

Kapitel 12

Timing, Speichernde Elemente

Bernd Becker – Technische Informatik II

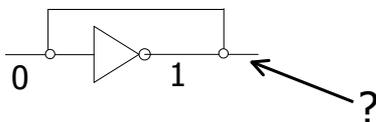
Ausblick

Bisher wurden nur *kombinatorische* Schaltkreise

$SK = (X, G, Y_0, in, out, Y_1)$

betrachtet, wobei G *azyklisch* war.

Was geschieht, wenn G *nicht zykliefrei* ist?



→ Schaltpläne, Schaltungen

Vorgehen

- Exkurs über physikalische Eigenschaften von Gattern → „Approximation“ des Zeitverhaltens
- Analyse *spezieller* Schaltpläne mit Zyklen, nämlich Speicherbausteine wie z.B. Flipflops, Latches, Register, RAMs, ROMs, ...
- Betrachte nur noch bestimmte Teilklassen von Schaltplänen: Zusammenschaltungen von Speicherbausteinen und Schaltkreisen nach bestimmten Regeln
→ *sequentielle SKs* bzw. *Schaltwerke*
- Diskreter Aufbau eines gesamten Rechners (Kap. 13 ff) mit Analyse des Zeitverhaltens
→ Einsicht in die Funktionsweise eines Rechners (und z.T. auch in die eines Entwurfssystems)

12.1 Physikalische Eigenschaften und Timing

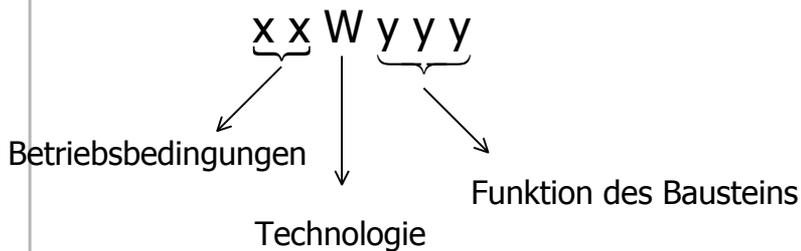
Physikalische Eigenschaften von Gattern

3 wesentliche Punkte:

1. logische Signale \cong Spannungspegel
2. Fanout von Gattern ist begrenzt
3. Gatter benötigen Zeit zum Schalten!!

Beispiel:

Notation zur Kennzeichnung von Bausteinen:



Beispiel: (ff)

Bausteinfamilie FAST
(Fairchild Advanced Schottky TTL)
(spezifiziert in *FAST DATA BOOK, 1985*)

Bsp: 54F04 =
Chip mit 6 Invertern in FAST Technologie,
militärischer Bereich

Zur Notation:

x x:

- Temperaturbereich, Störanfälligkeit gegen Strahlung, Ausfallsicherheit
- 54 = militärischer Bereich
- 74 = kommerzieller Bereich

y y y:

- Funktion unabhängig von Technologie und Betriebssystem

W:

F: FAST = Fairchild Advanced Schottky TTL
FACT: Fairchild Advanced CMOS Technology
TTL: Transistor-Transistor Logic
LS: Low Power Schottky

Logische Signale ↔ physikalische Signale

In jeder Technologie gibt es eine
Versorgungsspannung V_{CC} (z.B. $V_{CC} = 5V$).

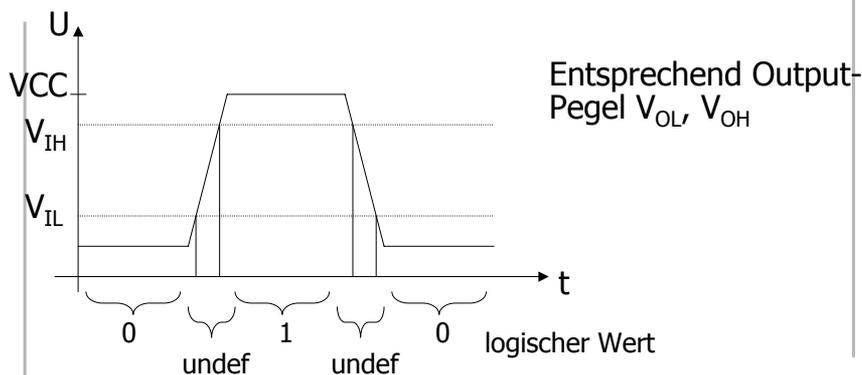
Zwei Input-Pegel: V_{IH} (*V in high*) und V_{IL} (*V in low*)

→ Eine Spannung $U \in [0, V_{CC}]$ am Eingang eines Gatters
wird als logischer Wert $I(U)$ interpretiert.

$$I(U) = \begin{cases} 0 & , \text{ falls } U \leq V_{IL} \\ 1 & , \text{ falls } U \geq V_{IH} \\ \text{undef.} & , \text{ sonst} \end{cases}$$

Logische Signale ↔ physikalische Signale (ff)

Bsp.: TTL-Pegel (FAST) $V_{IL} = 0.8V$, $V_{IH} = 2V$



Beispiel zum Output

FAST-Bausteine mit $V_{OL} \in [0.5, 0.55]$, $V_{OH} \in [2, 2.7]$

Will man Ausgang u eines Gatters mit Eingang v verbinden, dann sollte gelten:

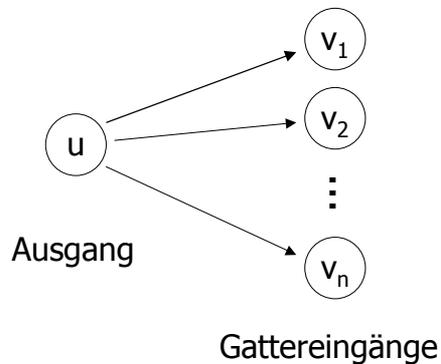
$$V_{OL}^u \leq V_{IL}^v, \quad V_{OH}^u \geq V_{IH}^v,$$

sonst werden Signale falsch interpretiert.

Bsp.: FAST benutzt TTL-Pegel

→ Hintereinanderschalten möglich

Fanout – graphisch veranschaulicht



Fanout bei FAST

Falls am Ausgang u Spannung U anliegt, dann gilt
(Kirchhoff'sches Gesetz):

$$I(U) = \sum_{j=1}^n I^j(U)$$

($I(U)$ = Stromstärke an Ausgang u,

$I^j(U)$ = Stromstärke an Eingang v_j)

v_j verbrauchen Strom, aber u kann nicht unbegrenzt
Strom liefern!!

Fanout bei FAST ff.

In Katalogen nur

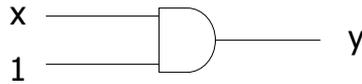
- I_{OL}, I_{OH} für Ausgänge (Ausgangsstrom bei Signal low/high)
- I_{IL}, I_{IH} für Eingänge (Eingangsstrom für Signal low/high)

⇒ v_1, \dots, v_n wird nur dann an u angeschlossen,

wenn
$$I_{OL} \geq \sum_{j=1}^n I_{IL}^j, \quad I_{OH} \geq \sum_{j=1}^n I_{IH}^j$$

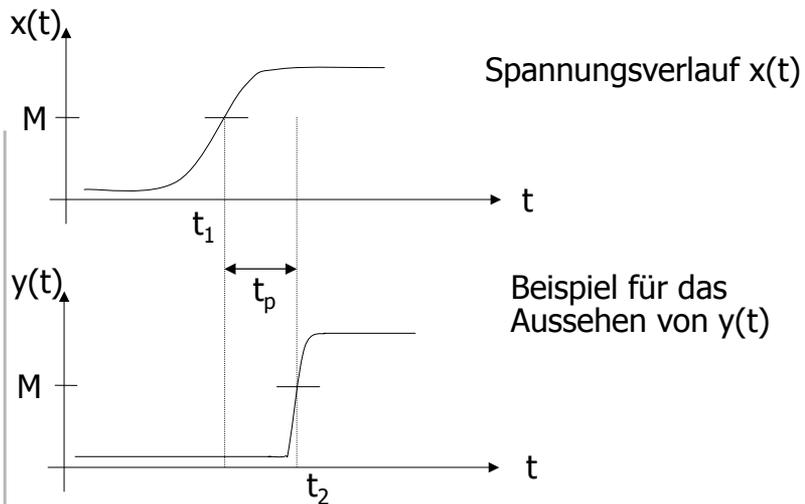
Verzögerungszeiten

Situation:



BB TI II 12.1/15

Spannungsverlauf $x(t)$, $y(t)$



BB TI II 12.1/16

Allgemeine Bemerkung zu Verzögerungszeiten

Im allgemeinen gilt nicht $y(t) = x(t - t_p)$, so dass man dann einfach t_p als Verzögerungszeit definieren kann. $y(t)$ wird *verformt*.

Hier: Verzögerungszeit bzgl. einer festen Spannung M mit $V_{IL} < M < V_{IH}$

Bestimme t_1, t_2 mit $x(t_1) = y(t_2) = M$

→ $t_p = t_2 - t_1$ (*propagation delay* = Verzögerungszeit)

Beispiel

FAST-Bausteine für $M = 1.5V$ spezifiziert.

Bausteine 74F00, 74F04, 74F08, 74F32, 74F86:
(NAND, NOT, AND, OR, EXOR)

t_p zwischen 1.5 und 8.0 ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9}\text{s}$)

Angaben zur Verzögerungszeit

In der Regel verschiedene Verzögerungszeiten für Übergänge $0 \rightarrow 1$ und $1 \rightarrow 0$.

Daher nicht t_p angegeben, sondern

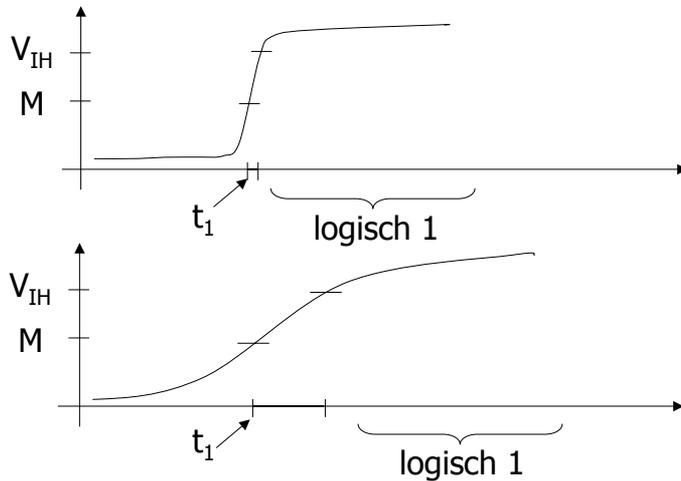
- t_{PLH} : Verzögerungszeit bei $0 \rightarrow 1$
- t_{PHL} : Verzögerungszeit bei $1 \rightarrow 0$

Modellierung der Verzögerungszeit

Problem bei Modellierung der Verzögerungszeit bzgl. fester Spannung M:

Keine Aussage darüber, wann logische Signale 0 bzw. 1 sind,
d.h. physikalische Signale unterhalb V_{IL}
bzw. oberhalb V_{IH} sind.

Illustration des Problems



Anstiegs- und Abfallzeit

Für jedes Signal braucht man also zusätzliche Informationen über:

- Anstiegszeit (*rise time*) =
Zeit, in der Signal von V_{IL} nach V_{IH} steigt
- Abfallzeit (*fall time*) =
Zeit, in der Signal von V_{IH} nach V_{IL} fällt

Beschränkung dieser Zeiten

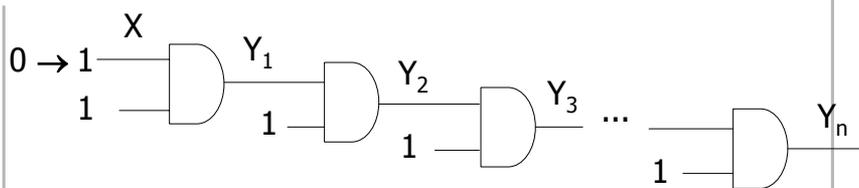
Die in unseren Analysen verwendeten Gatter haben die folgende angenehme Eigenschaft:

$\exists \delta$ mit folgender Eigenschaft:

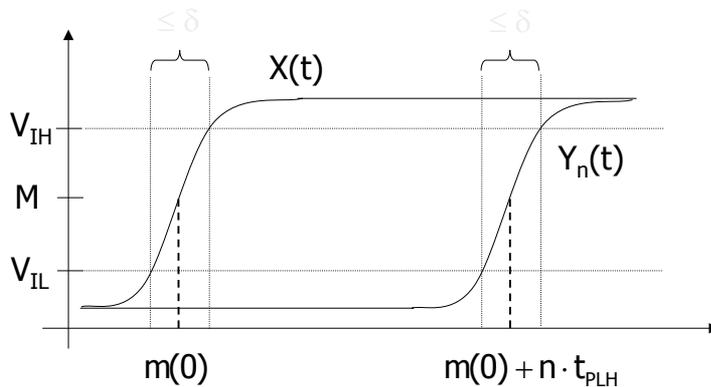
Falls rise/fall time $\leq \delta$ am Gattereingang,
dann rise/fall time $\leq \delta$ am Gatterausgang.

Bsp.: FAST-Bausteine: $\delta \approx 2.5$ ns

Analyse der Verzögerungszeit einer Kette von n Gattern



Analyse der Verzögerungszeit einer Kette von n Gattern (ff)



Analyse der Verzögerungszeit einer Kette von n Gattern (ff)

Durchläuft $X(t)$ nach Zeit $m(0)$ die Spannung M ,
dann durchläuft $Y_n(t)$ die Spannung M nach
 $m(0) + n \cdot t_{PLH}$.

Falls $X(t)$ mit Anstiegszeit $\leq \delta$,
dann auch $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$.

Also ist Y_n auf jeden Fall zur Zeit
 $m(0) + n \cdot t_{PLH} + \delta$ logisch 1.

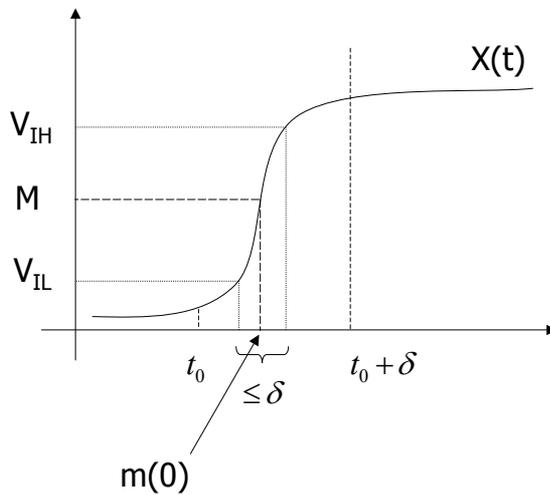
Allgemein:

Die Zeiten, an denen die entsprechenden Signale wohldefinierte logische Werte 0, 1 annehmen, unterscheiden sich von denen für M um höchstens δ .

Bemerkung:

Eine rise/fall time $\leq \delta$ an den primären Eingängen einer Schaltung kann man garantieren, wenn man den Schaltvorgang zur Zeit t_0 beginnt und spätestens zur Zeit $t_0 + \delta$ abschließt.

Beispiel zur Bemerkung



Bemerkung (ff)

Beginnt man im Beispiel den Schaltvorgang bei t_0
und beendet ihn bei $t_0 + \delta$,
dann gilt $m(0) \leq t_0 + \delta$
und Y_n ist spätestens nach
 $t_0 + n \cdot t_{PLH} + 2\delta$
logisch 1.

Vereinbarung:

Im folgenden soll

Signal X wird zum Zeitpunkt t_1 abgesenkt/gehoben
bedeuten

X wird abgesenkt/gehoben mit $X(t_1) = M$.

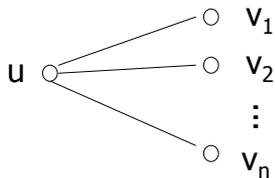
Kapazitive Last

Verzögerungszeiten von Gattern sind nicht konstant,
sondern werden beeinflusst durch

- Betriebstemperatur
- Fertigungsprozess des Chips
- kapazitive Last am Gatterausgang

Kapazitive Last (1)

Kapazitive Last am Ausgang u entsteht dadurch, dass sich die Eingänge v_1, \dots, v_n , die mit u verbunden sind, wie Kondensatoren verhalten, die beim Schalten ge- bzw. entladen werden müssen.



Kapazitive Last (2)

Zusätzlich wird auch der Leitung zwischen u und v_i ($\forall i$) eine kapazitive Last zugeordnet.

Einheit für kapazitive Lasten:

1 Farad (1 F)

Jedem Eingang von Gattern wird eine kapazitive Last zugeordnet. (FAST: 4 – 5 pF)

Kapazitive Last (3)

Für die Gesamtlast C an u gilt:

$$C = C_L + \sum_{j=1}^n C_j$$

$$C = \sum_{j=1}^n C_j$$

falls die Leitungskapazität ignoriert werden kann.

Dies ist auf Leiterplattenebene in der Regel der Fall.

Kapazitive Last (4)

Verzögerungszeiten t_p werden in der Regel für eine Standardlast C_0 angegeben.

(FAST: 50 pF)

Ist $C \neq C_0$, so gilt:

$$t_p(C) = t_p(C_0) + \alpha_u \cdot (C - C_0)$$

mit α_u technologieabhängige Konstante

$$\text{FAST: } \alpha_u = 0.03 \frac{\text{ns}}{\text{pF}}$$

Kapazitive Last (5)

Abschätzung:

Wieviele Eingänge kann man an Ausgänge hängen,
ohne dass $t_p(C_0)$ überschritten wird?

Kapazitive Last (6)

Annahme:

$C_{\max} = 5 \text{ pF}$ für jeden Eingang.

Hängt man maximal $n = 20$ Eingänge an einen Ausgang, so gilt

Eingänge an einen Ausgang, so gilt

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \leq n \cdot C_{\max} \leq n_0 \cdot C_{\max} = C_0$$

und damit $t_p(C) \leq t_p(C_0)$

→ Fanoutbeschränkung ≤ 10 für FAST-Bausteine

Worst-case Timing-Analyse

Wegen Abhängigkeit der Verzögerungszeit von Temperatur oder Fertigungsprozess werden vom Hersteller keine festen Zeiten t_{PLH}/t_{PHL} angegeben, sondern 3 Werte:

- τ^{\min} = untere Schranke
- τ^{\max} = obere Schranke
- τ^{typ} = *typischer* Wert (???)

min, max und typ

Bei Temperaturen im Bereich T
(kommerzieller Temperaturbereich $0^\circ - 70^\circ \text{ C}$,
militärischer Temperaturbereich $-55^\circ - 125^\circ \text{ C}$)
und Last C_0 gilt für tatsächliche Verzögerungszeit t_p :

$$\tau^{\min} \leq t_p \leq \tau^{\max}$$

min, max und typ (ff)

Für τ^{typ} gilt ebenfalls $\tau^{\text{min}} \leq \tau^{\text{typ}} \leq \tau^{\text{max}}$.

Beim Rechnen mit τ^{typ} macht man einen
Fehler mit unbekannter Größe.

→ kein Rechnen mit τ^{typ} , sondern mit
Intervallen $(\tau^{\text{min}}, \tau^{\text{max}})$

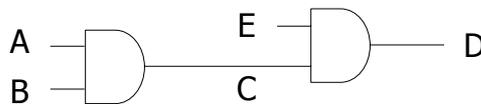
Zeitintervalle bei Timing-Analysen

- zur Zeit (a, b) heißt:
frühestens zur Zeit a , spätestens bei b
- zur Zeit $a \cong$ zur Zeit (a, a)
- $\min(a, b) = a$,
 $\max(a, b) = b$,
 $(a, b) + (c, d) = (a+c, b+d)$

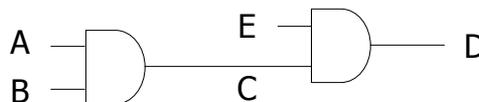
Beispiel: AND-Gatter

AND – Gatter (74F08):

	min	max
t_{PLH}	3.0	6.6
t_{PHL}	2.5	6.3



Fall 1



- A, E fest auf 1
- B von 0 auf 1 zum Zeitpunkt t_0

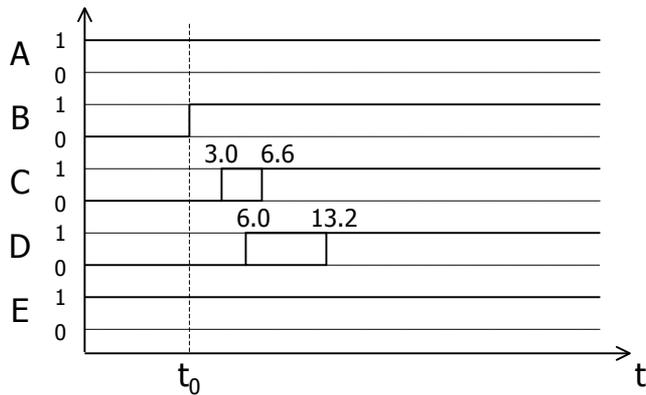
→ Änderung von C zur Zeit

$$t_1 = t_0 + (3.0, 6.6)$$

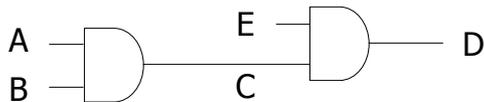
→ Änderung von D zur Zeit

$$t_2 = t_1 + (3.0, 6.6) = t_0 + (6.0, 13.2)$$

Fall 1 – Timing-Diagramm



Fall 2



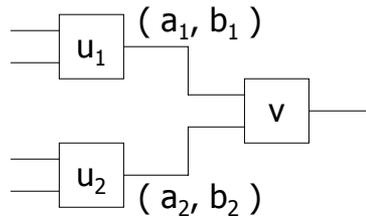
A, B, E können sich zum Zeitpunkt t_0 ändern, sind vorher und nachher stabil.

Es ist unbekannt, *wieviele* Signale sich ändern und *wie* sie sich ändern.

→ Größere Abschätzungen

Fall 2 (ff)

Bestimmung von Zeitintervallen, zu denen die Gatter überhaupt schalten können:



Fall 2 (ff)

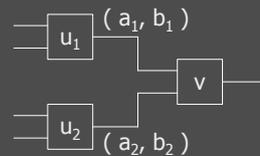
$$\text{Sei } t^{\min} := \min(\tau_{\text{LH}}^{\min}, \tau_{\text{HL}}^{\min})$$

$$t^{\max} := \max(\tau_{\text{LH}}^{\max}, \tau_{\text{HL}}^{\max})$$

gegeben für Gatter v.

→ v kann schalten zur Zeit

$$(\min(a_1, a_2), \max(b_1, b_2)) + (t^{\min}, t^{\max})$$

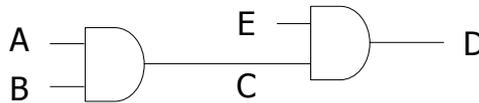


Im Beispiel:

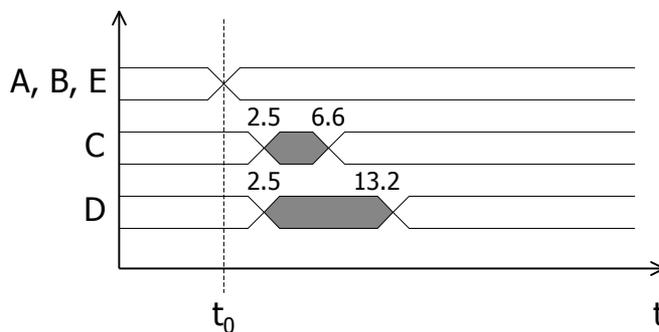
AND	min	max
t_{PLH}	3.0	6.6
t_{PHL}	2.5	6.3

Wenn die Gatter schalten,
dann in folgenden Intervallen:

- C: $t_0 + (2.5, 6.6)$
- E: $t_0 + (0.0, 0.0)$
- D: $(t_0 + 0.0, t_0 + 6.6) + (2.5, 6.6)$
 $= (t_0 + 2.5, t_0 + 13.2)$



Fall 2 – Timing-Diagramm



Interpretation des Timing-Diagramms

Was kann im schraffierten Bereich passieren?

Beispiel:

t_0 : A, B, E: 110 → 101

Annahme:

AND-Gatter haben folgende Verzögerungszeiten

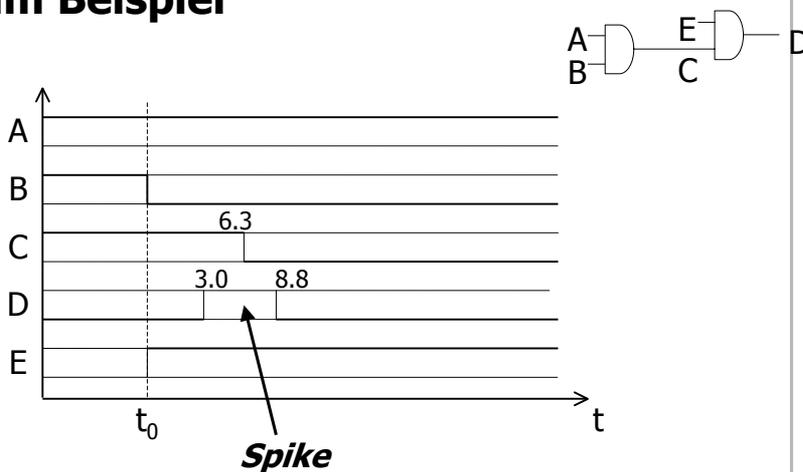
1. AND-Gatter: $t_{PLH} = 6.6 \text{ ns}$, $t_{PHL} = 6.3 \text{ ns}$

2. AND-Gatter: $t_{PLH} = 3.0 \text{ ns}$, $t_{PHL} = 2.5 \text{ ns}$

BB TI II 12.1/51

Timing-Diagramm zum Beispiel

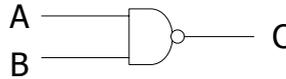
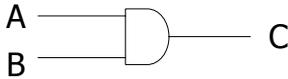
1. AND-Gatter: $t_{PLH} = 6.6 \text{ ns}$, $t_{PHL} = 6.3 \text{ ns}$
2. AND-Gatter: $t_{PLH} = 3.0 \text{ ns}$, $t_{PHL} = 2.5 \text{ ns}$



In manchen Anwendungen will man Spikes vermeiden (s. Flipflops).

BB TI II 12.1/52

Spikefreies Umschalten von Gattern



Ziel:

Übergang von $A=1, B=0$ zu $A=0, B=1$,
ohne Spike am Ausgang.

Bemerkung:

Der Übergang $(0, 1) \rightarrow (1, 0)$ bzw. umgekehrt ist
der einzige, bei dem an AND/NAND-Gattern ein Spike
auftreten kann.

Erinnerung:

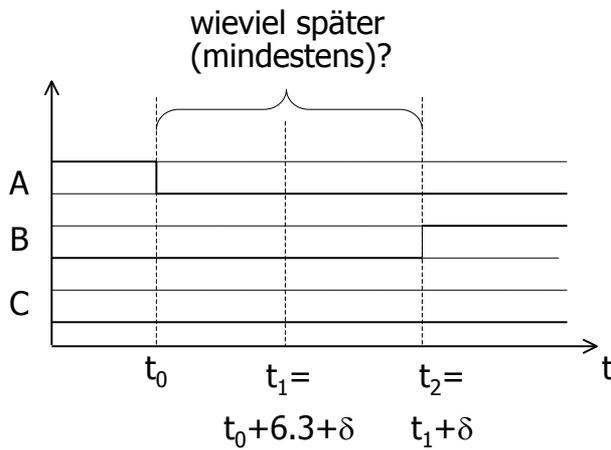
Signal s wird zum Zeitpunkt t gehoben/gesenkt

heißt

*s wird gehoben/gesenkt und durchläuft Spannung M
dabei zum Zeitpunkt t .*

AND-Gatter:

AND	min	max
t_{PLH}	3.0	6.6
t_{PHL}	2.5	6.3



Timing im Gatter:

AND	min	max
t_{PLH}	3.0	6.6
t_{PHL}	2.5	6.3

- Senke A bei $t_0 = 0$
 → Internes Schalten (bzgl. M!) spätestens nach 6.3 ns
 → C = 0 wegen A = 0 spätestens bei $t_1 = t_0 + 6.3 + \delta$
 - Hebe B zum Zeitpunkt $t_2 = t_1 + \delta$
 → B = 0 zum Zeitpunkt t_1
- Also: Vor t_1 : B = 0 \Rightarrow C = 0
 Nach t_1 : C = 0 wegen A = 0
- Übergänge für A und B mit Abstand
 $t_2 - t_0 = 6.3 + 2\delta = \underline{11.3}$

NAND-Gatter:

NAND – Gatter (74F00):

	min	max
t_{PLH}	2.4	6.0
t_{PHL}	1.5	5.3

Analog:

Abstand $t_2 - t_0 = \underline{11.0}$