

Zusammenfassung Architektur Eingebetteter System

Paul Nykiel

27. Juli 2019

This page is intentionally left blank.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einführung | 3 |
| 1.1 | Architektur eines Eingebetteten Systems | 3 |
| 1.1.1 | Eigenschaften eines Eingebetteten Systems | 3 |
| 1.1.2 | Zusätzliche Herausforderungen beim Entwurf | 3 |
| 1.1.3 | Entwurfsebenen | 4 |
| 1.2 | Hardwarespezifikationssprachen | 4 |
| 1.2.1 | Aufbau von VHDL-Beschreibungen | 5 |
| 1.2.2 | Beispiel: Multiplexer | 6 |
| 1.3 | Configuration | 7 |
| 1.4 | VHDL-Simulationssemantik | 8 |
| 1.4.1 | Signale Treiben | 8 |
| 1.4.2 | Rückkopplungen auflösen | 8 |
| 1.4.3 | Verzögerungen modellieren | 9 |
| 2 | Processing Elements | 10 |
| 2.1 | Instruction Set Processor (ISP) | 10 |
| 2.1.1 | von-Neumann-/Princeton-Architektur | 10 |
| 2.1.2 | Befehlszyklus | 10 |
| 2.1.3 | Harvard-Architektur | 10 |
| 2.2 | Application Specific Instruction Set Processor (ASIP) | 11 |
| 2.3 | Application Specific Processor | 11 |
| 2.4 | Beispiel: Aufbau eines Schnurlosen DECT-Telefons | 11 |
| 2.5 | Wie kommunizieren PEs in heterogenen Systemen? | 11 |
| 2.5.1 | Gemeinsame Ressourcen (Speicherkopplung) | 11 |
| 2.5.2 | Direkte Verbindung | 11 |
| 2.5.3 | Tiled-Architecture | 11 |
| 3 | Halbleitertechnologien | 12 |
| 3.1 | Full-Custom-Logic Fabric | 12 |
| 3.2 | Semi-Custom (Gate-Array) | 13 |

Kapitel 1

Einführung

Ein eingebettetes System ist in einen technischen Kontext oder Prozess eingebettet.

Im wesentlichen kann ein eingebettetes System als ein Computer, der einen technischen Prozess steuert oder regelt, betrachtet werden.

Grafik

1.1 Architektur eines Eingebetteten Systems

1.1.1 Eigenschaften eines Eingebetteten Systems

- Enge Verzahnung zwischen Hard- und Software
- Strenge funktionale und zeitliche Randbedingungen
- Zusätzlich zum Prozessor wird I/O Hard- und Software benötigt
- Oftmals wird Anwendungsspezifische Hardware benötigt

⇒ Keine „General-Purpose“ Lösung möglich

Zusätzliche Probleme:

- Wenig Platz
- Nur beschränkte Energiekapazität
- System darf nicht warm werden
- Kostengünstig

1.1.2 Zusätzliche Herausforderungen beim Entwurf

Die Entwicklung eines eingebetteten Systems ist kein reines Software-Problem, zusätzlich muss beachtet werden:

- Auswahl eines Prozessors, Signalprozessors, Microcontrollers

- Ein-/Ausgabe Konzept&Komponenten
 - Sensoren und Aktoren
 - Kommunikationsschnittstellen
- Speichertechnologien und Anbindung
- Systempartitionierung: Aufteilen der Funktionen der Komponente
- Logik- und Schaltungsentwurf
- Auswahl geeigneter Halbleitertechnologien
- Entwicklung von Treibersoftware
- Wahl eines Laufzeits-/Betriebssystems
- Die eigentliche Softwareentwicklung

⇒ Aufteilung des Entwurfs auf mehrer Entwurfsebene

1.1.3 Entwurfsebenen

| Verhalten | Syntheseschritt | Entscheidungen | Test |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| System Specification | Systemsynthese | HW/SW/OS | Modelsimulator / Checker |
| Behavioural Specification | Verhalten / Architektursynthese | Verarbeitungseinheiten | HW/SW-Simulation |
| Register-Transfer-Specification | RT-Synthese | Register, Addierer, Mux | HDL-Simulation |
| Logic-Specification | Logiksynthese | Gatter | Gate-Simulation |

Tabelle 1.1: Entwurfsebenen

Grafik

1.2 Hardwarespezifikationssprachen

- Verilog
- VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Description Language)

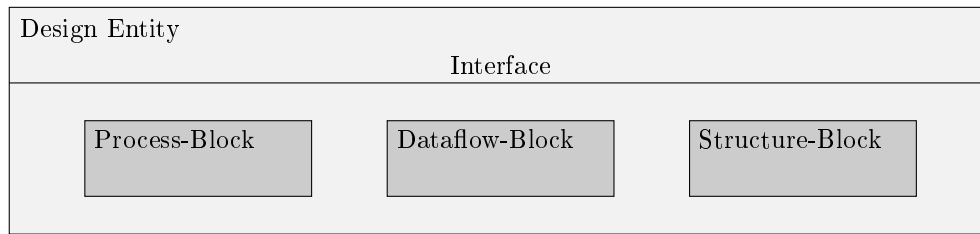


Abbildung 1.1: Aufbau einer Design-Entity

Process-Block Sequentiell abgearbeitete Logik:

```

process (clk)
begin
    ...
end

```

Dataflow-Block Konkurrent abgearbeitete Logik:

```

begin
    ...
end

```

Structure-Block Zusammenschalten weiterer Design-Entitys:

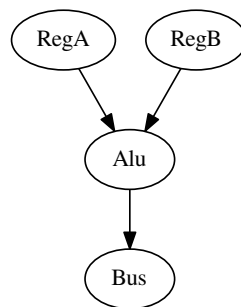


Abbildung 1.2: Structure-Block

1.2.1 Aufbau von VHDL-Beschreibungen

- **use**: Import von Bibliotheken

- **entity**: Schnittstellenbeschreibung
- **architecture**: Implementierung der Entity
- **configuration**: **architecture** zu **entity** auswählen

1.2.2 Beispiel: Multiplexer

Entity-Deklaration:

```
entity MUX is
    port(a,b,sel: in Bit;
          f: out Bit);
end MUX;
```

Als Process-Block

```
architecture BEHAVIOUR_MUX of MUX is
begin
    process(a,b,sel)
    begin
        if sel = '1' then f <= a;
        else f <= b;
        end process;
    end BEHAVIOUR_MUX;
```

Als Dataflow-Block

```
architecture DATAFLOW_MUX of MUX is
begin
    f <= a when sel = '1' else b;
end DATAFLOW_MUX;
```

alternativ geht auch:

```
architecture DATAFLOW_MUX of MUX is
begin
    f <= (a and sel) or (b and (not sel));
end DATAFLOW_MUX;
```

eine weitere Option:

```
architecture DATAFLOW_MUX of MUX is
signal nsel, f1, f2 : Bit;
begin
    nsel <= not sel;
    f1 <= a and sel;
    f2 <= b and nsel;
    f <= f1 or f2;
end DATAFLOW_MUX;
```

Alternativ: Mit Variablen
Als Structure-Block

Laut Skript
geht das so
nicht, sollte
aber eigent-
lich schon?

```
architecture STRUCTURE of MUX is
    component NOT
        port(i: in Bit; o: out Bit);
    end component;
    component AND
        port(i1, i2: in Bit; o: out Bit);
    end component;
    component OR
        port(i1, i2: in Bit; o: out Bit);
    end component;
    signal nsel, f1, f2: Bit;
begin
    g1: AND port map(a, sel, f1);
    g2: AND port map(b, nsel, f2);
    g3: OR port map(f1, f2, f);
    g4: NOT port map(sel, nsel);
end STRUCTURE;
```

1.3 Configuration

Rekursiv die Architektur für jede Entity auswählen:

```
configuration STRUCTURE_MUX of MUX is
    for STRUCTURE
        for g1,g2: AND use entity MYAND(BEHAVIOUR_AND)
            ...
        end for;
    end for;
end STRUCTURE_MUX;
```

Dann muss die oben genutzte Entity und Architektur natürlich noch definiert werden:

Was genau
passiert da
jetzt?

```
entity MYAND is
    port(i1, i2: in Bit;
         o: out Bit);
end MYAND;

architecture BEHAVIOUR_MYAND is
    o <= i1 and i2;
end BEHAVIOUR_MYAND;
```


1.4 VHDL-Simulationssemantik

Aufgaben des Simulators:

- Signal treiben/propagieren
- Rückkopplungen auflösen
- Verzögerungen modellieren

1.4.1 Signale Treiben

Signale werden durch eine Event-Queue repräsentiert, das heißt nicht die Signale selber, sondern nur Änderungen der Signale (z.B. Flanken) werden gespeichert. Die Event-Queue besteht aus „Transaktionen“ jede Transaktion ist ein Tuple aus der Zeit zu der die Änderung auftritt, und der Änderung selber.

Zum Beispiel:

```
y <= '0' after 0ns, '1' after 10ns, '0' after 20n;
```

Wird als Event-Queue so dargestellt:

$$\{< 0, '0' >, < 10, '1' >, < 20, '0' >\}$$

1.4.2 Rückkopplungen auflösen

Transaktionen können echt parallel stattfinden (Ereignisse treten asynchron und ggf. gleichzeitig auf). \Rightarrow Es kann zu Konflikten kommen („Henne-Ei-Problem“), z.B. bei einem zero-delay RS-Latch:

```
1      x <= not (y and lset);
2      y <= not (x and reset);
```

Lösung: Tagged-Event-Queue bzw. Delta-Delay: Jeder Zeitpunkt wird um eine „zweiten Dimension“ ergänzt, Events die direkt nacheinander (z.B. als direkte Folge) auftreten (mit einem Delta-Delay) werden entlang dieser zweiten Dimension geordnet.

| t | lset | x | y | reset | Zeile |
|---------------|------|---|---|-------|-------|
| 0 | ↓ | 0 | 1 | 1 | 1 |
| $0 + \Delta$ | 0 | ↑ | 1 | 1 | 2 |
| $0 + 2\Delta$ | 0 | 1 | ↓ | 1 | 1 |
| $0 + 3\Delta$ | 0 | 1 | 0 | 1 | ✓ |
| 10 | ↑ | 1 | 0 | 1 | 1 |
| $10 + \Delta$ | 1 | 1 | 0 | 1 | ✓ |

Tabelle 1.2: Tagged-Event-Queue für den zero-delay RS-Latch

1.4.3 Verzögerungen modellieren

Durch Schaltzeiten, Kapazitäten, Laufzeiten etc. kommt es in echten Systemen zu Verzögerungen der Signale. Diese müssen daher auch in VHDL modelliert werden können. Dafür wird zwischen zwei Arten unterschieden:

- Langsames Ansprechverhalten, das heißt kurze Pulse werden nicht durchgelassen
- Verzögerung der Signale

Beispiel (Inverter):

```
out <= reject 10 ns inertial not in after 30ns;
```

Die Verzögerungen werden in VHDL durch `reject` für langsames Ansprechverhalten (hier muss der Puls mindestens 10ns dauern) und `after` für Verzögerungen (hier 30ns) modelliert.

Für reine Laufzeitverzögerungen kann in VHDL auch `transport` genutzt werden, folgende Befehle sind äquivalent:

```
out <= transport in after 30ns;  
out <= reject 0ns inertial in after 30ns;
```

wait_until
und generic

Kapitel 2

Processing Elements

2.1 Instruction Set Processor (ISP)

2.1.1 von-Neumann-/Princeton-Architektur

Grafik

2.1.2 Befehlszyklus

1. Befehl holen (fetch)
2. Befehl dekodieren (decode)
3. Operanden holen (load)
4. Befehl ausführen (execute)
5. Daten speichern (write back)

| Pro | Contra |
|--|---|
| Analyse einfach Speicher flexibel benutzbar | Auslastung gering von-Neumann Flaschenhals (Daten und Befehle über den selben Bus) |

2.1.3 Harvard-Architektur

Grafik

| Pro | Contra |
|---|---|
| Auslastung Kein Flaschenhals Schnellere Abarbeitung | Fragmentierter Speicher Analyse schwierig Schwierig bei Datenabhängigkeiten |

2.2 Application Specific Instruction Set Processor (ASIP)

Regulärer ISP wird durch zusätzliche Instruktionen (und damit auch Hardware) für ein bestimmtes Einsatzgebiet optimiert, z.B. durch zusätzlich „Multiply-Accumulate“-Einheit oder auch komplette FFT-Operationen. Beispiel: DSP (Digital Signal Processor).

Grafik

2.3 Application Specific Processor

Nicht mehr programmierbar, Prozessor kann nur wenige vorkonfigurierte Befehle ausführen, Steuerung erfolgt über eine spezielle Logik, oftmals in Form einer State-Machine.

Grafik

2.4 Beispiel: Aufbau eines Schnurlosen DECT-Telefons

Oftmals wird ein ISP mit zugehöriger RF-Hardware auf einem Chip integriert (z.B. in Mobiltelefonen), dann spricht man von einem System-on-a-Chip (SoC).

Grafik

2.5 Wie kommunizieren PEs in heterogenen Systemen?

2.5.1 Gemeinsame Ressourcen (Speicherkopplung)

Alle PEs können über einen Bus auf eine gemeinsame Ressource (für gewöhnlich Speicher) zugreifen. Für die Synchronisation ist ein „Arbiter“ (Richter) sowie ein Bus-Controller in jedem PE notwendig.

Grafik

2.5.2 Direkte Verbindung

Direkte Verbindung zwischen allen PEs die kommunizieren müssen, Arbitrierung ist nicht notwendig, mehrere PEs können gleichzeitig kommunizieren. Es ist wieder ein Controller für jede Verbindung vonnöten, zudem muss dieser eventuell Daten puffern. Bei n PEs sind im Worstcase $\frac{(n-1) \cdot n}{2} \in \mathcal{O}(n^2)$ Verbindungen notwendig.

2.5.3 Tiled-Architecture

Bei einer Tiled-Architecture oder Network-on-a-Chip (NOC) werden jeweils wenige PEs über eine gemeinsame Ressource verbunden. Diese Gruppen an PEs werden dann über ein Gitter aus Leitungen verbunden.

Grafik

Kapitel 3

Halbleitertechnologien

Jedes PE, egal ob ISP, ASIP oder ASP muss gefertigt werden. Hierfür muss sich für eine Herstellungsart entschieden werden.



Abbildung 3.1: Optionen für die fertigung von Halbleiterkomponenten

3.1 Full-Custom-Logic Fabric

Sehr teuer, dafür aber maximale Performance. Lohnt sich im Normalfall nur für sehr große Stückzahlen. Beispiele für Full-Custom gefertigte Komponenten:

- PC-Processoren
- GPUs
- ASIPs (z.b. Basisbandprozessoren)
- Microcontroller

Üblicherweise werden Full-Custom-Komponenten in „complementary metal-oxide-semiconductor“ (CMOS) Technik gefertigt.

3.2 Semi-Custom (Gate-Array)

Ein Gate-Array besteht aus vielen, nicht verbundenen, Transistorzellen, sogenannten Basismakros. Vom Anwender kann sowohl die Funktion jeder Logikzelle (NAND oder NOR) sowie die Verbindungen zwischen den Logikzellen bestimmt werden.

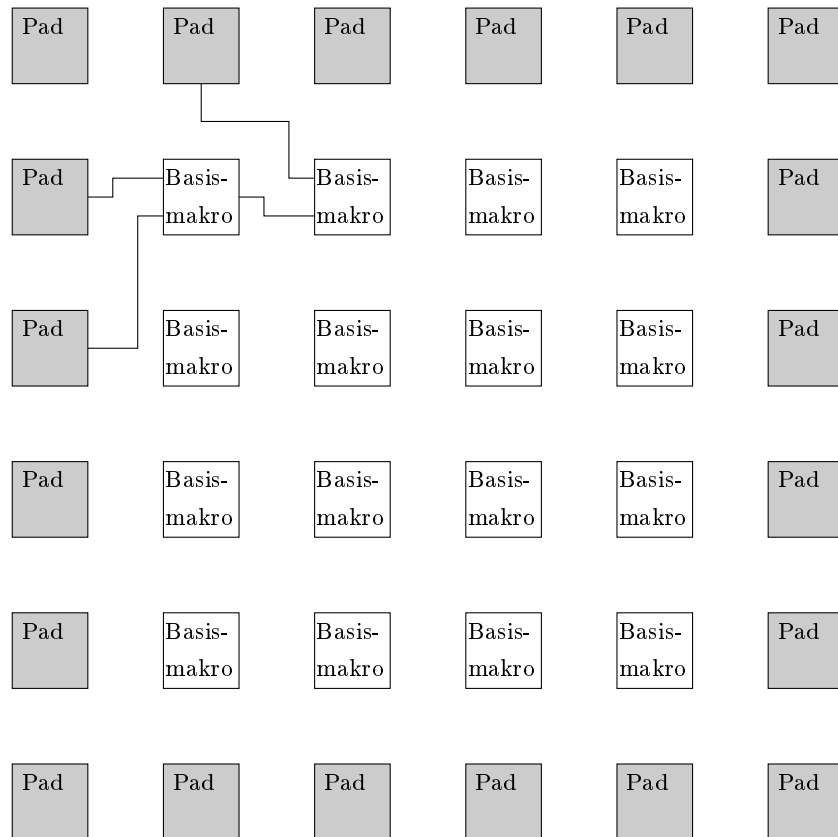


Abbildung 3.2: Aufbau eines Gate-Arrays

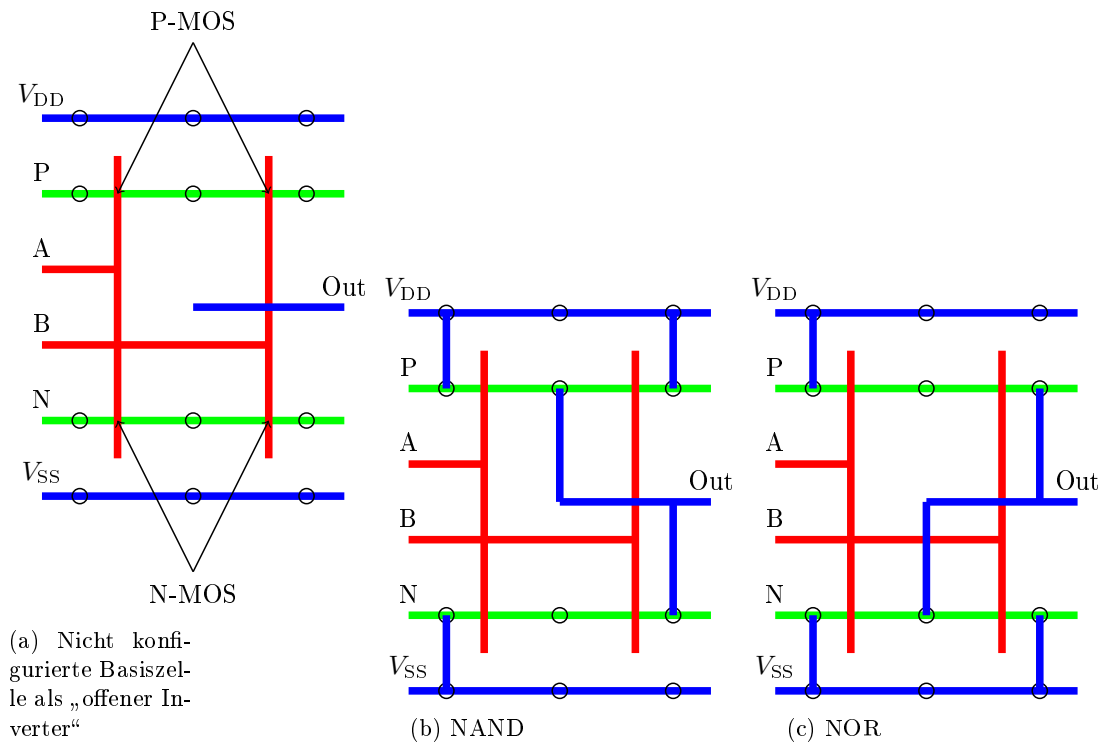


Abbildung 3.3: Aufbau und Nutzung der Transistorzellen/Basismakros