

Einführung in Computer Microsystems

Sommersemester 2012



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

5. Block: CRT-Controller, Optimierung, Speicher und Busse





Einführung



- ▶ Demonstriert Benutzung von Verilog
- ▶ Lösung einer Aufgabe durch Hardware
- ▶ Keine Software-Instruktionen
- ▶ **Keine** prozessorartigen Strukturen
 - ▶ Standen im Fokus der 2. Hälfte **TGDI**

Was macht ein Video-Controller?



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

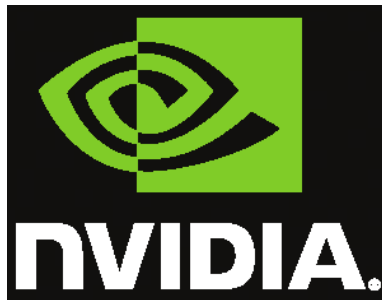
Was macht ein Video-Controller?



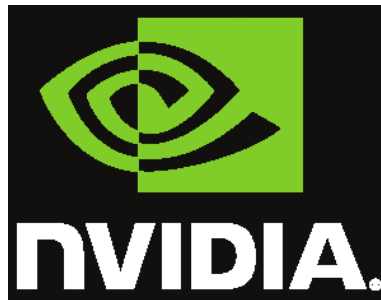
Was macht ein Video-Controller?



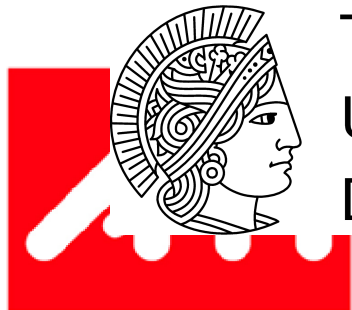
Was macht ein Video-Controller?



Was macht ein Video-Controller?

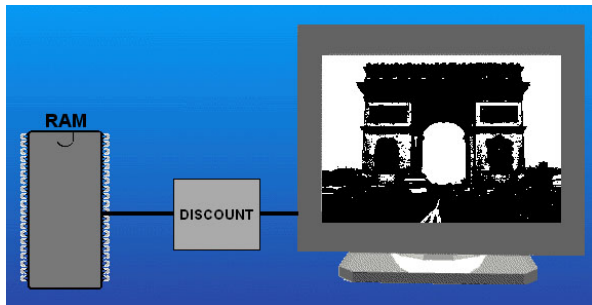


Was macht ein Video-Controller?

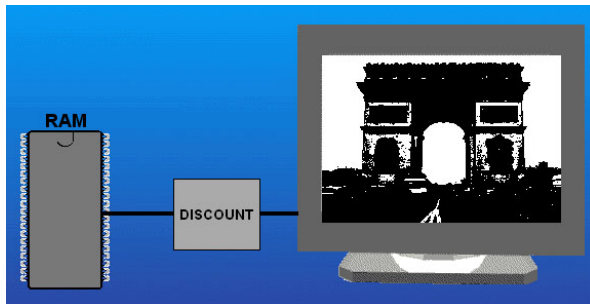


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

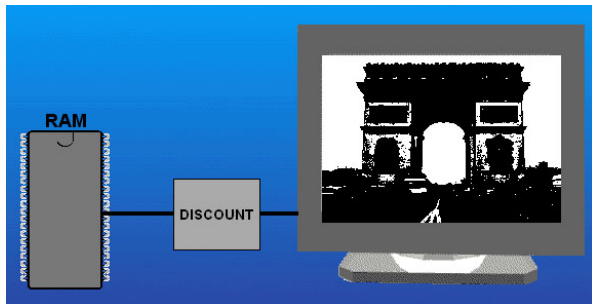
nVIDIA.



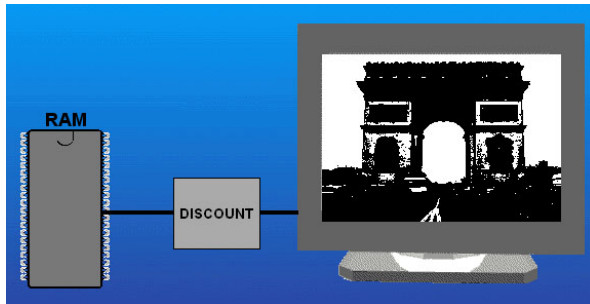
- ▶ Ausgabe von Schwarzweißbildern auf Monitor



- ▶ Ausgabe von Schwarzweißbildern auf Monitor
- ▶ Genauer:



- ▶ Ausgabe von Schwarzweißbildern auf Monitor
- ▶ Genauer:
 - ▶ Bild ist in Speicher abgelegt



- ▶ Ausgabe von Schwarzweißbildern auf Monitor
- ▶ Genauer:
 - ▶ Bild ist in Speicher abgelegt
 - ▶ DISCOUNT generiert daraus Videosignale



- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal



- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder



- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder
- ▶ Daten analog kodiert als Spannungspegel



- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder
- ▶ Daten analog kodiert als Spannungspegel
 - ▶ Bilddaten (0,3 V = schwarz, 1 V = weiß)

- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder
- ▶ Daten analog kodiert als Spannungspegel
 - ▶ Bilddaten (0,3 V = schwarz, 1 V = weiß)
 - ▶ Synchronisation (Zeilen, Halbbilder) bei 0 V



- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder
- ▶ Daten analog kodiert als Spannungspegel
 - ▶ Bilddaten (0,3 V = schwarz, 1 V = weiß)
 - ▶ Synchronisation (Zeilen, Halbbilder) bei 0 V
 - ▶ Austastbereich (0,3 V)

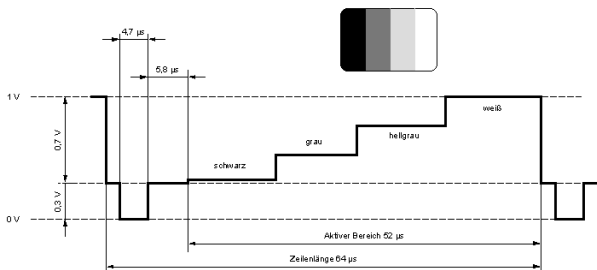


- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder
- ▶ Daten analog kodiert als Spannungspegel
 - ▶ Bilddaten (0,3 V = schwarz, 1 V = weiß)
 - ▶ Synchronisation (Zeilen, Halbbilder) bei 0 V
 - ▶ Austastbereich (0,3 V)
 - ▶ Vorgegebene Dauer und Reihenfolge der Bereiche



- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder
- ▶ Daten **analog** kodiert als Spannungspegel
 - ▶ Bilddaten (0,3 V = schwarz, 1 V = weiß)
 - ▶ Synchronisation (Zeilen, Halbbilder) bei 0 V
 - ▶ Austastbereich (0,3 V)
 - ▶ Vorgegebene Dauer und Reihenfolge der Bereiche

- ▶ Bild-Austast-Synchron-Signal
- ▶ Für Graustufenbilder
- ▶ Daten analog kodiert als Spannungspegel
 - ▶ Bilddaten (0,3 V = schwarz, 1 V = weiß)
 - ▶ Synchronisation (Zeilen, Halbbilder) bei 0 V
 - ▶ Austastbereich (0,3 V)
 - ▶ Vorgegebene Dauer und Reihenfolge der Bereiche





- ▶ Ab jetzt Nachrichtentechnik ???



- ▶ Ab jetzt Nachrichtentechnik ???
- ▶ Nein, keine Panik



- ▶ Ab jetzt Nachrichtentechnik ???
- ▶ Nein, keine Panik
- ▶ Alles Informatik-kompatibel vereinfacht!



- ▶ Ab jetzt Nachrichtentechnik ???
- ▶ Nein, **keine** Panik
- ▶ Alles Informatik-kompatibel vereinfacht!
 - ▶ Hier: Reines Schwarz und Weiß (Pixelwerte 0 und 1)

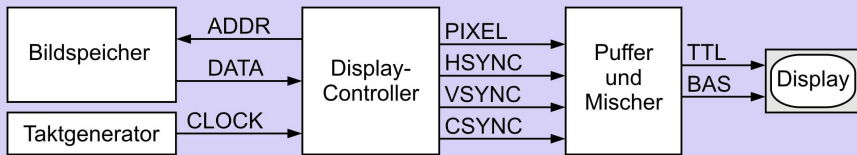


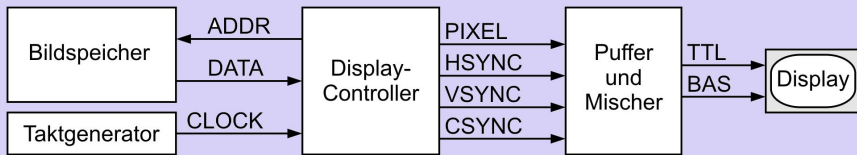
- ▶ Ab jetzt Nachrichtentechnik ???
- ▶ Nein, **keine** Panik
- ▶ Alles Informatik-kompatibel vereinfacht!
 - ▶ Hier: Reines Schwarz und Weiß (Pixelwerte 0 und 1)
 - ▶ Nur Erzeugung von **Steuersignalen** für Analogteil



- ▶ Ab jetzt **Nachrichtentechnik** ???
- ▶ Nein, **keine** Panik
- ▶ Alles Informatik-kompatibel vereinfacht!
 - ▶ Hier: Reines Schwarz und Weiß (Pixelwerte 0 und 1)
 - ▶ Nur Erzeugung von **Steuersignalen** für Analogteil
 - ▶ **Keine** Handhabung von Analogsignalen (z.B. via DAC)

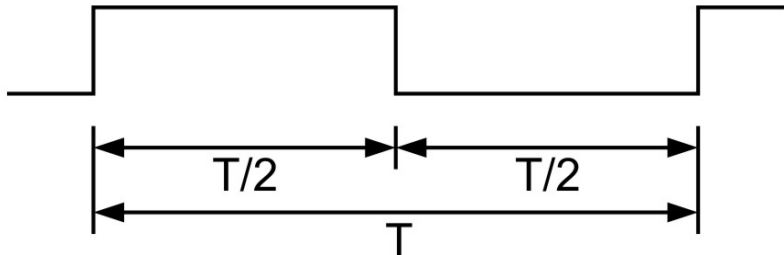
Spezifikation: Aufbau





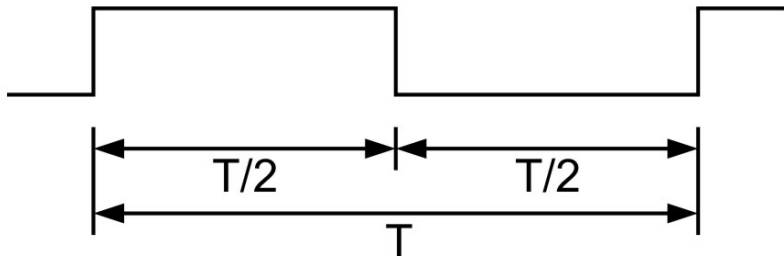
ADDR	Adresse
DATA	Bildspeicher [ADDR]
CLOCK	Basistakt
PIXEL	Bildpunkt (1=hell, 0=dunkel)
HSYNC	horizontale Synchronisation der Bildzeilen
VSYNC	vertikale Synchronisation ganzer Bilder
CSYNC	kombiniertes HSYNC und VSYNC
TTL	Schnittstelle für getrennte PIXEL, HSYNC, VSYNC
BAS	gemischtes Signal

Takt



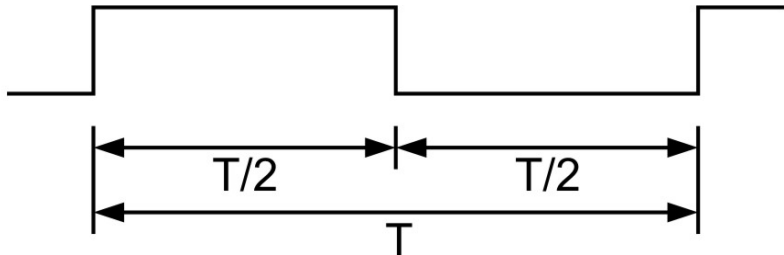
- ▶ Nur selten: "So schnell wie möglich"

Takt

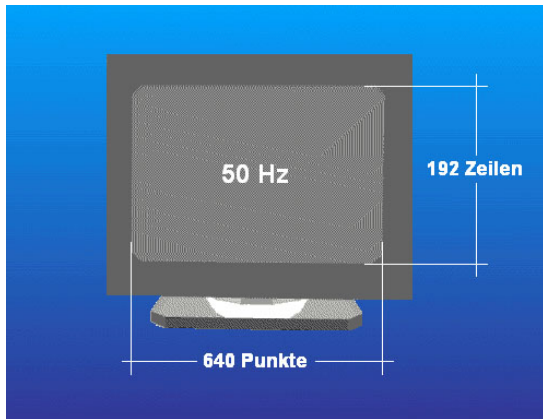


- ▶ Nur selten: “So schnell wie möglich”
- ▶ In der Regel: Erfüllen externer Anforderungen

Takt



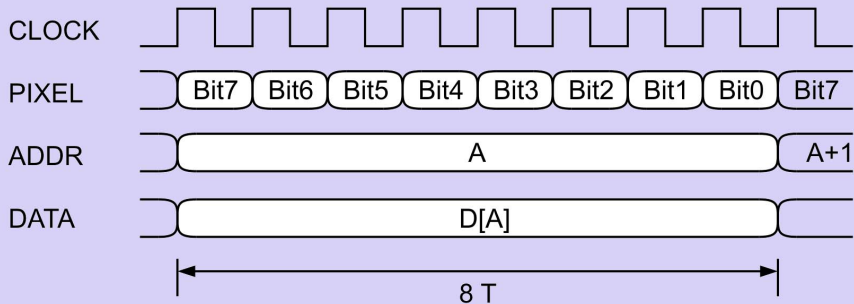
- ▶ Nur selten: “So schnell wie möglich”
- ▶ In der Regel: Erfüllen externer Anforderungen
- ▶ Aber **nicht** langsamer!



Zwar kein HDTV, aber reicht zum Üben ...

Quelle für Bilddaten: Speicher

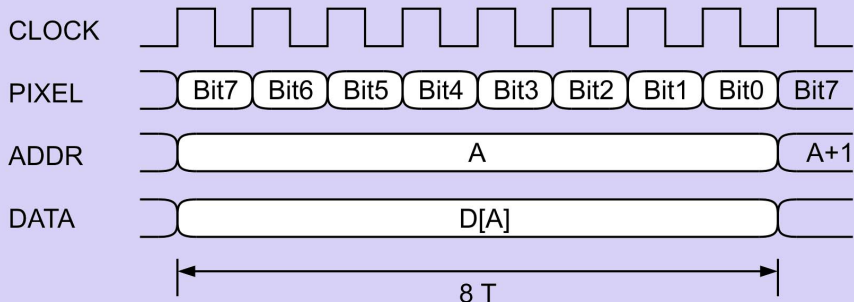
1 Bit pro Bildpunkt



Wie hoch muß Taktfrequenz sein, um 192×640 Punkte mit 50 Hz auf Ausgang PIXEL zu liefern?

Quelle für Bilddaten: Speicher

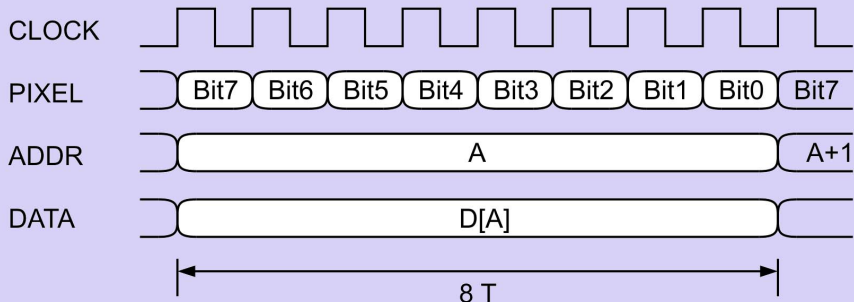
1 Bit pro Bildpunkt



Wie hoch muß Taktfrequenz sein, um 192×640 Punkte mit 50 Hz auf Ausgang PIXEL zu liefern?
6,144 MHz?

Quelle für Bilddaten: Speicher

1 Bit pro Bildpunkt

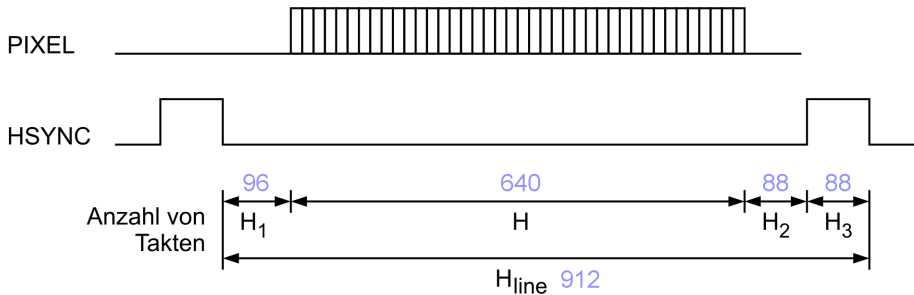


Wie hoch muß Taktfrequenz sein, um 192×640 Punkte mit 50 Hz auf Ausgang PIXEL zu liefern?

6,144 MHz?

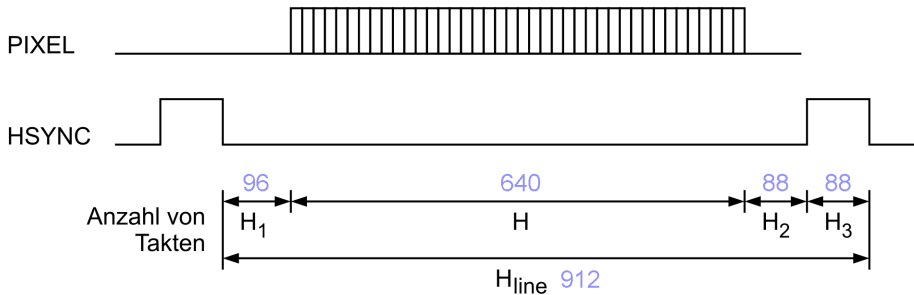
Nein, Videosignal ist komplizierter!

Bildaufbau: Zeile aus Pixeln



H1 Hintere Schwarzschar, legt u.a. Schwarzpegel fest

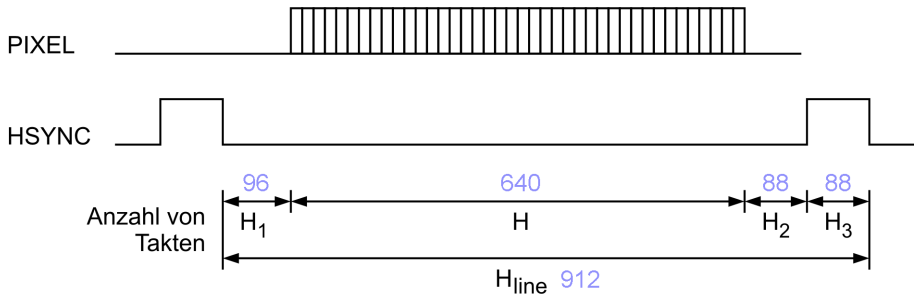
Bildaufbau: Zeile aus Pixeln



H1 Hinterer Schwarzscher, legt u.a. Schwarzpegel fest

H Bilddaten

Bildaufbau: Zeile aus Pixeln

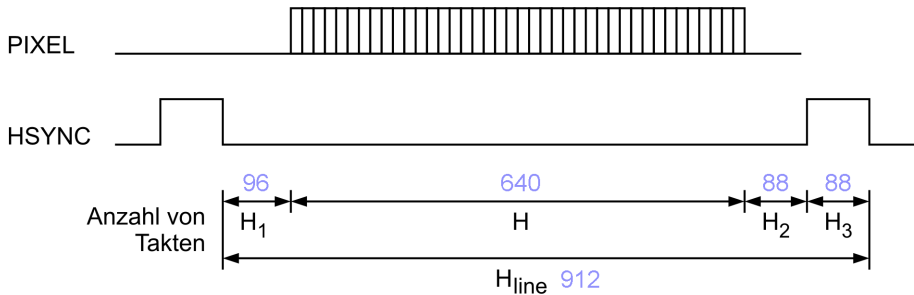


H1 Hintere Schwarzschulter, legt u.a. Schwarzpegel fest

H Bilddaten

H2 Vordere Schwarzschulter, Verzögerungszeit zur Erkennung von HSYNC

Bildaufbau: Zeile aus Pixeln



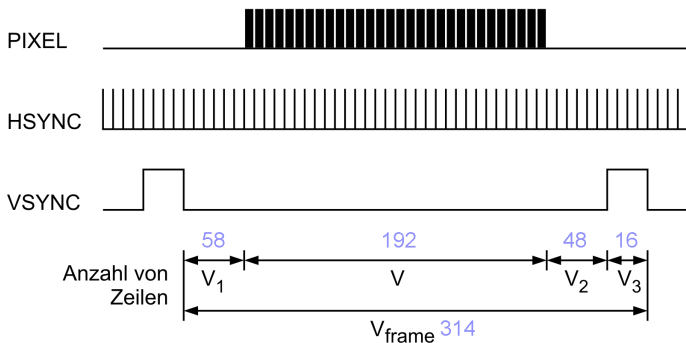
H1 Hintere Schwarzschulter, legt u.a. Schwarzpegel fest

H Bilddaten

H2 Vordere Schwarzschulter, Verzögerungszeit zur Erkennung von HSYNC

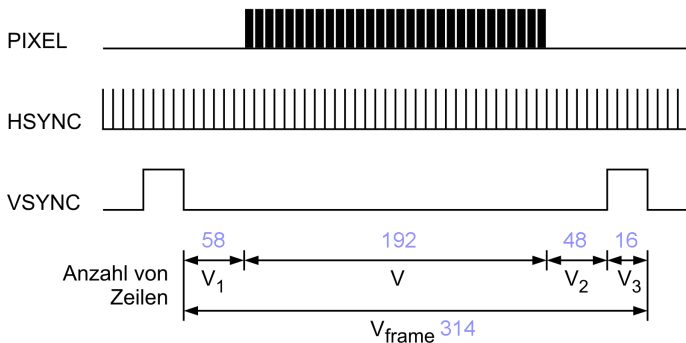
H3 Horizontale Synchronisation, zeigt Zeilenende an (→ nächste Zeile)

Bildaufbau: Bild aus Zeilen



V_1 Oberer nicht sichtbarer Teil (wäre unscharf)

Bildaufbau: Bild aus Zeilen



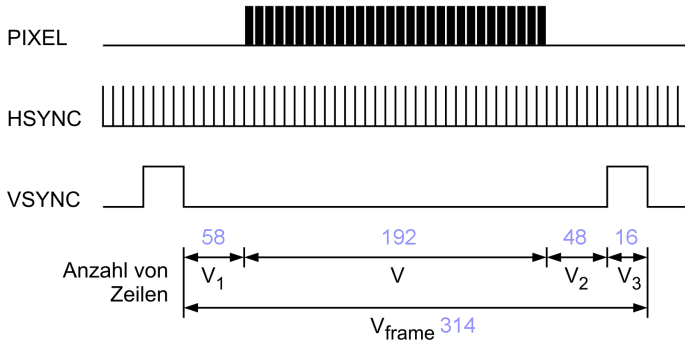
V_1 Oberer nicht sichtbarer Teil (wäre unscharf)

V Sichtbare Zeilen

Bildaufbau: Bild aus Zeilen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

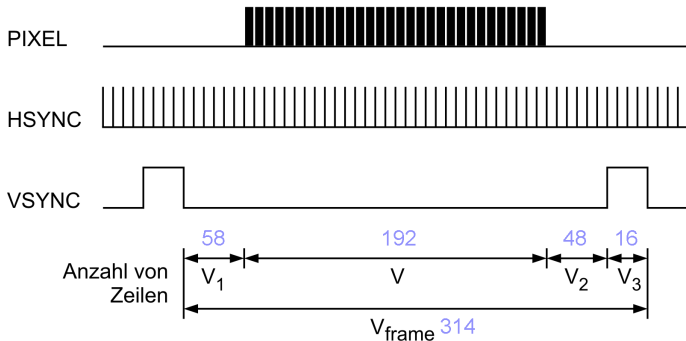


V₁ Oberer nicht sichtbarer Teil (wäre unscharf)

V Sichtbare Zeilen

V₂ Unterer nicht sichtbarer Teil (wäre unscharf)

Bildaufbau: Bild aus Zeilen



V1 Oberer nicht sichtbarer Teil (wäre unscharf)

V Sichtbare Zeilen

V2 Unterer nicht sichtbarer Teil (wäre unscharf)

V3 Vertikale Synchronisation, setzt Elektronenstrahl nach links oben

Timing, 2. Versuch



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

912 Spalten * 314 Zeilen

Timing, 2. Versuch



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

912 Spalten * 314 Zeilen
= 286.368 Pixel je Bild je 1/50 Sekunde

Timing, 2. Versuch



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

912 Spalten * 314 Zeilen
= 286.368 Pixel je Bild je 1/50 Sekunde
= 14.318.400 Pixel / Sekunde



912 Spalten * 314 Zeilen
= 286.368 Pixel je Bild je 1/50 Sekunde
= 14.318.400 Pixel / Sekunde
≈ 14,3 MHz Pixeltaktfrequenz (Periode 70 ns)



912 Spalten * 314 Zeilen
= 286.368 Pixel je Bild je 1/50 Sekunde
= 14.318.400 Pixel / Sekunde
≈ **14,3 MHz** Pixeltaktfrequenz (Periode 70 ns)

Mehr als doppelt so hoch wie die Frequenz der reinen Bilddaten!



- ▶ Breite = 1 Byte = 8 Bit



- ▶ Breite = 1 Byte = 8 Bit
- ▶ Je Bildzeile:

$$\frac{H \text{ Pixel}}{8 \text{ Pixel / Byte}} = 80 \text{ Bytes}$$

- ▶ Breite = 1 Byte = 8 Bit

- ▶ Je Bildzeile:

$$\frac{H \text{ Pixel}}{8 \text{ Pixel / Byte}} = 80 \text{ Bytes}$$

- ▶ * 192 Zeilen → 15360 Bytes pro Bild



- ▶ Breite = 1 Byte = 8 Bit

- ▶ Je Bildzeile:

$$\frac{H \text{ Pixel}}{8 \text{ Pixel / Byte}} = 80 \text{ Bytes}$$

- ▶ * 192 Zeilen → 15360 Bytes pro Bild
- ▶ Speicher mit 14b Adressen adressieren

- ▶ Breite = 1 Byte = 8 Bit

- ▶ Je Bildzeile:

$$\frac{H \text{ Pixel}}{8 \text{ Pixel / Byte}} = 80 \text{ Bytes}$$

- ▶ * 192 Zeilen → 15360 Bytes pro Bild
- ▶ Speicher mit 14b Adressen adressieren
 - ▶ Würde für 2^{14} Bytes = 16384 Bytes reichen

- ▶ Breite = 1 Byte = 8 Bit

- ▶ Je Bildzeile:

$$\frac{H \text{ Pixel}}{8 \text{ Pixel / Byte}} = 80 \text{ Bytes}$$

- ▶ * 192 Zeilen → 15360 Bytes pro Bild
- ▶ Speicher mit 14b Adressen adressieren
 - ▶ Würde für 2^{14} Bytes = 16384 Bytes reichen
- ▶ Linke obere Bildecke = Bit 7 des Bytes an Adresse 0

- ▶ Breite = 1 Byte = 8 Bit

- ▶ Je Bildzeile:

$$\frac{H \text{ Pixel}}{8 \text{ Pixel / Byte}} = 80 \text{ Bytes}$$

- ▶ * 192 Zeilen → 15360 Bytes pro Bild
- ▶ Speicher mit 14b Adressen adressieren
 - ▶ Würde für 2^{14} Bytes = 16384 Bytes reichen
- ▶ Linke obere Bildecke = Bit 7 des Bytes an Adresse 0
- ▶ Während der Austastlücken: **keine** Daten



Verilog-Modell

Grobstruktur

Wie vorgehen?



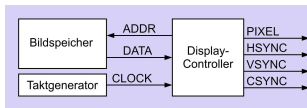
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Grobstruktur

Wie vorgehen?

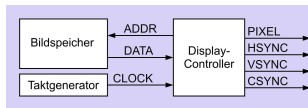


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



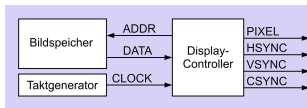
Grobstruktur

Wie vorgehen?



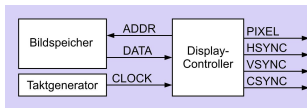
Grobstruktur

Wie vorgehen?



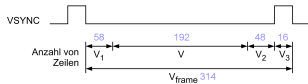
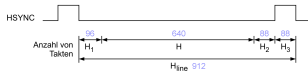
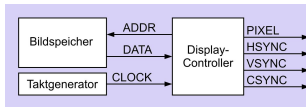
Grobstruktur

Wie vorgehen?



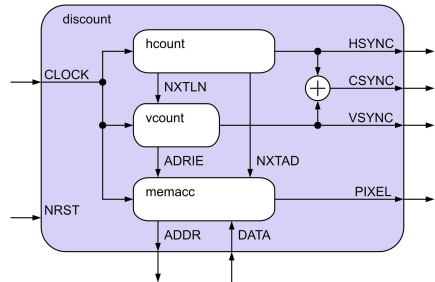
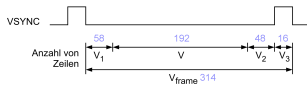
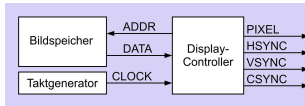
Grobstruktur

Wie vorgehen?



Grobstruktur

Wie vorgehen?





```
'ifdef DISCOUNT_DEFS_V
'else
'define DISCOUNT_DEFS_V
// horizontale Parameter in Takten:
'define H1 96 // linker Bildrand
'define H 640 // Bildpunkte
'define H2 88 // rechter Bildrand
'define H3 88 // horizontale Synchronisation
'define Hline 'H1+'H+'H2+'H3 // Zeilenlänge

// vertikale Parameter in Zeilen:
'define V1 58 // oberer Bildrand
'define V 192 // Bildbereich
'define V2 48 // unterer Bildrand
'define V3 16 // vertikale Synchronisation
'define Vframe 'V1+'V+'V2+'V3 // Bildaufbau in Zeilen

// Definitionen
'define Asz 14 // Adressbreite
'define Dsz 8 // Datenbreite
'define Bsz 8 // Byte-Breite
'define Msz 'H*'V/'Bsz // Speichergroesse
'endif
```

```
'include "discount_defs.v"

module discount (ADDR, PIXEL, CSYNC, HSYNC, VSYNC, DATA, CLOCK, NRST);

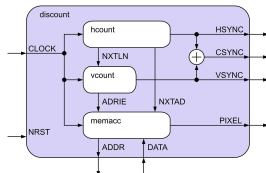
    ... // Eingaenge / Ausgaenge

    // interne Variablen
wire    ADRIE, // Freigabe: Bilddaten uebernehmen und
           // Bildadresse erhoehen
           // (address increment enable)
           NXTAD, // Bildadresse hochzaehlen
           NXTLN; // Zeile hochzaehlen

    //
    // kombinierte Synchronisation
    //
assign CSYNC = HSYNC ^ VSYNC;

    //
    // Instanzen
    //
hcount HCOUNT (NXTAD, NXTLN, HSYNC, CLOCK, NRST);
vcount VCOUNT (ADRIE, VSYNC, NXTLN, CLOCK, NRST);
memacc MEMACC (ADDR, PIXEL, DATA, ADRIE, NXTAD, CLOCK, NRST);

endmodule // discount
```





```
// Timing und Arbeitsperiode von hcount:  
//  
// 'H1 Takte linker Bildrand  
//   HSYNC=0, NXTAD=0, NTXLN=0  
// 'H Takte Bildpunkte  
//   HSYNC=0, NXTLN=0, NXTAD wird alle 8 Takte gesetzt  
// 'H2 Takte rechter Bildrand  
//   HSYNC=0, NXTAD=0, NTXLN=0  
// 'H3 Takte horizontale Synchronisation  
//   HSYNC=1, NXTAD=0, NXTLN wird im letzten Takt 1  
//  
//-----
```

```
'include "discount_defs.v"
```

```
module hcount (NXTAD, NXTLN, HSYNC, CLOCK, NRST);
```

```
    ... // Ein-/Ausgaenge
```



```
// interne Variablen
reg [9:0] HCNT; // Taktzaehler innerhalb einer Zeile
reg [1:0] HPHASE; // Phasen horizontal:
                // 0 linker Bildrand
                // 1 Bildpunkte
                // 2 rechter Bildrand
                // 3 horizontale Synchronisation

// Taktzaehler aktualisieren
// (Periode 'Hline, Bereich 0..'Hline-1)
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0)      HCNT <= 'Hline-1; // Reset
  else
    if (HCNT == 'Hline-1) HCNT <= 0; // neue Zeile
    else                  HCNT <= HCNT+1;
end

// Phasenzaehler aktualisieren
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0) HPHASE <= 3; // Reset
  else
    case (HCNT)
      0:      HPHASE <= 0; // linker Bildrand
      'H1:    HPHASE <= HPHASE+1; // Bildpunkte
      'H1+'H: HPHASE <= HPHASE+1; // rechter Bildrand
      'H1+'H+'H2: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
    endcase
end
```

HCOUNT: Rumpf 2/2



```
//  
// horizontale Synchronisation aktualisieren;  
// HSYNC wird ueber ein Register ausgegeben, um die Verzoeigerung  
// auf NXTAD von einem Takt zu kompensieren und so das Timing nach  
// aussen einzuhalten  
//  
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin  
  if (NRST == 0)  HSYNC <= 1; // Reset  
  else  
    if (HPHASE == 3) HSYNC <= 1;  
    else           HSYNC <= 0;  
end  
  
//  
// NXTAD und NXTLN aktualisieren  
//  
always @(HCNT or HPHASE) begin  
  if ((HCNT % 'Bsz == 1)           // neues Byte  
      && (HPHASE == 1))             NXTAD = 1;  
  else                               NXTAD = 0;  
  if ((HCNT == 0) && (HPHASE == 3)) NXTLN = 1;  
  else                               NXTLN = 0;  
end
```



```
//-----  
//  
// Timing: die Arbeitsperiode von vcount dauert 'Vframe Zeilen und  
// beginnt bei NXTLN=1 mit einer steigenden Taktflanke:  
//  
// 'V1 Zeilen oberer Bildrand  
//     VSYNC=0, ADRIE=0  
// 'V Zeilen Bildzeilen  
//     VSYNC=0, ADRIE=1  
// 'V2 Zeilen unterer Bildrand  
//     VSYNC=0, ADRIE=0  
// 'V3 Zeilen vertikale Synchronisation  
//     VSYNC=1, ADRIE=0  
//  
//-----
```

```
'include "discount_defs.v"
```

```
module vcount (ADRIE, VSYNC, NXTLN, CLOCK, NRST);
```

```
    ... // Eingaenge / Ausgaenge
```



```
// interne Variablen
reg [8:0] VCNT; // Zeilenzaehler
reg [1:0] VPHASE; // Phasen vertikal:
                // 0 oberer Bildrand
                // 1 Bildbereich
                // 2 unterer Bildrand
                // 3 vertikale Synchronisation

//
// Zeilenzaehler aktualisieren
// (Periode 'Vframe, Bereich 0..'Vframe-1)
//
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0)      VCNT <= 0;    // Reset
  else
    if (NXTLN == 1) begin           // neue Zeile
      if (VCNT == 'Vframe-1) VCNT <= 0; // neues Bild
    else
      VCNT <= VCNT+1;
    end
end
```

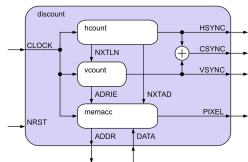



```
//  
// Phasenzaehler aktualisieren  
//  
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin  
  if (NRST == 0) VPHASE <= 3; // Reset  
  else  
    if (NXTLN == 1) // neue Zeile  
      case (VCNT)  
        0: VPHASE <= 0; // oberer Bildrand  
        `V1: VPHASE <= VPHASE+1; // Bildbereich  
        `V1+`V: VPHASE <= VPHASE+1; // unterer Bildrand  
        `V1+`V+`V2: VPHASE <= VPHASE+1; // vertikale Synchronisation  
      endcase  
end
```



```
//  
// vertikale Synchronisation aktualisieren  
//  
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin  
    if (NRST == 0) VSYNC <= 1;    // Reset  
    else  
        if (VPHASE == 3) VSYNC <= 1;  
        else VSYNC <= 0;  
end  
  
//  
// ADRIE aktualisieren  
//  
always @(VPHASE) begin  
    if (VPHASE == 1) ADRIE = 1;  
    else ADRIE = 0;
```

```
//-----  
//  
// Timing und Funktion:  
//  
// Bei einer positiven Taktflanke und ADRIE=NXTAD=1 werden das  
// Bildpunkt-Schieberegister mit den momentanen Bildspeicherdaten  
// geladen und die Bildspeicheradresse erhöht. Letztere liegt im  
// Bereich von 0 bis 'Msz, worauf wieder 0 folgt.  
// Ist ADRIE oder NXTAD 0, wird das Bildpunkt-Schieberegister  
// weitergeschoben und beim niedrigstwertigen Bit mit 0 gefüllt.  
//-----
```



```
'include "discount_defs.v"
```

```
module memacc (ADDR, PIXEL, DATA, ADRIE, NXTAD, CLOCK, NRST);
```

```
... // Eingaenge und Ausgaenge
```



```
// interne Variablen
reg [Dsz-1:0] PIXSR; // Bildpunkt-Schieberegister

//
// Bildpunkt aus Schieberegister abgreifen
//
assign PIXEL = PIXSR[Dsz-1];

//
// Bildspeicheradresse aktualisieren
//
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0)          ADDR <= 0; // Reset
  else
    if ((NXTAD == 1) && (ADRIE == 1)) begin // neue Adresse
      if (ADDR == 'Msz-1) ADDR <= 0; // Ende Bildspeicher
      else
        ADDR <= ADDR+1;
    end
end
```



```
//  
// Bildpunkt-Schieberegister aktualisieren  
//  
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin  
    if (NRST == 0) PIXSR <= 0; // Reset  
    else  
        if ((NXTAD == 1) && (ADRIE == 1))  
            PIXSR <= DATA; // neues Byte laden  
        else PIXSR <= {PIXSR[Dsz-2:0], 1'b0}; // schieben  
    end  
endmodule // memacc
```



- ▶ Problem: Signalverläufe sind

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell
 - ▶ mühsam



- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell
 - ▶ mühsam
 - ▶ fehleranfällig

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell
 - ▶ mühsam
 - ▶ fehleranfällig
- ▶ Idee

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell
 - ▶ mühsam
 - ▶ fehleranfällig
- ▶ Idee
 - ▶ Automatische Überprüfung von Ausgaben

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell
 - ▶ mühsam
 - ▶ fehleranfällig
- ▶ Idee
 - ▶ Automatische Überprüfung von Ausgaben
- ▶ Hier

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell
 - ▶ mühsam
 - ▶ fehleranfällig
- ▶ Idee
 - ▶ Automatische Überprüfung von Ausgaben
- ▶ Hier
 - ▶ Verwende Diagonale als Eingabebild

- ▶ Problem: Signalverläufe sind
 - ▶ Hunderte von Takten lang
 - ▶ auf Details zu überprüfen
- ▶ Manuell
 - ▶ mühsam
 - ▶ fehleranfällig
- ▶ Idee
 - ▶ Automatische Überprüfung von Ausgaben
- ▶ Hier
 - ▶ Verwende Diagonale als Eingabebild
 - ▶ Überprüfe, ob Ausgabedaten ebenfalls Diagonale beschreiben

Testrahmen für den Video-Controller 1/4

Kopf und UUT-Instanziierung



```
'include "discount_defs.v"

module test;

`define tLow 50 // Takt Low-Zeit
`define tHigh 50 // Takt High-Zeit
`define Simtime (('Hline)-('Vframe)+120) // 1.2 Frames simulieren

// Deklarationen
reg ['Bsz-1:0] MEM[0:'Msz-1]; // Bildspeicher
reg ['Bsz-1:0] TEMP; // Hilfsvariable (Speicher)
reg ['Dsz-1:0] DATA; // Bildspeicherausgang
reg CLOCK, // Takt
NRST; // Initialisierung
wire ['Asz-1:0] ADDR; // Bildspeicheradresse
wire PIXEL, // Bildpunkt
CSYNC, // kombinierte Synchronisation
HSYNC, // horizontale Synchronisation
VSYNC; // vertikale Synchronisation
integer BYTE, BIT, // Speicherposition
H, V; // Bildposition

//
// Testinstanz des Display-Controllers
//
discount DISCOUNT (ADDR,PIXEL,CSYNC,HSYNC,VSYNC,DATA,CLOCK,NRST);
```

Testrahmen für den Video-Controller 2/4

Verwaltungsarbeiten



```
// Takt erzeugen: Periode von 100 Zeiteinheiten
always begin
    CLOCK = 1'b0;
    #1Low;
    CLOCK = 1'b1;
    #1High;
end

// Reset
initial begin
    NRST = 1'b0;
    @(negedge CLOCK);
    NRST = 1'b1;
end

// Bildspeicherdaten auslesen: Hier kombinatorisches ROM!
always @(ADDR) begin
    DATA = MEM[ADDR];
end

initial
    #Simtime $stop;           // Simulationsdauer

// Textausgabe
initial
    $monitor("Takt=%d__PIXEL=%b__HSYNC=%b__VSYNC=%b",
        $time/100, PIXEL, HSYNC, VSYNC);
```

Testrahmen für den Video-Controller 3/4

Erzeugen einer Diagonale als Eingabebild



```
//  
// Speicher initialisieren, weisse Diagonale  
//  
initial begin  
  BYTE = 0; // Initialisierung  
  BIT = 'Bsz-1;  
  TEMP = 0;  
  for (V = 0; V < 'V; V = V+1) // Zeilen  
  for (H = 0; H < 'H; H = H+1) begin // Punkte  
    if (V == H) TEMP[BIT] = 1; // Diagonale  
    else TEMP[BIT] = 0;  
    if (BIT == 0) begin // neues Byte  
      MEM[BYTE] = TEMP;  
      BYTE = BYTE+1;  
      BIT = 'Bsz-1;  
    end  
    else BIT = BIT-1;  
  end  
end  
end
```

Testrahmen für den Video-Controller 4/4

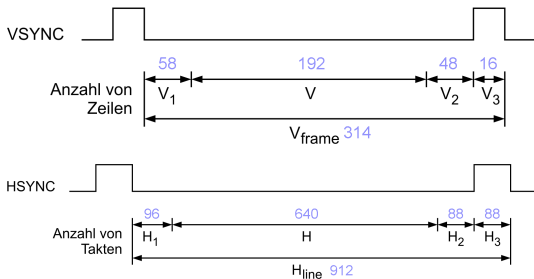
Automatische Überprüfung der Ausgabe auf Diagonalform



```
//  
// Diagonale verifizieren  
//  
always @(posedge CLOCK) begin  
  H = DISCOUNT.HCOUNT.HCNT - 'H1 - 1; // Bildposition (White-Box-Test!)  
  V = DISCOUNT.VCOUNT.VCNT - 'V1;  
  
  if ((H>=0) && (H<'H) && // echter Bildpunkt  
      (V>0) && (V<='V))  
  
  if (((H==V) && (PIXEL==0)) || // Diagonale  
      ((H!=V) && (PIXEL==1))) // ausserhalb Diagonale  
    $display(  
      "falsche_Diagonale_bei_Takt_%0d,_PIXEL=_%b,_H=_%0d,_V=_%0d"  
      , $time/100, PIXEL, H, V);  
end
```

Interpretation der Simulationsergebnisse

1. Überlegung: Erster gesetzter Pixel bei Diagonale



Rechnung: **Heller** Pixel muss auftauchen nach:

58 Zeilen (obere Austastlücke, V_1) zu je 912 Takten

+ 96 Takte bis Beginn der Bilddaten (H_1)

+ 3 Takte bis Ende des 1. VSYNC (Flip-Flops $VCNT \rightarrow VPHASE \rightarrow VSYNC$)

= 52995

Interpretation der Simulationsergebnisse

Vergleich mit Ausgabe der \$monitor-Anweisung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Da Zählung der Takte bei 0 anfängt: Takt Nr. 52994

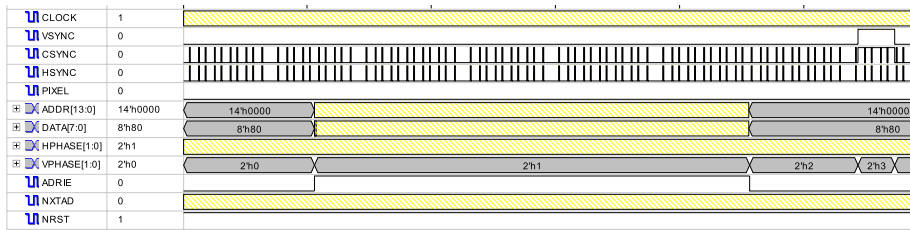
Interpretation der Simulationsergebnisse

Vergleich mit Ausgabe der \$monitor-Anweisung

Da Zählung der Takte bei 0 anfängt: Takt Nr. 52994

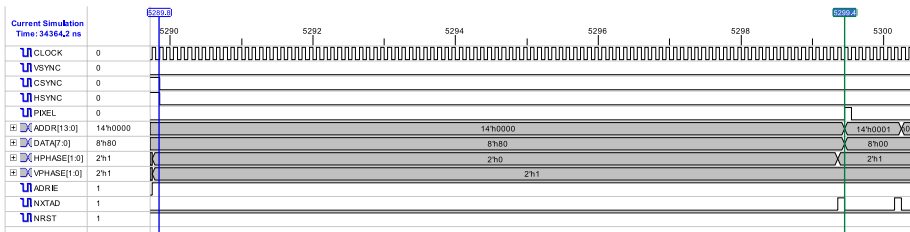
Takt=	50162	PIXEL=0	HSYNC=0	VSYNC=0
Takt=	50986	PIXEL=0	HSYNC=1	VSYNC=0
Takt=	51074	PIXEL=0	HSYNC=0	VSYNC=0
Takt=	51898	PIXEL=0	HSYNC=1	VSYNC=0
Takt=	51986	PIXEL=0	HSYNC=0	VSYNC=0
Takt=	52810	PIXEL=0	HSYNC=1	VSYNC=0
Takt=	52898	PIXEL=0	HSYNC=0	VSYNC=0
Takt=	52994	PIXEL=1	HSYNC=0	VSYNC=0
Takt=	52995	PIXEL=0	HSYNC=0	VSYNC=0
Takt=	53722	PIXEL=0	HSYNC=1	VSYNC=0
Takt=	53810	PIXEL=0	HSYNC=0	VSYNC=0
Takt=	53907	PIXEL=1	HSYNC=0	VSYNC=0

Signalverlauf: Ein ganzes Bild



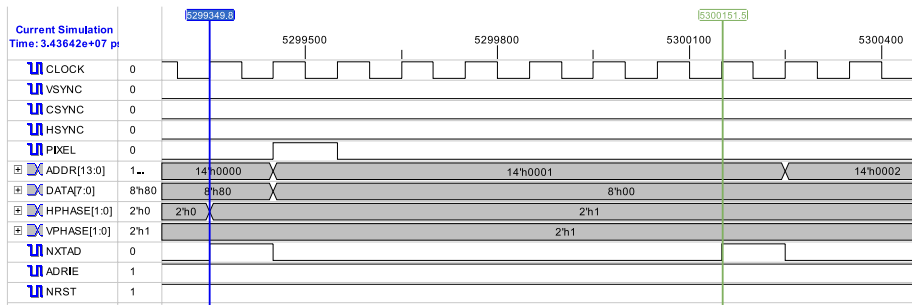
Signalverlauf: Anfang einer Zeile

Präziser: 1. Zeile



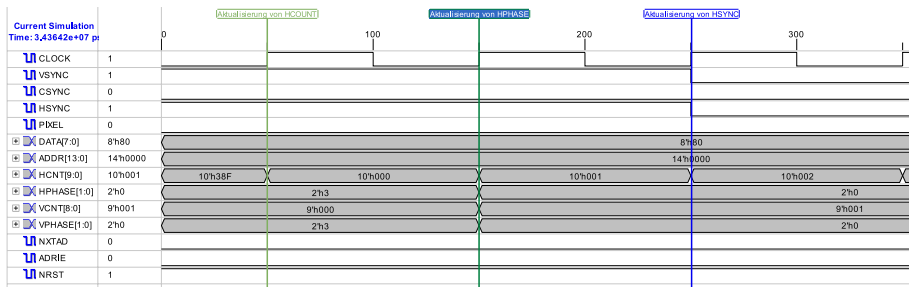
Signalverlauf: Einzelne Pixel

Präziser: 1. Pixel der 1. Zeile



Signalverlauf: Anfang des ersten Bildes

Diskussion der sequentiellen Verzögerungen





Platzieren und Verdrahten

Abbildung auf ein Xilinx XC3020 FPGA

... einen sehr alten (= sehr einfachen) Baustein



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

DESIGN SUMMARY:

```
Part type=3020PC68-70
63 of 64 CLBs used
30 of 58 I/O pins used
...
50 CLB flipflops used
```

Xdelay: traced 490 paths, from 56 path sources.

Xdelay Report File:

Minimum Clock Period : 66.8 ns

Estimated Maximum Clock Speed : 15.0 Mhz

Abbildung auf ein Xilinx XC3020 FPGA

... einen sehr alten (= sehr einfachen) Baustein



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

DESIGN SUMMARY:

```
Part type=3020PC68-70
63 of 64 CLBs used
30 of 58 I/O pins used
...
50 CLB flipflops used
```

Xdelay: traced 490 paths, from 56 path sources.

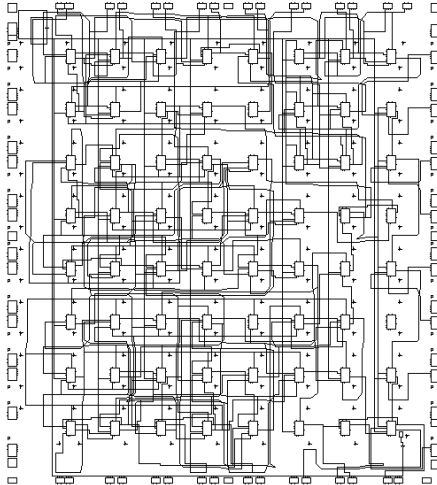
Xdelay Report File:

Minimum Clock Period : 66.8 ns

Estimated Maximum Clock Speed : 15.0 Mhz

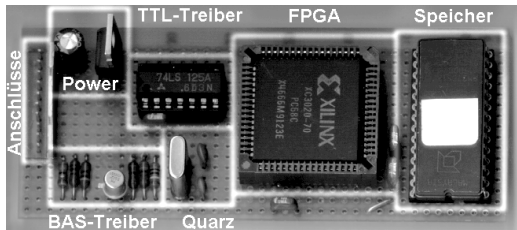
Hält Pixel-Takt für vorgegebene Auflösung ein!

Layout

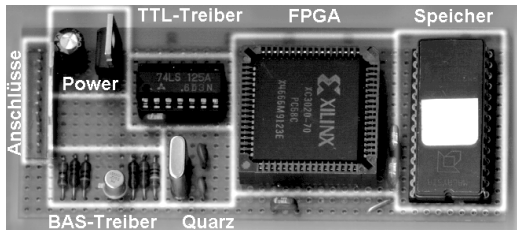




Bildspeicher-ROM auf den Chip



- ▶ Bisherige Annahme: [Externer ROM-Chip](#)



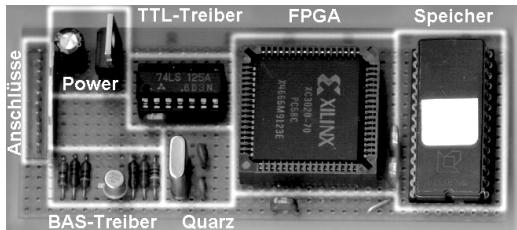
- ▶ Bisherige Annahme: **Externer ROM-Chip**
- ▶ Nur einfaches Verhalten simuliert

// Bildspeicherdaten auslesen: Hier kombinatorisches ROM!

always @(ADDR) **begin**

DATA = MEM[ADDR];

end



- ▶ Bisherige Annahme: **Externer ROM-Chip**
- ▶ Nur einfaches Verhalten simuliert

// Bildspeicherdaten auslesen: Hier kombinatorisches ROM!

```
always @(ADDR) begin  
    DATA = MEM[ADDR];  
end
```

- ▶ Nun Idee: ROM direkt in DISCOUNT integrieren

Schrittweises Vorgehen

Zunächst nur in **Simulation** behandeln



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Feld aus $15360 \cdot 8 = 122880$ Registern?

Schrittweises Vorgehen

Zunächst nur in **Simulation** behandeln



- ▶ Feld aus $15360 \cdot 8 = 122880$ Registern?
- ▶ Nein, viel zu ineffizient

Schrittweises Vorgehen

Zunächst nur in **Simulation** behandeln



- ▶ Feld aus $15360 \cdot 8 = 122880$ Registern?
- ▶ Nein, viel zu **ineffizient**
- ▶ Ersetze Pseudo-ROM durch **echte** Hardware-Modelle
- ▶ Werden vom FPGA/ASIC-Hersteller zur Verfügung gestellt

Schrittweises Vorgehen

Zunächst nur in **Simulation** behandeln



- ▶ Feld aus $15360 \cdot 8 = 122880$ Registern?
- ▶ Nein, viel zu **ineffizient**
- ▶ Ersetze Pseudo-ROM durch **echte** Hardware-Modelle
- ▶ Werden vom FPGA/ASIC-Hersteller zur Verfügung gestellt
- ▶ Unsere **Anforderungen**
 - ▶ Platz für 15360 Bytes
 - ▶ 14b Adressen
 - ▶ 8b Datenausgang

Schrittweises Vorgehen

Zunächst nur in **Simulation** behandeln



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Feld aus $15360 \cdot 8 = 122880$ Registern?
- ▶ Nein, viel zu ineffizient
- ▶ Ersetze Pseudo-ROM durch echte Hardware-Modelle
- ▶ Werden vom FPGA/ASIC-Hersteller zur Verfügung gestellt
- ▶ Unsere Anforderungen
 - ▶ Platz für 15360 Bytes
 - ▶ 14b Adressen
 - ▶ 8b Datenausgang
- ▶ Verfügbar auf Ziel-FPGA
 - ▶ Ramblöcke mit Platz für je 16384 Bits
 - ▶ 14b Adressen
 - ▶ 1b Datenausgang

Schrittweises Vorgehen

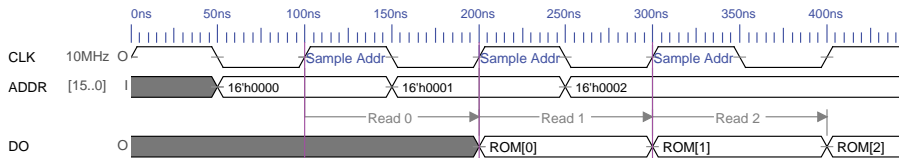
Zunächst nur in **Simulation** behandeln



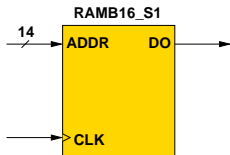
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Feld aus $15360 \cdot 8 = 122880$ Registern?
- ▶ Nein, viel zu **ineffizient**
- ▶ Ersetze Pseudo-ROM durch **echte** Hardware-Modelle
- ▶ Werden vom FPGA/ASIC-Hersteller zur Verfügung gestellt
- ▶ Unsere **Anforderungen**
 - ▶ Platz für 15360 Bytes
 - ▶ 14b Adressen
 - ▶ 8b Datenausgang
- ▶ **Verfügbar** auf Ziel-FPGA
 - ▶ Ramblöcke mit Platz für je 16384 **Bits**
 - ▶ 14b Adressen
 - ▶ **1b** Datenausgang
- ▶ Passt nicht ganz ...

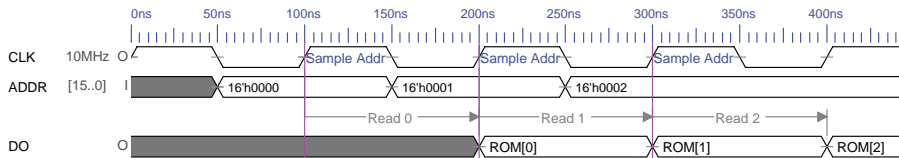
Trotzdem genauer anschauen: RAMB16_S1



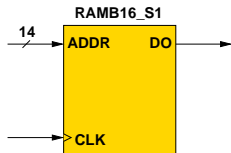
- Adressen werden zur **steigenden** Flanke ausgewertet



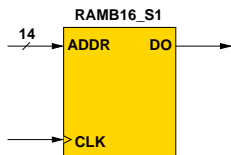
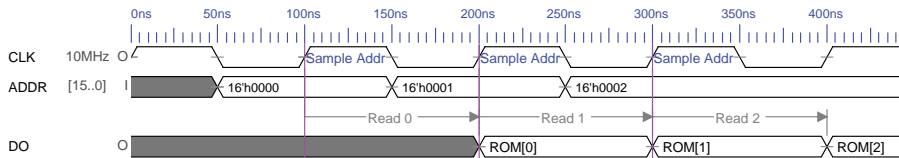
Trotzdem genauer anschauen: RAMB16_S1



- ▶ Adressen werden zur **steigenden Flanke** ausgewertet
 - ▶ Unterschied zum **kombinatorischen Pseudo-ROM**



Trotzdem genauer anschauen: RAMB16_S1



- ▶ Adressen werden zur **steigenden Flanke** ausgewertet
 - ▶ Unterschied zum **kombinatorischen Pseudo-ROM**
- ▶ Ausgang DO liefert adressierte Daten **nach nächster steigender Flanke**

- ▶ Ein ROM-Block namens `RAMB16_S1` ??

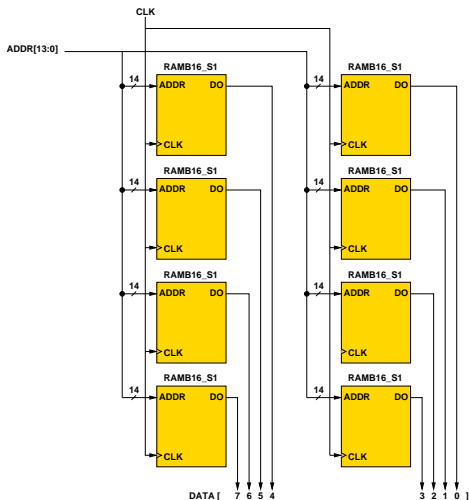
- ▶ Ein ROM-Block namens `RAMB16_S1` ??
- ▶ Der Block kann wohl noch mehr

- ▶ Ein ROM-Block namens `RAMB16_S1` ??
- ▶ Der Block kann wohl noch mehr
- ▶ Hier wirklich nur als **ROM** benutzt
- ▶ Dazu verschiedene **zusätzliche** Steuersignale auf **feste** Werte legen
 - ▶ `EN=1'b1`, Block ist **immer** aktiv
 - ▶ `WE=1'b0`, **niemals** schreiben (soll ja ein **ROM** sein!)
 - ▶ `SSR=1'b0`, **kein** gesonderter Reset-Wert (Daten stehen im ROM)



- ▶ Ein ROM-Block namens `RAMB16_S1` ??
- ▶ Der Block kann wohl noch mehr
- ▶ Hier wirklich nur als `ROM` benutzt
- ▶ Dazu verschiedene **zusätzliche** Steuersignale auf **feste** Werte legen
 - ▶ `EN=1'b1`, Block ist **immer** aktiv
 - ▶ `WE=1'b0`, **niemals** schreiben (soll ja ein `ROM` sein!)
 - ▶ `SSR=1'b0`, **kein** gesonderter Reset-Wert (Daten stehen im ROM)
- ▶ Aber nach wie vor
 - ▶ Ausgang `D0` ist nur **1b** breit, wir brauchen aber **8b**

Verschaltung zum einem 16K x 8b ROM



Timing: Pseudo-ROM ./.. echtes ROM



- ▶ Pseudo-ROM war **kombinatorisch**
- ▶ Hat **“sofort”** auf Änderungen der Adresse reagiert



- ▶ Pseudo-ROM war **kombinatorisch**
- ▶ Hat **“sofort”** auf Änderungen der Adresse reagiert
- ▶ Echtes ROM ist **sequentiell**
- ▶ Reagiert erst bei nächster **positiver Flanke**

Timing: Pseudo-ROM ./.. echtes ROM



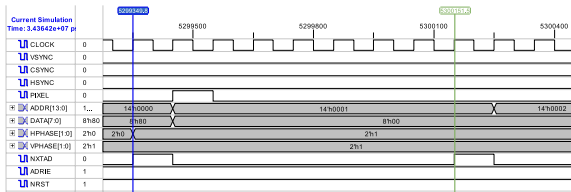
- ▶ Pseudo-ROM war **kombinatorisch**
- ▶ Hat **“sofort”** auf Änderungen der Adresse reagiert
- ▶ Echtes ROM ist **sequentiell**
- ▶ Reagiert erst bei nächster **positiver Flanke**
- ▶ Alles neu entwerfen??



- ▶ Pseudo-ROM war **kombinatorisch**
- ▶ Hat **“sofort”** auf Änderungen der Adresse reagiert
- ▶ Echtes ROM ist **sequentiell**
- ▶ Reagiert erst bei nächster **positiver Flanke**
- ▶ Alles neu entwerfen??
- ▶ Nein, in diesem **speziellen** Fall nicht nötig
- ▶ Adresse liegt 8 Takte **vor** Übernehmen des Datums an
- ▶ **Genug Zeit**, damit echtes ROM seine Daten ausgibt

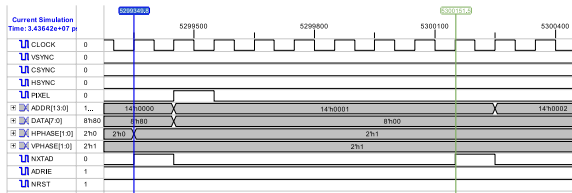
Zeitverhalten Pseudo-ROM ./.. echtes ROM

Pseudo-ROM: Änderungen an ADDR ändern **sofort** DATA

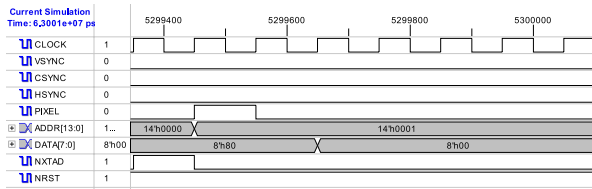


Zeitverhalten Pseudo-ROM ./.. echtes ROM

Pseudo-ROM: Änderungen an ADDR ändern **sofort** DATA



Echtes ROM: Änderungen an ADDR ändern DATA **verzögert**



Einbindung des echten ROMs in Verilog

Kapseln innerhalb eines eigenen Moduls



```
// Bildspeicher aus Xilinx-ROM-Blöcken

#include "discount_defs.v"

module rom(
    input          CLK, // Clock
    input          NRST, // Reset#
    input  [Asz-1:0] ADDR, // 14-bit Address Input
    output [Bsz-1:0] DATA // 8-bit Data Output
);

integer i;
```

Erstellen des Feldes aus acht RAMB16_S1

Statt Copy & Paste schlaueres Konstrukt

```
// Instanziere 8 RAMB16_S1 namens INST[0].ROMBLOCK ... INST[7].ROMBLOCK
generate
  genvar j;
  for (j = 0; j < 8; j = j + 1) begin: INST
    RAMB16_S1 ROMBLOCK(
      .DO(DATA[j]), // bitweiser Anschluß
      .ADDR(ADDR),
      .CLK(CLK),
      .EN(1'b1),    // Enable, immer aktiv
      .WE(1'b0),   // Nie schreiben
      .SSR(1'b0)   // ROM nicht zuruecksetzen
    )
  end
endgenerate
```

Erstellen des Feldes aus acht RAMB16_S1

Statt Copy & Paste schlaueres Konstrukt



```
// Instanziere 8 RAMB16_S1 namens INST[0].ROMBLOCK ... INST[7].ROMBLOCK
generate
  genvar j;
  for (j = 0; j < 8; j = j + 1) begin: INST
    RAMB16_S1 ROMBLOCK(
      .DO(DATA[j]), // bitweiser Anschluß
      .ADDR(ADDR),
      .CLK(CLK),
      .EN(1'b1),    // Enable, immer aktiv
      .WE(1'b0),   // Nie schreiben
      .SSR(1'b0)  // ROM nicht zuruecksetzen
    )
  end
endgenerate
```

- ▶ Erzeugt genau das erforderliche Feld

Erstellen des Feldes aus acht RAMB16_S1

Statt Copy & Paste schlaueres Konstrukt



```
// Instanziere 8 RAMB16_S1 namens INST[0].ROMBLOCK ... INST[7].ROMBLOCK
generate
  genvar j;
  for (j = 0; j < 8; j = j + 1) begin: INST
    RAMB16_S1 ROMBLOCK(
      .DO(DATA[j]), // bitweiser Anschluß
      .ADDR(ADDR),
      .CLK(CLK),
      .EN(1'b1),    // Enable, immer aktiv
      .WE(1'b0),   // Nie schreiben
      .SSR(1'b0)   // ROM nicht zuruecksetzen
    )
  end
endgenerate
```

- ▶ Erzeugt genau das erforderliche Feld
- ▶ Präfix (hier INST) vermeidet Namenskonflikte

Erstellen des Feldes aus acht RAMB16_S1

Statt Copy & Paste schlaueres Konstrukt



```
// Instanziere 8 RAMB16_S1 namens INST[0].ROMBLOCK ... INST[7].ROMBLOCK
generate
  genvar j;
  for (j = 0; j < 8; j = j + 1) begin: INST
    RAMB16_S1 ROMBLOCK(
      .DO(DATA[j]), // bitweiser Anschluß
      .ADDR(ADDR),
      .CLK(CLK),
      .EN(1'b1),    // Enable, immer aktiv
      .WE(1'b0),   // Nie schreiben
      .SSR(1'b0)  // ROM nicht zuruecksetzen
    )
  end
endgenerate
```

- ▶ Erzeugt genau das erforderliche Feld
- ▶ Präfix (hier INST) vermeidet Namenskonflikte
- ▶ Nicht durch for ersetzbar

Erstellen des Feldes aus acht RAMB16_S1

Statt Copy & Paste schlaueres Konstrukt



```
// Instanziere 8 RAMB16_S1 namens INST[0].ROMBLOCK ... INST[7].ROMBLOCK
generate
  genvar j;
  for (j = 0; j < 8; j = j + 1) begin: INST
    RAMB16_S1 ROMBLOCK(
      .DO(DATA[j]), // bitweiser Anschluß
      .ADDR(ADDR),
      .CLK(CLK),
      .EN(1'b1),    // Enable, immer aktiv
      .WE(1'b0),   // Nie schreiben
      .SSR(1'b0)   // ROM nicht zuruecksetzen
    )
  end
endgenerate
```

- ▶ Erzeugt genau das erforderliche Feld
- ▶ Präfix (hier INST) vermeidet Namenskonflikte
- ▶ Nicht durch for ersetzbar
 - ▶ for kann keine Instanziierungen vornehmen

Erstellen des Feldes aus acht RAMB16_S1

Statt Copy & Paste schlaueres Konstrukt



```
// Instanziere 8 RAMB16_S1 namens INST[0].ROMBLOCK ... INST[7].ROMBLOCK
generate
  genvar j;
  for (j = 0; j < 8; j = j + 1) begin: INST
    RAMB16_S1 ROMBLOCK(
      .DO(DATA[j]), // bitweiser Anschluß
      .ADDR(ADDR),
      .CLK(CLK),
      .EN(1'b1),    // Enable, immer aktiv
      .WE(1'b0),   // Nie schreiben
      .SSR(1'b0)   // ROM nicht zuruecksetzen
    )
  end
endgenerate
```

- ▶ Erzeugt genau das erforderliche Feld
- ▶ Präfix (hier INST) vermeidet Namenskonflikte
- ▶ Nicht durch for ersetzbar
 - ▶ for kann keine Instanziierungen vornehmen
 - ▶ Sondern enthält nur prozeduralen Code

Initialisieren der Bilddaten

Weisse Diagonale von links oben nach rechts unten



```
always @(negedge NRST) // <-- bei jedem Reset
// i: Index auf Byte, immer 8 Zeilen + 1 Byte weiter
for (i = 0; i < 'Msz; i = i + 'H/8-8 + 1) begin
// 7. ROM-Bank, Pixel ganz links im Byte
INST[7].ROMBLOCK.mem[i] = 1'b1;
// 6. ROM-Bank, 2. Pixel von links im Byte, 1 Zeile tiefer
INST[6].ROMBLOCK.mem[i + 'H/8] = 1'b1;
// 5. ROM-Bank, 3. Pixel von links im Byte, 2 Zeilen tiefer
INST[5].ROMBLOCK.mem[i + 'H*2/8] = 1'b1;
// usw.
INST[4].ROMBLOCK.mem[i + 'H*3/8] = 1'b1;
INST[3].ROMBLOCK.mem[i + 'H*4/8] = 1'b1;
INST[2].ROMBLOCK.mem[i + 'H*5/8] = 1'b1;
INST[1].ROMBLOCK.mem[i + 'H*6/8] = 1'b1;
INST[0].ROMBLOCK.mem[i + 'H*7/8] = 1'b1;
end
```


Initialisieren der Bilddaten

Weisse Diagonale von links oben nach rechts unten



```
always @(negedge NRST) // <-- bei jedem Reset
// i: Index auf Byte, immer 8 Zeilen + 1 Byte weiter
for (i = 0; i < 'Msz; i = i + 'H/8-8 + 1) begin
// 7. ROM-Bank, Pixel ganz links im Byte
INST[7].ROMBLOCK.mem[i] = 1'b1;
// 6. ROM-Bank, 2. Pixel von links im Byte, 1 Zeile tiefer
INST[6].ROMBLOCK.mem[i + 'H/8] = 1'b1;
// 5. ROM-Bank, 3. Pixel von links im Byte, 2 Zeilen tiefer
INST[5].ROMBLOCK.mem[i + 'H*2/8] = 1'b1;
// usw.
INST[4].ROMBLOCK.mem[i + 'H*3/8] = 1'b1;
INST[3].ROMBLOCK.mem[i + 'H*4/8] = 1'b1;
INST[2].ROMBLOCK.mem[i + 'H*5/8] = 1'b1;
INST[1].ROMBLOCK.mem[i + 'H*6/8] = 1'b1;
INST[0].ROMBLOCK.mem[i + 'H*7/8] = 1'b1;
end
```

Nicht synthetisierbar!



- ▶ Gleiches Verhalten wie Version mit Pseudo-ROM

- ▶ Gleiches Verhalten wie Version mit Pseudo-ROM
- ▶ Vorbereitung für weitere Verbesserung

- ▶ Gleiches Verhalten wie Version mit Pseudo-ROM
- ▶ Vorbereitung für weitere Verbesserung
- ▶ Unterschiedliche Bilder

- ▶ Gleiches Verhalten wie Version mit Pseudo-ROM
- ▶ Vorbereitung für weitere Verbesserung
- ▶ Unterschiedliche Bilder
 - ▶ RAM statt ROM

- ▶ Gleiches Verhalten wie Version mit Pseudo-ROM
- ▶ Vorbereitung für weitere Verbesserung
- ▶ **Unterschiedliche** Bilder
 - ▶ **RAM** statt ROM
 - ▶ Auf dem Chip, auch in **Synthese**



Optimierung

Untersuchung des Synthese-Ergebnisses

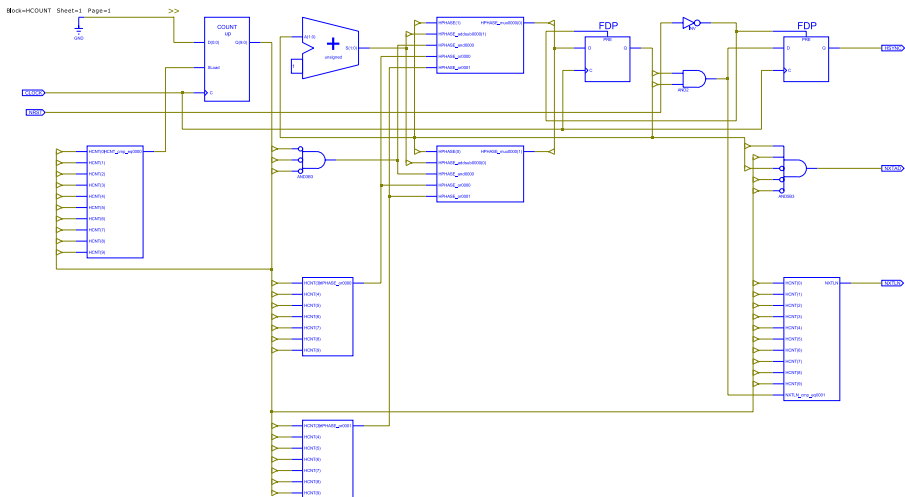
Speziell: Berechnung der NXTAD und NXTLN-Signale



```
always @(HCNT or HPHASE) begin
  if ((HCNT % 'Bsz == 1 )           // neues Byte
      && (HPHASE == 1))             NXTAD = 1;
  else                               NXTAD = 0;
  if ((HCNT == 0) && (HPHASE == 3)) NXTLN = 1;
  else                               NXTLN = 0;
end
```


Untersuchung des Synthese-Ergebnisses

Speziell: Berechnung der NXTAD und NXTLN-Signale

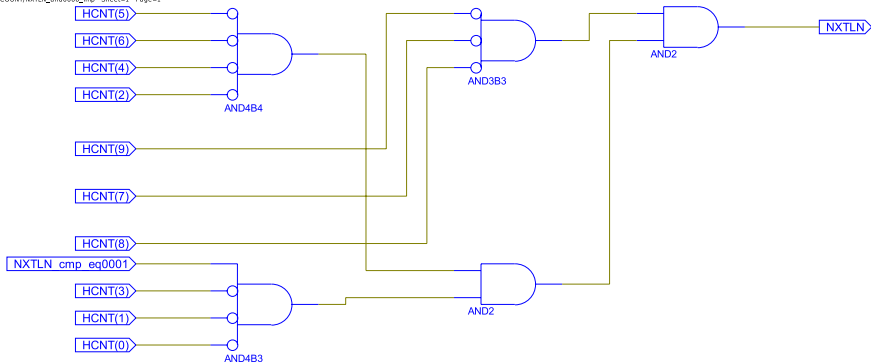


Untersuchung des Synthese-Ergebnisses

Noch genauer: Berechnung des NXTLN-Signals



Block=HCOUNT/NXTLN_and0000_imp Sheet=1 Page=1

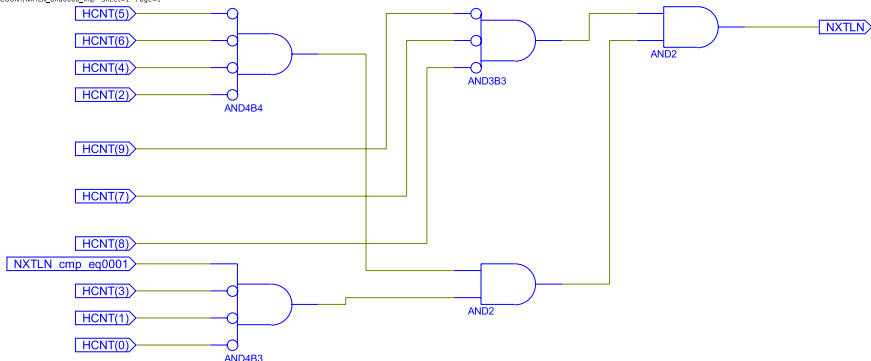


Untersuchung des Synthese-Ergebnisses

Noch genauer: Berechnung des NXTLN-Signals

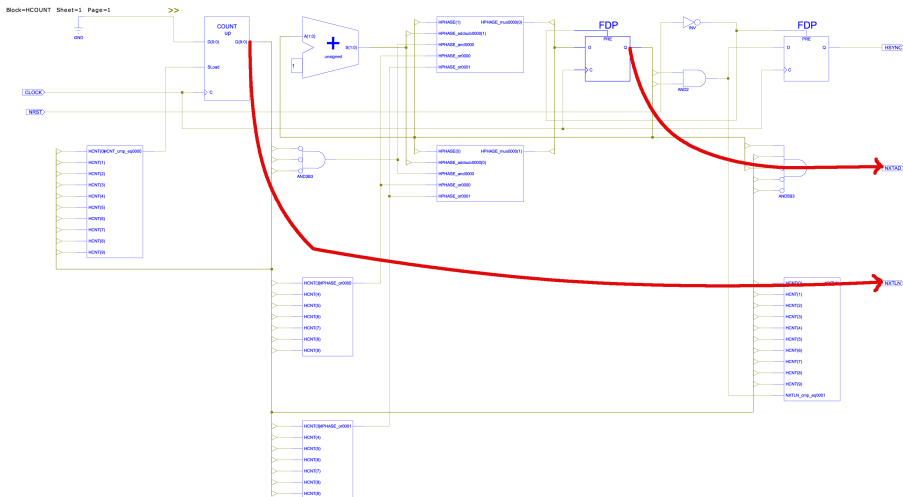


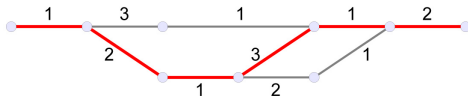
Block=HCOUNT/NXTLN_and0000_imp Sheet=1 Page=1



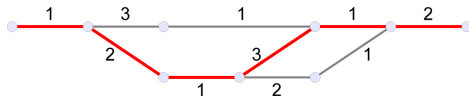
Durchläuft mindestens zwei Wertetabellen.

Annahme: Signale sind zu langsam Wegen Logik und Verdrahtungsverzögerungen

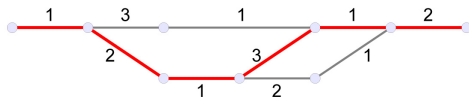




- Längste Verzögerung **zwischen** Registern bestimmt Taktfrequenz

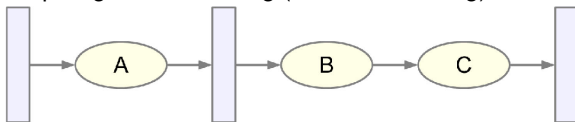


- ▶ Längste Verzögerung **zwischen** Registern bestimmt Taktfrequenz
- ▶ Idee: Pfad(e) **verkürzen**

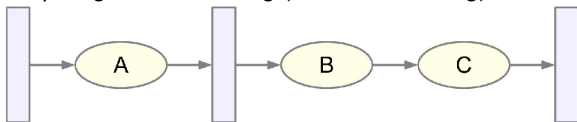


- ▶ Längste Verzögerung **zwischen** Registern bestimmt Taktfrequenz
- ▶ Idee: Pfad(e) **verkürzen**
- ▶ Verschiedene Ansätze

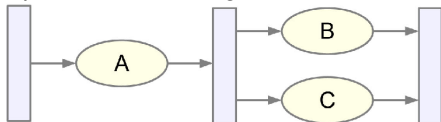
Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



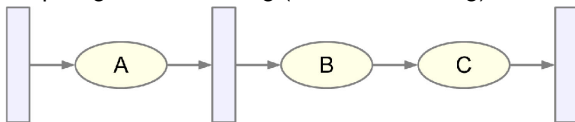
Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



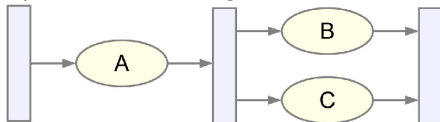
Optimierte Schaltung



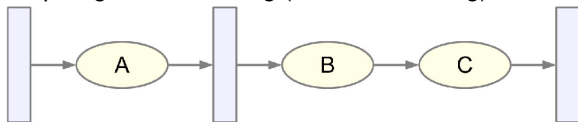
Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



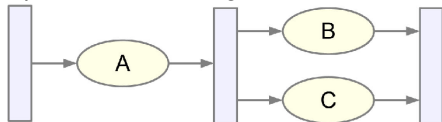
Optimierte Schaltung



Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)

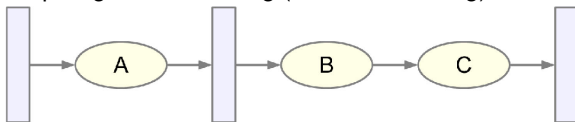


Optimierte Schaltung

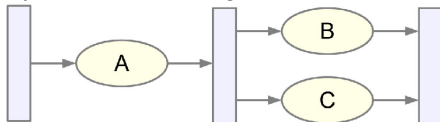


Parallelisieren von Berechnungen

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



Optimierte Schaltung



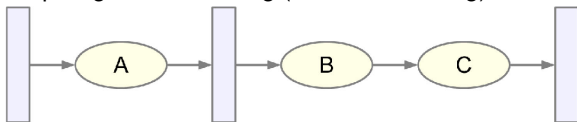
Parallelisieren von Berechnungen

Beachte: Sequentielles Verhalten bleibt **unverändert!**

Möglichkeiten der High-Level-Synthese

1. Verschieben von Berechnungen über Taktgrenzen

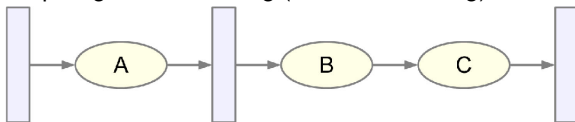
Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



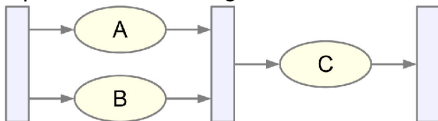
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

1. Verschieben von Berechnungen über Taktgrenzen

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



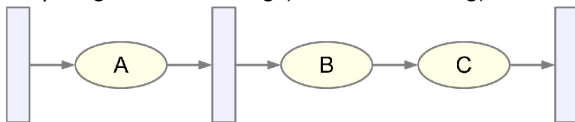
Optimierte Schaltung



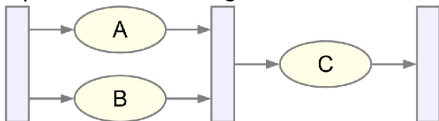
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

1. Verschieben von Berechnungen über Taktgrenzen

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



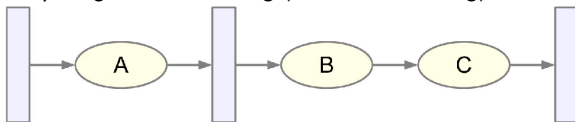
Optimierte Schaltung



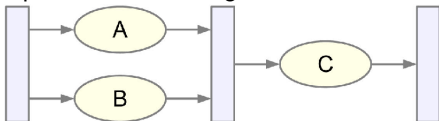
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

1. Verschieben von Berechnungen über Taktgrenzen

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



Optimierte Schaltung

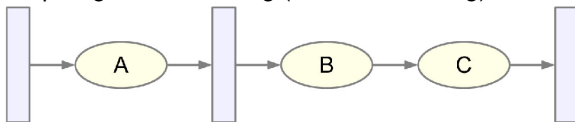


Vorziehen von Berechnungen über Taktgrenzen hinweg

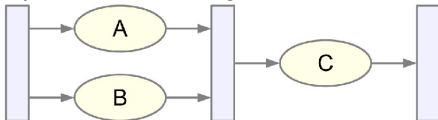
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

1. Verschieben von Berechnungen über Taktgrenzen

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



Optimierte Schaltung



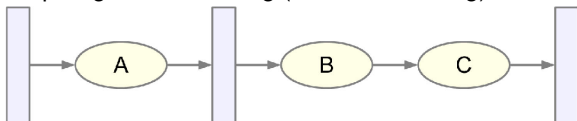
Vorziehen von Berechnungen über Taktgrenzen hinweg

Beachte: Sequentielles Verhalten bleibt auch hier unverändert!

Möglichkeiten der High-Level-Synthese

2. Einfügen von zusätzlichen Registern (Pipelining)

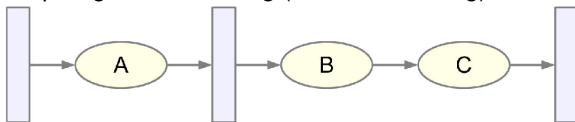
Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



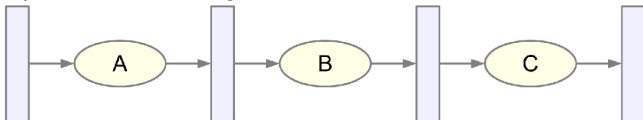
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

2. Einfügen von zusätzlichen Registern (Pipelining)

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



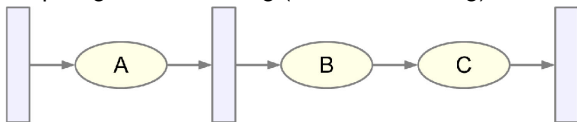
Optimierte Schaltung



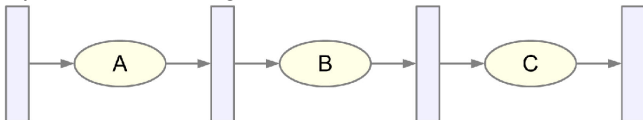
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

2. Einfügen von zusätzlichen Registern (Pipelining)

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



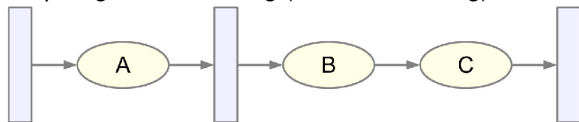
Optimierte Schaltung



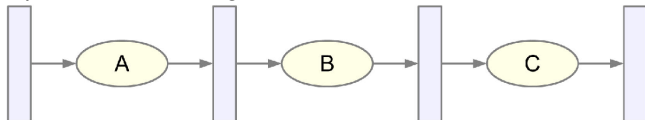
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

2. Einfügen von zusätzlichen Registern (Pipelining)

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



Optimierte Schaltung

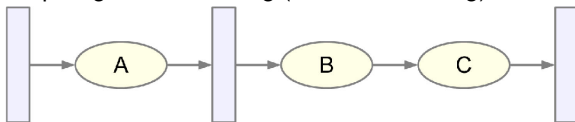


Aufteilen von langen Berechnungen über mehrere Takte

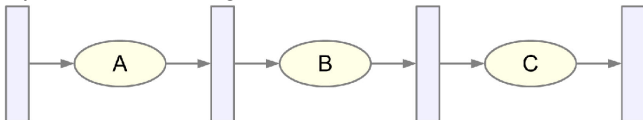
Möglichkeiten der High-Level-Synthese

2. Einfügen von zusätzlichen Registern (Pipelining)

Ursprüngliche Schaltung (Pfad B-C zu lang)



Optimierte Schaltung



Aufteilen von langen Berechnungen **über** mehrere Takte

Beachte: Sequentielles Verhalten wird nun **verändert!**

Diskussion der Methoden für unser Problem

NXTAD und NXTLN seien zu langsam



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Möglichkeiten der **Logiksynthese** bereits ausgenutzt
 - ▶ ... das macht unser Synthesewerkzeug ja **automatisch**
 - ▶ Reicht hier aber nicht!

Diskussion der Methoden für unser Problem

NXTAD und NXTLN seien zu langsam



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Möglichkeiten der **Logiksynthese** bereits ausgenutzt
 - ▶ ... das macht unser Synthesewerkzeug ja **automatisch**
 - ▶ Reicht hier aber nicht!
- ▶ Methoden der **High-Level-Synthese** verwenden
 - ▶ ... nun aber **manuell**, die gibt das Werkzeug automatisch nicht her

Diskussion der Methoden für unser Problem

NXTAD und NXTLN seien zu langsam



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Möglichkeiten der Logiksynthese bereits ausgenutzt
 - ▶ ... das macht unser Synthesewerkzeug ja automatisch
 - ▶ Reicht hier aber nicht!
- ▶ Methoden der High-Level-Synthese verwenden
 - ▶ ... nun aber manuell, die gibt das Werkzeug automatisch nicht her
- ▶ Welche nehmen?
 - ▶ Wir wollen manuell einen möglichst kleinen Eingriff durchführen
 - ▶ Also versuche, sequentielles Verhalten der Signale beizubehalten

Diskussion der Methoden für unser Problem

NXTAD und NXTLN seien zu langsam



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Möglichkeiten der **Logiksynthese** bereits ausgenutzt
 - ▶ ... das macht unser Synthesewerkzeug ja **automatisch**
 - ▶ Reicht hier aber nicht!
 - ▶ Methoden der **High-Level-Synthese** verwenden
 - ▶ ... nun aber **manuell**, die gibt das Werkzeug automatisch nicht her
 - ▶ Welche nehmen?
 - ▶ Wir wollen manuell einen möglichst **kleinen** Eingriff durchführen
 - ▶ Also versuche, sequentielles Verhalten der Signale **beizubehalten**
- ↳ **Verschieben** von Berechnungen!

- ▶ Idee: Breche lange Pfade durch eingefügte **Register** auf



- ▶ Idee: Breche lange Pfade durch eingefügte Register auf
- ▶ Nun also NXTAD und NXTLN nicht mehr kombinatorisch
- ▶ ... sondern sequentiell berechnen



- ▶ Idee: Breche lange Pfade durch eingefügte Register auf
- ▶ Nun also NXTAD und NXTLN nicht mehr kombinatorisch
- ▶ ... sondern sequentiell berechnen
- ▶ Problem bei naivem Vorgehen (einfach Register einfügen)
 - ▶ Signale verzögern sich nach aussen um einen Takt
 - ▶ Der Rest der Schaltung funktioniert nicht mehr!

- ▶ Idee: Breche lange Pfade durch eingefügte Register auf
- ▶ Nun also NXTAD und NXTLN nicht mehr kombinatorisch
- ▶ ... sondern sequentiell berechnen
- ▶ Problem bei naivem Vorgehen (einfach Register einfügen)
 - ▶ Signale verzögern sich nach aussen um einen Takt
 - ▶ Der Rest der Schaltung funktioniert nicht mehr!
- ▶ Lösungsidee
 - ▶ Zwar neue Register einbauen
 - ▶ Aber Ergebnis einen Takt im voraus berechnen
 - ▶ Damit bleibt von aussen sichtbares sequentielles Verhalten gleich

Berechnung von NXTLN

Alle Bedingungsabfragen um einen Takt vorziehen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Ursprüngliche Berechnung

```
if ((HCNT == 0) && (HPHASE == 3))  
    NXTLN = 1;  
else  
    NXTLN = 0;
```

Berechnung von NXTLN

Alle Bedingungsabfragen um einen Takt vorziehen



Ursprüngliche Berechnung

```
if ((HCNT == 0) && (HPHASE == 3))
    NXTLN = 1;
else
    NXTLN = 0;
```

Nun einen Takt vorziehen

```
if ((HCNT == 'Hline-1'))
    NXTLN = 1;
else
    NXTLN = 0;
```

Überlegung: Bei `HCNT == 'Hline-1'` ist in jedem Fall `HPHASE==3`
Abfrage auf `HPHASE` unnötig!

Ursprüngliche Berechnung

```
if ((HCNT % 'Bsz == 1) && (HPHASE == 1))  
    NXTAD = 1  
else  
    NXTAD = 0;
```



Ursprüngliche Berechnung

```
if ((HCNT % 'Bsz == 1) && (HPHASE == 1))  
    NXTAD = 1  
else  
    NXTAD = 0;
```

Nun einen Takt vorziehen

```
if ((HCNT % 'Bsz == 0) && (HPHASE == 1))  
    NXTAD = 1  
else  
    NXTAD = 0;
```



Ursprüngliche Berechnung

```
if ((HCNT % 'Bsz == 1) && (HPHASE == 1))  
    NXTAD = 1  
else  
    NXTAD = 0;
```

Nun einen Takt vorziehen

```
if ((HCNT % 'Bsz == 0) && (HPHASE == 1))  
    NXTAD = 1  
else  
    NXTAD = 0;
```



Ursprüngliche Berechnung

```
if ((HCNT % 'Bsz == 1) && (HPHASE == 1))  
    NXTAD = 1  
else  
    NXTAD = 0;
```

Nun **einen Takt** vorziehen

```
if ((HCNT % 'Bsz == 0) && (HPHASE == 1))  
    NXTAD = 1  
else  
    NXTAD = 0;
```

Reicht aber **nicht** aus: HPHASE wird erst zu **spät 1**!

HPHASE eher berechnen

Idee: Phasengrenzen um einen Takt nach vorne schieben



Ursprüngliche Berechnung

```
case (HCNT)
  0:      HPHASE <= 0;           // linker Bildrand
  'H1:    HPHASE <= HPHASE+1;   // Bildpunkte
  'H1+'H: HPHASE <= HPHASE+1;   // rechter Bildrand
  'H1+'H+'H2: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
endcase
```

HPHASE eher berechnen

Idee: Phasengrenzen um einen Takt nach vorne schieben



Ursprüngliche Berechnung

```
case (HCNT)
  0:      HPHASE <= 0;           // linker Bildrand
  'H1:    HPHASE <= HPHASE+1;   // Bildpunkte
  'H1+'H: HPHASE <= HPHASE+1;   // rechter Bildrand
  'H1+'H+'H2: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
endcase
```

Um einen Takt vorgezogenes Signal

```
case (HCNT)
  'Hline - 1: HPHASE <= 0;           // linker Bildrand
  'H1 - 1:    HPHASE <= HPHASE+1;   // Bildpunkte
  'H1+'H - 1: HPHASE <= HPHASE+1;   // rechter Bildrand
  'H1+'H+'H2 - 1: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
endcase
```

HPHASE eher berechnen

Idee: Phasengrenzen um einen Takt nach vorne schieben



Ursprüngliche Berechnung

```
case (HCNT)
  0:      HPHASE <= 0;           // linker Bildrand
  'H1:    HPHASE <= HPHASE+1;   // Bildpunkte
  'H1+'H: HPHASE <= HPHASE+1;   // rechter Bildrand
  'H1+'H+'H2: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
endcase
```

Um einen Takt vorgezogenes Signal

```
case (HCNT)
  'Hline - 1: HPHASE <= 0;           // linker Bildrand
  'H1 - 1:    HPHASE <= HPHASE+1;   // Bildpunkte
  'H1+'H - 1: HPHASE <= HPHASE+1;   // rechter Bildrand
  'H1+'H+'H2 - 1: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
endcase
```

HPHASE eher berechnen

Idee: Phasengrenzen um einen Takt nach vorne schieben



Ursprüngliche Berechnung

```
case (HCNT)
  0:      HPHASE <= 0;           // linker Bildrand
  'H1:    HPHASE <= HPHASE+1;   // Bildpunkte
  'H1+'H: HPHASE <= HPHASE+1;   // rechter Bildrand
  'H1+'H+'H2: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
endcase
```

Um einen Takt vorgezogenes Signal

```
case (HCNT)
  'Hline - 1:  HPHASE <= 0;           // linker Bildrand
  'H1 - 1:     HPHASE <= HPHASE+1;   // Bildpunkte
  'H1+'H - 1:  HPHASE <= HPHASE+1;   // rechter Bildrand
  'H1+'H+'H2 - 1: HPHASE <= HPHASE+1; // Bildsynchronisation
endcase
```

DISCOUNT funktioniert nicht: Nun kommt HSYNC zu früh!



Ursprüngliche Berechnung

```
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0)    HSYNC <= 1;
  else
    if (HPHASE == 3) HSYNC <= 1;    // <-- nun zu früh!
    else            HSYNC <= 0;    //   - " -
end
```

Ursprüngliche Berechnung

```
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0)    HSYNC <= 1;
  else
    if (HPHASE == 3) HSYNC <= 1;    // <-- nun zu früh!
    else            HSYNC <= 0;    //      - " -
  end
```

Neu: Um einen Takt verzögertes HSYNC-Signal via HSYNC_E

```
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0) begin
    HSYNC    <= 1;
    HSYNC_E <= 1;
  end else begin
    if (HPHASE == 3) HSYNC_E <= 1;
    else            HSYNC_E <= 0;
    HSYNC <= HSYNC_E;
  end
end
```

Nun ist HSYNC selbst wieder richtig.

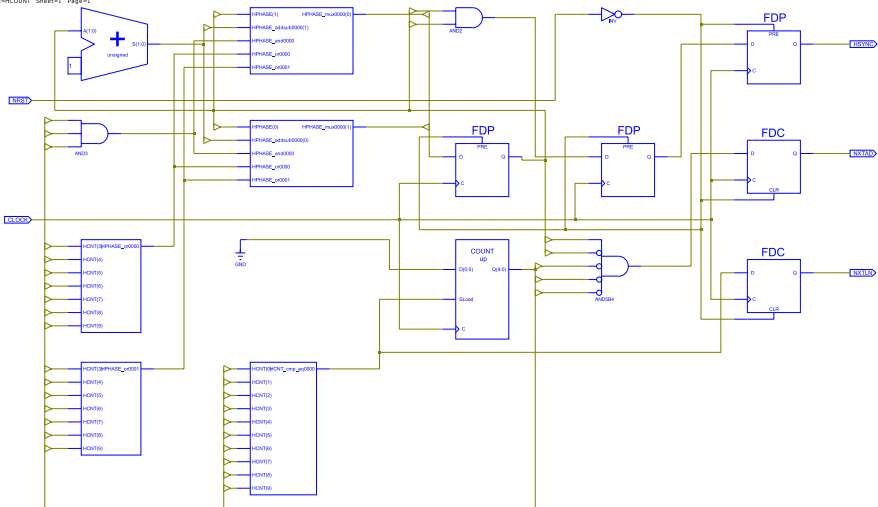
Vorgezogene NXTAD-Berechnung durch eingefügte Register

```
always @(posedge CLOCK or negedge NRST) begin
  if (NRST == 0) begin                // Reset
    NXTAD <= 0;
    NXTLN <= 0;
  end else begin
    if ((HCNT % 'Bsz == 0 )          // neues Byte
        && (HPHASE == 1))
      NXTAD <= 1;
    else
      if (HCNT == 'Hline-1)
        NXTAD <= 0;
      else
        NXTLN <= 1;
    else
      NXTLN <= 0;
  end
end
```

Damit sequentielles Verhalten nach aussen gleich geblieben

Synthese-Ergebnis der optimierten Schaltung

Block-HCOUNT Sheet=1 Page=1



Timing-Analyse der endgültigen Schaltung

Nach Platzierung/Verdrahtung auf modernem XC2VP30 FPGA)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vor Optimierung

Timing summary:

Design statistics:

Minimum period : 3.898ns
(Maximum frequency: 256.542MHz)

Timing-Analyse der endgültigen Schaltung

Nach Platzierung/Verdrahtung auf modernerem XC2VP30 FPGA)



Vor Optimierung

Timing summary:

Design statistics:

Minimum period : 3.898ns
(Maximum frequency: 256.542MHz)

Nach Optimierung

Timing summary:

Design statistics:

Minimum period : 3.197ns
(Maximum frequency: 312.793MHz)



Modellierung von Speichern



- ▶ RAM (*random access memory*) ist i.d.R. flüchtig
- ▶ Ausnahme: *non-volatile RAM* (NVRAM), z.B. FeRAM, MRAM, PCRAM, ...

- ▶ RAM (*random access memory*) ist i.d.R. flüchtig
- ▶ Ausnahme: *non-volatile RAM* (NVRAM), z.B. FeRAM, MRAM, PCRAM, ...
 - ▶ nicht: Flash, EPROM, EEPROM: Schreiben dauert deutlich länger als lesen
 - ▶ bei Flash: 0.5 s (NAND Flash), 1 s (NOR Flash) pro 128 KB Block



- ▶ RAM (*random access memory*) ist i.d.R. flüchtig
- ▶ Ausnahme: *non-volatile RAM* (NVRAM), z.B. FeRAM, MRAM, PCRAM, ...
 - ▶ **nicht:** Flash, EPROM, EEPROM: Schreiben dauert deutlich länger als lesen
 - ▶ bei Flash: 0.5 s (NAND Flash), 1 s (NOR Flash) pro 128 KB Block
- ▶ Unterschiedliche Arten von flüchtigen RAM Speichern (→ TGDI)
 - ▶ Statisches RAM (SRAM)
 - ▶ Dynamisches RAM (DRAM)

- ▶ asynchrone und synchrone RAMs
 - ▶ SRAM vs. SSRAM
 - ▶ DRAM vs. SDRAM)

- ▶ asynchrone und synchrone RAMs
 - ▶ SRAM vs. SSRAM
 - ▶ DRAM vs. SDRAM)
- ▶ *double data-rate* (DDR)
 - ▶ Daten werden bei steigender **und** fallender Taktflanke übertragen
 - ▶ z.B. DDR3-SDRAM



- ▶ asynchrone und synchrone RAMs
 - ▶ SRAM vs. SSRAM
 - ▶ DRAM vs. SDRAM)
- ▶ *double data-rate* (DDR)
 - ▶ Daten werden bei steigender **und** fallender Taktflanke übertragen
 - ▶ z.B. DDR3-SDRAM
- ▶ *quad data-rate* (QDR)
 - ▶ Daten werden bei steigender und fallender Taktflanke übertragen
 - ▶ ... und jeweils hälftig *zwischen* den Taktflanken (90° phasenverschoben)
 - ▶ z.B. QDR-SSRAM

Speicherbus-Protokoll für externes SRAM

Asynchron



- ▶ Adressleitungen wählen Speicherzellen aus
- ▶ Datenleitungen
- ▶ Chipauswahlleitung \overline{CS} (*chip select*)
- ▶ Schreibleitung \overline{WE} (*write enable*)
- ▶ Leseleitung \overline{OE} (*output enable*)

Speicherbus-Protokoll für externes SRAM

Asynchron



- ▶ Adressleitungen wählen Speicherzellen aus
- ▶ Datenleitungen
- ▶ Chipauswahlleitung \overline{CS} (*chip select*)
- ▶ Schreibleitung \overline{WE} (*write enable*)
- ▶ Leseleitung \overline{OE} (*output enable*)
- ▶ \overline{CS} , \overline{WE} und \overline{OE}
 - ▶ active-low, angedeutet durch die Negierung der Signalnamen
 - ▶ auch geschrieben als nCS , nWE , nOE

Speicherbus-Protokoll für externes SRAM

Asynchron



- ▶ Adressleitungen wählen Speicherzellen aus
- ▶ Datenleitungen
- ▶ Chipauswahlleitung \overline{CS} (*chip select*)
- ▶ Schreibleitung \overline{WE} (*write enable*)
- ▶ Leseleitung \overline{OE} (*output enable*)
- ▶ \overline{CS} , \overline{WE} und \overline{OE}
 - ▶ active-low, angedeutet durch die Negierung der Signalnamen
 - ▶ auch geschrieben als nCS , nWE , nOE
- ▶ Bei $\overline{CS} = 1$: Ausgabeleitungen (DATA) hochohmig (Z)
 - ▶ \overline{WE} und \overline{OE} werden ignoriert
- ▶ Steuerung des Chips im wesentlichen über \overline{CS}

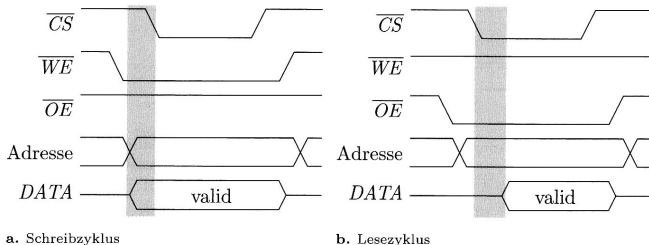
Speicherbus-Protokoll für externes SRAM

Asynchron



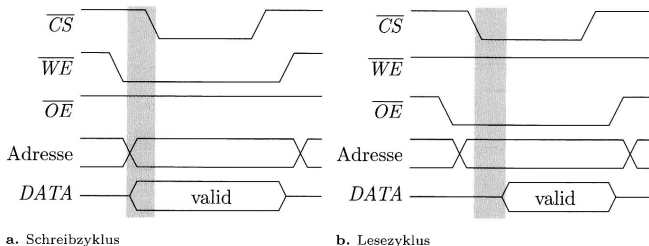
- ▶ Adressleitungen wählen Speicherzellen aus
- ▶ Datenleitungen
- ▶ Chipauswahlleitung \overline{CS} (*chip select*)
- ▶ Schreibleitung \overline{WE} (*write enable*)
- ▶ Leseleitung \overline{OE} (*output enable*)
- ▶ \overline{CS} , \overline{WE} und \overline{OE}
 - ▶ active-low, angedeutet durch die Negierung der Signalnamen
 - ▶ auch geschrieben als nCS , nWE , nOE
- ▶ Bei $\overline{CS} = 1$: Ausgabeleitungen (DATA) hochohmig (Z)
 - ▶ \overline{WE} und \overline{OE} werden ignoriert
- ▶ Steuerung des Chips im wesentlichen über \overline{CS}
 - ▶ Siehe `Select` bei Adressdekodierung (kommt noch ...)

Signalverlauf: Zugriff auf asynchrones SRAM



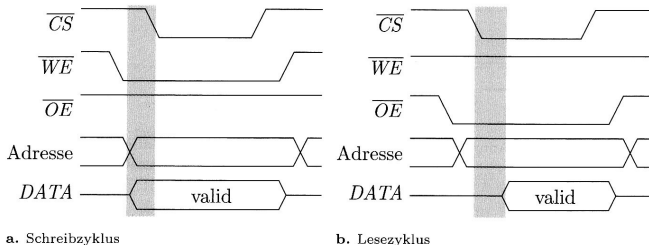
- ▶ Verzögerungszeiten des Speichers durch Schattierung dargestellt

Signalverlauf: Zugriff auf asynchrones SRAM



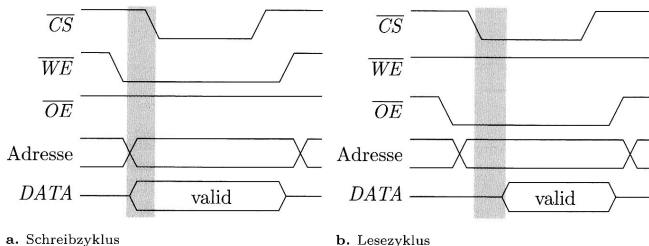
- ▶ Verzögerungszeiten des Speichers durch Schattierung dargestellt
- ▶ Schreiben: Adressen und Daten müssen vor der Übernahme *stabil* anliegen
 - ▶ Ähnlich Setup- und Hold-Zeiten, siehe TGD1

Signalverlauf: Zugriff auf asynchrones SRAM



- ▶ Verzögerungszeiten des Speichers durch Schattierung dargestellt
- ▶ Schreiben: Adressen und Daten müssen vor der Übernahme *stabil* anliegen
 - ▶ Ähnlich Setup- und Hold-Zeiten, siehe TGDI
- ▶ Lesen: Nach Änderung von \overline{CS} Verzögerung, bis gültigen Daten anliegen
- ▶ Auslesen des Speichers durch Setzen von \overline{OE}

Signalverlauf: Zugriff auf asynchrones SRAM



- ▶ Verzögerungszeiten des Speichers durch Schattierung dargestellt
- ▶ Schreiben: Adressen und Daten müssen vor der Übernahme *stabil* anliegen
 - ▶ Ähnlich Setup- und Hold-Zeiten, siehe TGD1
- ▶ Lesen: Nach Änderung von \overline{CS} Verzögerung, bis gültigen Daten anliegen
- ▶ Auslesen des Speichers durch Setzen von \overline{OE}
- ▶ Alle Feinheiten in Datenblättern der Hersteller

Speicherbus-Protokoll für externes DRAM

asynchron, stark vereinfacht



- ▶ DRAMs haben große Speicherkapazität (4 Gb = 1 G x 4 b)
- ▶ Zusammenfassung von Adressleitungen (hier: 30)
 - ▶ Spart Pins!

Speicherbus-Protokoll für externes DRAM

asynchron, stark vereinfacht



- ▶ DRAMs haben große Speicherkapazität (4 Gb = 1 G x 4 b)
- ▶ Zusammenfassung von Adressleitungen (hier: 30)
 - ▶ Spart Pins!
- ▶ Adresdaten aufteilen in Reihen- und Spaltenadressen
 - ▶ ggf. auch noch Bank-Adresse (hier nicht im Detail behandelt)
 - ▶ im 4 Gb Beispiel 16b Reihe, 11b Spalte, 3b Bank
 - ▶ $= 2^{16} \cdot 2^{11} \cdot 2^3 = 2^{30} = 1 \text{ G}$

Speicherbus-Protokoll für externes DRAM

asynchron, stark vereinfacht



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ DRAMs haben große Speicherkapazität (4 Gb = 1 G x 4 b)
- ▶ Zusammenfassung von Adressleitungen (hier: 30)
 - ▶ Spart Pins!
- ▶ Adressdaten aufteilen in Reihen- und Spaltenadressen
 - ▶ ggf. auch noch Bank-Adresse (hier nicht im Detail behandelt)
 - ▶ im 4 Gb Beispiel 16b Reihe, 11b Spalte, 3b Bank
 - ▶ $= 2^{16} \cdot 2^{11} \cdot 2^3 = 2^{30} = 1 \text{ G}$
- ▶ Reihen- und Spaltenadressen dann **nacheinander** übertragen
 - ▶ über den gleichen **16b** Adressbus
 - ▶ Zeitmultiplex-Verfahren

Speicherbus-Protokoll für externes DRAM

asynchron, stark vereinfacht

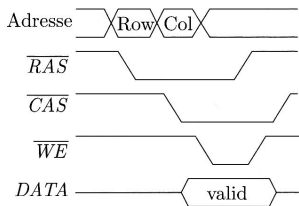


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

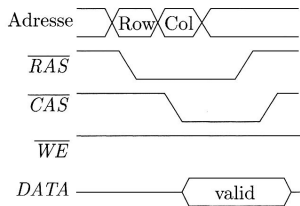
- ▶ DRAMs haben große Speicherkapazität (4 Gb = 1 G x 4 b)
- ▶ Zusammenfassung von Adressleitungen (hier: 30)
 - ▶ Spart Pins!
- ▶ Adresdaten aufteilen in Reihen- und Spaltenadressen
 - ▶ ggf. auch noch Bank-Adresse (hier nicht im Detail behandelt)
 - ▶ im 4 Gb Beispiel 16b Reihe, 11b Spalte, 3b Bank
 - ▶ $= 2^{16} \cdot 2^{11} \cdot 2^3 = 2^{30} = 1 \text{ G}$
- ▶ Reihen- und Spaltenadressen dann **nacheinander** übertragen
 - ▶ über den gleichen **16b** Adressbus
 - ▶ Zeitmultiplex-Verfahren
- ▶ Auswahl der Art der Teiladresse
 - ▶ Row-Address-Strobe (\overline{RAS}) für Zeilenadresse
 - ▶ Column-Address-Strobe (\overline{CAS}) für Spaltenadresse

Signalverlauf: DRAM Zugriff

asynchron



a. Schreibzyklus



b. Lesezyklus

- Hier **stark vereinfacht**, alle Feinheiten in Datenblättern der Hersteller



```
module rom16x4 (ROM_data, ROM_addr);
  output [3:0] ROM_data;
  input  [3:0] ROM_addr;
  reg    [3:0] ROM [15:0];

  assign ROM_data = ROM[ROM_addr];

  // für Simulation
  initial $readmemh("ROM-2b-Adder.txt",ROM,0,15);
endmodule
```

angelehnt an Ciletti, Michael D.: *Advanced Digital Design with the Verilog HDL*. Prentice Hall, 2003, S. 424



```
module sram16x8 (input [3:0] address,  
                input nCS, nWE, nOE,  
                inout [7:0] data);  
  
reg [7:0] memory [15:0]; // 16 Zellen, 8 Bit breit  
  
assign data = (!nCS && !nOE) ? memory[address] : 8'bZ;  
  
always @(nCS or nWE)  
  if (!nCS && !nWE) memory [address] = data;  
  
endmodule
```

angelehnt an *Biere, Kroening, Weissenbacher, Wintersteiger: Digitaltechnik - Eine praxisnahe Einführung. Springer, 2008, S. 184*

Verilog-Modell: Externer DRAM-Chip

asynchron, stark vereinfacht



```
module dram256x8 (input [3:0] address,  
                 input nRAS, nCAS, nWE, nOE,  
                 inout [7:0] data);  
  
reg [7:0] memory [15:0][15:0]; // 16x16 Zellen, 8 Bit breit  
reg [3:0] row, column;  
  
assign data = (!nOE) ? memory[row][column] : 8'bZ;  
  
always @(negedge nRAS)  
    row <= address;  
  
always @(negedge nCAS)  
    column <= address;  
  
always @(negedge nWE)  
    memory [row][column] <= data;  
  
endmodule
```

angelehnt an *Biere, Kroening, Weissenbacher, Wintersteiger: Digitaltechnik - Eine praxisnahe Einführung. Springer, 2008, S. 185*



Takterzeugung

- ▶ Takterzeugung erfolgt physikalisch z. B. durch einen Quarz



- ▶ Takterzeugung erfolgt physikalisch z. B. durch einen Quarz
- ▶ Beispiel: Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 *MHz*

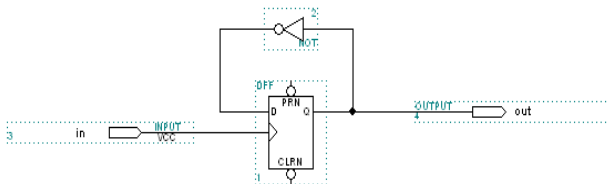


- ▶ Takterzeugung erfolgt physikalisch z. B. durch einen Quarz
- ▶ Beispiel: Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 *MHz*
- ▶ Was, wenn Chip nur bei 32 *MHz* läuft?



- ▶ Takterzeugung erfolgt physikalisch z. B. durch einen Quarz
- ▶ Beispiel: Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 *MHz*
- ▶ Was, wenn Chip nur bei 32 *MHz* läuft?
- ▶ Wie erreicht man eine Takteilung?

- ▶ Takterzeugung erfolgt physikalisch z. B. durch einen Quarz
- ▶ Beispiel: Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 MHz
- ▶ Was, wenn Chip nur bei 32 MHz läuft?
- ▶ Wie erreicht man eine Taktteilung?
- ▶ Z. B. rückgekoppeltes Flip-Flop





- ▶ Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 *MHz*
- ▶ Taktfrequenz z. B. auf 125 *kHz* teilen?



- ▶ Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 *MHz*
- ▶ Taktfrequenz z. B. auf 125 *kHz* teilen?
- ▶ Naive Lösung: neun rückgekoppelte Flip-Flops in Reihe schalten



- ▶ Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 *MHz*
- ▶ Taktfrequenz z. B. auf 125 *kHz* teilen?
- ▶ Naive Lösung: neun rückgekoppelte Flip-Flops in Reihe schalten
- ▶ Unpraktikabel: lange Durchlaufzeit, Ressourcenverschwendung an CLBs

- ▶ Quarz hat eine Taktfrequenz von 64 *MHz*
- ▶ Taktfrequenz z. B. auf 125 *kHz* teilen?
- ▶ Naive Lösung: neun rückgekoppelte Flip-Flops in Reihe schalten
- ▶ Unpraktikabel: lange Durchlaufzeit, Ressourcenverschwendung an CLBs
- ▶ Bessere Lösung: Zähler mit verschiedenen Abgriffen



- ▶ Verschiedene Taktfrequenzen ergeben sich durch unterschiedliche Abgriffe
- ▶ Jeweils geteilt durch entsprechende Zweierpotenz

```
module taktteiler( clkin , clkout1 , clkout2 , clkout3 );
```

```
input clkin ;
```

```
output clkout1 , clkout2 , clkout3 ;
```

```
reg [24:0] counter;
```

```
assign clkout1 = counter[24];
```

```
assign clkout2 = counter[23];
```

```
assign clkout3 = counter[18];
```

```
always @(posedge clkin) begin
```

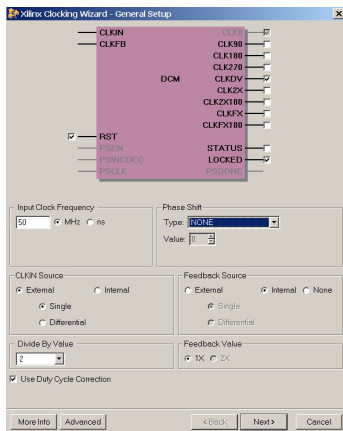
```
    counter <= counter + 1;
```

```
end
```

```
endmodule
```


Andere Teilungsverhältnisse

Digital Clock Manager (DCM) oder Phase-Locked Loop (PLL)



Damit z.B. auch Ausgangsfrequenz = $5 / 3$ der Eingangsfrequenz

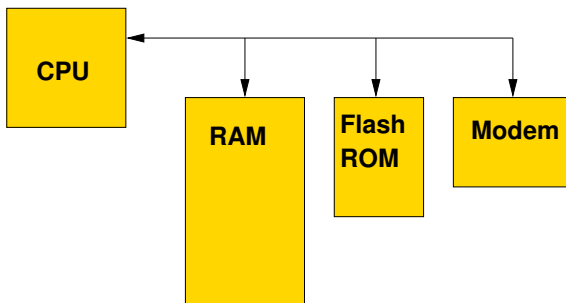


Kommunikation und Adressierung



- ▶ Verschiedene Untereinheiten
- ▶ Kommunikation untereinander
- ▶ Auf verschiedene technische Weisen realisierbar

- ▶ Verschiedene Untereinheiten
- ▶ Kommunikation untereinander
- ▶ Auf verschiedene technische Weisen realisierbar



Häufig verwendet: Busse



- ▶ Gemeinsame Verbindungen zwischen Komponenten
- ▶ Maximal ein Initiator / Master gleichzeitig
 - ▶ Veranlasst Aktivitäten auf Bus

Häufig verwendet: Busse

- ▶ Gemeinsame Verbindungen zwischen Komponenten
- ▶ Maximal ein Initiator / Master gleichzeitig
 - ▶ Veranlasst Aktivitäten auf Bus
- ▶ Ein oder mehrere Targets / Slaves
 - ▶ Reagieren auf Aktivitäten auf dem Bus



- ▶ Gemeinsame Verbindungen zwischen Komponenten
- ▶ Maximal ein Initiator / Master gleichzeitig
 - ▶ Veranlasst Aktivitäten auf Bus
- ▶ Ein oder mehrere Targets / Slaves
 - ▶ Reagieren auf Aktivitäten auf dem Bus
- ▶ Grundlegende Transaktionen auf dem Bus
 - ▶ Initiator fordert Daten von Target an: Lesezugriff
 - ▶ Initiator überträgt Daten zum Target: Schreibzugriff

- ▶ Gemeinsame Verbindungen zwischen Komponenten
- ▶ Maximal ein Initiator / Master gleichzeitig
 - ▶ Veranlasst Aktivitäten auf Bus
- ▶ Ein oder mehrere Targets / Slaves
 - ▶ Reagieren auf Aktivitäten auf dem Bus
- ▶ Grundlegende Transaktionen auf dem Bus
 - ▶ Initiator fordert Daten von Target an: Lesezugriff
 - ▶ Initiator überträgt Daten zum Target: Schreibzugriff
- ▶ Busorganisation in einfachen Systemen
 - ▶ Nur ein Master, häufig die CPU



- ▶ Gemeinsame Verbindungen zwischen Komponenten
- ▶ Maximal ein **Initiator** / **Master** gleichzeitig
 - ▶ **Veranlasst** Aktivitäten auf Bus
- ▶ Ein oder mehrere **Targets** / **Slaves**
 - ▶ **Reagieren** auf Aktivitäten auf dem Bus
- ▶ Grundlegende **Transaktionen** auf dem Bus
 - ▶ Initiator fordert Daten von Target an: **Lesezugriff**
 - ▶ Initiator überträgt Daten zum Target: **Schreibzugriff**
- ▶ Busorganisation in **einfachen** Systemen
 - ▶ Nur **ein** Master, häufig die **CPU**
- ▶ In **leistungsstärkeren** Systemen
 - ▶ **Mehrere** Master (*multi-master* Ansatz, DMA)
 - ▶ Beispiele: Gb/s-Ethernet, Festplatten-Controller, Graphikprozessor, USB 2.0...
 - ▶ Hier nicht weiter behandelt

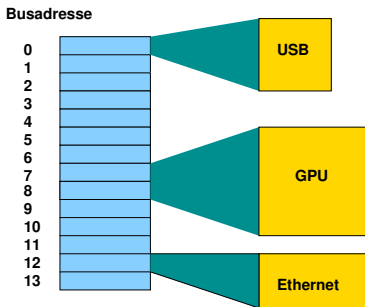
- ▶ **Gemeinsam** genutztes Medium

- ▶ Gemeinsam genutztes Medium
- ▶ Vorteile
 - ▶ Einfache Realisierung
 - ▶ Wenig Chip-Fläche

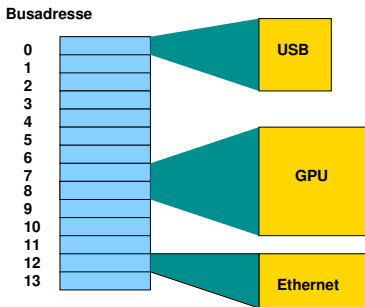
- ▶ **Gemeinsam** genutztes Medium
- ▶ **Vorteile**
 - ▶ **Einfache** Realisierung
 - ▶ **Wenig** Chip-Fläche
- ▶ **Nachteile**
 - ▶ Nur **eine** Verbindung gleichzeitig
 - ▶ Vereinfacht, kann **etwas** verbessert werden
 - ▶ → Disconnect/Reconnect, Split Transaction, ...

- ▶ **Gemeinsam** genutztes Medium
- ▶ **Vorteile**
 - ▶ **Einfache** Realisierung
 - ▶ **Wenig** Chip-Fläche
- ▶ **Nachteile**
 - ▶ Nur **eine** Verbindung gleichzeitig
 - ▶ Vereinfacht, kann **etwas** verbessert werden
 - ▶ → Disconnect/Reconnect, Split Transaction, ...
 - ▶ Probleme bei Bussen
 - ▶ Wie Bus vergeben, wenn **mehrere** Initiator/Master **gleichzeitig** Zugriff benötigen? → nicht weiter behandelt
 - ▶ Wie Target **gezielt** ansprechen? → kommt jetzt

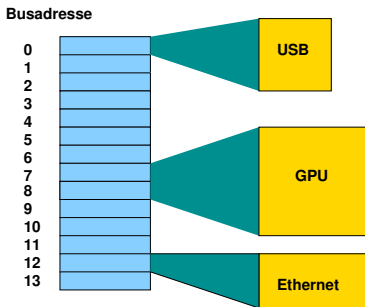
- Vergabe von **Adressen** für Teilnehmer an Bus



- ▶ Vergabe von **Adressen** für Teilnehmer an Bus
- ▶ Können auch **sehr** große Bereiche sein



- ▶ Vergabe von **Adressen** für Teilnehmer an Bus
- ▶ Können auch **sehr** große Bereiche sein
 - ▶ Beispiel: Moderne GPU braucht ca. 2 GB an **Adressraum**





- ▶ CPU kennt schon Adressen



- ▶ CPU kennt schon Adressen
- ▶ Nämlich für den Speicher



- ▶ CPU kennt schon Adressen
- ▶ Nämlich für den Speicher
- ▶ Wie damit Buszugriffe realisieren?



- ▶ CPU kennt schon Adressen
- ▶ Nämlich für den Speicher
- ▶ Wie damit Buszugriffe realisieren?
- ▶ Zwei Alternativen

1. Getrennter Adressbereich für Bus



- ▶ Häufig **Ein-/Ausgabe-Adressbereich** genannt
- ▶ Verwendet z.B. bei älteren X86-Architekturen

1. Getrennter Adressbereich für Bus



- ▶ Häufig **Ein-/Ausgabe-Adressbereich** genannt
- ▶ Verwendet z.B. bei älteren X86-Architekturen
- ▶ Spezielle **Instruktionen** für Ein-/Ausgabe
- ▶ Interpretieren angegebene Adresse immer als **Busadresse**

1. Getrennter Adressbereich für Bus

- ▶ Häufig **Ein-/Ausgabe-Adressbereich** genannt
- ▶ Verwendet z.B. bei älteren X86-Architekturen
- ▶ Spezielle **Instruktionen** für Ein-/Ausgabe
- ▶ Interpretieren angegebene Adresse immer als **Busadresse**
- ▶ Beispiel: `outb %a1, 0x60`
 - ▶ **Schreibt** Inhalt des AL-Registers (1 Byte) an Busadresse 0x60

1. Getrennter Adressbereich für Bus

- ▶ Häufig **Ein-/Ausgabe-Adressbereich** genannt
- ▶ Verwendet z.B. bei älteren X86-Architekturen
- ▶ Spezielle **Instruktionen** für Ein-/Ausgabe
- ▶ Interpretieren angegebene Adresse immer als **Busadresse**
- ▶ Beispiel: `outb %a1, 0x60`
 - ▶ **Schreibt** Inhalt des AL-Registers (1 Byte) an Busadresse 0x60
- ▶ Beispiel: `inb 0x71, %a1`
 - ▶ **Liest** 1 Byte von Busadresse 0x71 in AL Register

1. Getrennter Adressbereich für Bus



- ▶ Häufig **Ein-/Ausgabe-Adressbereich** genannt
- ▶ Verwendet z.B. bei älteren X86-Architekturen
- ▶ Spezielle **Instruktionen** für Ein-/Ausgabe
- ▶ Interpretieren angegebene Adresse immer als **Busadresse**
- ▶ Beispiel: `outb %a1, 0x60`
 - ▶ **Schreibt** Inhalt des AL-Registers (1 Byte) an Busadresse 0x60
- ▶ Beispiel: `inb 0x71, %a1`
 - ▶ **Liest** 1 Byte von Busadresse 0x71 in AL Register
- ▶ Beispiele für die klassische **PC-Architektur**
 - ▶ **Tastatur** liegt auf 0x60 und 0x64
 - ▶ **1. Serielle Schnittstelle** liegt auf 0x3f8-3ff
 - ▶ **1. Festplatten-Controller** liegt auf 0x1f0-1f7 und 0x3f6-3f7

2. Gemeinsamer Adressbereich

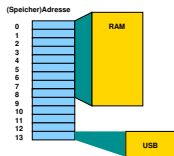
- ▶ **Nachteil** des getrennten Adressbereichs
 - ▶ **Zusätzliche** Instruktionen
 - ▶ Ungünstig, Instruktionsbits sind **rares Gut**

2. Gemeinsamer Adressbereich

- ▶ **Nachteil** des getrennten Adressbereichs
 - ▶ **Zusätzliche** Instruktionen
 - ▶ Ungünstig, Instruktionsbits sind **rares Gut**
- ▶ **Anderer Ansatz**: **Blende** Busadressen in **normalen** Adressraum ein: **memory mapped I/O**
 - ▶ So bei den meisten anderen Prozessoren
 - ▶ Auch bei X86 möglich, heute überwiegend verwendet

2. Gemeinsamer Adressbereich

- ▶ **Nachteil** des getrennten Adressbereichs
 - ▶ **Zusätzliche** Instruktionen
 - ▶ Ungünstig, Instruktionsbits sind **rares Gut**
- ▶ **Anderer Ansatz:** **Blende** Busadressen in **normalen** Adressraum ein: **memory mapped I/O**
 - ▶ So bei den meisten anderen Prozessoren
 - ▶ Auch bei X86 möglich, heute überwiegend verwendet
- ▶ Zugriff nun mit ganz normalen Lade/Speicherbefehlen
 - ▶ `lw $t0, 4`: Lade 32b Wort aus **RAM-Speicher**
 - ▶ `sb $t1, 13`: Gebe Byte auf **USB-Schnittstelle** aus





- ▶ Problem: Wie erkennen Busteilnehmer, ob sie **angesprochen** werden?
 - ▶ Also Target / Slave eines Zugriffs sind



- ▶ Problem: Wie erkennen Busteilnehmer, ob sie **angesprochen** werden?
 - ▶ Also Target / Slave eines Zugriffs sind
- ▶ Gängige Lösung
 - ▶ **Select**-Signal pro Teilnehmer
 - ▶ Wird **aktiviert**, wenn Teilnehmer vom Initiator/Master angesprochen wird

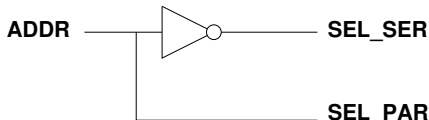


- ▶ Problem: Wie erkennen Busteilnehmer, ob sie **angesprochen** werden?
 - ▶ Also Target / Slave eines Zugriffs sind
- ▶ Gängige Lösung
 - ▶ **Select-Signal** pro Teilnehmer
 - ▶ Wird **aktiviert**, wenn Teilnehmer vom Initiator/Master angesprochen wird
- ▶ **Adressdekodierung** übersetzt Busadressen in Select-Signale
- ▶ Triviales Beispiel: Zwei Teilnehmer auf Bus
 - ▶ Auf Adressen 0 und 1

- ▶ Problem: Wie erkennen Busteilnehmer, ob sie **angesprochen** werden?
 - ▶ Also Target / Slave eines Zugriffs sind
- ▶ Gängige Lösung
 - ▶ **Select-Signal** pro Teilnehmer
 - ▶ Wird **aktiviert**, wenn Teilnehmer vom Initiator/Master angesprochen wird
- ▶ **Adressdekodierung** übersetzt Busadressen in Select-Signale
- ▶ Triviales Beispiel: Zwei Teilnehmer auf Bus
 - ▶ Auf Adressen 0 und 1

Adresse

0	
1	



Komplizierteres Szenario

Annahme: 64KB Adressraum



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
0x0000	0x1FFF	RAM 8KB
0x2000	0x23FF	Flash-Speicher 1KB
0xFE00	0xFFFF	Modem 512B

Wie realisierbar?

Komplizierteres Szenario

Annahme: 64KB Adressraum



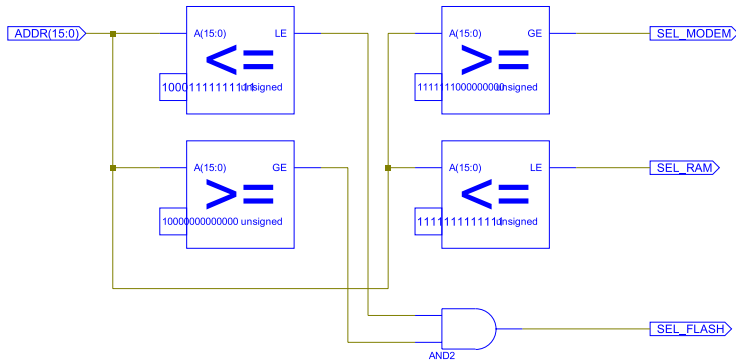
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
0x0000	0x1FFF	RAM 8KB
0x2000	0x23FF	Flash-Speicher 1KB
0xFE00	0xFFFF	Modem 512B

Wie realisierbar? Erster Versuch:

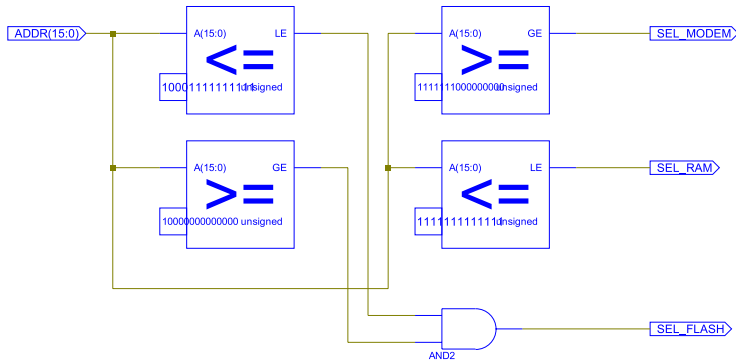
```
module decoder1 (  
  input [15:0] ADDR,  
  output      SEL_RAM, SEL_FLASH, SEL_MODEM  
);  
  
  assign SEL_RAM    = (ADDR >= 16'h0000 && ADDR <= 16'h1FFF);  
  assign SEL_FLASH  = (ADDR >= 16'h2000 && ADDR <= 16'h23FF);  
  assign SEL_MODEM  = (ADDR >= 16'hFE00 && ADDR <= 16'hFFFF);  
  
endmodule
```

Diskussion: Syntheseresultat



- ▶ Optimiert: Immerhin nur vier statt sechs Vergleicher

Diskussion: Syntheseresultat



- ▶ Optimiert: Immerhin nur vier statt sechs Vergleicher
- ▶ Jeder einzelne Vergleicher aber groß und langsam!



Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden
- ▶ Mit möglichst **wenigen** Bits!

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden
- ▶ Mit möglichst **wenigen** Bits!
- ▶ Beginne mit **höchstwertigen** (=linken) Bits

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden
- ▶ Mit möglichst **wenigen** Bits!
- ▶ Beginne mit **höchstwertigen** (=linken) Bits
 - ▶ Vermeide so falsche Erkennung von Adressbereichen

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden
- ▶ Mit möglichst **wenigen** Bits!
- ▶ Beginne mit **höchstwertigen** (=linken) Bits
 - ▶ Vermeide so falsche Erkennung von Adressbereichen
 - ▶ Gegenbeispiel: Verwende Bit 9, um Modem (=1) und Flash (=0) auseinanderzuhalten

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden
- ▶ Mit möglichst **wenigen** Bits!
- ▶ Beginne mit **höchstwertigen** (=linken) Bits
 - ▶ Vermeide so falsche Erkennung von Adressbereichen
 - ▶ Gegenbeispiel: Verwende Bit 9, um Modem (=1) und Flash (=0) auseinanderzuhalten
 - ▶ Klappt nicht: Bei Zugriff auf RAM kann Bit 9 **auch** 1 werden!



Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden
- ▶ Mit möglichst **wenigen** Bits!
- ▶ Beginne mit **höchstwertigen** (=linken) Bits
 - ▶ Vermeide so falsche Erkennung von Adressbereichen
 - ▶ Gegenbeispiel: Verwende Bit 9, um Modem (=1) und Flash (=0) auseinanderzuhalten
 - ▶ Klappt nicht: Bei Zugriff auf RAM kann Bit 9 **auch** 1 werden!
 - ▶ Bereiche dürfen sich **nicht** überlappen

Müssen wir immer **alle** Bits vergleichen?

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ **Nein**, versuche nur **Startadressen** eindeutig zu unterscheiden
- ▶ Mit möglichst **wenigen** Bits!
- ▶ Beginne mit **höchstwertigen** (=linken) Bits
 - ▶ Vermeide so falsche Erkennung von Adressbereichen
 - ▶ Gegenbeispiel: Verwende Bit 9, um Modem (=1) und Flash (=0) auseinanderzuhalten
 - ▶ Klappt nicht: Bei Zugriff auf RAM kann Bit 9 **auch** 1 werden!
 - ▶ Bereiche dürfen sich **nicht** überlappen
 - ▶ Niemals **gleichzeitig** mehr als ein Select-Signal aktiv

Nächster Versuch ...

Konstruiere **Entscheidungsbaum** von links nach rechts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ ADDR[15]==1 → Zugriff auf **Modem**

Nächster Versuch ...

Konstruiere **Entscheidungsbaum** von links nach rechts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ $ADDR[15]==1$ → Zugriff auf **Modem**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==0$ → Zugriff auf **RAM**

Nächster Versuch ...

Konstruiere **Entscheidungsbaum** von links nach rechts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ $ADDR[15]==1$ → Zugriff auf **Modem**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==0$ → Zugriff auf **RAM**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==1$ → Zugriff auf **Flash**

Nächster Versuch ...

Konstruiere **Entscheidungsbaum** von links nach rechts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ $ADDR[15]==1$ → Zugriff auf **Modem**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==0$ → Zugriff auf **RAM**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==1$ → Zugriff auf **Flash**

Nächster Versuch ...

Konstruiere **Entscheidungsbaum** von links nach rechts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ $ADDR[15]==1$ → Zugriff auf **Modem**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==0$ → Zugriff auf **RAM**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==1$ → Zugriff auf **Flash**

Diskussion

- ▶ Überlappungsfrei

Nächster Versuch ...

Konstruiere **Entscheidungsbaum** von links nach rechts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ $ADDR[15]==1$ → Zugriff auf **Modem**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==0$ → Zugriff auf **RAM**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==1$ → Zugriff auf **Flash**

Diskussion

- ▶ **Überlappungsfrei**
- ▶ Select-Signal wird korrekt 1 bei Zugriff auf **Startadresse** und folgende Adressen

Nächster Versuch ...

Konstruiere **Entscheidungsbaum** von links nach rechts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

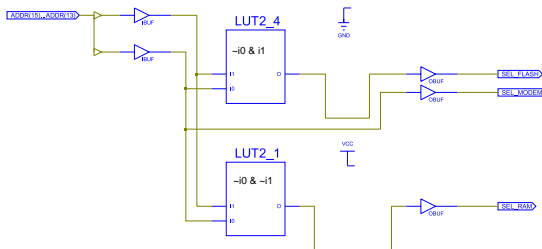
Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

- ▶ $ADDR[15]==1$ → Zugriff auf **Modem**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==0$ → Zugriff auf **RAM**
- ▶ $ADDR[15]==0 \ \&\& \ ADDR[13]==1$ → Zugriff auf **Flash**

Diskussion

- ▶ **Überlappungsfrei**
- ▶ Select-Signal wird korrekt 1 bei Zugriff auf **Startadresse** und folgende Adressen
- ▶ Aber was ist mit der **Endadresse**? → später!

```
module decoder2 (  
    input [15:0] ADDR,  
    output      SEL_RAM, SEL_FLASH, SEL_MODEM  
);  
  
assign SEL_RAM    = ~ADDR[15] & ~ADDR[13];  
assign SEL_FLASH = ~ADDR[15] & ADDR[13];  
assign SEL_MODEM = ADDR[15];  
  
endmodule
```



Dekodierung **innerhalb** eines Teilnehmers

Einfaches Beispiel 1KB Flash-ROM, organisiert als 1Kx8b



```
module rom1kx8 (  
  input      SELECT,  
  input [9:0] ADDR,  
  output [7:0] DATA  
);  
  
  reg [7:0] MEM [0:1023]  
  
  assign DATA = (SELECT) ? MEM[ADDR] : 8'bz;  
  
  initial begin          // einige Beispieldaten eintragen  
    MEM[0]   = 8'h42;  
    MEM[1]   = 8'h23;  
    ...  
    MEM[1022] = 8'h20;  
    MEM[1023] = 8'h07;  
  end  
  
endmodule
```

Dekodierung **innerhalb** eines Teilnehmers

Komplexeres Beispiel: Modem-Steuerregister



```
module modem (  
  input    CLOCK,  
  input    SELECT,  
  input [8:0] ADDR,  
  input    WRITE,  
  inout [7:0] DATA  
);  
  
reg [7:0] baudrate;  
reg [1:0] parity;  
reg [7:0] inchar, outchar;  
  
assign DATA = (~SELECT | WRITE) ? 8'bz :  
  ((ADDR==0) ? baudrate :  
  (ADDR==1) ? {6'b0,parity} :  
  (ADDR==2) ? inchar // <-- ADDR=2 liest Zeichen  
  : 8'h42);          // <-- Default-Wert für Debugging  
  
always @(posedge CLOCK) begin  
  if (SELECT & WRITE)  
    case (ADDR)  
      0 : baudrate <= DATA;  
      1 : parity   <= DATA[1:0];  
      2 : outchar  <= DATA;          // <-- ADDR=2 schreibt Zeichen  
    endcase  
end  
  
endmodule
```


Anschluss an Bus

Am Beispiel des 1KB Flash-ROMs

```
module mysystem;
...

wire [15:0] ADDR;
wire [7:0] DATA;
wire      SEL_RAM, SEL_FLASH, SEL_MODEM;

// Adressdecoder
decoder2 DECODER (ADDR, SEL_RAM, SEL_FLASH, SEL_MODEM);

// Flash-ROM
rom1kx8 FLASH (SEL_FLASH, ADDR[9:0], DATA);

...
endmodule
```

Verhalten des Flash-ROMs

Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabe- datum
---------------------------	-----------------	----------------------------	-------------------

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabe- datum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabe- datum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400				

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1			

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000		

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000	8'h42	Hinter Flash-Ende!

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000	8'h42	Hinter Flash-Ende!
16'h2401	1	10'h001	8'h23	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000	8'h42	Hinter Flash-Ende!
16'h2401	1	10'h001	8'h23	
16'h27FE	1	10'h3FE	8'h20	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000	8'h42	Hinter Flash-Ende!
16'h2401	1	10'h001	8'h23	
16'h27FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h27FF	1	10'h3FF	8'h07	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000	8'h42	Hinter Flash-Ende!
16'h2401	1	10'h001	8'h23	
16'h27FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h27FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2800	1	10'h000	8'h42	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000	8'h42	Hinter Flash-Ende!
16'h2401	1	10'h001	8'h23	
16'h27FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h27FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2800	1	10'h000	8'h42	
16'h2801	1	10'h001	8'h23	

Verhalten des Flash-ROMs



Startadresse	Endadresse	Teilnehmer
16'b0000_0000_0000_0000	16'b0001_1111_1111_1111	RAM 8KB
16'b0010_0000_0000_0000	16'b0010_0011_1111_1111	Flash-Speicher 1KB
16'b1111_1110_0000_0000	16'b1111_1111_1111_1111	Modem 512B

Zugriff auf Busadresse	Flash Select	Zugriff auf ROM-Adresse	Ausgabedatum	
16'h0000	0	10'h000	8'bz	Zugriff auf RAM-Bereich
16'hFE00	0	10'h200	8'bz	Zugriff auf Modem-Bereich
16'h2000	1	10'h000	8'h42	Zugriffe auf Flash-Bereich
16'h2001	1	10'h001	8'h23	
16'h23FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h23FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2400	1	10'h000	8'h42	Hinter Flash-Ende!
16'h2401	1	10'h001	8'h23	
16'h27FE	1	10'h3FE	8'h20	
16'h27FF	1	10'h3FF	8'h07	
16'h2800	1	10'h000	8'h42	
16'h2801	1	10'h001	8'h23	

...

➡ Der Flash-Bereich **wiederholt** sich!



- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich



- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten



- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**

- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**



- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX



- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX
 - ▶ Schreibzugriffe auf 80008008 werden **abgefangen**

- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX
 - ▶ Schreibzugriffe auf 80008008 werden **abgefangen**
 - ▶ Aber Fehler im **Adresdecoder** der Southbridge



- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX
 - ▶ Schreibzugriffe auf 80008008 werden **abgefangen**
 - ▶ Aber Fehler im **Adressdecoder** der Southbridge
 - ▶ Adressen sind auch **aliased** als 80008x08



- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX
 - ▶ Schreibzugriffe auf 80008008 werden **abgefangen**
 - ▶ Aber Fehler im **Adressdecoder** der Southbridge
 - ▶ Adressen sind auch **aliased** als 80008x08
 - ▶ Zugriffe **erlaubt** für $x \neq 0$

- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX
 - ▶ Schreibzugriffe auf 80008008 werden **abgefangen**
 - ▶ Aber Fehler im **Adressdecoder** der Southbridge
 - ▶ Adressen sind auch **aliased** als 80008x08
 - ▶ Zugriffe **erlaubt** für $x \neq 0$
 - ▶ So Zugriff auf “geheimen” **Boot-Code** möglich

- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX
 - ▶ Schreibzugriffe auf 80008008 werden **abgefangen**
 - ▶ Aber Fehler im **Adressdecoder** der Southbridge
 - ▶ Adressen sind auch **aliased** als 80008x08
 - ▶ Zugriffe **erlaubt** für $x \neq 0$
 - ▶ So Zugriff auf “geheimen” **Boot-Code** möglich
 - ▶ → “MIST Premature Unmap Attack ”

- ▶ Speicherbereich **wiederholt** sich
- ▶ Es sind aber immer die **gleichen** Daten
- ▶ Sichtbarkeit der gleichen *lokalen* Adressen an unterschiedlichen *Busadressen*: **Aliasing**
- ▶ Schadet in vielen Fällen **nicht**
 - ▶ Manchmal schon: **Hack** der Microsoft XBOX
 - ▶ Schreibzugriffe auf 80008008 werden **abgefangen**
 - ▶ Aber Fehler im **Adressdecoder** der Southbridge
 - ▶ Adressen sind auch **aliased** als 80008x08
 - ▶ Zugriffe **erlaubt** für $x \neq 0$
 - ▶ So Zugriff auf “geheimen” **Boot-Code** möglich
 - ▶ → “MIST Premature Unmap Attack ”
- ▶ Erlaubt aber sehr **einfache und schnelle** Adressdekodierung



- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden



- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt



- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt
- ▶ Adressbereiche müssen **überlappungsfrei** sein



- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt
- ▶ Adressbereiche müssen **überlappungsfrei** sein
- ▶ Gleichzeitig darf **maximal ein** Select-Signal aktiv sein



- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt
- ▶ Adressbereiche müssen **überlappungsfrei** sein
- ▶ Gleichzeitig darf **maximal ein** Select-Signal aktiv sein
- ▶ Erstelle Adressdekodierlogik durch Aufbau eines **Entscheidungsbaumes**

- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt
- ▶ Adressbereiche müssen **überlappungsfrei** sein
- ▶ Gleichzeitig darf **maximal ein** Select-Signal aktiv sein
- ▶ Erstelle Adressdekodierlogik durch Aufbau eines **Entscheidungsbaumes**
 - ▶ Von höherwertigen zu niederwertigen Adressbits

- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt
- ▶ Adressbereiche müssen **überlappungsfrei** sein
- ▶ Gleichzeitig darf **maximal ein** Select-Signal aktiv sein
- ▶ Erstelle Adressdekodierlogik durch Aufbau eines **Entscheidungsbaumes**
 - ▶ Von höherwertigen zu niederwertigen Adressbits
 - ▶ Erfülle Anforderungen dabei durch Auswertung von möglichst **wenigen** Adressbits



- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt
- ▶ Adressbereiche müssen **überlappungsfrei** sein
- ▶ Gleichzeitig darf **maximal ein** Select-Signal aktiv sein
- ▶ Erstelle Adressdekodierlogik durch Aufbau eines **Entscheidungsbaumes**
 - ▶ Von höherwertigen zu niederwertigen Adressbits
 - ▶ Erfülle Anforderungen dabei durch Auswertung von möglichst **wenigen** Adressbits
- ▶ Dabei **darf** derselbe Adressbereich i.d.R. mehrfach auftauchen (aliasing)

- ▶ Zeige Busteilnehmern durch **Select-Signal** an, wenn sie angesprochen werden
- ▶ Select-Signale werden aus **Busadressen** erzeugt
- ▶ Adressbereiche müssen **überlappungsfrei** sein
- ▶ Gleichzeitig darf **maximal ein** Select-Signal aktiv sein
- ▶ Erstelle Adressdekodierlogik durch Aufbau eines **Entscheidungsbaumes**
 - ▶ Von höherwertigen zu niederwertigen Adressbits
 - ▶ Erfülle Anforderungen dabei durch Auswertung von möglichst **wenigen** Adressbits
- ▶ Dabei **darf** derselbe Adressbereich i.d.R. mehrfach auftauchen (aliasing)
- ▶ Er **muß** aber mindestens an den spezifizierten Adressen erreichbar sein



Zusammenfassung



- ▶ DISCOUNT ist **software-ferne** Anwendung
- ▶ Demonstriert diverse Techniken
- ▶ Applikations-spezifische **Constraints**
- ▶ Hier: Minimale **Taktfrequenz** durch Auflösung vorgegeben
- ▶ Verwendung von **technologiespezifischen** Blöcken
- ▶ Hier: **Xilinx** ROM-Block
- ▶ **Optimierung** der Schaltung
- ▶ Jenseits der Fähigkeiten des **Logiksynthesewerkzeugs**
- ▶ Methoden der **High-Level-Synthese**
- ▶ Hier: **Vorziehen** von Berechnungen über Taktgrenzen
- ▶ Speicher
- ▶ Takterzeugung
- ▶ Adressdekodierung