Y_0	Y_0	Y_1		0
Y_1	Y_1	Y_1		1

d)

Tab. 9 Automatentabelle

- Der Setzbefehl verschwindet wieder, d.h., der Eingang nimmt wieder den Zustand $X = [0, 0]$ an.
  Man könnte dieser neuen Situation einen weiteren inneren Zustand Y_2 zuordnen. Da die Schaltung jedoch nicht zwischen "Setzbefehl liegt am Eingang" und
  "Setzbefehl hat am Eingang gelegen"
  unterscheiden muß, um zum richtigen Ausgangszustand zu kommen,

kann man auch der neuen Situation den inneren Zustand Y_1 zuordnen (Tab. 9 d).

- Folgt, ausgehend vom inneren Zustand Y_1, ein Rücksetzsignal $X = [1, 0]$, so soll die Schaltung, wie ursprünglich vorausgesetzt, wieder Y_0 annehmen und $z = 0$ ausgeben (Tab. 9 e).

Y^{k-1}	0 0	0 1	1 0	z
Y_0	Y_0	Y_1	Y_0	0
Y_1	Y_1	Y_1	Y_0	1

e)

Tab. 9 Automatentabelle

Damit haben wir die endgültige Automatentabelle erhalten. Es werden zwei innere Zustände benötigt. Das bedeutet eine innere Signalvariable

$$Y = [y] .$$

Das Bild 21 kann also jetzt präzisiert werden (Bild 23).

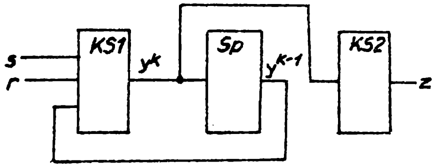


Bild 23 Blockstruktur

- 4. Lösungsschritt: Darstellen des Zustandsgraphen

Der Graph (Bild 24) gilt mit

$X = [r, s]$, $X_0 = [0, 0]$, $X_1 = [0, 1]$, $X_2 = [1, 0]$,

$Y = [y]$, $Y_0 = [0]$, $Y_1 = [1]$ und

$Z = [z]$, $Z_0 = [0]$, $Z_1 = [1]$.

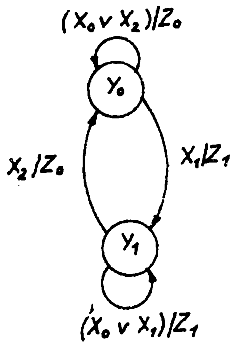


Bild 24 Graph des Elementarspeichers

Er enthält gegenüber Tab. 9 e keine neuen Informationen, dient aber ggf. einer anschaulicheren Darstellung der Funktion der Schaltung.

- 5. Lösungsschritt:
<u>Berechnen der Überführungs- und der Ausgangsfunktion</u>

Dazu stellen wir die Automatentabelle 9 e etwas praktisch-konkreter nach Vorbild der Tab. 7 dar (Tab. 10).

x					
r	s	y^{k-1}	y^k	z	Funktion
0	0	0	0	0	speichern
0	0	1	1	1	
0	1	0	1	1	setzen
0	1	1	1	1	
1	0	0	0	0	rücksetzen
1	0	1	0	0	
1	1	0	-	-	nicht vorkommend
1	1	1	-	-	

Tab. 10 Praktische Automatentabelle

$y^k =$		y^{k-1}	y^{k-1}	
	0	1	0	0
s	1	1	Ø	Ø
			r	r

Bild 25 Karnaughplan

Über den Karnaughplan (Bild 25) erhalten wir die Überführungsfunktion z.B. als DNF

$$y^k = s \vee \bar{r}\, y^{k-1} .$$

Sie lautet nach doppelter Negierung als homogene NAND-Darstellung

$$y^k = \overline{\bar{s}\;\overline{\bar{r}\, y^{k-1}}}$$

Die Ausgangsfunktion ist sofort ablesbar als

$$z = y^k$$

- 6. Lösungsschritt: <u>Darstellen des Signalflußplans</u>

Ausgehend von der Blockstruktur (Bild 23) ergibt sich mit den im 5. Schritt berechneten Funktionen der Signalflußplan gemäß Bild 26.
Damit ist der logische Inhalt der Teilblöcke KS 1 und KS 2 bestimmt.

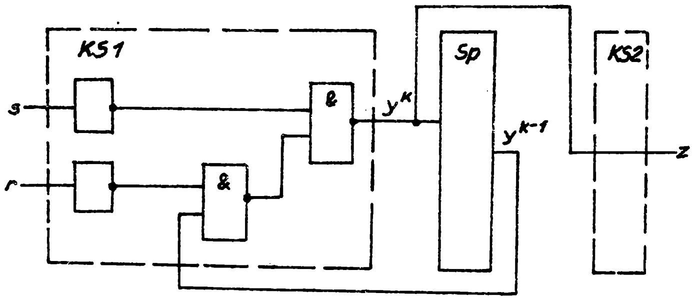


Bild 26 Signalflußplan

- 7. Lösungsschritt:

<u>Bestimmen des Inhaltes des Speicherblockes Sp</u>

Möglichkeiten zur Realisierung des Blockes Sp haben wir schon erwähnt (Kondensator, zeitverzögernde Schaltglieder, speicherndes Schaltnetzwerk).
In unserem <u>speziellen</u> Beispiel und in <u>wenigen</u> anderen Fällen ist ein Verzicht auf den Block Sp möglich. Wir können das in folgender Überlegung erkennen.

Die Automatentabelle (Tab. 9 e) zeigt, daß

- für die Funktionen "setzen" ($X_1 = [0, 1]$) und "rücksetzen" ($X_2 = [1, 0]$) der neue Zustand unabhängig vom bisherigen ist, d.h., daß der bisherige Zustand für diese Funktionen nicht benötigt wird;
- für die Funktion "speichern" ($X_0 = [0, 0]$) der neue Zustand gleich dem bisherigen ist ($Y^k = Y^{k-1}$).

Wegen dieses Sachverhaltes kann man in Bild 26 statt des bisherigen Zustandes Y^{k-1} auch den Zustand Y^k auf den Eingang der KS 1 zurückführen. Damit darf der Block Sp entfallen.

Bild 27 zeigt die endgültige, in der Literatur übliche Darstellung des Signalflußplanes. Dieser von uns entworfene Elementarspeicher heißt wegen seiner <u>R</u>ücksetz- und <u>S</u>etz-Funktionen auch <u>rs-Trigger</u>.

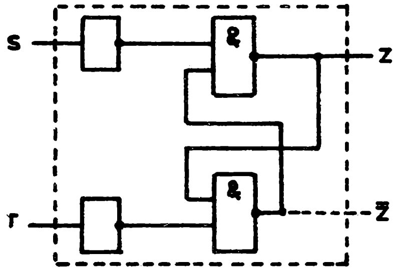


Bild 27 Signalflußplan des Elementarspeichers (rs-Trigger)

Der in Bild 27 zusätzlich angegebene Ausgang $\bar{z}$ wird schaltungstechnisch oft genutzt, da er für die Eingangszustände X_0, X_1, X_2, (nicht jedoch für X = [1, 1] !) immer das zu z negierte Signal führt.

Damit haben wir den Begriff, eine Struktur und eine grundsätzliche Möglichkeit des Entwurfs sequentieller Schaltungen kennengelernt.
Vor der weiteren Durcharbeit des Lehrbriefes versuchen Sie bitte eine eigene Zusammenfassung der wesentlichen Gedanken dieses 1. Kapitels!
Lösen Sie anschließend die folgenden Aufgaben!

1.5. Aufgaben

1/1. Ein Schaltnetzwerk mit zwei Eingangsvariablen x_0 und x_1 und einer Ausgangsvariablen z entspricht einem Impulsdiagramm nach Bild 28. Geben Sie an, warum eine sequentielle Schaltung vorliegt!

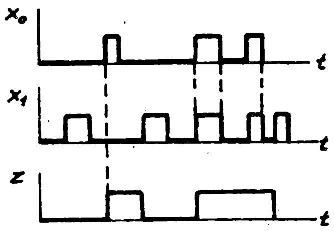


Bild 28 Impulsdiagramm

1/2. Gegeben ist eine Automatentabelle (Tab. 11)

Y^{k-1}	X_0	X_1	X_2	X_3	Z
Y_0	Y_0	Y_0	Y_1	Y_3	Z_0
Y_1	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Z_0
Y_2	Y_0	Y_2	Y_1	Y_2	Z_1
Y_3	Y_1	Y_3	Y_1	Y_3	Z_0

$X = [x_1, x_0]$, $X_0 = [0, 0]$, $X_1 = [0, 1]$, $X_2 = [1, 0]$, $X_3 = [1, 1]$

$Z = [z_1, z_0]$, $Z_0 = [0, 1]$, $Z_1 = [1, 0]$

Tab. 11 Automatentabelle

a) Geben Sie den Zustandsgraphen an!

b) Geben Sie die Blockstruktur (ähnlich Bild 23) an!

c) Bestimmen Sie aus dem in a) erhaltenen Graphen die Automatentabelle!

d) Berechnen Sie die Überführungs- und die Ausgangsfunktionen für die Kodierung der inneren Zustände
$Y = [y_1, y_0]$ mit
$Y_0 = [0, 0]$, $Y_1 = [0, 1]$, $Y_2 = [1, 1]$, $Y_3 = [1, 0]$
als min. KNF!

2. Steuerungsprinzipe sequentieller Schaltungen

Sequentielle Schaltungen kann man nach ihrer Steuerung in zwei große Gruppen einteilen:

- asynchrone Schaltungen und
- synchrone Schaltungen.

2.1. Asynchrone Schaltungen

Bei asynchronen Schaltungen wird das eintreffende Eingangssignal sofort verarbeitet. D.h., der Zeitpunkt, zu dem sich der innere Zustand ändern kann, wird vom Eingangssignal selbst bestimmt. Die Änderung des Eingangssignals bedeutet immer das Ende des vorherigen Zeitabschnittes Δt_{k-1} und den Beginn des neuen Δt_k, usw. (Bild 29). Unsere bisher betrachteten Schaltungen arbeiten asynchron.

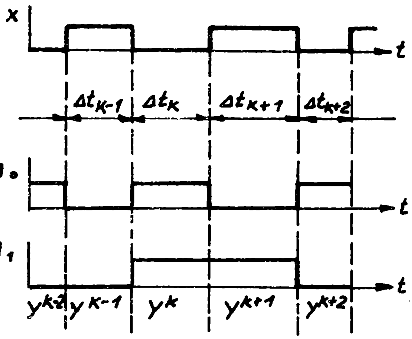


Bild 29 Impulsdiagramm einer asynchronen Schaltung

2.2. Synchrone Schaltungen

In synchronen Schaltungen wird das anliegende Eingangssignal nur zu ganz bestimmten diskreten Zeitpunkten verarbeitet. D.h., der Zeitpunkt, zu dem sich der

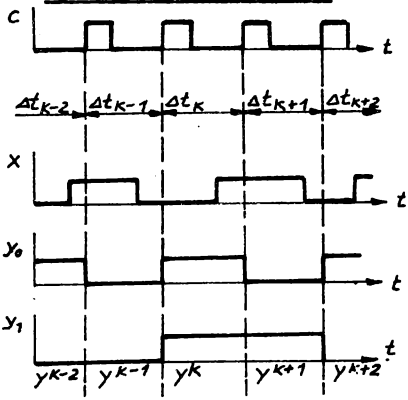


Bild 30 Impulsdiagramm einer synchronen Schaltung

innere Zustand ändern kann, wird durch einen zusätzlichen, sog. Taktimpuls bestimmt. Bild 30 zeigt diese Zeitquantisierung, d.h. die Einteilung der Zeit in einzelne Abschnitte mit Hilfe der Vorderflanke eines periodischen Taktpulses c. Die Taktung kann allerdings auch mit Hilfe aperiodischer Impulse erfolgen.

Aus dem Dargestellten wird verständlich:

- Asynchrone Schaltungen heißen auch <u>ungetaktete Schaltungen</u>,
- synchrone Schaltungen nennt man auch <u>getaktete Schaltungen</u>.

Für die Realisierung des Taktsteuerungsprinzips gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Z.B. erhält man aus dem ungetakteten rs-Trigger (Bild 27) einen getakteten (oder synchronen) rs-Trigger durch Konjunktion der Eingänge r und s mit dem Takt c (Bild 31).

Dann ergibt sich das Impulsdiagramm in Bild 32 x).

Vergleichen Sie dieses mit dem Impulsdiagramm des asynchronen rs-Triggers (Bild 22)!

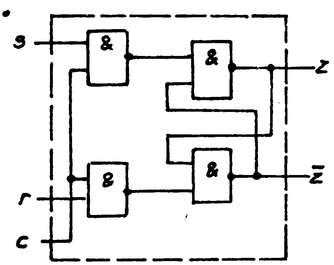


Bild 31 Synchroner rs-Trigger

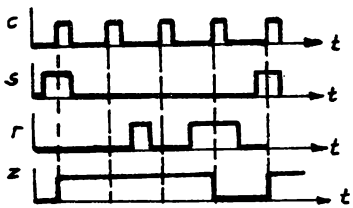


Bild 32 Impulsdiagramm des synchronen rs-Triggers

x) Zur Vereinfachung ändern sich hier die Eingangszustände während c = 1 nicht. Das entspricht oft der Praxis.

Um zu einer allgemeinen Struktur der synchronen Schaltung zu kommen, wählen wir aus den verschiedenen Möglichkeiten ein heute viel verwendetes Steuerungsprinzip synchroner Schaltungen, das sog. Master-Slave-Prinzip. Dieses elegante Schaltungsprinzip, mit dem viele Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Realisierung des Speicherblockes Sp umgangen werden, ist etwas aufwendiger und daher erst mit der Durchsetzung der ökonomisch günstigen Mikroelektronik dominierend geworden.

2.3. Realisierung synchroner sequentieller Schaltungen durch das Master-Slave-Prinzip

Wir gehen aus von der allgemeinen Struktur der asynchronen sequentiellen Schaltung (Bild 17). Sie wird folgendermaßen erweitert:

- Da das Eingangssignal X erst den neuen inneren Zustand bilden soll, wenn ein Taktsignal c = 1 ist, wird der KS 1 eine Torschaltung T 1 (Und-Glied) nachgeordnet, die mit c = 0 gesperrt ist.
- Der Speicher Sp wird durch zwei in Kette geschaltete Speicher Sp 1 und Sp 2 ersetzt. Zwischen Sp 1 und Sp 2 liegt eine Torschaltung T 2, die mit c = 1 gesperrt ist.

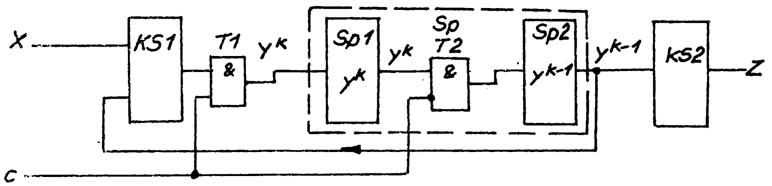


Bild 33 Master-Slave-Struktur

Wir erklären die Funktionsweise der so mit Bild 33 erhaltenen Struktur:

- Mit Anliegen des Taktimpulses c = 1 entsteht am Ausgang des Tores T 1 der von KS 1 aus dem Eingangszustand X und dem bisherigen inneren Zustand Y^{k-1} gebildete neue innere Zustand Y^k.

- Der neue innere Zustand Y^k wird sofort in den Speicher Sp 1 übernommen und liegt damit auch an seinem Ausgang.

- Mit Verschwinden des Taktimpulses ($c = 0$) wird die Schaltung durch das Tor T 1 eingangsseitig gegen neue Signale gesperrt. Das Tor T 2 öffnet und bewirkt damit die Übernahme des neuen Zustandes aus Sp 1 in Sp 2.

- Der nun am Ausgang von Sp 2 liegende innere Zustand wird über KS 2 in den Ausgangszustand Z umkodiert.

Der Speicher Sp 1 wird in der anglo-amerikanisch beeinflußten Literatur auch Master (Meister) genannt, da er zunächst den neuen Zustand Y^k aufnimmt. Der Speicher Sp 2 heißt Slave (Sklave, Knecht), da er den vom Master vorgegebenen Zustand übernimmt.

Zusammenfassend kann man also feststellen:

- Zum Zeitpunkt, der durch die Vorderflanke des Taktimpulses bestimmt wird, entsteht in Sp 1 der neue innere Zustand.

- Zum Zeitpunkt, der durch die Rückflanke des Taktimpulses bestimmt wird, übernimmt Sp 2 den neuen Zustand und gibt ihn über KS 2 als Ausgangszustand aus.

Der Takt wird meistens in einem separaten Taktgenerator erzeugt.

Die Blöcke Sp 1 und Sp 2 werden wie bisher durch speichernde Elemente gebildet, z.B. Kondensatoren (als sog. dynamische, d.h. flüchtige Speicher). Das sog. statische Speicherprinzip verwendet z.B. den von uns entworfenen Elementarspeicher (rs-Trigger, Bild 27) pro notwendigem Bit.
Ersetzen wir den Signalflußplan des rs-Triggers in Bild 27 durch sein Symbol gemäß TGL 16056/04 (Bild 34), so ergibt sich z.B. für eine Schaltung mit einer Eingangsvariablen, 2 inneren Zustandsvariablen und drei Ausgangsvariablen das Bild 35.

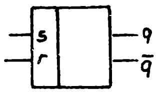


Bild 34 Symbol des rs-Triggers

Diesem Strukturbild entsprechen alle weiteren von uns zu betrachtenden sequentiellen Schaltungen. Sie bestehen in Sp 1 und Sp 2 aus bestimmten Triggertypen sowie aus den kombinatorischen

Schaltungen KS 1 und KS 2.
Sie lernen daher in den nächsten Kapiteln verschiedene Triggertypen und die konkrete Berechnung der Blöcke KS1 und KS2 kennen.

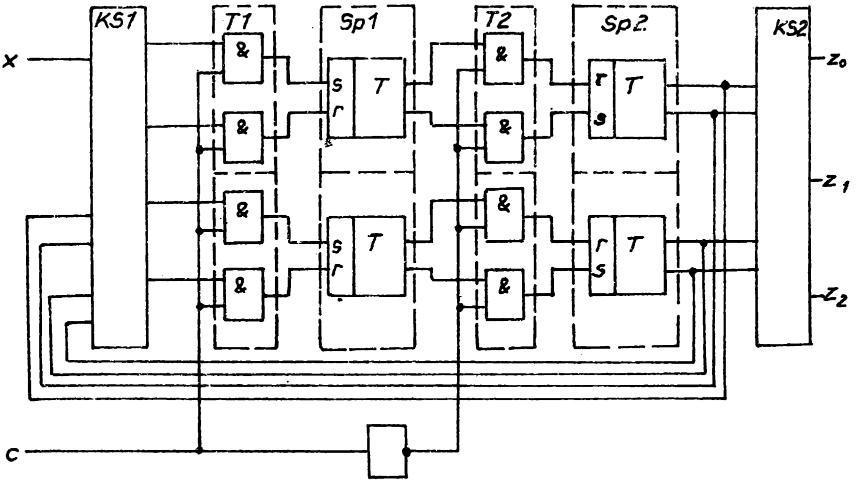
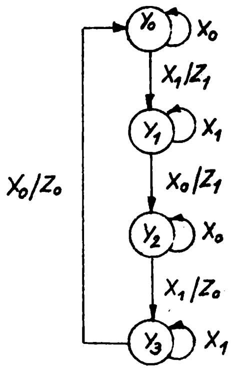


Bild 35 Sequentielle Schaltung nach dem Master-Slave-Prinzip

2.4. Aufgaben

2/1. Gegeben ist der Graph (Bild 36) mit



$$Y = [y_1, y_0], \quad X = [x_0],$$
$$Y_0 = [0, 0] \quad X_0 = [0]$$
$$Y_1 = [1, 0] \quad X_1 = [1]$$
$$Y_2 = [1, 1]$$
$$Y_3 = [0, 1] \quad Z = [z_0],$$
$$Z_0 = [0]$$
$$Z_1 = [1].$$

Bild 36 Graph

a) Wodurch ist der Zeitpunkt eines möglichen Übergangs von einem inneren Zustand (Knoten) zum folgenden bestimmt, und zwar

   1) bei einer asynchronen Schaltung,

   2) bei einer synchronen Schaltung?

b) Zeichnen Sie das zugehörige Impulsdiagramm

   1) der asynchronen Schaltung,

   2) der synchronen Schaltung!

c) Schreiben Sie die Automatentabelle

   1) entsprechend Tab. 8,

   2) entsprechend Tab. 7 und 5!

2/2. Eine synchrone sequentielle Schaltung, deren Ausgangszustand immer gleich ihrem inneren Zustand sein soll ($Z = Y$), hat eine Eingangsvariable x_0. Befindet er sich zum Zeittakt t_k im Anfangszustand Y_0, dann durchläuft er mit der Eingangsbelegung $x_0 = 1$ in 5 Zeittakten die Zustände Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5. Liegt im Zustand Y_5 $x_0 = 1$ an, geht die Schaltung in den Zustand Y_0 über. Mit $x_0 = 0$ im Zustand Y_5 durchläuft die Schaltung die Zustände Y_6, Y_7, ..., Y_{15}, Y_5, wobei diese Zustandsfolge unabhängig von x_0 sein soll. Wenn die Schaltung, ausgehend von Y_0, den Zustand Y_5 noch nicht erreicht hat, verharrt sie bei $x_0 = 0$ im jeweiligen Zustand. Die Struktur entspricht dem Spezialfall $Z = Y^{k-1}$.

a) Stellen Sie die Automatentabelle auf!

b) Stellen Sie die genannte Funktion als Zustandsgraph dar!

c) Zeichnen Sie die ausführliche Struktur der Schaltung entsprechend Bild 35

3. Aufgabenlösungen

1/1. Der Versuch der Aufstellung der nebenstehenden Schaltbelegungstabelle ergibt für $[x_1, x_0] = [0, 0]$ keinen eindeutig bestimmten Ausgangswert z.

x_1	x_0	z	
0	0	0	0.1
0	1	1	
1	0	0	
1	1	1	

1/2. a)

Graph gemäß Bild

Die Ausgangszustände sind einfach neben den inneren Zustand Y_i geschrieben.

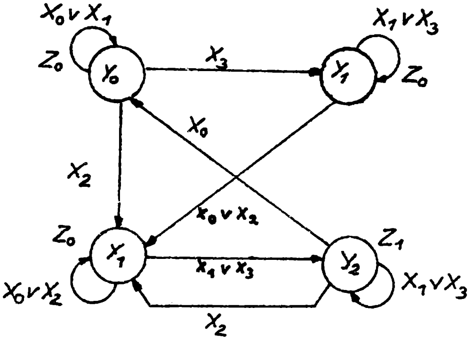


Bild 37

b) Gemäß Bild

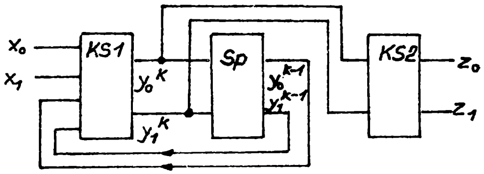


Bild 38

c) Siehe gegebene Automatentabelle (Tab. 11)!

d) $y_1 := x_0 \, (x_1 \vee y_1 \vee y_0)$

$$y_0 := (x_1 \vee y_0)\,(\bar{x}_0 \vee \bar{y}_1 \vee y_0)\,(\bar{x}_0 \vee y_1 \vee \bar{y}_0)$$

$$z_1 = y_1 \, y_0$$

$$z_0 = \bar{y}_1 \vee \bar{y}_0$$

2/1. a 1) Der Übergang von einem Knoten zum folgenden wird durch den Zeitpunkt der Änderung des Eingangszustandes bestimmt.

a 2) Der Übergang wird durch den Zeitpunkt des Erscheinens des Taktimpulses bestimmt.
Entsprechend dem Master-Slave-Prinzip wird der gemäß Graph folgende innere Zustand zum Zeitpunkt der Taktvorderflanke im Sp 1 gebildet. Zum Zeitpunkt der Taktrückflanke übernimmt auch Sp 2 den neugebildeten Zustand.

b 1)

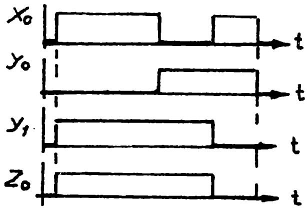


Bild 39
Impulsdiagramm

b 2)

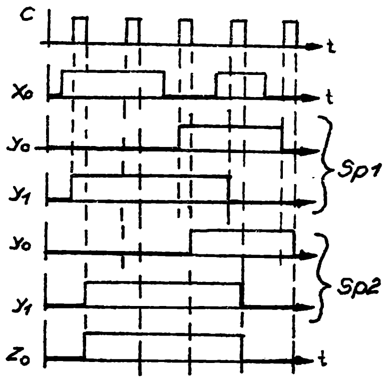


Bild 40 Impulsdiagramm

c 1)

Y^{k-1}	X_0	X_1	Z
Y_0	Y_0	Y_1	Z_0
Y_1	Y_2	Y_1	Z_1
Y_2	Y_2	Y_3	Z_1
Y_3	Y_0	Y_3	Z_0

Tab. 12 Automatentabelle

c 2)

x_0	y_1^{k-1}	y_0^{k-1}	y_1^k	y_0^k
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	1	1
0	1	1	1	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1

Tab. 13 Überführungstabelle

y_1	y_0	z_0
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

Tab. 14 Ausgangstabelle

2/2. a)

Y_{k-1}	x_0 = 0	x_0 = 1
Y_0	Y_0	Y_1
Y_1	Y_1	Y_2
Y_2	Y_2	Y_3
Y_3	Y_3	Y_4
Y_4	Y_4	Y_5
Y_5	Y_6	Y_0
Y_6	Y_7	Y_7
Y_7	Y_8	Y_8
Y_8	Y_9	Y_9
Y_9	Y_{10}	Y_{10}
Y_{10}	Y_{11}	Y_{11}
Y_{11}	Y_{12}	Y_{12}
Y_{12}	Y_{13}	Y_{13}
Y_{13}	Y_{14}	Y_{14}
Y_{14}	Y_{15}	Y_{15}
Y_{15}	Y_5	Y_5

Tab. 15 Automatentabelle

b) Überprüfen Sie die Richtigkeit Ihres Graphen selbst, indem Sie aus ihm ebenfalls die Automatentabelle herleiten!

c) $X = [x_0]$, $Y = [y_3, y_2, y_1, y_0]$,

$Z = Y$

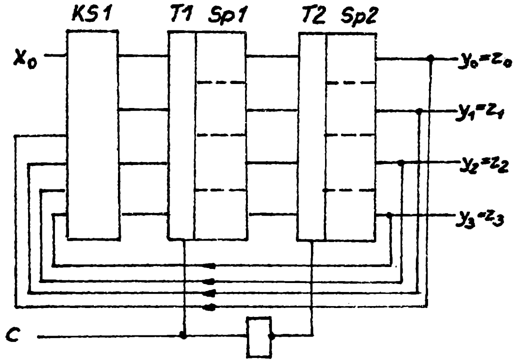


Bild 41 Struktur der sequentiellen Schaltung