

64-040 Modul IP7: Rechnerstrukturen

[http://tams.informatik.uni-hamburg.de/
lectures/2011ws/vorlesung/rs](http://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2011ws/vorlesung/rs)

Kapitel 13

Andreas Mäder



Universität Hamburg
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Fachbereich Informatik

Technische Aspekte Multimodaler Systeme

Wintersemester 2011/2012



Kapitel 13

Zeitverhalten
Modellierung
Hazards



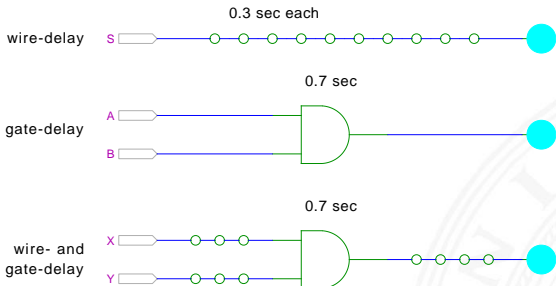
Zeitverhalten einer Schaltung: Modellierung

Wie wird das Zeitverhalten eines Schaltnetzes modelliert?

Gängige Abstraktionsebenen mit zunehmendem Detaillierungsgrad

1. algebraische Ausdrücke: keine zeitliche Abhängigkeit
2. „fundamentales Modell“: Einheitsverzögerung des algebraischen Ausdrucks um eine Zeit τ
3. individuelle Gatterverzögerungen
 - ▶ mehrere Modelle, unterschiedlich detailliert
 - ▶ Abstraktion elektrischer Eigenschaften
4. Gatterverzögerungen + Leitungslaufzeiten (geschätzt, berechnet)
5. Differentialgleichungen für Spannungen und Ströme (verschiedene „Ersatzmodelle“)

Gatterverzögerung vs. Leitungslaufzeiten



- ▶ früher: Gatterverzögerungen \gg Leitungslaufzeiten
- ▶ Schaltungen modelliert durch Gatterlaufzeiten
- ▶ aktuelle „Submicron“-Halbleitertechnologie: Leitungslaufzeiten \gg Gatterverzögerungen



Zeitverhalten

- ▶ alle folgenden Schaltungsbeispiele werden mit Gatterverzögerungen modelliert
- ▶ Gatterlaufzeiten als Vielfache einer Grundverzögerung (τ)
- ▶ aber Leitungslaufzeiten ignoriert

- ▶ mögliche Verfeinerungen
 - ▶ gatterabhängige Schaltzeiten für INV, NAND, NOR, XOR etc.
 - ▶ unterschiedliche Schaltzeiten für Wechsel: $0 \rightarrow 1$ und $1 \rightarrow 0$
 - ▶ unterschiedliche Schaltzeiten für 2-, 3-, 4-Input Gatter
 - ▶ Schaltzeiten sind abhängig von der Anzahl nachfolgender Eingänge (engl. *fanout*)



Exkurs: Lichtgeschwindigkeit und Taktraten

- ▶ Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $c \approx 300\,000 \text{ km/sec}$
 $\approx 30 \text{ cm/ns}$
- ▶ in Metallen und Halbleitern langsamer: $c \approx 20 \text{ cm/ns}$
- ⇒ bei 1 Gigahertz Takt: Ausbreitung um ca. 20 Zentimeter

Abschätzungen:

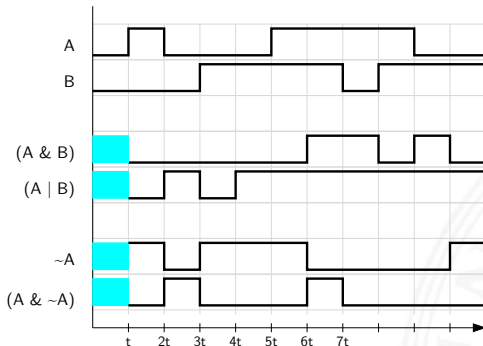
- ▶ Prozessor: ca. 2 cm Diagonale $\approx 10 \text{ GHz}$ Taktrate
- ▶ Platine: ca. 20 cm Kantenlänge $\approx 1 \text{ GHz}$ Takt
- ▶ UKW-Radio: 100 MHz, 2 Meter Wellenlänge
- ⇒ prinzipiell kann (schon heute) ein Signal innerhalb eines Takts nicht von einer Ecke des ICs zur Anderen gelangen



Impulsdiagramme

- ▶ **Impulsdiagramm** (engl. *waveform*): Darstellung der logischen Werte einer Schaltfunktion als Funktion der Zeit
- ▶ als Abstraktion des tatsächlichen Verlaufs
- ▶ Zeit läuft von links nach rechts
- ▶ Schaltfunktion(en): von oben nach unten aufgelistet
- ▶ Vergleichbar den Messwerten am Oszilloskop (analoge Werte) bzw. den Messwerten am Logic-State-Analyzer (digitale Werte)
- ▶ ggf. Darstellung mehrerer logischer Werte (z.B. 0,1,Z,U,X)

Impulsdiagramm: Beispiel



- ▶ im Beispiel jeweils eine „Zeiteinheit“ Verzögerung für jede einzelne logische Operation
- ▶ Ergebnis einer Operation nur, wenn die Eingaben definiert sind
- ▶ im ersten Zeitschritt noch undefinierte Werte



Hazards

- ▶ **Hazard:** die Eigenschaft einer Schaltfunktion, bei bestimmten Kombinationen der individuellen Verzögerungen ihrer Verknüpfungsglieder ein Fehlverhalten zu zeigen
- ▶ **Hazardfehler:** das aktuelle Fehlverhalten einer realisierten Schaltfunktion aufgrund eines Hazards



Hazards: Klassifikation

nach der Erscheinungsform am Ausgang

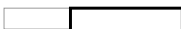
- ▶ **statisch**: der Ausgangswert soll stabil sein, es tritt aber ein Wechsel auf
- ▶ **dynamisch**: der Ausgangswert soll (einmal) wechseln, es tritt aber ein mehrfacher Wechsel auf

nach den Eingangsbedingungen, unter denen der Hazard auftritt

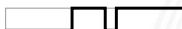
- ▶ **Strukturhazard**: bedingt durch die Struktur der Schaltung, auch bei Umschalten eines einzigen Eingangswertes
- ▶ **Funktionshazard**: bedingt durch die Funktion der Schaltung

Hazards: statisch vs. dynamisch

erwarteter Signalverlauf



Verlauf mit Hazard



statischer 1-Hazard

statischer 0-Hazard

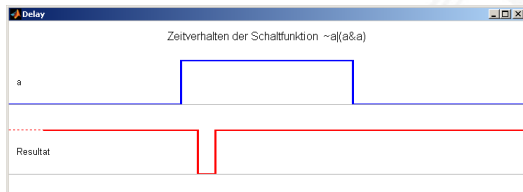
dynamischer 1-Hazard

dynamischer 0-Hazard

- ▶ 1-Hazard wenn fehlerhaft der Wert 1 auftritt, und umgekehrt
- ▶ es können natürlich auch mehrfache Hazards auftreten
- ▶ Hinweis: Begriffsbildung in der Literatur nicht einheitlich

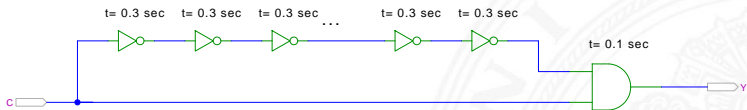
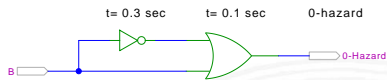
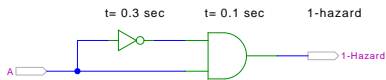
Hazards: Strukturhazard

- ▶ **Strukturhazard** wird durch die gewählte Struktur der Schaltung verursacht
- ▶ auch, wenn sich nur eine Variable ändert
- ▶ Beispiel: $f(a) = \neg a \vee (a \wedge a)$
 $\neg a$ schaltet schneller ab, als $(a \wedge a)$ einschaltet



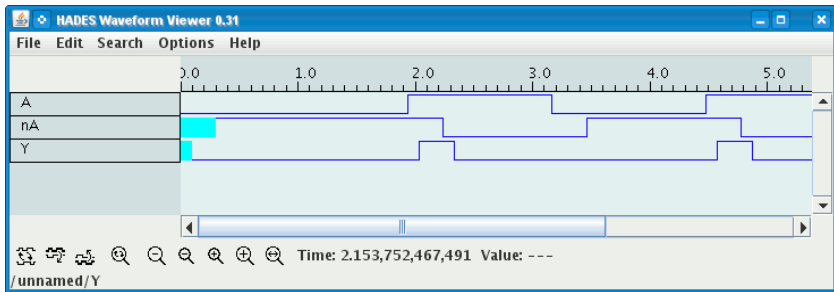
- ▶ Hazard kann durch Modifikation der Schaltung beseitigt werden
 im Beispiel mit: $f(a) = 1$

Strukturhazards: Beispiele



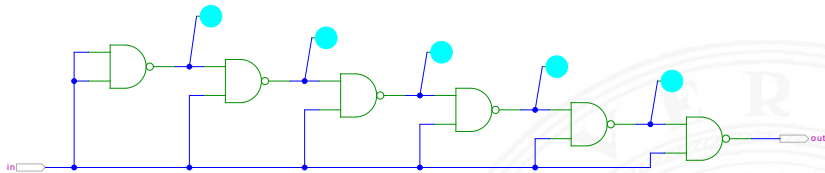
- ▶ logische Funktion ist $(a \wedge \bar{a}) = 0$ bzw. $(a \vee \bar{a}) = 1$
- ▶ aber ein Eingang jeweils durch Inverter verzögert
- ⇒ kurzer Impuls beim Umschalten von $0 \rightarrow 1$ bzw. $1 \rightarrow 0$

Strukturhazards: Beispiele (cont.)



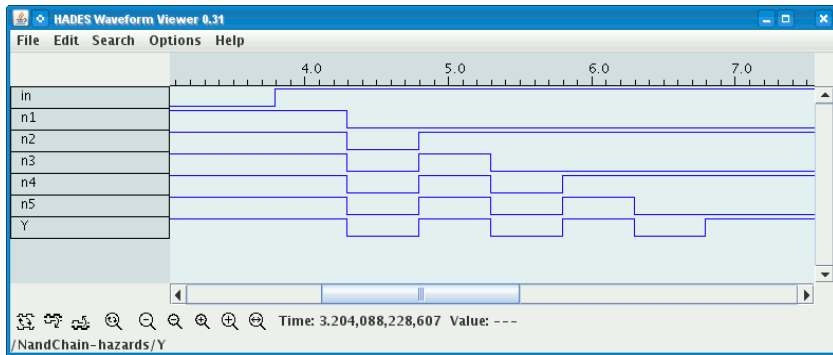
- ▶ Schaltung $(a \wedge \bar{a}) = 0$ erzeugt (statischen-1) Hazard
- ▶ Länge des Impulses abhängig von Verzögerung im Inverter
- ▶ Kette von Invertern erlaubt Einstellung der Pulslänge

Strukturhazards extrem: NAND-Kette



- ▶ alle NAND-Gatter an Eingang *in* angeschlossen
- ▶ $in = 0$ erzwingt $y_i = 1$
- ▶ Übergang *in* von 0 auf 1 startet Folge von Hazards...

Strukturhazards extrem: NAND-Kette (cont.)



- ▶ Schaltung erzeugt Folge von (dynamischen-0) Hazards
- ▶ Anzahl der Impulse abhängig von Anzahl der Gatter

Strukturhazards im KV-Diagramm

		x1 x0			
		00	01	11	10
x2	0	0	0	1	0
	1	1	1	1	0

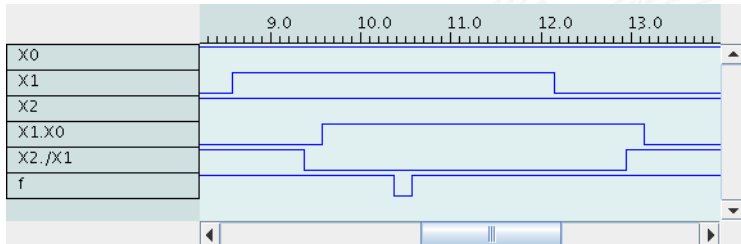
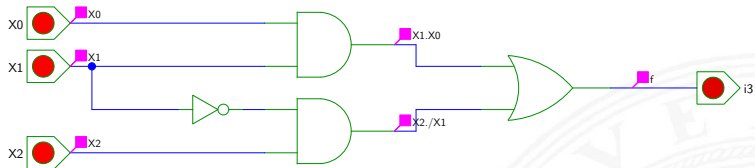
		x1 x0			
		00	01	11	10
x2	0	0	0	1	0
	1	1	1	1	0

- ▶ Funktion $f = (x_2 \bar{x}_1) \vee (x_1 x_0)$
- ▶ realisiert in disjunktiver Form mit 2 Schleifen

Strukturhazard beim Übergang von $(x_2 \bar{x}_1 x_0)$ nach $(x_2 x_1 x_0)$

- ▶ Gatter $(x_2 \bar{x}_1)$ schaltet ab, Gatter $(x_1 x_0)$ schaltet ein
- ▶ Ausgang evtl. kurz 0, abhängig von Verzögerungen

Strukturhazards im KV-Diagramm (cont.)



Strukturhazards beseitigen

		x1 x0			
		00	01	11	10
x2	0	0	0	1	0
	1	1	1	1	0

		x1 x0			
		00	01	11	10
x2	0	0	0	1	0
	1	1	1	1	0

▶ Funktion $f = (x_2 \bar{x}_1) \vee (x_1 x_0)$

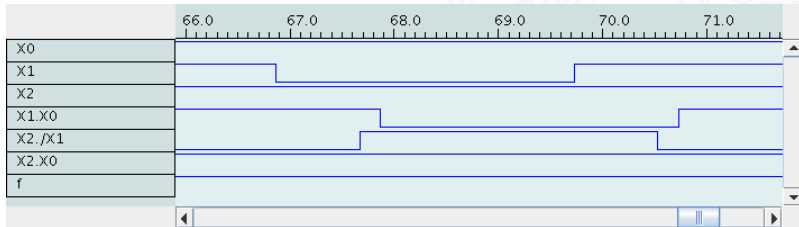
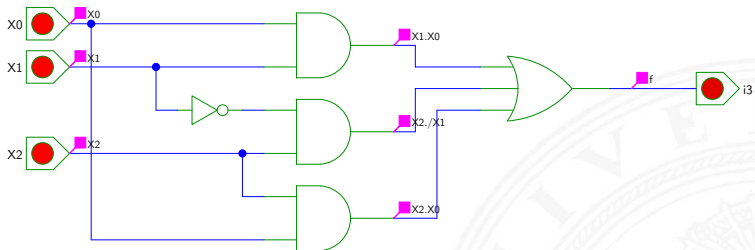
▶ realisiert in disjunktiver Form mit **3 Schleifen**

$$f = (x_2 \bar{x}_1) \vee (x_1 x_0) \vee (x_2 x_0)$$

+ Strukturhazard durch zusätzliche Schleife beseitigt

– aber höhere Hardwarekosten als bei minimierter Realisierung

Strukturhazards beseitigen (cont.)



Hazards: Funktionshazard

- ▶ **Funktionshazard** kann bei gleichzeitigem Wechsel mehrerer Eingangswerte als **Eigenschaft der Schaltfunktion** entstehen
- ▶ Problem: Gleichzeitigkeit an Eingängen
- ⇒ Funktionshazard kann nicht durch strukturelle Maßnahmen verhindert werden

- ▶ Beispiel: Übergang von $(x_2 \bar{x}_1 x_0)$ nach $(\bar{x}_2 x_1 x_0)$

		x1 x0			
		00	01	11	10
x2	0	0	0	1	0
	1	1	1	1	0

		x1 x0			
		00	01	11	10
x2	0	0	0	1	0
	1	1	1	1	0