



Elektrotechnisches Grundlagenpraktikum

Digitaltechnik

- Entwurf eines Rechteckgenerators
- Schaltwerkentwurf für einen Getränkeautomaten
- Untersuchungen zu Laufzeitfehlern

von

Dr.-Ing. Armin Teltschik
Dipl.-Ing. Simon Zorn

Inhaltsverzeichnis

2	Literatur	4
3	Geräte	4
4	Allgemeine Grundlagen	5
4.1	System und Systemmodell.....	5
4.1.1	System	5
4.1.2	Systemmodell	5
4.2	Verhaltensmodelle.....	6
4.2.1	Grundbegriffe der Verhaltensmodellierung	6
4.2.2	Klassifizierung von Verhaltensmodellen	7
4.2.3	Das Steuerkreismodell.....	8
4.2.4	Modellierung von Steuerwerken durch Automatenmodelle.....	9
4.2.4.1	MEALY-Automat (durchschaltendes Schaltwerk).....	9
4.2.4.2	MOORE-Automat (speicherndes Schaltwerk).....	10
4.3	Entwurfsschritte beim Steuerwerkentwurf durch speichernde Schaltwerke	10
4.3.1	Erstellen des Ablaufdiagrammes	11
4.3.2	Kodierung der Zustände und der Schnittstellenvariablen	12
4.3.3	Erstellen der Automatentabelle.....	13
4.3.4	Erstellen des Automatengraphen	13
4.3.5	Schaltalgebra	14
4.3.5.1	Schaltfunktionen.....	14
4.3.5.2	Konjunktive und disjunktive Normalform	15
4.3.5.3	Schaltnetzminimierung mit KV-Diagramm	16
4.3.5.4	Entwurf von Schaltnetzen	17
4.3.6	Entwurf des λ und δ Schaltnetzes	17
4.4	Zustandsspeicher.....	18
4.5	Logikbausteine.....	19
4.5.1	Schaltsschwellen und Signallaufzeiten der verschiedenen Technologien ..	20
4.6	Laufzeitbedingtes Fehlverhalten logischer Verknüpfungen (Hazardfehler)	21
4.6.1	Strukturhazard	21
4.6.2	Funktionshazard	22
4.7	Bedienung des Speicheroszilloskops.....	24
5	Versuchsdurchführung	26
5.1	Versuch 1: Entwurf eines 6135 kHz Rechteckgenerators.....	26
5.2	Versuch 2: Schaltwerkentwurf für einen Getränkeautomaten	28
5.3	Versuch 3: Untersuchungen zu Laufzeitfehlern.....	35
	Anhang A Datenblätter	43

5 Versuchsdurchführung

Der erste der beiden Versuche wird ausschließlich mit der Digitalbox (s. Bild 5.1) durchgeführt.

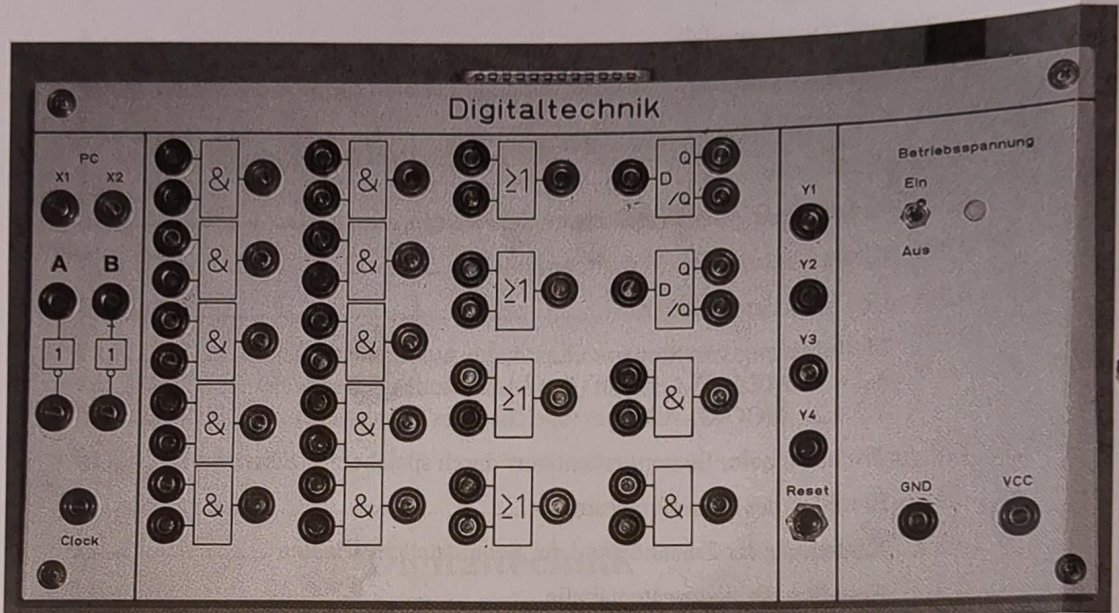


Bild 5.1 Digitalbox

Hinweis: Um undefinierte Gatterzustände zu vermeiden sind innerhalb der Digitalbox alle Gattereingänge mit einem 100kOhm Pullup-Widerstand auf Vcc geschaltet. In unbeschaltetem Zustand liegt somit an den UND- und ODER-Gatterausgängen stets ein "HIGH"-Pegel an. Von allen Logikbausteinen der Box finden Sie die Hersteller-Datenblätter im Anhang.

5.1 Versuch 1: Entwurf eines 6135 kHz Rechteckgenerators

Entwerfen Sie einen 6135 kHz Rechteckgenerator wie in Bild 5.2 dargestellt.

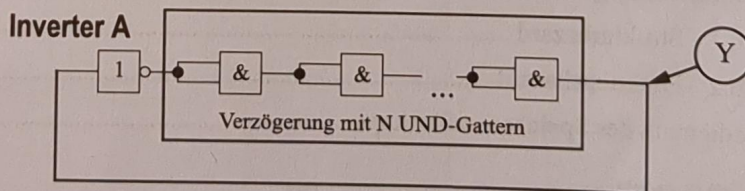


Bild 5.2 Prinzipieller Aufbau des Rechteckgenerators

Hinweis:

Verwenden Sie für diesen Versuch den linken Inverter A.



5. Kapitel: Versuchsdurchführung

Im Anhang ab Seite 41 finden Sie die Herstellerdatenblätter der verwendeten Logikbausteine. Entnehmen Sie den Datenblättern die typischen Verzögerungszeiten und berechnen Sie daraus die notwendige Anzahl der UND-Gatter, die benötigt werden.

typ. Verzögerungszeiten des Inverters: $\frac{T_{on}}{10ns}$ $\frac{T_{off}}{9ns}$

typ. Verzögerungszeiten des UND-Gatters: $\frac{LH}{10ns}$ $\frac{HL}{8ns}$

$19ns$
 $18ns$

Berechnung:

$$\text{Amplitudendauer } 163ns \rightarrow 163ns - 19ns = 144ns$$
$$\frac{144ns}{18ns} = 8 \text{ Gatter}$$

Es werden 8 Stück UND-Gatter benötigt.

Bauen Sie die Schaltung auf. **Schalten Sie die Box während der Verkabelung aus!**

Schalten Sie die Box ein und überprüfen Sie die Frequenz mit dem Oszilloskop an Punkt (Y).

! Vergewissern Sie sich, dass im **ACQUIRE** Menü **ACQUISITION-Normal** gewählt ist. Verwenden Sie die **MEASURE-Zeit-Frequenz** Funktion zur Bestimmung der Frequenz. Wackeln Sie auch an den Verbindungskabeln um den Einfluss der Leitungsführung auf die Frequenz zu sehen.

gemessene Frequenz

$$f = \frac{6}{5,06} MHz$$

Wieviele Gatter müssten Sie nehmen, wenn Sie die Verzögerung mit ODER-Gattern entwerfen würden?

Berechnung:

$$\frac{144ns}{28ns} = 5,14 \sim 5 \text{ Gatter}$$

5.2 Versuch 2: Schaltwerkentwurf für einen Getränkeautomaten

Entwerfen Sie das Steuerwerk für einen Getränkeautomaten, wie in Bild 5.3 dargestellt.

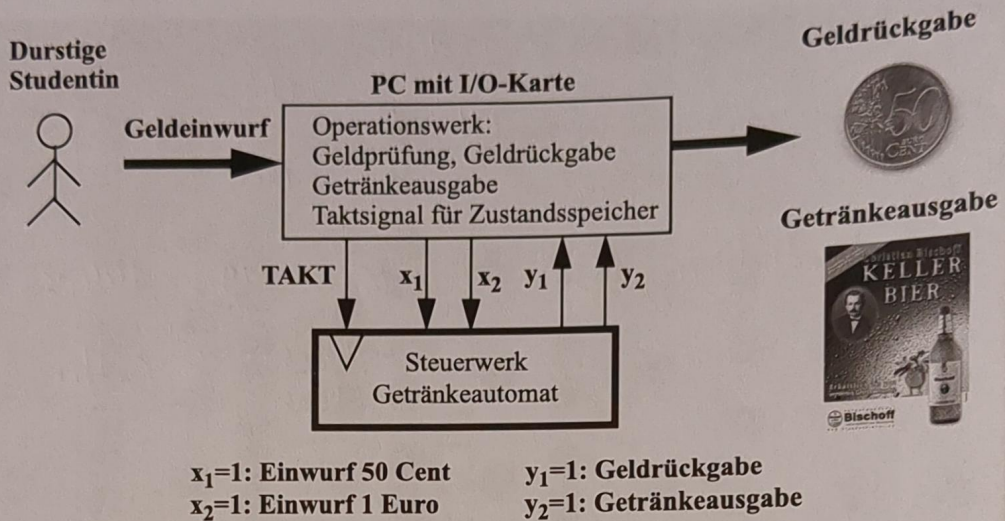


Bild 5.3 Steuerkreismodell für einen Getränkeautomaten

Die Aufgaben des Operationswerks werden vom Personal Computer an Ihrem Arbeitsplatz übernommen. Per Mausklick können Sie virtuelles Geld in den Automaten einwerfen und erhalten bei korrektem Entwurf des Steuerwerkes ein virtuelles Getränk. Weiterhin generiert der PC den Systemtakt für die Zustandsspeicher des Steuerwerks.

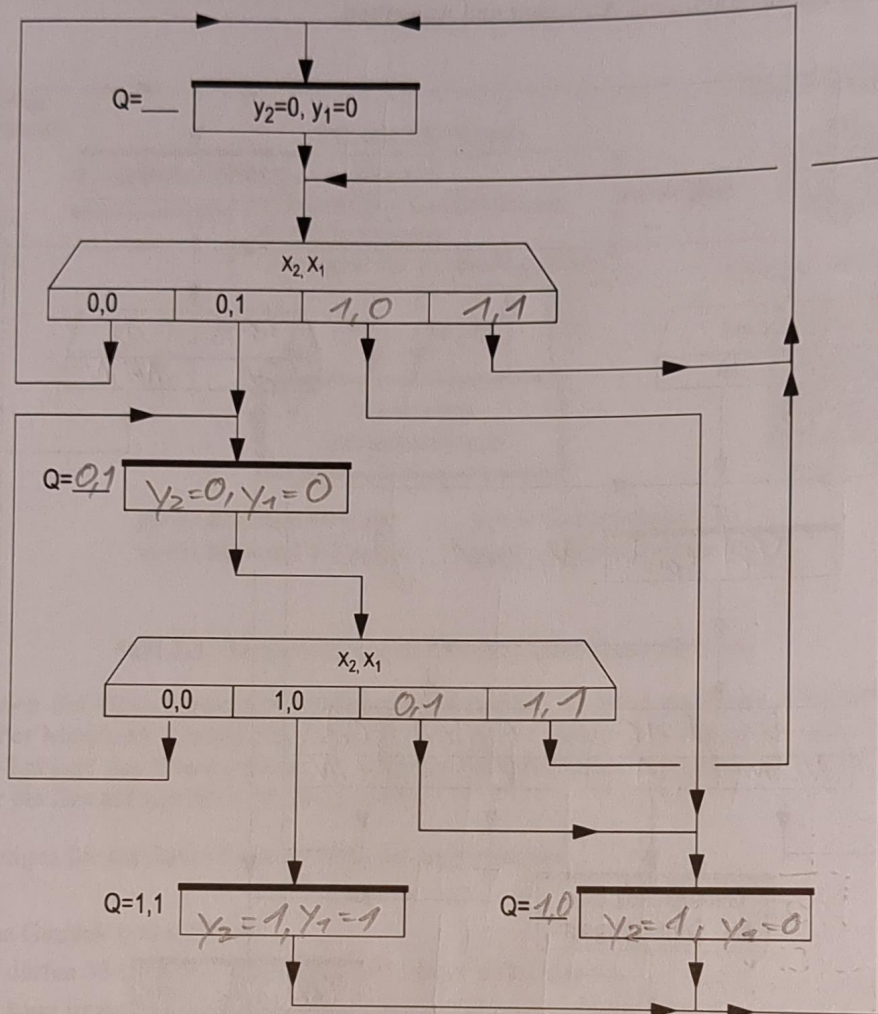
Berücksichtigen Sie bei Ihrem Entwurf folgende Bedingungen:

- Das Getränk kostet 1 Euro.
- Es dürfen 50 Cent und 1 Euro Münzen eingeworfen werden.
- Es kann immer nur ein Geldstück zu einem Zeitpunkt eingeworfen werden.
- Bei Überbezahlung gibt der Automat Restgeld aus.
- Der Entwurf soll durch ein speicherndes Schaltwerk erfolgen.
- Verwenden Sie die Kodierung der Schnittstellenvariablen wie in Bild 5.3 angegeben.
- Das Operationswerk überprüft den Geldeinwurf schneller als Geld eingeworfen werden kann. D.h. nach jeder Zustandserkennung eines Geldeinwurfs erkennt es einen Folgezustand kein Geldeinwurf.

Zur Vermeidung von Folgefehlern lassen Sie bitte Ihre Teilergebnisse direkt von Ihrem Betreuer überprüfen.

100

Kodiertes Ablaufdiagramm: $Q = q_2, q_1$



$$x_2 = \begin{cases} 1 & \text{Einwurf 1€} \\ 0 & \text{kein Einwurf} \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \text{Einwurf 50¢} \\ 0 & \text{kein Einwurf} \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$y_2 = \begin{cases} 1 & \text{Getränk} \\ 0 & \text{keine Ausgabe} \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$y_1 = \begin{cases} 1 & \text{Rückgeld} \\ 0 & \text{keine Ausgabe} \end{cases} \Leftrightarrow$$

Bild 5.5 Kodiertes Ablaufdiagramm und Bedeutung der Schnittstellenvariablen.

5. Kapitel: Versuchsdurchführung

Aufgabe 3: Erstellen Sie aus dem kodierten Ablaufdiagramm die Wahrheitstabelle der Zustandsübergangsfunktion δ und der Ausgabefunktion λ

Zustandsübergangsfunktion (alle Kombinationen x_2^n, x_1^n)

Ausgabefunktion

q_2^n	q_1^n	x_2^n	x_1^n	q_2^{n+1}	q_1^{n+1}
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0
0	0	1	1	0	0
0	1	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0
1	1	1	1	0	0

q_2^n	q_1^n	y_2^{n+1}	y_1^{n+1}
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	1	0
1	1	1	1

Der Automat soll bei **unzulässiger** Eingabe den Folgezustand $Q=0,0$ einnehmen.

Aufgabe 4: Bilden Sie die disjunktive Minimalform der Schaltnetze durch Minimierung mittels KV-Diagramm

— x_1^n —

0	0	1	0
1	0	0	1
1	0	0	1
0	0	0	0

x_2^n | q_2^n

— q_1^n —

q_2^{n+1} Minimierung

Die Schaltfunktion lässt sich aus 2 Überdeckungen ermitteln:

$$q_2^{n+1} = (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2) \vee (\bar{x}_2 \wedge x_1 \wedge \bar{q}_1 \wedge q_2)$$

— x_1^n —

0	1	0	1
0	0	0	1
0	0	0	0
0	1	1	0

x_2^n | q_2^n

— q_1^n —

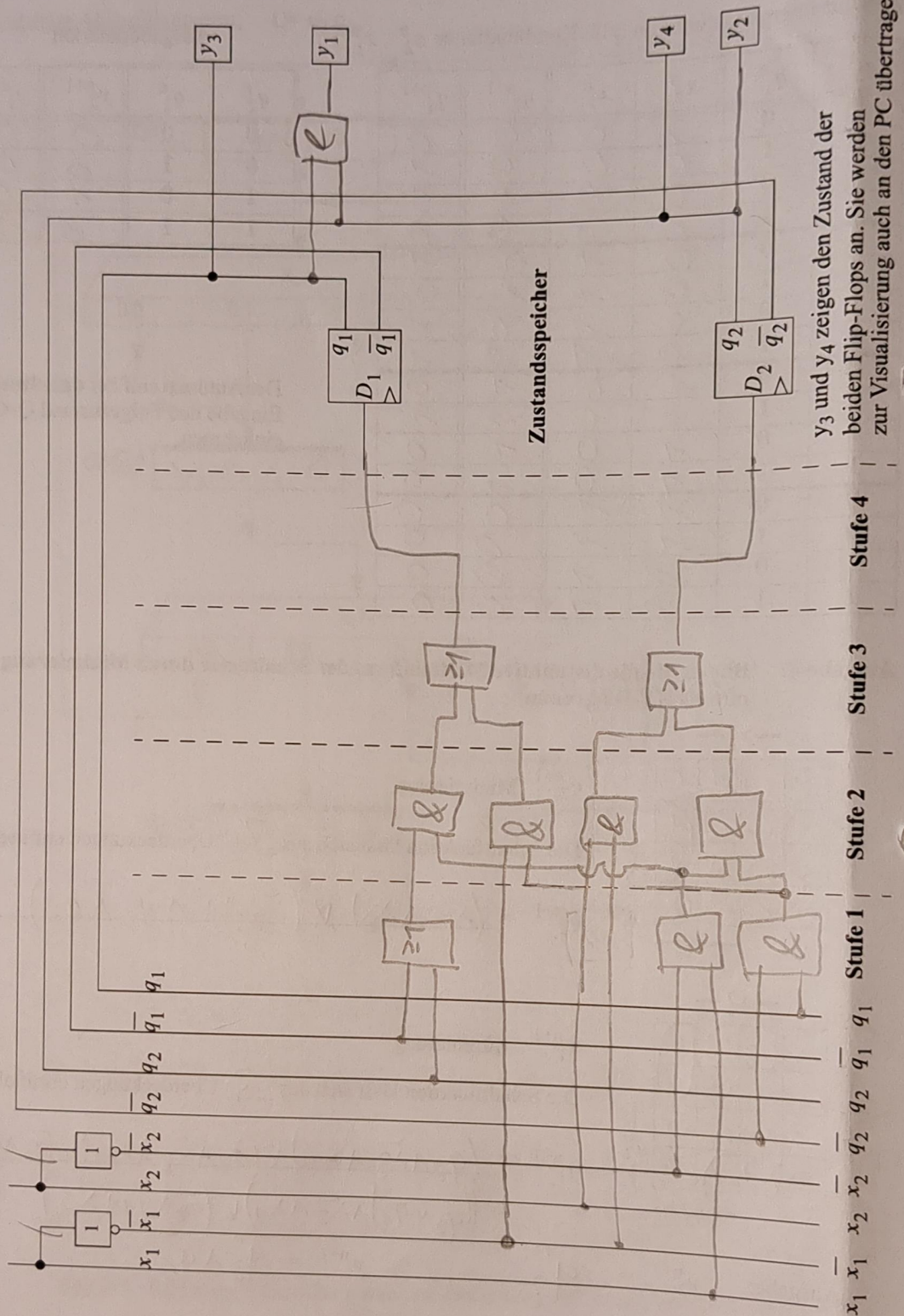
q_1^{n+1} Minimierung

Die Schaltfunktion lässt sich aus 3 Überdeckungen ermitteln:

$$q_1^{n+1} = (q_2 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1) \vee (\bar{q}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1) \vee (\bar{q}_2 \wedge q_1 \wedge \bar{x}_1) \\ = ((q_2 \vee \bar{q}_1) \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1) \vee (\bar{q}_2 \wedge q_1 \wedge \bar{x}_1)$$

Ausgabe: $y_2^{n+1} = q_2^n$ $y_1^{n+1} = q_2^n \wedge q_1^n$

Aufgabe 5: Vervollständigen Sie das Steuerwerk mit den Schaltnetzen der Zustandsübergangsfunktion δ und der Ausgabefunktion λ



y_3 und y_4 zeigen den Zustand der beiden Flip-Flops an. Sie werden zur Visualisierung auch an den PC übertragen.

Aufgabe 6: Bauen Sie das Steuerwerk mit der Digitalbox auf

Schalten Sie die Digitalbox aus. Bauen Sie das Steuerwerk von Seite 31 mit der Digitalbox auf. Zur Verkabelung stehen Ihnen Kabel mit roten und schwarzen Steckern zur Verfügung. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, sollten Sie Verbindungen immer nur von "roten Ausgängen" zu "schwarzen Eingängen" stecken. Jeder Eingang ist so nur mit einem schwarzen Stecker beschaltet.

Hinweis:

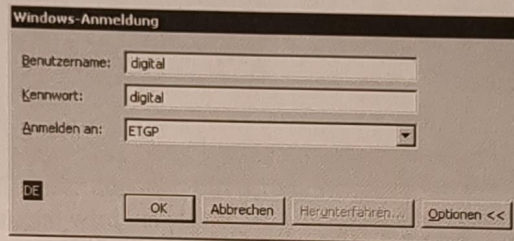
Verbinden Sie nie mehrere rote Ausgänge miteinander, da dies zur Zerstörung der Bauteile führen kann!

Wenn Sie korrekt minimiert haben, dann benötigen Sie 30 Verbindungskabel!



Verbinden Sie das Flachbandkabel (s. Bild 5.1 auf Seite 25) wieder mit der Digitalbox und schalten Sie die Box ein. **Mit dem "Reset"-Taster können und sollten Sie die Zustandsspeicher zu Beginn zurücksetzen.**

Die Funktionsweise Ihres Steuerwerks können Sie mit dem PC an Ihrem Arbeitsplatz überprüfen. Melden Sie sich mit dem **Benutzernamen "digital"** und dem **Passwort "digital"** an **"ETGP"** an:



Nach der Anmeldung erscheint die Oberfläche des virtuellen Automaten wie in Bild 5.6 auf Seite 33 dargestellt. Im linken Diagramm sehen Sie den Systemtakt und die Eingangsvariablen x_1 und x_2 . Im rechten Diagramm werden die Ausgangsvariablen y_1 und y_2 sowie die Zustandsvariablen q_1 und q_2 dargestellt. Den Systemtakt können Sie mit dem Schieberegler "Verzögerung" schneller und langsamer machen. Wenn Sie mit der Maus in das Feld "Einwurf" klicken, bekommen sie eine Auswahlbox mit vier Möglichkeiten. Von links nach rechts betrachtet sind dies:

- Einwurf: "nichts"
- Einwurf: "50 Cent"
- Einwurf: "1 Euro"
- Manipulation

Überprüfen Sie die korrekte Funktion Ihres Steuerwerkes und zeigen Sie dies Ihrem Betreuer.

Was bewirkt "Manipulation"?

Antwort:

x_1 und x_2 gleichzeitig an $\rightarrow$ 1€ & 50ct gleichzeitig eingeworfen

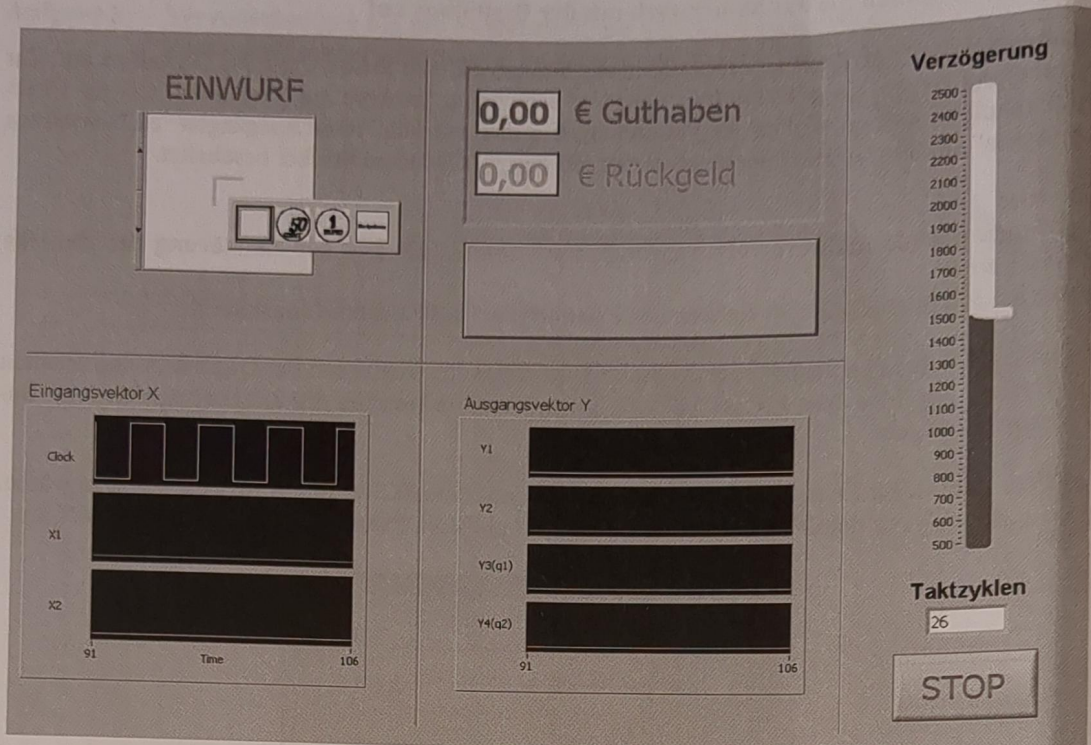


Bild 5.6 Virtueller Getränkeautomat

5.3 Versuch 3: Untersuchungen zu Laufzeitfehlern

Aufgabe 1: Behebung der Fehlfunktion eines Schaltnetzes

Eine Marktstudie hat ergeben, dass in Getränkemärkten von Universitätsstädten folgende Getränkekombinationen am häufigsten von Studenten gekauft werden:

{nur Bier}; {Bier und Cola}; {Cola und Whisky}; {Bier, Cola und Whisky}

Um seinen Umsatz zu steigern lässt ein Marktleiter von seinen Mitarbeitern Getränkekästen mit den genannten Kombinationen befüllen. Die Kästen werden anschließend von einem Testsystem überprüft. Aus dem Testsystem kommen drei Signale, die mit x_1 , x_2 und $clock$ gekennzeichnet sind und deren Bedeutung sich wie folgt gestaltet:

$x_1 = 1 \Leftrightarrow$ Im Kasten ist Bier

$x_2 = 1 \Leftrightarrow$ Im Kasten ist Cola

$clock = 1 \Leftrightarrow$ Im Kasten ist Whisky

Leider werden von den Mitarbeitern die Kästen häufig falsch bestückt. Daher hat sich der Betriebs-elektroniker folgendes Schaltnetz überlegt, mit dem er bei einer fehlerhaften Bestückung ein Alarmsignal auslöst. Das Alarmsignal wird bei einem 1-0 Übergang des Ausgangs y ausgelöst.

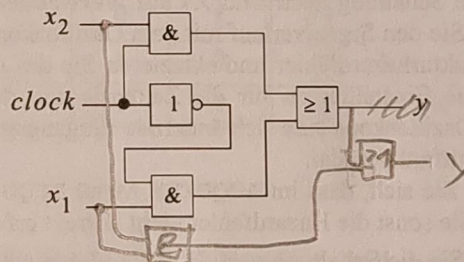


Bild 5.7 Schaltnetz zur Überprüfung der Bestückung

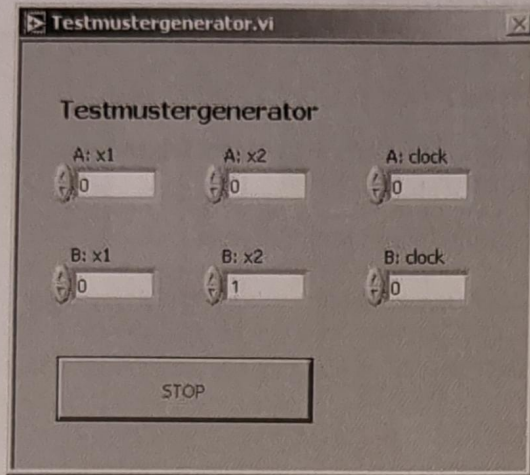
Trotz eines sorgfältigen Aufbaus wird hin und wieder der Alarm auch bei korrekt bestückten Getränkekästen ausgelöst.

Ihre Aufgabe: Untersuchen Sie die Schaltung und versuchen Sie den Fehler zu beheben.

Als Hilfsmittel steht Ihnen ein digitales Speicheroszilloskop und ein virtueller Testmuster-generator (s. Bild 5.8) zur Verfügung. Am Testmuster-generator können Sie die Belegung der Variablen mit x_1 , x_2 und $clock$ für die beiden Zustände A und B definieren, die dann kontinuierlich im Wechsel ausgegeben werden.

Hinweis:

Der Testmuster-generator greift auf dieselben Hardware-Ressourcen zu, wie der Getränkeautomat. Beenden Sie daher den Getränkeautomat vor dem Start des Testmuster-generators (Icon auf Desktop).



Beispielausgabe

	A	B	A	B	A	B	
X1	0	0	0	0	0	0	...
X2	0	1	0	1	0	1	
clock	0	0	0	0	0	0	

Zeit

Bild 5.8 Virtueller Testmustergenerator und Beispielausgabe

Finden Sie Lösungen zu den folgenden Fragen. Platz für Ihre Lösungen haben Sie ab Seite 36.

Um Folgefehler zu vermeiden lassen Ihre Antworten direkt von den Betreuern überprüfen!:

1. Erfüllt die Schaltnetzfunktion die geforderten Bedingungen? Überprüfen Sie dies durch Aufstellen der Wertetabelle und des KV-Diagramms.
2. Stellt das Schaltnetz die Struktur für einen Strukturhazard bereit? Wenn ja, bei welchen Getränkekastenwechseln tritt dies auf?
3. Bauen Sie die Schaltung nach Bild 5.7 auf. **Verwenden Sie den rechten Inverter B.** Untersuchen Sie den Signalverlauf mit dem Oszilloskop. Oszillografieren Sie den auftretenden Strukturhazardfehler und skizzieren Sie das Oszillogramm in ihr Protokoll. Vermerken Sie Einstellungen für die Zeitbasis und die Skalierung. Stellen Sie auf Kanal 1 des Oszilloskops eine sich ändernde Eingangsgröße und auf Kanal 2 den Ausgang der Schaltfunktion dar.
Vergewissern Sie sich, dass im **ACQUIRE** Menü **ACQUISITION-Spitzendet.** gewählt ist, da Sie sonst die Hazardfehler nicht korrekt erfassen.
4. Modifizieren Sie die Schaltung nach Bild 5.7, damit sie frei von einem Strukturhazard ist. Skizzieren sie den Schaltplan, bauen Sie ihre Schaltung auf und überprüfen Sie ob der Strukturhazardfehler noch vorhanden ist.
5. Bauen Sie die Schaltung wieder zurück und untersuchen Sie die nicht modifizierte Schaltung nach Bild 5.7 auf Funktionshazards. Vervollständigen Sie die Tabelle der Funktionshazardübergänge auf Seite 37 mit der Belegung B bei der Sie einen Funktionshazardfehler erwarten. Überprüfen Sie Ihr Ergebnis mit dem Testmustergenerator und dem Oszilloskop.

Notieren Sie die Art des Hazardfehlers (Positiver oder Negativer Puls) in Abhängigkeit der Flanke des Clock-Signales.

Zur Verdeutlichung ist die erste Zeile bereits ausgefüllt und das entsprechende Oszillogramm abgebildet.

Beachten Sie, dass sich bei der Belegung B zusätzlich zum Clock Signal nur eine weitere Eingangsgröße x_1 oder x_2 ändern darf.

5. Kapitel: Versuchsdurchführung

zu 1 und 2.: Wertetabelle, KV-Diagramm

	x ₂			
x ₁	0	0	1	0
	1	1	1	0
-Clock-				

$$y = ((x_2 \wedge \text{clock}) \vee (x_1 \wedge \overline{\text{clock}})) \vee (x_1 \wedge x_2)$$

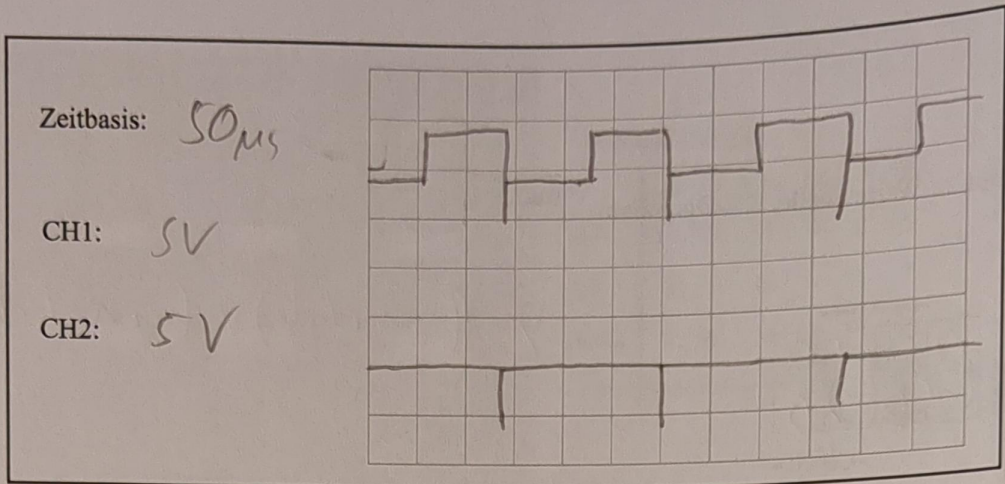
x ₁	x ₂	clock	y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

Ja, da ~~clock~~ und $\overline{\text{clock}}$
nicht gleichzeitig
umschalten
→ „1 gate mehr“

} Strukturhazard

zu 3.:

Wählen Sie die Zeitbasis so, dass die Hazardfehler als Nadelimpulse dargestellt werden.

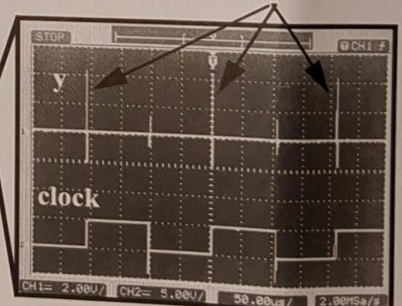


zu 4: Schaltplan / Erklärung - Was haben Sie getan?

zu 5: Tabelle der Funktionshazardübergänge der Originalschaltung nach Bild 5.7

Belegung A x1 x2 clock y	Belegung B x1 x2 clock y	Hazardfehler ┐ oder ┘	Clockflanke ┐ oder ┘
0 0 0 0	1 0 1 0	┐	┐
0 1 1 1	1 0 0 1	┘	┘
0 0 1 0	0 1 0 0	✓	✓
1 0 0 1	1 1 1 1	┘	┘

Hazardfehler



5. Kapitel: Versuchsdurchführung

Wie können Sie Funktionshazardfehler vermeiden? Denken Sie hier auch an die Arbeitsweise der Mitarbeiter, die die Getränkekästen bestücken.

Ausgangswerte mitteilen

Bevor Sie Ihren Platz verlassen stellen Sie bitte sicher, dass Sie ...

1. ... am PC abgemeldet sind.
2. ... die Digitalbox abgeschaltet haben.
3. ... alle Kabel aus der Box gezogen und voneinander getrennt haben.