Kapitel 5

Timing:
1. Physikalische Eigenschaften
2. Timing wichtiger Komponenten
3. **Exaktes Timing von ReTI**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

UNI FREIBURG

Dr. Tobias Schubert, Dr. Ralf Wimmer

Professur für Rechnerarchitektur
WS 2016/17

Es gilt:

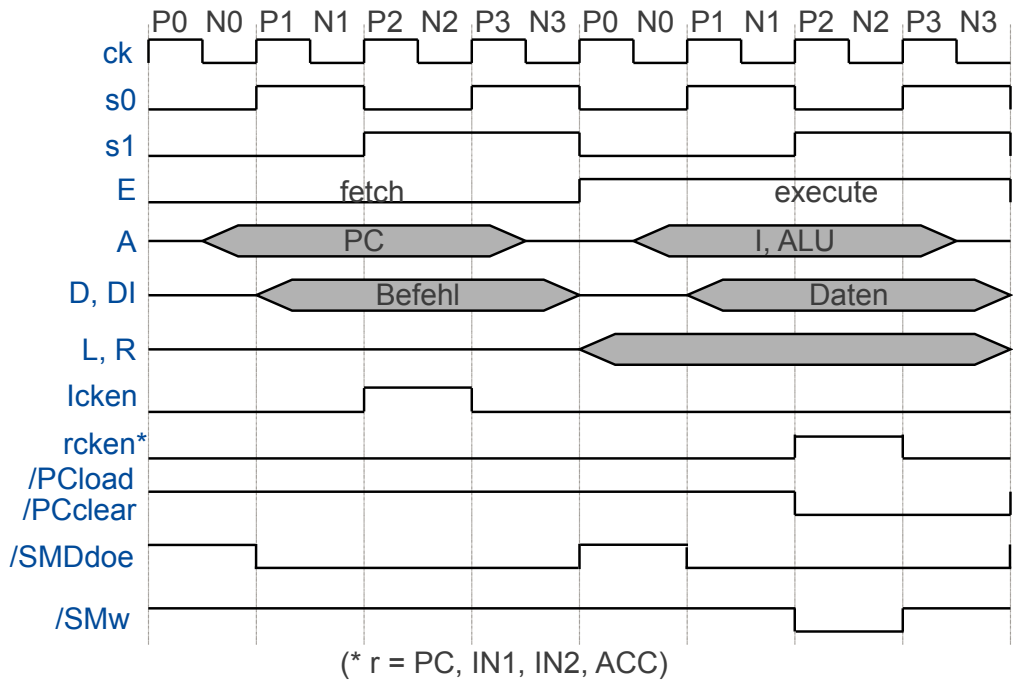
- Bei hinreichend langsamem Takt funktioniert der Rechner.

Frage:

- Wie schnell kann man den Rechner takten?
  Wie lange muss ein Takt mind. sein?

→ Ersetze idealisiertes Timing durch exakte Timinganalyse

→ Gesucht:
Untere Grenze für Zykluszeit t_c



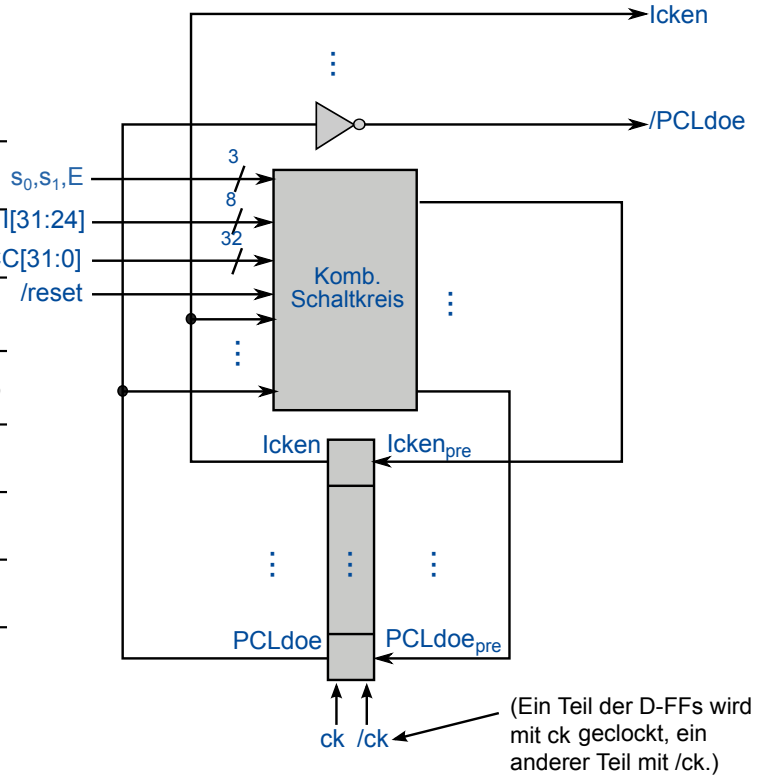
Schritte der Analyse

1. Einhalten von Setup- und Hold-Zeiten der Kontrolllogik
2. Vermeidung von Bus-Contention
3. PC-Inkrementierung
4. Compute-Befehle:
   OE: Compute Memory
5. *Fetch*, *Load*, *Store*, *Jump*

- Wir werden uns auf Compute-Befehle beschränken.

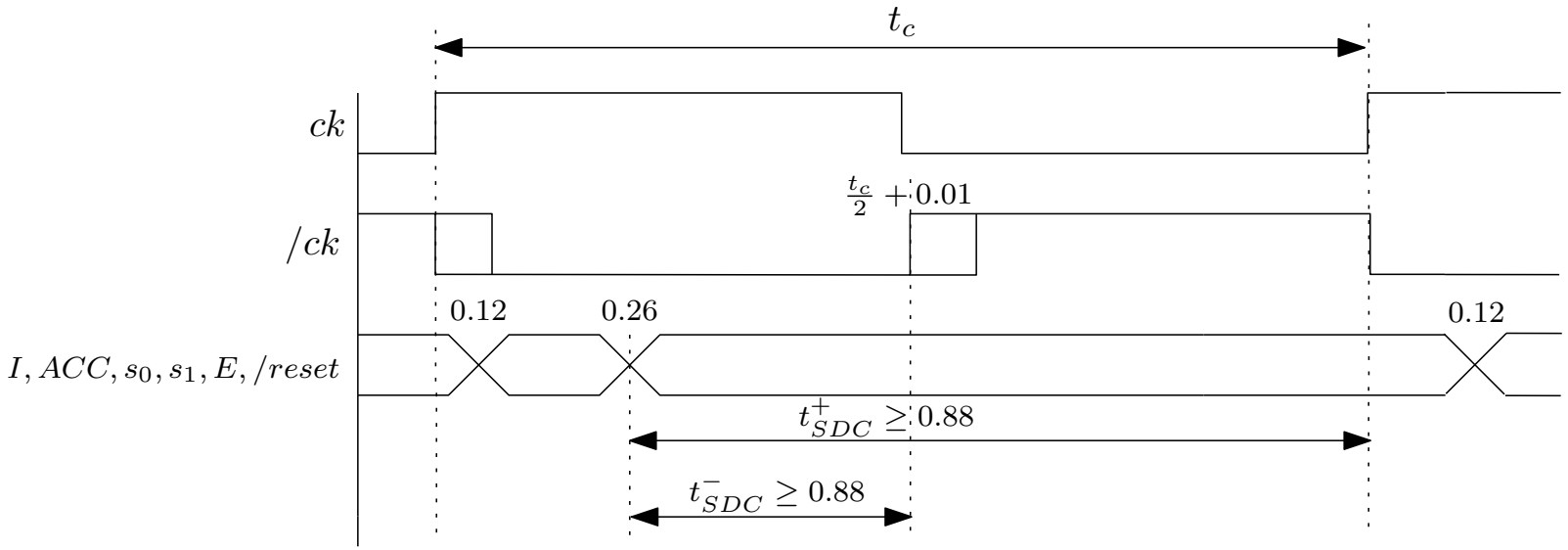
Timing der Kontrolllogik (1/3)

Symbol	Bezeichnung	t^{min}	t^{max}
$\tau^{+}_{p,ah}$	Verzögerungszeit *ck* bis *Q*, active high	0.12	0.26
$\tau^{+}_{p,al}$	Verzögerungszeit *ck* bis *Q*, active low	0.12	0.41
$\tau^{-}_{p,ah}$	Verzögerungszeit *ck* bis *Q* (von */ck* angesteuert, active high)	$t_c/2+0.13$	$t_c/2+0.41$
$\tau^{-}_{p,al}$	Verzögerungszeit *ck* bis *Q* (von */ck* angesteuert, active high)	$t_c/2+0.13$	$t_c/2+0.56$
t^{+}_{SDC}	Setupzeit von *D* bis *ck*	0.88	
t^{-}_{SDC}	Setupzeit von *D* bis */ck*	0.88	
t^{+}_{HCD}	Holdzeit von *D* nach *ck*	0.06	
t^{-}_{HCD}	Holdzeit von *D* nach */ck*	0.06	



- Setupzeit der Dateneingänge bis *ck* ist $t^{+}_{SDC} \geq 0.88$, Setupzeit der Dateneingänge bis */ck* ist $t^{-}_{SDC} \geq 0.88$.
- Dateneingänge $(s_0, s_1, E, I, ACC, reset)$ müssen rechtzeitig bereit sein.
- Alle Dateneingänge sind Ausgangssignale von FFs, die mit *ck* getaktet werden.

Timing der Kontrolllogik (2/3)



- Wähle eine beliebige steigende Taktflanke *Pi* als zeitlichen Bezugspunkt.
- Die Dateneingänge sind also bereit zur Zeit $\tau_{PCQ} = [0.12, 0.26]$ (Verzögerung eines D-FF).
- Die nächste steigende Taktflanke von $/ck$ ist bei $\frac{t_c}{2} + [0.01, 0.15]$, die nächste steigende Taktflanke von *ck* bei t_c.

$\Rightarrow \frac{t_c}{2} + \underbrace{0.01}_{\text{Inverterverzögerung}} \geq \underbrace{0.88}_{t^-_{SDC}} + \underbrace{0.26}_{\tau_{PCQ} \text{ für FFs}}$, d.h. $t_c \geq 2.26$.

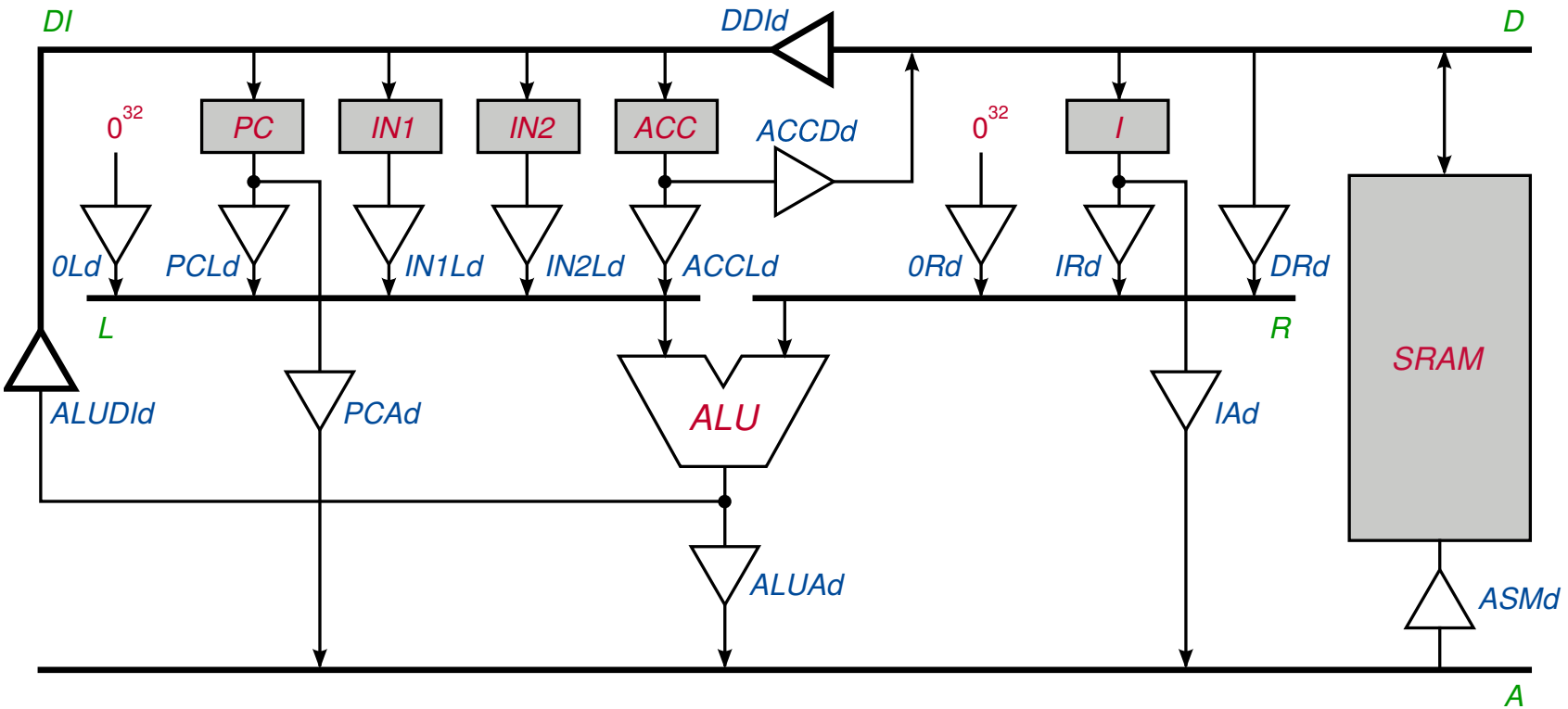
$\Rightarrow t_c \geq \underbrace{0.88}_{t^+_{SDC}} + \underbrace{0.26}_{\tau_{PCQ} \text{ für FFs}} = 1.14$

Constraints

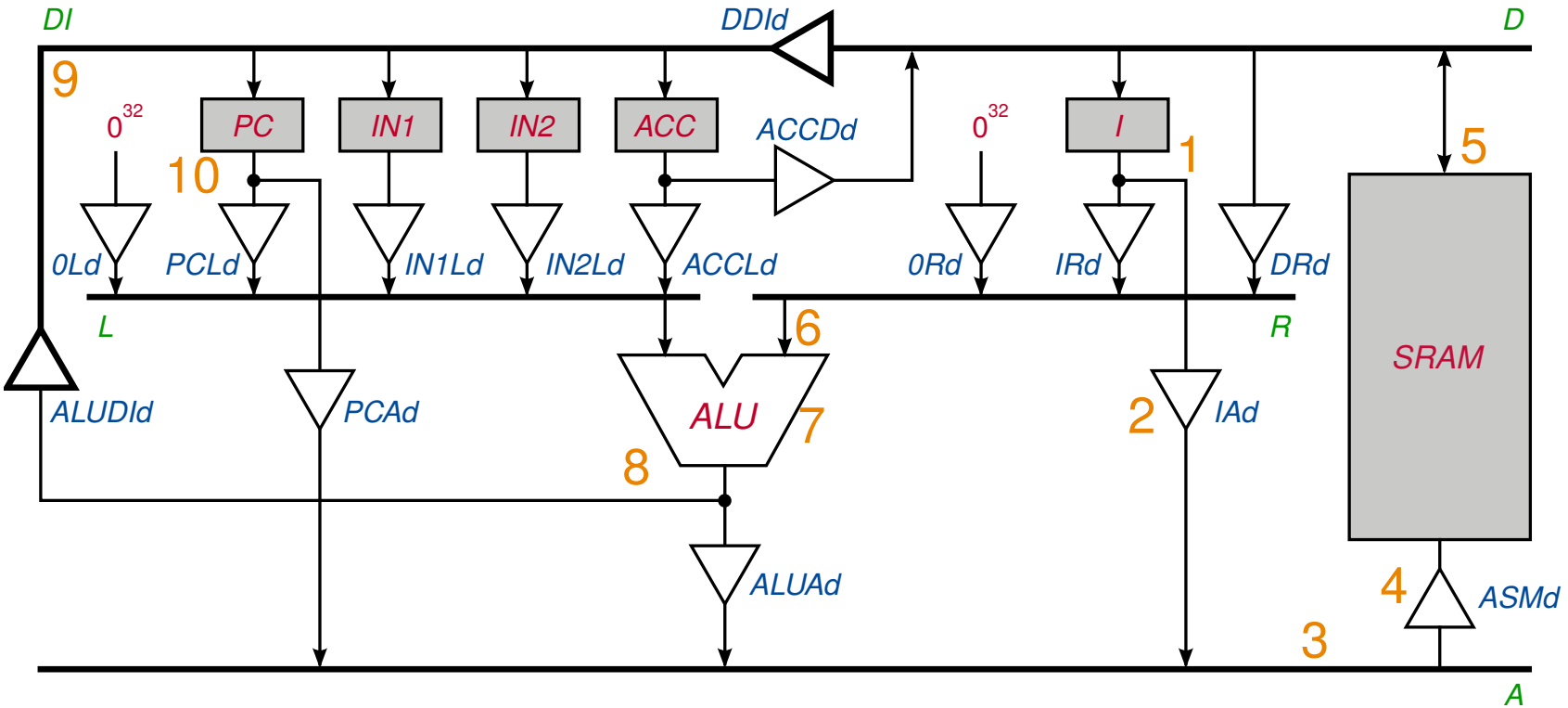
- $t_c \geq 2.26$

Compute-Befehle

- Am zeitkritischsten ist Compute memory!

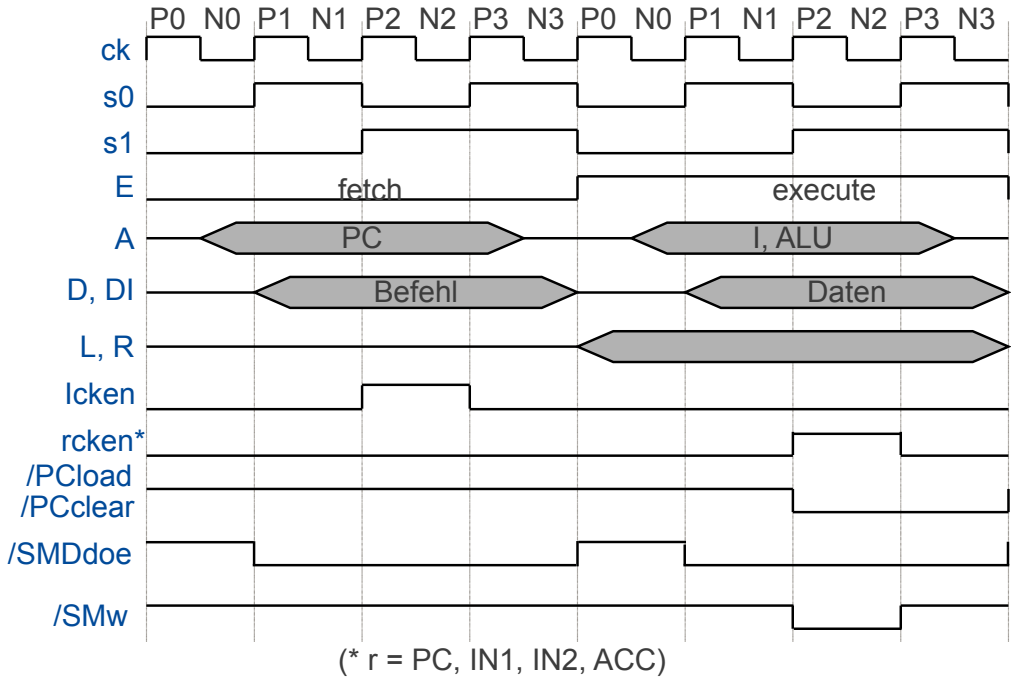


$[r] := [r] + [M(\langle i \rangle)]$; hier:$[PC] := [PC] + [M(\langle i \rangle)]$



Analyse allgemein

- Beginn der Analyse bei *P3* von Fetch als zeitlicher Bezugspunkt.
- Bei *P3* von Fetch wird der Befehl ins Instruktionsregister übernommen.



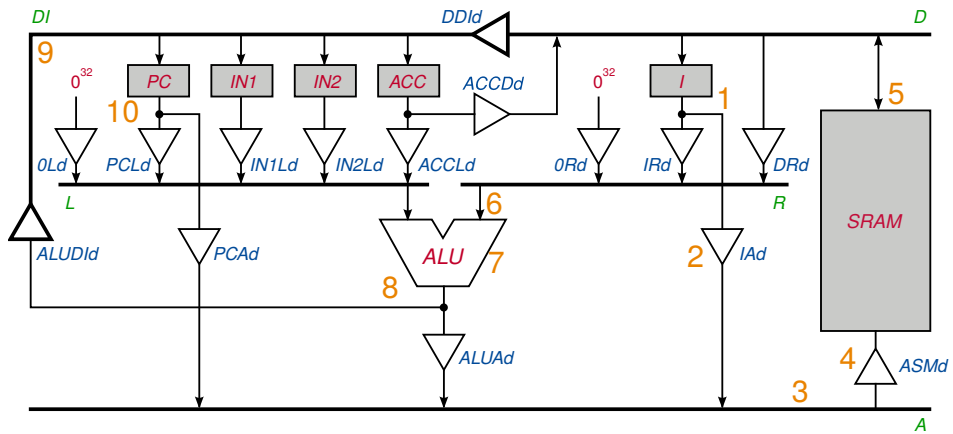
I-Ausgänge (1/2)

I-Ausgänge gültig bei

$$\tau_1 = \underbrace{[0.12, 0.26]}_{\tau_{PCQ} \text{ von Register } I}$$

D-FF	Bezeichnung	t^{min}	t^{max}
t_{SDC}	Setupzeit von *D* bis *ck*	0.08	
t_{HCD}	Holdzeit von *D* nach *ck*	0.14	
τ_{PCQ}	Verzögerungszeit von *ck* bis *Q*	0.12	0.26
τ_{PDQ}	Verzögerungszeit von *D* bis *Q*	0.10	0.21

- $0^8 I_{23} \ldots I_0$ wird über Treiber *IAd* auf Adressbus gegeben.
- 0^8 ist eine Konstante und steht daher ebenfalls zu τ_1 bereit.



Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$

- $t_c \geq 2.26$

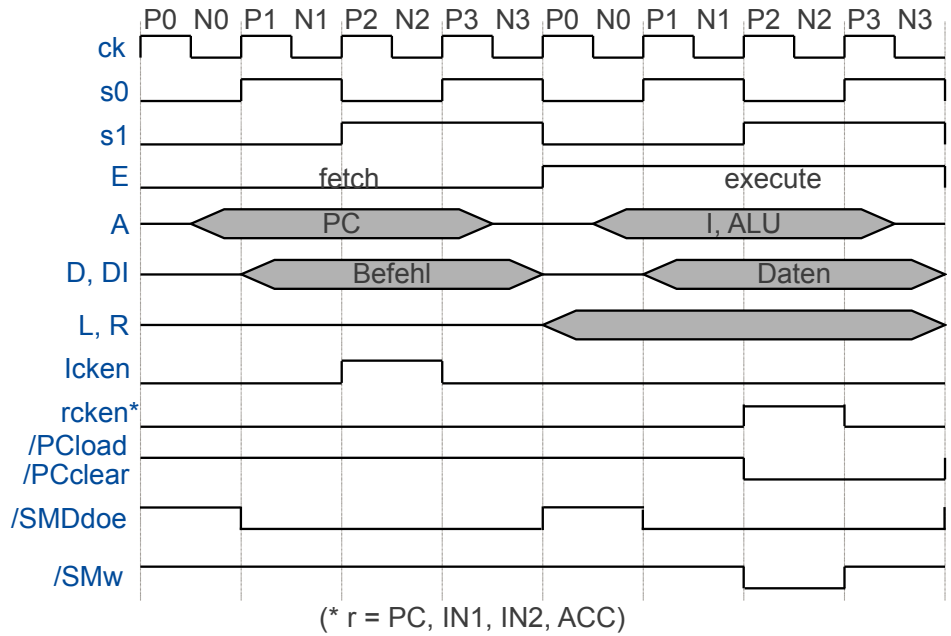
I-Ausgänge (2/2)

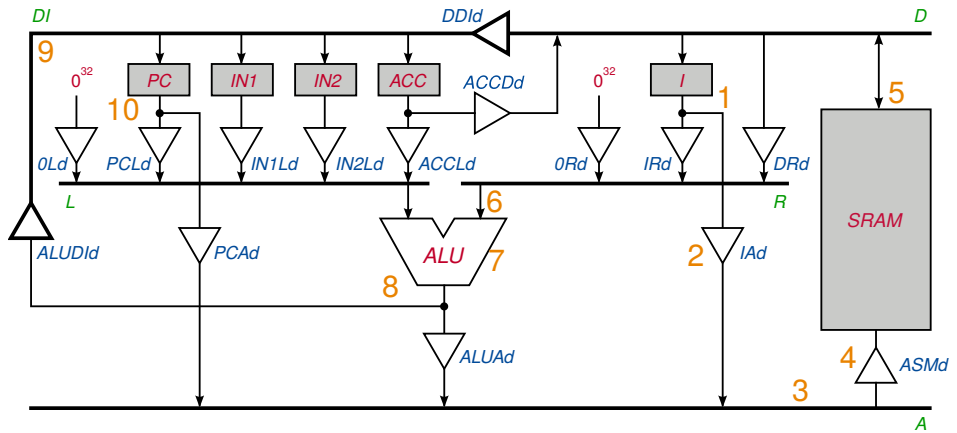
IAd enabled bei *N*0 von Execute, d.h. */IAdoe* aktiv zur Zeit

$$\begin{aligned}\tau_2 &= t_c + \tau^{-}_{p,al} \\ &= t_c + \frac{t_c}{2} + [0.13, 0.56] \\ &= \frac{3}{2}t_c + [0.13, 0.56]\end{aligned}$$

I schon gültig vor Aktivierung von *IAd* bei Punkt 2, falls

$$\begin{aligned}\max(\tau_1) &\leq \min(\tau_2) \Leftrightarrow \\ 0.26 &\leq \frac{3}{2}t_c + 0.13 \Leftrightarrow \\ \frac{3}{2}t_c &\geq 0.13 \Leftarrow \\ t_c &\geq 0.09\end{aligned}$$





Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^-_{p,al} = \frac{3}{2} t_c + [0.13, 0.56]$

- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$

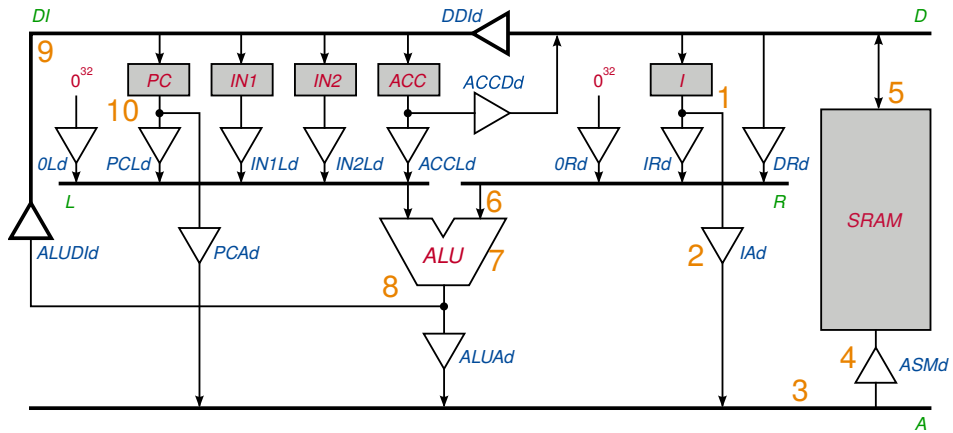
Gültiges A (1/2)

$\rightarrow A$ gültig zur Zeit

$$\tau_3 = \tau_2 + \underbrace{[0.03, 0.11]}_{\text{Enable Zeit Treiber}}$$

$$= \frac{3}{2} t_c + [0.16, 0.67]$$

	Tristate-Treiber	min	max
τ_{PZL}	Enable-Zeiten	0.03	0.10
τ_{PZH}	Enable-Zeiten	0.03	0.11
τ_{PLZ}	Disable-Zeiten	0.03	0.11
τ_{PHZ}	Disable-Zeiten	0.03	0.10
τ_{PLH}	Umschaltverzögerung bei $/OE = 0$	0.02	0.07
τ_{PHL}	Umschaltverzögerung bei $/OE = 0$	0.03	0.10

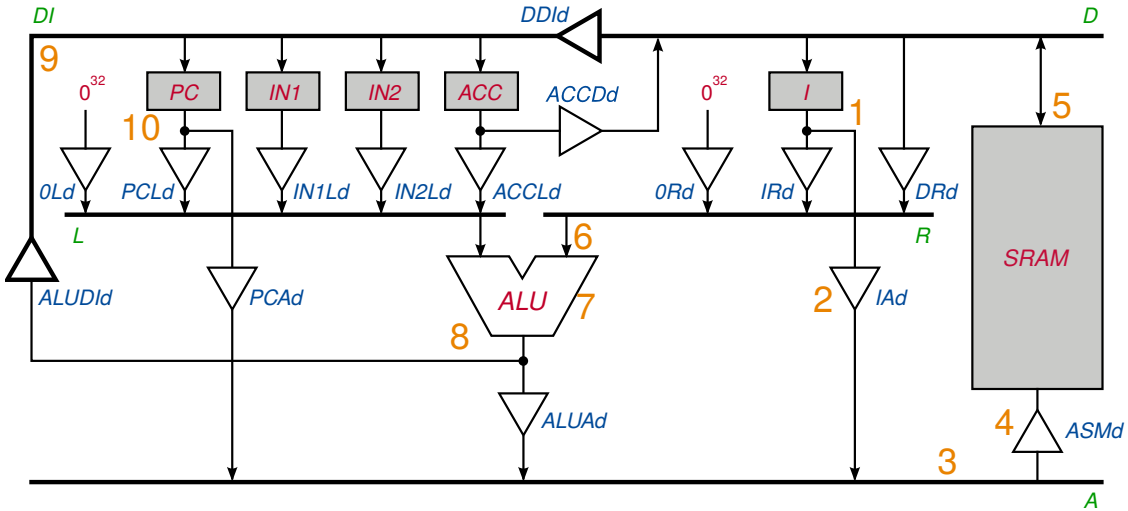


Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^{-}_{p,al} = \frac{3}{2} t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2} t_c + [0.16, 0.67]$

- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$

Gültiges *A* (2/2)



- *ASMd* immer enabled

→ nur Treiber-Verzögerung berücksichtigt

→ *A* an *SM* bei

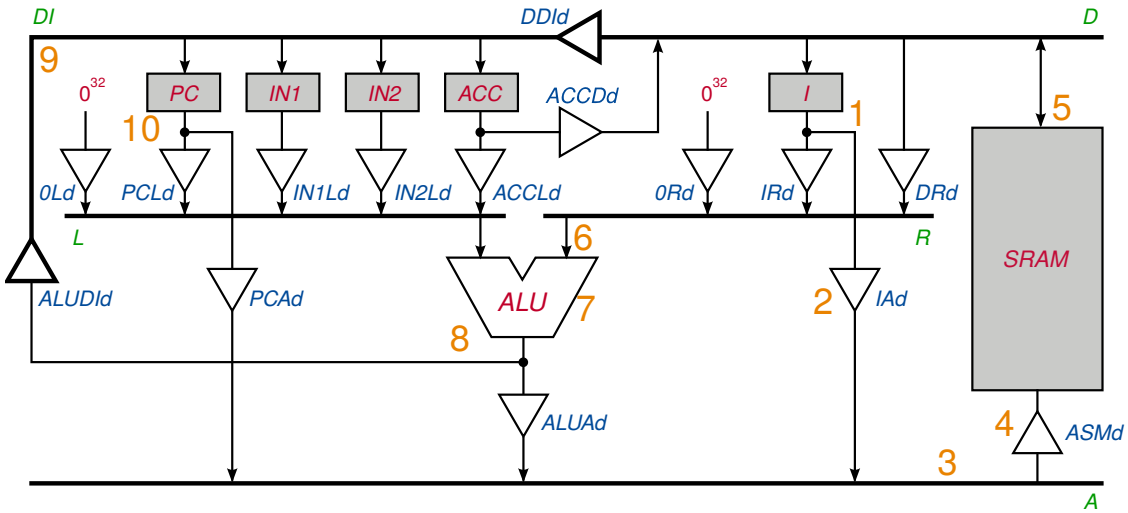
  - $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2} t_c + [0.18, 0.77]$

Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^-_{p,al} = \frac{3}{2} t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2} t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2} t_c + [0.18, 0.77]$

- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$

Daten am Speicherausgang (1/3)



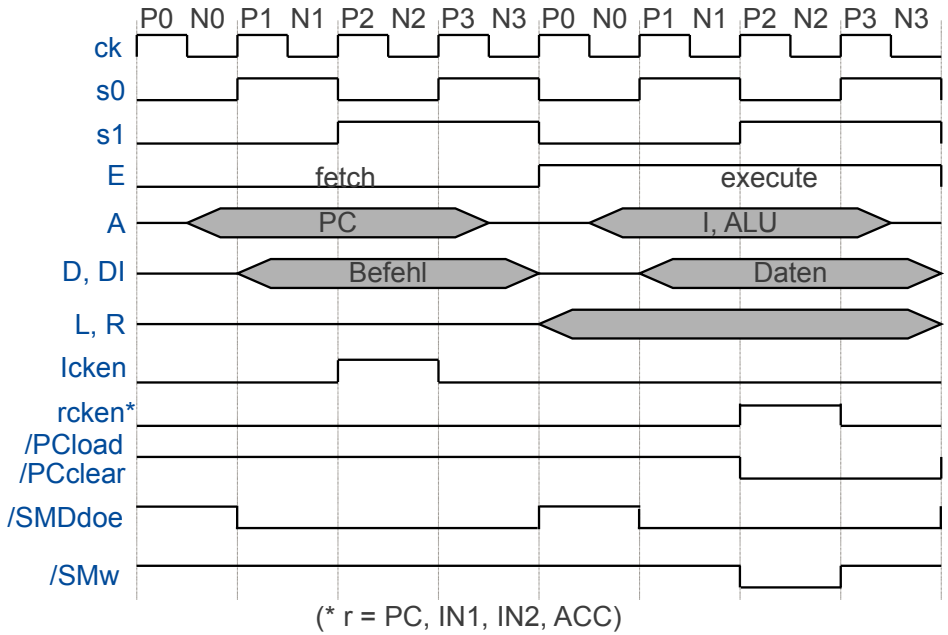
- Lesezugriffszeit von *SRAM*: $[0.0, 12.0]$ (siehe Daten von CY7C1079DV33)

→ Gültige Daten am Speicherausgang bei

$$\begin{aligned}\tau_5 &= \tau_4 + [0.0, 12.0] \\ &= \frac{3}{2}t_c + [0.18, 0.77] + [0.0, 12.0] \\ &= \frac{3}{2}t_c + [0.18, 12.77]\end{aligned}$$

- Das ist aber nur korrekt, wenn der Ausgangstreiber durch $/SMDdoe$ rechtzeitig enabled ist!

Daten am Speicherausgang (2/3)



SRAM CY7C1079DV33			
Symbol	**Bezeichnung**	t^{min}	t^{max}
t_{acc}	Lesezugriffszeit		12.0
t_{OED}	Zeit von $/SMDdoe = 0$ bis D		7.0
...			

- $/SMDdoe$ aktiviert zur Zeit $\tau' = 2 \cdot t_c + \tau^+_{p,al} = 2 \cdot t_c + [0.12, 0.41]$.
- Daten am Speicherausgang aufgrund Treiber-Enable gültig zur Zeit $\tau'' = \tau' + [0.0, 7.0] = 2 \cdot t_c + [0.12, 7.41]$.

$\Rightarrow$ Daten am Speicherausgang gültig spätestens zur Zeit $t''' = \max(\max(\tau_5), \max(\tau''))$.

Daten am Speicherausgang (3/3)

- Daten am Speicherausgang gültig zur Zeit $t''' = \max(\max(\tau_5), \max(\tau''))$.
- Bedingung für $\max(\tau_5) \geq \max(\tau'')$:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2}t_c + 12.77 &\geq 2 \cdot t_c + 7.41 \Leftrightarrow \\ \frac{1}{2}t_c &\leq 5.36 \Leftrightarrow \\ t_c &\leq 10.72 \end{aligned}$$

- Wir nehmen ab jetzt an, dass die Taktperiode $t_c \leq 10.72$ ist und rechnen mit $\max(\tau_5)$ weiter.
- (Es gilt auf jeden Fall $\min(\tau_5)$ $(= \frac{3}{2}t_c + 0.18) < \min(\tau'')$ $(= 2 \cdot t_c + 0.12)$
- Sollte sich später ergeben, dass die minimale Taktperiode $t_c > 10.72$, dann müssten wir die Rechnung nochmals korrigieren.

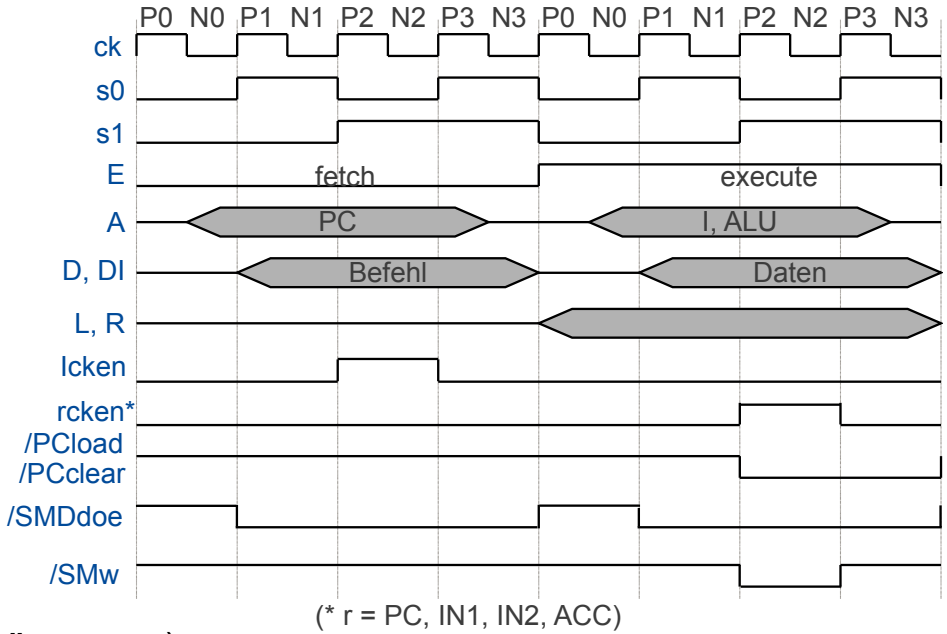
Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^-_{p,al} = \frac{3}{2}t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2}t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 0.77]$
- $\tau_5 = \tau_4 + [0.0, 12.0] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 12.77]$

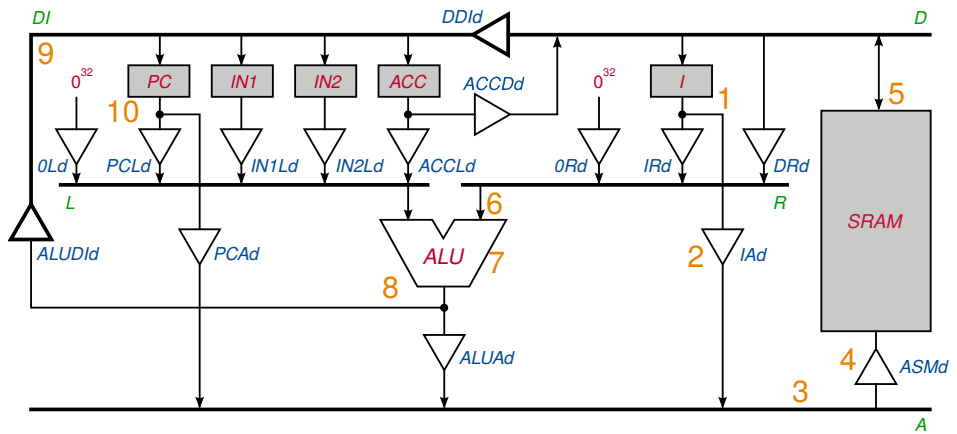
- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$
- $t_c \leq 10.72$

Daten auf *R*

DRd enabled bei *P*0 von Execute, also einen Takt vor Ausgangstreiber von *SM*
→ Enable nicht kritisch
→ Daten auf *R* spätestens bei



$$\tau_6 = \tau_5 + [0.02, 0.10] \text{ (Treiber-Verzögerung)}$$
$$= \frac{3}{2} t_c + [0.20, 12.87]$$



Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^-_{p,al} = \frac{3}{2}t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2}t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 0.77]$
- $\tau_5 = \tau_4 + [0.0, 12.0] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 12.77]$
- $\tau_6 = \tau_5 + [0.2, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.20, 12.87]$

- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$
- $t_c \leq 10.72$

Daten auf L

- Registerausgänge $r \in \{PC, ACC, IN1, IN2\}$ schon seit letzter Execute-Phase gültig.

$\rightarrow$ nicht kritisch

- Treiber *rLd* enabled bei $P0$ von Execute, d.h. wie auch bei *DRd* ist Zeit zum Enablen unkritisch im Vergleich zu t_6.

$f[2:0], c_{in}$

- $f[2:0], c_{in}$ werden durch den kombinatorischen Schaltkreis der Kontrolllogik aus $I_{31}, \ldots, I_{24}$ berechnet.
- I-Ausgänge aber schon gültig bei $\tau_1 = [0.12, 0.26]$.
- Verzögerungszeit des kombinatorischen Schaltkreises $< t^+_{SDC} = 0.88$
- $f[2:0], c_{in}$ gültig spätestens bei $t_7 = 0.26 + 0.88 = 1.14$.

$\rightarrow$ völlig unkritisch verglichen mit $\max(\tau_6) = \frac{3}{2} t_c + 12.87$

Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^-_{p,al} = \frac{3}{2}t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2}t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 0.77]$
- $\tau_5 = \tau_4 + [0.0, 12.0] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 12.77]$
- $\tau_6 = \tau_5 + [0.2, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.20, 12.87]$
- $t_7 = 1.14$

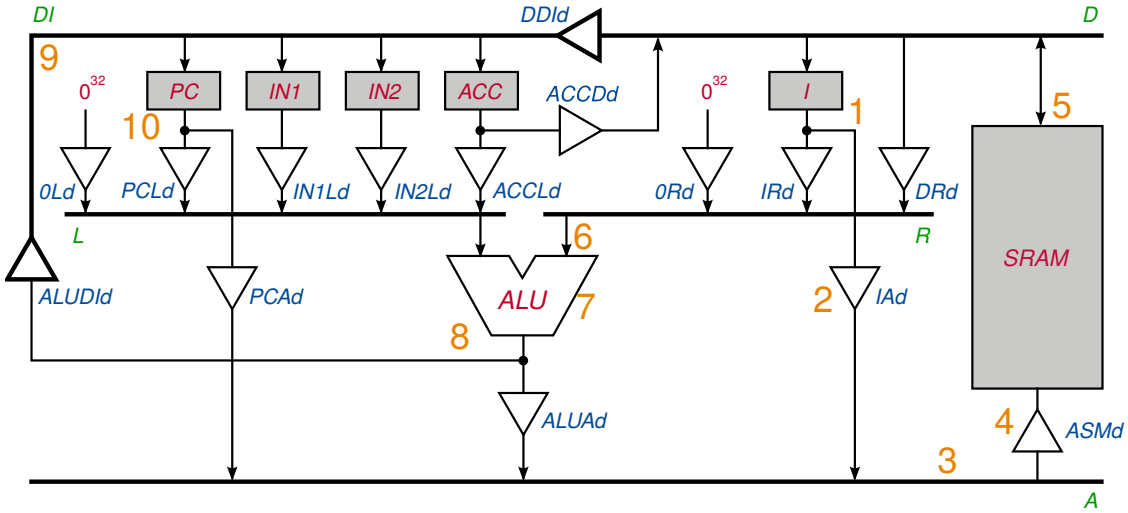
- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$
- $t_c \leq 10.72$

Voraussetzungen für die exakte Timinganalyse von *Compute memory*

- *ALU*
- Analyse der ALU (32-Bit mit Conditional Sum) unter folgender Annahme:
  - Funktionsselect-Signale liegen 0.28 ns vor den Daten an (unkritisch, da $t_7 + 0.28 = 1.14 + 0.28 = 1.42 < \min(\tau_6) = \frac{3}{2}t_c + 0.20$).
  - Resultatsausgänge gültig 3.25 ns nachdem die Daten anliegen.

Symbol	**Bezeichnung**	t^{min}	t^{max}
t_{select}		0.28	
t_{ALU}	Verzögerungszeit von a, b bzw. c_{in} bis Ausgang		3.25

ALU-Ausgänge



- Spätestens gültig bei

$$t_8 = \max(\tau_6) + \underbrace{3.25}_{\text{Delay ALU}} = \frac{3}{2}t_c + 12.87 + 3.25$$

$$= \frac{3}{2}t_c + 16.12$$

Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^{-}_{p,al} = \frac{3}{2}t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2}t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 0.77]$
- $\tau_5 = \tau_4 + [0.0, 12.0] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 12.77]$
- $\tau_6 = \tau_5 + [0.2, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.20, 12.87]$
- $t_7 = 1.14$
- $t_8 = \max(\tau_6) + 3.25 = \frac{3}{2}t_c + 16.12$

- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$
- $t_c \leq 10.72$

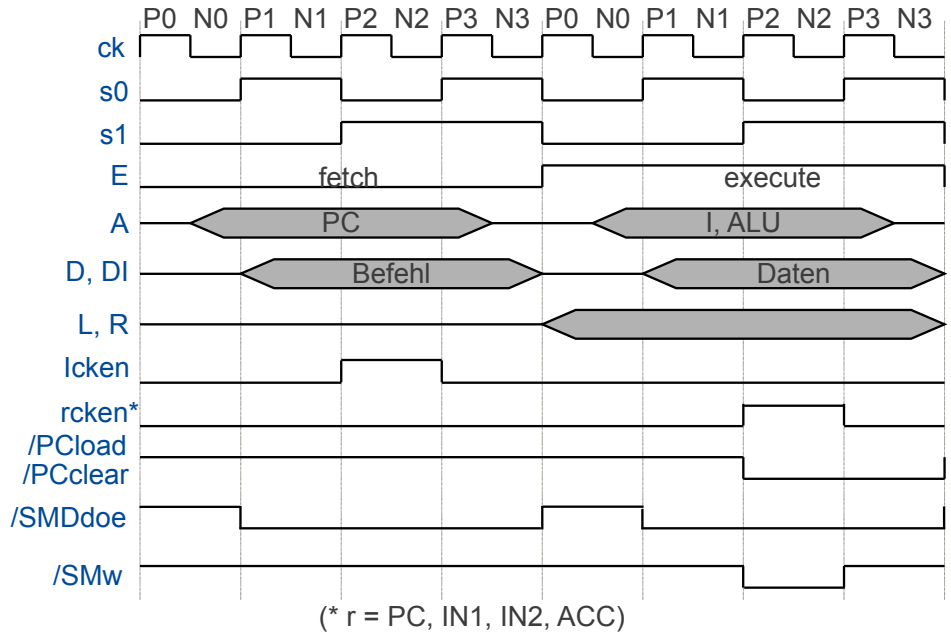
DI

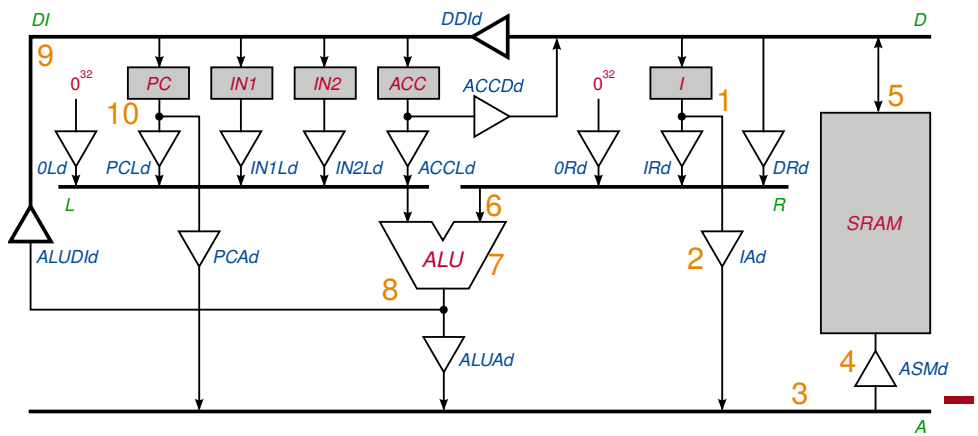
- */ALUDIdoe* wird wie */SMDdoe* aktiviert bei *P*1 von Execute
- Daten kommen an *ALUDId* später an als an als Daten am internen *SRAM*–Treiber
- Enable–Zeit von *ALUDId* jedoch kürzer als bei *SRAM*
- Mit $t_c \leq 10.72$ ist auf jeden Fall auch für *ALUDId* gewährleistet, dass Treiber enabled, wenn Daten kommen.

→ Berücksichtige nur Treiberverzögerung.

→ Gültig spätestens bei

$$\begin{aligned} t_9 &= t_8 + 0.10 \\ &= \frac{3}{2}t_c + 16.12 + 0.10 \\ &= \frac{3}{2}t_c + 16.22 \end{aligned}$$





Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^-_{p,al} = \frac{3}{2}t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2}t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 0.77]$
- $\tau_5 = \tau_4 + [0.0, 12.0] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 12.77]$
- $\tau_6 = \tau_5 + [0.2, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.20, 12.87]$
- $t_7 = 1.14$
- $t_8 = \max(\tau_6) + 3.25 = \frac{3}{2}t_c + 16.12$
- $t_9 = t_8 + 0.10 = \frac{3}{2}t_c + 16.22$

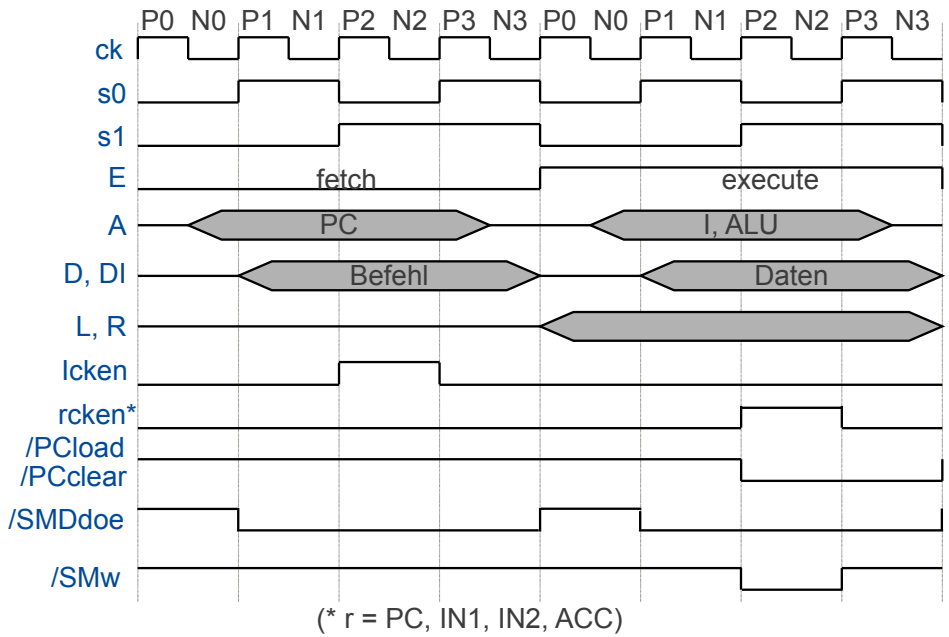
- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$
- $t_c \leq 10.72$

Datenübernahme in Register *r*

- Clocksignale bei *P*3 von Execute

  → steigende Flanke bei $\tau_{10} = 4t_c$

- Minimale Taktperiode wird aus Setup-Zeit von *r* berechnet (Setup-Zeit am größten, wenn $r = PC$)



Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau_{p,al}^{-} = \frac{3}{2} t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2} t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2} t_c + [0.18, 0.77]$
- $\tau_5 = \tau_4 + [0.0, 12.0] = \frac{3}{2} t_c + [0.18, 12.77]$
- $\tau_6 = \tau_5 + [0.2, 0.10] = \frac{3}{2} t_c + [0.20, 12.87]$
- $t_7 = 1.14$
- $t_8 = \max(\tau_6) + 3.25 = \frac{3}{2} t_c + 16.12$
- $t_9 = t_8 + 0.10 = \frac{3}{2} t_c + 16.22$
- $\tau_{10} = 4 \cdot t_c$

- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$
- $t_c \leq 10.72$

Timing: Zähler

- Aus einer Analyse des Zählers in einer Implementierung gemäß Kapitel 4.1 (aber mit zusätzlichem Clock–Enable für das Register!) ergeben sich folgende Zeiten:

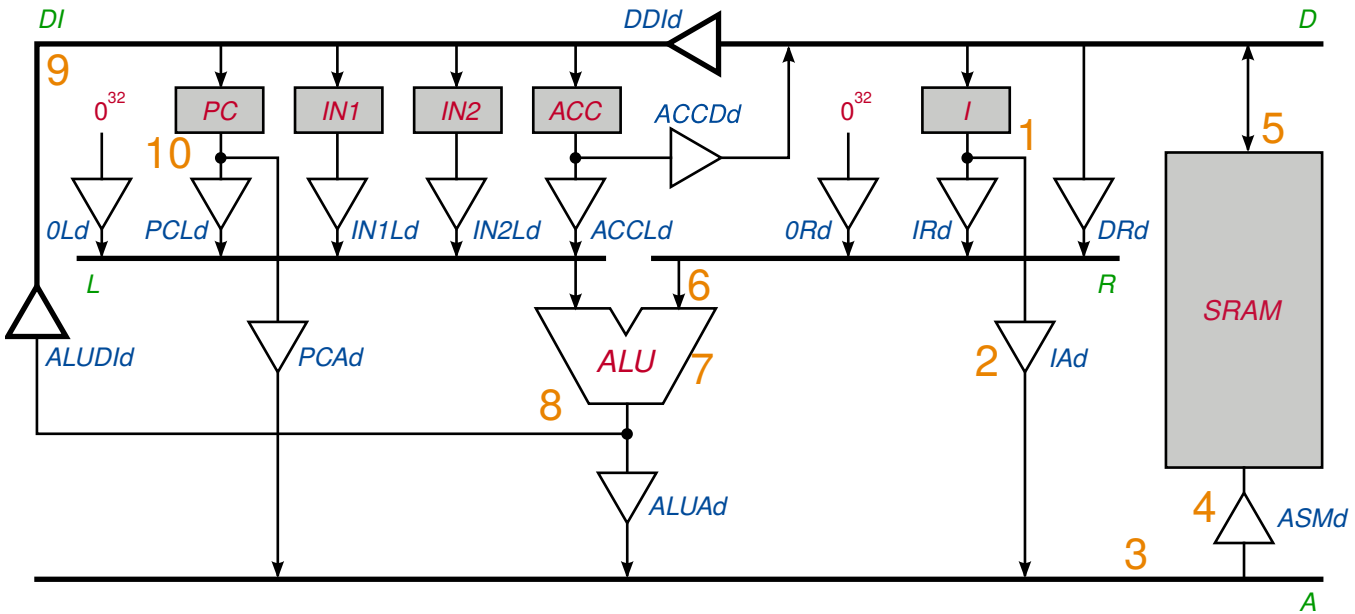
Symbol	**Bezeichnung**	$t^{\mathbf{min}}$	$t^{\mathbf{max}}$
t_{SDC}	Setup-Zeit von *D* vor *ck*	0.53	
t_{HDC}	Hold-Zeit von *D* nach *ck*	0.05	
t_{SLC}	Setup-Zeit von $/L$ vor *ck*	0.76	
t_{HLC}	Hold-Zeit von $/L$ nach *ck*	0.02	
t_{SEC}	Setup-Zeit von $/PCcken$ vor *ck*	0.46	
t_{HEC}	Hold-Zeit von $/PCcken$ nach *ck*	0.08	
...	...	...	...

Setup-Zeit von Zähler

- Setup-Zeit: $t_{SDC} = 0.53\ ns$ (siehe Aufbau Zähler)

→ Bedingung:

- $t_9 + 0.53 \leq \min(\tau_{10})$
  $\Leftrightarrow \frac{3}{2}t_c + 16.75 \leq 4t_c$
  $\Leftrightarrow \frac{5}{2}t_c \geq 16.75$
  $\Leftrightarrow t_c \geq 6.70$



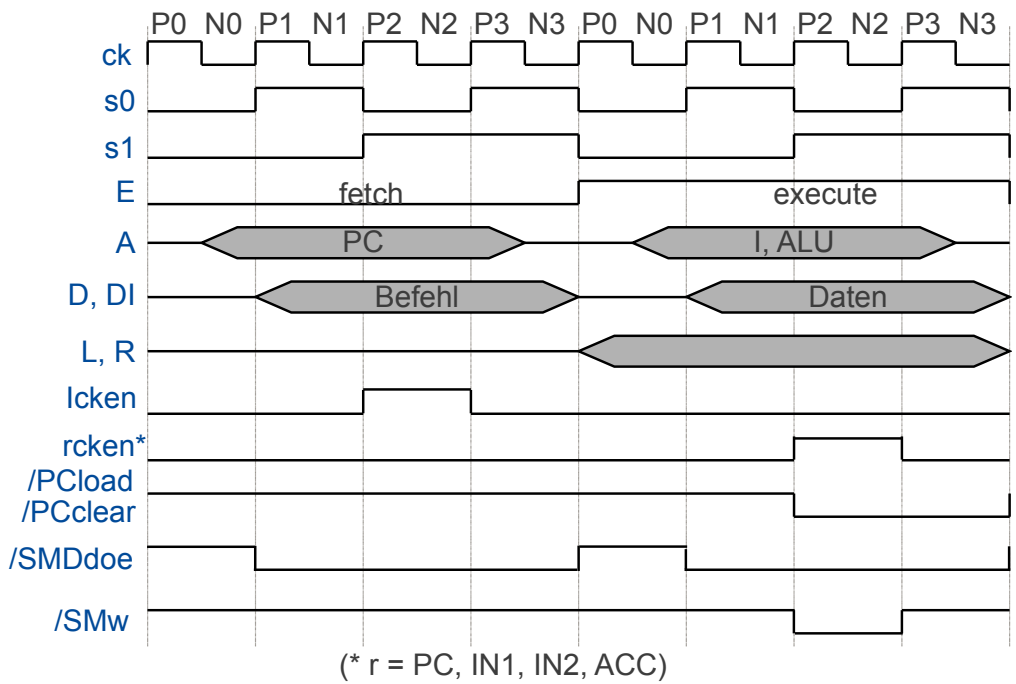
Constraints

- $\tau_1 = [0.12, 0.26]$
- $\tau_2 = t_c + \tau^{-}_{p,al} = \frac{3}{2}t_c + [0.13, 0.56]$
- $\tau_3 = \tau_2 + [0.03, 0.11] = \frac{3}{2}t_c + [0.16, 0.67]$
- $\tau_4 = \tau_3 + [0.02, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 0.77]$
- $\tau_5 = \tau_4 + [0.0, 12.0] = \frac{3}{2}t_c + [0.18, 12.77]$
- $\tau_6 = \tau_5 + [0.2, 0.10] = \frac{3}{2}t_c + [0.20, 12.87]$
- $t_7 = 1.14$
- $t_8 = \max(\tau_6) + 3.25 = \frac{3}{2}t_c + 16.12$
- $t_9 = t_8 + 0.10 = \frac{3}{2}t_c + 16.22$
- $\tau_{10} = 4 \cdot t_c$

- $t_c \geq 2.26$
- $t_c \geq 0.09$
- $t_c \leq 10.72$
- $t_c \geq 6.70$

Es bleiben zu beachten:

- Hold-Zeit t_{HCD}
- Maximal bei $r \in \{ACC, IN1, IN2\}$, $t_{HCD} = 0.11$
  - Unproblematisch, da alle Treiber noch mindestens $\frac{1}{2}$ Takt nach *rck* enabled sind.



Setup- und Hold-Zeiten von *rcken*

- *rcken* aktiv bei *P*2 von Execute, inaktiv bei *P*3 von Execute, d.h. aktiv von:
  - $\tau_{11} = 3t_c + \tau^+_{p,ah} = 3t_c + [0.12, 0.26]$ bis
  - $\tau_{12} = 4t_c + \tau^+_{p,ah} = 4t_c + [0.12, 0.26]$
- Setup-Zeit:
  - Für alle $r \in \{PC, ACC, IN1, IN2\}$: $t_{SEC} = 0.46$

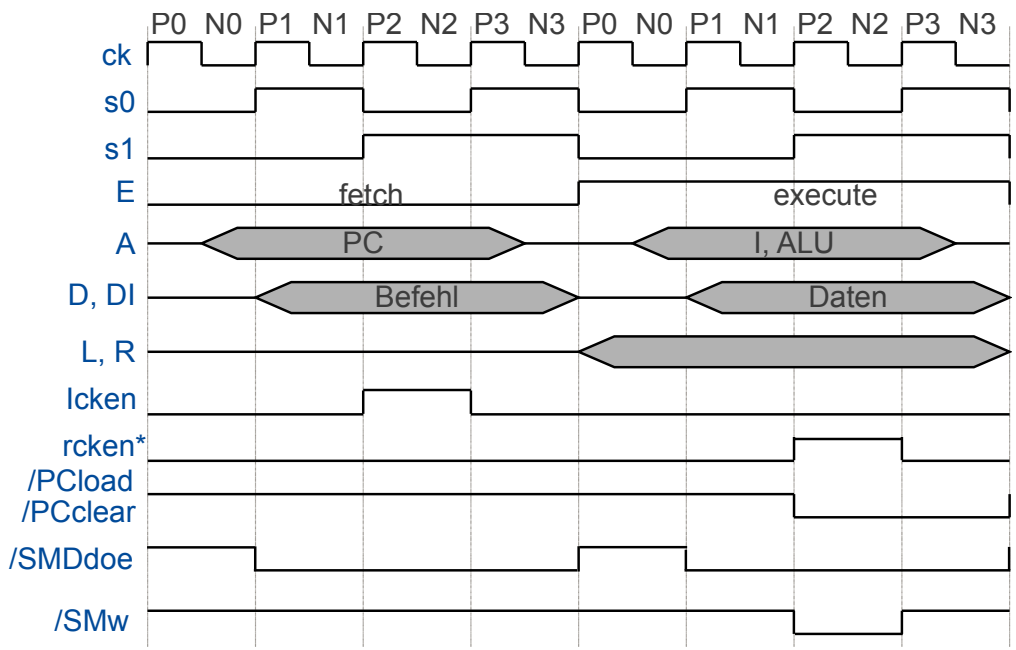
  $\Rightarrow \max(\tau_{11}) + 0.46 \leq 4t_c$, d.h. $3t_c + 0.26 + 0.46 \leq 4t_c$ bzw.

  $\Rightarrow t_c \geq 0.72$ (unkritisch im Vergleich zu bisherigen Constraints)
- Hold-Zeit:
  - Für alle $r \in \{PC, ACC, IN1, IN2\}$: $t_{HEC} = 0.08$

  $\Rightarrow \min(\tau_{12}) \geq 4t_c + 0.08$, d.h. $0.12 \leq 0.08$
- (Analog auch für alle anderen Takte.)

Setup- und Hold-Zeiten /*PCload* beim Zähler

- Setup /*L* bis *ck*: $t_{SLC} = 0.76$
- Hold /*L* nach *ck*: $t_{HLC} = 0.02$
- */PCload* (benötigt, wenn **neue** Werte in Zähler kommen) aktiv bei *P*2 von Execute, inaktiv bei *P*0 von Fetch, d.h. aktiv von:
  - $\tau_{13} = 3t_c + \tau^+_{p,al} = 3t_c + [0.12, 0.41]$ bis
  - $\tau_{14} = 5t_c + \tau^+_{p,al} = 5t_c + [0.12, 0.41]$



Bedingungen für Setup- und Hold-Zeiten /*PCload* beim Zähler

- Setup:

  $\max(\tau_{13}) + 0.76 \leq \min(\tau_{10}) \Leftrightarrow$
  $3t_c + 0.41 + 0.76 \leq 4t_c \Leftrightarrow$
  $t_c \geq 1.18$

- Hold:

  $\min(\tau_{14}) \geq \max(\tau_{10} + 0.02) \Leftrightarrow$
  $5t_c + 0.12 \geq 4t_c + 0.02 \Leftrightarrow$
  $t_c \geq -0.10$

$\rightarrow$ Beide unkritisch im Vergleich zu bisherigen Constraints.

Fazit: Zykluszeit und Befehlsrate

- Vorläufiges Ergebnis: Falls sich durch andere Befehle keine schärferen Bedingungen an die Zykluszeit ergeben, dann lautet sie:
  - $t_c \geq 6.70\ ns$
- Taktfrequenz:
  - $v = \frac{1}{6.70} \cdot 10^9\ Hz = 149.2\ MHz$
- 8 Takte pro Befehl $\rightarrow$ 18.6 Millionen Befehle pro Sekunde, d.h. Befehlsrate von 18.6 *MIPS* (= Million Instructions per Second)

Anmerkungen zur Timing–Analyse

- Eine „echte” Timing–Analyse müsste noch Leitungslaufzeiten auf dem Chip berücksichtigen.
- Dazu muss dann aber schon das Layout des Chips bekannt sein, um die Leitungslängen und -kapazitäten zu berechnen.
- Leitungslaufzeiten waren früher bei einem Aufbau mit diskreten Bausteinen vernachlässigbar, sind es bei den heutigen Technologien aber nicht mehr.

$\Rightarrow$ Exakte Timing-Analysen sind heute daher kaum ohne maschinelle Unterstützung durchführbar.

- Synthesetools sind in der Lage, durch Optimierung der Treiberstärken von Grundgattern (verschiedene Versionen in der Bibliothek!) Laufzeiten zu minimieren.
- Wird das SRAM nicht auf dem Chip integriert (d.h. stattdessen ein kommerzielles externes SRAM angeschlossen), dann muss man noch Verzögerungszeiten für I/O–Pads des Chips mit eventueller Anpassung von Spannungspegeln berücksichtigen.

Ausblick 1/2

- Beschleunigung
  - Schnellere Komponenten, z.B. ALU (siehe Übung)
  - Schnellere Adressberechnung (Treiber schon bei P0 öffnen)
  - Verkürzung des Fetch-Zyklus um 1 Takt
  - Pipelining
  - Schnellerer Speicher
  - ...

Ausblick (2/2)

- Fehlertoleranz (Kapitel 6)
  - Wie umgehen mit Übertragungsfehlern auf den Leitungen?
  - Parity-Check, Hamming-Code
  - Andere Fehler ...
- Verifikation (Kapitel 7)
  - Ist der Entwurf der ReTI überhaupt korrekt?
  - Automatische Methoden für den Beweis der Korrektheit
- Architekturkonzepte (Kapitel 8)
  - Speicherhierarchie
  - Pipelining
  - Parallelität