Einführung in Computer Microsystems

4. Modellierungskonzepte in Verilog

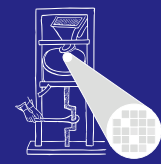
Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2007

Organisatorisches

Organisatorisches



- Klausurtermine
  - 31.05.2007, 18:00-18:45 Uhr
  - 26.07.2007, 17:00-18:30 Uhr
- Tutorensprechstunde im C-Pool
  - Thomas Feller, Di. 13:30-15:00 Uhr in C005

Organisatorisches

- Klausurtermine
  - 31.05.2007, 18:00-18:45 Uhr
  - 26.07.2007, 17:00-18:30 Uhr
- Tutorensprechstunde im C-Pool
  - Thomas Feller, Di. 13:30-15:00 Uhr in C005

Organisatorisches

- Klausurtermine
  - 31.05.2007, 18:00-18:45 Uhr
  - 26.07.2007, 17:00-18:30 Uhr
- Tutorensprechstunde im C-Pool
  - Thomas Feller, Di. 13:30-15:00 Uhr in C005

Organisatorisches

- Klausurtermine
  - 31.05.2007, 18:00-18:45 Uhr
  - 26.07.2007, 17:00-18:30 Uhr
- Tutorensprechstunde im C-Pool
  - Thomas Feller, Di. 13:30-15:00 Uhr in C005

Organisatorisches

- Klausurtermine
  - 31.05.2007, 18:00-18:45 Uhr
  - 26.07.2007, 17:00-18:30 Uhr
- Tutorensprechstunde im C-Pool
  - Thomas Feller, Di. 13:30-15:00 Uhr in C005

Parallelität

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
  - Modellierung durch parallele always-Blöcke

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
  - Modellierung paralleler Vorgänge

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
  - $\Rightarrow$ Modellierung paralleler Vorgänge

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
  - $\Rightarrow$ Modellierung paralleler Vorgänge

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
    - Modelliert durch parallele `always`-Blöcke

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
    - Modelliert durch parallele `always`-Blöcke

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
    - Modelliert durch parallele `always`-Blöcke

Parallelität

- In konventionellen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, C
  - Anweisungen werden der Reihe nach bearbeitet
  - Programmzähler zeigt auf aktuelle Anweisung
  - Es gibt nur einen Kontrollfluß
- In HDLs und realen Schaltungen
  - Alle Komponenten arbeiten parallel
  - Z.B. kann eine Taktflanke eine Vielzahl von gleichzeitigen Aktionen auslösen
    - Modelliert durch parallele **`always`**-Blöcke

Modellierung von Parallelität in Verilog

- Instanzen von Modulen
- `always`- und `initial`-Blöcke
- ständige Zuweisungen (*continuous assignments*)
- nichtblockende Zuweisungen
- Mischformen

Modellierung von Parallelität in Verilog

- Instanzen von Modulen
- **`always`-** und **`initial`**-Blöcke
- ständige Zuweisungen (*continuous assignments*)
- nichtblockende Zuweisungen
- Mischformen

Modellierung von Parallelität in Verilog

- Instanzen von Modulen
- **`always`-** und **`initial`**-Blöcke
- ständige Zuweisungen (*continuous assignments*)
- nichtblockende Zuweisungen
- Mischformen

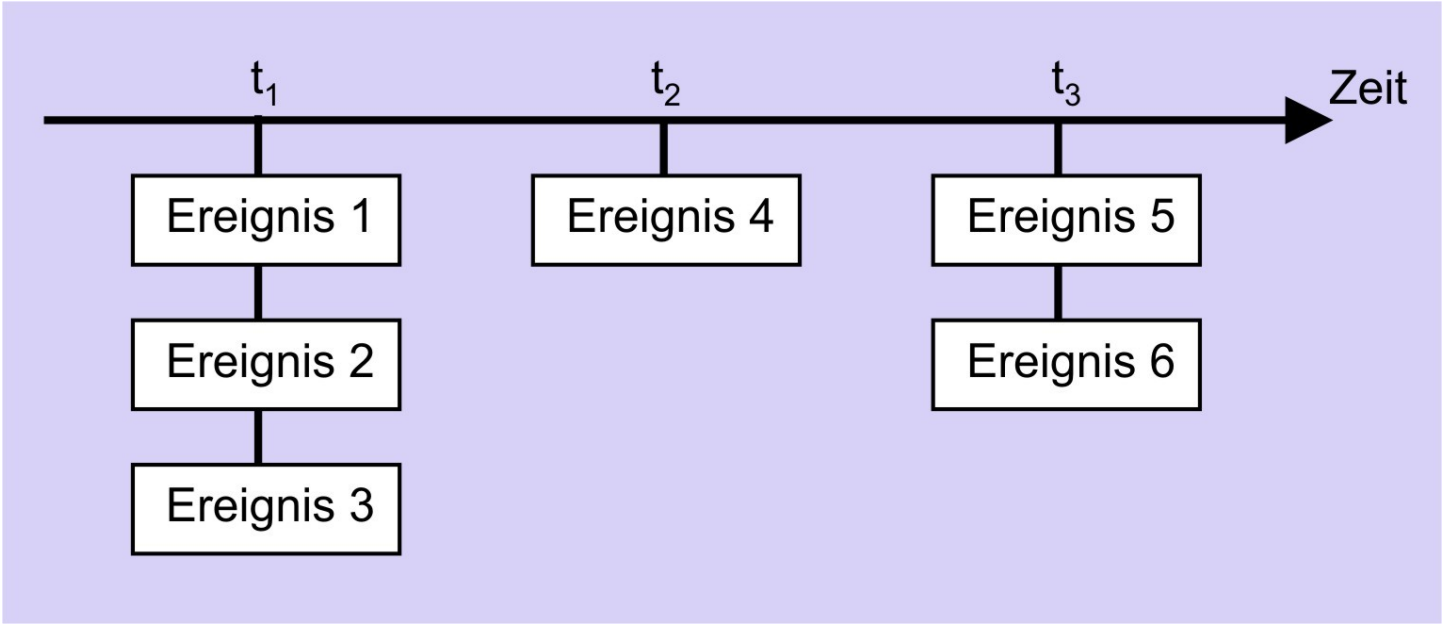
Modellierung von Parallelität in Verilog

- Instanzen von Modulen
- **`always`-** und **`initial`**-Blöcke
- ständige Zuweisungen (*continuous assignments*)
- nichtblockende Zuweisungen
- Mischformen

Modellierung von Parallelität in Verilog

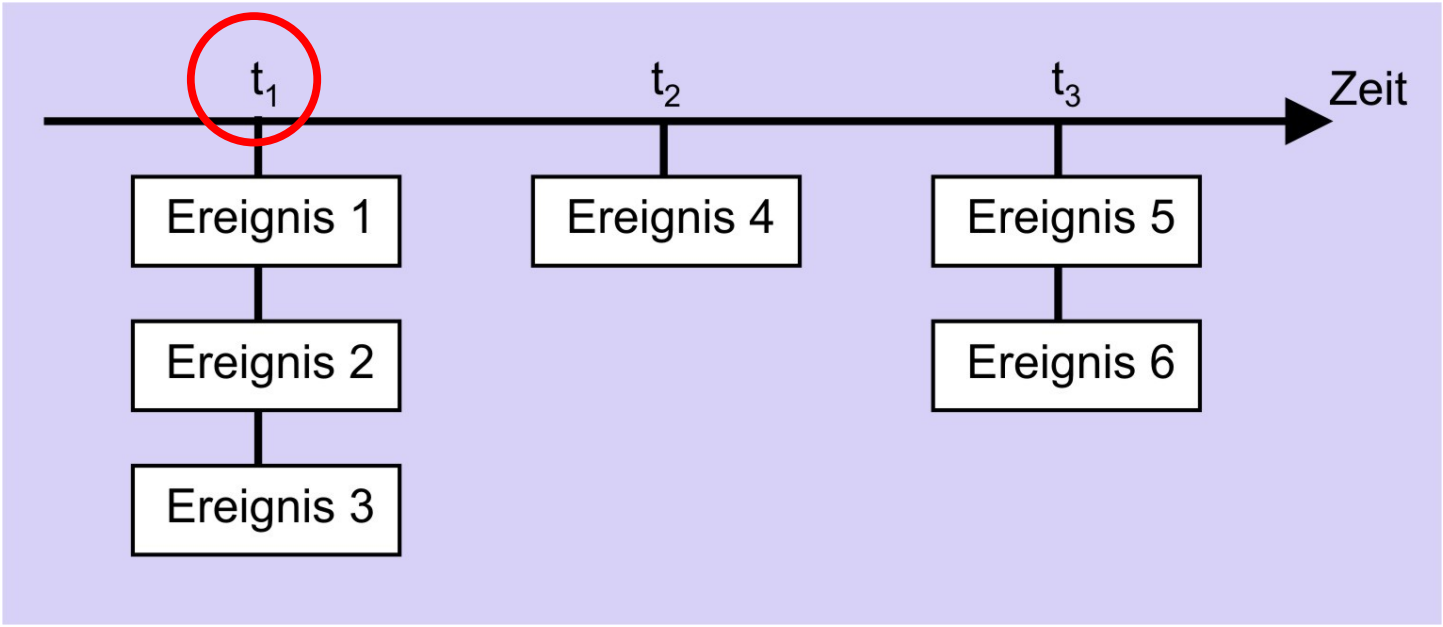
- Instanzen von Modulen
- **`always`-** und **`initial`**-Blöcke
- ständige Zuweisungen (*continuous assignments*)
- nichtblockende Zuweisungen
- Mischformen

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



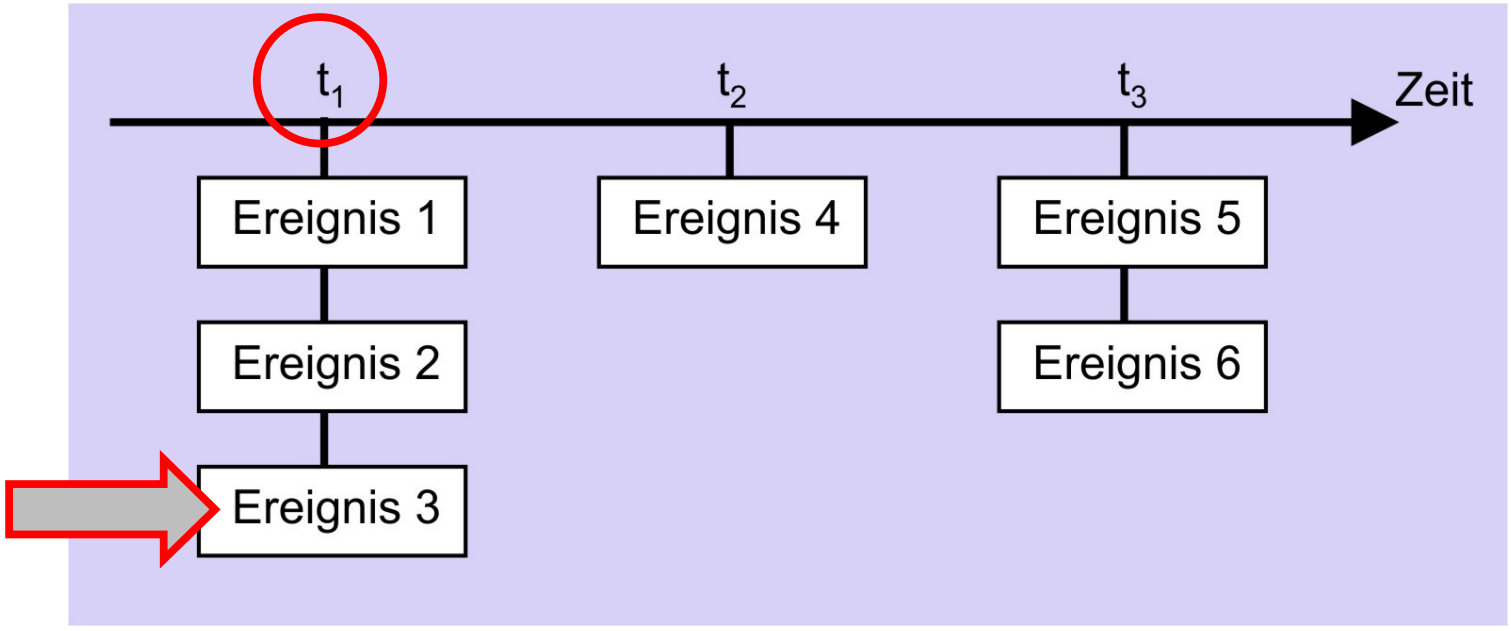
- globale Simulations-Zeitpunkte t_1, t_2, ...
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



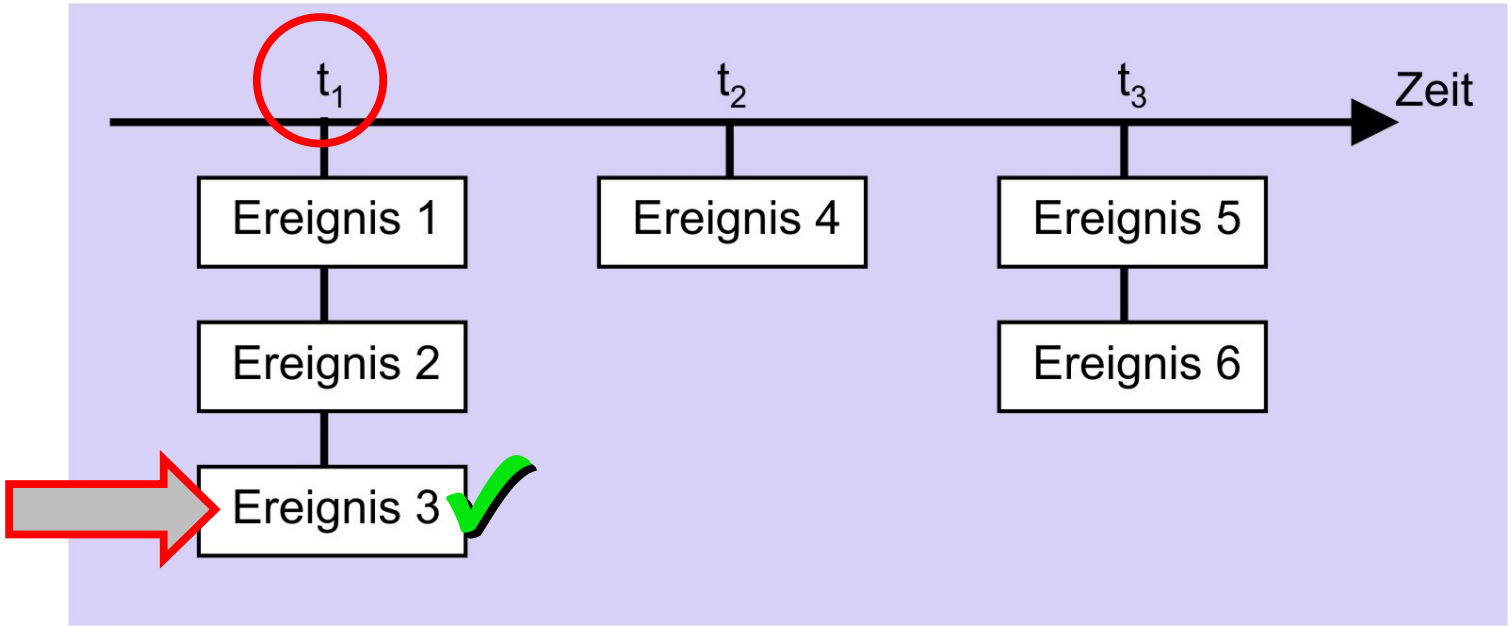
- globale Simulations-Zeitpunkte $t_1, t_2, \ldots$
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



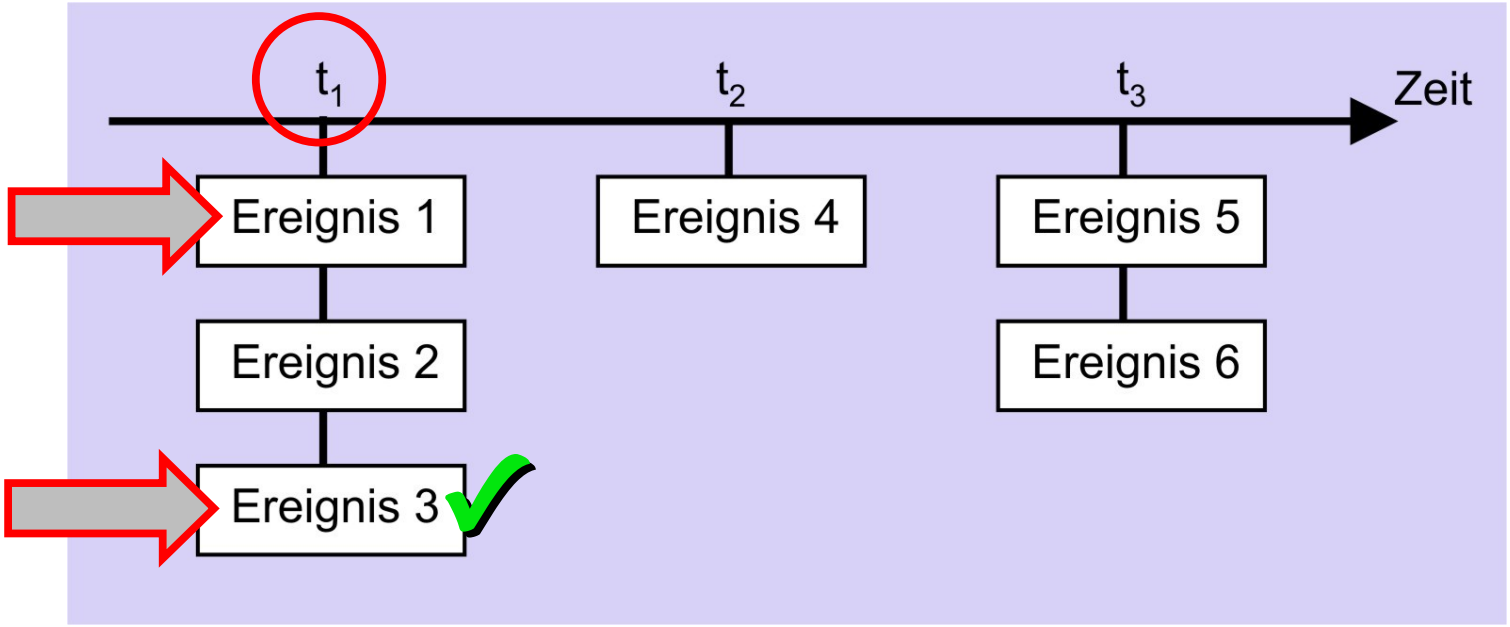
- globale Simulations-Zeitpunkte $t_1, t_2, \ldots$
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



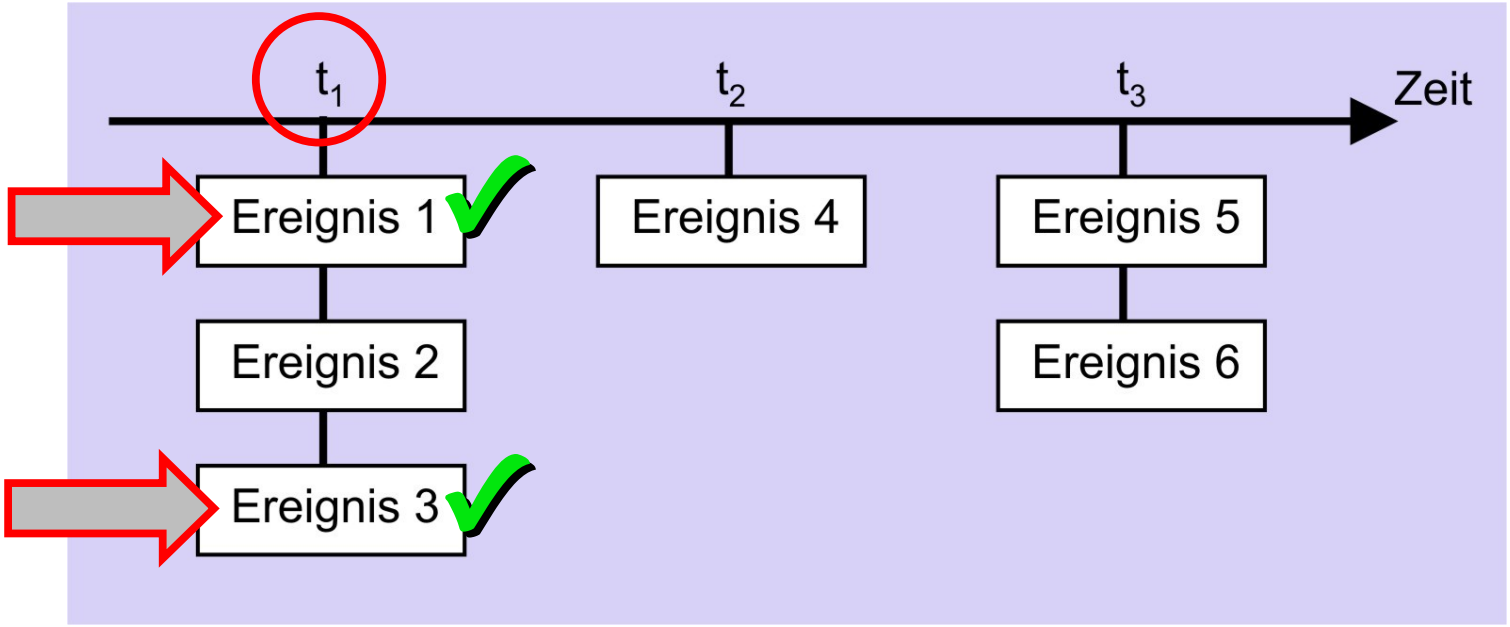
- globale Simulations-Zeitpunkte $t_1, t_2, \ldots$
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



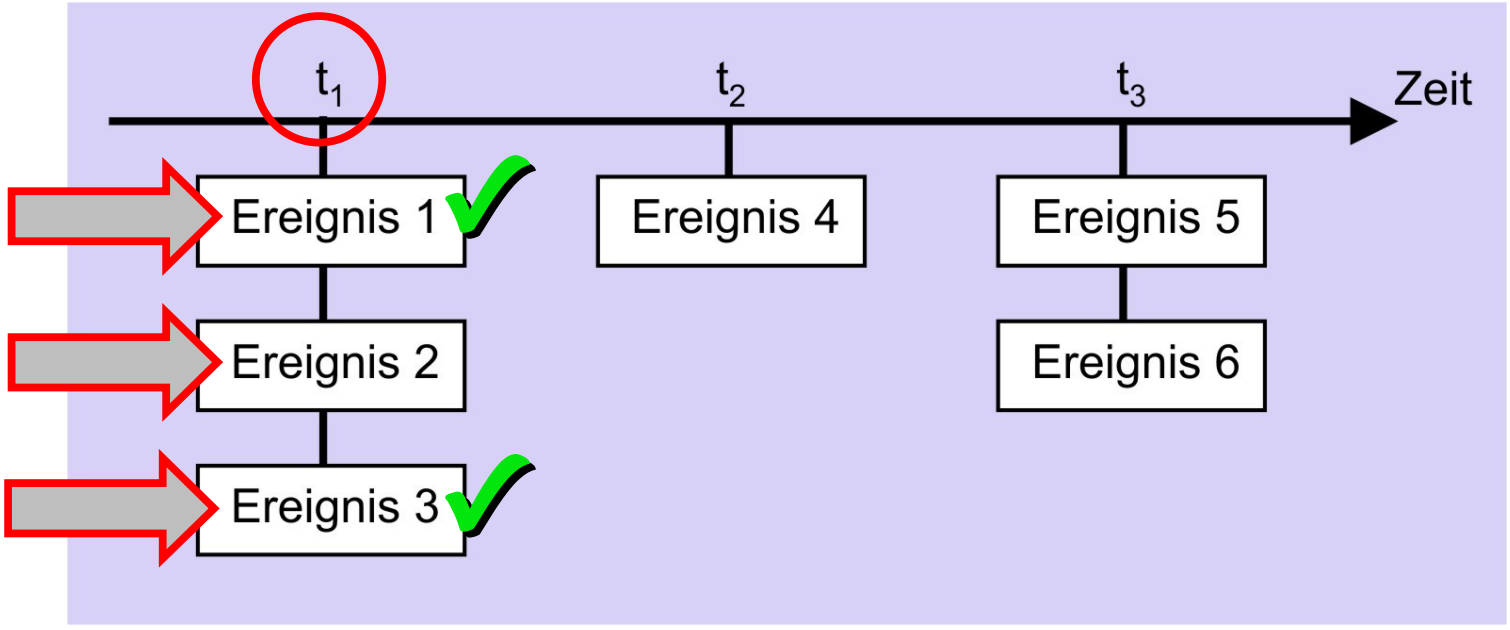
- globale Simulations-Zeitpunkte $t_1, t_2, \ldots$
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



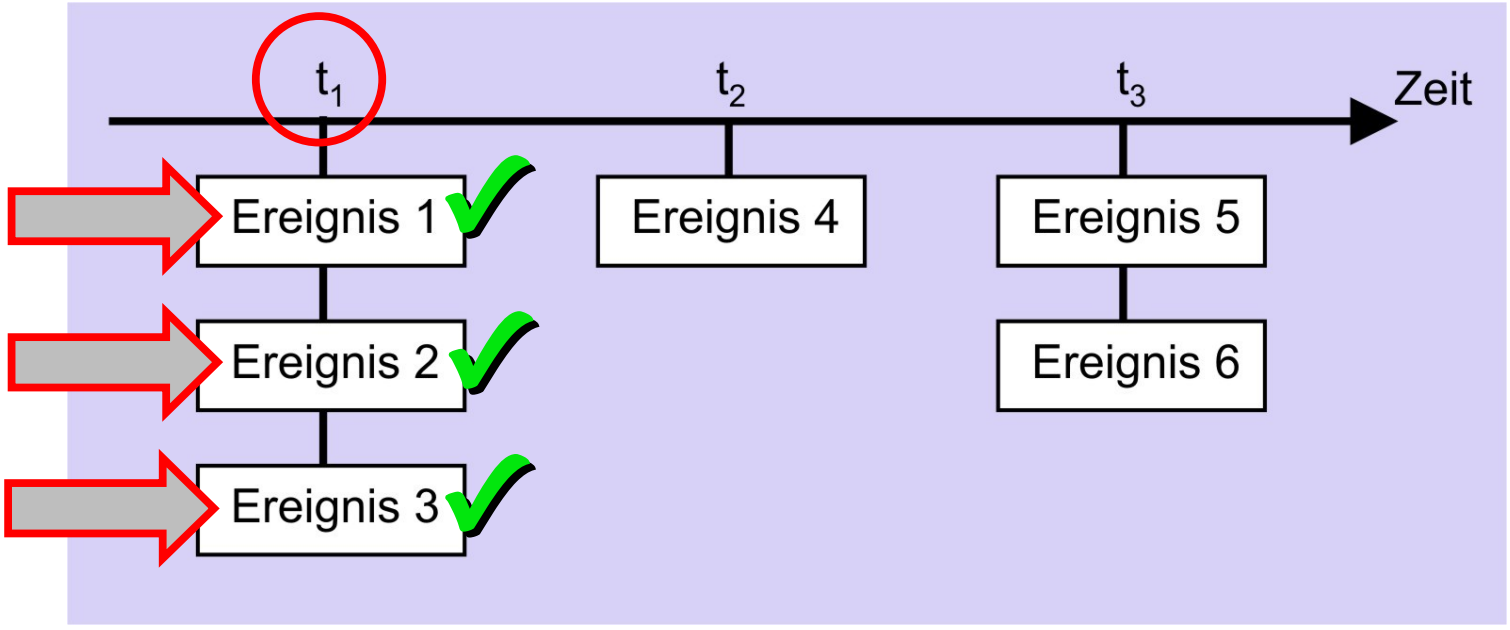
- globale Simulations-Zeitpunkte t_1, t_2, ...
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



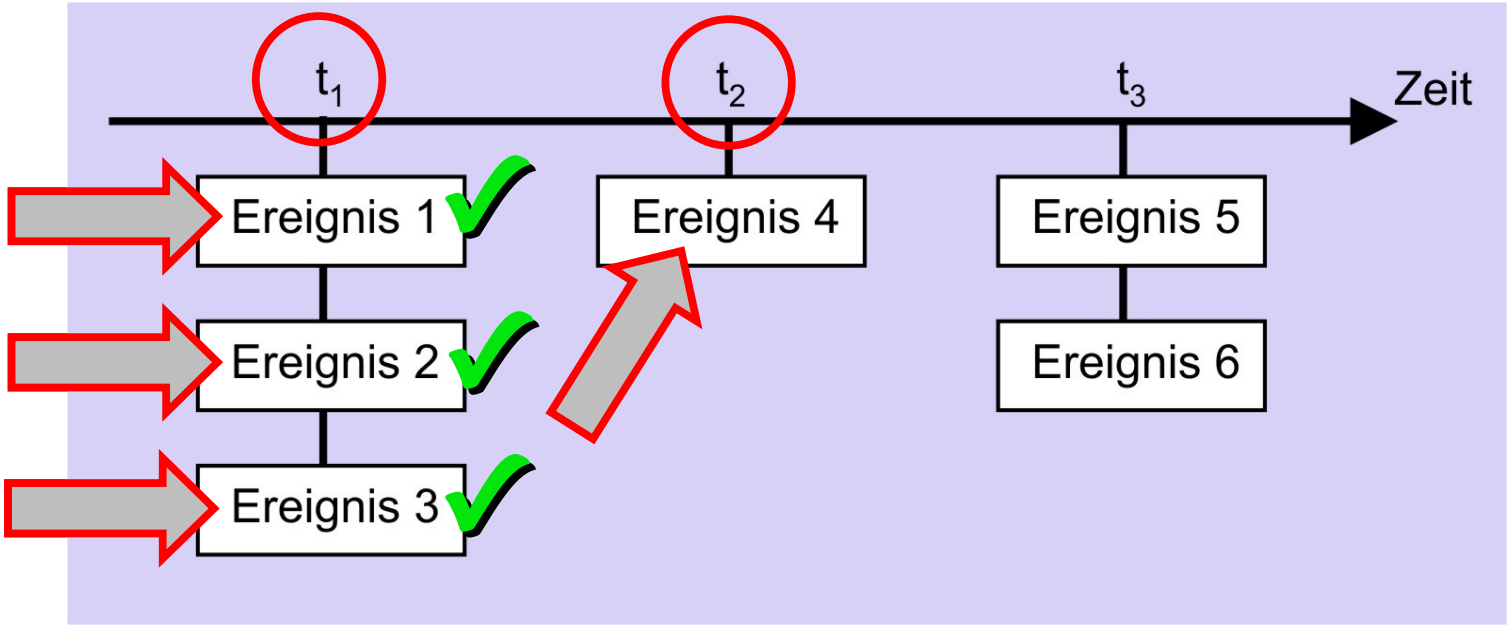
- globale Simulations-Zeitpunkte $t_1, t_2, \ldots$
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



- globale Simulations-Zeitpunkte t_1, t_2, ...
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Ereignisgesteuerte Simulation der Parallelität



- globale Simulations-Zeitpunkte t_1, t_2, ...
- ein oder mehrere Ereignisse sollen jeweils parallel ausgeführt werden
- Ereignis-Scheduler wählt eines zufällig aus
- wenn bei t_1 nichts mehr zu tun, gehe zu t_2 weiter

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Parallelität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Paralleität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Parallelität

- Kein Verlass auf bestimmte Reihenfolge
  - Kann zwischen Simulatoren variieren
  - Kann auch durch Simulationsoptionen beeinflußt werden
- parallel = nicht-deterministisch
  - ein richtiges Ergebnis garantiert nicht allgemeine Korrektheit
  - exponenziell viele Ergebnisse möglich
- Unwägbarkeiten können durch Entwurfsstile reduziert werden
  - Synchrone Register-Transfer-Logik
  - Designer legt Zeitablauf explizit im Modell fest
  - Unterschiedliche Ereignisse finden in unterschiedlichen Takten statt

Register-Transfer-Logik

Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

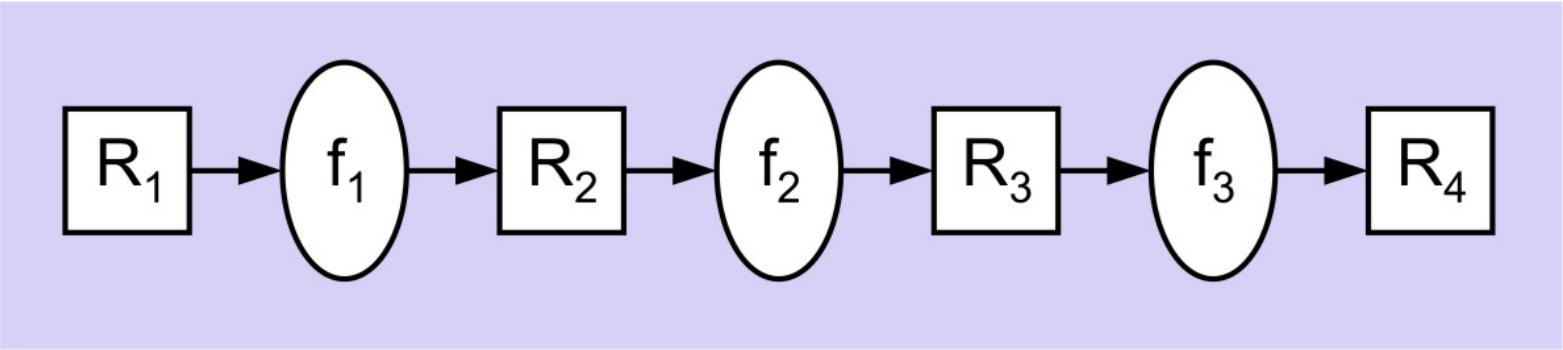
Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

Register-Transfer-Logik (RTL)
Einführung

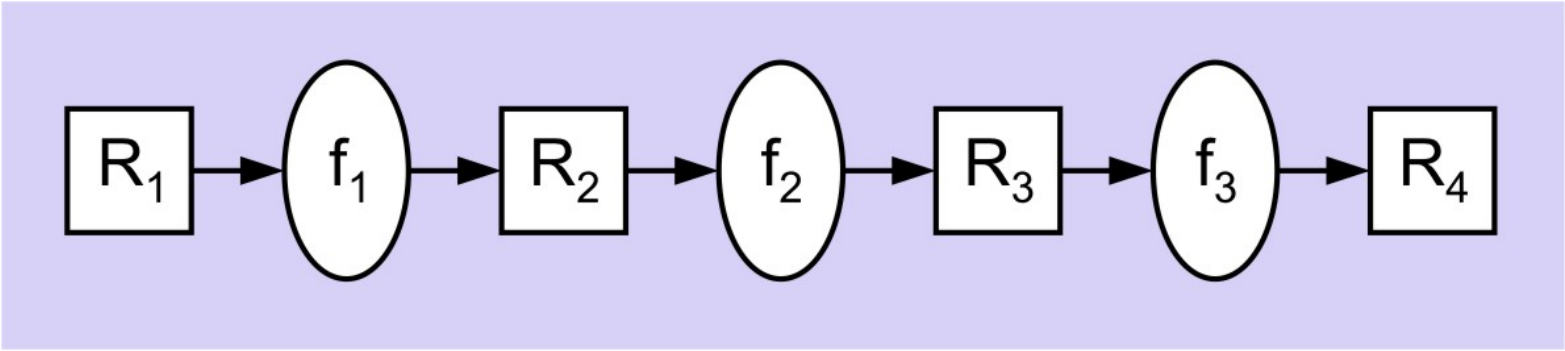
- Grundlegendes und universelles Konzept
- Beliebige Automatennetze übersichtlich realisierbar
- insbesondere effiziente Pipelines
- Ähnlichkeit zum Programmieren $y = f_3(f_2(f_1(x)))$
  - Aber räumlich parallel verteilt
- Synchron durch gemeinsamen Takt
- Gut testbar
- Sehr kompakt mit nichtblockender Zuweisung realisierbar

Pipeline in Register-Transfer-Logik



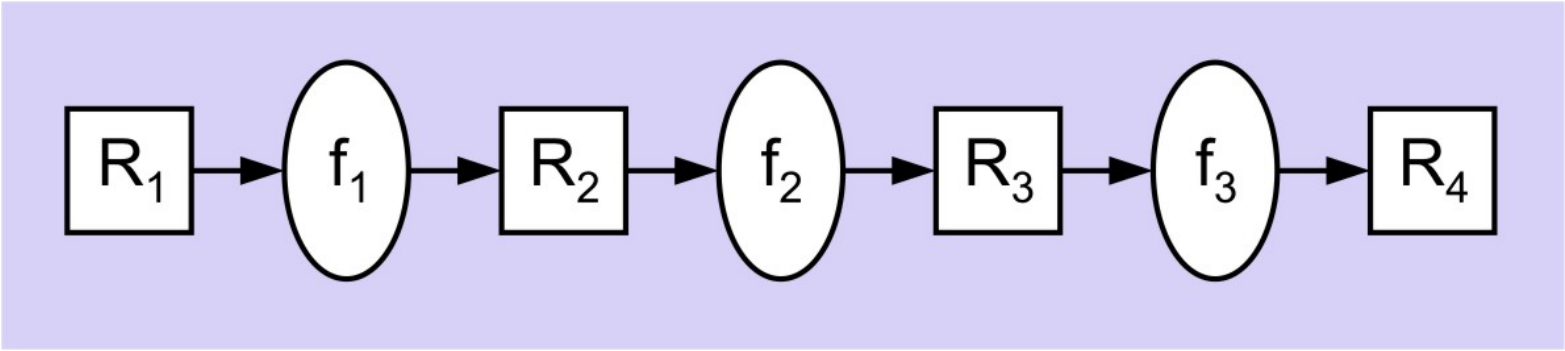
- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

Pipeline in Register-Transfer-Logik



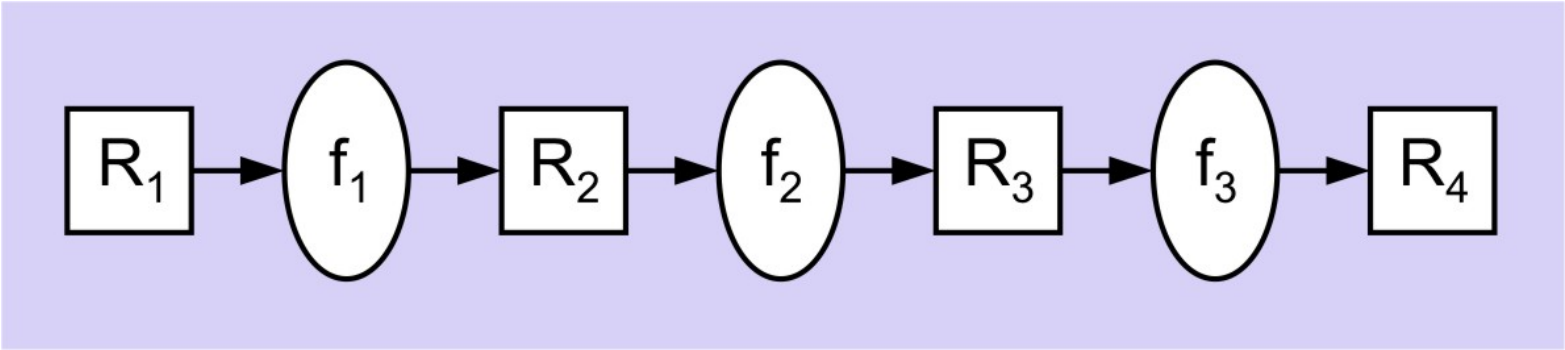
- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

Pipeline in Register-Transfer-Logik



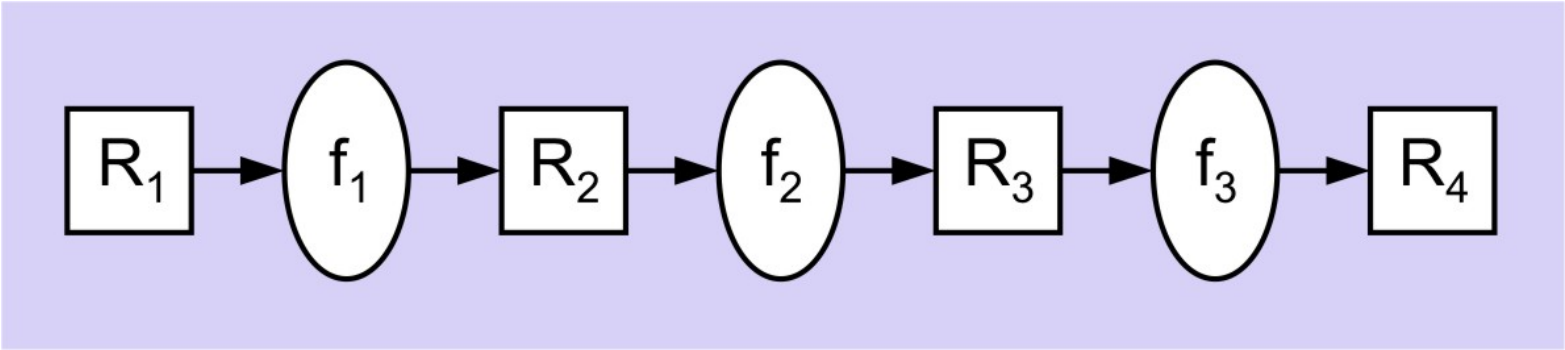
- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

Pipeline in Register-Transfer-Logik



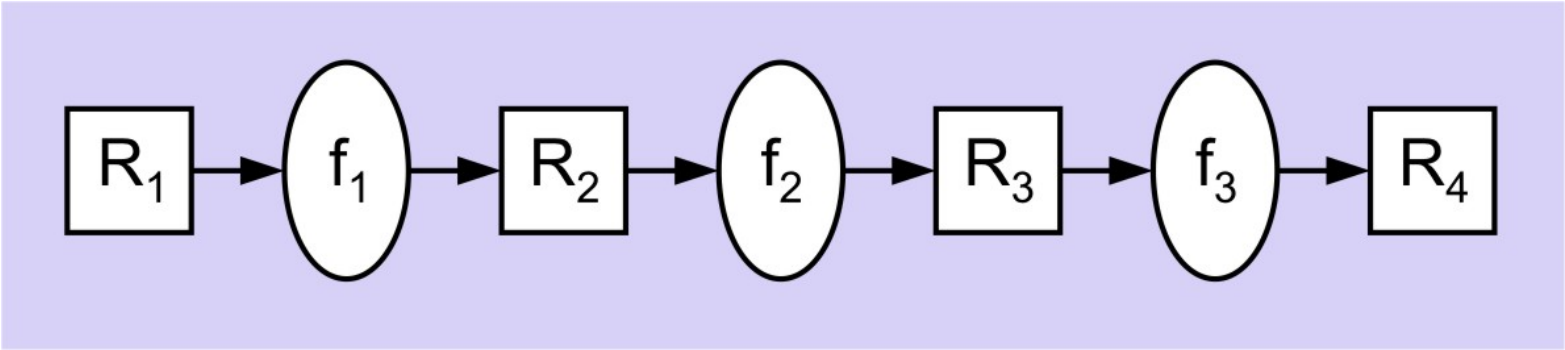
- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

Pipeline in Register-Transfer-Logik



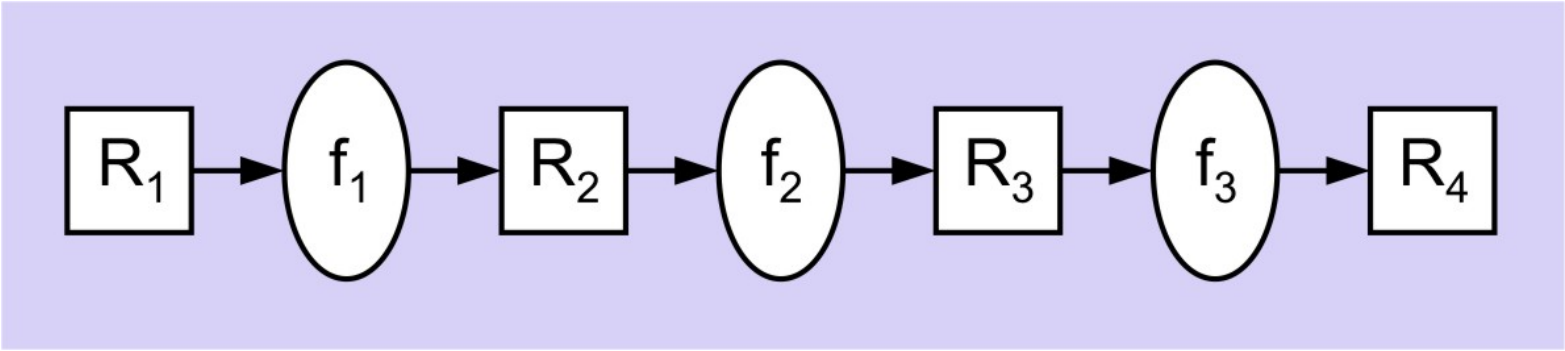
- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

Pipeline in Register-Transfer-Logik



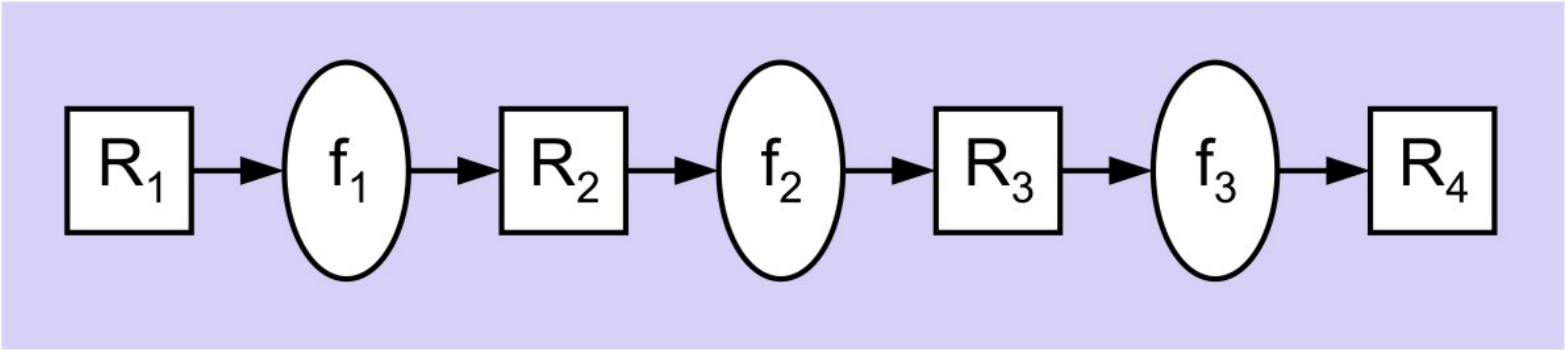
- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

Pipeline in Register-Transfer-Logik



- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

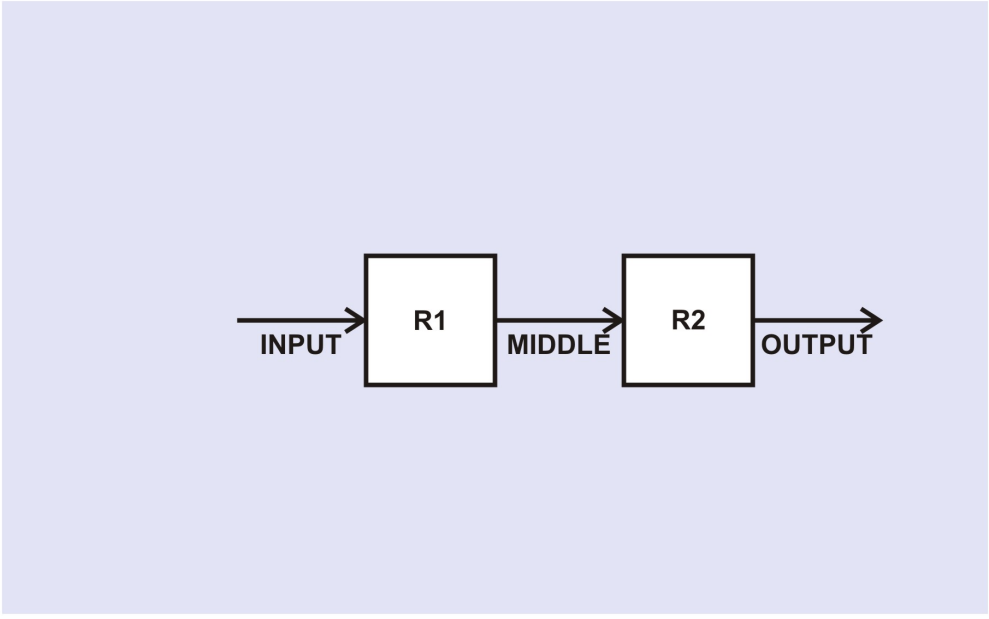
Pipeline in Register-Transfer-Logik



- Kombinatorische Logik zwischen den Registern
  - f_1: verdoppeln
  - f_2: plus 5
  - f_3: quadrieren
- Pipeline berechnet $R_4 = (2R_1 + 5)^2$
  - bearbeitet 3 Datensätze gleichzeitig
  - gibt pro Takt ein Ergebnis aus
  - Damit 3x schneller als sequentielle Berechung der drei Funktionen

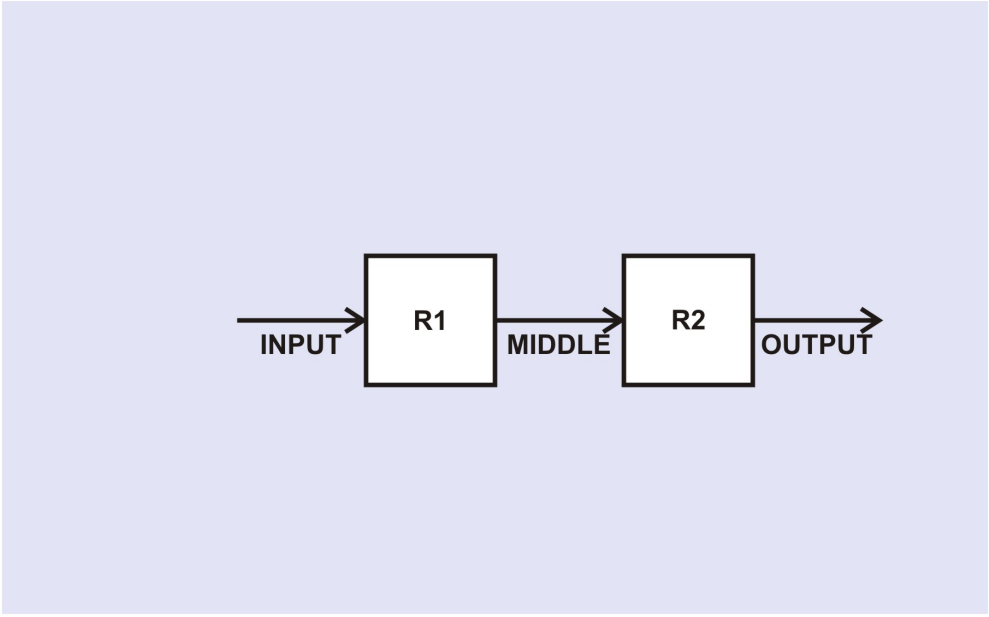
Konstruktion von Pipelines in RTL

1. Schritt: Flip-Flop-Kette



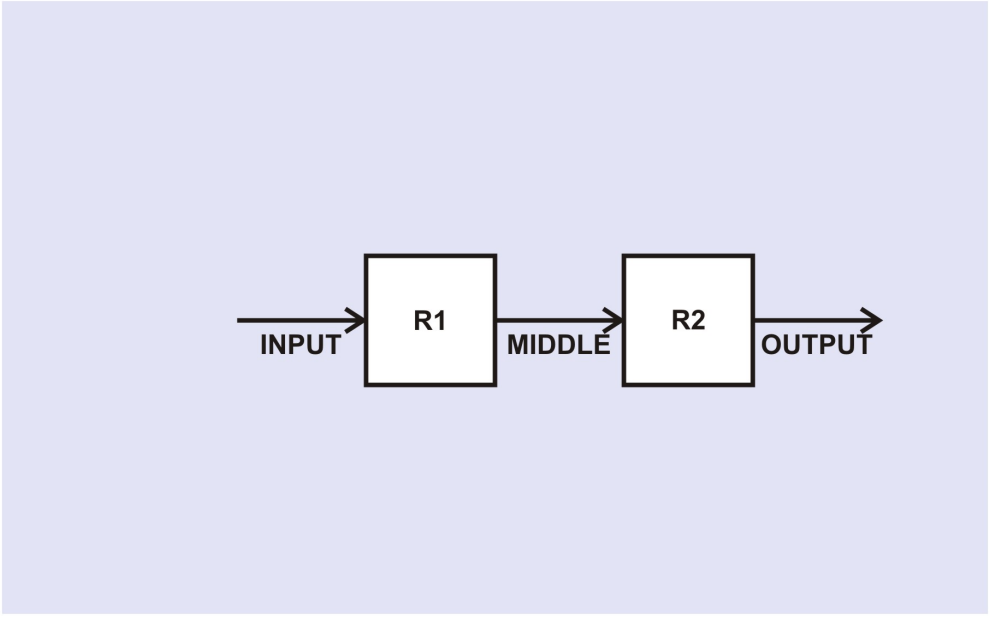
- Mini-Pipeline aus zwei Flip-Flops
- Flip-Flops sind flankengesteuert
  - Unterschied zu Latches (pegelgesteuert)
  - Aufbau z.B. aus Master-Slave-Latches (TGDI1)
- Annahme hier: vorderflankengesteuert
  - always @(posedge CLOCK)

1. Schritt: Flip-Flop-Kette



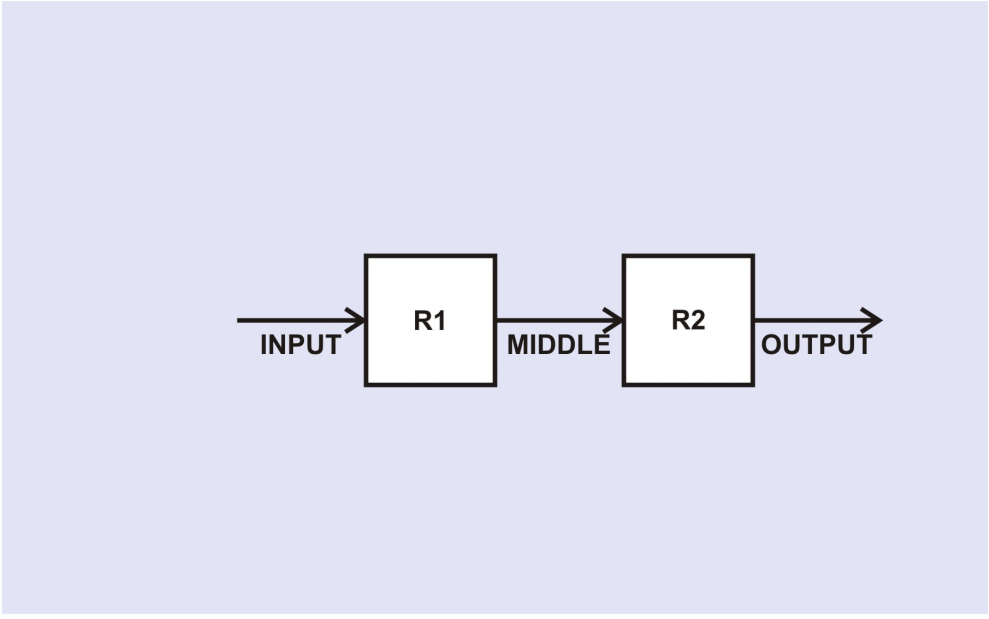
- Mini-Pipeline aus zwei Flip-Flops
- Flip-Flops sind flankengesteuert
  - Unterschied zu Latches (pegelgesteuert)
  - Aufbau z.B. aus Master-Slave-Latches (TGDI1)
- Annahme hier: vorderflankengesteuert
  - always @(posedge CLOCK)

1. Schritt: Flip-Flop-Kette



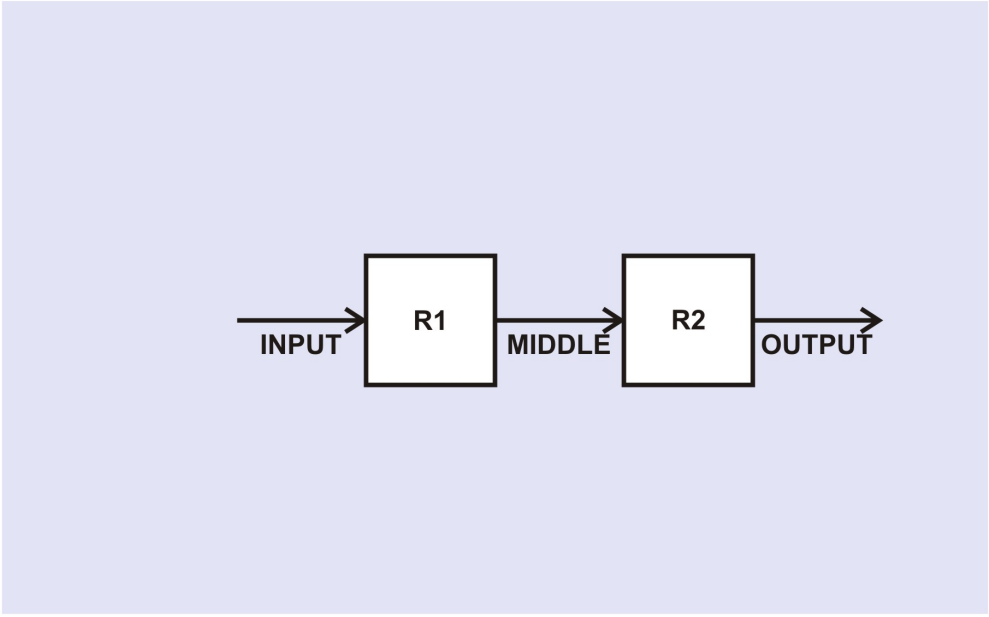
- Mini-Pipeline aus zwei Flip-Flops
- Flip-Flops sind flankengesteuert
  - Unterschied zu Latches (pegelgesteuert)
  - Aufbau z.B. aus Master-Slave-Latches (TGDI1)
- Annahme hier: vorderflankengesteuert
  - always @(posedge CLOCK)

1. Schritt: Flip-Flop-Kette



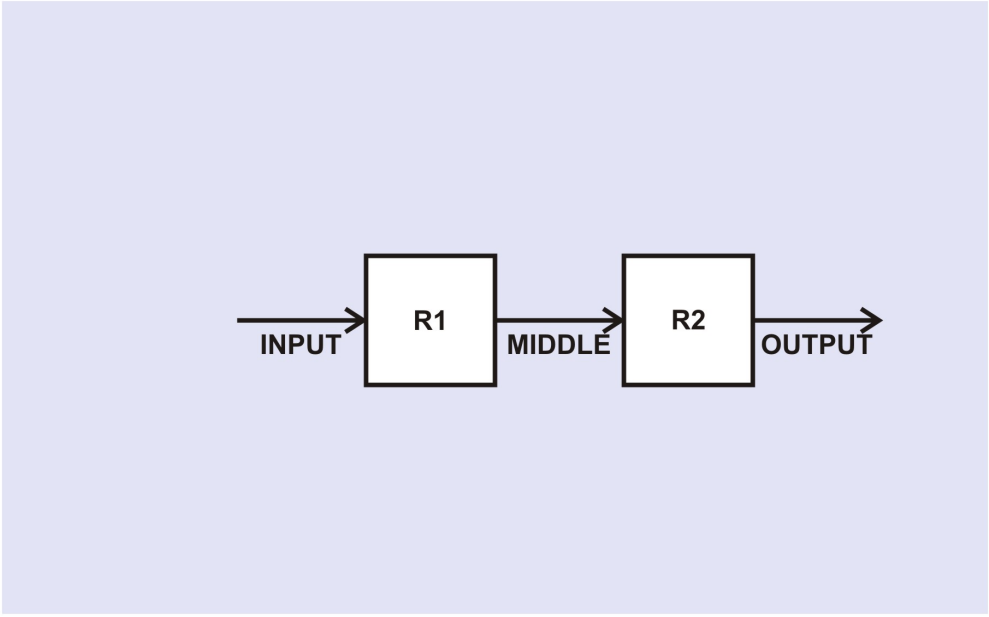
- Mini-Pipeline aus zwei Flip-Flops
- Flip-Flops sind flankengesteuert
  - Unterschied zu Latches (pegelgesteuert)
  - Aufbau z.B. aus Master-Slave-Latches (TGDI1)
- Annahme hier: vorderflankengesteuert
  - always @(posedge CLOCK)

1. Schritt: Flip-Flop-Kette



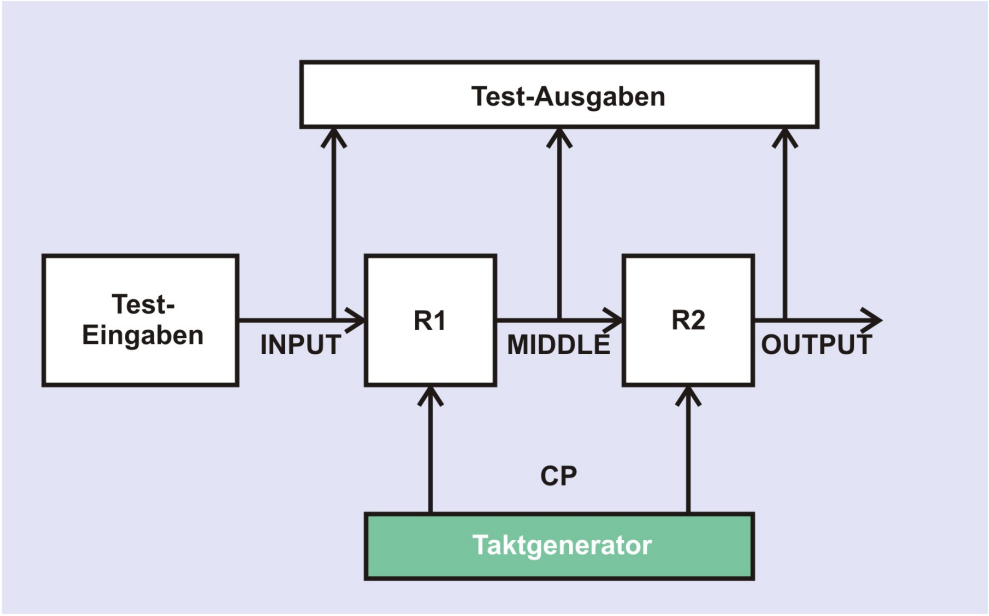
- Mini-Pipeline aus zwei Flip-Flops
- Flip-Flops sind flankengesteuert
  - Unterschied zu Latches (pegelgesteuert)
  - Aufbau z.B. aus Master-Slave-Latches (TGDI1)
- Annahme hier: vorderflankengesteuert
  - always @(posedge CLOCK)

1. Schritt: Flip-Flop-Kette

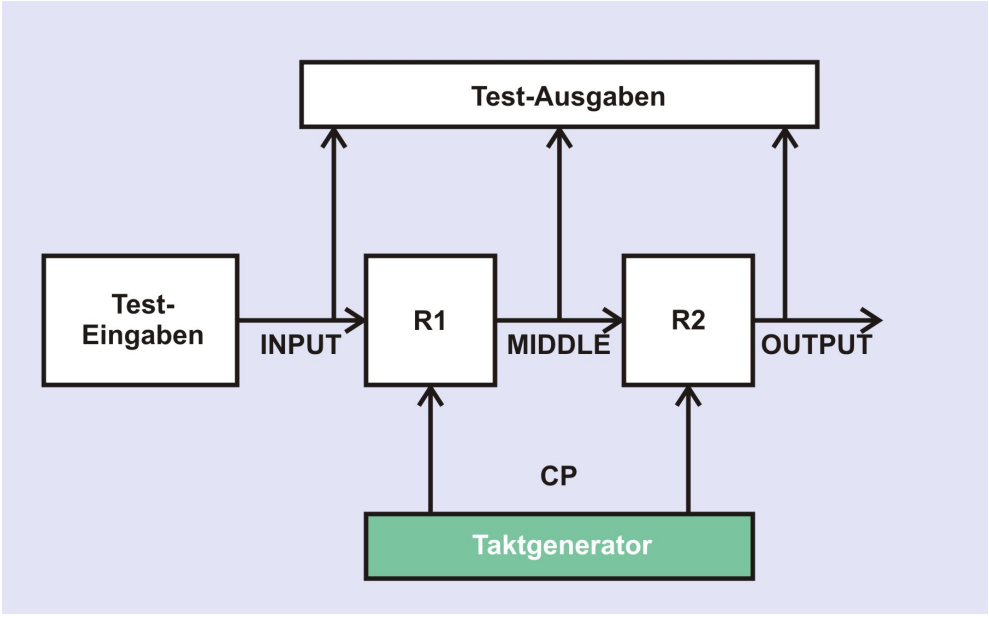


- Mini-Pipeline aus zwei Flip-Flops
- Flip-Flops sind flankengesteuert
  - Unterschied zu Latches (pegelgesteuert)
  - Aufbau z.B. aus Master-Slave-Latches (TGDI1)
- Annahme hier: vorderflankengesteuert
  - **always** @(**posedge** CLOCK)

2. Schritt: Takterzeugung

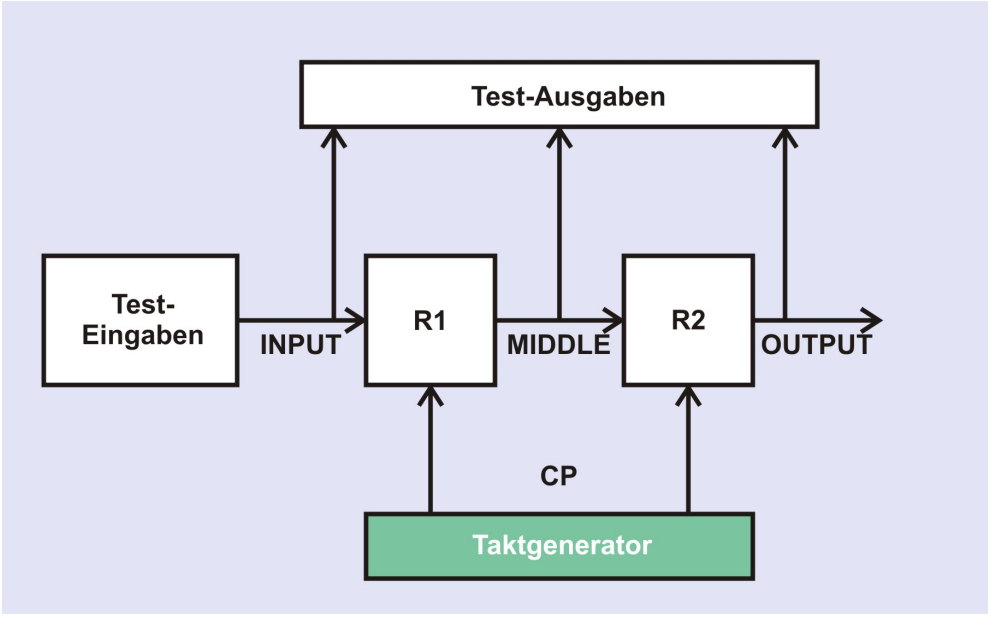


2. Schritt: Takterzeugung

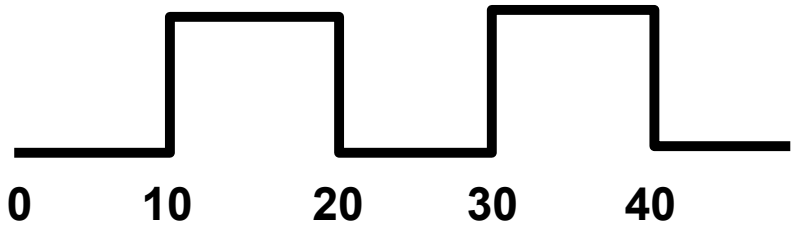



```
always begin
   CP = 0; #10;
   CP = 1; #10;
end
```

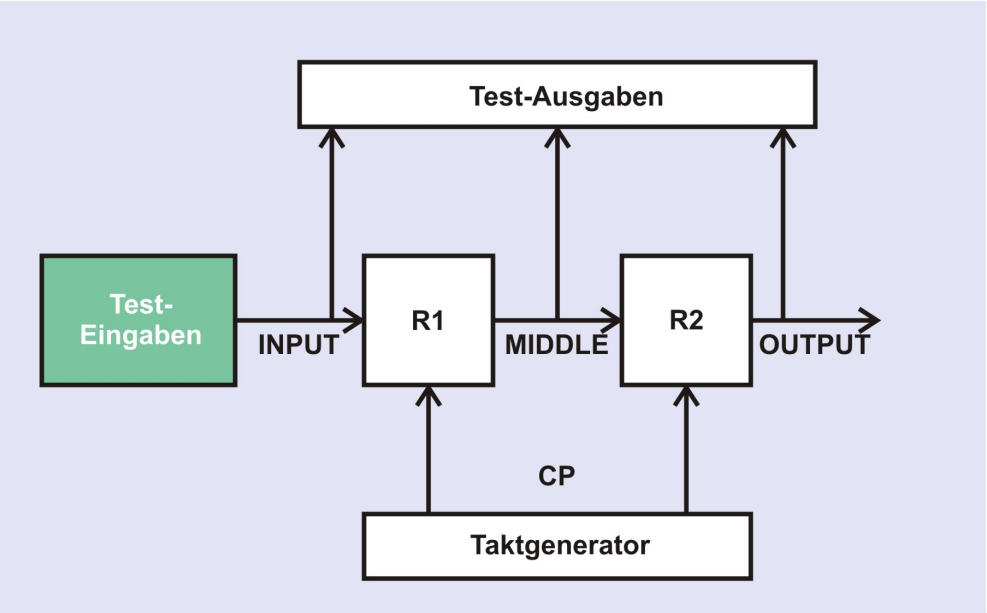
2. Schritt: Takterzeugung



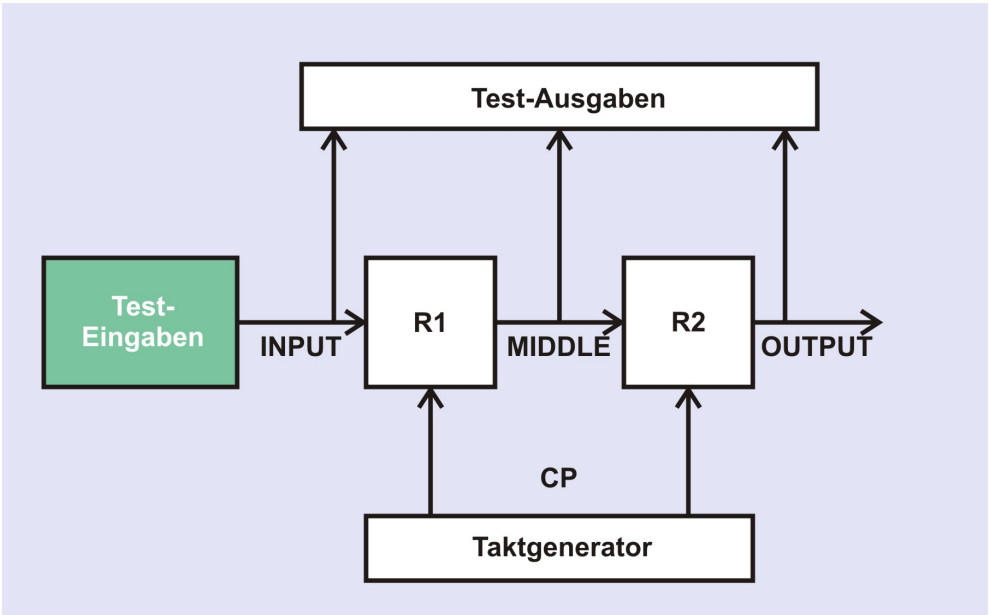

```
always begin
   CP = 0; #10;
   CP = 1; #10;
end
```



3. Schritt: Testeingaben (Stimuli)

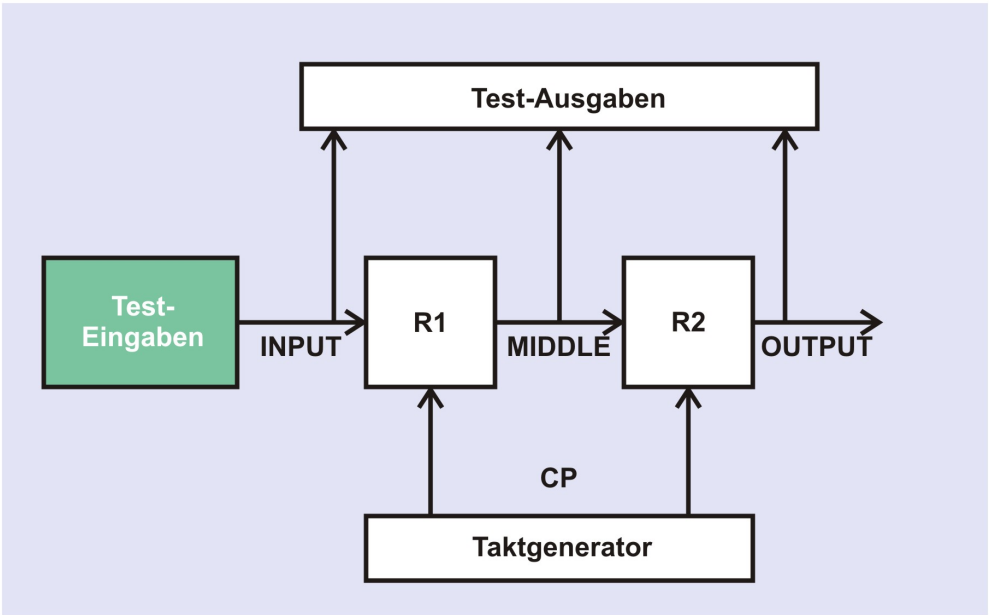


3. Schritt: Testeingaben (Stimuli)

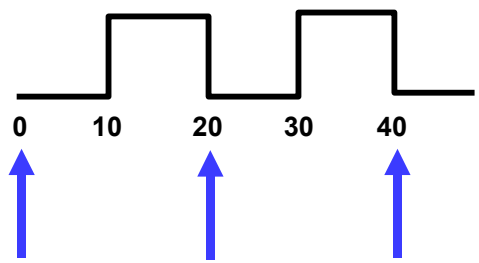



```
initial  begin
  INPUT = 0;      #20;
  INPUT = 255;  #20;
  INPUT = 8'haa; #20;
  $finish;
end
```

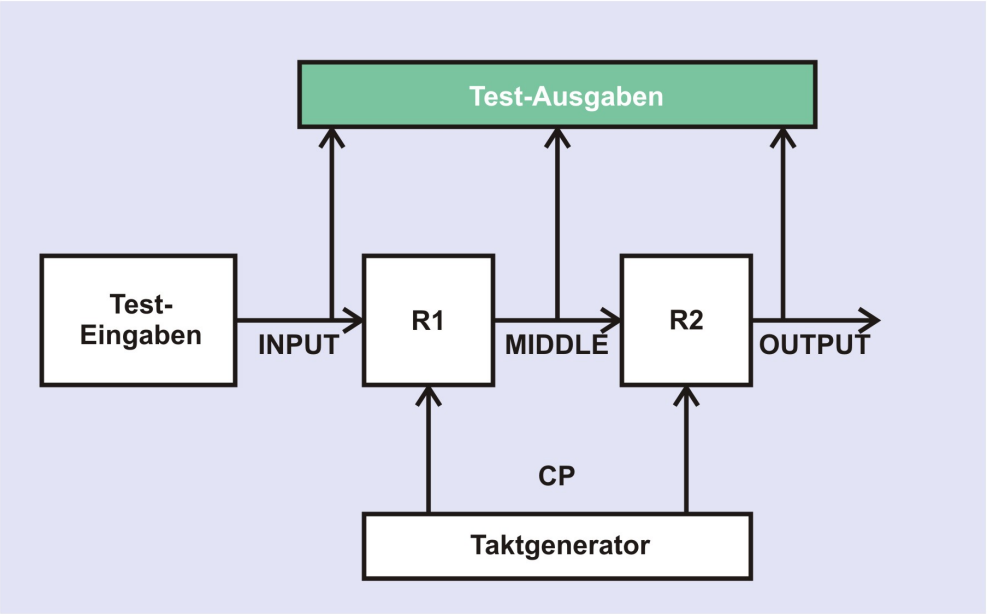
3. Schritt: Testeingaben (Stimuli)



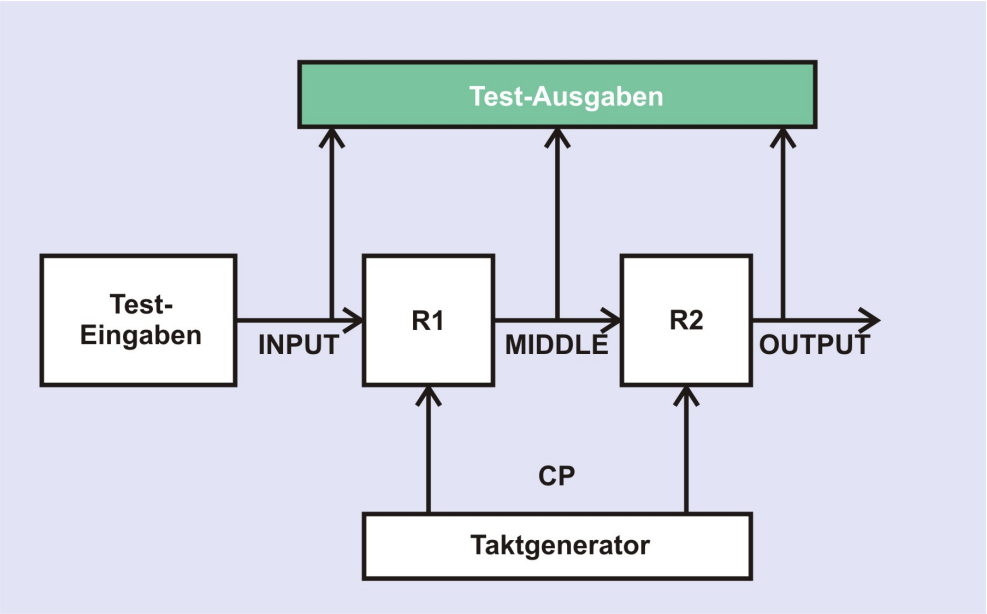

```
initial  begin
  INPUT = 0;      #20;
  INPUT = 255;  #20;
  INPUT = 8'haa; #20;
  $finish;
end
```



4. Schritt: Testausgaben

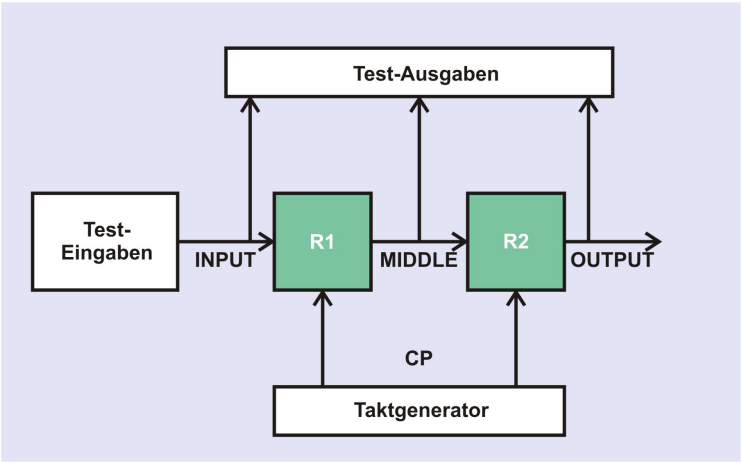


4. Schritt: Testausgaben

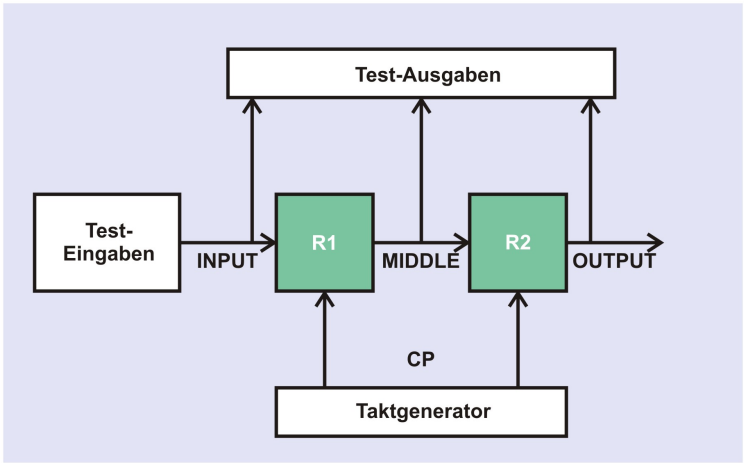



```
always @(INPUT, MIDDLE, OUTPUT)
  $display
    ("Zeit: %2.0f,  INPUT = %h,  MIDDLE = %h,  OUTPUT = %h",
    $time,  INPUT, MIDDLE, OUTPUT);
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops

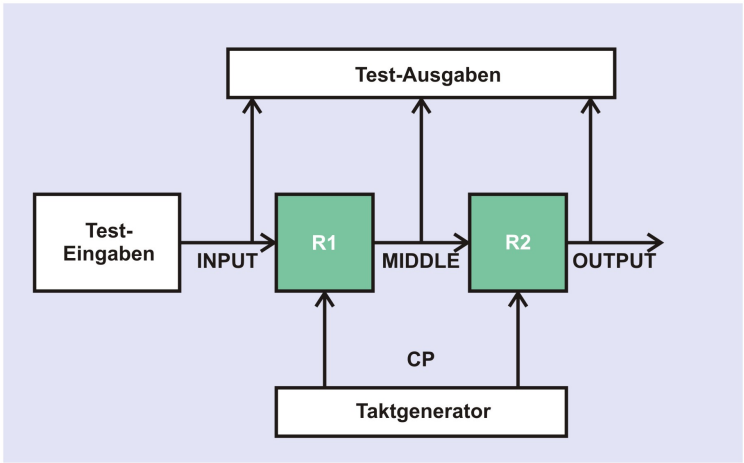


5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops




```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

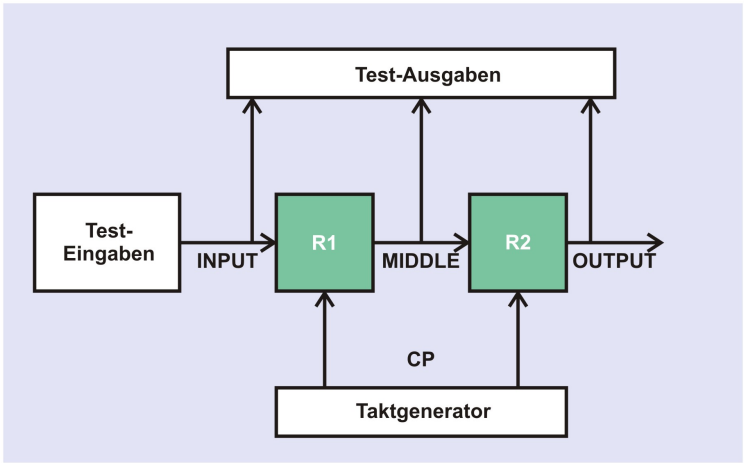
5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops




```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

```
always @(posedge CP) //SIM
  MIDDLE = #1 INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops

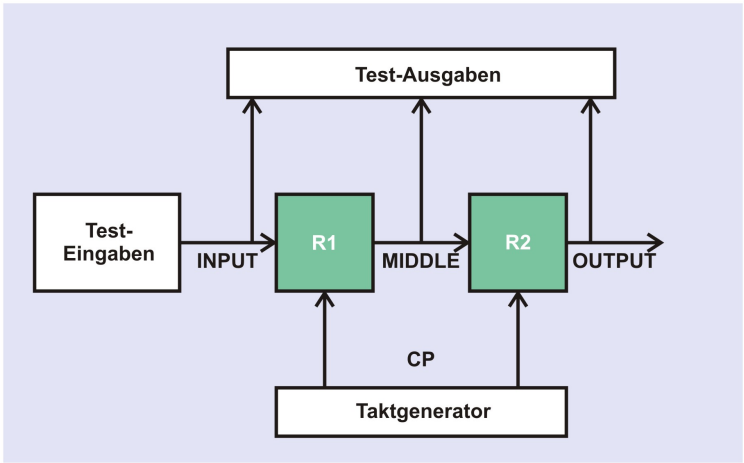



```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE = #1 INPUT; // Fehler!
  OUTPUT = #1 MIDDLE;// Fehler!
end
```

```
always @(posedge CP) //SIM
  MIDDLE = #1 INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops



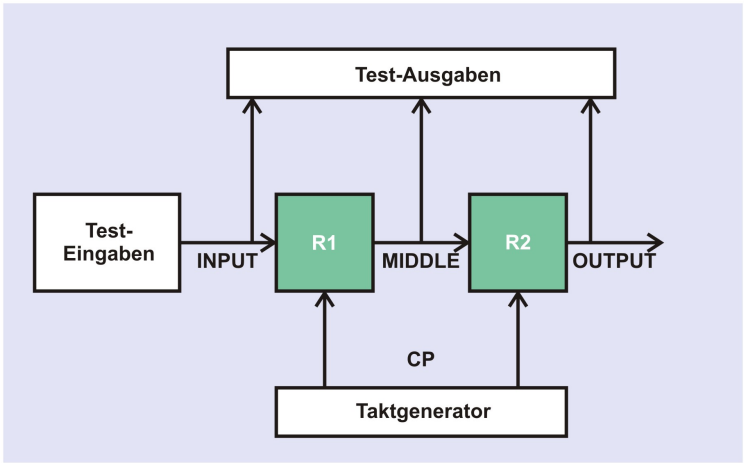

```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE = #1 INPUT; // Fehler!
  OUTPUT = #1 MIDDLE;// Fehler!
end
```

```
always @(posedge CP) //SIM
  MIDDLE = #1 INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

```
always @(posedge CP)
begin
  OUTPUT = MIDDLE;
  MIDDLE = INPUT;
end
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops




```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

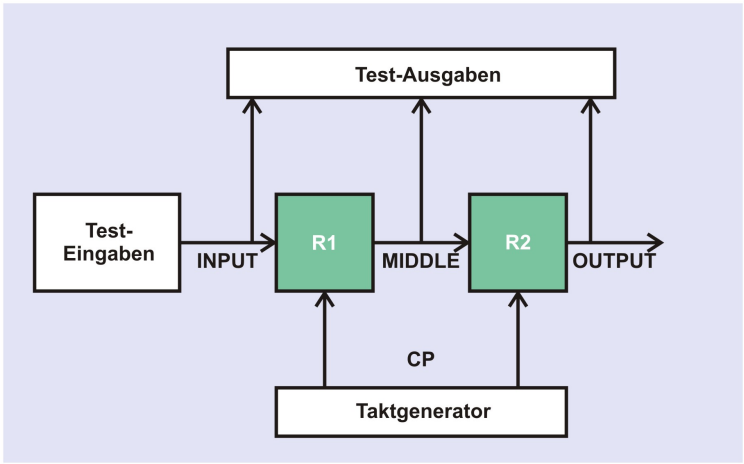
```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE = #1 INPUT; // Fehler!
  OUTPUT = #1 MIDDLE;// Fehler!
end
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE <= INPUT;
  OUTPUT <= MIDDLE;
end
```

```
always @(posedge CP) //SIM
  MIDDLE = #1 INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

```
always @(posedge CP)
begin
  OUTPUT = MIDDLE;
  MIDDLE = INPUT;
end
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops




```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE = #1 INPUT; // Fehler!
  OUTPUT = #1 MIDDLE;// Fehler!
end
```

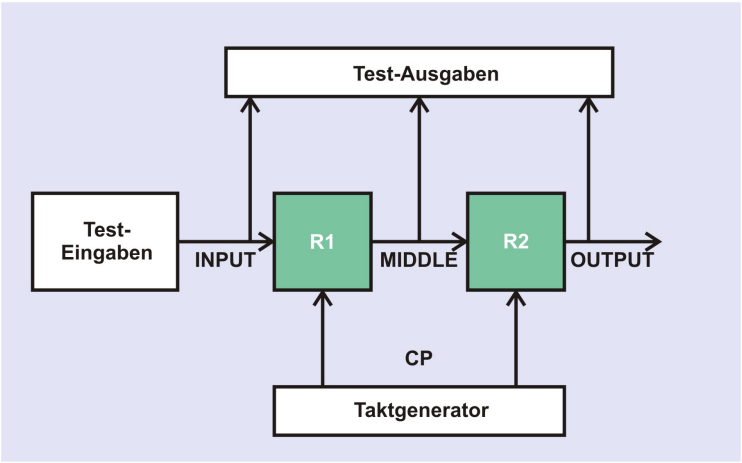
```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE <= INPUT;
  OUTPUT <= MIDDLE;
end
```

```
always @(posedge CP) //SIM
  MIDDLE = #1 INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

```
always @(posedge CP)
begin
  OUTPUT = MIDDLE;
  MIDDLE = INPUT;
end
```

```
always @(posedge CP)
begin
  OUTPUT <= MIDDLE;
  MIDDLE <= INPUT;
end
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops




```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE = #1 INPUT; // Fehler!
  OUTPUT = #1 MIDDLE;// Fehler!
end
```

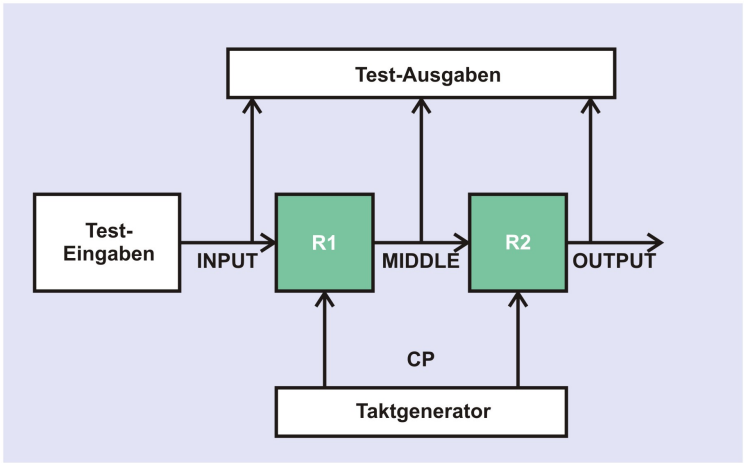
```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE <= INPUT;
  OUTPUT <= MIDDLE;
end
```

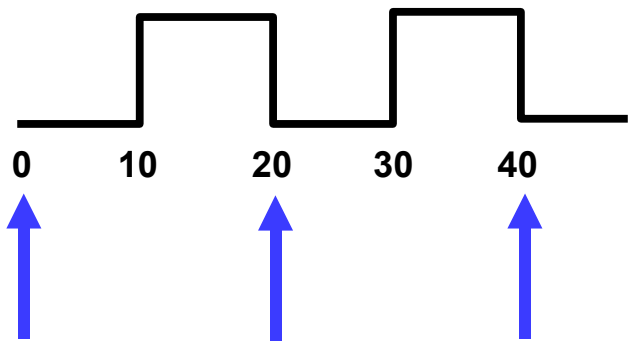
```
always @(posedge CP) //SIM
  MIDDLE = #1 INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

```
always @(posedge CP)
begin
  OUTPUT = MIDDLE;
  MIDDLE = INPUT;
end
```

```
always @(posedge CP)
  MIDDLE <= INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT <= MIDDLE;
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops






```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @(posedge CP)
  OUTPUT = MIDDLE; // Fehler!
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE = #1 INPUT; // Fehler!
  OUTPUT = #1 MIDDLE;// Fehler!
end
```

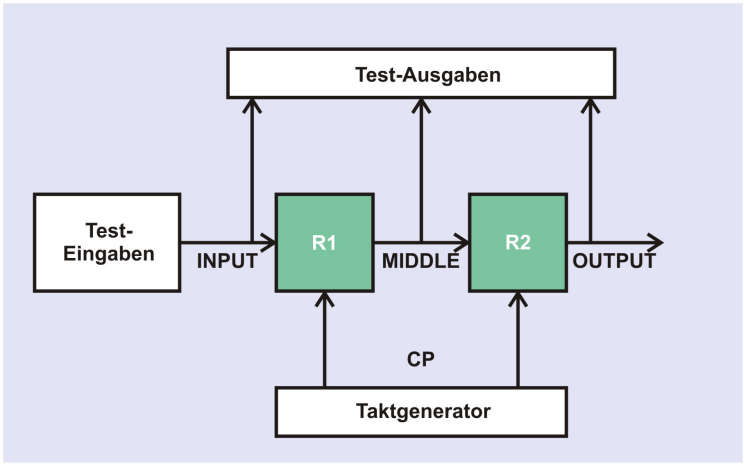
```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE <= INPUT;
  OUTPUT <= MIDDLE;
end
```

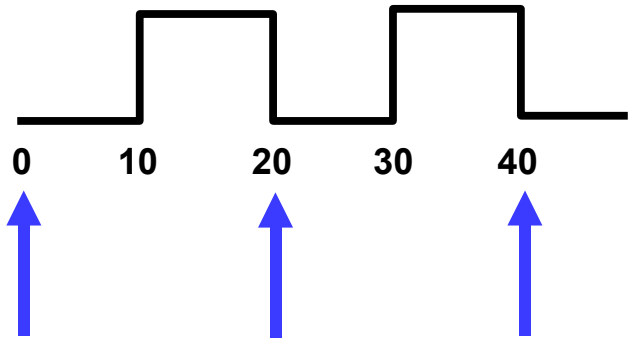
```
always @(posedge CP) //SIM
  MIDDLE = #1 INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

```
always @(posedge CP)
begin
  OUTPUT = MIDDLE;
  MIDDLE = INPUT;
end
```

```
always @(posedge CP)
  MIDDLE <= INPUT;

always @(posedge CP)
  OUTPUT <= MIDDLE;
```

5. Schritt: Modellierung der Flip-Flops






```
always @(posedge CP)
  MIDDLE = INPUT; // Fehler!

always @
  OUTPU
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE = #1 INPUT; // Fehler!
```

```
always @(posedge CP)
begin
  MIDDLE <= INPUT;
```

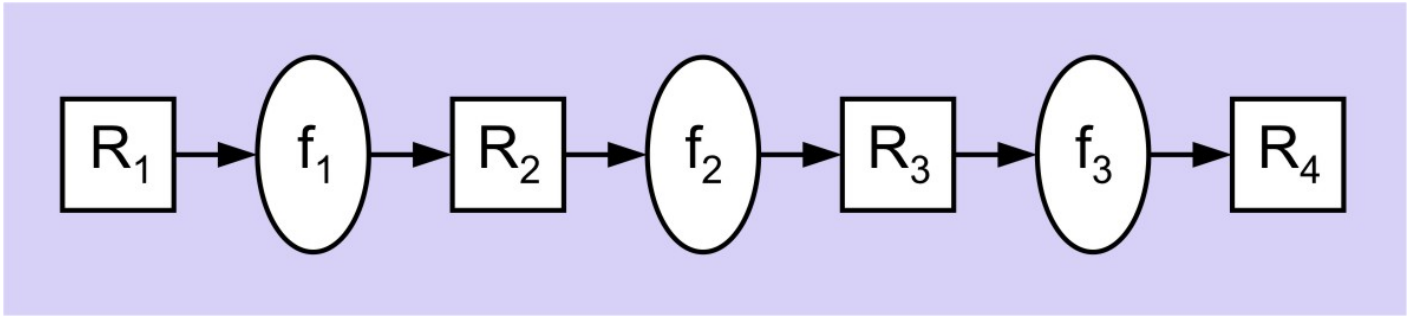
```
Zeit:  0,   INPUT = 00,   MIDDLE = xx,   OUTPUT = xx
Zeit: 11,   INPUT = 00,   MIDDLE = 00,   OUTPUT = xx
Zeit: 20,   INPUT = ff,   MIDDLE = 00,   OUTPUT = xx
Zeit: 31,   INPUT = ff,   MIDDLE = ff,   OUTPUT = 00
Zeit: 40,   INPUT = aa,   MIDDLE = ff,   OUTPUT = 00
Zeit: 51,   INPUT = aa,   MIDDLE = aa,   OUTPUT = ff
```

```
always @
  MIDDLI

always @
  OUTPUT = #1 MIDDLE;
```

```
end
```

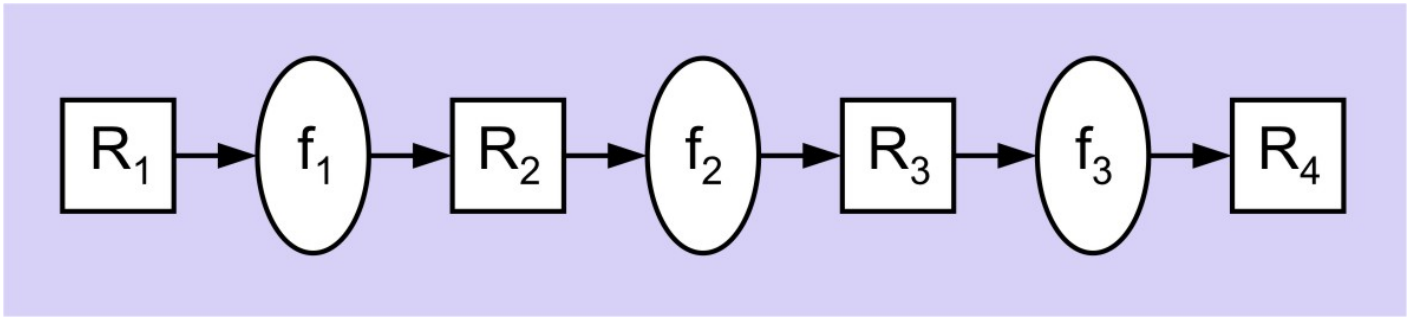
```
  OUTPUT <= MIDDLE;
```

Beispiel-Pipeline: Rahmenmodul



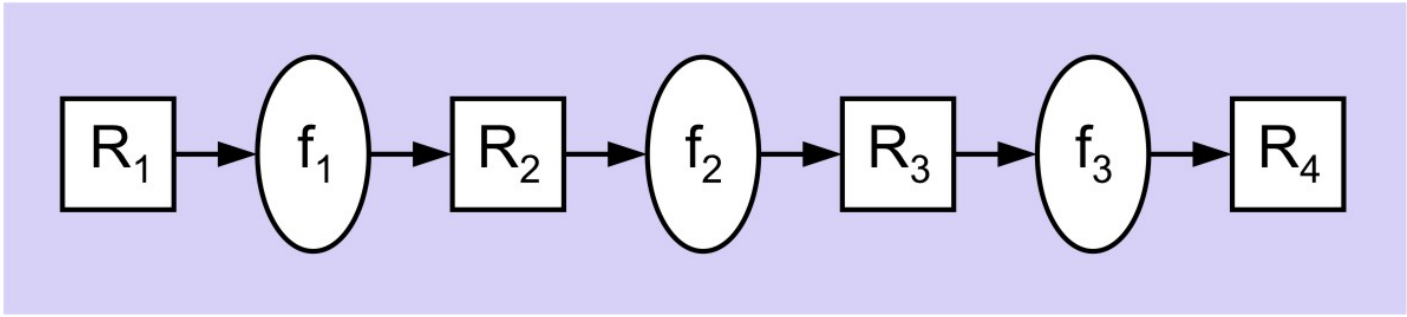

```
module pipeline #(

parameter     Low   = 10,          // Takt low
              High  =  5           // Takt high
);
reg           CLOCK;               // Takt

reg     [7:0] R1,                  // Register 1
              R2,                  // Register 2
              R3,                  // Register 3
              R4;                  // Register 4

integer       I;                   // Hilfsvariable
 ...
endmodule // pipeline
```

Beispiel-Pipeline: Rahmenmodul



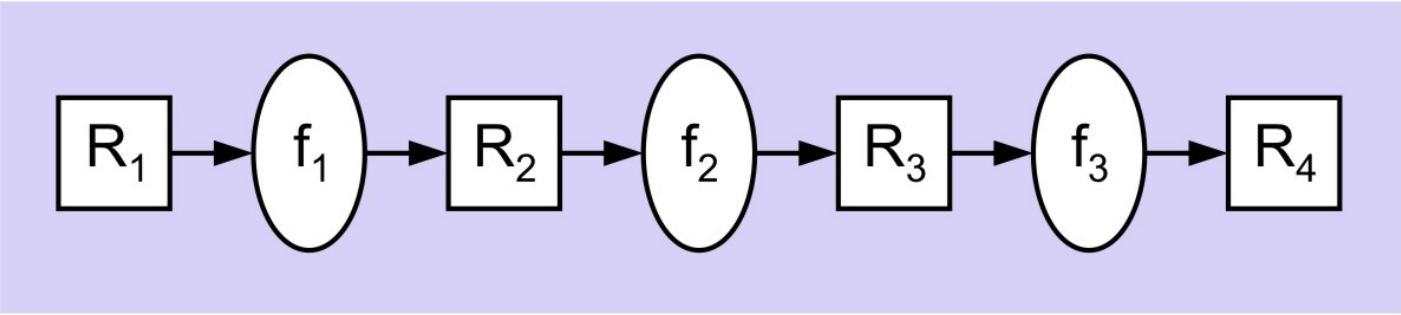

```
module pipeline #(

parameter     Low   = 10,          // Takt low
              High  =  5           // Takt high
);
reg           CLOCK;               // Takt

reg     [7:0] R1,                  // Register 1
              R2,                  // Register 2
              R3,                  // Register 3
              R4;                  // Register 4

integer       I;                   // Hilfsvariable
 ...
endmodule // pipeline
```

Beispiel-Pipeline: Takterzeugung




```
// Ein-Phasen-Takt
always begin
   #Low CLOCK <= 1;                    // Takt low
   #High CLOCK <= 0;                   // Takt high
end
```

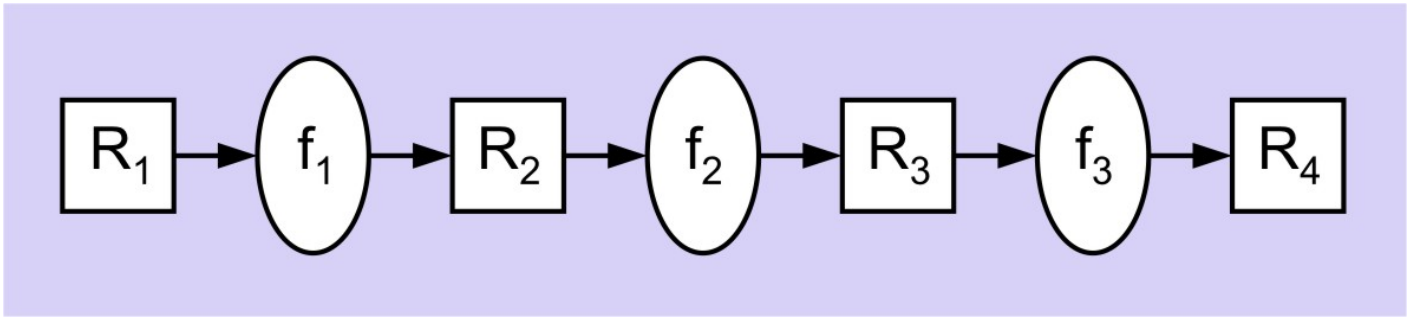
Beispiel-Pipeline: Takterzeugung




```
// Ein-Phasen-Takt
always begin
   #Low CLOCK <= 1;                    // Takt low
   #High CLOCK <= 0;                   // Takt high
end
```

Beispiel-Pipeline: Kombinatorische Logik

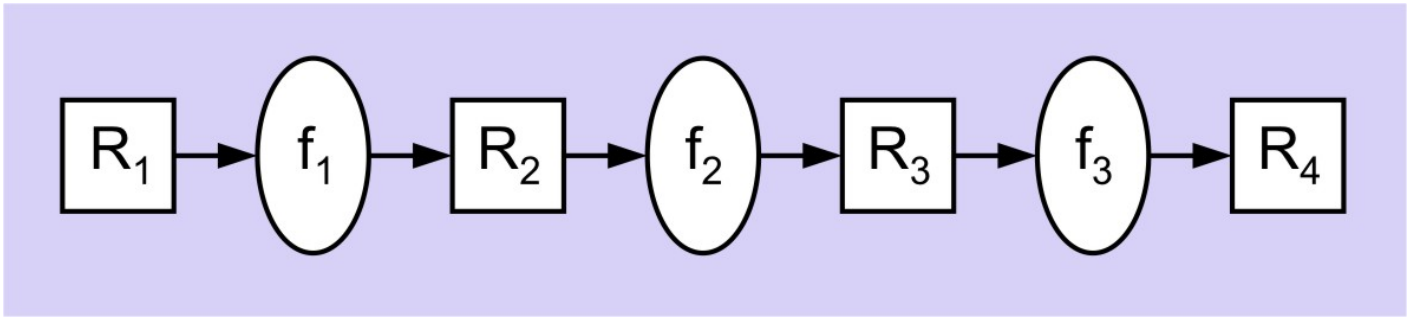
Führt eigentliche Rechnung aus




```
// Logik zwischen R1 und R2
function [7:0] f1 (input [7:0] IN);
  f1 = 2 * IN;
endfunction

// Logik zwischen R2 und R3
function [7:0] f2 (input [7:0] IN);
  f2 = IN + 5;
endfunction

// Logik zwischen R3 und R4
function [7:0] f3 (input [7:0] IN);
  f3 = IN * IN;
endfunction
```

Beispiel-Pipeline: Kombinatorische Logik

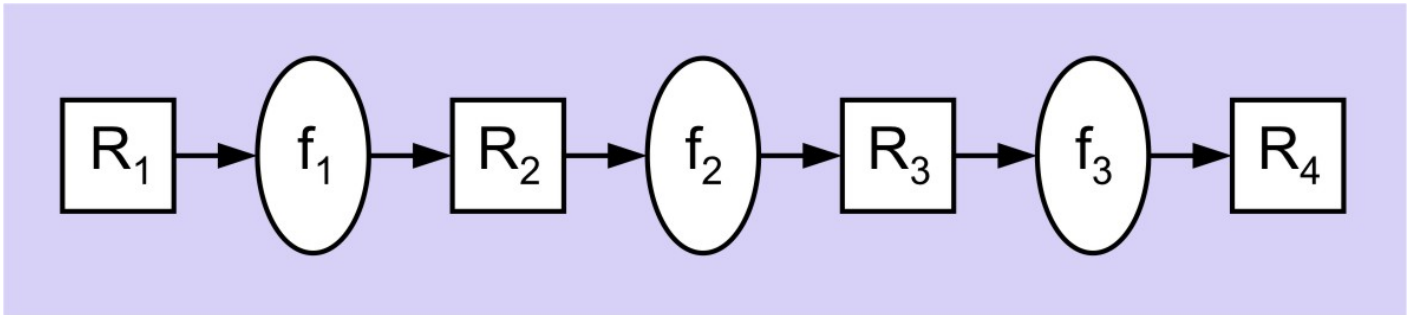
Führt eigentliche Rechnung aus




```
// Logik zwischen R1 und R2
function [7:0] f1 (input [7:0] IN);
  f1 = 2 * IN;
endfunction

// Logik zwischen R2 und R3
function [7:0] f2 (input [7:0] IN);
  f2 = IN + 5;
endfunction

// Logik zwischen R3 und R4
function [7:0] f3 (input [7:0] IN);
  f3 = IN * IN;
endfunction
```

Testrahmen

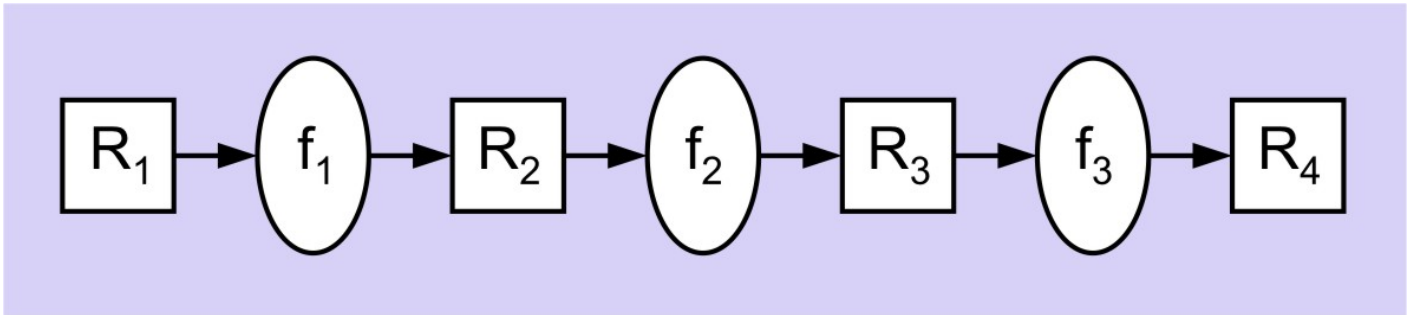
Hier in einem Modul (kürzer), besser: saubere Trennung in eigenem Modul




```
// Test-Ausgaben
always @(*)
  $display ("%4.0f   %b   %d   %d   %d   %d",
  $time, CLOCK, R1, R2, R3, R4);

// Ueberschrift, Test-Eingaben
 initial  begin
  $display ("Zeit  CLOCK   R1   R2   R3   R4\n");

  @(negedge CLOCK) R1 <= 1;       // R1 eingeben
  @(negedge CLOCK) R1 <= 2;       // R1 eingeben
  @(negedge CLOCK) R1 <= 3;       // R1 eingeben
  @(negedge CLOCK) R1 <= 4;       // R1 eingeben

  for(I=1;I<=5;I=I+1)             // Pipeline leeren
    @(posedge CLOCK);
  $finish;
end
```

Testrahmen

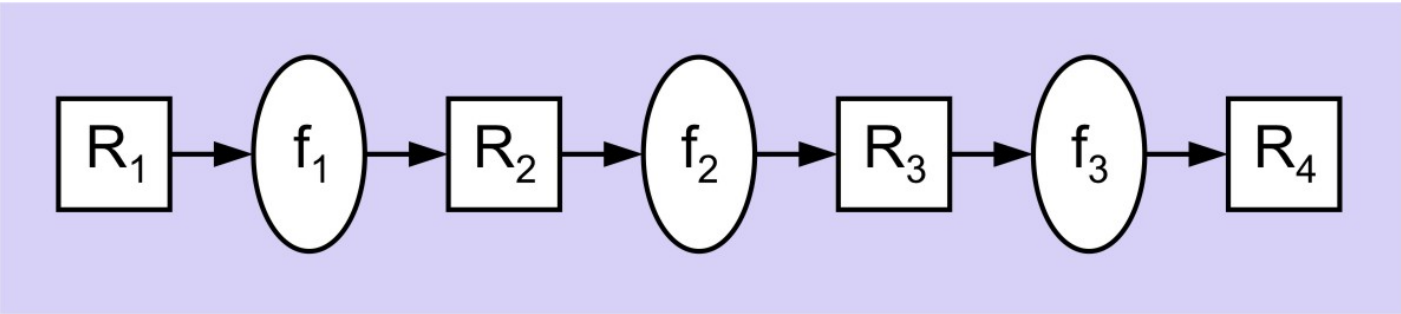
Hier in einem Modul (kürzer), besser: saubere Trennung in eigenem Modul




```
// Test-Ausgaben
always @(*)
  $display ("%4.0f   %b   %d   %d   %d   %d",
  $time, CLOCK, R1, R2, R3, R4);

// Ueberschrift, Test-Eingaben
 initial  begin
  $display ("Zeit  CLOCK   R1   R2   R3   R4\n");

  @(negedge CLOCK) R1 <= 1;       // R1 eingeben
  @(negedge CLOCK) R1 <= 2;       // R1 eingeben
  @(negedge CLOCK) R1 <= 3;       // R1 eingeben
  @(negedge CLOCK) R1 <= 4;       // R1 eingeben

  for(I=1;I<=5;I=I+1)                 // Pipeline leeren
    @(posedge CLOCK);
  $finish;
end
```

Beispiel-Pipeline: Ablaufsteuerung

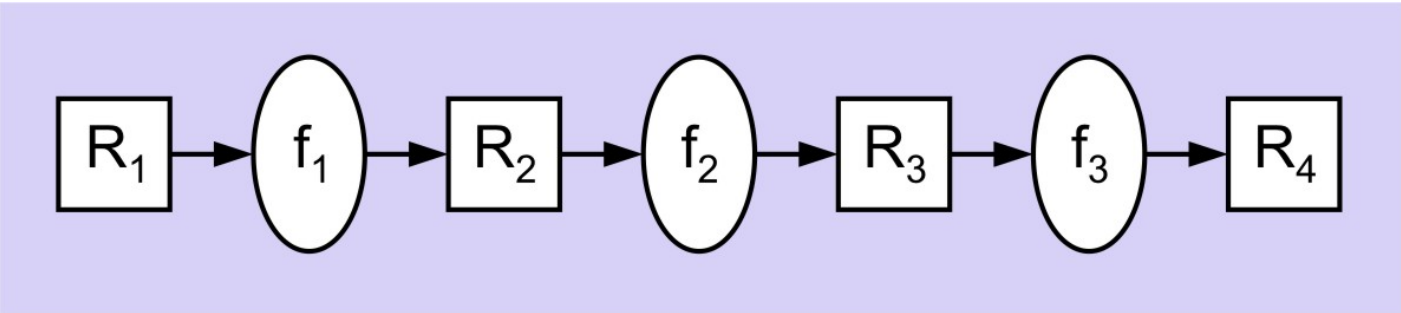
Hier in einem Modul (kürzer), besser: saubere Trennung in eigenem Modul




```
// Pipeline steuern und Funktionen berechnen
always @(posedge CLOCK) begin
   R2 <= f1(R1);
   R3 <= f2(R2);
   R4 <= f3(R3);
end
```

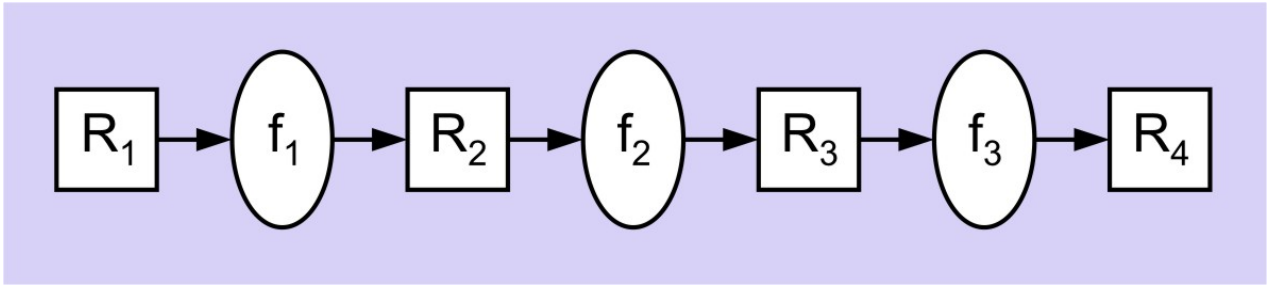
Beispiel-Pipeline: Ablaufsteuerung

Hier in einem Modul (kürzer), besser: saubere Trennung in eigenem Modul

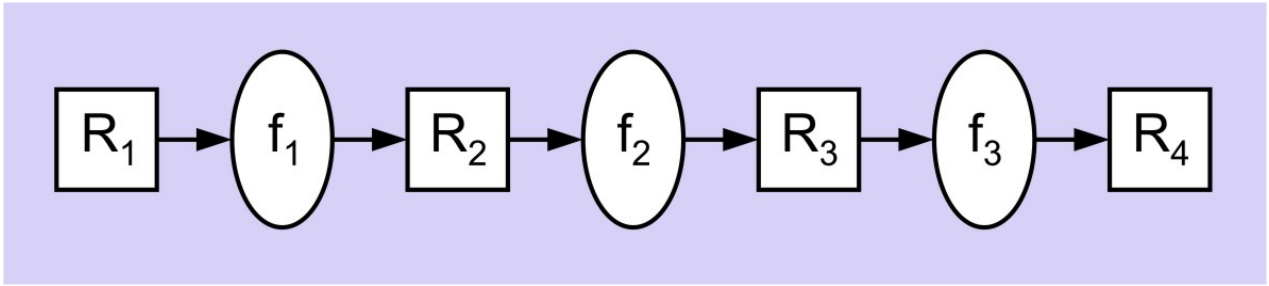



```
// Pipeline steuern und Funktionen berechnen
always @(posedge CLOCK) begin
   R2 <= f1(R1);
   R3 <= f2(R2);
   R4 <= f3(R3);
end
```

Beispiel-Pipeline: Ergebnisse

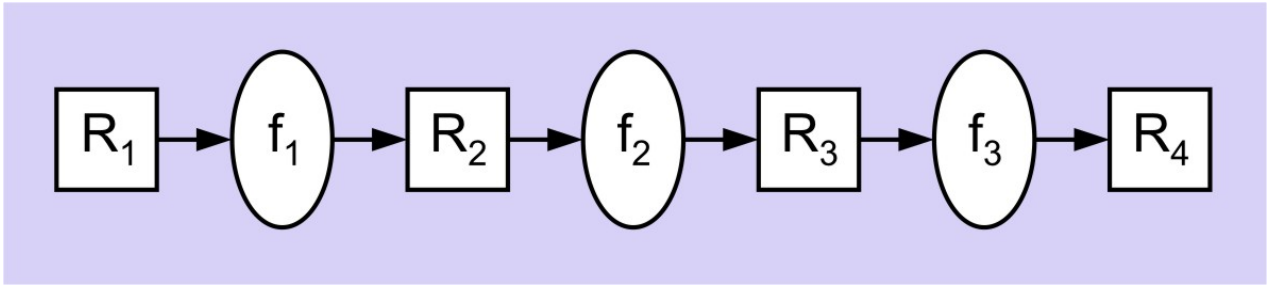


Beispiel-Pipeline: Ergebnisse

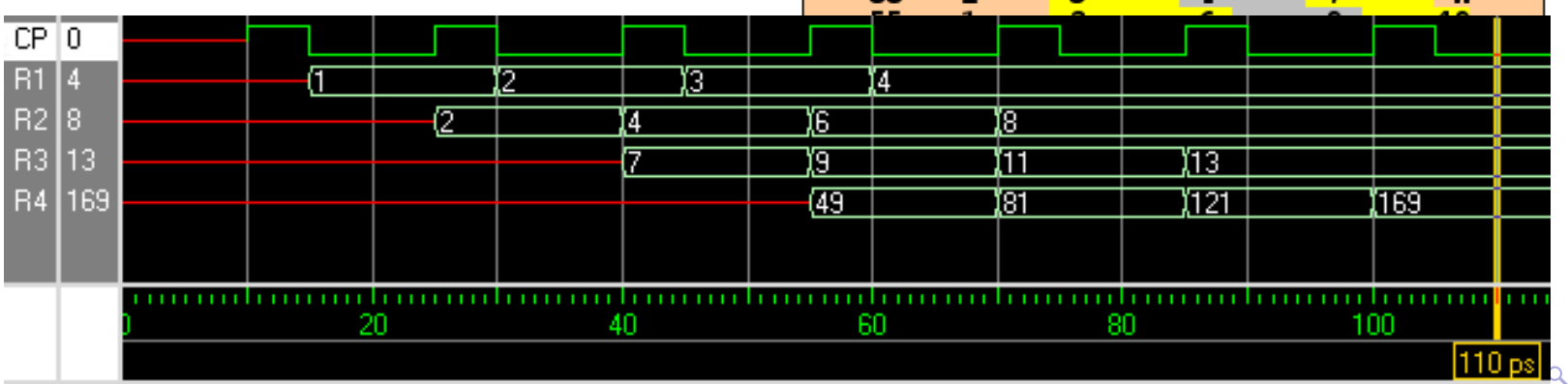


Zeit	CLOCK	R1	R2	R3	R4
10	1	x	x	x	x
15	0	x	x	x	x
15	0	1	x	x	x
25	1	1	x	x	x
25	1	1	2	x	x
30	0	1	2	x	x
30	0	2	2	x	x
40	1	2	2	x	x
40	1	2	4	7	x
45	0	2	4	7	x
45	0	3	4	7	x
55	1	3	4	7	x
55	1	3	6	9	49
60	0	3	6	9	49
60	0	4	6	9	49
70	1	4	6	9	49
70	1	4	8	11	81
75	0	4	8	11	81
85	1	4	8	11	81
85	1	4	8	13	121
90	0	4	8	13	121
100	1	4	8	13	121
100	1	4	8	13	169
105	0	4	8	13	169
115	1	4	8	13	169

Beispiel-Pipeline: Ergebnisse

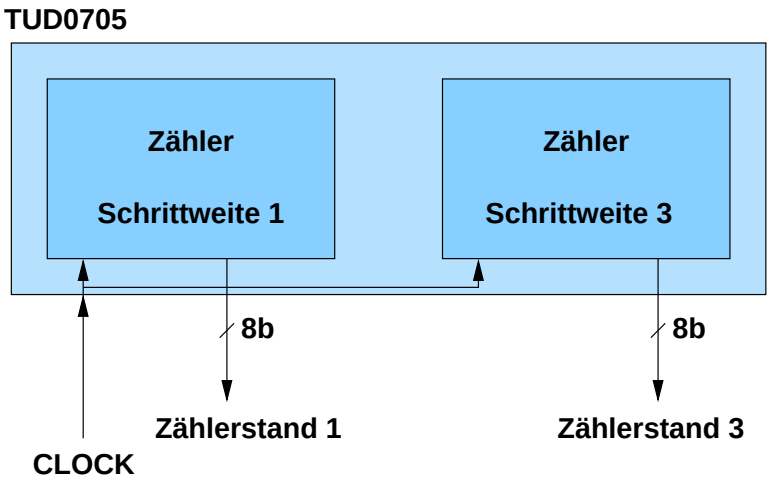


Zeit	CLOCK	R1	R2	R3	R4
10	1	x	x	x	x
15	0	x	x	x	x
15	0	1	x	x	x
25	1	1	x	x	x
25	1	1	2	x	x
30	0	1	2	x	x
30	0	2	2	x	x
40	1	2	2	x	x
40	1	2	4	7	x
45	0	2	4	7	x
45	0	3	4	7	x
55	1	3	4	7	x



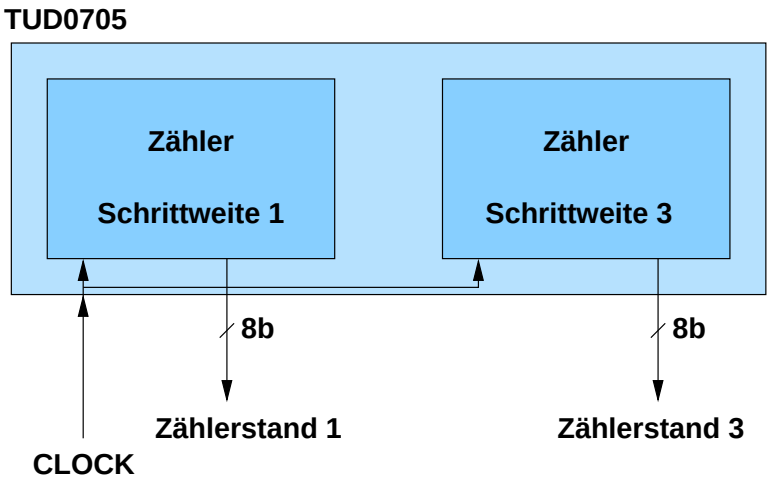
Busse

Beispiel-Chip TUD0705: Großer Verkaufserfolg!



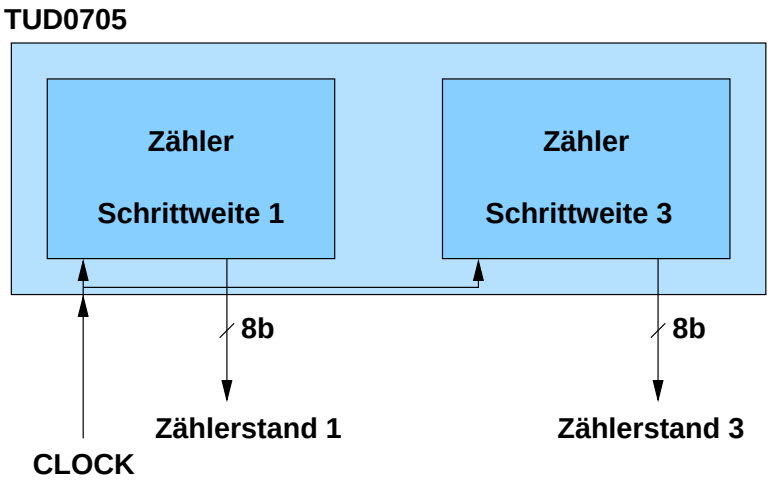
- Zwei synchrone 8b-Zähler
- Schrittweiten 1 und 3
- Beide parallel auslesbar

Beispiel-Chip TUD0705: Großer Verkaufserfolg!



- Zwei synchrone 8b-Zähler
- Schrittweiten 1 und 3
- Beide parallel auslesbar

Beispiel-Chip TUD0705: Großer Verkaufserfolg!



- Zwei synchrone 8b-Zähler
- Schrittweiten 1 und 3
- Beide parallel auslesbar

Problem: Zu teuer!

- Wo Geld sparen?
- Anforderung: Es wird nur jeweils einer der beiden Werte gebraucht
- Ausgangs-Pins sparen (kosten extra)
- Beide Zähler über die gleichen Pins nach aussen leiten

➥Wie beide Werte auseinanderhalten?

Problem: Zu teuer!

- Wo Geld sparen?
- Anforderung: Es wird nur jeweils einer der beiden Werte gebraucht
- Ausgangs-Pins sparen (kosten extra)
- Beide Zähler über die gleichen Pins nach aussen leiten

➥Wie beide Werte auseinanderhalten?

Problem: Zu teuer!

- Wo Geld sparen?
- Anforderung: Es wird nur jeweils einer der beiden Werte gebraucht
- Ausgangs-Pins sparen (kosten extra)
- Beide Zähler über die gleichen Pins nach aussen leiten

➥Wie beide Werte auseinanderhalten?

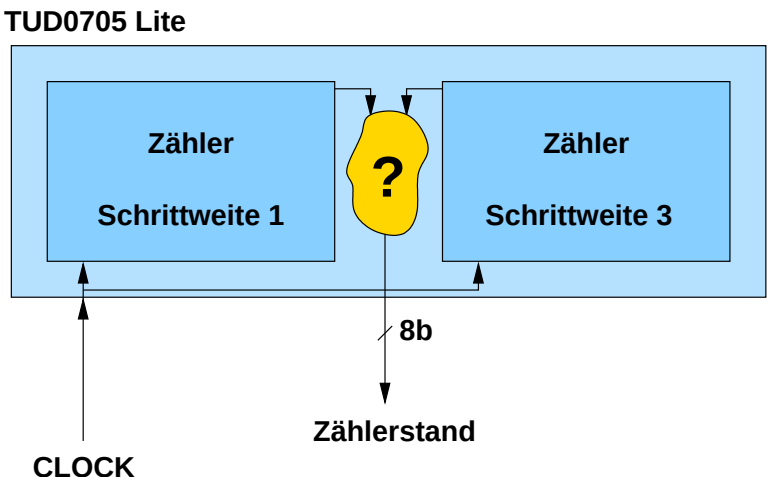
Problem: Zu teuer!

- Wo Geld sparen?
- Anforderung: Es wird nur jeweils einer der beiden Werte gebraucht
- Ausgangs-Pins sparen (kosten extra)
- Beide Zähler über die gleichen Pins nach aussen leiten

➥Wie beide Werte auseinanderhalten?

Problem: Zu teuer!

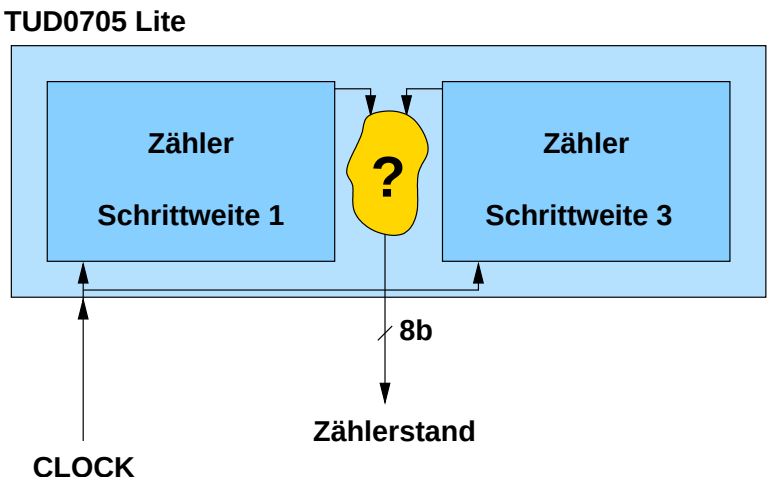
- Wo Geld sparen?
- Anforderung: Es wird nur jeweils einer der beiden Werte gebraucht
- Ausgangs-Pins sparen (kosten extra)
- Beide Zähler über die gleichen Pins nach aussen leiten



➥Wie beide Werte auseinanderhalten?

Problem: Zu teuer!

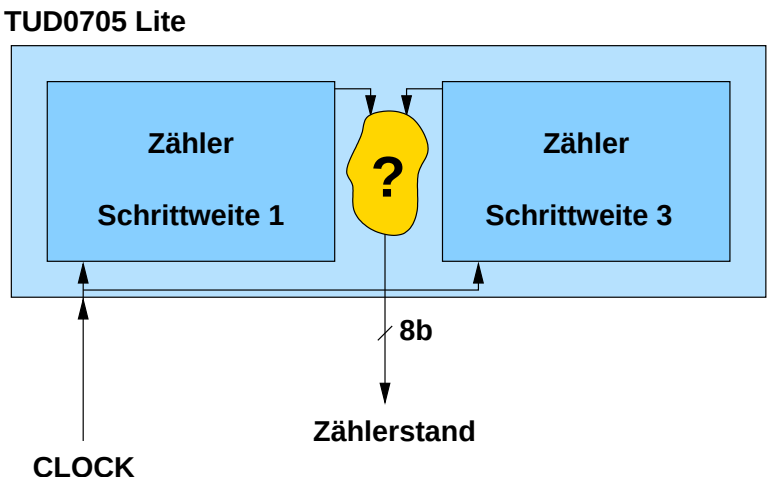
- Wo Geld sparen?
- Anforderung: Es wird nur jeweils einer der beiden Werte gebraucht
- Ausgangs-Pins sparen (kosten extra)
- Beide Zähler über die gleichen Pins nach aussen leiten



➥Wie beide Werte auseinanderhalten?

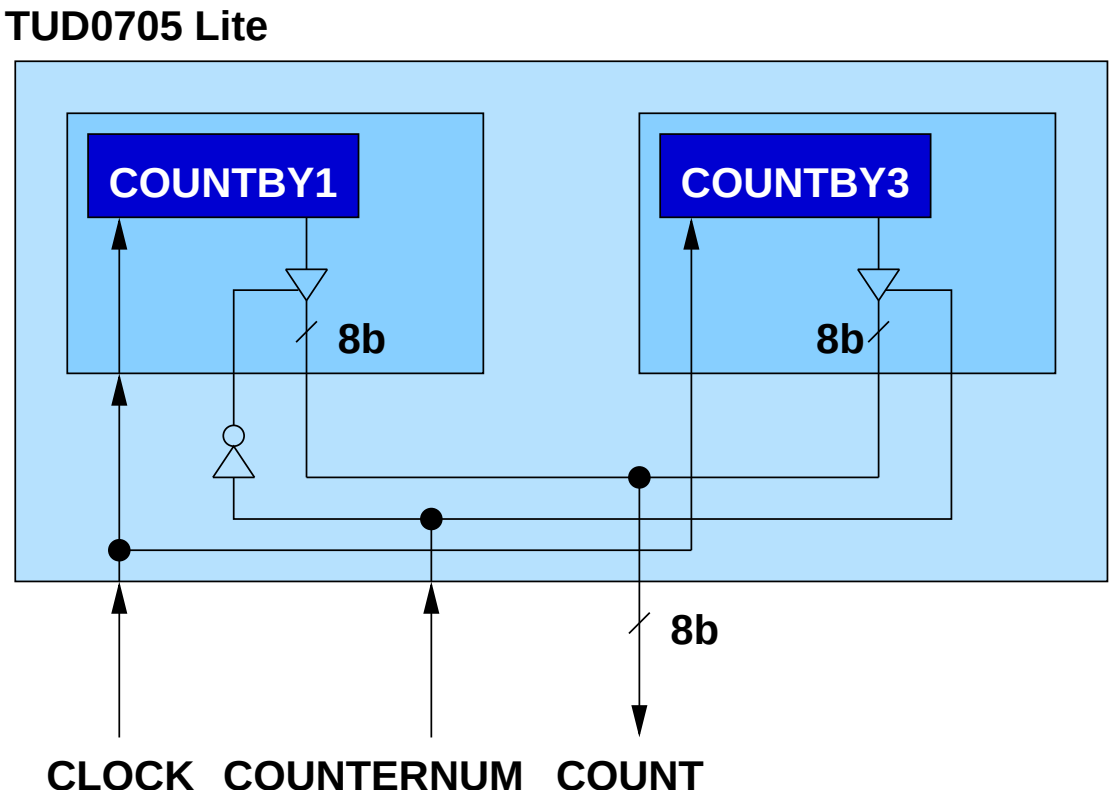
Problem: Zu teuer!

- Wo Geld sparen?
- Anforderung: Es wird nur jeweils einer der beiden Werte gebraucht
- Ausgangs-Pins sparen (kosten extra)
- Beide Zähler über die gleichen Pins nach aussen leiten



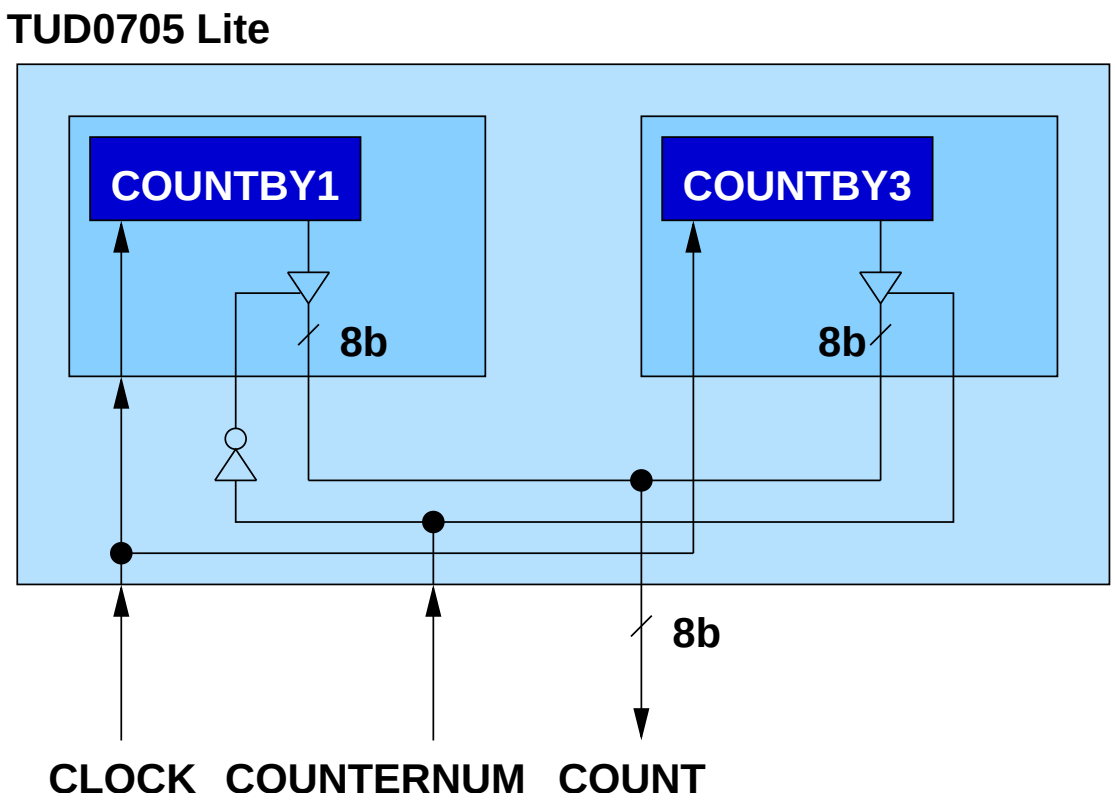
➥Wie beide Werte auseinanderhalten?

Idee: Nicht gebrauchten Zählerausgang hochohmig schalten



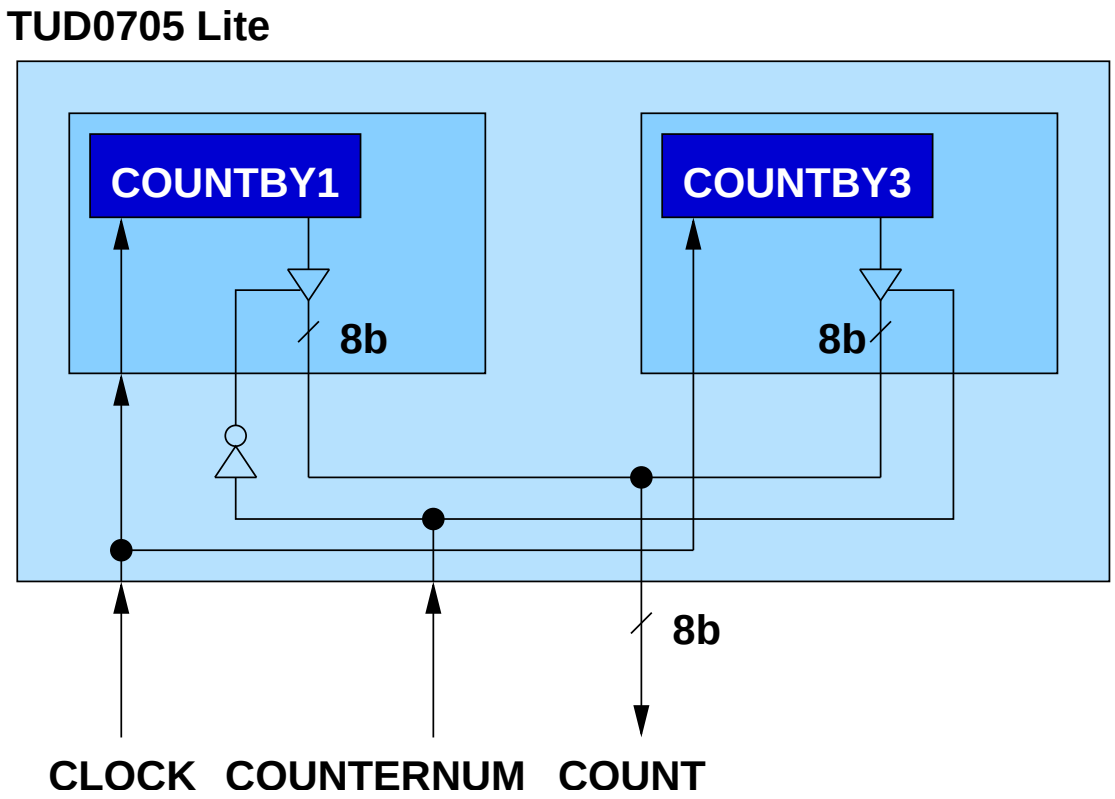
- Neuer Steuereingang `COUNTERNUM`
  - Bei `COUNTERNUM=0` Wert des ersten Zählers ausgeben
  - Bei `COUNTERNUM=1` Wert des zweiten Zählers ausgeben

Idee: Nicht gebrauchten Zählerausgang hochohmig schalten



- Neuer Steuereingang **COUNTERNUM**
  - Bei **COUNTERNUM=0** Wert des ersten Zählers ausgeben
  - Bei **COUNTERNUM=1** Wert des zweiten Zählers ausgeben

Idee: Nicht gebrauchten Zählerausgang hochohmig schalten



- Neuer Steuereingang **COUNTERNUM**
  - Bei **COUNTERNUM=0** Wert des ersten Zählers ausgeben
  - Bei **COUNTERNUM=1** Wert des zweiten Zählers ausgeben

Verilog: Modellierung der Zähler

- Beliebige Schrittweite
- Hochohmig-schaltbarer Ausgang

```
module COUNTER
#(
  parameter stepsize = 1          // Schrittweite
 )
 (
  input   wire         CLOCK,
  input   wire         SELECT, // Wert ausgeben?
  output  wire [7:0]   OUT
 );

reg [7:0] COUNT = 0;              // Nur für Simulation!

always @(posedge CLOCK)
  COUNT <= COUNT + stepsize;

assign OUT = (SELECT) ? COUNT : 8'bz; // Tri-State Treiber

endmodule
```

Verilog: Modellierung der Zähler

- Beliebige Schrittweite
- Hochohmig-schaltbarer Ausgang

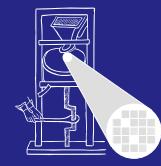
```
module COUNTER
#(
  parameter stepsize = 1        // Schrittweite
 )
 (
  input   wire         CLOCK,
  input   wire         SELECT, // Wert ausgeben?
  output  wire [7:0]   OUT
 );

reg [7:0] COUNT = 0;            // Nur für Simulation!

always @(posedge CLOCK)
  COUNT <= COUNT + stepsize;

assign OUT = (SELECT) ? COUNT : 8'bz; // Tri-State Treiber

endmodule
```

Verilog: Modellierung der Zähler

- Beliebige Schrittweite
- Hochohmig-schaltbarer Ausgang

```
module COUNTER
#(
  parameter stepsize = 1        // Schrittweite
 )
 (
  input   wire         CLOCK,
  input   wire         SELECT, // Wert ausgeben?
  output  wire [7:0]   OUT
 );

reg [7:0] COUNT = 0;            // Nur für Simulation!

always @(posedge CLOCK)
  COUNT <= COUNT + stepsize;

assign OUT = (SELECT) ? COUNT : 8'bz; // Tri-State Treiber

endmodule
```

Verilog: Modellierung der Zähler



- Beliebige Schrittweite
- Hochohmig-schaltbarer Ausgang

```
module COUNTER
#(
  parameter stepsize = 1        // Schrittweite
 )
 (
  input   wire        CLOCK,
  input   wire        SELECT, // Wert ausgeben?
  output  wire [7:0]  OUT
 );

reg [7:0]  COUNT = 0;           // Nur für Simulation!

always @(posedge CLOCK)
  COUNT <= COUNT + stepsize;

assign OUT = (SELECT) ? COUNT : 8'bz; // Tri-State Treiber

endmodule
```

Verilog: Modellierung des Gesamt-Chips

```
module TUD0705Lite
  (
    input    wire        CLOCK,
    input    wire        COUNTERNUM,
    output   wire [7:0]  COUNT
  );

COUNTER #(1) COUNTBY1(CLOCK, COUNTERNUM == 0, COUNT);
COUNTER #(3) COUNTBY3(CLOCK, COUNTERNUM == 1, COUNT);

endmodule
```

Für Input-Wire `SELECT` direkt Ausdruck angegeben, statt:

```
wire SELECTBY1, SELECTBY3;

assign SELECTBY1 = COUNTERNUM == 0;
assign SELECTBY3 = COUNTERNUM == 1;

counter #(1)  COUNTBY1(CLOCK, SELECTBY1, COUNT);
counter #(3)  COUNTBY3(CLOCK, SELECTBY3, COUNT);
```

Verilog: Modellierung des Gesamt-Chips

```
module TUD0705Lite
  (
    input    wire        CLOCK,
    input    wire        COUNTERNUM,
    output   wire [7:0]  COUNT
  );

COUNTER #(1) COUNTBY1(CLOCK, COUNTERNUM == 0, COUNT);
COUNTER #(3) COUNTBY3(CLOCK, COUNTERNUM == 1, COUNT);

endmodule
```

Für Input-Wire **`SELECT`** direkt Ausdruck angegeben, statt:

```
wire SELECTBY1, SELECTBY3;

assign SELECTBY1 = COUNTERNUM == 0;
assign SELECTBY3 = COUNTERNUM == 1;

counter #(1)  COUNTBY1(CLOCK, SELECTBY1, COUNT);
counter #(3)  COUNTBY3(CLOCK, SELECTBY3, COUNT);
```

Verilog: Modellierung des Gesamt-Chips

```
module TUD0705Lite
  (
    input    wire        CLOCK,
    input    wire        COUNTERNUM,
    output   wire [7:0]  COUNT
  );

COUNTER #(1) COUNTBY1(CLOCK, COUNTERNUM == 0, COUNT);
COUNTER #(3) COUNTBY3(CLOCK, COUNTERNUM == 1, COUNT);

endmodule
```

Für Input-Wire **`SELECT`** direkt Ausdruck angegeben, statt:

```
wire SELECTBY1, SELECTBY3;

assign SELECTBY1 = COUNTERNUM == 0;
assign SELECTBY3 = COUNTERNUM == 1;

counter #(1)  COUNTBY1(CLOCK, SELECTBY1, COUNT);
counter #(3)  COUNTBY3(CLOCK, SELECTBY3, COUNT);
```

Verilog: Modellierung des Testrahmens

```
module TESTFRAME;

wire [7:0]  COUNT;
reg         CLOCK;
reg         COUNTERNUM;

TUD0705Lite DUT(CLOCK, COUNTERNUM, COUNT);
```

Verilog: Modellierung des Testrahmens

```
module TESTFRAME;

wire [7:0]  COUNT;
reg         CLOCK;
reg         COUNTERNUM;

TUD0705Lite DUT(CLOCK, COUNTERNUM, COUNT);
```

```
always begin // Takt erzeugen
  CLOCK = 0;
  #10;
  CLOCK = 1;
  #10;
end
```

Verilog: Modellierung des Testrahmens

```
module TESTFRAME;

wire [7:0]  COUNT;
reg         CLOCK;
reg         COUNTERNUM;

TUD0705Lite DUT(CLOCK, COUNTERNUM, COUNT);
```

```
always begin // Takt erzeugen
  CLOCK = 0;
  #10;
  CLOCK = 1;
  #10;
end
```

```
initial  begin      // Stimuli
  COUNTERNUM = 0; // 1. Zähler
  #60;
  COUNTERNUM = 1; // 2. Zähler
  #60;
  COUNTERNUM = 0; // 1. Zähler
  #60;
  $finish;
end
```

Verilog: Modellierung des Testrahmens

```
module TESTFRAME;

wire [7:0]  COUNT;
reg         CLOCK;
reg         COUNTERNUM;

TUD0705Lite DUT(CLOCK, COUNTERNUM, COUNT);
```

```
always begin // Takt erzeugen
  CLOCK = 0;
  #10;
  CLOCK = 1;
  #10;
end
```

```
initial  begin      // Stimuli
  COUNTERNUM = 0; // 1. Zähler
  #60;
  COUNTERNUM = 1; // 2. Zähler
  #60;
  COUNTERNUM = 0; // 1. Zähler
  #60;
  $finish;
end
```

```
always @(COUNT) // Ausgaben überwachen
  $display("%2.0f: COUNTERNUM=%b COUNT=%d",
           $time, COUNTERNUM, COUNT);
endmodule
```

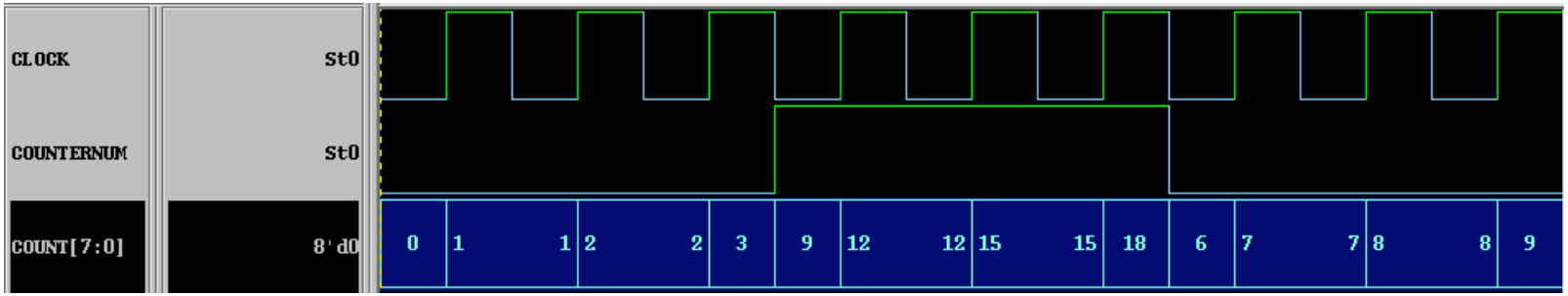
Ergebnisse: Textausgabe

```
always begin // Takt erzeugen
  CLOCK = 0;
  #10;
  CLOCK = 1;
  #10;
end
```

```
initial  begin      // Stimuli
  COUNTERNUM = 0; // 1. Zähler
  #60;
  COUNTERNUM = 1; // 2. Zähler
  #60;
  COUNTERNUM = 0; // 1. Zähler
  #60;
  $finish;
end
```

```
  0: COUNTERNUM=0 COUNT=  0
 10: COUNTERNUM=0 COUNT=  1
 30: COUNTERNUM=0 COUNT=  2
 50: COUNTERNUM=0 COUNT=  3
 60: COUNTERNUM=1 COUNT=  9
 70: COUNTERNUM=1 COUNT= 12
 90: COUNTERNUM=1 COUNT= 15
110: COUNTERNUM=1 COUNT= 18
120: COUNTERNUM=0 COUNT=  6
130: COUNTERNUM=0 COUNT=  7
150: COUNTERNUM=0 COUNT=  8
170: COUNTERNUM=0 COUNT=  9
```

Ergebnisse: Waves




```
  0: COUNTERNUM=0 COUNT=  0
 10: COUNTERNUM=0 COUNT=  1
 30: COUNTERNUM=0 COUNT=  2
 50: COUNTERNUM=0 COUNT=  3
 60: COUNTERNUM=1 COUNT=  9
 70: COUNTERNUM=1 COUNT= 12
 90: COUNTERNUM=1 COUNT= 15
110: COUNTERNUM=1 COUNT= 18
120: COUNTERNUM=0 COUNT=  6
130: COUNTERNUM=0 COUNT=  7
150: COUNTERNUM=0 COUNT=  8
170: COUNTERNUM=0 COUNT=  9
```

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen

Busse

- Mehrere Quellen/Senken auf einer Leitung: Bus
- Mehrere Senken: Unkritisch, fan-out immer konfliktfrei
- Quellen realisierbar durch Tri-State-Treiber
  - 0, 1, Z (hochohmig)
- Nur eine Quelle darf gleichzeitig aktiv sein
- Andere hochohmig schalten
- Benötigt Steuerung: Welche Quelle soll aktiv sein?
- Verschiedenste Möglichkeiten
- Hier gezeigt: Slave-Mode
  - Quellen wird von aussen mitgeteilt, ob Sie aktiv sein dürfen