



A. Koch

Eingebettete Prozessorarchitekturen

12. Programmierung Adaptiver Computer

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Wintersemester 2007/2008



A. Koch

Verilog



- Hardware-Beschreibungssprache
- Auszugsweise bereits behandelt in
 - Technische Grundlagen der Informatik II
 - Kanonik Computer Microsystems
- Erlaubt
 - Präzise Beschreibung von Hardware
 - Unterschiedlichste Berechnungsmodelle
 - Datenfluß
 - Endliche Automaten
 - Zeitliche Verteilung von Berechnungen
 - ...
 - Benutzung
 - **Simulation** ohne konkrete Hardware
 - **Synthese** von Hardware
- Hier nur **auszugsweise** Wiederholung einiger Sprachelemente

Einige Verilog-Sprachelemente



A. Koch

- Hierarchische Beschreibung
 - Aufteilen einer Schaltung in Unter**module**
 - Schnittstellen zwischen Modulen
- Parallele Abläufe
 - Reale Verarbeitung erfolgt i.d.R. **parallel**
 - Simuliert in **zufälliger** Reihenfolge
 - Jede Reihenfolge muß **explizit** formuliert werden
- Weitere Eigenschaften: Modellierung von
 - Zeitpunkten und -intervallen
 - Elektrischen Eigenschaften
 - ...

➡ Hier **nicht** behandelt

Verwende Verilog als **parallele Programmiersprache** für ACS.

Beispiel: Triviales Verilog-Modul



A. Koch

```
// Schnittstelle
module somelogic(x,y,a,b,c);
  input  [7:0] a, b, c;
  output [7:0] x, y;

  // Deklaration mit Zwischenberechnung
  wire  [7:0] temp = 8'd42 ^ c;

  assign y = (a & b) | temp;
  assign x = (a ^ b) | ~temp;
endmodule
```

- Modulkopf
- Schnittstellenbeschreibung
 - Angabe von Bit-Breiten
- **Parallele** Berechnungen
 - Im Simulator in
 - zufälliger Reihenfolge ausgeführt

Sequentielle Ausführung



- Zufällige Abarbeitungsreihenfolge störend
- Inseln pseudo-sequentieller Abarbeitung durch **Blöcke**

A. Koch

```
module somecalc(x,y,a,b,c);
  input  [7:0] a, b, c;
  output [7:0] x, y;
  reg [7:0] x, y; // Variablen für Block
  // wann soll Block ablaufen?
  always @(a or b or c) begin
    if (c) begin
      x = a+10;
      y = x+b;
    end else begin
      x = a-10;
      y = x-b;
    end
  end
endmodule
```

- **Sensitivity List** startet Blockausführung
 - Hier: **Änderungen** der Signale **a**, **b** oder **c**
- Zuweisungsziele in sequentielltem Block
 - Mit **reg** als **Register** deklarieren
- Anweisungen innerhalb von Block laufen **sequentiell** ab

Parallelität **innerhalb** von Blöcken



A. Koch

- Hardware rechnet parallel
- Daher in der Regel schneller als sequentielle Software
- Viele Feinheiten der Parallelität beschreibbar
- Nützlich auch **innerhalb** von Blöcken
 - **Getrenntes** Lesen und Schreiben von Variablen durch Zuweisung mit `<=` (*non-blocking assignment*)
- Erst die **rechten** Seiten aller `<=` lesen
 - In der Reihenfolge ihres Auftretens im Block
 - Damit weiterrechnen
- Erst am Ende des Blockes **linke** Seiten von `<=` schreiben
 - Mit den im Laufe des Blockes berechneten Werten
- Effekt: Solche Zuweisungen laufen **parallel** ab

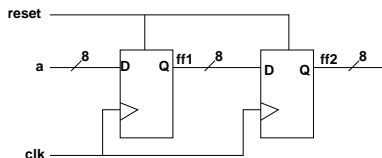
➡ Wofür gut? Kommt gleich . . .

Getaktete Blöcke



- Alle Blöcke laufen **parallel** zueinander ab
 - In Hardware **echt** parallel
 - In der Simulation in **zufälliger** Reihenfolge
- Inter-Block Koordination mittels **Takt**

A. Koch



```
module ff2(ff2, a, clk, reset);
  input  [7:0] a;
  input          clk, reset;
  output [7:0] ff2;
  reg [7:0] ff1, ff2;
  always @(posedge clk) begin
    if (reset) begin
      ff1 <= 0; ff2 <= 0;
    end else begin
      ff1 <= a;
      ff2 <= ff1;
    end
  end
endmodule
```

- Beachte **parallele** Zuweisungen (<=)
 - Reset und eigentlicher Schieberegister



A. Koch

Kommunikation mit der RCU

Kommunikation mit der RCU



A. Koch

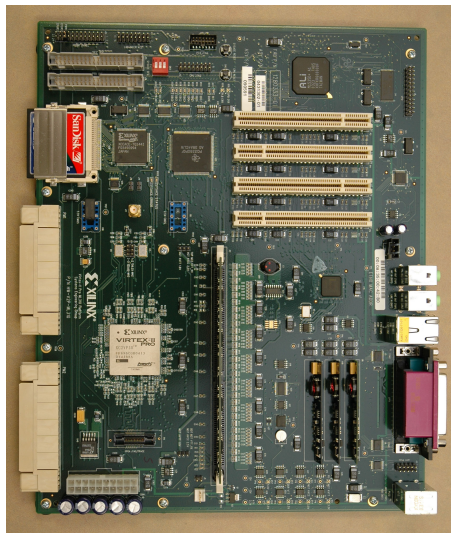
- Einfach bei
 - Rekonfigurierbare Funktionseinheit
 - Rekonfigurierbarem Koprozessor
- Hier in der Regel spezielle Prozessorbefehle vorhanden
 - Tensilica Xtensa LX, Stretch S5000
- Loser integrierte RCUs werden häufig in den Speicher eingebündelt
 - *memory mapped*
 - Lese und Schreibzugriffe der CPU betreffen nicht den Hauptspeicher
 - Sondern landen auf der RCU
 - **Akzeptieren** von Daten beim Schreiben
 - **Generieren** von Daten beim Lesen

Beispiel: ML310 Entwicklungsplattform

PC-artige Grundarchitektur



A. Koch



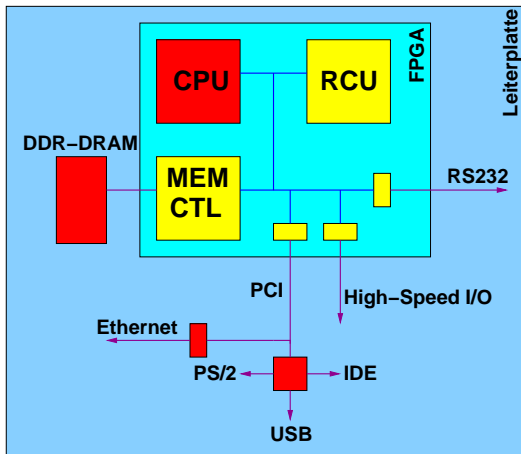
- Xilinx Virtex II Pro FPGA
- Zwei PowerPC-Prozessoren On-Chip
- 256MB DDR-DRAM
- Viele Schnittstellen
- Betrieb unter Linux

ML310 als ACS: Architektur

Feste Hardware in Rot, rekonfigurierbare Hardware in Gelb



A. Koch

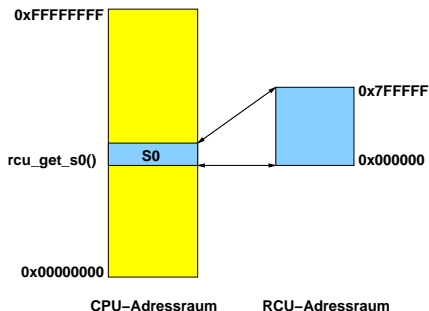


- "Herz" des Systems rekonfigurierbar
- RCU als Koprozessor mit CPU auf einem Chip

Memory-Mapped RCU



A. Koch



- Basisadresse der RCU mit `rcu_get_s0()` abrufen
- Zugriffe in diesen Speicherbereich landen auf RCU
 - Fangen dort bei RCU-Adresse 0 an
 - Annahme hier: RCU Bereich hat 8MB, als 2M x 32b Worte adressierbar

Kommunikation im Slave-Mode



A. Koch

- CPU füttert RCU mit Daten und Kontrollinformationen
- RCU rechnet
- CPU holt Ergebnisse von RCU ab
- RCU agiert als **Sklave** im System
- Einfach zu realisieren, aber langsam

Slave-Mode Schnittstelle im ML310 ACS



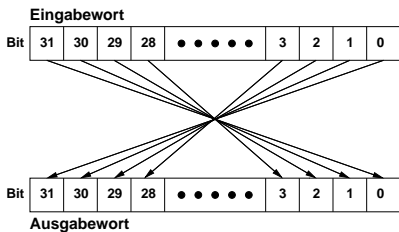
A. Koch

- input **CLK**
 - Taktsignal
- input **RESET**
 - Bei 1: Alle internen Register auf Startwerte setzen
- input **ADDRESSED**
 - Bei 1: Ein Zugriff von aussen auf die RCU erfolgt
- input **WRITE**
 - Bei 1: Schreibzugriff von aussen, Daten liegen an RCU an
 - Bei 0: Lesezugriff, Daten aus der RCU nach aussen geben
- input **DATAIN**
 - Bei Schreibzugriff von hier Daten übernehmen
- input **ADDRESS**
 - Zugegriffene Adresse innerhalb des RCU-Bereiches
- output **DATAOUT**
 - Bei Lesezugriff hier Daten anlegen

Beispiel: Bit-Reihenfolge in 32b Wort verdrehen



A. Koch



- Eingaben

- Startadresse eines Eingabe-Arrays aus 32b Worten
- Startadresse eines Ausgabe-Arrays aus 32b Worten
- Anzahl der 32b Worte

- Ausgabe

- In Ausgabe-Array die verdrehten Datenworte

Slave-RCU in Verilog

Schnittstelle zum Restsystem



```
module user(  
    CLK,          // Systemtakt  
    RESET,       // systemweiter Reset  
    ADDRESSED,   // High, wenn RCU von CPU angesprochen wird  
    WRITE,       // High, wenn CPU auf RCU schreiben will  
    DATAIN,     // Von der CPU auf die RCU geschriebene Daten  
    DATAOUT,    // Von der CPU aus der RCU gelesene Daten  
    ADDRESS      // Adresse des Zugriffs (hier ignoriert)  
);  
  
// Eingänge  
input      CLK;  
input      RESET;  
input      ADDRESSED;  
input      WRITE;  
input [31:0] DATAIN;  
input [23:2] ADDRESS;  
  
// Ausgänge  
output [31:0] DATAOUT;
```

A. Koch

Slave-RCU in Verilog

Kern der Anwendung



```
reg [31:0] result;           // Ergebnisregister
reg [31:0] reversed;        // Zwischenergebnis

// Gebe immer (unabhängig von der Adresse) das Ergebnisregister aus
assign DATAOUT = result;

// Berechne als Zwischenergebnis immer die
// bitverdrehte Reihenfolgen des Dateneingangs
// Beachte: Dies ist ein kombinatorischer Block!
always @(DATAIN) begin: comb_block
    integer n;
    for (n=0; n < 32; n = n + 1) begin
        reversed[n] = DATAIN[31-n];
    end
end

// Steuerung
always @(posedge CLK or posedge RESET) begin
    // Initialisiere Ergebnis auf magic number für Debugging
    if (RESET) begin
        result <= 32'hDEADBEEF;
    // Schreibzugriff auf RC, neu berechnetes Zwischenergebnis übernehmen
    end else if ( ADDRESSSED & WRITE) begin
        result <= reversed;
    end
end

endmodule
```

A. Koch

Programm zur Benutzung der Slave-RCU

Kernteil ohne Initialisierung und Deinitialisierung



A. Koch

```
// Lese komplette Eingabedatei in Eingabe-Speicherbereich  
fread(inwords, sizeof(unsigned long), NUM_WORDS, infile);
```

```
// RCU initialisieren  
rcu_init ();
```

```
// Zeiger auf RC-Adressraum holen  
rcu = rcu_get_s0(NULL);
```

```
// Bearbeite Daten  
for (m=0; m < NUM_WORDS; ++m) {  
    // Übertrage das Eingabedatenwort an die RCU  
    rcu[0] = inwords[m];  
    // Hole das Ergebnis von der RCU in Ausgabefeld ein  
    outwords[m] = rcu[0];  
}
```

```
// Schreibe das komplette Ausgabefeld in die Ausgabedatei  
fwrite (outwords, sizeof(unsigned long), NUM_WORDS, outfile);
```



A. Koch

Demo



A. Koch

Master-Mode



- Funktioniert zwar
- Aber recht langsam
- Bus wird nicht effizient ausgenutzt
- Immer nur ein 32b Wort von/nach CPU übertragen
- Dazwischen längere Pausen

➡ Besser: **Master-Mode**

Master-Mode



A. Koch

- Erwartet nur **Kommandos** und **Parameter** im Slave-Mode
- Nicht mehr die **Daten** selbst
- Arbeitet nach Startkommando unabhängig von CPU
- Signalisiert CPU später das Ende der Berechnung
- Problem: Master-Mode-Protokolle nicht trivial!

➡ Abstrahieren und wiederverwendbare Lösung finden



A. Koch

Abstrakte Datenströme mit MARC

Idee von MARC

Memory Architecture for Reconfigurable Computers



A. Koch

- Abstrahiert echte ACS-Hardware
- Eigentliche Anwendung bleibt portabel
 - ACE-V ACS
 - ML310 ACS (aber \gg 18x schneller!)
- Charakterisiert **logische** Zugriffsmuster
 - Irregulär: Z.B. Durchlauf von verketteter Liste
 - Regulär: Z.B. Durchlauf durch Array
- Hier: Reguläre Zugriffe mit **Datenströmen** (*streams*)

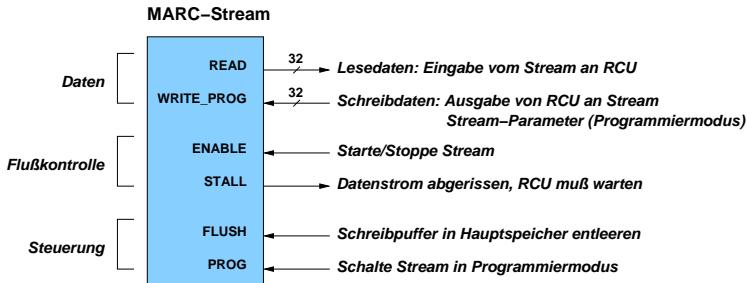


- Laufen über einen Speicherbereich
 - Liefern Daten an RCU (Lese-Strom)
 - Akzeptieren Daten von RCU (Schreib-Strom)
- Parameter
 - **Startadresse**
 - **Anzahl Datensätze** -1
 - **Schrittweite** (übersprungene Datensätze)
 - **Breite der Zugriffe** (8b/16b/32b)
 - **Lesen** oder **Schreiben**
- Signalisieren **Unterbrechungen** (*stalls*) im Datenstrom
 - RCU muss reagieren
 - Beim **Lesen**: Warten, bis wieder Daten verfügbar sind
 - Beim **Schreiben**: Anhalten und Datum puffern, bis Strom weiterfließt
- Problem: Gekoppelte Ströme

Schnittstelle zu MARC-Stream



A. Koch



Reihenfolge der Parameter im Programmiermodus

Startadresse

Anzahl Datensätze

Schrittweite

Breite der Zugriffe (8b/16b/32b)

Zugriffsart (Lesen/Schreiben)

Flußsteuerung mit **ENABLE**-Eingang

Kommando wird **vor** positiver Taktflanke angelegt



A. Koch

Beim Lesen

- **1**: RCU will zur **übernächsten** Flanke ein neues Datum übernehmen
- **0**: Stream anhalten, an **übernächster** Flanke kein Datum übernehmen

Beim Schreiben

- **1**: RCU hat gültiges Datum berechnet, das zur **nächsten** Flanke in Strom übernommen werden soll.
- **0**: RCU hat für die **nächste** Flanke noch kein gültiges Datum, Strom soll warten

Flußsteuerung mit `STALL`-Ausgang

Zeigt durch '1' eine Unterbrechung im Datenfluß an



A. Koch

Beim Lesen

- Daten vom Strom nur in RCU übernehmen, wenn zur **vorherigen** positiven Taktflanke `STALL=0` ist
- Bei `STALL=1` auf Daten warten

Beim Schreiben

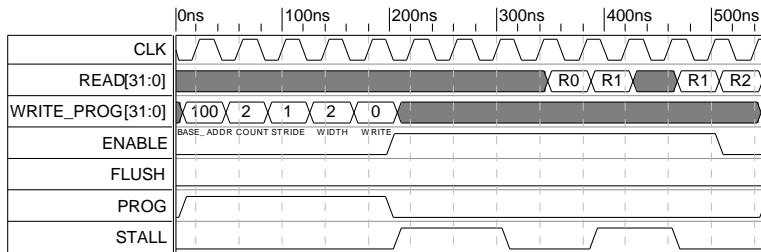
- Strom übernimmt Daten nur, wenn zur **selben** positiven Taktflanke `STALL=0` ist
- Bei `STALL=1` Schreibdatum stabil halten und auf Ende der Unterbrechung warten

Lesestrom

Programmierung und Behandlung von Unterbrechung



A. Koch



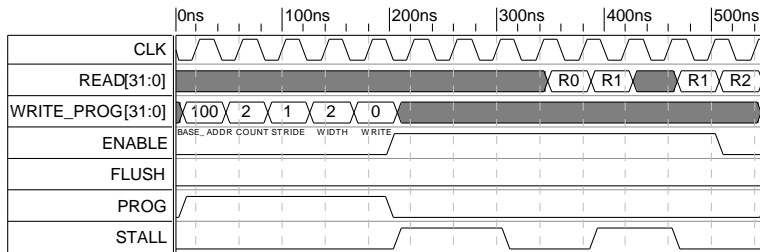
1 Takt **Versatz** zwischen Steuersignalen und Daten

Schreibstrom

Programmierung und Behandlung von Unterbrechung



A. Koch



Kein Versatz zwischen Steuersignalen und Daten

Synchronisation von Datenströmen

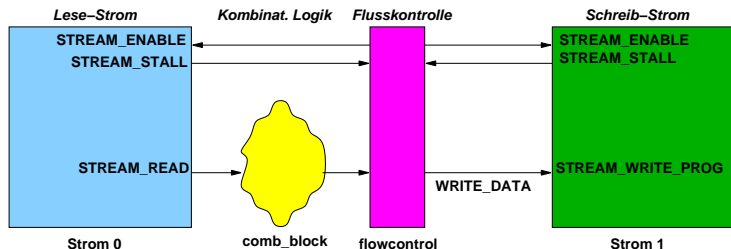


A. Koch

- Abrisse
 - **Lesestrom** hat temporär keine Daten verfügbar
 - **Schreibstrom** kann temporär keine Daten aufnehmen
- Jeweils anderer Strom muss **angehalten** werden
- Beim **Schreibstrom** zusätzlich
 - Letztes Datum **zwischenspeichern**
 - Leseströme reagieren mit 1 Takt Verzögerung auf Kommandos
 - Dieses Datum auffangen
 - Gespeichertes Datum beim Wiederanfahren des Schreibstroms übergeben

Struktur einer RCU mit zwei Strömen

Lesestrom gekoppelt mit Schreibstrom



A. Koch

- Berechnung als **kombinatorische** Logik
 - Arbeitet innerhalb **1** Takt
- Flußkontrolle synchronisiert Ströme und puffert Daten
- Bei komplizierterer **sequentieller** Berechnung
 - Steuersignale verzögern
 - Berechnung anhalten
 - Falls nicht möglich: Mehr Daten puffern



A. Koch

Programmbeispiel Master-Mode-RCU

Schnittstelle der Master-Mode-RCU

Erweitert Slave-Schnittstelle um MARC-Signale



A. Koch

```
'include "marcdefs.v"

module user (

    STREAM_READ,    // Read-Datenbus
    STREAM_WRITE_PROG, // Write-Programm-Datenbus
    STREAM_STALL,   // Stall-Signale
    STREAM_ENABLE,  // Start/Stop für Streams
    STREAM_FLUSH,   // Schreib-Streams entleeren
    STREAM_PROG     // Programmiermodus einschalten

// Deklarationen für Stream-Schnittstelle
input ['STREAM_DATA_BUS] STREAM_READ;
input ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_STALL;
output ['STREAM_DATA_BUS] STREAM_WRITE_PROG;
output ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_ENABLE;
output ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_FLUSH;
output ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_PROG;
wire ['STREAM_DATA_BUS] STREAM_READ;
wire ['STREAM_DATA_BUS] STREAM_WRITE_PROG;
wire ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_STALL;
wire ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_ENABLE;
reg ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_FLUSH;
reg ['STREAM_CNTL_BUS] STREAM_PROG;
```

Slave-Mode-Schnittstelle

Zum Übertragen von Kommandos und Parametern



```
// Abkürzung für Registernummer 0 ... 15
wire [3:0]  REGNUM = ADDRESS[5:2];

// Gebe immer das gerade adressierte Register aus.
// Nicht benötigte Register geben eine Magic-Number
// und den aktuellen IRQ-Status im MSB zurück
wire [31:0] DATAOUT =
    (REGNUM == 4'h0) ? SOURCEADDR
    : (REGNUM == 4'h1) ? DESTADDR
    : (REGNUM == 4'h2) ? COUNT
    : (32'h00C0FFEE | (IRQSTATE << 31));

// Controller FSM überwacht gesamte Anwendung
always @(posedge CLK or posedge RESET) begin
    // Initialisiere Register bei chip-weitem Reset
    if (RESET) begin
    end else if (ADDRESSED & WRITE) begin
    // Schreibzugriff auf RCU, schreibe in entsprechendes Register
    case (REGNUM)
        0: SOURCEADDR <= DATAIN;
        1: DESTADDR <= DATAIN;
        2: COUNT <= DATAIN;
        3: begin
            START <= 1; // Startkommando, beginne Ausführung
        end
    default ;
    endcase
```

A. Koch

1. Betriebsphase: Programmieren der Ströme



A. Koch

```
end else begin
// CPU hat Berechnung gestartet, keine Slave-Mode Zugriffe mehr möglich
if (START) begin
case (STATE)
'STATE_PROG.START:
begin
// Beide Streams in Programmiermodus schalten
STREAM_PROG[1:0] <= 2'b11;
// Anfangsadresse für Stream 0 schreiben
STREAM_PROGDATA_0 <= SOURCEADDR;
// Anfangsadresse für Stream 1 schreiben
STREAM_PROGDATA_1 <= DESTADDR;
// FSM weitersetzen
STATE <= 'STATE_PROG.COUNT;
end
'STATE_PROG.COUNT:
begin
// Anzahl Datensätze - 1 eintragen (bei beiden Streams gleich)
STREAM_PROGDATA_0 <= COUNT - 1;
STREAM_PROGDATA_1 <= COUNT - 1;
// FSM weitersetzen
STATE <= 'STATE_PROG.STEP;
end
end
```

Analog weiter für Schrittweite, Zugriffsbreite, Betriebsart
(Lesen/Schreiben)

2. Betriebsphase: Fließende Datenströme

Während der eigentlichen Berechnung



A. Koch

```
'STATE_COMPUTE:
  begin
    // Programmiermodus für beide Streams abschalten
    STREAM_PROG[1:0] <= 0;
    // Beide Streams starten (via flowcontrol-Modul)
    STREAMSTART <= 1;

    // Alle Datensätze bearbeitet?
    if (COUNT == 0) begin
      // Dann beide Streams stoppen
      STREAMSTART <= 0;
      // Falls Schreib-Stream fertig
      if (!STREAM_STALL[1]) begin
        // alle noch gepufferten Daten wirklich schreiben
        STREAM_FLUSH[1] <= 1;
        // FSM weitersetzen
        STATE <= 'STATE_SHUTDOWN;
      end
    end else if (STREAM_ENABLE[0] & ~STREAM_STALL[0])
      // Nur dann einen Datensatz als bearbeitet zählen,
      // wenn Stream 0 aktiv liest (ENABLE) und nicht hängt (!STALL)
      COUNT <= COUNT - 1;
  end
```

3. Betriebsphase: Herunterfahren der Ströme



A. Koch

```
'STATE_SHUTDOWN:
  begin
    // Ist Schreibpuffer schon komplett geleert?
    if (!STREAM_STALL[1]) begin
      // ja, Leerung beenden
      STREAM_FLUSH[1] <= 0;
      // CPU durch IRQ Fertigwerden der RC anzeigen
      IRQSTATE <= 1;
      // FSM stoppen (RC jetzt wieder im Slave-Mode)
      START <= 0;
      // FSM auf Startzustand zurücksetzen
      STATE <= 'STATE_PROG_START;
    end
  end
  // Dieser Fall sollte nicht auftreten, nur für Logikoptimierung
  default: STATE <= 'bx;
endcase
```

Verbinden der Datenströme



A. Koch

```
// Streams laufen, nachdem sie gestartet worden sind und solange
// noch Daten zu bearbeiten sind.
wire RUNNING = STREAMSTART & (COUNT != 0);

// Flußkontrolle zwischen Ein- und Ausgabe-Streams
flowcontrol FC (
    CLK,           // Takt
    RUNNING,       // Streams laufen lassen?
    STREAM.STALL[0], // Hängt Stream 0 (Eingabe-Stream)?
    STREAM.STALL[1], // Hängt Stream 1 (Ausgabe-Stream)?
    REVERSED,      // Von Anwendung zu schreibende Daten
    STREAM.ENABLE[0], // Stream 0 starten oder anhalten
    STREAM.ENABLE[1], // Stream 1 starten oder anhalten
    WRITE_DATA     // Eingangsdaten für Ausgabe-Stream
);

// Schalte Streams zwischen Programmier- und Datenbetrieb um
// Stream0 ist Lese-Stream, sein Eingang kann immer im Programmierbetrieb sein
assign STREAM_WRITE_PROG[STREAM_0] = STREAM_PROGDATA_0;

// Stream1 ist Schreib-Stream, hier muß der Eingang umgeschaltet werden
assign STREAM_WRITE_PROG[STREAM_1] =
    (STREAM_PROG[1])
    ? STREAM_PROGDATA_1
    : WRITE_DATA;
```


Eigentliche Berechnung



A. Koch

```
// Berechne als Zwischenergebnis immer die
// bitverdrehte Reihenfolges das Lese-Datenstromes 0
// Beachte: Dies ist ein kombinatorischer Block!
always @(STREAM_READ[31:0]) begin: comb_block
  integer n;
  for (n=0; n < 32; n = n + 1) begin
    REVERSED[n] = STREAM_READ[31-n];
  end
end
```

Programm zur Benutzung der Master-RCU: Initialisierung



A. Koch

```
// RC initialisieren
rcu_init ();

// Zeiger auf S0-Bereich mit RC-Registern holen
rcu = rcu_get.s0(NULL);

// fordere Speicher für Ein- und Ausgabefelder an
// Platz für Ausgabe liegt direkt hinter Eingabefeld
// *_phys zeigt auf die physikalische Speicheradresse
// aus Sicht der Hardware
inwords = acev_malloc_master(2 * NUM_WORDS * sizeof(unsigned long),
                             (void **) &inwords_phys);
outwords = inwords + NUM_WORDS;
outwords_phys = inwords_phys + NUM_WORDS;

if (!inwords || !inwords_phys) {
    fprintf (stderr, "out_of_memory\n");
    exit (1);
}

// Funktioniert der Slave Zugriff?
printf ("Magic:_%x\n", rc[28]);
```

Programm zur Benutzung der Master-RCU: Start und Ende



A. Koch

```
// Lese komplette Eingabedatei in Eingabe-Speicherbereich
fread(inwords, sizeof(unsigned long), NUM.WORDS, infile);

// Übertrage Parameter an RCU (nicht die Daten selbst)
rc[REG_SOURCE_ADDR] = inwords_phys; // Physikalische(!) Startadresse
rc[REG_DEST_ADDR] = outwords_phys; // Physikalische(!) Zieladresse
rc[REG_COUNT] = NUM.WORDS; // Anzahl Datensätze
rc[REG_START] = 1; // Startkommando für RC

// Warte auf Ende der Berechnung (wird über IRQ angezeigt)
rcu.wait ();

// Schreibe das komplette Ausgabefeld in die Ausgabedatei
fwrite (outwords, sizeof(unsigned long), NUM.WORDS, outfile);
```

Rechenleistung



A. Koch

Lösung	Taktfreq. in MHz	RCU-Größe in Slices	Rechenzeit in μ s	Schneller als SW um
Software	300 (CPU)		195942	1.00
Slave-RCU	100 (RCU)	45	32045	6.11
Master-RCU	100 (RCU)	981	5813	33.71

Ziel-RCU: Virtex-IIpro FPGA, 4 LUTs pro Slice



A. Koch

Zusammenfassung



- Grundlagen Verilog
 - Kommunikation der RCU mit Restsystem
 - Slave-Mode
 - Master-Mode
 - Beispielanwendung: Bit-Reihenfolge verdrehen
 - Datenströme mit MARC
 - Flußsteuerung und Synchronisation
- ➔ Detailliertere Erklärung in **Teilskript** auf Web-Seite