



Entwurf digitaler Schaltungen

Foliensatz 6: Rechnerstrukturen

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (EDS_F6)

22. Juli 2020



Inhalt F6: Rechnerstrukturen

CORDIC

- 1.1 Algorithmus
- 1.2 Simulation des Algorithmus
- 1.3 Umstellung auf Festkommazahlen
- 1.4 Entwurf als Rechenwerk
- 1.5 Testrahmen

MiPro

- 2.1 Funktion und Befehlssatz
- 2.2 Assembler und Disassembler
- 2.3 Prozessorzustand
- 2.4 Simulationsmodell
- 2.5 Testrahmen
- 2.6 Testbeispiele

RISC-Prozessor

- 3.1 Pipeline-Verarbeitung
- 3.2 Pipeline-Auslastung
- 3.3 Simulationsmodell
- 3.4 Testbeispiele



Der Foliensatz behandelt 3 Beispielenwürfe

Anwendungsspezifisches Rechenwerk für Winkelfunktionen:

- Algorithmus und Optimierung mit Gleitkommaoperationen.
- Package mit algorithmenspez. Datentypen, Operationen, ...
- Ersatz der Gleitkomma- durch Festkommaoperationen.
- Operationsablauf. Simulationsmodell für die Synthese, ...

Minimalprozessor »MiPro« aus »Rechnerarchitektur«:

- Package mit algorithmenspezifischen Datentypen, ...
- Assembler, Disassembler, ... in VHDL.
- Simulationsmodell, Testrahmen und Testbeispiele.

Erweiterung des Minimalprozessors zu einem RISC-Prozessor:

- Pipeline-Erweiterung.
- Simulationsmodell, Testbeispiele.



Lernziele und Anmerkungen

Der Hauptaufwand des modernen Schaltungsentwurfs entfällt auf Simulation, Test und Fehlerbeseitigung.

Die nachfolgenden Simulationen nutzen wieder die klassische »printf-Technik«¹. Dafür werden entsprechende Packages programmiert.

Im Gegensatz zu Software ist für Hardware Optimierung wichtig. Minimierung der Schaltungsgröße, des Stromverbrauchs, ...

Das größte Optimierungspotenzial steckt im Algorithmus.

Suche eines Algorithmus mit minimaler Anzahl von Rechenschritten, Rechenwerken, ...

¹Wie bereits auf Foliensatz 2 für Anweisungen und auf Foliensatz 4 für Operationsabläufe.



CORDIC



Algorithmen für Sinus und Kosinus

Taylor-Reihen:

$$\sin(\phi) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\phi^{2n+1}}{(2n+1)!}$$

$$\cos(\phi) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\phi^{2n}}{(2n)!}$$

- Mehrere Multiplikationen je Summationsschritt.
- Erforderliche Anzahl der Summationsschritte hängt von ϕ ab.

CORDIC:

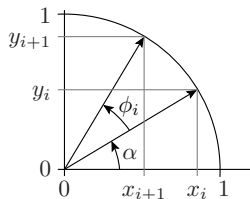
- Drei Additionen/Subtraktionen je Berechnungsschritt.
- Erforderliche Anzahl der Berechnungsschritte ist etwa Anzahl der Nachkommabits des Ergebnisses und damit konstant.



Algorithmus

Mathematische Grundlage

Rotation eines Vektors in einem Koordinatensystem:

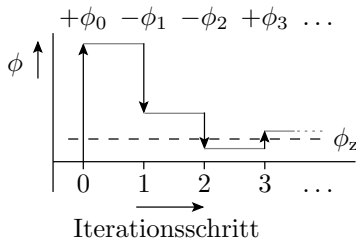
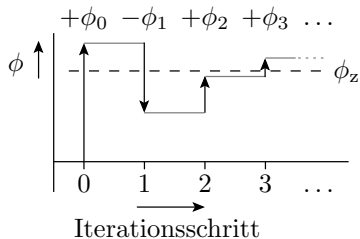


$$\begin{aligned}
 x_i &= \cos(\alpha) \\
 y_i &= \sin(\alpha) \\
 x_{i+1} &= \cos(\alpha + \phi_i) = \cos(\alpha) \cdot \cos(\phi_i) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\phi_i) \\
 &= x_i \cdot \cos(\phi_i) - y_i \cdot \sin(\phi_i) \\
 y_{i+1} &= \sin(\alpha + \phi_i) = \cos(\alpha) \cdot \sin(\phi_i) + \sin(\alpha) \cdot \cos(\phi_i) \\
 &= x_i \cdot \sin(\phi_i) + y_i \cdot \cos(\phi_i)
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi_i) & -\sin(\phi_i) \\ \sin(\phi_i) & \cos(\phi_i) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$$

Beim CORDIC-Algorithmus wird der Drehwinkel aus einer festen Anzahl konstanter Winkelschritte abnehmender Größe zusammengesetzt und schrittweise der zugehörige Sinus- und Kosinus-Wert berechnet.

In jedem Schritt nächst kleinere Winkelkonstante addieren oder subtrahieren. Iterationsziel: Annäherung der Winkelsumme an den Vorgabewert ϕ_z :



Zu jeder Winkeladd./-sub. gehört eine Matrixmultiplikation

$$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\pm\phi_{n-1}) & -\sin(\pm\phi_{n-1}) \\ \sin(\pm\phi_{n-1}) & \cos(\pm\phi_{n-1}) \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} \cos(\pm\phi_0) & -\sin(\pm\phi_0) \\ \sin(\pm\phi_0) & \cos(\pm\phi_0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

(c, s – Ergebnisse für $\cos(\phi)$ und $\sin(\phi)$).

Optimierung zur Hardware-Nachbildung

Aufwand je Rotationsschritt bis hierher: 4 Mult., mehrere Add., ...

Weitere Optimierung:

- Kosinus $\cos(\phi_i) = \cos(-\phi_i)$ ausklammern:

$$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} = SCS \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\tan(\pm\phi_{n-1}) \\ \tan(\pm\phi_{n-1}) & 1 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} 1 & -\tan(\pm\phi_0) \\ \tan(\pm\phi_0) & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Winkelvorzeichen unabhängige Konstante:

$$SCS = \prod_{i=0}^{n-1} \cos(\phi_i)$$

- Winkelschritte so wählen, dass die Tangens-Konstanten absteigende Zweierpotenzen sind:

$$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} = SCS \cdot \begin{pmatrix} 1 & \mp 2^{-n+1} \\ \pm 2^{-n+1} & 1 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} 1 & \mp 2^{-1} \\ \pm 2^{-1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \mp 2^{-0} \\ \pm 2^{-0} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} = SCS \cdot \begin{pmatrix} 1 & \mp 2^{-n+1} \\ \pm 2^{-n+1} & 1 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} 1 & \mp 2^{-1} \\ \pm 2^{-1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \mp 2^{-0} \\ \pm 2^{-0} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Berechnung von $\cos(\phi_i)$ und $\sin(\phi_i)$ mit n Nachkommabits:

- $2 \cdot n$ Bitverschiebungen um $i \in [1, n]$ Bits
- $3 \cdot n$ Additionen/Subtraktionen
- n Lesezugriffe auf eine Tabelle mit $(\arctan(2^{-i}))$
- 2 Multiplikationen mit der Konstanten SCS

statt $4 \cdot 2$ Multiplikationen und ...

Rechenwerke und Konstanten

Der Algorithmus benötigt für jeden Rotationsschritt

- zwei Additionen/Subtraktionen mit »alter Wert $\cdot 2^{-i}$ «,
- eine Addition/Subtraktion mit einer Winkelkonstanten:

i	0	1	2	3	4	5	6	$i > 6$
$\tan(\phi_i)$	2^{-0}	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}	2^{-5}	2^{-6}	2^{-i}
ϕ_i	0,785	0,464	0,245	0,124	0,062	0,031	0,015	$\approx 2^{-i}$

- Je eine Abschlussmultiplikation mit

$$\text{SCS} = \prod_{i=0}^{n-1} \cos(\arctan(2^{-i})) \approx 0,607$$

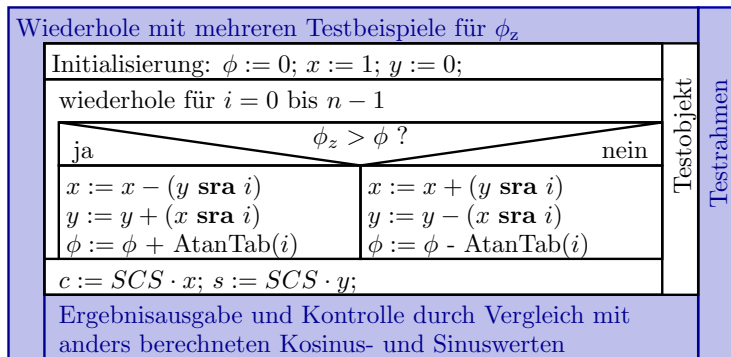
für den Sinus- und Kosinuswert.



Simulation des Algorithmus



Algorithmus und Testrahmen



$x \text{ sra } i$ arithmetische Rechtsverschiebung, identisch mit $x \cdot 2^{-i}$

Das Simulationsmodell dient auch zur Festlegung der erforderlichen Anzahl der Nachkommabits und Berechnungsschritte für die erforderliche Rechengenauigkeit.



Package mit anwendungsspezifischen Datentypen

```
package cordic_real_pack is
```

- Datentyp für Winkel-, Sinus-, Kosinus und Zwischenwerte²:

```
subtype t_dat is real range -2.0 to 2.0;
```

- Feldtyp für Winkelwerte für die Konstantentabelle:

```
type t_dat_array is array (natural range <>)  
  of t_dat;
```

- Datentyp für Testbeispiele (Eingabe + Ergebnissollwerte):

```
type t_test is record  
  phi:t_dat; sin:t_dat; cos:t_dat;  
end record;
```

²Später im Package `cordic_fix_pack.vhd` wird `t_dat` durch einen Bitvektortyp für Festkommazahlen ersetzt.



Konstanten und Testbeispiele

- Winkelkonstanten³ (Berechnung siehe Folie 12):

```
constant AtanTab: t_dat_array(0 to 15) := (  
    0.785398163, 0.463647609, 0.244978663,  
    0.124354995, 0.062418810, 0.031239833, ...);  
constant SCS: t_dat := 0.607252935;
```

- Testbeispiele als Feldkonstante von Tupeln aus Winkel- und Sollwerten für den zugehörigen Sinus- und Kosinuswert:

```
type t_test_dat is array (natural range <>  
                           of t_test;  
constant test_dat: t_test_dat(1 to 21) := (  
    1=>(-1.57080, -1.00000, 0.00000),  
    2=>(-1.41372, -0.98769, 0.15643), ...);
```

³Erzeugt mit dem Matlab-Script GenConstReal.m auf der WEB-Seite.



Anwendungsspezifische Funktionen

- Konvertierung von Werten vom Typ »t_dat« in eine formatierte Textdarstellung:

```
function str(x t_dat) return string;
```

- Vorzeichenbehaftete Rechtsverschiebung um eine variable Bitanzahl (Multiplikation mit 2^{-i}):

```
function "sra"(a: t_dat; i: natural)  
    return t_dat;
```

- Ende der Package-Definition:

```
end package;
```



Funktionsimplementierungen im Package Body

```
package body cordic_real_pack is  
  function str(x t_dat) return string is  
    — Textkonvertierung für Werte vom Typ t_dat in  
    — eine Dezimaldarstellung mit Vorzeichen, einer  
    — Vor- und 4 Nachkommastellen, z.B. "-1,9765"  
    ...  
  
  function4 "sra"(a: t_dat; i: natural) return t_dat is  
    — arithmetische Rechtsverschiebung  
  begin  
    return a/(2.0**i);  
  end function;  
end package body;
```

⁴Aufruf der Operatorfunktion mit *<Wert>* **sra** *<Verschiebung>*.



Testprogramm

```
— test_cordic_real.vhd
use std.textio.write;
use std.textio.output;
use work.cordic_real_pack.all;
entity test_cordic_real is end entity;
architecture a of test_cordic_real is
  signal x, y, c, s, phi, phi_z: t_dat;
begin
  process
    variable test: t_test;
  begin
    for tnr in test_dat'range loop
      <Abarbeitung der Testbeispiele>
    end loop;
    wait;
  end process; end architecture;
```

Wiederhole für 21 Testbeispiele

zu testender Algorithmus

Ausgabe der Ergebnisse und
der Soll-/Ist-Abweichungen



Abarbeitung und Protokollierung der Testbeispiele

```

write(output, "_Winkel_(Delta)|Kosinus_(Delta)|_...")
for tnr in test_dat'range loop
  test := test_dat(tnr);
  phi_z <= test.phi;
  <Berechnung von sin(phi_z) und cos(phi_z)>
  write(output, str(phi_z) & "_" & str(phi-test.phi)
        & "|" & str(c)      & "_" & str(c-test.cos)
        & "|" & str(s)      & "_" & str(s-test.sin));
end loop;

```

Textausgabe (Delta ist die Soll/Ist-Abweichung, im Beispiel null):

```

Winkel (Delta)|Kosinus (Delta)| Sinus (Delta)
-1,5708 -0,0000|-0,0000 -0,0000|-1,0000 +0,0000
-1,4137 +0,0000|+0,1565 +0,0000|-0,9877 +0,0000
-1,2566 +0,0000|+0,3090 +0,0000|-0,9511 +0,0000
-1,0996 +0,0000|+0,4540 +0,0000|-0,8910 +0,0000
-0,9425 +0,0000|+0,5878 +0,0000|-0,8090 +0,0000

```



Berechnung

```
x <= 1.0; y <= 0.0; phi <= 0.0;
```

```
wait for 10 ns;
```

```
for i in AtanTab'range loop
```

```
  if phi_z > phi then
```

```
    x <= x - (y sra i); y <= y + (x sra i);
```

```
    phi <= phi + AtanTab(i);
```

```
  else
```

```
    x <= x + (y sra i); y <= y - (x sra i);
```

```
    phi <= phi - AtanTab(i);
```

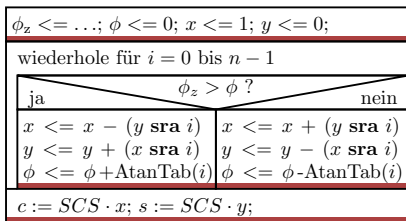
```
  end if;
```

```
wait for 10 ns;
```

```
end loop;
```

```
c <= SCS * x; s <= SCS * y;
```

```
wait for 10 ns;
```



Simulation wartet 10 ns

Wait-Anweisungen,
damit die Signale die
zugewiesenen Werte
übernehmen.



Umstellung auf Festkommazahlen



Umstellung auf Festkommazahlen

Der nicht synthesefähige Typ

```
subtype t_dat is real range -2.0 to 2.0;
```

soll durch 16-Bit vorzeichenbehaftete Festkommazahlen ersetzt werden.

- Betrag kleiner 2 verlangt ein Vorzeichen- und ein Datenbit (insg. 2 Bit) vor dem Komma.
- Bleiben $16-2=14$ Nachkommabits. Rundungsfehler $> 2^{-15} \approx 3 \cdot 10^{-5}$.

Die Zahlentypänderung verlangt fast nur Änderungen im Package:

```
package cordic_fix_pack is  
  subtype t_dat is signed(15 downto 0);
```

Die Definitionen der daraus zusammengesetzten Typen

»t_dat_array«, »t_test« und »t_test_dat« ändern sich nicht.



Die Konstanten sind umzurechnen (mit Matlab)

$$w_{\text{fix}} = \text{round}(w_{\text{real}} \cdot 2^{14})$$

```

type t_dat_array is array (natural range <>) of t_dat;
— Winkelkonstanten
constant AtanTab: t_dat_array(0 to 14) := (
  x"3244", — 0.78540
  x"1dac", — 0.46365
  x"0fae", — 0.24498
  ...
  x"0001"); — 0.00006 (Wert 15 wäre null und entfällt)

— Abschlussmultiplikator
constant SCS: t_dat := x"26dd"; — 0.6073

— Testbeispiele
constant test_dat: t_test_dat(1 to 21) := (
  1=>(x"9b78", x"c000", x"0000"), —(-1.570, -1.000, 0.000)
  2=>(x"a585", x"c0c9", x"0a03"), —(-1.413, -0.988, 0.156)
  ...

```




Umdefinieren der Package-Funktionen

Die Textkonvertierung

```
function str(x: t_dat) return string is ..
```

ist neu zu programmieren. Die Zahlendarstellung soll bleiben wie bisher:

```
Winkel <Delta>|Kosinus <Delta>| Sinus <Delta>
-1,5708 -0,0000|-0,0000 -0,0000|-1,0000 +0,0000
-1,4137 +0,0000|+0,1565 +0,0000|-0,9877 +0,0000
-1,2566 +0,0000|+0,3090 +0,0000|-0,9511 +0,0000
-1,0996 +0,0000|+0,4540 +0,0000|-0,8910 +0,0000
-0,9425 +0,0000|+0,5878 +0,0000|-0,8090 +0,0000
```

Der sra-Operator ist mit Bitverschiebungen zu realisieren:

```
function "sra"(a:t_dat; b:natural) return t_dat is
  variable y: t_dat := (others=>a(15));
begin
  assert b<16; — nur fuer die Simulation
  y(15-b downto 0) := a(15 downto b);
  return y;
end function;
```



Neue Konstanten und Package-Funktionen

Definition von Konstanten für die Werte 0.0 und 1.0:

```
constant const_0: t_dat := x"0000";  -- 0.0  
constant const_1: t_dat := x"4000";  -- 1.0
```

Funktion für die Abschlussmultiplikation mit SCS⁵:

```
function mult_scs(a: t_dat) return t_dat is  
  variable p: signed(31 downto 0) := a * SCS;  
begin  
  return t_dat(p(29 downto 14));  
end function;
```

⁵Das Produkt zweier Zahlen mit 2 Bit vor und 14 Bit nach dem Komma hat 4 Bit vor und 28 Bit nach dem Komma. Daraus wird der Teilbereich mit 2 Vor- und 14 Nachkommabits ausgewählt. Wegen der betragsmäßigen Wertebegrenzung auf < 1 sind bei der Verringerung der Anzahl der Vorkommastellen auf 2 Wertebereichsüberläufe ausgeschlossen.



Der simulierte Algorithmus bleibt fast unverändert

```

x<=const_1; y<=const_0;
phi<=const_0;
wait for 10 ns;
for i in AtanTab' range loop
  if phi_z > phi then
    x <= x - (y sra i); y <= y + (x sra i);
    phi<=phi + AtanTab(i);
  else
    x <= x + (y sra i); y <= y - (x sra i);
    phi <= phi - AtanTab(i);
  end if;
  wait for 10 ns;
end loop;
c <= mult_scs(x); s <= mult_scs(y);

```

$\phi_z \leftarrow \dots; \phi \leftarrow 0; x \leftarrow 1; y \leftarrow 0;$	
wiederhole für $i = 0$ bis $n - 1$	
$\phi_z > \phi ?$	
ja	nein
$x \leftarrow x - (y \text{ sra } i)$	$x \leftarrow x + (y \text{ sra } i)$
$y \leftarrow y + (x \text{ sra } i)$	$y \leftarrow y - (x \text{ sra } i)$
$\phi \leftarrow \phi + \text{AtanTab}(i)$	$\phi \leftarrow \phi - \text{AtanTab}(i)$
$c := SCS \cdot x; s := SCS \cdot y;$	

Simulation wartet 10 ns



Rahmenprogramm für die Simulation und Ausgabe

- Zusätzlich genutzte Packages: work.cordic_fix_pack, ieee.numeric_std (Operatoren +, -, >).
- Rest des Rahmenprogramms wie mit »reellen Zahlen«:

Wiederhole für alle Testbeispiele:

x, y, phi und phi_z initialisieren

15 CORDIC-Schritte, 2 Abschlussmult., Textausgabe

- Numerischer Fehler max. $\mp 2 \cdot 10^{-4}$:

```

-0,1571 +0,0000!+0,9876 -0,0001!-0,1565 +0,0000
+0,0000 +0,0000!+1,0001 +0,0001!-0,0001 -0,0001
+0,1570 +0,0000!+0,9877 +0,0000!+0,1564 -0,0001
+0,3141 +0,0000!+0,9510 -0,0001!+0,3089 -0,0001
+0,4712 +0,0000!+0,8911 +0,0001!+0,4537 -0,0002
+0,6283 +0,0000!+0,8091 +0,0001!+0,5876 -0,0002
+0,7853 +0,0000!+0,7072 +0,0001!+0,7070 -0,0001
+0,9424 +0,0000!+0,5876 -0,0001!+0,8091 +0,0001
+1,0995 +0,0000!+0,4539 -0,0001!+0,8910 +0,0000
+1,2566 +0,0000!+0,3090 +0,0000!+0,9510 -0,0001
+1,4137 +0,0000!+0,1564 +0,0000!+0,9877 +0,0000
+1,5707 +0,0000!+0,0000 +0,0000!+1,0000 +0,0000

```

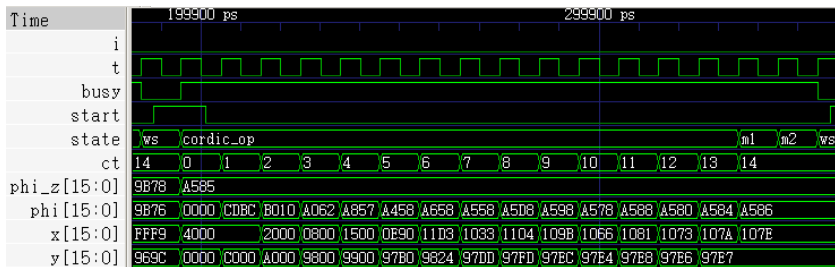


Entwurf als Rechenwerk



Festlegung des Operationsablaufs

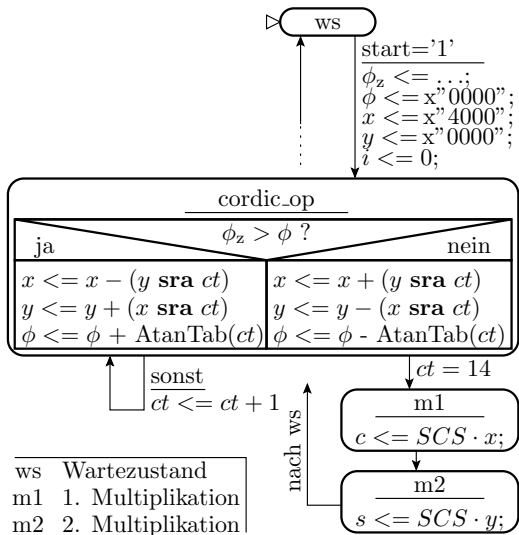
Angestrebtes Simulationsergebnis:



- Wenn busy inaktiv und Start aktiv, Datenübernahme und Berechnungsbeginn.
- 15 CORDIC-Schritte,
- Abschlussmultiplikationen nacheinander. Ein zusätzlicher Takt und ein eingesparter Multiplizierer.



Operationsablaufgraph



Schnittstelle, interne Signale

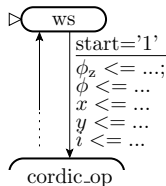
```

use work.cordic_fix_pack.all; ...

entity cordic is
  port(
    T, I, Start: in std_logic; — I, Start seien
    w: in t_dat; — abgetastet
    busy: out std_logic;
    s, c: out t_dat);
end entity;

architecture a of cordic is
  type t_state is (ws, cordic_op, m1, m2);
  signal state: t_state;
  signal ct: natural range(AtanTab'range);
  signal x, y, phi, phi_z: t_dat;
begin
  ...
end architecture;

```

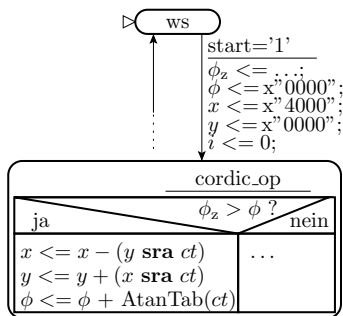


Prozesse für Operationsablauf und Ausgabe

```

process (T, I)
begin
  if I='1' then
    state <= ws;
  elsif rising_edge(T) then
    case state is
      when ws =>
        if Start = '1' then
          ct <= AtanTab'low;
          phi<=const_0;
          x<=const_1; y<=const_0;
          state <= cordic_op; phi_z <= w;
        end if;
        when cordic_op =>
          if phi_z > phi then
            x <= x - (y sra ct); y <= y + (x sra ct);
            phi<=phi + AtanTab(ct);

```



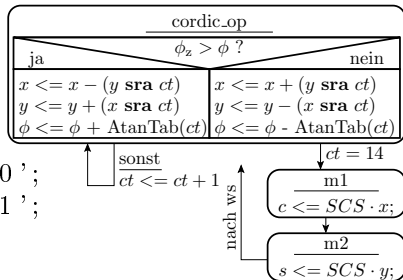


```

else
  x <= x + (y sra ct); y <= y - (x sra ct);
  phi <= phi - AtanTab(ct);
end if;
if ct=AtanTab'high-1 then state <= m1;
else ct <= ct +1; end if;
when m1 => -- Abschlussmultiplikation Kosinus
  c <= mult_scs(x); state <= m2;
when m2 => -- Abschlussmultiplikation Sinus
  s <= mult_scs(y); state <= ws;
end case;
end if;
end process;

process (state) begin
  if state=ws then busy <= '0';
  else busy <= '1';
  end if;
end process;

```





Testrahmen



```
use work.cordic_fix_pack.all;
library ieee; use ieee.std_logic_1164.all;
entity test_cordic is end entity;

architecture a of test_cordic is
  signal T, I, Start, busy: std_logic := '0';
  signal w, s, c: t_dat;
begin
  — Instanziierung des Testobjekts
  uut: entity work.cordic port map(T=>T, I=>I,
  Start=>Start, busy=>busy, w=>w, s=>s, c=>c);

  process — Erzeugung des Takt- und des Init.-Signals
  begin
    I <= '1', '0' after 20 ns;
    while now < 1 us loop
      wait for 5 ns; T <= not T;
    end loop;
    wait;
  end process;
end;
```



Abarbeitung der Testbeispiele aus dem Package

```
process
  variable test: t_test;
begin
  for tnr in test_dat range loop
    wait until busy='0'; wait for 3 ns;
    start <='1'; test:=test_dat(tnr);
    w <= test.phi;
    wait until busy = '1';
    wait for 6 ns;
    start <='0';
  end loop;
  wait;
end process;
end architecture;
```




Zusammenfassung

Entwurf eines CORDIC-Rechenwerks in den Schritten:

- Entwicklung und Simulation des Algorithmus mit Gleitkommazahlen (auch komplett in Matlab möglich).
- Ersatz der Gleitkomma- durch Festkommazahlen. Festlegung der Vor- und Nachkommabit- und Iterationsanzahl.
- Operationsablauf mit 3 Addierern, 2 Block-Shiftern, einem adressierbaren Konstantenspeicher, einem Multiplizierer, ...
- »Printf«- und Regressionstest nach jeder Verfeinerung zum Aufspüren und zur Beseitigung entstandener Fehler.

Es würden noch folgen: Synthese, Test, ...

Tatsache:

Komplexe Systeme wie ein CORDIC-Rechenwerk lassen sich nicht mehr in einem Schritt entwerfen.



MiPro

Der Minimalprozessor MiPro

MiPro ist ein für die Lehrveranstaltung »Rechnerarchitektur« im 1. Semester entwickelter Minimalprozessor:

- 16-Bit Befehlswoorte, 4 Befehlsformate, 31 Befehle,
- acht 8-Bit-Register, 3-Bit-Registeradressen, 8-Bit-Konstanten,
- $2^8 = 256$ Befehls- und 256 Datenspeicherplätze.

Teilbitvektor	15 ... 11	10 9 8	7 6 5	4 3 2	1 0	cnr
noop	00000					0
jump imm,cond	00001	cond	imm			1
cmd rd,imm	cnr	rd	imm			2 bis 14
cmd rd (retu)	cnr	rd				15
cmd rd,ra	cnr	rd	ra			16 bis 23
cmd rd,ra,rb	cnr	rd	ra	rb		24 bis 30

(cnr – Befehlsnummer; rd, ra, rb – Registeradressen; imm
(**I**mmEDIATE) – Direktwert ; cond (**C**ondition) – Sprungbedingung).



Der Prozessor ist so einfach aufgebaut, dass sich der komplette Prozessorzustand in einer Textzeile darstellen lässt:

PC	Befehl	assem.:	hex	r0	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	c	z
00	ld_i	r1,4a,..:294a	00 4a	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
01	ld_i	r0,73,..:2873	73 4a	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
02	move	r2,r0,..:8200	73 4a 73	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
03	move	r3,r1,..:8320	73 4a 73 4a	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
04	andi	r2,0f,..:620f	73 4a 03 4a	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
05	andi	r3,f0,..:63f0	73 4a 03 40	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
06	or_r	r4,r2,r3:ec4c	73 4a 03 40 43	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
07	xorr	r5,r4,r4:f590	73 4a 03 40 43	00	00	00	00	00	00	00	00	0	1

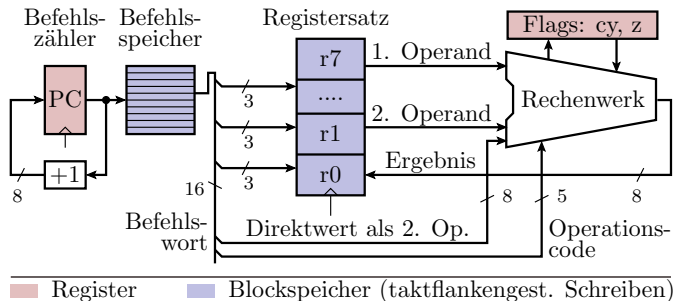
PC – Befehlszähler, r0 bis r7 – Register; c, z – Carry- und Zero-Flag.

- Spalte 1: Befehlsadresse (hex.)
- Spalte 2: Befehlswort (disassembliert und hex.)
- ab Spalte 3: Register und Flags nach Operationsausführung.

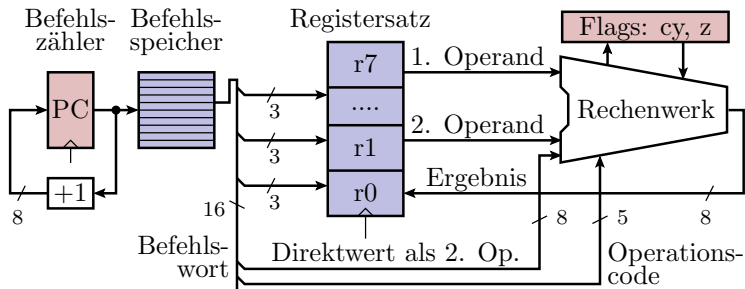


Funktion und Befehlssatz

Hardware für Verarbeitungsbefehle



- PC adressiert den Befehlsspeicher und erhöht sich um eins.
- Aus dem gelesenen Befehlsword werden Befehlsnummer, Registeradressen und optional ein Direktwert entnommen.
- Operationsausführung mit zwei Operanden und einem Ergebnis. Optionale Auswertung und Veränderung der Flags.



Mit dieser Hardware ausführbare Operationen:

- Kopieren: Register oder Konstante \Rightarrow Register;
- logische Operationen: UND-, ODER-, EXOR-Verknüpfung von zwei Operanden (bitweise). Negation eines Operanden.
- Verschiebung, Rotation rechts / links um ein Bit.
- Addition, Subtraktion mit oder ohne einlaufendem Übertrag.

Details siehe nachfolgende Folien. Mit dieser Hardware noch nicht ausführbar sind Lade-/Speicher-Operationen, Sprünge, ...



Logikbefehle des Minimalprozessors

Teilbitvektor	15 ... 11	10 9 8	7 6 5	4 3 2	1 0
cmd rd,ra,rb	cnr	rd	ra	rb	
cmd rd,ra	cnr	rd	ra		
cmd rd,imm	cnr	rd	imm		

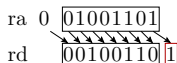
Befehl	Operation	Flags	cnr
andr rd , ra , rb	rd := ra and rb	z	28
andi rd ,imm	rd := rd and imm	z	12
or_r rd , ra , rb	rd := ra or rb	z	29
or_i rd ,imm	rd := rd or imm	z	13
xorr rd , ra , rb	rd := ra xor rb	z	30
xori rd ,imm	rd := rd xor imm	z	14
notr rd , ra	rd := not ra	z	23

Befehle zum Initialisieren und Kopieren von Registerinhalten:

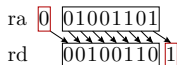
ld_i rd ,imm	rd := imm		5
move rd , ra	rd := ra		16

Verschiebe- und Rotationsbefehle

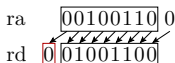
```
sh_r rd, ra
```



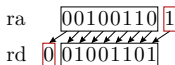
```
rotr rd, ra
```



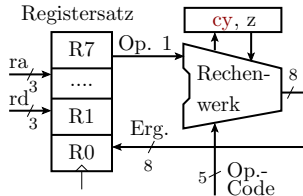
```
sh_l rd, ra
```



```
rotl rd, ra
```



Registersatz



sh_r rd, ra	rd := 0:ra >> 1	cy, z	20
rotr rd, ra	rd := cy:ra >> 1	cy, z	22
sh_l rd, ra	rd := ra:0 << 1	cy, z	19
rotl rd, ra	rd := ra:cy << 1	cy, z	21

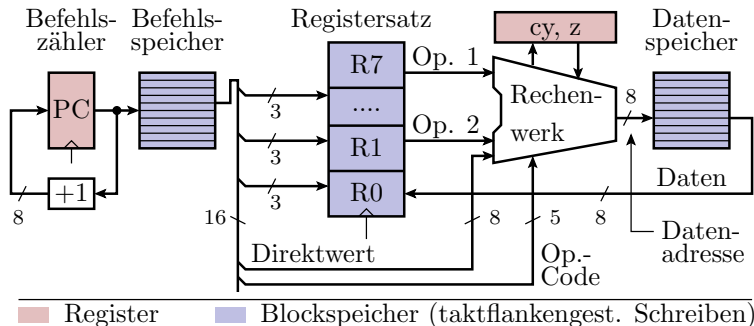
- 0:ra – Verkettung von null und ra zu einem 9-Bit-Wert.
- 1-Bit-Verschiebung, rausgeschobenes Bit in cy.
- Verschiebefehle übernehmen in das frei werdende Bit null, Rotationsbefehle den bisherigen Wert von cy.

Additions- und Subtraktionsbefehle MiPro

Befehl	Operation	Flags	cnr
addr rd , ra , rb	$rd := ra + rb$	cy , z	24
addi rd , imm	$rd := rd + imm$	cy , z	8
adcr rd , ra , rb	$rd := ra + rb + cy$	cy , z	25
adci rd , imm	$rd := rd + imm + cy$	cy , z	9
subr rd , ra , rb	$rd := ra - rb$	cy , z	26
subi rd , imm	$rd := imm - rd$	cy , z	10
sbcrr rd , ra , rb	$rd := ra - rb - cy$	cy , z	27
sbcir rd , imm	$rd := imm - rd - cy$	cy , z	11

- Bei Addition mehrerer Bytes werden die niederwertigen Bytes mit add und die höherwertigen mit adc addiert. Analog bei der Subtraktion.
- Der erste Operand kann eine Variable oder eine Konstante (Direktwert) sein.

Erweiterung um Ladeoperationen



- Aus max. zwei Registerinhalten oder einem Registerinhalt und einer Konstanten wird die Adresse berechnet.
- Das Zielregister übernimmt statt des Berechnungsergebnisses den aus dem Datenspeicher gelesenen Wert.

Lade- / Speicherbefehle des Minimalprozessors

Teilbitvektor	15 ... 11	10 9 8	7 6 5	4 3 2	1 0
cmd rd,ra	cnr	rd	ra		
cmd rd,imm	cnr	rd	imm		

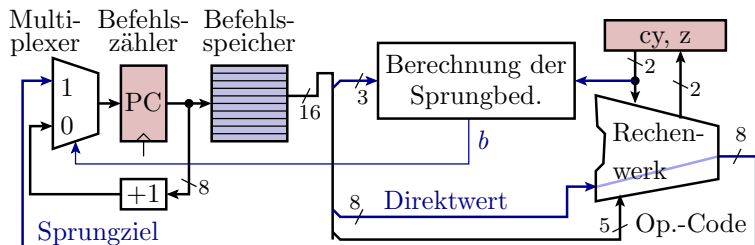
Befehl	Operation	Flags	cnr
load rd,imm	rd := dmem(imm)		3
stor rd,imm	dmem(imm) := rd		4
ld_r rd,ra	rd := dmem(ra)		17
st_r rd,ra	dmem(ra) := rd		18

Unterstützte Adressierungsarten:

- direkt für die Adressierung von Variablen mit festen Adressen.
- indirekt für die Adressierung mit Zeigern.

Eine Adressrechnung, z.B. Registerinhalt + Konstante, in MiPro nicht implementiert, würde im Rechenwerk erfolgen.

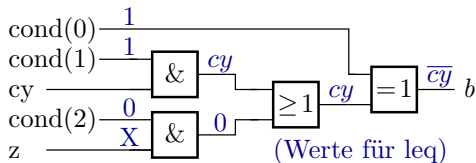
MiPro-Erweiterungen für Sprungbefehle



`jump imm, cond; if (b) pc = imm; else pc++;`

- Das Rechenwerk leitet die Konstante zu einem Multiplexer (Umschalter), der gesteuert vom berechneten Bedingungsbit b zwischen »nächster Befehl« und »Sprung« umschaltet.
- Die Berechnung der Sprungbedingung erfolgt mit einer Schaltung aus 4 Gattern (siehe nächste Folie).

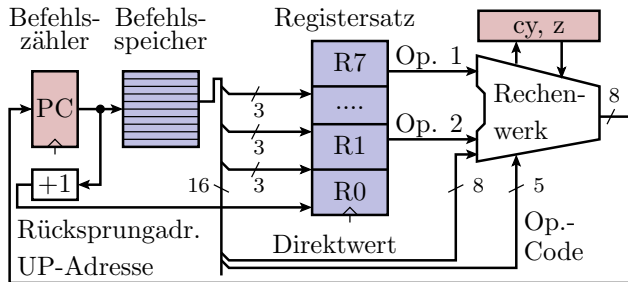
Berechnung der Sprungbedingung



cond	Wert	Bedeutung	Flag-Bedingung
nev	000	jump never	keine
alw	001	jump always	keine
gth	010	jump greater than	cy=1
leq	011	jump if less or equal	cy=0
equ	100	jump if equal	z = 1
neq	101	jump if not equal	z = 0
geq	110	jump if greater or equal	cy=1 or z=1
lth	111	jump if less than	cy=0 and z=0

Hardware-Erweiterung für Call- und Return-Befehl

Befehl	Operation	Flags	cnr
call rd,imm	rd:=pc+1, pc:=imm		2
retu rd	pc := rd		15



Register

 Blockspeicher (taktflankengest. Schreiben)



Assembler und Disassembler

Textdarstellung von Befehlsbestandteilen

```
constant imem: t_imem(0 to 7) := (  
    0=>cmd(ld_i, r1, x"23"),  
    1=>cmd(subi, r1, x"4a"), ...
```

```
00|ld_i r1,23,...:2923|00 23 00 00 00 00 00 00|0|0|  
01|subi r1,4a,...:514a|00 27 00 00 00 00 00 00|0|0|
```

Für Programmierung und Test ist es wichtig, dass Befehle und Befehlsbestandteile in Assemblernotation beschrieben werden:

- Befehlsnummern als Symbole,
- Registeradressen als r0 bis r7 und
- Konstanten als zweistellige Hexzahlen.

Programmtechnische Lösung:

- Symbolische Befehlsbestandteile als Aufzählungstypen,
- Assemblieren mit den Funktionen »cmd()«, »nop()« und »jmp()«,
- ...

Befehlsbestandteile als Aufzählungstypen

Teilbitvektor	15 ... 11	10 9 8	7 6 5	4 3 2	1 0	cnr
noop	00000					0
jump imm,cond	00001	cond	imm			1
cmd rd,imm	cnr	rd	imm			2 bis 14
cmd rd (retu)	cnr	rd				15
cmd rd,ra	cnr	rd	ra			16 bis 23
cmd rd,ra,rb	cnr	rd	ra	rb		24 bis 30

```

type t_cmd is (noop,           — Assemblerfunktion
  jump,                          — jump(imm8, cond:=non)
  call, load, stor, ld_i, comp,  — cmd(<cmd> rd, imm8)
  cmpc, addi, adci, subi, sbci,
  andi, or_i, xori,
  retu,                           — ret(rd)
  move, ld_r, st_r, sh_l, sh_r,  — cmd(<cmd> rd ra)
  rotl, rotr, notr,
  addr, adcr, subr, sbcr,       — cmd(<cmd> rd ra rb)
  andr, or_r, xorr);
    
```

Konvertierung in Texte und Bitvektoren

- Aufzählungstyp (hier vom Typ »t_cmd«) nach Text:

```
... t_cmd' image (<Objekt vom Typ t_cmd>)
```

- Zahlenwert »w« nach *b*-Bit-Vektor* :

```
function to_bitvec(w: natural; b: positive)  
                return bit_vector;
```

- Aufzählungstyp (hier vom Typ »t_cmd«) nach Bitvektor:

```
... to_bitvec(t_cmd' pos (<Obj. vom Typ t_cmd>, 5);
```

- Bitvektor in eine vorzeichenfreie Zahl* :

```
function uint(w: bit_vector) return natural;
```

- Zahlenwert nach Text (Hex.-Darstellung)* :

```
function hex(dat: bit_vector) return string;
```

* Funktionen aus dem Package »mipro_pack«.

Registeradressen und Sprungbedingungen

Teilbitvektor	15 ... 11	10 9 8	7 6 5	4 3 2	1 0	cnr
noop	00000					0
jump imm,cond	00001	cond	imm			1
cmd rd,imm	cnr	rd	imm			2 bis 14
cmd rd (retu)	cnr	rd				15
cmd rd,ra	cnr	rd	ra			16 bis 23
cmd rd,ra,rb	cnr	rd	ra	rb		24 bis 30

```
type t_reg is (r0, r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7);
```

```
type t_cond is (
    nev, — jump never
    alw, — jump always
    gth, — jump greater than (cy=1)
    leq, — jump if less or equal (cy=0)
    equ, — jump if equal (z =1)
    neq, — jump if not equal (z =0)
    geq, — jump if greater or equal (cy=1 or z=1)
    lth); — jump if less than (cy=0 and z=0)
```

Die Assembler- funktionen

Teilbitvektor	15 ... 11	10 9 8	7 6 5	4 3 2	1 0	cnr
noop	00000					0
jump imm,cond	00001	cond	imm			1
cmd rd,imm	cnr	rd	imm			2 bis 14
cmd rd (retu)	cnr	rd				15
cmd rd,ra	cnr	rd	ra			16 bis 23
cmd rd,ra,rb	cnr	rd	ra	rb		24 bis 30

constant nop: bit_vector(15 **downto** 0) := x"0000";

— *Sprungbefehl: Argumente Sprungziel und -bedingung*

function jmp(tgadr: bit_vector(7 **downto** 0);
cond: t_cond:=alw) **return** bit_vector;

— *Argumente: Registeradresse und 8-Bit-Direktwert*

function cmd(w: t_cmd; rd:t_reg;
imm: bit_vector(7 **downto** 0)) **return** bit_vector;

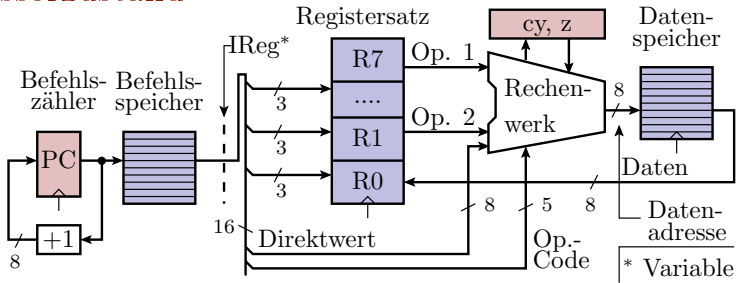
— *Argumente: 1 bis 3 Registeradressen*

function cmd(w: t_cmd; rd:t_reg; ra, rb: t_reg:=r0)
return bit_vector;



Prozessorzustand

Prozessorzustand

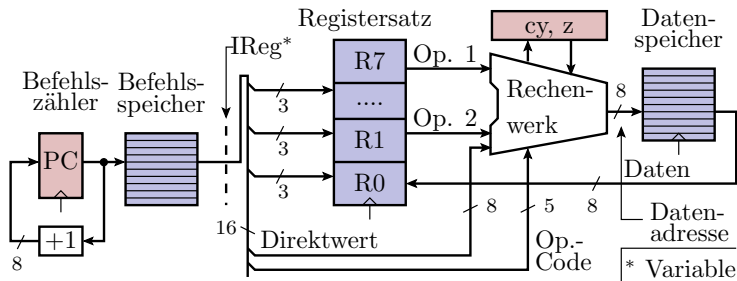


- Datentyp Befehlsspeicher:

```
type t_imem is array (natural range<>)
of bit_vector(15 downto 0);
```

- Textdarstellung für Befehle (z.B. »ld_i r1,4a,..«):

```
function str_ir(w: bit_vector(15 downto 0))
return string;
```



- Datentyp Datenspeicher:

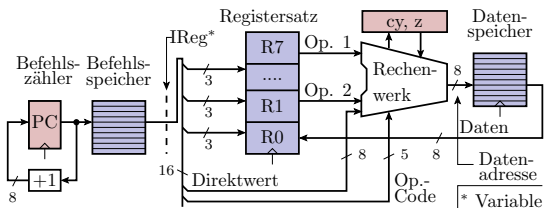
```
type t_dmem is array (natural range<>)
  of bit_vector(7 downto 0);
```

- Textdarstellung für Datenspeicherbereiche:

```
function str(w: t_dmem) return string;
```



- Prozessorzustand:



```
type t_proc_state is record
```

```
  PC : bit_vector( 7 downto 0); — Befehlszähler
```

```
  IReg: bit_vector(15 downto 0); — Befehlswort
```

```
  cy:  bit; — Carry-Flag
```

```
  z:  bit; — Zero-Flag
```

```
  RSet: t_dmem(0 to 7); — Registersatz
```

```
end record;
```

- Textdarstellung des Prozessorzustands:

```
constant c_proc_state: string :=
```

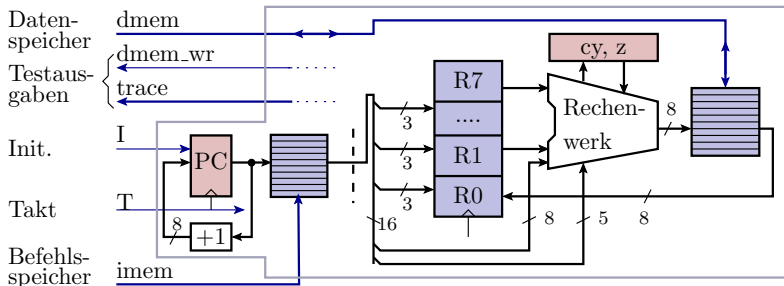
```
"PC|Befehl_assem.:_hex|r0_r1_r2_r3_r4_r5_r6_r7|c|z|";
```

```
function str(ps: t_proc_state) return string;
```




Simulationsmodell

Schnittstelle

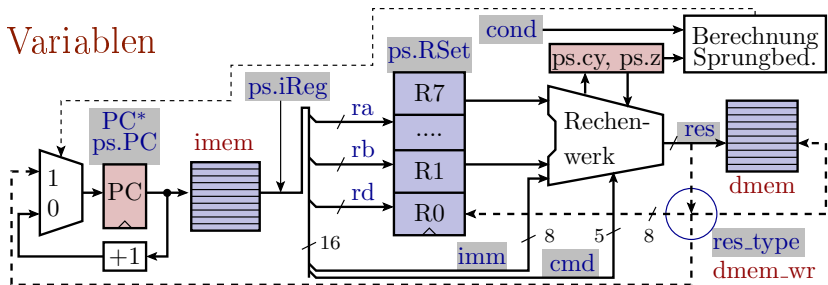


```

entity mipro is port (
    T, I: in bit;
    imem: in t_imem;
    dmem: inout t_dmem;
    trace: out t_proc_state;
    dmem_wr: out boolean);
end entity;
    
```



Variablen



architecture of mipro is begin

process (T, I)

variable cmd: t_cmd;

variable res: bit_vector(8 downto 0);

variable imm, PC: bit_vector(7 downto 0);

variable cond: bit_vector(2 downto 0);

variable rd, ra, rb: natural range 0 to 7;

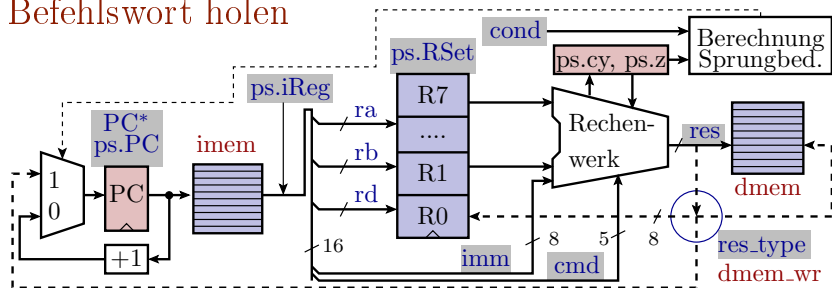
variable ps: t_proc_state;

type t_res_type is (non, rcz, rncz, ncz, rz);

variable res_type: t_res_type;

xx Variablen
* Folgewert

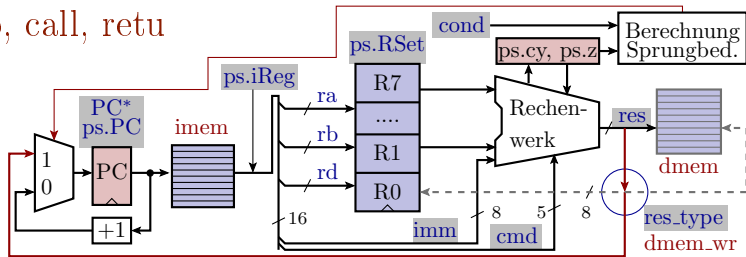
Befehlsword holen



```

ps.IReg := imem(uint(ps.PC));
PC      := inc(ps.PC);
cmd     := t_cmd'val(uint(ps.IReg(15 downto 11)));
cond    := ps.IReg(10 downto 8);
rd      := uint(ps.IReg(10 downto 8));
ra      := uint(ps.IReg( 7 downto 5));
rb      := uint(ps.IReg( 4 downto 2));
imm     := ps.IReg( 7 downto 0);
    
```

jump, call, retu



```
dmem_wr <= false; res_type := non;
```

```
case cmd is
```

```
when jump =>                                — Sprungbefehl
```

```
  if test_jump_cond(cond, ps.cy, ps.z) then
    PC := imm;                                — überschreibt PC+1
```

```
  end if;
```

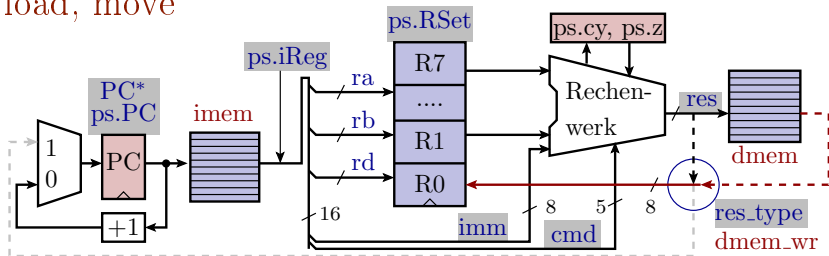
```
when call =>                                  — Unterprogrammaufruf
```

```
  ps.RSet(rd) := PC; PC := imm;
```

```
when retu =>                                  — Rücksprung
```

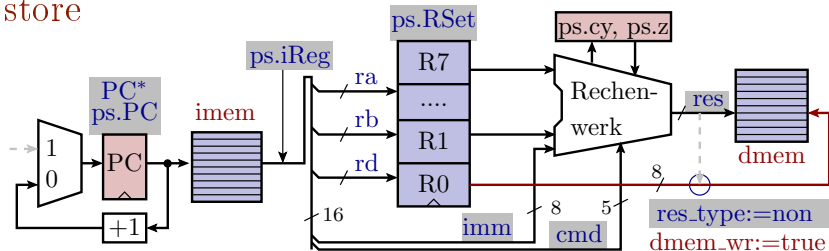
```
  PC := ps.RSet(rd);
```

load, move



- when** load \Rightarrow — Lade von konstanter Adresse
`ps.RSet(rd) := dmem(uint(imm));`
- when** ld_r \Rightarrow — Lade von variabler Adresse
`ps.RSet(rd) := dmem(uint(ps.RSet(ra)));`
- when** ld_i \Rightarrow — Lade eine Konstante
`ps.RSet(rd) := imm;`
- when** move \Rightarrow — Kopiere von Ra nach Rd
`ps.RSet(rd) := ps.RSet(ra);`

store

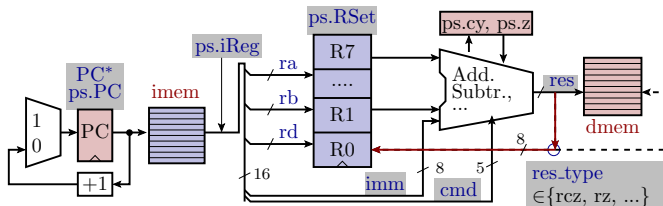


when stor \Rightarrow — *Speichern, konstante Adresse*
`dmem(uint(imm)) <= ps.RSet(rd);`
`dmem_wr <= true;`

when st_r \Rightarrow — *Speichern, variable Adresse*
`dmem(uint(ps.RSet(ra))) <= ps.RSet(rd);`
`dmem_wr <= true;`

»dmem_wr« signalisiert dem Testrahmen eine Werteänderung des Datenspeichers, wurde vor der Fallunterscheidung auf »false« gesetzt und wird für Speicheroperationen mit »true« überschrieben.

Addition

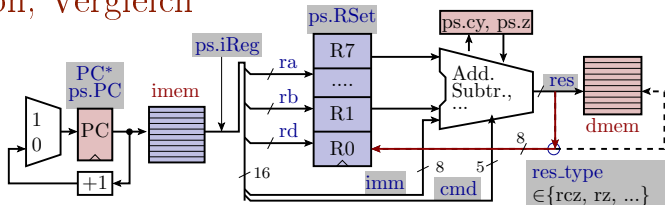


```

when addr => res_type := rcz ;
    res := add(ps.RSet(ra), ps.RSet(rb), '0');
when addi => res_type := rcz ;
    res := add(imm, ps.RSet(rd), '0');
when adcr => res_type := rcz ;
    res := add(ps.RSet(ra), ps.RSet(rb), ps.cy);
when adci => res_type := rcz ;
    res := add(imm, ps.RSet(rd), ps.cy);
    
```

Fallunterscheidung nach »res_typ« folgt nach der auszuführenden Operation. »rcz«: Ergebnis in Register schreiben, Carry- und Zero-Flag anpassen.

Subtraktion, Vergleich



- Subtraktion: Addition mit dem Komplement:

when subr =>

```
res := add(ps.RSet(ra), not(ps.RSet(rb)), '1');
res_type := rncz; ...
```

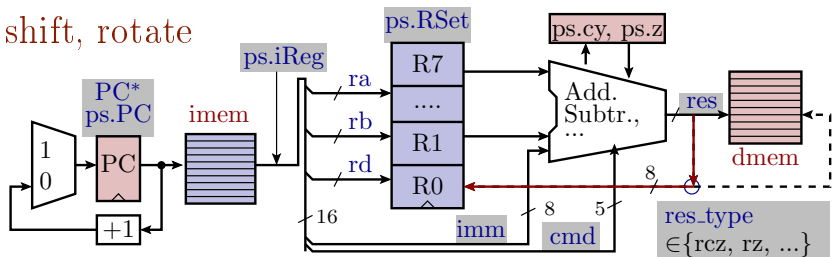
- Vergleich: Subtraktion, die nur das Carry- und Zero-Flag beeinflusst:

when comp =>

```
res := add(imm, not(ps.RSet(rd)), '1');
res_type := ncz;
```



shift, rotate

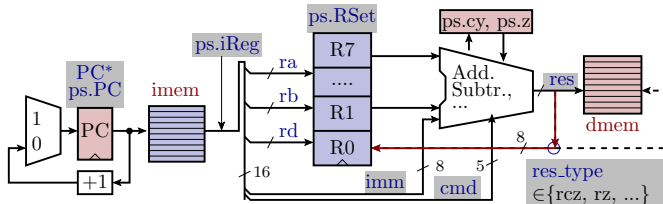


```

when sh_l => res_type := rcz ;
  res := ps.RSet(ra) & '0' ;
when rotl => res_type := rcz ;
  res := ps.RSet(ra) & ps.cy ;
when sh_r => res_type := rcz ;
  res := '0' & ps.RSet(ra) ;
  res := res(0)&res(8 downto 1) ;
when rotr => res_type := rcz ;
  res := ps.cy & ps.RSet(ra) ;
  res := res(0)&res(8 downto 1) ;

```

Bitweise Logikoperationen



```

when notr => res_type := rz ;
    res(7 downto 0) := not ps.RSet(ra) ;
when andr => res_type := rz ;
    res(7 downto 0) := ps.RSet(ra) and ps.RSet(rb) ;
when andi => res_type := rz ;
    res(7 downto 0) := imm and ps.RSet(rd) ;
when ...
    <für or_r, or_i, xorr und xori vergleichbare Befehlsfolgen>
when others => res_type := non ;
end case ;
    
```



Ergebnis schreiben

```
case res_type is
  when rcz => — addr, addi, adcr, adci, sh_l, ...
    ps.RSet(rd) := res(7 downto 0);
    ps.cy := res(8);
    ps.z := is_zero(res(7 downto 0));
  when rncz => — subr, subi, sbcr, sbci,
    ps.RSet(rd) := res(7 downto 0);
    ps.cy := not res(8);
    ps.z := is_zero(res(7 downto 0));
  when ncz => — comp, cmpr
    ps.cy := not res(8);
    ps.z := is_zero(res(7 downto 0));
  when rz => — notr, andr, andi, or_r, or_i, ...
    ps.RSet(rd) := res(7 downto 0);
    ps.z := is_zero(res(7 downto 0));
  when others => null;
end case;
```



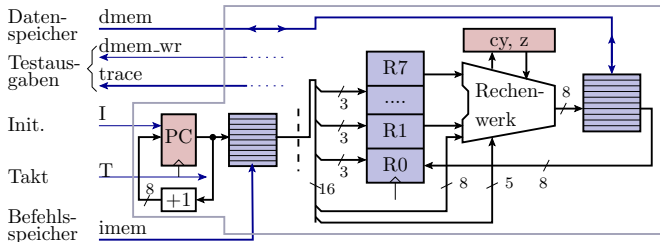
Testrahmen

Das zu testende Programm

```
use work.mipro_pack.all; use ...
entity test_mipro is end entity;
architecture a of test_mipro is
  constant imem: t_imem(0 to 8) := (
    0=>cmd(ld_i, r1, x"3a"),
    1=>cmd(ld_i, r0, x"73"),
    2=>cmd(ld_i, r3, x"E7"),
    3=>cmd(ld_i, r2, x"13"),
    4=>cmd(addr, r5, r1, r3),
    5=>cmd(adcr, r4, r0, r2),
    6=>cmd(subi, r5, x"23"),
    7=>cmd(sbc_i, r4, x"86"),
    others => nop);
```

Zuweisung der Befehlswoorte an ausgewählte Befehlsspeicherplätze.
Alle anderen Adressen werden mit x"0000" (nop) initialisiert.

Signal, Taktperiode, Testobjektinstanz



```

signal T, I: in bit;
signal dmem: t_dmem(0 to 7);
signal ps: t_proc_state;
signal dmem_wr: boolean;
constant tP: delay_length := 10 ns;
    
```

begin

DUT: **entity** work.mipro

port map(T, I, imem, dmem, ps, dmem_wr);

Erzeugung des Takts und der Trace-Tabelle

process

begin

```

write(output, lf & c_proc_state); — Tabellenkopf
while uint(ps.PC) < imem' high loop — für alle Befehle
    T <= '1' after 5 ns, '0' after 10 ns; — Takt erzeugen und warten
    wait for 10 ns;
    write(output, str(ps)); — Prozessorzustand
    if dmem_wr then — nach Speicherzugriff
        write(output, "str(dmem) _=_ " & str(dmem)); — Datenspeicherinhalt ausgeben
    end if;
end loop;
wait;

```

end process;

Trace-Ausgabe:

PC	Befehl	assem.:	hex	r0	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	c z
00	ld_i	r1, 3a, ...:293a		00	3a	00	00	00	00	00	00	0 0



Testbeispiele

Addition und Subtraktion

Programmieraufgabe:

```
r0:r1 = 0x733A;          r2:r3 = 0x13E7;
r4:r5 = r0:r1 + r2:r3; Ergebnis: 0x8721
r6:r7 = r0:r1 - r2:r3; Ergebnis: 0x5F53
```

Programm mit ergänzten Registerinhalten:

PC	Befehl	assem.: hex	r0	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	c	z
00	ld_i	r1,3a,...:293a	00	3a	00	00	00	00	00	00	0	0
01	ld_i	r0,73,...:2873	73	3a	00	00	00	00	00	00	0	0
02	ld_i	r3,e7,...:2be7	73	3a	00	e7	00	00	00	00	0	0
03	ld_i	r2,13,...:2a13	73	3a	13	e7	00	00	00	00	0	0
04	addr	r5,r1,r3:c52c	73	3a	13	e7	00	21	00	00	1	0
05	adcr	r4,r0,r2:cc08	73	3a	13	e7	87	21	00	00	0	0
06	subr	r7,r1,r3:d72c	73	3a	13	e7	87	21	00	53	1	0
07	sbcr	r6,r0,r2:de08	73	3a	13	e7	87	21	5f	53	0	0

Testbeispiel mit Speicherzugriff und Schleife

```
r0 = 1; r1 = 34;  
M: dmem(r0) = r1;  
   r1 = r1 - r0; r0 = r0 +1;  
   wenn r0 ≤ 3 springe zu M
```

Sprungbedingung für r0=2 und 3 erfüllt. 3 Schleifendurchläufe.

```
0000: ld_i r0 ,01 ,..  
0001: ld_i r1 ,34 ,..  
0002: st_r r1 ,r0 ,..  
0003: subr r1 ,r1 ,r0  
0004: addi r0 ,01 ,..  
0005: comp r0 ,03 ,..  
0006: jump 02 ,leq ..  
0007: noop .. ,.. ,..
```

- In welcher Reihenfolge werden die Anweisungen abgearbeitet?



PC	Befehl	assem.:	hex	r0	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	c	z
00	ld_i	r0, 01, ...:2801	01	00	00	00	00	00	00	00	00	0	0
01	ld_i	r1, 34, ...:2934	01	34	00	00	00	00	00	00	00	0	0
02	st_r	r1, r0, ...:9100	01	34	00	00	00	00	00	00	00	0	0
		dmem =	[00	34	00	00	00	00	00	00	00]		
03	subr	r1, r1, r0:d120	01	33	00	00	00	00	00	00	00	0	0
04	addi	r0, 01, ...:4001	02	33	00	00	00	00	00	00	00	0	0
05	comp	r0, 03, ...:3003	02	33	00	00	00	00	00	00	00	0	0
06	jump	02, leq...:0 b02	02	33	00	00	00	00	00	00	00	0	0
02	st_r	r1, r0, ...:9100	02	33	00	00	00	00	00	00	00	0	0
		dmem =	[00	34	33	00	00	00	00	00	00]		
03	subr	r1, r1, r0:d120	02	31	00	00	00	00	00	00	00	0	0
04	addi	r0, 01, ...:4001	03	31	00	00	00	00	00	00	00	0	0
05	comp	r0, 03, ...:3003	03	31	00	00	00	00	00	00	00	0	1
06	jump	02, leq...:0 b02	03	31	00	00	00	00	00	00	00	0	1
02	st_r	r1, r0, ...:9100	03	31	00	00	00	00	00	00	00	0	1
		dmem =	[00	34	33	31	00	00	00	00	00]		
03	subr	r1, r1, r0:d120	03	2e	00	00	00	00	00	00	00	0	0
04	addi	r0, 01, ...:4001	04	2e	00	00	00	00	00	00	00	0	0
05	comp	r0, 03, ...:3003	04	2e	00	00	00	00	00	00	00	1	0
06	jump	02, leq...:0 b02	04	2e	00	00	00	00	00	00	00	1	0
07	noop	0000	04	2e	00	00	00	00	00	00	00	1	0



RISC-Prozessor



RISC-Prozessoren

- Die in den letzten 30 Jahren neu entwickelten Prozessoren haben eine RISC⁶-Architektur.
- Die Befehlssätze sind (überwiegend) auf Befehle reduziert, die in einem Zeitslot in einer Pipeline abarbeitbar sind.
- Zuvor gebräuchliche Befehle für komplexere Operationen, die mehrere Zeitslots benötigen, wie das Inkrementieren einer Variablen im Speicher werden durch Befehlsfolgen nachgebildet.
- Pipeline-Verarbeitung hat ein nicht zu übertreffend günstiges Aufwand-Nutzen-Verhältnis.

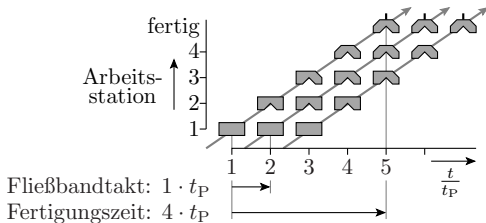
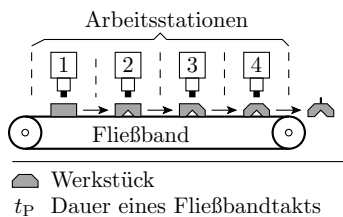
In diesem Abschnitt wird das Simulationsmodell des Minimalprozessors »MiPro« zu dem eines RISC-Prozessors mit Pipeline erweitert.

⁶RISC ist ein Akronym für **R**educed **I**nstruction **S**et **C**omputer.



Pipeline-Verarbeitung

Pipeline-Verarbeitung

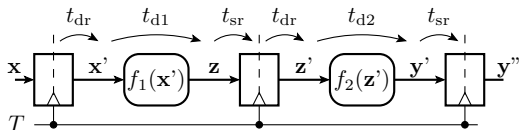
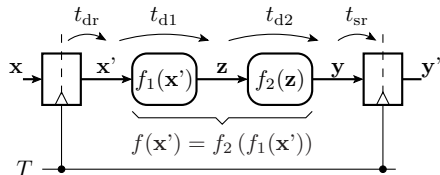


- Aufteilung einer Gesamtaufgabe in N_P Arbeitsschritte.
- Gesamtaufwand je Objekt: $N_P \cdot t_P$ (t_P – Periode Fließbandtakt)
- Je Takt wird ein Objekt fertig.

Tatsache:

Parallelverarbeitung ohne vervielfachten Aufwand.

Angewandt auf Hardware



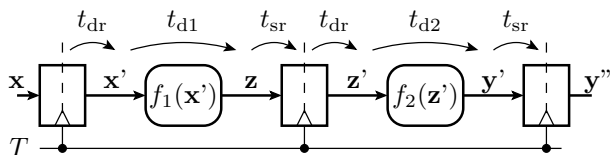
- t_{dr} Registerverzögerungszeit
- t_{d1} Verzögerungszeit von f_1
- t_{d2} Verzögerungszeit von f_2
- t_{sr} Registervorhaltezeit
- x Eingangssignal
- z Zwischensignal
- y Ausgangssignal
- ... ' abgetastetes Signal

minimale Taktperiode

- ohne Pipeline
 $t_{dr} + t_{sr} + t_{d1} + t_{d2}$
- mit Pipeline
 $t_{dr} + t_{sr} + \max(t_{d1}, t_{d2})$

- Aufwand: ein zusätzliches Register je Pipeline-Stufe.
- Viel billiger als mehrfache Hardware. Vorzugslösung für Parallelverarbeitung.

Beschreibung einer Pipeline in VHDL



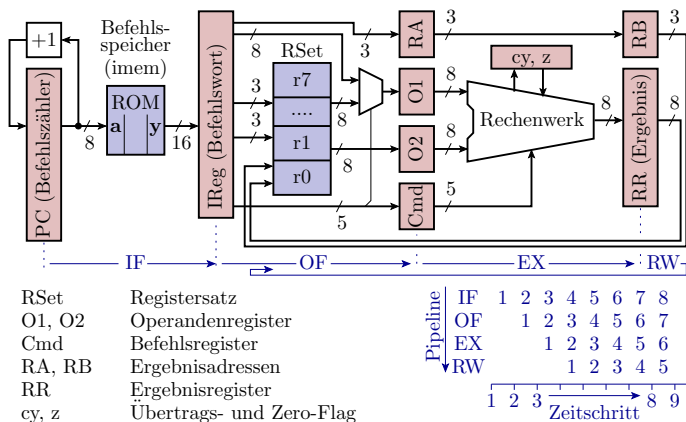
```

process (T)
  if rising_edge(T) then
    x_del <=x;
    z_del <=f1(x_del);
    y_del2<=f2(z_del);
  end if;
end process;
    
```

Register werden durch Signalzuweisungen, wenn »aktive Taktflanke« beschrieben.

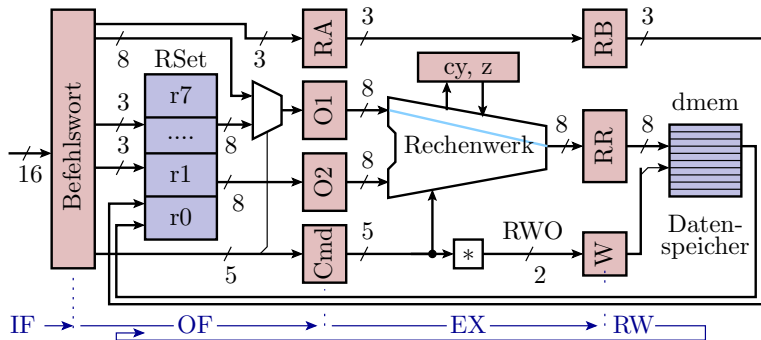


Verarbeitungs-Pipeline für unseren RISC-Prozessor



Pipeline-Phasen: IF – Instruction Fetch; OF – Operand Fetch; EX – Execute; RW – Result Write.

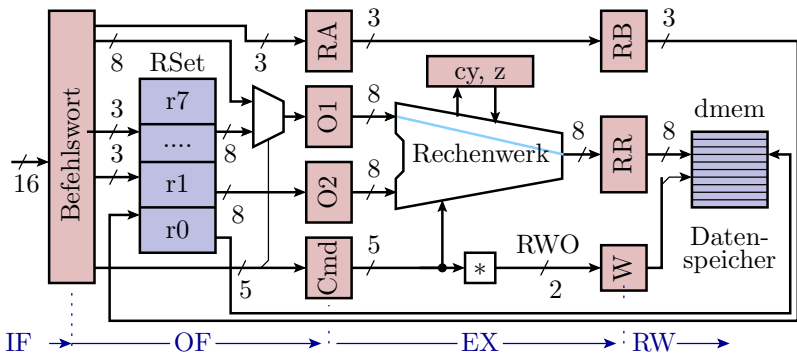
Modifizierte Pipeline für Ladebefehle



* Bildung des 2-Bit-RWO-Codes für die RW-Phase ($RWO \in \{-, R, L, S\}$ für kein Ergebnis speichern, Ergebnis in Register speichern, Lade- oder Speicheroperation).

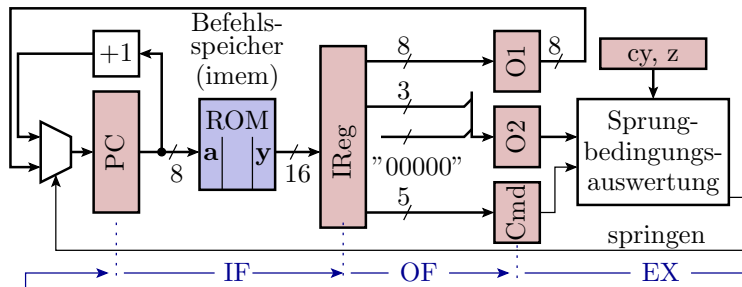
- EX-Phase: Adressrechnung, Weitergabe RWO-Code Laden.
- RW-Phase: Laden des Zielregisters mit Speicherinhalt.

Pipeline für Speicheroperationen



- EX-Phase: Adressrechnung, Weitergabe RWO-Code Speichern.
- RW-Phase: Kopieren des »Zielregisters« in den Speicher.

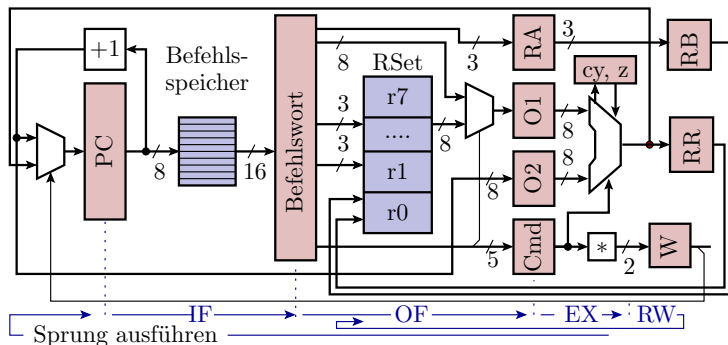
Sprung-Pipeline



```
jump imm,cond; if (b) pc = imm; else pc++;
```

- OF-Phase: Sprungziel in O1 und Sprungbedingung in O2 laden.
- EX-Phase: bedingte Übernahme von O1 in den Befehlszähler.
- RW-Phase: keine Operation.

Unterprogrammaufruf und Rücksprung



- OF-Phase: Direktwert (call) oder Registerinhalt (retu) in O1. Befehlszähler+1 in O2 (nur call), Zieladresse in RA (nur call).
- EX-Phase: Sprung. O2 => RR (nur call) und RA => RB.
- RW-Phase: Rücksprungadresse in Register speichern (nur call).



Pipeline-Auslastung



Pipeline-Auslastung

Verarbeitungsergebnisse werden erst zwei Takte nach Lesen der Operanden geschrieben. Verursacht Probleme. Beispiel:

Addition von vier Registerinhalten

Adr Befehl

0 B1: addr r0,r0,r1
 1 B2: addr r0,r0,r2
 2 B3: addr r0,r0,r3

* Register lesen
 **n* lesen und mit *n* überschreiben

BW Befehlswort

PC	BW	<i>r</i> ₀	<i>r</i> ₁	<i>r</i> ₂	<i>r</i> ₃	O1	O2	RR
0		7	2	11	17			
1	B1							
2	B2	*	*			7	2	
3	B3	*		*		7	11	9
4		*9			*	7	17	18
5		18						24
6		24						

In *r*₀ steht in Takt 5 *r*₀ + *r*₁, in Takt 6 *r*₀ + *r*₂ und in Takt 7 *r*₀ + *r*₃. Statt *r*₀ + *r*₁ + *r*₂ + *r*₃ wird *r*₀ + *r*₃, d.h. ein falsches Ergebnis berechnet.

Einfügen von noop^7 -Befehlen

		IF	OF				RW	EX		
Adr	Befehl	PC	BW	r_0	r_1	r_2	r_3	O1	O2	RR
0	B1: addr r0,r0,r1	0		7	2	11	17			
1	noop	1	B1							
2	noop	2	noop	*	*			7	2	
3	B2: addr r0,r0,r2	3	noop							9
4	noop	4	B2	9						
5	noop	5	noop	*		*		9	11	
6	B3: addr r0,r0,r3	6	noop							20
7	noop	7	B3	20						
8	noop	8	noop	*			*	20	17	
9	noop	9	noop							37
10	noop	10	noop	37						

* Register lesen
 * n lesen und mit n überschreiben

■ Die drei Additionen benötigen bis zum Abschluss 11 Takte.

⁷noop – **No Operation**, für den Beispielprozessor Op-Code 0x0000.

Optimierte Berechnungsreihenfolge

	IF	OF				RW	EX		
	PC	BW	r_0	r_1	r_2	r_3	O1	O2	RR
0	B1: addr r_0, r_0, r_1	0	7	2	11	17			
1	B2: addr r_2, r_2, r_3	1	B1						
2	noop	2	B2	*	*		7	2	
3	noop	3	noop		*	*	11	17	9
4	B3: addr r_0, r_0, r_2	4	noop	9					28
		5	B3		28				
		6	noop	*	*		9	28	
		7	noop						37
		8	noop	37					

* Register lesen
 * n lesen und mit n
 überschreiben

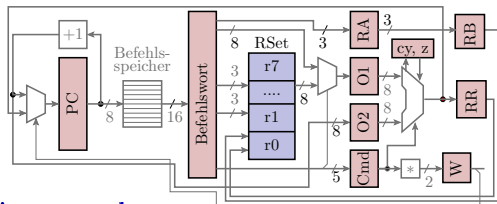
Die Additionen $r_0 + r_1$ und $r_2 + r_3$ können direkt nacheinander erfolgen. Ausführungszeit zwei Takte weniger.

Abarbeitungszeit und Größe von Programmen hängen erheblich von der Compiler-Optimierung ab.



Simulationsmodell

Prozessorzustand

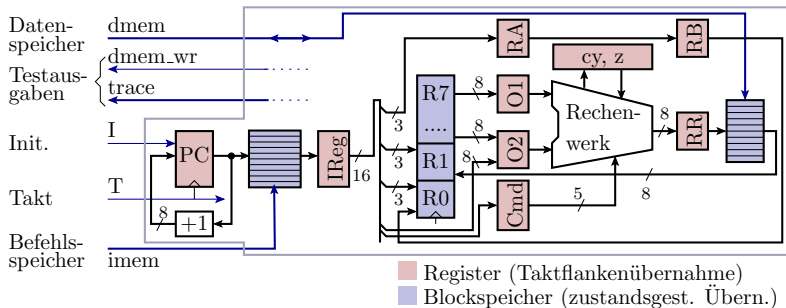


```
type t_proc_state is record
```

- PC : t_dat(7 downto 0); --- Befehlszähler
- IReg: t_dat(15 downto 0); --- Befehlswort
- Cmd: t_dat(4 downto 0); --- Befehlsregister
- O1: t_dat(7 downto 0); --- Operand 1
- O2: t_dat(7 downto 0); --- Operand 2
- cy: t_dat(0 downto 0); --- Übertrag
- z: t_dat(0 downto 0); --- Zero-Flag
- RR: t_dat(7 downto 0); --- Ergebnisregister
- RA: t_dat(2 downto 0); --- Ergebnisadresse EX
- RB: t_dat(2 downto 0); --- Ergebnisadresse RW
- W: t_dat(1 downto 0); --- RWO-Code
- RSet: t_dmem(0 to 7); --- Registersatz

```
end record;
```

Schnittstelle fast wie »MiPro«



```
entity risc is port(
```

```
  T, I: in bit;
```

```
  imem: in t_imem;
```

```
  dmem: inout t_dmem;
```

```
  ps: buffer t_proc_state; — Trace, Prozessorstatus
```

```
  dmem_wr: out boolean);
```

```
end entity;
```



```
entity risc is  
  generic (dm_init: t_dmem := (others => x"00"));  
  port (  
    T, I: in bit;  
    imem: in t_imem;  
    dmem: inout t_dmem;  
    ps: buffer t_proc_state;  
    dmem_wr: out boolean);  
end entity;
```

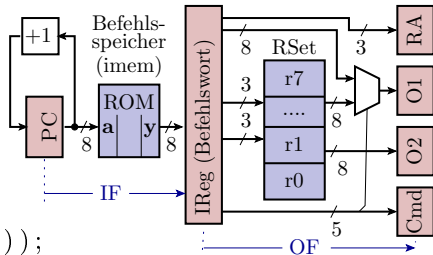
- Befehlsspeicher (imem): Vom Simulationsmodell nur lesbar.
- Datenspeicher (dmem): Vom Simulationsmodell les- und schreibbar.
- Prozessorzustand (ps): Testausgabe, von außen nur lesbar.
- »generic dm_init«: Optionaler Anfangswert für den Datenspeicher, um Programmbeispiele mit initialisiertem Datenspeicher simulieren zu können.

Beschreibungsrahmen

```
architecture a of risc is
begin
  process(T, I)
    variable res: bit_vector(8 downto 0);
    variable cmd: t_cmd;
  begin
    if I='1' then
      ps.PC <= x"00";
      dmem <= dm_init;
    elsif T'event and T='1' then
      <RT-Funktion des RISC-Prozessors>
    end if;
  end process;
end architecture;
```

- Durch den Pipeline-Einbau sind aus vielen MiPro-Variablen Register geworden.

IF- und OF-Phase



— *IF (Instruction Fetch)*

```
ps.PC    <= inc(ps.PC);
ps.IReg  <= imem(uint(ps.PC));
```

— *OF (Operand Fetch)*

```
ps.Cmd   <= ps.IReg(15 downto 11);
ps.RA    <= ps.IReg(10 downto 8);
cmd := t_cmd'val(uint(ps.IReg(15 downto 11)));
```

case cmd **is**

when noop =>

```
ps.O1 <= x"00";
```

```
ps.O2 <= x"00";
```

<ps.O1 und ps.O2 für die anderen Befehle siehe nächste Folie>

end case;



```
when jump =>
  ps.01 <= ps.IReg(7 downto 0);           -- Sprungziel
  ps.02 <= "00000" & ps.IReg(10 downto 8); -- Sprungbeding.
when call =>
  ps.01 <= ps.IReg(7 downto 0);           -- Sprungziel
  ps.02 <= ps.PC;                         -- Rücksprungadr.
when load|stor|ld_i =>
  ps.01 <= ps.IReg(7 downto 0);           -- Datensp.-Adr.
  ps.02 <= x"00";                         -- ungenutzt
when retu =>
  ps.01 <=ps.RSet(uint(ps.IReg(10 downto 8))); -- Sprungziel
  ps.02 <= x"00";                         -- ungenutzt
when move|ld_r|st_r|sh_l|sh_r|rotl|rotr|notr =>
  ps.01 <= ps.RSet(uint(ps.IReg(7 downto 5))); -- Operand
  ps.02 <= x"00";                         -- ungenutzt
when addr|adcr|subr|sbcr|andr|or_r|xorr =>
  ps.01 <= ps.RSet(uint(ps.IReg(7 downto 5))); -- R-Wert A
  ps.02 <= ps.RSet(uint(ps.IReg(4 downto 2))); -- R-Wert B
when others =>
  ps.01 <= ps.IReg(7 downto 0);           -- Konstante
  ps.02 <=ps.RSet(uint(ps.IReg(10 downto 8))); -- R-Wert
```

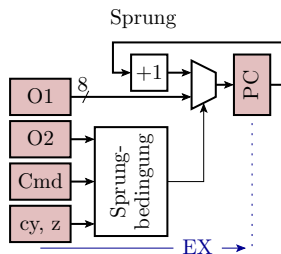
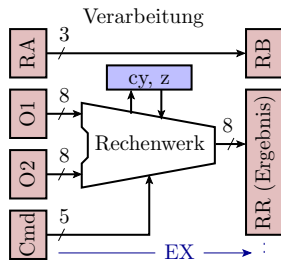


EX- (Ausführungs-) Phase

```

ps.RB <= ps.RA;
cmd := t_cmd'val(uint(ps.Cmd));
case cmd is
  when jump => — Sprung
    if test_jump_cond(ps.O2(2 downto
      0), ps.cy, ps.z) then
      ps.PC <= ps.O1;
    end if;
  when call => — Unterprogrammaufr.
    ps.PC <= ps.O1;
    ps.RR <= ps.O2;
  when retu => — Rücksprung
    ps.PC <= ps.O1;
  — Laden, Speichern, Kopieren
  when ld_i | load | ld_r | stor | st_r | move =>
    ps.RR <= ps.O1;

```



when `addr | addi` \Rightarrow — *Addition ohne Übertrag*

```
res := add(ps.O1, ps.O2, '0');
ps.RR <= res(7 downto 0);
ps.cy <= res(8);
ps.z <= is_zero(res(7 downto 0));
```

when `adcr | adci` \Rightarrow — *Addition mit Übertrag*

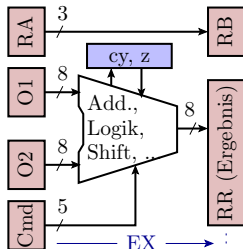
```
res := add(ps.O1, ps.O2, ps.cy);
ps.RR <= res(7 downto 0);
ps.cy <= res(8);
ps.z <= is_zero(res(7 downto 0));
```

when `<Subtraktion>` \Rightarrow

<Addition neg. Subtrahend und Übertrag>

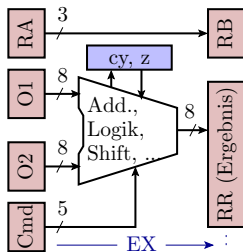
when `sh_l` \Rightarrow — *Linksverschiebung*

```
res := ps.O1 & '0';
ps.cy <= res(8);
ps.RR <= res(7 downto 0);
ps.Z <= is_zero(res(7 downto 0));
```

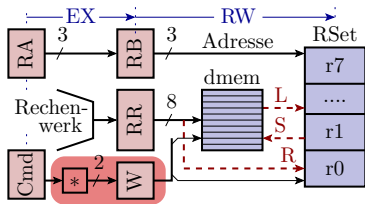




```
when <Rechtsverschiebung, Rotation> =>
  <Vergleichbare Operation wie sh_l>
when notr => — bitweise Negation
  ps.RR <= not ps.O1;
  ps.Z <= is_zero(not ps.O1);
when andr | andi => — bitweises UND
  ps.RR <= ps.O1 and ps.O2;
  ps.Z <= is_zero(ps.O1 and ps.O2);
when <ODER oder EXOR> =>
  <Vergleichbare Operation wie bei UND>
when others =>
  null;
end case;
```



Berechnung der RW-Operation für die RW-Phase



```
case cmd is
```

```
  when noop | jump | comp | cmpc | ret u =>
```

```
    ps.W <= "00"; -- RW-Phase: keine Operation
```

```
  when load | ld_r =>
```

```
    ps.W <= "10"; -- RW-Phase: RSet(RB) := dmем(RR)
```

```
  when stor | st_r =>
```

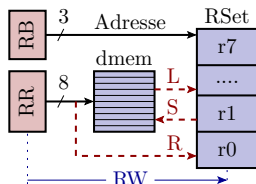
```
    ps.W <= "01"; -- RW-Phase: dmем(RR) := RSet(RB)
```

```
  when others =>
```

```
    ps.W <= "11"; -- RW-Phase: RSet(RB) := RR
```

```
end case;
```

RW-Phase (Ergebnis schreiben)



```
dmem_wr <= false;
```

```
case ps.W is
```

```
  when "11" =>                                     — Ergebnis schreiben
```

```
    ps.RSet(uint(ps.RB)) <= ps.RR;
```

```
  when "10" =>                                     — Ladeoperation
```

```
    ps.RSet(uint(ps.RB)) <= dmem(uint(ps.RR));
```

```
  when "01" =>                                     — Speicheroperation
```

```
    dmem(uint(ps.RR)) <= ps.RSet(uint(ps.RB));
```

```
    dmem_wr <= true;
```

```
  when "00" => null;                               — keine Operation
```

```
end case;
```




Testbeispiele



Addition

```
r0:r1 = 733A; r2:r3 = 13E7
```

```
r4:r5 = r0:r1 + r2:r3      (Ergebnis: 8721)
```

```
r4:r5 = 8623 - r4:r5      (Ergebnis: FF02)
```

PC	Befehlswort	01	02	RR	c	z	RA	RB	W	r0	r1	r2	r3	r4	r5
01	ld_i r1,3a,..	00	00	00	0	0	r0	r0	-	00	00	00	00	00	00
02	ld_i r0,73,..	3a	00	00	0	0	r1	r0	-	00	00	00	00	00	00
03	ld_i r3,e7,..	73	00	3a	0	0	r0	r1	R	00	00	00	00	00	00
04	ld_i r2,13,..	e7	00	73	0	0	r3	r0	R	00	3a	00	00	00	00
05	noop	13	00	e7	0	0	r2	r3	R	73	3a	00	00	00	00
06	addr r5,r1,r3	00	00	13	0	0	r0	r2	R	73	3a	00	e7	00	00
07	adcr r4,r0,r2	3a	e7	13	0	0	r5	r0	-	73	3a	13	e7	00	00
08	noop	73	13	21	1	0	r4	r5	R	73	3a	13	e7	00	00
09	subi r5,23,..	00	00	87	0	0	r0	r4	R	73	3a	13	e7	00	21
0a	sbc_i r4,86,..	23	21	87	0	0	r5	r0	-	73	3a	13	e7	87	21
0b	noop	86	87	02	0	0	r4	r5	R	73	3a	13	e7	87	21
0c	noop	00	00	ff	1	0	r0	r4	R	73	3a	13	e7	87	02
0d	noop	00	00	ff	1	0	r0	r0	-	73	3a	13	e7	ff	02



Testbeispiel mit Lade- und Speicherbefehlen

```
dmem(0x05) = 0x48;  
r1 = 0x06; dmem(r1)= 0x31;  
r3 = dmem(0x05);  
r4 = dmem(r1);
```

Programmiert für Pipeline-Verarbeitung:

```
0000: ld_i  r0,48,..; r0 = 0x48  
0001: stor  r0,05,..; dmem(0x05) = r0  
0002: ld_i  r1,06,..; r1 = 0x06 (Adresse)  
0003: noop  ..,..,..  
0004: ld_i  r2,31,..; r2 = 0x31 (Daten)  
0005: noop  ..,..,..  
0006: st_r  r2,r1,..; dmem(r1) = r2  
0007: load  r3,05,..; r3 = dmem(0x05)  
0008: ld_r  r4,r1,..; r4 = dmem(r1)  
0009: noop  ..,..,..
```



Programm-Trace mit Lade- und Speicherbefehlen

PC	Befehlswort	Cmd	01	02	RR	c	z	RA	RB	W	r0	r1	r2	r3	r4
01	ld_i r0,48,..	noop	00	00	00	0	0	r0	r0	-	00	00	00	00	00
02	stor r0,05,..	ld_i	48	00	00	0	0	r0	r0	-	00	00	00	00	00
03	ld_i r1,06,..	stor	05	00	48	0	0	r0	r0	R	00	00	00	00	00
04	noop	ld_i	06	00	05	0	0	r1	r0	S	48	00	00	00	00
05	ld_i r2,31,..	noop	00	00	06	0	0	r0	r1	R	48	00	00	00	00
dmem[0:7] =											[00 00 00 00 00 48 00 00]				
06	noop	ld_i	31	00	06	0	0	r2	r0	-	48	06	00	00	00
07	st_r r2,r1,..	noop	00	00	31	0	0	r0	r2	R	48	06	00	00	00
08	load r3,05,..	st_r	06	00	31	0	0	r2	r0	-	48	06	31	00	00
09	ld_r r4,r1,..	load	05	00	06	0	0	r3	r2	S	48	06	31	00	00
0a	noop	ld_r	06	00	05	0	0	r4	r3	L	48	06	31	00	00
dmem[0:7] =											[00 00 00 00 00 48 31 00]				
0b	noop	noop	00	00	06	0	0	r0	r4	L	48	06	31	48	00
0c	noop	noop	00	00	06	0	0	r0	r0	-	48	06	31	48	31



Beispielprogramm mit Schleife

```
r0 = 0x01; r1 = 0x34;
```

```
M: dmem(r0) = r1;
```

```
r1 = r1 - r0;
```

```
r0 = r0 + 0x01;
```

```
wenn r0 <= 0x3 springe zu M; (3 Schleifendurchläufe)
```

Programmiert für Pipeline-Verarbeitung:

```
0x00: ld_i  r0,01,.. ; r0 = 0x01
```

```
0x01: ld_i  r1,34,.. ; r1 = 0x34
```

```
0x02: noop  ..,..,.. ; warte, bis r0 geladen ist
```

```
0x03: comp  r0,03,.. ; vergleiche r0 mit 0x03
```

```
0x04: st_r  r1,r0,.. ; dmem(r0) = r1;
```

```
0x05: jump  02,lth.. ; wenn r0 < 0x3 springe zu 0x2
```

```
0x06: addi  r0,01,.. ; r0 = r0+1 (Delayslot 1)
```

```
0x07: subr  r1,r1,r0 ; r1 = r1-r0 (Delayslot 2)
```

```
0x08: noop  ..,..,.. ; 1. Anw. nach der Schleife
```



Programm-Trace mit Schleife

PC	Befehlswort	Cmd	01	02	RR	c	z	RA	RB	W	r0	r1	r2	r3	r4
01	ld_i r0,01,..	noop	00	00	00	0	0	r0	r0	-	00	00	00	00	00

1. Schleifendurchlauf:

02	ld_i r1,34,..	ld_i	01	00	00	0	0	r0	r0	-	00	00	00	00	00
03	noop	ld_i	34	00	01	0	0	r1	r0	R	00	00	00	00	00
04	comp r0,03,..	noop	00	00	34	0	0	r0	r1	R	01	00	00	00	00
05	st_r r1,r0,..	comp	03	01	34	0	0	r0	r0	-	01	34	00	00	00
06	jump 02,1th..	st_r	01	00	02	0	0	r1	r0	-	01	34	00	00	00
07	addi r0,01,..	jump	02	07	01	0	0	r7	r1	S	01	34	00	00	00

2. Schleifendurchlauf:

02	subr r1,r1,r0	addi	01	01	01	0	0	r0	r7	-	01	34	00	00	00
----	---------------	------	----	----	----	---	---	----	----	---	----	----	----	----	----

Abschluss 1. Schreibop.: dmem[0:7]=[00 34 00 00 00 00 00]

03	noop	subr	34	01	02	0	0	r1	r0	R	01	34	00	00	00
04	comp r0,03,..	noop	00	00	33	0	0	r0	r1	R	02	34	00	00	00
05	st_r r1,r0,..	comp	03	02	33	0	0	r0	r0	-	02	33	00	00	00



Fortsetzung

```

PC| Befehlswort | Cmd | 01|02|RR|c|z|RA|RB|W|r0 r1 r2 r3 r4
05| Fortsetzung nach Laden des Spungbefehts
06| jump 02,lth..|st_r|02|00|01|0|0|r1|r0|-|02 33 00 00 00
07| addi r0,01,..|jump|02|07|02|0|0|r7|r1|S|02 33 00 00 00

```

3. Schleifendurchlauf:

```
02| subr r1,r1,r0|addi|01|02|02|0|0|r0|r7|-|02 33 00 00 00
```

Abschluss 2. Schreibop.: dmem[0:7]=[00 34 33 00 00 00 00]

```
03| noop .....,..|subr|33|02|03|0|0|r1|r0|R|02 33 00 00 00
```

```
04| comp r0,03,..|noop|00|00|31|0|0|r0|r1|R|03 33 00 00 00
```

```
05| st_r r1,r0,..|comp|03|03|31|0|0|r0|r0|-|03 31 00 00 00
```

```
06| jump 02,lth..|st_r|03|00|00|0|1|r1|r0|-|03 31 00 00 00
```

```
07| addi r0,01,..|jump|02|07|03|0|1|r7|r1|S|03 31 00 00 00
```

```
08| subr r1,r1,r0|addi|01|03|03|0|1|r0|r7|-|03 31 00 00 00
```

Abschluss 3. Schreibop.: dmem[0:7]=[00 34 33 31 00 00 00]

```
09| noop .....,..|subr|31|03|04|0|0|r1|r0|R|03 31 00 00 00
```

```
0a| noop .....,..|noop|00|00|2e|0|0|r0|r1|R|04 31 00 00 00
```



Unterprogrammaufruf

Das nachfolgende Unterprogramm bekommt in `dmem(1)` einen Wert und in `r1` eine Adresse übergeben und schreibt den übergebenen Wert + `0x13` in den Datenspeicher auf die Übergabeadresse:

```
0000: ld_i  r0,35,..           Unterprogramm:
0001: stor  r0,01,..           0010: load r3,01,..
0002: ld_i  r1,02,..           0013: addi r3,13,..
0003: call  r5,10,..           0014: st_r r3,r1,..
0006: ld_i  r0,46,..           0015: retu r5,..,..
0007: stor  r0,01,..
0008: ld_i  r1,04,..           (Restliche Befehle noop)
0009: call  r5,10,..
000c: jump 0c,alw.. ; Halt in Endlosschleife
```

Testbeispiele:

- Aufruf mit `dmem(1)=0x35` und `r1=2`, Ergebnis `dmem(2)=0x48`
- Aufruf mit `dmem(1)=0x46` und `r1=4`, Ergebnis `dmem(4)=0x59`



Programm-Trace mit einer Schleife

PC	Befehlswort	Cmd	01	02	RR	RA	RB	W	r0	r1	r2	r3	r4	r5
01	ld_i r0,35,..	noop	00	00	00	r0	r0	-	00	00	00	00	00	00
02	stor r0,01,..	ld_i	35	00	00	r0	r0	-	00	00	00	00	00	00
03	ld_i r1,02,..	stor	01	00	35	r0	r0	R	00	00	00	00	00	00

Unterprogrammaufruf mit $dmem(1)=0x35$ und $r1=2$

04	call r5,10,..	ld_i	02	00	01	r1	r0	S	35	00	00	00	00	00
05	noop	call	10	04	02	r5	r1	R	35	00	00	00	00	00

Abschluss Schreibop. Aufruf 1: $dmem = [00\ 35\ 00\ 00\ 00\ ..]$

10	noop	noop	00	00	04	r0	r5	R	35	02	00	00	00	00
11	load r3,01,..	noop	00	00	04	r0	r0	-	35	02	00	00	00	04
12	noop	load	01	00	04	r3	r0	-	35	02	00	00	00	04
13	noop	noop	00	00	01	r0	r3	L	35	02	00	00	00	04
14	addi r3,13,..	noop	00	00	01	r0	r0	-	35	02	00	35	00	04
15	st_r r3,r1,..	addi	13	35	01	r3	r0	-	35	02	00	35	00	04
16	retu r5,..,..	st_r	02	00	48	r3	r3	R	35	02	00	35	00	04

...

1 Zeitslot bis Rücksprung und 2 bis Speicherop. fertig



```

PC| Befehlswort | Cmd | 01|02|RR|RA|RB|W|r0 r1 r2 r3 r4 r5
17|noop .....,..|retu|04|00|02|r5|r3|S|35 02 00 48 00 04
04|noop .....,..|noop|00|00|02|r0|r5|-|35 02 00 48 00 04
Abschluss Schreibop. UP1: dmem = [00 35 48 00 00 00 ..]
05|noop .....,..|noop|00|00|02|r0|r0|-|35 02 00 48 00 04
06|noop .....,..|noop|00|00|02|r0|r0|-|35 02 00 48 00 04
07|ld_i r0,46,..|noop|00|00|02|r0|r0|-|35 02 00 48 00 04
08|stor r0,01,..|ld_i|46|00|02|r0|r0|-|35 02 00 48 00 04
09|ld_i r1,04,..|stor|01|00|46|r0|r0|R|35 02 00 48 00 04

```

Unterprogrammaufruf mit dmem(1)=0x46 und r1=4

```

0a|call r5,10,..|ld_i|04|00|01|r1|r0|S|46 02 00 48 00 04
0b|noop .....,..|call|10|0a|04|r5|r1|R|46 02 00 48 00 04
Abschluss Schreibop. Aufruf 2: dmem = [00 46 48 00 00 ..]
10|noop .....,..|noop|00|00|0a|r0|r5|R|46 04 00 48 00 04
11|load r3,01,..|noop|00|00|0a|r0|r0|-|46 04 00 48 00 0a
12|noop .....,..|load|01|00|0a|r3|r0|-|46 04 00 48 00 0a
13|noop .....,..|noop|00|00|01|r0|r3|L|46 04 00 48 00 0a
14|addi r3,13,..|noop|00|00|01|r0|r0|-|46 04 00 46 00 0a
15|st_r r3,r1,..|addi|13|46|01|r3|r0|-|46 04 00 46 00 0a
16|retu r5,..,..|st_r|04|00|59|r3|r3|R|46 04 00 46 00 0a

```



```

PC| Befehlswort | Cmd | 01|02|RR|RA|RB|W|r0 r1 r2 r3 r4 r5
... 1 Zeitslot bis Rückspr. und 2 bis Speicherop. fertig
17|noop .....,..|retu|0a|00|04|r5|r3|S|46 04 00 59 00 0a
0a|noop .....,..|noop|00|00|04|r0|r5|-|46 04 00 59 00 0a
Abschluss Schreibop. UP2: dmem = [00 46 48 00 59 00 ..]
0b|noop .....,..|noop|00|00|04|r0|r0|-|46 04 00 59 00 0a
0c|noop .....,..|noop|00|00|04|r0|r0|-|46 04 00 59 00 0a

```

Endlosschleife mit 2 Delay-Slots

```

0d|jump 0c,alw..|noop|00|00|04|r0|r0|-|46 04 00 59 00 0a
0e|noop .....,..|jump|0c|01|04|r1|r0|-|46 04 00 59 00 0a
0c|noop .....,..|noop|00|00|04|r0|r1|-|46 04 00 59 00 0a
0d|jump 0c,alw..|noop|00|00|04|r0|r0|-|46 04 00 59 00 0a

```



Abschlussbemerkungen

Der Entwurf eines Prozessors mit Pipeline ist für Studierende keine unlösbare Aufgabe:

- Festlegung der Pipeline-Abläufe für alle Befehlsarten.
- Zusammenstellen aller Register-Transfer-Operationen.
- Beschreibung in VHDL.
- Synthese. FPGA-Programmieren. Test.

Die größeren Herausforderungen sind:

- Ein strukturierter Entwurfsablauf, damit der Entwurf, die Dokumentationen, ... fertig werden.
- Ein prüfgerechter Entwurf, um den Prozessor simulieren und testen zu können.
- Die Werkzeuge für die Programmierung (Assembler, Dissassembler, ...)