

WGR-V Verilog Doku

Inhaltsverzeichnis

- **Datei:** rtl/alu.v
 - Modul: alu
- **Datei:** rtl/cpu.v
 - Modul: cpu
- **Datei:** rtl/defines.v
 - Modul: Unknown
 - Modul: Unknown
 - Modul: Unknown
 - Modul: Unknown
 - Modul: Unknown
 - Modul: Unknown
 - Modul: Unknown
- **Datei:** rtl/ram/ram_ram.v
 - Modul: ram_ram
- **Datei:** rtl/ram/ram_spi.v
 - Modul: ram_spi
- **Datei:** rtl/ram/mb85rs64v.v
 - Modul: mb85rs64v
- **Datei:** rtl/memory.v
 - Modul: memory
- **Datei:** rtl/peripherals/debug_module.v
 - Modul: debug_module
- **Datei:** rtl/peripherals/fifo.v
 - Modul: fifo
- **Datei:** rtl/peripherals/gpio.v
 - Modul: gpio
- **Datei:** rtl/peripherals/peripheral_bus.v
 - Modul: peripheral_bus
- **Datei:** rtl/peripherals/pwm_timer.v
 - Modul: pwm_timer
- **Datei:** rtl/peripherals/seq_divider.v
 - Modul: seq_divider
- **Datei:** rtl/peripherals/seq_multiplier.v
 - Modul: seq_multiplier
- **Datei:** rtl/peripherals/spi.v
 - Modul: spi
- **Datei:** rtl/peripherals/system_timer.v
 - Modul: system_timer
- **Datei:** rtl/peripherals/uart.v
 - Modul: uart
- **Datei:** rtl/peripherals/ws2812b.v
 - Modul: ws2812b
- **Datei:** rtl/register_file.v
 - Modul: register_file
- **Datei:** rtl/wgr_v_max.v
 - Modul: wgr_v_max

Datei: rtl/alu.v

Modul: alu

Kurzbeschreibung: Arithmetisch-Logische Einheit (ALU) für 32-Bit-Operationen.

Dieses Modul führt verschiedene arithmetische und logische Operationen auf zwei 32-Bit-Operanden durch, basierend auf einem 4-Bit-Steuersignal. Zusätzlich erzeugt es ein Zero-Flag, falls das Ergebnis 0 ist. Unterstützte Operationen (OP...): - ADD (4'b0000) Addieren - SUB (4'b0001) Subtrahieren - AND (4'b0010) Bitwise UND - OR (4'b0011) Bitwise ODER - XOR (4'b0100) Bitwise EXKLUSIVE ODER - SLL (4'b0101) Bitweises Shift-Left - SRL (4'b0110) Bitweises Shift-Right (logisch) -

SRA (4'b0111) Vorzeichenbehaftetes, bitweises Shift-Right (arithmetisch) - SLT (4'b1000) Vergleich (signed) - SLTU (4'b1001) Vergleich (unsigned)

Lokale Parameter:

- OP_ADD = 4'b0000
- OP_SUB = 4'b0001
- OP_AND = 4'b0010
- OP_OR = 4'b0011
- OP_XOR = 4'b0100
- OP_SLL = 4'b0101
- OP_SRL = 4'b0110
- OP_SRA = 4'b0111
- OP_SLT = 4'b1000
- OP_SLTU = 4'b1001

Eingänge:

- [31:0] operand1 Erstes Eingangsoperand
- [31:0] operand2 Zweites Eingangsoperand
- [3:0] operation 4-Bit-Operationscode

Ausgänge:

- reg [31:0] result Ergebnis des Rechengvorgangs
- wire zero Signal, falls result=0

Source Code

```
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module alu (
    input wire [31:0] operand1,
    input wire [31:0] operand2,
    input wire [ 3:0] operation,
    output reg [31:0] result,
    output wire      zero
);

// -----
// Operationen als lokale Konstanten
// -----
localparam OP_ADD  = 4'b0000;
localparam OP_SUB  = 4'b0001;
localparam OP_AND  = 4'b0010;
localparam OP_OR   = 4'b0011;
localparam OP_XOR  = 4'b0100;
localparam OP_SLL  = 4'b0101;
localparam OP_SRL  = 4'b0110;
localparam OP_SRA  = 4'b0111;
localparam OP_SLT  = 4'b1000;
localparam OP_SLTU = 4'b1001;

// -----
// Vorzeichenbehaftete Interpretationen der Operanden
// -----
wire signed [31:0] sign_op1;
wire signed [31:0] sign_op2;

assign sign_op1 = $signed(operand1);
assign sign_op2 = $signed(operand2);
```

```

assign zero = (result == 32'd0);

// -----
// Hauptzuweisung für result abhängig von operation
// -----
always @( * )
begin
    case (operation)

        OP_ADD:
            result = operand1 + operand2;

        OP_SUB:
            result = sign_op1 - sign_op2;

        OP_AND:
            result = operand1 & operand2;

        OP_OR:
            result = operand1 | operand2;

        OP_XOR:
            result = operand1 ^ operand2;

        OP_SLL:
            result = operand1 << operand2[4:0];

        OP_SRL:
            result = operand1 >> operand2[4:0];

        OP_SRA:
            result = sign_op1 >>> operand2[4:0];

        OP_SLT:
            result = (sign_op1 < sign_op2) ? 32'd1 : 32'd0;

        OP_SLTU:
            result = (operand1 < operand2) ? 32'd1 : 32'd0;

        default:
            result = 32'd0;

    endcase
end

endmodule

```

Datei: rtl/cpu.v

Modul: cpu

Kurzbeschreibung: Einfacher CPU-Kern mit RISC-V-ähnlichem Befehlsformat.

Dieser CPU-Kern holt Instruktionen aus dem Speicher (memory), decodiert sie (Opcode, Funct3, Funct7, Registeradressen etc.) und führt sie mittels einer ALU aus. Lese- und Schreibzugriffe auf Speicher oder Peripherie erfolgen über die Signale `address`, `write_data`, `we`, `re`, `read_data` und `mem_busy`. Der CPU-Core durchläuft eine einfache 5-stufige Pipeline in zeitversetzten Zuständen (FETCH, DECODE, EXECUTE, MEMORY, WRITEBACK), allerdings sequentiell (kein echtes Pipeline-Overlap). Hier eine Kurzbeschreibung der Zustände: - **FETCH** : Eine Instruktion wird über `re=1` im Speicher angefordert. - **WAIT** : Auf das Eintreffen von `read_data` wird gewartet. - **DECODE** : Instruktionsbits (`opcode`, `funct3`, `funct7`,

rs1, rs2, rd usw.) extrahieren. - EXECUTE: ALU-Operationen durchführen, Sprungadressen berechnen usw. - MEMORY : Lese-/Schreibzugriffe bei LOAD/STORE - MEMHALT: Warten, bis der Speicher- oder Peripheriezugriff abgeschlossen ist. - RMW_WAIT & STORE_RMW: Dienen dem atomaren Lesen-Schreiben (Byte/16-Bit) bei LOAD/STORE. - WRITEBACK: Ergebnis in Register ablegen (falls erforderlich) und PC inkrementieren oder Branch ausführen. Die ALU-Operationen nutzen ein 4-Bit-Steuersignal (z. B. OP_ADD), das anhand von opcode/funct3/funct7 generiert wird.

Lokale Parameter:

- FETCH = 4'd0
- WAIT = 4'd1
- DECODE = 4'd2
- EXECUTE = 4'd3
- MEMORY = 4'd4
- MEMHALT = 4'd5
- WRITEBACK= 4'd6
- RMW_WAIT = 4'd7
- STORE_RMW= 4'd8

Eingänge:

- clk Systemtakt
- rst_n Asynchroner, aktiver-LOW Reset
- [31:0] read_data Daten, die bei re=1 aus dem Speicher gelesen werden
- wire mem_busy Signalisiert, ob der Speicherzugriff noch in Arbeit ist

Ausgänge:

- [31:0] address Speicheradresse für Lese-/Schreiboperationen
- reg [31:0] write_data Daten, die bei we=1 in den Speicher geschrieben werden
- reg we Write-Enable
- reg re Read-Enable

Source Code

```
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module cpu (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    output wire [31:0] address,
    output reg  [31:0] write_data,
    input wire [31:0] read_data,
    output reg      we,
    output reg      re,
    input wire      mem_busy
);

    // -----
    // Definition der Zustände / 5-stufige Pipeline
    // -----

    localparam [3:0]
        FETCH      = 4'd0,
        WAIT       = 4'd1,
        DECODE     = 4'd2,
        EXECUTE    = 4'd3,
        MEMORY     = 4'd4,
        MEMHALT    = 4'd5,
        WRITEBACK  = 4'd6,
        RMW_WAIT   = 4'd7,
        STORE_RMW  = 4'd8;
```

```

// -----
// ALU-Operationscodes
// -----
localparam [3:0]
    OP_ADD      = 4'b0000,
    OP_SUB      = 4'b0001,
    OP_AND      = 4'b0010,
    OP_OR       = 4'b0011,
    OP_XOR      = 4'b0100,
    OP_SLL      = 4'b0101,
    OP_SRL      = 4'b0110,
    OP_SRA      = 4'b0111,
    OP_SLT      = 4'b1000,
    OP_SLTU     = 4'b1001;

// -----
// Funct3-Codes
// -----
localparam [2:0]
    F3_ADD_SUB  = 3'b000,
    F3_SLL      = 3'b001,
    F3_SLT      = 3'b010,
    F3_SLTU     = 3'b011,
    F3_XOR      = 3'b100,
    F3_SRL_SRA  = 3'b101,
    F3_OR       = 3'b110,
    F3_AND      = 3'b111;

localparam [2:0]
    F3_LB       = 3'b000,
    F3_LH       = 3'b001,
    F3_LW       = 3'b010,
    F3_LBU      = 3'b100,
    F3_LHU      = 3'b101;

localparam [2:0]
    F3_SB       = 3'b000,
    F3_SH       = 3'b001,
    F3_SW       = 3'b010;

localparam [2:0]
    F3_BEQ      = 3'b000,
    F3_BNE      = 3'b001,
    F3_BLT      = 3'b100,
    F3_BGE      = 3'b101,
    F3_BLTU     = 3'b110,
    F3_BGEU     = 3'b111;

// -----
// Funct7 / OPCODE
// -----
localparam [6:0]
    F7_ADD      = 7'b0000000,
    F7_SUB      = 7'b0100000,
    F7_SLL      = 7'b0000000,
    F7_SLT      = 7'b0000000,
    F7_SLTU     = 7'b0000000,
    F7_XOR      = 7'b0000000,
    F7_SRL      = 7'b0000000,

```

```

F7_SRA      = 7'b0100000,
F7_OR       = 7'b0000000,
F7_AND      = 7'b0000000;

localparam [6:0]
  OPCODE_LUI      = 7'b0110111,
  OPCODE_AUIPC    = 7'b0010111,
  OPCODE_JAL      = 7'b1101111,
  OPCODE_JALR     = 7'b1100111,
  OPCODE_BRANCH   = 7'b1100011,
  OPCODE_LOAD     = 7'b0000011,
  OPCODE_STORE    = 7'b0100011,
  OPCODE_OP_IMM   = 7'b0010011,
  OPCODE_OP       = 7'b0110011;

// -----
// CPU-Register (PC, Zwischenspeicher etc.)
// -----
reg [31:0] PC;
reg [31:0] inst;
reg [31:0] address_reg;
reg [31:0] reg_w_data;
reg [31:0] alu_operand1;
reg [31:0] alu_operand2;
reg [31:0] imm;
reg [ 4:0] reg_write_addr;
reg [ 3:0] alu_op;
reg [ 3:0] state;
reg [ 3:0] next_state;
reg [ 1:0] mem_offset;
reg       reg_we;

// -----
// ALU-Anbindung
// -----
wire [31:0] rs1_data;
wire [31:0] rs2_data;
wire [31:0] alu_result;
wire [ 6:0] opcode;
wire [ 6:0] funct7;
wire [ 4:0] rs1;
wire [ 4:0] rs2;
wire [ 4:0] rd;
wire [ 2:0] funct3;
wire       alu_zero;

// -----
// Zuweisungen
// -----
assign address = address_reg;

assign opcode = inst[ 6: 0];
assign funct7 = inst[31:25];
assign rs1    = inst[19:15];
assign rs2    = inst[24:20];
assign rd     = inst[11: 7];
assign funct3 = inst[14:12];

// -----
// Registerdatei-Instanziierung

```

```

// -----
register_file reg_file (
    .rst_n      (rst_n),
    .clk        (clk),
    .we         (reg_we),
    .rd         (reg_write_addr),
    .rs1        (rs1),
    .rs2        (rs2),
    .rd_data    (reg_w_data),
    .rs1_data   (rs1_data),
    .rs2_data   (rs2_data)
);

// -----
// ALU-Instanziierung
// -----
alu alu_inst (
    .operand1   (alu_operand1),
    .operand2   (alu_operand2),
    .operation   (alu_op),
    .result     (alu_result),
    .zero       (alu_zero)
);

// -----
// Erzeugung von 'imm' aus der Instruktion (verschiedene Typen)
// -----
always @( * )
begin

    case (opcode)

        OP_CODE_OP_IMM,
        OP_CODE_LOAD,
        OP_CODE_JALR:
            // Sign extension für 12-Bit
            imm = {{20{inst[31]}}, inst[31:20]};

        OP_CODE_STORE:
            // Sign extension für 12-Bit (Split in inst[31:25] & inst[11:7])
            imm = {{20{inst[31]}},
                    inst[31:25],
                    inst[11:7]};

        OP_CODE_BRANCH:
            // Sign extension + Bit[7] + Bit[30:25] + Bit[11:8] + 0
            imm = {{20{inst[31]}},
                    inst[7],
                    inst[30:25],
                    inst[11:8],
                    1'b0};

        OP_CODE_LUI,
        OP_CODE_AUIPC:
            imm = {inst[31:12], 12'b0};

        OP_CODE_JAL:
            // 20-Bit Sign extension, plus die gemischten Bits (inst[31], inst[19:12], inst[20], inst[30:21], 0)
            imm = {{11{inst[31]}},
                    inst[31],

```

```

        inst[19:12],
        inst[20],
        inst[30:21],
        1'b0};

    default: imm = 32'd0;

endcase
end

// -----
// Nächster Zustand (next_state) basierend auf state + Signalen
// -----
always @( * )
begin
    case (state)

        FETCH:
            next_state = WAIT;

        WAIT:
            next_state = (mem_busy || re) ? WAIT : DECODE;

        DECODE:
            next_state = EXECUTE;

        EXECUTE:
        begin
            // Bei LOAD/STORE -> in den MEMORY-Zustand
            if (opcode == OPCODE_LOAD || opcode == OPCODE_STORE)
                next_state = MEMORY;
            else
                next_state = WRITEBACK;
        end

        MEMORY:
        begin
            if (opcode == OPCODE_LOAD)
                next_state = (mem_busy || re) ? MEMORY : MEMHALT;
            else
                if (opcode == OPCODE_STORE)
                begin
                    if (funct3 == F3_SW)
                        next_state = (mem_busy || re) ? MEMORY : MEMHALT;
                    else
                        // Byte/Halfword => Read-Modify-Write
                        if (funct3 == F3_SB || funct3 == F3_SH)
                            next_state = (mem_busy || re) ? MEMORY : RMW_WAIT;
                        else
                            next_state = (mem_busy || re) ? MEMORY : MEMHALT;
                    end
                end
                else
                    next_state = WRITEBACK;
            end

        RMW_WAIT:
            // Warte auf Ende des Speicherzugriffs
            next_state = (mem_busy || re || we) ? RMW_WAIT : STORE_RMW;
        STORE_RMW:
            // Warte erneut bis busy + re/we durch sind

```



```

    next_state = (mem_busy || re || we) ? STORE_RMW : MEMHALT;
MEMHALT:
    // Warte bis busy und re/we beendet
    next_state = (mem_busy || re || we) ? MEMHALT : WRITEBACK;
WRITEBACK:
    next_state = FETCH;
default:
    next_state = FETCH;

endcase
end

// -----
// Zustandsübergänge und Ausführung
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        state      <= FETCH;
        PC         <= 32'h00004000; // Startadresse
        inst       <= 32'h00000013;
        reg_we     <= 1'b0;
        re         <= 1'b0;
        we         <= 1'b0;
        write_data <= 32'd0;
        address_reg <= 32'h00004000;
        mem_offset <= 2'b00;
    end
    else
    begin
        state      <= next_state;
        reg_we     <= 1'b0; // Standard: kein Registerwrite
        write_data <= 32'd0; // Standard: Kein Schreiben
        re         <= 1'b0;
        we         <= 1'b0;

        case (state)

            // -----
            // FETCH: Instruktion anfordern (re=1, address=PC)
            // -----
            FETCH:
            begin
                re      <= 1'b1;
                address_reg <= PC;
            end

            // -----
            // WAIT: Warten auf read_data vom Speicher
            // -----
            WAIT:
            begin
                re      <= 1'b0;
            end

            // -----
            // DECODE: Instruktion in 'inst' puffer, parse
            // -----

```

```

DECODE:
begin
    inst <= read_data;
end

// -----
// EXECUTE: Berechne ALU-Operation (ALU-Setup)
// -----
EXECUTE:
begin
    case (opcode)

        OPкод_OP:
        begin
            alu_operand1 <= rs1_data;
            alu_operand2 <= rs2_data;

            case (funct3)

                F3_ADD_SUB:
                    alu_op <= funct7[5] ? OP_SUB : OP_ADD;

                F3_AND:
                    alu_op <= OP_AND;

                F3_OR:
                    alu_op <= OP_OR;

                F3_XOR:
                    alu_op <= OP_XOR;

                F3_SLL:
                    alu_op <= OP_SLL;

                F3_SRL_SRA:
                    alu_op <= funct7[5] ? OP_SRA : OP_SRL;

                F3_SLT:
                    alu_op <= OP_SLT;

                F3_SLTU:
                    alu_op <= OP_SLTU;

                default:
                    alu_op <= 4'b1111; //NOP ausführen

            endcase
        end

        OPкод_OP_IMM:
        begin
            alu_operand1 <= rs1_data;

            if (funct3 == F3_SLL || funct3 == F3_SRL_SRA)
                alu_operand2 <= inst[24: 20];
            else
                alu_operand2 <= imm;
            end

            case (funct3)

```

```

F3_ADD_SUB:
    alu_op <= OP_ADD;

F3_AND:
    alu_op <= OP_AND;

F3_OR:
    alu_op <= OP_OR;

F3_XOR:
    alu_op <= OP_XOR;

F3_SLT:
    alu_op <= OP_SLT;

F3_SLTU:
    alu_op <= OP_SLTU;

F3_SLL:
    alu_op <= OP_SLL;

F3_SRL_SRA:
    alu_op <= (inst[30]) ? OP_SRA : OP_SRL;

default:
    alu_op <= 4'b1111;

endcase
end

OPCODE_LOAD:
begin
    alu_operand1 <= rs1_data;
    alu_operand2 <= imm;
    alu_op <= OP_ADD;
end

OPCODE_STORE:
begin
    alu_operand1 <= rs1_data;
    alu_operand2 <= imm;
    alu_op <= OP_ADD;
end

OPCODE_JAL:
begin
    alu_operand1 <= PC;
    alu_operand2 <= imm;
    alu_op <= OP_ADD;
end

OPCODE_JALR:
begin
    alu_operand1 <= rs1_data;
    alu_operand2 <= imm;
    alu_op <= OP_ADD;
end

OPCODE_BRANCH:
begin

```

```

        alu_operand1 <= rs1_data;
        alu_operand2 <= rs2_data;
        alu_op        <= OP_SUB;
    end

    OPCODE_AUIPC:
    begin
        alu_operand1 <= PC;
        alu_operand2 <= imm;
        alu_op        <= OP_ADD;
    end

    OPCODE_LUI:
    begin
        alu_operand1 <= 32'd0;
        alu_operand2 <= imm;
        alu_op        <= OP_ADD;
    end

    default:
    begin
        alu_operand1 <= 32'd0;
        alu_operand2 <= 32'd0;
        alu_op        <= 4'b1111;
    end

endcase
end

// -----
// MEMORY: Lese-/Schreibzugriff
// -----
MEMORY:
begin
    if (opcode == OPCODE_LOAD)
    begin
        re        <= 1'b1;
        address_reg <= alu_result & 32'hFFFFFFFC;
        mem_offset <= alu_result[1: 0];
    end
    else
    begin
        if (opcode == OPCODE_STORE)
        begin
            if (funct3 == F3_SW)
            begin
                write_data <= rs2_data;
                we          <= 1'b1;
                address_reg <= alu_result;
            end
            else
            begin
                if (funct3 == F3_SB || funct3 == F3_SH)
                begin
                    re        <= 1'b1;
                    address_reg <= alu_result & 32'hFFFFFFFC;
                    mem_offset <= alu_result[1:0];
                end
            end
        end
    end
end

// -----

```

```

// RMW_WAIT: Warten bis read_data ok
// -----
RMW_WAIT:
begin
    // Warten bis read_data ok
end

// -----
// STORE_RMW: Daten anpassen und we=1
// Byte-/Halbwort-Schreiben erfordert zuerst ein Lesen des Zielwortes (Read-Modify-Write)
// -----
STORE_RMW:
begin
    if (funct3 == F3_SB)
    begin
        case (mem_offset[1: 0])

            2'b00:
                write_data <= {read_data[31:8], rs2_data[7:0]};

            2'b01:
                write_data <= {read_data[31:16], rs2_data[7:0], read_data[7: 0]};

            2'b10:
                write_data <= {read_data[31:24], rs2_data[7:0], read_data[15: 0]};

            2'b11:
                write_data <= {rs2_data[7:0], read_data[23:0]};

            default:
                write_data <= read_data;

        endcase
    end
    else
        if (funct3 == F3_SH)
        begin
            if (mem_offset[1] == 1'b0)
                write_data <= {read_data[31: 16], rs2_data[15: 0]};
            else
                write_data <= {rs2_data[15: 0], read_data[15: 0]};
            end
        end
        else
            write_data <= read_data;
        end

    we <= 1'b1;
end

// -----
// MEMHALT: Warte auf Freigabe
// -----
MEMHALT:
begin
    // wait
end

// -----
// WRITEBACK: ALU-Ergebnis oder Speicherergebnisse
//              in Register ablegen. PC update.
// -----

```

```

WRITEBACK:
begin
  if (opcode == 7'b0000011)
  begin
    case (funct3)

    F3_LB:
    begin
      case (mem_offset[1: 0])
        2'b00: reg_w_data <= {{24{read_data[ 7]}}}, read_data[ 7: 0]];
        2'b01: reg_w_data <= {{24{read_data[15]}}}, read_data[15: 8]];
        2'b10: reg_w_data <= {{24{read_data[23]}}}, read_data[23:16]];
        2'b11: reg_w_data <= {{24{read_data[31]}}}, read_data[31:24]];
        default: reg_w_data <= read_data;
      endcase
    end

    F3_LH:
    begin
      if (mem_offset[1] == 1'b0)
        reg_w_data <= {{16{read_data[15]}}}, read_data[15:0]];
      else
        reg_w_data <= {{16{read_data[31]}}}, read_data[31:16]];
      end
    end

    F3_LW:
    begin
      reg_w_data <= read_data;
    end

    F3_LBU:
    begin
      case (mem_offset[1: 0])

        2'b00:
          reg_w_data <= {24'd0, read_data[ 7:0]};

        2'b01:
          reg_w_data <= {24'd0, read_data[15:8]};

        2'b10:
          reg_w_data <= {24'd0, read_data[23:16]};

        2'b11:
          reg_w_data <= {24'd0, read_data[31:24]};

        default:
          reg_w_data <= read_data;

      endcase
    end

    F3_LHU:
    begin
      if (mem_offset[1] == 1'b0)
        reg_w_data <= {16'd0, read_data[15: 0]};
      else
        reg_w_data <= {16'd0, read_data[31:16]};
      end
    end
  end
end

```

```

    default:
        reg_w_data <= read_data;

    endcase
end

else if (opcode == OPCODE_JAL ||
        opcode == OPCODE_JALR)
    reg_w_data <= PC + 4;

else if (opcode == OPCODE_LUI)
    reg_w_data <= imm;

else if (opcode == OPCODE_AUIPC)
    reg_w_data <= PC + imm;

else if (opcode == OPCODE_OP_IMM ||
        opcode == OPCODE_OP)
    reg_w_data <= alu_result;

else
    reg_w_data <= 32'd0;

// Bei bestimmten Opcodes muss in rd geschrieben werden
if (opcode == OPCODE_LOAD || opcode == OPCODE_JAL ||
    opcode == OPCODE_JALR || opcode == OPCODE_LUI ||
    opcode == OPCODE_AUIPC || opcode == OPCODE_OP_IMM ||
    opcode == OPCODE_OP)
begin
    reg_write_addr <= rd;
    reg_we <= (rd != 5'd0);
end

else
    reg_we <= 1'b0;

// PC-Update
if (opcode == OPCODE_JAL)
    PC <= alu_result;
else
    if (opcode == OPCODE_JALR)
        PC <= alu_result & ~32'd1;
    else
        if (opcode == OPCODE_BRANCH)
            begin
                case (funct3)

                    F3_BEQ:
                        PC <= (alu_zero) ? (PC + imm) : (PC + 4);

                    F3_BNE:
                        PC <= (!alu_zero) ? (PC + imm) : (PC + 4);

                    F3_BLT:
                        PC <= ($signed(rs1_data) < $signed(rs2_data)) ? (PC + imm) : (PC + 4);

                    F3_BGE:
                        PC <= ($signed(rs1_data) >= $signed(rs2_data)) ? (PC + imm) : (PC + 4);

                    F3_BLTU:

```

```

        PC <= (rs1_data < rs2_data) ? (PC + imm) : (PC + 4);

F3_BGEU:
    PC <= (rs1_data >= rs2_data) ? (PC + imm) : (PC + 4);

default:
    PC <= PC + 4;

    endcase
end
else
    PC <= PC + 4;
end

default: ;

    endcase
end
end

endmodule

```

Datei: rtl/defines.v

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Globale Definitionsdatei (Makros und Parameter).

Diese Datei definiert verschiedene globale Konstante, Parameter und Makros, die in den restlichen Modulen verwendet werden. Sie legt unter anderem die Taktfrequenz (CLK_FREQ), UART- und SPI-FIFO-Größen fest, sowie Flags zum Bedingen Integrieren bestimmter Module (z. B. INCLUDE_UART).

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Gibt die Taktfrequenz des Systems in Hz an, z. B. 12 MHz.

Parameter:

- CLK_FREQ

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Berechnet den Teilerwert für eine angegebene Baudrate.

Beispiel: BAUD_DIV(115200) bei 12 MHz ergibt den passenden Teilwert.

Parameter:

- BAUD_DIV(Baud)

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Aktiviert (falls definiert) den Betrieb als 32-Bit RISC-V-Kern.

Parameter:

- RV32I

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Aktiviert (falls definiert) die Verwendung des FRAM-Speichers statt internem RAM.

Parameter:

- FRAM_MEMORY

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Legt die Tiefe (Anzahl Einträge) für die TX- und RX-FIFOs des UART fest.

Parameter:

- UART_FIFO_TX_DEPTH
- UART_FIFO_RX_DEPTH

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Legt die Tiefe (Anzahl Einträge) für die TX- und RX-FIFOs des SPI fest.

Parameter:

- SPI_FIFO_TX_DEPTH
- SPI_FIFO_RX_DEPTH

Modul: Unknown

Kurzbeschreibung: Zum bedingten Einbinden der jeweiligen Peripheriemodule.

Parameter:

- INCLUDE_DEBUG, INCLUDE_UART, INCLUDE_TIME, ...

Source Code

```
`ifndef DEFINES_V
`define DEFINES_V

`define CLK_FREQ          12_000_000

`define BAUD_DIV(Baud) ((`CLK_FREQ / Baud) - 1)

`define RV32I

`ifndef FRAM_MEMORY

`define UART_FIFO_TX_DEPTH 4
`define UART_FIFO_RX_DEPTH 4

`define SPI_FIFO_TX_DEPTH 4
`define SPI_FIFO_RX_DEPTH 4

`define INCLUDE_DEBUG
`define INCLUDE_UART
`define INCLUDE_TIME
`define INCLUDE_PWM
`define INCLUDE_MULT
`define INCLUDE_DIV
`define INCLUDE_SPI
`define INCLUDE_GPIO
`define INCLUDE_WS

`endif
```

Datei: rtl/fram/fram_ram.v

Modul: fram_ram

Kurzbeschreibung: Abstraktes FRAM-Zugriffsmodul, das nach außen wie RAM erscheint,

intern jedoch über SPI kommuniziert. Dieses Modul nimmt Lese- und Schreibanforderungen (über address, we, re) entgegen und leitet sie an das fram_spi-Modul weiter. Nach Abschluss der SPI-Operation wird read_data gültig, bzw. die Schreiboperation ist abgeschlossen. Ein req_ready-Signal zeigt an, wann das Modul wieder bereit für neue Befehle ist. entgegen genommen werden kann

Lokale Parameter:

- ST_IDLE Leerlaufzustand (wartet auf we/re)
- ST_START Vorbereitung der SPI-Operation (Adress-/Datenübergabe)
- ST_WAIT Wartezustand, bis fram_spi fertigsignalisiert
- ST_DONE Abschluss der Operation, Daten liegen vor, req_ready=1

Eingänge:

- clk Systemtakt
- rst_n Asynchrones, aktives-LOW Reset
- [15:0] address Adress-Eingang (16 Bit, FRAM-Adressbereich)
- [31:0] write_data Daten, die bei we=1 in den FRAM geschrieben werden
- we Schreibeaktivierung (Write Enable)
- re Leseaktivierung (Read Enable)
- spi_miso SPI-Eingang (Master In, Slave Out)

Ausgänge:

- reg req_ready Signal, das anzeigt, ob ein neuer Lese-/Schreibzugriff
- reg [31:0] read_data Ausgelesene Daten bei einem Lesezugriff
- spi_mosi SPI-Ausgang (Master Out, Slave In)
- spi_clk SPI-Taktleitung
- spi_cs SPI-Chip-Select

Source Code

```
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns
```

```
module fram_ram (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    output reg      req_ready,
    input wire [15:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output reg [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re,
    output wire     spi_mosi,
    input wire      spi_miso,
    output wire     spi_clk,
    output wire     spi_cs,
);
```

```
// -----
// Zustandsdefinitionen für die interne Steuerung
// -----
localparam [2:0] ST_IDLE   = 3'd0;
localparam [2:0] ST_START  = 3'd1;
localparam [2:0] ST_WAIT   = 3'd2;
```

```

localparam [2:0] ST_DONE = 3'd3;

// -----
// Registervariablen
// -----
reg [31:0] spi_write_data;
reg [31:0] lat_write_data;
reg [15:0] spi_address;
reg [15:0] lat_address;
reg [ 2:0] state;
reg      spi_we;
reg      latched_we;
reg      spi_re;

// -----
// Rückgabedaten und Status von fram_spi
// -----
wire [31:0] spi_read_data;
wire      spi_done;

// -----
// Instanzierung des FRAM-SPI-Moduls
// -----
fram_spi fram_spi_inst (
    .clk      (clk),
    .rst_n    (rst_n),
    .address   (spi_address),
    .write_data (spi_write_data),
    .read_data  (spi_read_data),
    .we        (spi_we),
    .re        (spi_re),
    .done      (spi_done),
    .spi_mosi   (spi_mosi),
    .spi_miso   (spi_miso),
    .spi_clk    (spi_clk),
    .spi_cs     (spi_cs)
);

// -----
// Zustandsmaschine zur Abwicklung eines Lese-/Schreibzugriffs
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        state      <= ST_IDLE;
        req_ready   <= 1'b1;
        latched_we  <= 1'b0;
        lat_address <= 16'd0;
        lat_write_data <= 32'd0;
        read_data   <= 32'd0;
        spi_re      <= 1'b0;
        spi_we      <= 1'b0;
        spi_address <= 16'd0;
        spi_write_data <= 32'd0;
    end
    else
    begin

```

```

spi_we <= 1'b0;
spi_re <= 1'b0;

case (state)

// -----
// ST_IDLE: Warten auf we oder re
// -----
ST_IDLE: begin
    if (we || re)
        begin
            lat_address    <= address;
            lat_write_data <= write_data;
            latched_we     <= we;
            req_ready      <= 1'b0;
            state          <= ST_START;
        end
    else
        req_ready <= 1'b1;
    end

// -----
// ST_START: Setze Parameter für fram_spi
// -----
ST_START:
begin
    spi_address    <= lat_address;
    spi_write_data <= lat_write_data;

    if (latched_we)
        spi_we <= 1'b1;
    else
        spi_re <= 1'b1;

    state <= ST_WAIT;
end

// -----
// ST_WAIT: Warten, bis fram_spi fertig signalisiert (spi_done)
// -----
ST_WAIT:
begin
    if (spi_done)
        begin
            if (!latched_we)
                read_data <= spi_read_data;

            state <= ST_DONE;
        end
    end

// -----
// ST_DONE: Vorgang abgeschlossen, req_ready = 1
// -----
ST_DONE:
begin
    req_ready <= 1'b1;
    state     <= ST_IDLE;
end

```

```

        default:
            state <= ST_IDLE;

        endcase
    end
end

endmodule

```

Datei: rtl/ram/ram_spi.v

Modul: ram_spi

Kurzbeschreibung: SPI-Steuerung für FRAM-Zugriffe.

Dieses Modul erzeugt eine sequenzielle SPI-Kommunikation mit einem FRAM-Baustein (z. B. MB85RS64V). Es verwendet Opcode-Sequenzen für das Aktivieren der Schreibberechtigung (WREN), das Schreiben (WRITE) und das Lesen (READ). Die Operation wird anhand der Signale **we**, **re**, **address**, **write_data** gestartet. Nach Abschluss meldet das Modul den Zustand mit **done**.

Parameter:

- CMD_WIDTH Anzahl der zu shiftenden Bits für WRITE/READ (Adresse + Daten)
- CMD_WIDTH_WREN Anzahl der Bits für OPCODE_WREN

Lokale Parameter:

- OPCODE_WREN SPI-Opcode zum Aktivieren des Schreibens
- OPCODE_WRITE SPI-Opcode zum Schreiben von Daten
- OPCODE_READ SPI-Opcode zum Lesen von Daten
- ST_IDLE Leerlaufzustand (wartet auf we/re)
- ST_WREN_INIT Start der WREN-Sequenz
- ST_WREN_SHIFT Shiften der WREN-Bits
- ST_WREN_DONE Abschluss der WREN-Operation
- ST_WRITE_INIT Start der WRITE-Operation
- ST_WRITE_SHIFT Shiften der Schreibdaten
- ST_WRITE_DONE Abschluss der Schreiboperation
- ST_READ_INIT Start der READ-Operation
- ST_READ_SHIFT Shiften der gelesenen Daten
- ST_READ_DONE Abschluss der Leseoperation

Eingänge:

- clk Systemtakt
- rst_n Asynchrones, aktives-LOW Reset
- [15:0] address Zieladresse (für WRITE/READ)
- [31:0] write_data Zu schreibende 32-Bit-Daten
- we Write-Enable (löst WRITE-Sequenz aus)
- re Read-Enable (löst READ-Sequenz aus)
- wire spi_miso SPI-Datenleitung Slave->Master

Ausgänge:

- reg [31:0] read_data Ausgelesene 32-Bit-Daten
- reg done Signalisiert Abschluss einer Operation
- reg spi_mosi SPI-Datenleitung Master->Slave
- reg spi_clk SPI-Takt
- reg spi_cs SPI-Chip-Select (aktiv LOW)

Source Code

```

`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

```

```

module fram_spi (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [15:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output reg [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re,
    output reg      done,
    output reg      spi_mosi,
    input wire      spi_miso,
    output reg      spi_clk,
    output reg      spi_cs
);

// -----
// Lokale Parameter (OPCODEs)
// -----
localparam [7:0] OPCODE_WREN   = 8'h06;
localparam [7:0] OPCODE_WRITE = 8'h02;
localparam [7:0] OPCODE_READ  = 8'h03;

// -----
// Zustände des internen State-Automaten
// -----
localparam [3:0] ST_IDLE      = 4'd0;
localparam [3:0] ST_WREN_INIT = 4'd1;
localparam [3:0] ST_WREN_SHIFT = 4'd2;
localparam [3:0] ST_WREN_DONE = 4'd3;
localparam [3:0] ST_WRITE_INIT = 4'd4;
localparam [3:0] ST_WRITE_SHIFT = 4'd5;
localparam [3:0] ST_WRITE_DONE = 4'd6;
localparam [3:0] ST_READ_INIT  = 4'd7;
localparam [3:0] ST_READ_SHIFT = 4'd8;
localparam [3:0] ST_READ_DONE  = 4'd9;

// -----
// Anzahl der zu shiftenden Bits:
// - CMD_WIDTH: 8 (Opcode) + 16 (Adresse) + 32 (Daten) = 56
// - CMD_WIDTH_WREN: 8 (nur Opcode WREN)
// -----
localparam CMD_WIDTH      = 56;
localparam CMD_WIDTH_WREN = 8;

// -----
// Registervariablen für Shift und Steuerung
// -----
reg [55:0] shift_reg;
reg [ 5:0] bit_count;
reg [ 3:0] state;
reg      spi_clk_en;
reg      shifting;

// -----
// SPI-Taktdesign: spi_sck (genannt spi_clk)
// Wenn spi_clk_en=1, toggelt spi_clk
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)

```

```

begin
    if (!rst_n)
        spi_sck <= 1'b0;
    else
        begin
            if (spi_clk_en)
                spi_sck <= ~spi_sck;
            else
                spi_sck <= 1'b0;
        end
    end
end

// -----
// Hauptzustandsmaschine: WREN -> WRITE oder READ
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
        begin
            state      <= ST_IDLE;
            done        <= 1'b0;
            bit_count   <= 6'd0;
            spi_cs       <= 1'b1;
            spi_clk_en   <= 1'b0;
            spi_mosi     <= 1'b0;
            read_data    <= 32'd0;
            shift_reg    <= 56'd0;
            shifting     <= 1'b0;
        end
    else
        begin
            done <= 1'b0;

            case (state)

                // -----
                // ST_IDLE: Warten auf we (WRITE) oder re (READ)
                // -----
                ST_IDLE:
                begin
                    spi_cs   <= 1'b1;
                    spi_clk_en <= 1'b0;
                    bit_count <= 6'd0;
                    shifting  <= 1'b0;
                    if (write_enable)
                        begin
                            shift_reg <= {OPCODE_WREN, 48'd0};
                            state      <= ST_WREN_INIT;
                        end
                    else
                        if (read_enable)
                            begin
                                shift_reg <= {OPCODE_READ, addr, 32'd0};
                                state      <= ST_READ_INIT;
                            end
                        end
                end

                // -----
                // ST_WREN_INIT: CS low, shift_reg bereit für WREN
                // -----

```

```

ST_WREN_INIT:
begin
    spi_cs    <= 1'b0;
    spi_clk_en <= 1'b0;
    bit_count <= 6'd0;
    shifting   <= 1'b0;
    spi_mosi    <= shift_reg[55];
    state      <= ST_WREN_SHIFT;
end

// -----
// ST_WREN_SHIFT: Schiebe 8 Bit des WREN-Opcode raus
// -----
ST_WREN_SHIFT:
begin
    spi_clk_en <= 1'b1;
    shifting   <= 1'b1;
    if (bit_count == CMD_WIDTH_WREN)
    begin
        spi_cs    <= 1'b1;
        spi_clk_en <= 1'b0;
        shifting   <= 1'b0;
        state      <= ST_WREN_DONE;
    end
end

// -----
// ST_WREN_DONE: Jetzt WRITE vorbereiten
// -----
ST_WREN_DONE:
begin
    shift_reg <= {OPCODE_WRITE, addr, write_data};
    state     <= ST_WRITE_INIT;
end

// -----
// ST_WRITE_INIT: CS wieder runter, neu schieben
// -----
ST_WRITE_INIT:
begin
    spi_cs    <= 1'b0;
    spi_clk_en <= 1'b0;
    bit_count <= 6'd0;
    shifting   <= 1'b0;
    spi_mosi    <= shift_reg[55];
    state      <= ST_WRITE_SHIFT;
end

// -----
// ST_WRITE_SHIFT: 56 Bit (8+16+32) werden geshiftet
// -----
ST_WRITE_SHIFT:
begin
    spi_clk_en <= 1'b1;
    shifting   <= 1'b1;
    if (bit_count == CMD_WIDTH)
    begin
        spi_cs    <= 1'b1;
        spi_clk_en <= 1'b0;
        shifting   <= 1'b0;
    end
end

```



```

        state      <= ST_WRITE_DONE;
    end
end

// -----
// ST_WRITE_DONE: Fertig, done=1
// -----
ST_WRITE_DONE:
begin
    done  <= 1'b1;
    state <= ST_IDLE;
end

// -----
// ST_READ_INIT: CS runter, shift_reg bereit (OPCODE+Adress+Dummy)
// -----
ST_READ_INIT:
begin
    spi_cs   <= 1'b0;
    spi_clk_en <= 1'b0;
    bit_count <= 6'd0;
    shifting  <= 1'b0;
    spi_mosi   <= shift_reg[55];
    state     <= ST_READ_SHIFT;
end

// -----
// ST_READ_SHIFT: 56 Bit werden geshiftet, wobei
// die letzten 32 Bits Daten vom FRAM sind.
// -----
ST_READ_SHIFT:
begin
    spi_clk_en <= 1'b1;
    shifting   <= 1'b1;
    if (bit_count == CMD_WIDTH)
    begin
        spi_cs   <= 1'b1;
        spi_clk_en <= 1'b0;
        shifting  <= 1'b0;
        state     <= ST_READ_DONE;
    end
end

// -----
// ST_READ_DONE: Aus shift_reg die empfangenen 32 Bits
// -----
ST_READ_DONE:
begin
    read_data <= shift_reg[31:0];
    done <= 1'b1;
    state <= ST_IDLE;
end

default: state <= ST_IDLE;
endcase

// -----
// Schiebe-Operation
// Bei jeder fallenden Flanke von spi_clk: shift_reg[0] <= spi_miso
// Bei jeder steigenden Flanke: shift_reg << 1

```

```

// Hier realisiert über spi_sck == 0 / == 1-Abfragen
// -----
if (shifting)
begin
    if (spi_sck == 1'b0)
    begin
        shift_reg <= {shift_reg[54:0], 1'b0};
        bit_count <= bit_count + 1;
    end
    else
    begin
        shift_reg[0] <= spi_miso;
    end
end

spi_mosi <= shift_reg[55];

end
end
endmodule

```

Datei: rtl/fram/mb85rs64v.v

Modul: mb85rs64v

Kurzbeschreibung: Verilog-Modell des FRAM-Bausteins MB85RS64V.

Dieses Modul simuliert den internen SPI-Verhaltensablauf des MB85RS64V-Fram-Speichers. Es reagiert auf die üblichen FRAM-OPCODES (WRITE, READ, WREN) und unterstützt das Speichern von Daten in einem internen Memory-Array. Das Modul ist nur für Simulation und Verifikationszwecke gedacht und ersetzt in der Hardware ein externes FRAM-Bauteil. Zustandsautomat: - STATE_OPCODE: Auswerten des eingehenden Opcodes (WREN, WRITE, READ) - STATE_ADDR: Erfassen der Adresse (2 Bytes) - STATE_WRITE_DATA: Schreiben der ankommenden Bytes in Memory - STATE_READ_DATA: Ausgeben der gewünschten Bytes aus Memory

Lokale Parameter:

- OP_WRITE SPI-Opcode für Schreibzugriff
- OP_READ SPI-Opcode für Lesezugriff
- OP_WREN SPI-Opcode für Write Enable
- STATE_OPCODE Zustand zum Erfassen des Opcodes
- STATE_ADDR Zustand zum Erfassen der Adresse
- STATE_WRITE_DATA Zustand zum Schreiben der Daten ins Memory
- STATE_READ_DATA Zustand zum Auslesen der Daten

Eingänge:

- clk Systemtakt
- rst_n Asynchrones, aktives-LOW Reset
- spi_mosi SPI-Datenleitung Master->Slave
- spi_clk SPI-Takt
- spi_cs SPI-Chip-Select (aktiv LOW)

Ausgänge:

- reg spi_miso SPI-Datenleitung Slave->Master

Source Code

```

`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

```

```

module mb85rs64v (
    input wire clk,

```

```

    input wire rst_n,
    input wire spi_mosi,
    output reg spi_miso,
    input wire spi_clk,
    input wire spi_cs
);

// -----
// Lokale Konstanten / OPCODES
// -----
localparam OP_WRITE = 8'h02;
localparam OP_READ  = 8'h03;
localparam OP_WREN  = 8'h06;

// -----
// Zustandsdefinitionen
// -----
localparam STATE_OPCODE    = 2'd0;
localparam STATE_ADDR     = 2'd1;
localparam STATE_WRITE_DATA = 2'd2;
localparam STATE_READ_DATA  = 2'd3;

// -----
// Internes Memory-Array (z. B. 8k x 8 Bit = 64 KBit)
// -----
reg [ 7:0] memory[0:8191];

// -----
// Registervariablen für OPCODE, Adresse, Daten etc.
// -----
reg [15:0] address;
reg [15:0] address_shift;
reg [ 7:0] opcode;
reg [ 7:0] opcode_shift;
reg [ 7:0] tx_reg;
reg [ 7:0] data_shift;
reg [ 3:0] bit_cnt_tx;
reg [ 3:0] bit_cnt_rx;
reg [ 1:0] state;
reg      spi_clk_prev;
reg      cs_prev;
reg      we1;

// -----
// SPI-Signal-Flankenerkennung
// - spi_clk_prev, cs_prev merken letzten Zustand
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        state          <= STATE_OPCODE;
        opcode          <= 8'd0;
        opcode_shift    <= 8'd0;
        address_shift   <= 16'd0;
        data_shift       <= 8'd0;
        bit_cnt_rx       <= 4'd0;
        bit_cnt_tx       <= 4'd0;
        tx_reg          <= 8'd0;
    end
end

```

```

wel          <= 1'b0;
spi_miso     <= 1'b0;
spi_clk_prev <= 1'b0;
cs_prev      <= 1'b1;
address      <= 16'd0;
end
else
begin
    // Merken des vorherigen SPI-Takt- und CS-Zustands
    spi_clk_prev <= spi_clk;
    cs_prev      <= spi_cs;

    // Wenn spi_cs = 1, wird State-Logik zurückgesetzt
    if (spi_cs)
    begin
        state          <= STATE_OPCODE;
        bit_cnt_rx     <= 4'd0;
        bit_cnt_tx     <= 4'd0;
        opcode_shift   <= 8'd0;
        address_shift  <= 16'd0;
        data_shift     <= 8'd0;
        address        <= 16'd0;
        // Wenn ein Write-Opcode beendet wird, wel=0
        if (opcode == OP_WRITE)
            wel          <= 1'b0;
    end
    else
    begin
        // Flankenwertung: steigende Flanke spi_clk
        if (spi_clk && !spi_clk_prev)
        begin
            case (state)

                // -----
                // STATE_OPCODE: Zunächst 8 Bits für den OPCODE
                // -----
                STATE_OPCODE:
                begin
                    opcode_shift <= {opcode_shift[6:0], spi_mosi};
                    bit_cnt_rx   <= bit_cnt_rx + 1;
                    if (bit_cnt_rx == 4'd7)
                    begin
                        opcode          <= {opcode_shift[6:0], spi_mosi};
                        bit_cnt_rx     <= 4'd0;
                        opcode_shift   <= 8'd0;
                        if ({opcode_shift[6:0], spi_mosi} == OP_WREN)
                            wel <= 1'b1;
                        else
                            state <= STATE_ADDR;
                    end
                end
                // -----
                // STATE_ADDR: 2 Bytes Adresse (16 Bit)
                // -----
                STATE_ADDR:
                begin
                    address_shift <= {address_shift[14:0], spi_mosi};
                    bit_cnt_rx <= bit_cnt_rx + 1;

```

```

if (bit_cnt_rx == 4'd15)
begin
    tx_reg      <= memory[{address_shift[14:0], spi_mosi}];
    address     <= {address_shift[14:0], spi_mosi};
    bit_cnt_rx  <= 4'd0;
    if (opcode == OP_READ)
    begin
        state     <= STATE_READ_DATA;
        bit_cnt_tx <= 4'd0;
        spi_miso  <= memory[{address_shift[14:0], spi_mosi}][7];
    end
    else
    if (opcode == OP_WRITE)
    begin
        if (wel)
            state <= STATE_WRITE_DATA;
        else
            state <= STATE_OPCODE;
    end
    else
        state <= STATE_OPCODE;
    end
end

// -----
// STATE_ADDR: 2 Bytes Adresse (16 Bit)
// -----
STATE_WRITE_DATA:
begin
    if (bit_cnt_rx == 4'd7)
    begin
        memory[(address[12:0])] <= {data_shift[6:0], spi_mosi};
        bit_cnt_rx              <= 4'd0;
        data_shift               <= 8'd0;
        address                  <= address + 1;
    end
    else
    begin
        data_shift <= {data_shift[6:0], spi_mosi};
        bit_cnt_rx <= bit_cnt_rx + 1;
    end
end

// -----
// STATE_ADDR: 2 Bytes Adresse (16 Bit)
// -----
STATE_READ_DATA:
begin
    if (bit_cnt_tx == 4'd7)
    begin
        bit_cnt_tx <= 4'd0;
        address    <= address + 1;
        tx_reg     <= memory[address + 1];
        spi_miso   <= memory[(address + 1)][7];
    end
    else
    begin
        spi_miso <= tx_reg[6];
        tx_reg   <= {tx_reg[6:0], 1'b0};
        bit_cnt_tx <= bit_cnt_tx + 1;
    end
end

```

```

        end
    end

    default:
        state <= STATE_OPCODE;

    endcase
end
end
end
end
end

endmodule

```

Datei: rtl/memory.v

Modul: memory

Kurzbeschreibung: Hauptspeichermodul mit Anbindung an Peripherie.

Dieses Modul verwaltet die Zugriffe der CPU auf den Speicher (RAM oder FRAM, je nach Definition `FRAM_MEMORY`) sowie auf die Peripherie. Dabei wird die Adresse aufgeteilt in einen RAM-Bereich und einen Peripheriebereich. Lese- und Schreibzugriffe im RAM-Bereich erfolgen direkt auf das RAM/FRAM; Zugriffe im Peripheriebereich werden an das `peripheral_bus` Modul weitergereicht. Folgende Bereiche sind definiert: - Adressen $\geq 0x00004000$: RAM/FRAM-Bereich - Adressen $< 0x00004000$: Peripherie-Bereich (`per_addr`)

Eingänge:

- `clk` Systemtakt
- `rst_n` Asynchron, aktives-LOW Reset
- `[31:0] address` Adresse des gewünschten Zugriffs
- `[31:0] write_data` Daten, die bei `we=1` geschrieben werden
- `we` Write Enable
- `re` Read Enable
- `uart_rx` UART-Eingang
- `spi_miso` SPI Master-In
- `[7:0] gpio_in` GPIO-Eingänge

Ausgänge:

- `[31:0] read_data` Daten, die bei `re=1` gelesen werden
- `mem_busy` Signalisiert, ob ein externer Zugriff (z. B. FRAM) noch busy ist
- `uart_tx` UART-Ausgang
- `[31:0] debug_out` Debug-Leitung
- `pwm_out` PWM-Ausgang
- `ws_out` Datenleitung für WS2812B
- `spi_mosi` SPI Master-Out
- `spi_clk` SPI-Takt
- `spi_cs` SPI-Chipselect
- `[7:0] gpio_out` GPIO-Ausgänge
- `[7:0] gpio_dir` GPIO-Richtungsregister

Source Code

```

`include "../defines.v"
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

```

```

module memory (
    input wire    clk,
    input wire    rst_n,
    output wire    mem_busy,

```

```

input wire [31:0] address,
input wire [31:0] write_data,
output wire [31:0] read_data,
input wire      we,
input wire      re,
output wire     uart_tx,
input wire     uart_rx,
output wire [31:0] debug_out,
output wire     pwm_out,
output wire     ws_out,
output wire     spi_mosi,
input wire     spi_miso,
output wire     spi_clk,
output wire     spi_cs,
output wire [ 7:0] gpio_out,
output wire [ 7:0] gpio_dir,
input wire [ 7:0] gpio_in
);

// -----
// Interne Signale für RAM/FRAM und Peripherie
// -----
wire [31:0] ram_addr;
wire [31:0] ram_data;
wire [13:0] per_addr;
wire [31:0] per_data;

wire is_ram;
wire we_ram;
`ifdef FRAM_MEMORY
wire re_ram;
`endif
wire we_per;
wire re_per;
wire req_ready;

// -----
// Lese-/Schreib-Steuerung
// -----
assign we_ram    = we && is_ram;
`ifdef FRAM_MEMORY
assign re_ram    = re && is_ram;
`endif
assign we_per    = we && !is_ram;
assign re_per    = re && !is_ram;

// -----
// Aufteilung der Adressbereiche
// is_ram = 1, wenn address >= 0x00004000
// Ansonsten per_addr = address[13:0]
// -----
assign is_ram    = (address >= 32'h00004000);
assign ram_addr  = (address - 32'h00004000);
assign per_addr  = is_ram ? 14'b0 : address[13:0];
assign read_data = is_ram ? ram_data : per_data;

// -----
// mem_busy wird aus req_ready abgeleitet
// (Bei Normal-RAM meist nicht busy, bei FRAM schon)
// -----

```

```

    assign mem_busy = !req_ready;
`ifndef FRAM_MEMORY
    assign req_ready = 1'b1;
`endif

// -----
// RAM bzw. FRAM-Anbindung
// -----
`ifndef FRAM_MEMORY
    fram_ram fram_ram_inst (
        .clk      (clk),
        .rst_n    (rst_n),
        .req_ready (req_ready),
        .address   (ram_addr[15:0]),
        .write_data (write_data),
        .read_data  (ram_data),
        .we        (we_ram),
        .re        (re_ram),
        .spi_mosi   (spi_mosi),
        .spi_miso   (spi_miso),
        .spi_clk    (spi_clk),
        .spi_cs     (spi_cs)
    );
`else
    // Normales Single-Port-RAM
    ram1p ram1p_inst (
        .address (ram_addr[14:2]),
        .clock   (clk),
        .data     (write_data),
        .wren     (we_ram),
        .q        (ram_data)
    );
`endif

// -----
// Anbindung der Peripheriemodule
// -----
    peripheral_bus peripheral_bus_inst (
        .clk      (clk),
        .rst_n    (rst_n),
        .address   (per_addr),
        .write_data (write_data),
        .read_data  (per_data),
        .we        (we_per),
        .re        (re_per),
        .debug_out  (debug_out),
        .uart_tx    (uart_tx),
        .uart_rx    (uart_rx),
        .pwm_out    (pwm_out),
        .ws_out     (ws_out),
`ifndef FRAM_MEMORY
        .spi_mosi   (),
        .spi_miso   (1'b0),
        .spi_clk    (),
        .spi_cs     (),
`else
        .spi_mosi   (spi_mosi),
        .spi_miso   (spi_miso),
        .spi_clk    (spi_clk),
        .spi_cs     (spi_cs),

```



```

`endif
    .gpio_out    (gpio_out),
    .gpio_dir    (gpio_dir),
    .gpio_in     (gpio_in)
);

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/debug_module.v

Modul: debug_module

Kurzbeschreibung: Debug-Modul für Host-Kommunikation und Speicherzugriff

Dieses Modul stellt ein einfaches Register zur Verfügung, das über den Bus geschrieben und gelesen werden kann. Es wird außerdem über eine separate Leitung (debug_out) nach außen ausgegeben. Auf jeden Schreibzugriff hin wird der neue Wert im Simulator protokolliert.

Lokale Parameter:

- DEBUG_ADDR Basiskonstante zur Adresszuordnung

Eingänge:

- clk Systemtakt
- rst_n Reset-Signal
- address Adresse, über die auf das Debug-Register zugegriffen wird
- write_data Zu schreibende Daten
- we Write Enable-Signal
- re Read Enable-Signal

Ausgänge:

- read_data Gelesene Daten aus dem Debug-Register
- debug_out Direkte Ausgabe des Debug-Registers (z. B. zu Diagnosezwecken)

Source Code

```

`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module debug_module (
    input  wire      clk,
    input  wire      rst_n,
    input  wire [ 7:0] address,
    input  wire [31:0] write_data,
    output wire [31:0] read_data,
    input  wire      we,
    input  wire      re,
    output wire [31:0] debug_out
);

// Basiskonstante für Debug-Adressen
localparam DEBUG_ADDR = 32'h00000000;

// Internes Register, in dem Debug-Informationen abgelegt werden
reg [31:0] debug_reg;

// Zuweisungen: Leseausgabe und Debug-Ausgang geben dasselbe Register aus
assign read_data = debug_reg;
assign debug_out = debug_reg;

```

```

// Speichern oder Zurücksetzen des Debug-Registers
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        debug_reg <= 32'h00000000;
    end
    else
    if (we)
    begin
        debug_reg <= write_data;
        // Meldung im Simulator bei jedem Schreibzugriff
        $display("DEBUG_REG UPDATED: 0x%08X (%d) at time %0t", write_data, write_data, $time);
    end
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/fifo.v

Modul: fifo

Kurzbeschreibung: Ein einfacher FIFO-Speicher.

Dieser FIFO (First-In-First-Out) Puffer speichert Daten mit einer konfigurierbaren Breite (DATA_WIDTH) und Tiefe (DEPTH). Daten werden über das **wr_en** Signal hineingeschrieben und über das **rd_en** Signal ausgelesen. Das Modul liefert die Signale **empty** und **full**, um anzuzeigen, ob weitere Lese- oder Schreibvorgänge möglich sind.

Parameter:

- DATA_WIDTH Breite der gespeicherten Daten in Bits.
- DEPTH Anzahl der Einträge im FIFO.

Lokale Parameter:

- ADDR_WIDTH Breite der Adresszeiger basierend auf DEPTH.

Eingänge:

- clk Systemtakt.
- rst_n Aktiv-low Reset.
- wr_en Aktivierungssignal (Write-Enable) zum Schreiben in den FIFO.
- rd_en Aktivierungssignal (Read-Enable) zum Lesen aus dem FIFO.
- din Eingangsdaten mit Breite DATA_WIDTH.

Ausgänge:

- empty Signal, das anzeigt, ob der FIFO leer ist.
- full Signal, das anzeigt, ob der FIFO voll ist.
- dout Ausgangsdaten mit Breite DATA_WIDTH.

Source Code

```

`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module fifo #(
    parameter DATA_WIDTH = 8,
    parameter DEPTH       = 16
) (
    input  wire          clk,
    input  wire          rst_n,
    input  wire          wr_en,
    input  wire          rd_en,
    output wire          empty,

```

```

    output wire          full,
    input  wire [DATA_WIDTH-1:0] din,
    output wire [DATA_WIDTH-1:0] dout
);

// -----
// Abgeleitete Konstanten
// ADDR_WIDTH entspricht der Logarithmusbasis 2 von DEPTH
// und bestimmt die Größe der Lese-/Schreibzeiger
// -----
localparam ADDR_WIDTH = $clog2(DEPTH);

// -----
// FIFO-internes Speicherarray, sowie Lese- und Schreibzeiger
// -----
reg [ADDR_WIDTH :0]    rd_ptr;
reg [ADDR_WIDTH :0]    wr_ptr;
reg [DATA_WIDTH-1:0] mem[0:DEPTH-1];

// Edge-Detections für wr_en und rd_en
reg wr_en_prev;
reg rd_en_prev;

// Vorschau auf nächsten Schreibpointer
wire [ADDR_WIDTH: 0] next_wr;

// -----
// empty und full Signale
// - empty: wenn Lese- und Schreibzeiger identisch sind
// - full : wenn beide Pointer in Bezug auf MSB unterschiedlich
// sind, aber in Bezug auf die unteren Bits identisch
// -----
assign empty    = (rd_ptr == wr_ptr);

assign full     = (wr_ptr[ADDR_WIDTH] != rd_ptr[ADDR_WIDTH]) &&
                  (wr_ptr[ADDR_WIDTH-1:0] == rd_ptr[ADDR_WIDTH-1:0]);

assign next_wr = (wr_ptr  + 1);

// -----
// Lese-/Schreiblogik
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        wr_ptr <= 0;
        rd_ptr <= 0;
        wr_en_prev <= 0;
        rd_en_prev <= 0;
    end
    else
    begin
        // Speichern der vorherigen Zustände von wr_en und rd_en
        wr_en_prev <= wr_en;
        rd_en_prev <= rd_en;

        // Schreiben in den FIFO, wenn wr_en ansteigt und nicht full
        if (wr_en && !wr_en_prev && !full)
        begin

```

```

        mem[wr_ptr[ADDR_WIDTH - 1: 0]] <= din;
        wr_ptr <= next_wr;
    end

    // Lesen aus dem FIFO, wenn rd_en ansteigt und nicht empty
    if (rd_en && !rd_en_prev && !empty)
    begin
        rd_ptr <= rd_ptr + 1;
    end
end
end

// -----
// Daten-Ausgabe
// - Wenn FIFO leer, wird ein Nullwert ausgegeben
// - Ansonsten wird das Element an der rd_ptr-Position ausgegeben
// -----
assign dout = empty ? {DATA_WIDTH{1'b0}} : mem[rd_ptr[ADDR_WIDTH - 1 : 0]];

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/gpio.v

Modul: gpio

Kurzbeschreibung: GPIO Modul zur Steuerung allgemeiner I/O.

Dieses Modul implementiert einen einfachen GPIO-Controller. Es unterstützt das Auslesen von Eingangspins und das Schreiben auf Ausgangspins über definierte Adressen. Die Richtungssteuerung (gpio_dir) ist derzeit nicht implementiert.

Lokale Parameter:

- GPIO_DIR_BASE Momentan Nicht benutzt (exemplarisch, nicht benutzt)
- GPIO_IN_OFFSET Basisadresse (Offset) für das GPIO-Eingangsregister
- GPIO_OUT_OFFSET Basisadresse (Offset) für das GPIO-Ausgangsregister
- GPIO_OUT_STEP Schrittweite (Abstand) zwischen einzelnen GPIO-Ausgangsregistern

Eingänge:

- clk Systemtakt.
- rst_n Aktiv-low Reset-Signal.
- address Speicheradresse zur Auswahl der GPIO-Register.
- write_data Daten, die in die angesprochenen GPIO-Register geschrieben werden.
- we Schreibaktivierungssignal (Write-Enable).
- re Leseaktivierungssignal (Read-Enable).
- gpio_in Eingangssignale von den GPIO-Pins.

Ausgänge:

- read_data Ausgangsdaten basierend auf dem angesprochenen GPIO-Register.
- gpio_out Register zur Steuerung des Ausgangszustands der GPIO-Pins.
- gpio_dir GPIO-Richtungsregister (nicht implementiert).

Source Code

```

`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module gpio (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [7:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output wire [31:0] read_data,

```

```

input wire      we,
input wire      re,
output reg [7:0] gpio_out,
output reg [7:0] gpio_dir,
input wire [7:0] gpio_in
);

// -----
// Lokale Parameter für Adressbereiche
// -----
localparam GPIO_DIR_BASE      = 8'h00;
localparam GPIO_IN_OFFSET     = 8'h04;
localparam GPIO_OUT_OFFSET    = 8'h08;
localparam GPIO_OUT_STEP      = 8'h04;

// -----
// pin_index wird aus der Adresse abgeleitet, um festzustellen,
// welches Bit im gpio_out-Register angesprochen wird.
// -----
wire [2:0] pin_index = (address - GPIO_OUT_OFFSET) >> 2;

// -----
// Lesezugriffe:
// - Wenn address == GPIO_IN_OFFSET, wird gpio_in zurückgegeben.
// - Wenn address im Bereich der Ausgangsregister liegt,
//   wird das entsprechende gpio_out-Bit zurückgegeben.
// - Andernfalls 0.
// -----
assign read_data = (address == GPIO_IN_OFFSET) ? {24'd0, gpio_in} :
                  (address >= GPIO_OUT_OFFSET && address < (GPIO_OUT_OFFSET + (8 * GPIO_OUT_STEP)))
                  ? {31'd0, gpio_out[pin_index]} : 32'd0;

// -----
// Schreiben der gpio_out-Bits:
// - Beim Reset werden gpio_out und gpio_dir initialisiert.
// - Nur wenn address im Bereich für Ausgangsregister liegt und we=1,
//   wird genau ein Bit (write_data[0]) im gpio_out geschrieben.
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        gpio_out <= 8'd0;
        gpio_dir <= 8'd0;
    end
    else
    begin
        if (we && address >= GPIO_OUT_OFFSET && address < (GPIO_OUT_OFFSET + (8 * GPIO_OUT_STEP)))
        begin
            gpio_out[pin_index] <= write_data[0];
        end
    end
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/peripheral_bus.v

Modul: peripheral_bus

Kurzbeschreibung: Zentrales Peripherie-Bus-Modul

Dieses Modul bündelt alle Zugriffe auf die verschiedenen Peripherie-Komponenten (z. B. Debug, UART, Timer, PWM, SPI, GPIO etc.) und leitet Lese-/Schreibanfragen anhand einer Adress-Dekodierung an die entsprechenden Module weiter. Je nach aktivem Define (z. B. `INCLUDE_DEBUG`) wird die jeweilige Peripherie eingebunden oder nicht. Die Schnittstellen zu den einzelnen Modulen sind bereits in diesem Modul angelegt (z. B. `uart_tx`, `gpio_out`, `pwm_out`, ...).

Lokale Parameter:

- `DEBUG_BASE` Basis-Adressenbereich für das Debug-Modul
- `UART_BASE` Basis-Adressenbereich für das UART-Modul
- `TIME_BASE` Basis-Adressenbereich für den System-Timer
- `PWM_BASE` Basis-Adressenbereich für das PWM-Modul
- `MULT_BASE` Basis-Adressenbereich für das Multiplikatormodul
- `DIV_BASE` Basis-Adressenbereich für das Divisionsmodul
- `SPI_BASE` Basis-Adressenbereich für das SPI-Modul
- `GPIO_BASE` Basis-Adressenbereich für das GPIO-Modul
- `WS_BASE` Basis-Adressenbereich für das WS2812B-Modul

Eingänge:

- `clk` Systemtakt
- `rst_n` Asynchrones, aktives-LOW Reset-Signal
- `[13:0]` `address` Bus-Adresse, aus der das jeweilige Peripheriemodul dekodiert wird
- `[31:0]` `write_data` Zu schreibende Daten in das ausgewählte Modul
- `we` Write Enable-Signal
- `re` Read Enable-Signal
- `uart_rx` RX-Eingang des UART
- `spi_miso` SPI-Eingangsdaten (Master In, Slave Out)
- `[7:0]` `gpio_in` Eingangsleitungen des GPIO-Moduls

Ausgänge:

- `reg [31:0]` `read_data` Gelesene Daten von den Peripheriemodulen
- `[31:0]` `debug_out` Debug-Ausgangssignal (z. B. zur Diagnose)
- `uart_tx` TX-Ausgang des UART
- `pwm_out` PWM-Ausgangssignal
- `ws_out` Datenleitung für WS2812B-LEDs
- `spi_mosi` SPI-Ausgangsdaten (Master Out, Slave In)
- `spi_clk` SPI-Taktsignal
- `spi_cs` SPI-Chip-Select
- `[7:0]` `gpio_out` Ausgangssignale des GPIO-Moduls
- `[7:0]` `gpio_dir` Richtungsregister des GPIO-Moduls

Source Code

```
`include "../defines.v"
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module peripheral_bus (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [13:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output reg [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re,
    output wire [31:0] debug_out,
    output wire      uart_tx,
    input wire      uart_rx,
    output wire      pwm_out,
    output wire      ws_out,
    output wire      spi_mosi,
```

```

input wire      spi_miso,
output wire     spi_clk,
output wire     spi_cs,
output wire [ 7:0] gpio_out,
output wire [ 7:0] gpio_dir,
input wire [ 7:0] gpio_in
);

// Basis-Adressen für die einzelnen Peripherie-Komponenten
localparam DEBUG_BASE = 6'h01;
localparam UART_BASE  = 6'h02;
localparam TIME_BASE  = 6'h03;
localparam PWM_BASE   = 6'h04;
localparam MULT_BASE  = 6'h05;
localparam DIV_BASE   = 6'h06;
localparam SPI_BASE   = 6'h07;
localparam GPIO_BASE  = 6'h08;
localparam WS_BASE    = 6'h09;

// Aus der 14-Bit-Adresse wird hier der 8-Bit-Funktionsanteil extrahiert
// (lower 8 Bits), um innerhalb des Peripheriemoduls weiter zu dekodieren.
wire [7:0] func_addr;

assign func_addr = address[7:0];

// -----
// Debug-Modul (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifdef INCLUDE_DEBUG

wire [31:0] debug_data;

// Auswahl, ob Adresse in Bereich des Debug-Moduls fällt
wire debug_sel;
wire debug_we;
wire debug_re;

assign debug_sel = (address[12:8] == DEBUG_BASE);
assign debug_we  = we & debug_sel;
assign debug_re  = re & debug_sel;

debug_module debug_inst (
    .clk      (clk),
    .rst_n    (rst_n),
    .address  (func_addr),
    .write_data (write_data),
    .read_data (debug_data),
    .we       (debug_we),
    .re       (debug_re),
    .debug_out (debug_out)
);

// Falls nicht eingebunden, werden ungenutzte Signale auf konstante Werte gesetzt
`else
wire [31:0] debug_data = 32'h0;
wire      debug_sel   = 1'b0;
assign     debug_out   = 32'h0;
`endif

```

```

// -----
// UART-Modul (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_UART

    wire [31:0] uart_data;

    wire uart_sel;
    wire uart_we;
    wire uart_re;

    assign uart_sel  = (address[12:8] == UART_BASE);
    assign uart_we   = we & uart_sel;
    assign uart_re   = re & uart_sel;

    uart #(
        .FIFO_TX_DEPTH(`UART_FIFO_TX_DEPTH),
        .FIFO_RX_DEPTH(`UART_FIFO_RX_DEPTH)
    ) uart_inst (
        .clk          (clk),
        .rst_n        (rst_n),
        .address       (func_addr),
        .write_data    (write_data),
        .read_data     (uart_data),
        .we            (uart_we),
        .re            (uart_re),
        .uart_tx       (uart_tx),
        .uart_rx       (uart_rx)
    );

`else
    wire [31:0] uart_data = 32'h0;
    wire        uart_sel  = 1'b0;
    assign      uart_tx   = 1'b0;
`endif

// -----
// System Timer (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_TIME

    wire [31:0] time_data;

    wire time_sel;
    wire time_we;
    wire time_re;

    assign time_sel  = (address[12:8] == TIME_BASE);
    assign time_we   = we & time_sel;
    assign time_re   = re & time_sel;

    system_timer system_timer_inst (
        .clk          (clk),
        .rst_n        (rst_n),
        .address       (func_addr),
        .write_data    (write_data),
        .read_data     (time_data),
        .we            (time_we),
        .re            (time_re)
    );

```



```

);

`else
    wire [31:0] time_data = 32'h0;
    wire        time_sel  = 1'b0;
`endif

// -----
// PWM-Timer (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_PWM

    wire [31:0] pwm_data;

    wire pwm_sel;
    wire pwm_we;
    wire pwm_re;

    assign pwm_sel  = (address[12:8] == PWM_BASE);
    assign pwm_we   = we & pwm_sel;
    assign pwm_re   = re & pwm_sel;

    pwm_timer pwm_timer_inst (
        .clk      (clk),
        .rst_n    (rst_n),
        .address   (func_addr),
        .write_data (write_data),
        .read_data  (pwm_data),
        .we        (pwm_we),
        .re        (pwm_re),
        .pwm_out    (pwm_out)
    );

`else
    wire [31:0] pwm_data = 32'h0;
    wire        pwm_sel  = 1'b0;
    assign      pwm_out   = 1'b0;
`endif

// -----
// Sequentieller Multiplikator (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_MULT

    wire [31:0] mult_data;

    wire mult_sel;
    wire mult_we;
    wire mult_re;

    assign mult_sel  = (address[12:8] == MULT_BASE);
    assign mult_we   = we & mult_sel;
    assign mult_re   = re & mult_sel;

    seq_multiplier seq_multiplier_inst (
        .clk      (clk),
        .rst_n    (rst_n),
        .address   (func_addr),

```

```

        .write_data (write_data),
        .read_data  (mult_data),
        .we         (mult_we),
        .re         (mult_re)
    );

`else
    wire [31:0] mult_data = 32'h0;
    wire        mult_sel  = 1'b0;
`endif

// -----
// Sequentieller Divider (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_DIV

    wire [31:0] div_data;

    wire div_sel;
    wire div_we;
    wire div_re;

    assign div_sel  = (address[12:8] == DIV_BASE);
    assign div_we   = we & div_sel;
    assign div_re   = re & div_sel;

    seq_divider seq_divider_inst (
        .clk      (clk),
        .rst_n    (rst_n),
        .address  (func_addr),
        .write_data (write_data),
        .read_data (div_data),
        .we       (div_we),
        .re       (div_re)
    );

`else
    wire [31:0] div_data = 32'h0;
    wire        div_sel  = 1'b0;
`endif

// -----
// SPI-Modul (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_SPI

    wire [31:0] spi_data;

    wire spi_sel;
    wire spi_we;
    wire spi_re;

    assign spi_sel  = (address[12:8] == SPI_BASE);
    assign spi_we   = we & spi_sel;
    assign spi_re   = re & spi_sel;

    spi #(
        .FIFO_TX_DEPTH(`SPI_FIFO_TX_DEPTH),

```

```

.FIFO_RX_DEPTH(`SPI_FIFO_RX_DEPTH)
) spi_inst (
.clk      (clk),
.rst_n    (rst_n),
.address  (func_addr),
.write_data (write_data),
.read_data (spi_data),
.we       (spi_we),
.re       (spi_re),
.spi_clk  (spi_clk),
.spi_mosi (spi_mosi),
.spi_miso (spi_miso),
.spi_cs   (spi_cs)
);

`else
    wire [31:0] spi_data = 32'h0;
    wire      spi_sel   = 1'b0;
    assign     spi_mosi  = 1'b0;
    assign     spi_clk   = 1'b0;
    assign     spi_cs    = 1'b1;
`endif

// -----
// GPIO-Modul (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_GPIO

    wire [31:0] gpio_data;

    wire gpio_sel;
    wire gpio_we;
    wire gpio_re;

    assign gpio_sel = (address[12:8] == GPIO_BASE);
    assign gpio_we  = we & gpio_sel;
    assign gpio_re  = re & gpio_sel;

    gpio gpio_inst (
        .clk      (clk),
        .rst_n    (rst_n),
        .address  (func_addr),
        .write_data (write_data),
        .read_data (gpio_data),
        .we       (gpio_we),
        .re       (gpio_re),
        .gpio_out  (gpio_out),
        .gpio_dir  (gpio_dir),
        .gpio_in   (gpio_in)
    );

`else
    wire [31:0] gpio_data = 32'h0;
    wire      gpio_sel   = 1'b0;
    assign     gpio_out  = 8'b0;
    assign     gpio_dir  = 8'b0;
`endif

```

```

// -----
// WS2812B-LED-Modul (optional über DEFINE eingebunden)
// -----
`ifndef INCLUDE_WS

    wire [31:0] ws_data;

    wire ws_sel;
    wire ws_we;
    wire ws_re;

    assign ws_sel  = (address[12:8] == WS_BASE);
    assign ws_we   = we & ws_sel;
    assign ws_re   = re & ws_sel;

    ws2812b ws2812b_inst (
        .clk      (clk),
        .rst_n    (rst_n),
        .address   (func_addr),
        .write_data (write_data),
        .read_data  (ws_data),
        .we        (ws_we),
        .re        (ws_re),
        .ws_out     (ws_out)
    );

`else
    wire [31:0] ws_data = 32'h0;
    wire        ws_sel  = 1'b0;
    assign      ws_out   = 1'b0;
`endif

// -----
// Lesezugriffe: Hier wird je nach ausgewähltem Modul das passende
// 'read_data' ausgegeben. Falls kein passendes Modul selektiert
// ist, wird 0x0 zurückgegeben.
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
        read_data <= 32'h0;
    else
        if (re)
            begin
`ifndef INCLUDE_DEBUG
                if (debug_sel) read_data <= debug_data;
`endif
`ifndef INCLUDE_UART
                else if (uart_sel) read_data <= uart_data;
`endif
`ifndef INCLUDE_TIME
                else if (time_sel) read_data <= time_data;
`endif
`ifndef INCLUDE_PWM
                else if (pwm_sel) read_data <= pwm_data;
`endif
`ifndef INCLUDE_MULT
                else if (mult_sel) read_data <= mult_data;
`endif
            end
        end
end

```

```

`ifdef INCLUDE_DIV
    else if (div_sel)    read_data <= div_data;
`endif
`ifdef INCLUDE_SPI
    else if (spi_sel)    read_data <= spi_data;
`endif
`ifdef INCLUDE_GPIO
    else if (gpio_sel)   read_data <= gpio_data;
`endif
`ifdef INCLUDE_WS
    else if (ws_sel)     read_data <= ws_data;
`endif

    else
        read_data <= 32'h0;

    end
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/pwm_timer.v

Modul: pwm_timer

Kurzbeschreibung: PWM-Timer zur Erzeugung eines Pulsweitenmodulationssignals

Dieses Modul generiert ein PWM-Signal (Pulsweitenmodulation) mit konfigurierbarer Periode und Pulsbreite. Es wird typischerweise zur Ansteuerung von Motoren, LEDs oder anderen zeitgesteuerten Peripherien eingesetzt. Der Zähler läuft periodisch hoch und vergleicht seinen Wert mit einem Pulsbreitenwert, um das Ausgangssignal zu setzen. Über das Register-Interface lassen sich folgende Werte setzen/auslesen: - **PERIOD_ADDR** : Maximale Zählerperiode (PWM-Zykluslänge). - **DUTY_ADDR** : Vergleichswert für die Pulsbreite (PWM-Anteil). - **COUNTER_ADDR** : Zur Einsicht in den aktuellen Zählerstand (kann auch zurückgesetzt werden). - **CTRL_ADDR** : Steuerungsregister (z. B. Aktivierung, Prescaler).

Lokale Parameter:

- **PERIOD_ADDR** Offset-Adresse für die Perioden-Register.
- **DUTY_ADDR** Offset-Adresse für das Duty-Cycle-Register.
- **COUNTER_ADDR** Offset-Adresse für den Zählerstand.
- **CTRL_ADDR** Offset-Adresse für das Steuerregister.

Eingänge:

- **clk** Systemtakt.
- **rst_n** Asynchroner, aktiver-LOW Reset.
- **[7:0] address** Adressoffset zur Auswahl der Register.
- **[31:0] write_data** Zu schreibende Daten in das ausgewählte Register.
- **we** Write-Enable-Signal.
- **re** Read-Enable-Signal.

Ausgänge:

- **[31:0] read_data** Auszulesende Daten (abhängig von **address**).
- **reg pwm_out** Das generierte PWM-Ausgangssignal.

Source Code

```

`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module pwm_timer (
    input wire    clk,
    input wire    rst_n,

```

```

input wire [7:0] address,
input wire [31:0] write_data,
output wire [31:0] read_data,
input wire we,
input wire re,
output reg pwm_out
);

// -----
// Lokale Offset-Adressen
// -----
localparam PERIOD_ADDR = 8'h00;
localparam DUTY_ADDR = 8'h04;
localparam COUNTER_ADDR = 8'h08;
localparam CTRL_ADDR = 8'h0C;

// -----
// Registervariablen
// -----
reg [31:0] period;
reg [31:0] duty;
reg [31:0] counter;
reg [31:0] ctrl;
reg [15:0] pre_count;

// -----
// Lese-Multiplexer: Gibt je nach address den entsprechenden
// Registerwert heraus.
// -----
assign read_data = (address == PERIOD_ADDR) ? period :
                    (address == DUTY_ADDR) ? duty :
                    (address == COUNTER_ADDR) ? counter :
                    (address == CTRL_ADDR) ? ctrl :
                    32'h0;

// -----
// Schreib- und Zähllogik für period, duty, counter, ctrl
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n) begin
    if (!rst_n) begin
        period <= 32'd1000;
        duty <= 32'd500;
        counter <= 32'd0;
        ctrl <= 32'h00010000;
        pre_count <= 16'd0;
    end else begin
        if (we) begin
            // Bei Write-Enable wird abhängig von der address
            // das jeweilige Register überschrieben oder zurückgesetzt.
            case (address)
                PERIOD_ADDR:
                    period <= write_data;
                DUTY_ADDR:
                    duty <= write_data;
                COUNTER_ADDR:
                    counter <= 32'd0;
                CTRL_ADDR:
                    begin
                        ctrl <= write_data;
                        pre_count <= write_data[31:16];
                    end
            endcase
        end
    end
end

```

```

        end
        default: ;
    endcase
end else
if (pre_count > 0) begin
    // pre_count wird herabgesetzt, wenn > 0
    pre_count <= pre_count - 1;
end else begin
    // Wenn Vorzähler abgelaufen ist, wird counter inkrementiert
    pre_count <= ctrl[31:16];

    if (counter >= period - 1) begin
        counter <= 32'd0;
    end else begin
        counter <= counter + 1;
    end
end
end
end
end

// -----
// PWM-Ausgabe:
// - Ist das Bit ctrl[0] gesetzt, wird PWM aktiviert.
// - ctrl[1] kann (je nach Nutzung) z. B. eine Art Modus
//   für ein symmetrisches PWM sein (hier nur beispielhaft).
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
        pwm_out <= 1'b0;
    else begin
        if (ctrl[0]) begin
            if (ctrl[1])
                pwm_out <= (counter < (period >> 1)) ? 1'b1 : 1'b0;
            else
                pwm_out <= (counter < duty) ? 1'b1 : 1'b0;
        end else
            pwm_out <= 1'b0;
    end
end
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/seq_divider.v

Modul: seq_divider

Kurzbeschreibung: Sequentieller Divider (Divisionseinheit).

Dieses Modul führt eine sequentielle Division zweier 32-Bit-Werte durch. Dabei wird fortlaufend ein Teil des Dividenden mit dem Divisor verglichen und angepasst. Das Modul ist über ein Register-Interface ansprechbar: - **INFO_OFFSET**: Enthält das busy-Bit (Division noch aktiv). - **END_OFFSET**: Speicherort für den Dividenden (Endwert). - **SOR_OFFSET**: Speicherort für den Divisor (Startet die Division). - **QUO_OFFSET**: Liefert das Ergebnis (Quotient). - **REM_OFFSET**: Liefert den Restwert (Remainder).

Lokale Parameter:

- **INFO_OFFSET** Offset für das Statusregister (busy).
- **END_OFFSET** Offset für den Dividenden.
- **SOR_OFFSET** Offset für den Divisor (startet Division).
- **QUO_OFFSET** Offset für den Quotienten.
- **REM_OFFSET** Offset für den Rest.

Eingänge:

- clk Systemtakt.
- rst_n Aktiv-low Reset.
- [7:0] address Adresse für den Registerzugriff.
- [31:0] write_data Daten, die z. B. Dividenden/Divisor setzen.
- we Schreibaktivierungssignal (Write-Enable).
- re Leseaktivierungssignal (Read-Enable).

Ausgänge:

- [31:0] read_data Ausgabedaten basierend auf address.

Source Code

```
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module seq_divider (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [ 7:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output wire [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re
);

// -----
// Lokale Adress-Offsets für das Register-Interface
// -----
localparam INFO_OFFSET = 8'h00;
localparam END_OFFSET  = 8'h04;
localparam SOR_OFFSET  = 8'h08;
localparam QUO_OFFSET  = 8'h0C;
localparam REM_OFFSET  = 8'h10;

// -----
// Register für Dividenden, Divisor, Quotient und Rest
// dvdend_tmp dient als Arbeitsregister (64 Bit),
// um den Dividenden hochzuschieben und den Rest auszuarbeiten.
// -----
reg [31:0] dividend; // Gespeicherter Dividendenwert
reg [31:0] divisor;  // Gespeicherter Divisor
reg [63:0] dvdend_tmp; // Temporäre 64-Bit-Repräsentation des Dividenden
reg [31:0] quotient; // Quotient
reg [31:0] remainder; // Rest
reg [ 5:0] bit_index; // Zähler für 32-Bit schrittweise Division
reg        busy;     // Signalisiert laufende Division

// -----
// Lesezugriffe: abhängig vom Offset wird das passende
// Register oder das busy-Bit zurückgegeben.
// -----
assign read_data = (address == INFO_OFFSET) ? {31'd0, busy} :
                  (address == END_OFFSET)  ? dividend      :
                  (address == SOR_OFFSET)  ? divisor       :
                  (address == QUO_OFFSET)  ? quotient      :
                  (address == REM_OFFSET)  ? remainder     ;
```



```
32'd0;
```

```
// -----  
// Sequentieller Ablauf:  
// - Schreiben von dividend und divisor startet Berechnung.  
// - Der Divisor wird sukzessive vom oberen Teil des Dividenden  
//   subtrahiert (wenn möglich), das Ergebnis fließt in quotient.  
// -----  
always @(posedge clk or negedge rst_n)  
begin  
    if (!rst_n)  
    begin  
        dividend    <= 32'd0;  
        divisor      <= 32'd0;  
        quotient     <= 32'd0;  
        remainder    <= 32'd0;  
        dvdend_tmp   <= 64'd0;  
        bit_index    <= 6'd0;  
        busy         <= 1'b0;  
    end  
    else  
    begin  
        // Verarbeiten von Write-Zugriffen  
        if (we)  
        begin  
            case (address)  
  
                END_OFFSET:  
                begin  
                    // Setzt den Dividenden und initialisiert das Arbeitsregister  
                    dividend    <= write_data;  
                    dvdend_tmp  <= {32'd0, write_data};  
                    quotient    <= 32'd0;  
                    remainder   <= 32'd0;  
                end  
  
                SOR_OFFSET:  
                begin  
                    // Setzt den Divisor und aktiviert die Division  
                    divisor     <= write_data;  
                    bit_index   <= 6'd31;  
                    busy        <= 1'b1;  
                end  
  
            endcase  
        end  
  
        // Division in kleinen Schritten, solange busy=1  
        if (busy)  
        begin  
            // Jede Iteration:  
            // 1) Schiebe das 64-Bit-Fenster nach links (dvdend_tmp << 1),  
            // 2) Schiebe quotient nach links,  
            // 3) teste, ob Divisor subtrahierbar ist.  
            dvdend_tmp <= dvdend_tmp << 1;  
            quotient   <= quotient << 1;  
  
            // Prüfe den oberen 32-Bit-Teil gegen divisor
```

```

    if (dvdend_tmp[63:32] >= divisor)
    begin
        dvdend_tmp[63:32] <= dvdend_tmp[63:32] - divisor;
        quotient[0] = 1;
    end

    // Sobald alle Bits bearbeitet sind, legen wir remainder fest.
    if (bit_index == 0)
    begin
        remainder <= dvdend_tmp[63:32];
        busy <= 1'b0;
    end
    else
    begin
        bit_index <= bit_index - 1;
    end
end
end
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/seq_multiplier.v

Modul: seq_multiplier

Kurzbeschreibung: Sequentieller Multiplikator.

Dieses Modul implementiert eine sequentielle Multiplikation zweier 32-Bit-Werte. Die Multiplikation erfolgt durch aufeinanderfolgende Additionen basierend auf den Bits des Multiplikators. Das Modul ist speicherabbildbasiert und kann über Adressen gesteuert werden: - MUL1_OFFSET: Erster Multiplikand. - MUL2_OFFSET: Zweiter Multiplikator (startet die Berechnung). - RESH_OFFSET: Höhere 32 Bits des Ergebnisses. - RESL_OFFSET: Niedrigere 32 Bits des Ergebnisses. - INFO_OFFSET: Gibt an, ob die Berechnung noch läuft (busy).

Lokale Parameter:

- INFO_OFFSET Adresse für den Status (busy-Bit).
- MUL1_OFFSET Adresse für den ersten Multiplikanden.
- MUL2_OFFSET Adresse für den zweiten Multiplikator (startet Berechnung).
- RESH_OFFSET Adresse für die höheren 32 Bit des Ergebnisses.
- RESL_OFFSET Adresse für die niedrigeren 32 Bit des Ergebnisses.

Eingänge:

- clk Systemtakt.
- rst_n Aktiv-low Reset.
- address Speicheradresse für den Zugriff auf Register.
- write_data Daten, die in die ausgewählten Register geschrieben werden sollen.
- we Schreibaktivierungssignal (Write-Enable).
- re Leseaktivierungssignal (Read-Enable).

Ausgänge:

- read_data Zu lesende Daten basierend auf der Adresse.

Source Code

```

`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module seq_multiplier (
    input  wire      clk,
    input  wire      rst_n,
    input  wire [ 7:0] address,

```

```

input wire [31:0] write_data,
output wire [31:0] read_data,
input wire      we,
input wire      re
);

// -----
// Lokale Adress-Offsets für die Register
// -----
localparam INFO_OFFSET = 8'h00;
localparam MUL1_OFFSET = 8'h04;
localparam MUL2_OFFSET = 8'h08;
localparam RESH_OFFSET = 8'h0C;
localparam RESL_OFFSET = 8'h10;

// -----
// Register für Multiplikanden, Ergebnis und Steuerung
// -----
reg [31:0] multiplicand;
reg [31:0] multiplier;
reg [63:0] product;
reg [ 5:0] bit_index;
reg      busy;

// -----
// Leseausgabe: Je nach Adress-Offset wird entsprechender
// Registerinhalt oder Status zurückgegeben.
// -----
assign read_data = (address == INFO_OFFSET) ? {31'd0, busy} :
                  (address == MUL1_OFFSET) ? multiplicand :
                  (address == MUL2_OFFSET) ? multiplier :
                  (address == RESH_OFFSET) ? product[63:32] :
                  (address == RESL_OFFSET) ? product[31: 0] :
                  32'd0;

// -----
// Sequentielle Abarbeitung der Multiplikation
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n) begin
        // Initialisierung bei Reset
        multiplicand <= 32'd0;
        multiplier   <= 32'd0;
        product      <= 64'd0;
        bit_index    <= 6'd0;
        busy         <= 1'b0;
    end
    else
    begin
        // Behandlung von Bus-Schreibzugriffen
        if (we)
        begin
            case (address)
                MUL1_OFFSET: begin
                    // Schreiben des ersten Multiplikanden
                    multiplicand <= write_data;
                end
                MUL2_OFFSET: begin
                    // Schreiben des zweiten Multiplikators -> Start der Multiplikation

```

```

        multiplier <= write_data;
        product    <= 64'd0;
        bit_index  <= 6'd31;
        busy       <= 1'b1;
    end
endcase
end

// Wenn busy = 1, läuft die sequentielle Multiplikation
if (busy)
begin
    if (multiplier[bit_index])
    begin
        product <= product + ((64'd1 << bit_index) * multiplicand);
    end

    // Bitzähler reduzieren
    if (bit_index == 0)
    begin
        // Sobald alle Bits durch sind, ist die Multiplikation abgeschlossen
        busy <= 1'b0;
    end
    else
    begin
        bit_index <= bit_index - 1;
    end
end
end
end
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/spi.v

Modul: spi

Kurzbeschreibung: SPI-Peripheriemodul mit internen FIFO-Puffern.

Dieses Modul stellt ein SPI-Master-Interface bereit (MOSI/MISO/CLK/CS), mit jeweils einem TX- und RX-FIFO zur gepufferten Übertragung von Datenpaketen. Die Baudrate wird über ein konfigurierbares Clock-Divider- Register gesteuert. Zusätzlich kann zwischen automatischer und manueller Steuerung des CS-Signals gewählt werden. Register-Offsets innerhalb des Moduls: - CTRL_OFFSET : Steuerregister (Aktivierung, CS-Gen, etc.) - CLK_OFFSET : Clock-Divider-Register (zur SPI-Takterzeugung) - STATUS_OFFSET : Statusbits (z. B. Busy, FIFO-Zustände) - TX_OFFSET : TX-FIFO-Schreibregister - RX_OFFSET : RX-FIFO-Leseregister - CS_OFFSET : Manuelle Chip-Select-Steuerung

Parameter:

- FIFO_TX_DEPTH = 8 Anzahl der Einträge im FIFO für TX
- FIFO_RX_DEPTH = 8 Anzahl der Einträge im FIFO für RX

Lokale Parameter:

- CTRL_OFFSET Offset für das Steuerregister
- CLK_OFFSET Offset für den Baudratenteiler
- STATUS_OFFSET Offset für das Statusregister
- TX_OFFSET Offset zum Schreiben in den TX-FIFO
- RX_OFFSET Offset zum Lesen aus dem RX-FIFO
- CS_OFFSET Offset für manuelle Chip-Select-Steuerung
- STATE_IDLE Leerlaufzustand
- STATE_LOAD Daten werden aus dem TX-FIFO übernommen
- STATE_LOAD_WAIT Wartezyklus nach dem Laden
- STATE_TRANSFER Aktive SPI-Datenübertragung

Eingänge:

- clk Systemtakt
- rst_n Asynchroner, aktiver-LOW Reset
- [7:0] address Auswahl des Registers innerhalb des SPI-Moduls
- [31:0] write_data Daten, die in ein ausgewähltes Register geschrieben werden
- we Write-Enable-Signal
- re Read-Enable-Signal
- wire spi_miso SPI-Daten-Eingang (Master In, Slave Out)

Ausgänge:

- [31:0] read_data Ausgelesener Wert aus dem entsprechenden Register
- reg spi_clk SPI-Clock-Ausgang
- reg spi_mosi SPI-Daten-Ausgang (Master Out, Slave In)
- wire spi_cs SPI-Chip-Select (automatisch oder manuell)

Source Code

```
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module spi #(
    parameter FIFO_TX_DEPTH = 8,
    parameter FIFO_RX_DEPTH = 8
) (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [ 7:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output wire [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re,
    output reg      spi_clk,
    output reg      spi_mosi,
    input wire      spi_miso,
    output wire      spi_cs
);

// -----
// Register-Offsets innerhalb des Adressraums
// -----
localparam CTRL_OFFSET    = 8'h00;
localparam CLK_OFFSET     = 8'h04;
localparam STATUS_OFFSET  = 8'h08;
localparam TX_OFFSET      = 8'h0C;
localparam RX_OFFSET      = 8'h10;
localparam CS_OFFSET      = 8'h14;

// -----
// Zustände des internen State-Automaten
// -----
localparam STATE_IDLE     = 2'd0;
localparam STATE_LOAD     = 2'd1;
localparam STATE_LOAD_WAIT = 2'd2;
localparam STATE_TRANSFER = 2'd3;

// -----
// Registervariablen und -signale
// -----
reg [15:0] spi_clk_div;
```

```

reg [15:0] new_spi_clk_div;
reg [16:0] clk_counter;
reg [ 7:0] tx_shift;
reg [ 7:0] rx_shift;
reg [ 7:0] rx_fifo_din;
reg [ 1:0] state;
reg [ 3:0] bit_cnt;
reg [ 1:0] spi_ctrl;
reg tx_fifo_rd_en;
reg rx_fifo_wr_en;
reg rx_fifo_rd_en;
reg read_flag;
reg spi_clk_en;
reg active;
reg cs;
reg cs_gen;
reg cs_manual;
reg cs_manual_next;

// -----
// FIFOs für TX und RX
// -----
wire [8:0] tx_fifo_din;
wire [8:0] tx_fifo_dout;
wire [7:0] rx_fifo_dout;
wire [7:0] status_bits;
wire clk_div_zero;
wire spi_busy;
wire spi_ready;
wire tx_fifo_wr_en;
wire tx_fifo_empty;
wire tx_fifo_full;
wire rx_fifo_empty;
wire rx_fifo_full;
wire fifo_full;

// -----
// Externe Zuweisungen
// -----
assign clk_div_zero      = (~|spi_clk_div);
assign spi_busy          = (state != STATE_IDLE);
assign fifo_full         = rx_fifo_full | tx_fifo_full;
assign spi_ready         = !spi_busy & tx_fifo_empty & rx_fifo_empty;
assign status_bits       = {clk_div_zero, fifo_full, spi_ready, spi_busy, rx_fifo_full, rx_fifo_empty, tx_fifo_full};
assign tx_fifo_din[8:0] = write_data[8:0];
assign tx_fifo_wr_en     = we && (address[7:0] == TX_OFFSET);
assign spi_cs            = cs_gen ? cs : cs_manual;

// -----
// TX-FIFO Instanz
// -----
fifo #(
    .DATA_WIDTH (9),
    .DEPTH      (FIFO_TX_DEPTH)
) spi_tx_fifo (
    .clk      (clk),
    .rst_n    (rst_n),
    .wr_en    (tx_fifo_wr_en),
    .rd_en    (tx_fifo_rd_en),

```

```

.din    (tx_fifo_din),
.dout    (tx_fifo_dout),
.empty    (tx_fifo_empty),
.full    (tx_fifo_full)
);

// -----
// RX-FIFO Instanz
// -----
fifo #(
    .DATA_WIDTH (8),
    .DEPTH      (FIFO_RX_DEPTH)
) spi_rx_fifo (
    .clk    (clk),
    .rst_n  (rst_n),
    .wr_en  (rx_fifo_wr_en),
    .rd_en  (rx_fifo_rd_en),
    .din    (rx_fifo_din),
    .dout    (rx_fifo_dout),
    .empty  (rx_fifo_empty),
    .full   (rx_fifo_full)
);

// -----
// Lesen aus SPI-Registern (CTRL, CLK, STATUS, RX, CS)
// -----
assign read_data = (address[7:0] == CTRL_OFFSET) ? {30'd0, cs_gen, active} :
                  (address[7:0] == CLK_OFFSET)  ? {16'd0, spi_clk_div} :
                  (address[7:0] == STATUS_OFFSET) ? {24'd0, status_bits} :
                  (address[7:0] == RX_OFFSET)    ? {24'd0, rx_fifo_dout} :
                  (address[7:0] == CS_OFFSET)    ? {31'd0, cs_manual} :
                  32'd0;

// -----
// Clock-Divider-Logik: Erzeugung von spi_clk
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        clk_counter <= 16'b0;
        spi_clk_en <= 1'b0;
    end
    else
    begin

        if (state == STATE_LOAD)
        begin
            clk_counter <= 16'b1;
            spi_clk_en <= 1'b0;

        end
        else if (clk_counter >= {spi_clk_div[15: 0], ~|spi_clk_div})
        begin
            clk_counter <= 16'b1;
            spi_clk_en <= 1'b1;

        end
        else
    end
end

```

```

begin
    clk_counter <= clk_counter + 16'b1;
    spi_clk_en <= 1'b0;
end

end

end

// -----
// Zustandsmaschine für SPI
// - Übergänge zwischen Ladephase, Übertragung etc.
// - Steuert spi_clk, mosi, bit_cnt, etc.
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        state          <= STATE_IDLE;
        cs              <= 1'b1;
        cs_manual       <= 1'b1;
        spi_clk         <= 1'b0;
        bit_cnt         <= 4'b0;
        tx_shift        <= 8'b0;
        rx_shift        <= 8'b0;
        read_flag       <= 1'b0;
        tx_fifo_rd_en   <= 1'b0;
        rx_fifo_wr_en   <= 1'b0;
        spi_mosi        <= 1'b0;
    end
    else
    begin
        // Standard: Deaktivierung von FIFO-Lese/Schreib-Enables
        tx_fifo_rd_en <= 1'b0;
        rx_fifo_wr_en <= 1'b0;

        case (state)

            STATE_IDLE:
            begin
                cs_manual <= cs_manual_next;
                cs        <= 1'b1;
                spi_clk   <= 1'b0;
                bit_cnt   <= 4'b0;

                if (active && !tx_fifo_empty)
                begin
                    cs          <= 1'b0;
                    tx_shift    <= tx_fifo_dout[7:0];
                    tx_fifo_rd_en <= 1'b0;
                    state       <= STATE_LOAD;
                end
            end

            STATE_LOAD:
            begin
                tx_fifo_rd_en <= 1'b1;
                state        <= STATE_LOAD_WAIT;
                cs           <= 1'b0;
            end
        endcase
    end
end

```



```

STATE_LOAD_WAIT:
begin
    tx_shift      <= tx_fifo_dout[7:0];
    read_flag     <= tx_fifo_dout[8];
    tx_fifo_rd_en <= 1'b0;
    rx_shift      <= 8'd0;
    bit_cnt       <= 4'b0;
    spi_clk       <= 1'b0;
    spi_mosi      <= tx_fifo_dout[7];
    state         <= STATE_TRANSFER;
end

STATE_TRANSFER:
begin
    if (spi_clk_en)
    begin
        if (spi_clk == 0)
        begin
            spi_clk <= 1'b1;

            if (bit_cnt <= 3'd7)
            begin
                rx_shift[3'd7 - bit_cnt[2:0]] <= spi_miso;
            end
        end
    else
    begin
        spi_clk <= 1'b0;

        if (bit_cnt < 3'd7)
        begin
            bit_cnt  <= bit_cnt + 4'b1;
            spi_mosi <= tx_shift[3'd6 - bit_cnt[2: 0]];
        end
    else
    begin
        if (read_flag)
        begin
            rx_fifo_din  <= rx_shift;
            rx_fifo_wr_en <= 1'b1;
        end

        if (!tx_fifo_empty)
        begin
            state <= STATE_LOAD;
            //tx_fifo_rd_en <= 1'b1;
        end
    else
    begin
        cs      <= 1'b1;
        state   <= STATE_IDLE;
    end
    end
    end
    end
    else
        state <= STATE_TRANSFER;
    end

default:

```

```

        state <= STATE_IDLE;

    endcase
end
end

// -----
// Kontrolle der SPI-Einstellungen (CTRL, CLK, CS)
// - Hier wird z. B. active und cs_gen gesetzt, sowie
//   der Takteiler aktualisiert
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        active          <= 1'b1;
        cs_manual_next  <= 1'b1;
        cs_gen          <= 1'b1;
        spi_clk_div     <= 16'd0;
        new_spi_clk_div <= 16'd0;
    end
    else if (we)
    begin

        case (address[7:0])

            CTRL_OFFSET:
            begin
                active    <= write_data[0];
                cs_gen    <= write_data[1];
            end

            CLK_OFFSET:
            begin
                new_spi_clk_div <= write_data;
            end

            CS_OFFSET:
            begin
                cs_manual_next <= ~write_data[0];
            end

            default : ;

        endcase

    end
    else if (spi_ready)
        spi_clk_div <= new_spi_clk_div;
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/system_timer.v

Modul: system_timer

Kurzbeschreibung: System Timer

Dieses Modul stellt einen System-Timer bereit, der sowohl Millisekunden- als auch Mikrosekunden-Zähler verwaltet. Zwei Zähler (ms_counter, mik_counter) laufen in Abhängigkeit von CLK_FREQ, wodurch sich systemweite Zeitstempel erzeugen

lassen. Über Register kann der Zählerinhalt ausgelesen oder zurückgesetzt werden. Register-Offsets: - MS_L_OFFSET : Niedrigere 32 Bit des Millisekunden-Zählers - MS_H_OFFSET : Höhere 32 Bit des Millisekunden-Zählers - MIK_L_OFFSET : Niedrigere 32 Bit des Mikrosekunden-Zählers - MIK_H_OFFSET : Höhere 32 Bit des Mikrosekunden-Zählers - SYS_CLOCK : Liefert die aktuelle Taktrate in Hz (niedrigere 32 Bit)

Lokale Parameter:

- MS_COUNT_LIMIT Obergrenze für 1 ms (basierend auf CLK_FREQ)
- MIK_COUNT_LIMIT Obergrenze für 1 μ s (basierend auf CLK_FREQ)
- MS_COUNTER_WIDTH Breite des Zählers für ms_counter
- MIK_COUNTER_WIDTH Breite des Zählers für mik_counter
- MS_L_OFFSET Registeroffset für Millisekunden (Low)
- MS_H_OFFSET Registeroffset für Millisekunden (High)
- MIK_L_OFFSET Registeroffset für Mikrosekunden (Low)
- MIK_H_OFFSET Registeroffset für Mikrosekunden (High)
- SYS_CLOCK Registeroffset für das Auslesen der Taktfrequenz

Eingänge:

- clk Systemtakt.
- rst_n Asynchroner, aktiver-LOW Reset.
- [7:0] address Busadresse für das Lesen/Schreiben der Timerregister.
- [31:0] write_data Zu schreibende Daten (z. B. zum Zurücksetzen).
- we Write-Enable.
- re Read-Enable.

Ausgänge:

- [31:0] read_data Enthält gelesene Daten abhängig von address.

Source Code

```
`include "../defines.v"
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module system_timer (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [ 7:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output wire [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re
);

    localparam MS_COUNT_LIMIT    = (`CLK_FREQ / 1000)    - 1;
    localparam MIK_COUNT_LIMIT   = (`CLK_FREQ / 1000000) - 1;
    localparam MS_COUNTER_WIDTH  = $clog2(MS_COUNT_LIMIT + 1);
    localparam MIK_COUNTER_WIDTH = $clog2(MIK_COUNT_LIMIT + 1);

    localparam MSW = MS_COUNTER_WIDTH;
    localparam MKW = MIK_COUNTER_WIDTH;

    localparam MS_L_OFFSET = 8'h00;
    localparam MS_H_OFFSET = 8'h04;
    localparam MIK_L_OFFSET = 8'h08;
    localparam MIK_H_OFFSET = 8'h0C;
    localparam SYS_CLOCK    = 8'h10;

    // -----
    // Timer-Register:
```

```

// - ms_counter + sys_tim_ms: für Millisekunden
// - mik_counter + sys_tim_mik: für Mikrosekunden
// -----
reg [MSW-1:0] ms_counter;
reg [MKW-1:0] mik_counter;
reg [ 63 :0] sys_tim_ms;
reg [ 63 :0] sys_tim_mik;

wire [31:0] sys_clk;

assign sys_clk = `CLK_FREQ;

// -----
// Leseauswahl je nach address:
// -----
assign read_data = (address == MS_L_OFFSET) ? sys_tim_ms [31: 0] :
                    (address == MS_H_OFFSET) ? sys_tim_ms [63:32] :
                    (address == MIK_L_OFFSET) ? sys_tim_mik[31: 0] :
                    (address == MIK_H_OFFSET) ? sys_tim_mik[63:32] :
                    (address == SYS_CLOCK)    ? sys_clk    [31: 0] :
                    32'd0;

// -----
// Millisekunden-Zähler
// - ms_counter zählt bis MS_COUNT_LIMIT
// - Wird der Wert erreicht, dann sys_tim_ms++
// - Auf Write an MS_L_OFFSET wird Timer zurückgesetzt
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        sys_tim_ms <= 64'd0;
        ms_counter <= {MSW{1'b0}};
    end
    else
    begin
        if(we && (address == MS_L_OFFSET))
        begin
            sys_tim_ms <= 64'd0;
            ms_counter <= {MSW{1'b0}};
        end
        else if (ms_counter == MS_COUNT_LIMIT)
        begin
            sys_tim_ms <= sys_tim_ms + 1;
            ms_counter <= {MSW{1'b0}};
        end
        else
        begin
            ms_counter <= ms_counter + 1;
        end
    end
end

// -----
// Mikrosekunden-Zähler
// - mik_counter zählt bis MIK_COUNT_LIMIT
// - Wird der Wert erreicht, dann sys_tim_mik++
// - Auf Write an MIK_L_OFFSET wird Timer zurückgesetzt
// -----

```

```

always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        sys_tim_mik    <= 64'd0;
        mik_counter    <= {MKW{1'b0}};
    end
    else
    begin
        if(we && (address == MIK_L_OFFSET))
        begin
            sys_tim_mik    <= 64'd0;
            mik_counter    <= {MKW{1'b0}};
        end
        else if (mik_counter == MIK_COUNT_LIMIT)
        begin
            sys_tim_mik <= sys_tim_mik + 1;
            mik_counter <= {MKW{1'b0}};
        end
        else
        begin
            mik_counter <= mik_counter + 1;
        end
    end
end
endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/uart.v

Modul: uart

Kurzbeschreibung: UART-Modul mit TX-/RX-FIFOs

Dieses Modul implementiert eine einfache serielle Schnittstelle (UART). Es enthält interne FIFOs (TX und RX), die in ihrer Tiefe per Parameter festgelegt werden können. Die Baudrate kann über das Baudraten-Register gewählt werden, wobei mehrere vordefinierte Optionen existieren (z. B. 115200, 57600). Register-Offsets innerhalb des UART-Moduls: - **CTRL_OFFSET** : Steuerregister (z. B. Aktivierung). - **BAUD_OFFSET** : Wahl der Baudraten-Voreinstellung (4-Bit: 0..11). - **STATUS_OFFSET** : Statusbits (z. B. FIFO-Zustand, Busy). - **TX_OFFSET** : Schreiben in die TX-FIFO. - **RX_OFFSET** : Lesen aus der RX-FIFO.

Lokale Parameter:

- **BAUD_DIV_115200 ... BAUD_DIV_300** : Vordefinierte Baudteiler abhängig von **CLK_FREQ**.
- **DIV_WIDTH** : Breite der Taktteilerzähler.
- **CTRL_OFFSET** : Offset für das Steuerregister.
- **BAUD_OFFSET** : Offset für das Baudratenregister.
- **STATUS_OFFSET** : Offset für Statusbits.
- **TX_OFFSET** : Offset zum Schreiben in die TX-FIFO.
- **RX_OFFSET** : Offset zum Lesen aus der RX-FIFO.

Eingänge:

- **clk** Systemtakt
- **rst_n** Asynchrones, aktives-LOW Reset
- **[7:0] address** Adressoffset zur Auswahl der Register
- **[31:0] write_data** Zu schreibende Daten in das jeweilige Register
- **we** Write-Enable-Signal
- **re** Read-Enable-Signal
- **uart_rx** UART-Eingangssignal (RX)

Ausgänge:

- **[31:0] read_data** Gelesener Wert aus dem entsprechenden Register
- **reg uart_tx** UART-Ausgangssignal (TX)

Source Code

```
`include "../defines.v"
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module uart #(
    parameter FIFO_TX_DEPTH = 16,
    parameter FIFO_RX_DEPTH = 16
) (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [ 7:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output wire [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re,
    output reg      uart_tx,
    input wire      uart_rx
);

// -----
// Vordefinierte Baudteiler für verschiedene Standardbaudraten
// basierend auf dem Makro `CLK_FREQ` aus "defines.v".
// -----
localparam BAUD_DIV_115200 = `BAUD_DIV(115200);
localparam BAUD_DIV_57600  = `BAUD_DIV(57600);
localparam BAUD_DIV_38400  = `BAUD_DIV(38400);
localparam BAUD_DIV_28800  = `BAUD_DIV(28800);
localparam BAUD_DIV_23040  = `BAUD_DIV(23040);
localparam BAUD_DIV_19200  = `BAUD_DIV(19200);
localparam BAUD_DIV_14400  = `BAUD_DIV(14400);
localparam BAUD_DIV_9600   = `BAUD_DIV(9600);
localparam BAUD_DIV_4800   = `BAUD_DIV(4800);
localparam BAUD_DIV_2400   = `BAUD_DIV(2400);
localparam BAUD_DIV_1200   = `BAUD_DIV(1200);
localparam BAUD_DIV_300    = `BAUD_DIV(300);

// -----
// Breite der Teilerzähler
// -----
localparam DIV_WIDTH      = $clog2(BAUD_DIV_300 + 1);

// -----
// Register-Offsets
// -----
localparam CTRL_OFFSET    = 8'h00;
localparam BAUD_OFFSET    = 8'h04;
localparam STATUS_OFFSET  = 8'h08;
localparam TX_OFFSET      = 8'h0C;
localparam RX_OFFSET      = 8'h10;

// -----
// Zustände für RX/TX State Machines
// -----
localparam RX_IDLE        = 2'd0;
localparam RX_START       = 2'd1;
```

```

localparam RX_DATA          = 2'd2;
localparam RX_STOP          = 2'd3;

localparam TX_IDLE          = 2'd0;
localparam TX_START         = 2'd1;
localparam TX_DATA          = 2'd2;
localparam TX_STOP          = 2'd3;

// -----
// Bauddiv-Zähler, Shiftregister etc.
// -----
reg [DIV_WIDTH - 1:0] tx_bd_cntr; //Bauddiv-Zähler für TX
reg [DIV_WIDTH - 1:0] rx_bd_cntr; //Bauddiv-Zähler für RX
reg [DIV_WIDTH - 1:0] bd_div_cnt; // Zwischenspeicher für akt. Baudratenteiler

reg [ 7:0] tx_shift;    // 8-Bit Shiftregister zum Senden
reg [ 7:0] rx_shift;    // 8-Bit Shiftregister zum Empfangen
reg [ 3:0] baud_sel;    // Auswahl der Baudrate (0..11)
reg [ 3:0] new_baud_sel; // Puffer für Baudraten-Update
reg [ 2:0] tx_bit_id;   // Zähler für TX-Bits
reg [ 2:0] rx_bit_id;   // Zähler für RX-Bits
reg [ 1:0] tx_state;    // State Machine: Senden
reg [ 1:0] rx_state;    // State Machine: Empfangen

reg rx_fifo_we;         // Schreibeaktivierung RX-FIFO
reg tx_fifo_rd;         // Leseaktivierung TX-FIFO
reg rx_sync_1;          // Doppelte Synchronisierung von uart_rx
reg rx_sync_2;
reg rx_last;            // Letzter Zustand vom synchronisieren RX
reg new_active;          // Puffer für aktives UART
reg active;             // UART aktiv?

// -----
// FIFOs und Statusbits
// -----
wire [7:0] tx_fifo_dout;
wire [7:0] rx_fifo_dout;
wire [7:0] tx_data;
wire [7:0] rx_data;
wire [5:0] status_bits;

wire tx_fifo_we;
wire rx_fifo_re;
wire tx_fifo_empty;
wire tx_fifo_full;
wire rx_fifo_empty;
wire rx_fifo_full;
wire rx_fall_edge;
wire uart_busy;
wire uart_ready;

// -----
// Wahl des Baudteilers basierend auf baud_sel
// -----
always @( * )
begin
    case (baud_sel)
        4'd0    : bd_div_cnt = BAUD_DIV_115200;
        4'd1    : bd_div_cnt = BAUD_DIV_57600;
        4'd2    : bd_div_cnt = BAUD_DIV_38400;
    endcase
end

```

```

4'd3      : bd_div_cnt = BAUD_DIV_28800;
4'd4      : bd_div_cnt = BAUD_DIV_23040;
4'd5      : bd_div_cnt = BAUD_DIV_19200;
4'd6      : bd_div_cnt = BAUD_DIV_14400;
4'd7      : bd_div_cnt = BAUD_DIV_9600;
4'd8      : bd_div_cnt = BAUD_DIV_4800;
4'd9      : bd_div_cnt = BAUD_DIV_2400;
4'd10     : bd_div_cnt = BAUD_DIV_1200;
4'd11     : bd_div_cnt = BAUD_DIV_300;
default   : bd_div_cnt = BAUD_DIV_115200;
endcase
end

// -----
// Aufsplitten von write_data in 8 Bit
// -----
assign tx_data[7:0] = write_data[7:0];
assign rx_data[7:0] = rx_fifo_dout[7:0];

// Wenn in TX_OFFSET geschrieben wird, soll in TX-FIFO geschrieben werden
assign tx_fifo_we = we && (address[7:0] == TX_OFFSET);

// Wenn RX_OFFSET gelesen wird, soll aus RX-FIFO gelesen werden
assign rx_fifo_re = re && (address[7:0] == RX_OFFSET);

// -----
// UART-Busy, wenn TX oder RX gerade senden/empfangen
// -----
assign uart_busy = ((tx_state != TX_IDLE) | (rx_state != RX_IDLE));
// UART_ready, wenn nicht busy und beide FIFOs leer
assign uart_ready = !uart_busy & tx_fifo_empty & rx_fifo_empty;

// -----
// Statusbits (bit 5:0)
// -----
// bit5 = tx_fifo_empty
// bit4 = tx_fifo_full
// bit3 = rx_fifo_empty
// bit2 = rx_fifo_full
// bit1 = uart_busy
// bit0 = uart_ready
assign status_bits = {uart_ready, uart_busy, rx_fifo_full, rx_fifo_empty, tx_fifo_full, tx_fifo_empty};

// -----
// Erkennung fallende Flanke bei RX (Startbit-Erkennung)
// -----
assign rx_fall_edge = (rx_last == 1'b1) && (rx_sync_2 == 1'b0);

// -----
// Leseauswahl für read_data
// -----
assign read_data = (address[7:0] == CTRL_OFFSET) ? {31'd0, active} :
                  (address[7:0] == BAUD_OFFSET) ? {28'd0, baud_sel} :
                  (address[7:0] == STATUS_OFFSET) ? {26'd0, status_bits} :
                  (address[7:0] == RX_OFFSET) ? {23'd0, !rx_fifo_empty, rx_data} :
                  32'd0;

// -----
// TX-FIFO (zur Pufferung ausgehender Daten)
// -----

```



```

fifo #(
    .DATA_WIDTH (8),
    .DEPTH      (FIFO_TX_DEPTH)
) tx_fifo_inst (
    .clk      (clk),
    .rst_n    (rst_n),
    .wr_en    (tx_fifo_we),
    .din      (tx_data),
    .rd_en    (tx_fifo_rd),
    .dout     (tx_fifo_dout),
    .empty    (tx_fifo_empty),
    .full     (tx_fifo_full)
);

// -----
// RX-FIFO (zur Pufferung eingehender Daten)
// -----
fifo #(
    .DATA_WIDTH (8),
    .DEPTH      (FIFO_RX_DEPTH)
) rx_fifo_inst (
    .clk      (clk),
    .rst_n    (rst_n),
    .wr_en    (rx_fifo_we),
    .din      (rx_shift),
    .rd_en    (rx_fifo_re),
    .dout     (rx_fifo_dout),
    .empty    (rx_fifo_empty),
    .full     (rx_fifo_full)
);

// -----
// TX-State Machine:
// TX_IDLE  -> warten, bis Daten in TX-FIFO + active=1
// TX_START -> Latenz für Startbit
// TX_DATA  -> Sendet 8 Datenbits
// TX_STOP  -> Sendet Stopbit
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        tx_state    <= TX_IDLE;
        tx_bd_cntr  <= {DIV_WIDTH{1'b0}};
        tx_fifo_rd  <= 1'b0;
        uart_tx     <= 1'b1;
        tx_shift    <= 8'd0;
        tx_bit_id   <= 3'b0;
    end
    else
    begin

        case (tx_state)

            TX_IDLE:
            begin
                tx_bd_cntr <= {DIV_WIDTH{1'b0}};

                if (!tx_fifo_empty && active)

```

```

begin
    tx_shift    <= tx_fifo_dout;
    tx_state    <= TX_START;
    tx_fifo_rd  <= 1'b1;
end
end

TX_START:
begin
    tx_fifo_rd <= 1'b0;
    if (tx_bd_cntr == bd_div_cnt)
    begin
        tx_bd_cntr <= {DIV_WIDTH{1'b0}};
        tx_bit_id  <= 3'b0;
        uart_tx    <= tx_shift[0];
        tx_shift   <= {1'b0, tx_shift[7:1]};
        tx_state   <= TX_DATA;
    end
    else
    begin
        tx_bd_cntr <= tx_bd_cntr + {{(DIV_WIDTH - 1) {1'b0}}, 1'b1};
        uart_tx    <= 1'b0;
    end
end

TX_DATA:
begin
    if (tx_bd_cntr == bd_div_cnt)
    begin
        tx_bd_cntr <= {DIV_WIDTH{1'b0}};
        uart_tx    <= tx_shift[0];
        tx_shift   <= {1'b0, tx_shift[7:1]};

        if (tx_bit_id < 7)
        begin
            tx_bit_id <= tx_bit_id + 3'b1;
            tx_state  <= TX_DATA;
        end
        else
            tx_state <= TX_STOP;
    end
    else
    begin
        tx_bd_cntr <= tx_bd_cntr + {{(DIV_WIDTH - 1) {1'b0}}, 1'b1};
        tx_state   <= TX_DATA;
    end
end

TX_STOP:
begin
    if (tx_bd_cntr == bd_div_cnt)
    begin
        tx_bd_cntr <= {DIV_WIDTH{1'b0}};
        tx_state   <= TX_IDLE;
    end
    else
    begin
        tx_bd_cntr <= tx_bd_cntr + {{(DIV_WIDTH - 1) {1'b0}}, 1'b1};
        uart_tx    <= 1'b1;
    end
end

```

```

        end

        default : tx_state <= TX_IDLE;

    endcase
end
end

// -----
// RX-Synchronisation: Doppelte Abtastung von uart_rx
// -> rx_sync_1, rx_sync_2, rx_last zum Erkennen von Flanken
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        rx_sync_1 <= 1'b1;
        rx_sync_2 <= 1'b1;
        rx_last    <= 1'b1;
    end
    else
    begin
        rx_sync_1 <= uart_rx;
        rx_sync_2 <= rx_sync_1;
        rx_last    <= rx_sync_2;
    end
end

// -----
// RX-State Machine: Empfangen eines Bytes
// RX_IDLE -> Warten auf fallende Flanke (Startbit)
// RX_START -> Warte eine halbe Bitdauer
// RX_DATA -> 8 Bits empfangen
// RX_STOP -> Stopbit abwarten, ggf. in FIFO schreiben
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        rx_state    <= RX_IDLE;
        rx_bd_cntr  <= {DIV_WIDTH{1'b0}};
        rx_bit_id   <= 3'b0;
        rx_fifo_we  <= 1'b0;
    end
    else
    begin
        rx_fifo_we <= 1'b0;

        case (rx_state)

            RX_IDLE:
            begin
                rx_bd_cntr <= {DIV_WIDTH{1'b0}};

                if (rx_fall_edge)
                    rx_state <= RX_START;
            end

            RX_START:
            begin

```

```

    if (rx_bd_cntr == (bd_div_cnt >> 1))
    begin
        rx_bd_cntr <= {DIV_WIDTH{1'b0}};
        rx_bit_id  <= 3'b0;
        rx_state   <= RX_DATA;
    end
    else
        rx_bd_cntr <= rx_bd_cntr + 1;
    end

RX_DATA:
begin
    if (rx_bd_cntr == bd_div_cnt)
    begin
        rx_bd_cntr          <= {DIV_WIDTH{1'b0}};
        rx_shift[rx_bit_id] <= uart_rx;

        if (rx_bit_id == 7)
            rx_state <= RX_STOP;
        else
            rx_bit_id <= rx_bit_id + 1;

    end
    else
        rx_bd_cntr <= rx_bd_cntr + 1;
    end

RX_STOP:
begin
    if (rx_bd_cntr == bd_div_cnt)
    begin
        rx_bd_cntr <= {DIV_WIDTH{1'b0}};

        if (!rx_fifo_full)
            rx_fifo_we <= 1'b1;

        rx_state <= RX_IDLE;
    end
    else
        rx_bd_cntr <= rx_bd_cntr + 1;
    end

default:
    rx_state <= RX_IDLE;

endcase
end
end

// -----
// Steuerung von "active", "baud_sel" (Register-Schreibzugriffe)
// Erst wenn das UART idle und die FIFOs leer sind (uart_ready),
// wird baud_sel und active aktualisiert.
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        active          <= 1'b1;
        new_active      <= 1'b1;
    end
end

```

```

    baud_sel      <= 4'd0;
    new_baud_sel  <= 4'd0;
end
else if (we)
begin

    case (address[7:0])

        CTRL_OFFSET:
        begin
            new_active  <= write_data[0];
        end

        BAUD_OFFSET:
            new_baud_sel <= write_data[3:0];

        default: ;

    endcase
end
else
if (uart_ready)
begin
    baud_sel <= new_baud_sel;
    active  <= new_active;
end
end

endmodule

```

Datei: rtl/peripherals/ws2812b.v

Modul: ws2812b

Kurzbeschreibung: Treibermodul für WS2812B-LEDs (NeoPixel).

Dieses Modul steuert eine Kette von WS2812B-LEDs. Es werden nacheinander 24-Bit-Farbwerte (GRB) an die LEDs gesendet. Die Zeitsteuerung erfolgt über entsprechende Zähler (T0H, T0L, T1H, T1L, T_RESET). Dieses Beispiel zeigt eine einfache State-Maschine, die die Daten nacheinander an jede LED überträgt, dann ein Reset-Puls erzeugt und wieder von vorne beginnt. Register-Offsets (jeweils 8 Bit auseinanderliegend): - 0x00: Daten für LED 0 - 0x04: Daten für LED 1 - 0x08: Daten für LED 2 - 0x0C: Daten für LED 3 - 0x10: Daten für LED 4 - 0x14: Daten für LED 5 - 0x18: Daten für LED 6 - 0x1C: Daten für LED 7

Lokale Parameter:

- CLK_PERIOD_NS Zeit pro Takt in Nanosekunden, abgeleitet aus CLK_FREQ.
- T0H Länger des "High" bei Bit=0
- T0L Länger des "Low" bei Bit=0
- T1H Länger des "High" bei Bit=1
- T1L Länger des "Low" bei Bit=1
- T_RESET Pause, damit die LED-Kette den Frame erkennt
- STATE_LOAD_LED Initialer Zustand zum Laden der LED-Daten
- STATE_SEND_HIGH Sendephase: Leitung auf High
- STATE_SEND_LOW Sendephase: Leitung auf Low
- STATE_RESET Reset-Pause nach allen Bits

Eingänge:

- clk Systemtakt
- rst_n Asynchroner, aktiver-LOW Reset
- [7:0] address Adressoffset, um eine der 8 LED-Daten zu wählen
- [31:0] write_data Zu schreibender RGB-Wert (24 Bit genutzt)
- we Write Enable zum Setzen von LED-Farbwerten

- re Read Enable zum Auslesen gespeicherter Werte

Ausgänge:

- [31:0] read_data Gibt den gespeicherten RGB-Wert zurück
- reg ws_out Ausgangssignal zur WS2812B-Datenleitung

Source Code

```
`include "../defines.v"
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module ws2812b (
    input wire      clk,
    input wire      rst_n,
    input wire [ 7:0] address,
    input wire [31:0] write_data,
    output wire [31:0] read_data,
    input wire      we,
    input wire      re,
    output reg      ws_out
);

// -----
// Ermitteln der Taktperiode in Nanosekunden basierend auf CLK_FREQ.
// Werte TOH, TOL, T1H, T1L, T_RESET werden gerundet (IntegerDivision).
// -----
localparam CLK_PERIOD_NS = 1_000_000_000 / `CLK_FREQ;
localparam TOH      = (400 + CLK_PERIOD_NS - 1) / CLK_PERIOD_NS;
localparam TOL      = (850 + CLK_PERIOD_NS - 1) / CLK_PERIOD_NS;
localparam T1H      = (800 + CLK_PERIOD_NS - 1) / CLK_PERIOD_NS;
localparam T1L      = (450 + CLK_PERIOD_NS - 1) / CLK_PERIOD_NS;
localparam T_RESET  = (50_000 + CLK_PERIOD_NS - 1) / CLK_PERIOD_NS;

// -----
// Zustandsdefinitionen
// -----
localparam STATE_LOAD_LED      = 2'd0;
localparam STATE_SEND_HIGH    = 2'd1;
localparam STATE_SEND_LOW     = 2'd2;
localparam STATE_RESET        = 2'd3;

// -----
// LED-Daten: 8 LEDs à 24 Bit RGB
// - led_rgb[i] ist ein 24-Bit-Wert, repräsentiert G,R,B
// - Schieberegister shift_reg zum Senden
// -----
reg [23:0] led_rgb [0:7];
reg [23:0] shift_reg;
reg [15:0] timer;
reg [ 4:0] bit_index;
reg [ 2:0] led_index;
reg [ 1:0] state;

// -----
// Lese-Multiplexer: Bei Adressen 0x00, 0x04, 0x08, ... 0x1C
// wird der entsprechende led_rgb[i]-Wert (24 Bit) zurückgegeben.
// Die oberen 8 Bit von read_data bleiben 0.
// -----
```

```

assign read_data = (address[7:0] == 8'h00) ? {8'b0, led_rgb[0]} :
                  (address[7:0] == 8'h04) ? {8'b0, led_rgb[1]} :
                  (address[7:0] == 8'h08) ? {8'b0, led_rgb[2]} :
                  (address[7:0] == 8'h0C) ? {8'b0, led_rgb[3]} :
                  (address[7:0] == 8'h10) ? {8'b0, led_rgb[4]} :
                  (address[7:0] == 8'h14) ? {8'b0, led_rgb[5]} :
                  (address[7:0] == 8'h18) ? {8'b0, led_rgb[6]} :
                  (address[7:0] == 8'h1C) ? {8'b0, led_rgb[7]} :
                  32'd0;

// -----
// Schreiben in die LED-Register
// - address = 0x00, 0x04, ... => speichert 24 Bit in led_rgb
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        led_rgb[0] <= 24'h0;
        led_rgb[1] <= 24'h0;
        led_rgb[2] <= 24'h0;
        led_rgb[3] <= 24'h0;
        led_rgb[4] <= 24'h0;
        led_rgb[5] <= 24'h0;
        led_rgb[6] <= 24'h0;
        led_rgb[7] <= 24'h0;
    end
    else if (we)
    begin
        case(address)
            8'h00: led_rgb[0] <= write_data[23:0];
            8'h04: led_rgb[1] <= write_data[23:0];
            8'h08: led_rgb[2] <= write_data[23:0];
            8'h0C: led_rgb[3] <= write_data[23:0];
            8'h10: led_rgb[4] <= write_data[23:0];
            8'h14: led_rgb[5] <= write_data[23:0];
            8'h18: led_rgb[6] <= write_data[23:0];
            8'h1C: led_rgb[7] <= write_data[23:0];
            default: ;
        endcase
    end
end

// -----
// Haupt-Zustandsmaschine:
// 1) STATE_LOAD_LED: Lade Daten der aktuellen LED in shift_reg.
// 2) STATE_SEND_HIGH: Sende "High"-Phase (TOH oder T1H).
// 3) STATE_SEND_LOW:  Sende "Low"-Phase  (TOL oder T1L).
// 4) STATE_RESET:     Nach allen Bits die Resetlücke (T_RESET).
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        state      <= STATE_LOAD_LED;
        led_index  <= 3'd0;
        bit_index  <= 5'd23;
        timer      <= 0;
        ws_out     <= 0;
        shift_reg  <= 0;
    end
end

```

```

end
else
begin
    case (state)

        STATE_LOAD_LED:
        begin
            shift_reg <= {led_rgb[led_index][23:16], led_rgb[led_index][15:8], led_rgb[led_index][7:0]};
            bit_index <= 23;

            if (shift_reg[23]) begin
                timer <= T1H - 1;
            end else begin
                timer <= TOH - 1;
            end

            ws_out <= 1;
            state <= STATE_SEND_HIGH;
        end

        STATE_SEND_HIGH:
        begin
            if (timer == 0) begin
                timer <= shift_reg[bit_index] ? (T1L - 1) : (TOL - 1);
                ws_out <= 0;
                state <= STATE_SEND_LOW;
            end else begin
                timer <= timer - 1;
            end
        end

        STATE_SEND_LOW:
        begin
            if (timer == 0) begin
                if (bit_index == 0) begin
                    if (led_index == 7) begin
                        timer <= T_RESET - 1;
                        state <= STATE_RESET;
                    end else begin
                        led_index <= led_index + 1;
                        state <= STATE_LOAD_LED;
                    end
                end else begin
                    bit_index <= bit_index - 1;
                    timer <= shift_reg[bit_index - 1] ? (T1H - 1) : (TOH - 1);
                    ws_out <= 1;
                    state <= STATE_SEND_HIGH;
                end
            end else begin
                timer <= timer - 1;
            end
        end

        STATE_RESET:
        begin
            if (timer == 0) begin
                led_index <= 0;
                state <= STATE_LOAD_LED;
            end else begin
                timer <= timer - 1;
            end
        end
    end
end

```



```

        end
    end

    default: state <= STATE_LOAD_LED;

    endcase
end
end
endmodule

```

Datei: rtl/register_file.v

Modul: register_file

Kurzbeschreibung: Registerdatei für den CPU-Kern.

Diese Registerdatei umfasst entweder 32 Register (im RV32I-Mode) oder 16 Register (ansonsten) und unterstützt Lese- und Schreibzugriffe. Der Schreibzugriff erfolgt über ein Write-Enable-Signal, sowie Auswahl des Ziel- und Quellregisters. Bei RISC-V (RV32I) bleibt das Register x0 jederzeit auf 0. @macro RV32I Falls definiert, werden 32 Register angelegt.

Eingänge:

- clk Systemtakt.
- rst_n Asynchroner, aktiver-LOW Reset.
- we Write-Enable-Signal zum Beschreiben eines Registers.
- [4:0] rd Zielregister, in das bei we=1 geschrieben werden soll.
- [4:0] rs1 Erstes Quellregister für eine Leseanfrage.
- [4:0] rs2 Zweites Quellregister für eine Leseanfrage.
- [31:0] rd_data Daten, die in rd geschrieben werden (falls we=1).

Ausgänge:

- [31:0] rs1_data Daten aus dem Register rs1.
- [31:0] rs2_data Daten aus dem Register rs2.

Source Code

```

`include "./defines.v"
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

module register_file (
    input  wire      clk,
    input  wire      rst_n,
    input  wire      we,
    input  wire [ 4:0] rd,
    input  wire [ 4:0] rs1,
    input  wire [ 4:0] rs2,
    input  wire [31:0] rd_data,
    output wire [31:0] rs1_data,
    output wire [31:0] rs2_data
);

`ifdef RV32I
    // Bei aktiviertem RV32I-Macro werden 32 Register definiert (1..31).
    // Register 0 bleibt immer 0.
    reg [31:0] registers[31:1];
`else
    // Sonst 16 Register (1..15).
    reg [31:0] registers[15:1];
`endif

```

```

// -----
// Lesezugriffe:
// - Wenn rs1 != 0, wird das entsprechende Register ausgegeben,
//   sonst 0.
// - Wenn rs2 != 0, wird das entsprechende Register ausgegeben,
//   sonst 0.
// -----
`ifdef RV32I
    assign rs1_data = (rs1 != 5'd0) ? registers[rs1] : 32'd0;
    assign rs2_data = (rs2 != 5'd0) ? registers[rs2] : 32'd0;
`else
    // Nur die unteren 16 Register sind gültig (rd[4] = 0).
    assign rs1_data = (rs1 != 5'd0 && ~rs1[4]) ? registers[rs1] : 32'd0;
    assign rs2_data = (rs2 != 5'd0 && ~rs2[4]) ? registers[rs2] : 32'd0;
`endif

// -----
// Schreibzugriffe:
// - Bei RV32I wird registr[rd] nur beschrieben, wenn rd != 0.
// - Ansonsten nur, wenn rd != 0 und rd[4] nicht gesetzt.
// -----
always @(posedge clk or negedge rst_n)
begin
    if (!rst_n)
    begin
        registers[ 1] <= 32'd0;
        registers[ 2] <= 32'd0;
        registers[ 3] <= 32'd0;
        registers[ 4] <= 32'd0;
        registers[ 5] <= 32'd0;
        registers[ 6] <= 32'd0;
        registers[ 7] <= 32'd0;
        registers[ 8] <= 32'd0;
        registers[ 9] <= 32'd0;
        registers[10] <= 32'd0;
        registers[11] <= 32'd0;
        registers[12] <= 32'd0;
        registers[13] <= 32'd0;
        registers[14] <= 32'd0;
        registers[15] <= 32'd0;
    `ifdef RV32I
        registers[16] <= 32'd0;
        registers[17] <= 32'd0;
        registers[18] <= 32'd0;
        registers[19] <= 32'd0;
        registers[20] <= 32'd0;
        registers[21] <= 32'd0;
        registers[22] <= 32'd0;
        registers[23] <= 32'd0;
        registers[24] <= 32'd0;
        registers[25] <= 32'd0;
        registers[26] <= 32'd0;
        registers[27] <= 32'd0;
        registers[28] <= 32'd0;
        registers[29] <= 32'd0;
        registers[30] <= 32'd0;
        registers[31] <= 32'd0;
    `endif
    end
end

```

```

    else
`ifdef RV32I
        if (we && (rd != 5'd0))
            registers[rd] <= rd_data;
`else
        if (we && (rd != 5'd0) && ~rd[4])
            registers[rd] <= rd_data;
`endif
    end

endmodule

```

Datei: rtl/wgr_v_max.v

Modul: wgr_v_max

Kurzbeschreibung: Top-Level Modul („wgr_v_max“) eines minimalistischen SoC-Systems in HDL (mit CPU, Speicher und Peripherie).

Dieses Modul instanziiert die CPU (`cpu.v`) sowie den Hauptspeicher (`memory.v`). Es stellt außerdem einige grundlegende externe Signale bereit (UART, SPI, PWM, WS, GPIO) und kann somit als oberstes Top-Level Modul fungieren. Zusätzlich enthält es hier exemplarisch einen einfachen LED-Lauflicht-Zähler, der in `gpio_shift` gespeicherte Bits nacheinander auf `gpio_out` legt.

Eingänge:

- `clk` Systemtakt
- `rst_n` Asynchroner, aktiver-LOW Reset
- `uart_rx` RX-Eingang der UART-Schnittstelle
- `spi_miso` SPI-Eingang (Slave->Master)
- `[7:0]` `gpio_in` GPIO-Eingänge

Ausgänge:

- `uart_tx` TX-Ausgang der UART-Schnittstelle
- `[31:0]` `debug_out` Debugging-Signal aus dem Debug-Modul
- `pwm_out` PWM-Ausgang
- `ws_out` Datenleitung für WS2812B-LEDs
- `spi_mosi` SPI-Ausgang (Master->Slave)
- `spi_clk` SPI-Takt
- `spi_cs` SPI-Chipselect
- `[7:0]` `gpio_out` GPIO-Ausgänge
- `[7:0]` `gpio_dir` GPIO-Richtung (derzeit ungenutzt)

Source Code

```

`include "../defines.v"
`default_nettype none
`timescale 1ns / 1ns

```

```

module wgr_v_max (
    input  wire      clk,
    input  wire      rst_n,
    output wire      uart_tx,
    input  wire      uart_rx,
    output wire [31:0] debug_out,
    output wire      pwm_out,
    output wire      ws_out,
    output wire      spi_mosi,
    input  wire      spi_miso,
    output wire      spi_clk,
    output wire      spi_cs,

```

```

output wire [ 7:0] gpio_out,
output wire [ 7:0] gpio_dir,
input  wire [ 7:0] gpio_in
);

// -----
// Interne Verbindungs-Signale zwischen CPU und Memory
// -----
wire [31:0] address;
wire [31:0] write_data;
wire [31:0] read_data;
wire        mem_busy;
wire        we;
wire        re;

// -----
// Beispiel: Lauflicht-Steuerung für GPIO
// -----

//assign gpio_out = gpio_shift;

reg [ 7:0] gpio_shift;

reg [22:0] counter = 0;
reg [ 2:0] position = 0;

always @(posedge clk) begin
    if (counter >= 23'd6000000 - 1) begin
        counter <= 0;
        gpio_shift <= 8'b00000001 << position;
        position <= (position == 3'd7) ? 0 : position + 1;
    end else begin
        counter <= counter + 1;
    end
end

// -----
// CPU-Instanz: generiert Adresse, write_data, we, re und
// empfängt read_data sowie mem_busy
// -----
cpu cpu_inst (
    .clk          (clk),
    .rst_n        (rst_n),
    .address       (address),
    .write_data    (write_data),
    .read_data     (read_data),
    .we            (we),
    .re            (re),
    .mem_busy      (mem_busy)
);

// -----
// Speicher-Modul (RAM/Peripherie), an das die CPU
// ihre Zugriffe weiterleitet
// -----
memory memory_inst (
    .clk          (clk),
    .rst_n        (rst_n),
    .address       (address),

```

```
.write_data (write_data),
.read_data  (read_data),
.we         (we),
.re         (re),
.mem_busy   (mem_busy),
.uart_tx    (uart_tx),
.uart_rx    (uart_rx),
.debug_out  (debug_out),
.pwm_out    (pwm_out),
.ws_out     (ws_out),
.spi_mosi   (spi_mosi),
.spi_miso   (spi_miso),
.spi_clk    (spi_clk),
.spi_cs     (spi_cs),
.gpio_out   (gpio_out),
.gpio_dir   (gpio_dir),
.gpio_in    (gpio_in)
);

endmodule
```