

# Synthese Eingebetteter Systeme

Sommersemester 2011

## 1 – Einführung: Entwurf und Synthese

Michael Engel  
Informatik 12  
TU Dortmund

2011/04/06

---

# Überblick

---

- Komplexität aktueller eingebetteter Systeme
- Electronic System Level Modeling (ESL)
- Beschreibungsebenen für Eingebettete Systeme
  - Entwurfsfluss eingebetteter Systeme
  - Vom Transistor zum Verhalten
  - Vor- und Nachteile verschiedener Abstraktionsebenen
- Synthese
  - Begriffsdefinition
  - High-Level-Synthese
  - Entwurfsfluss eingebetteter Systeme
  - Beispiele

---

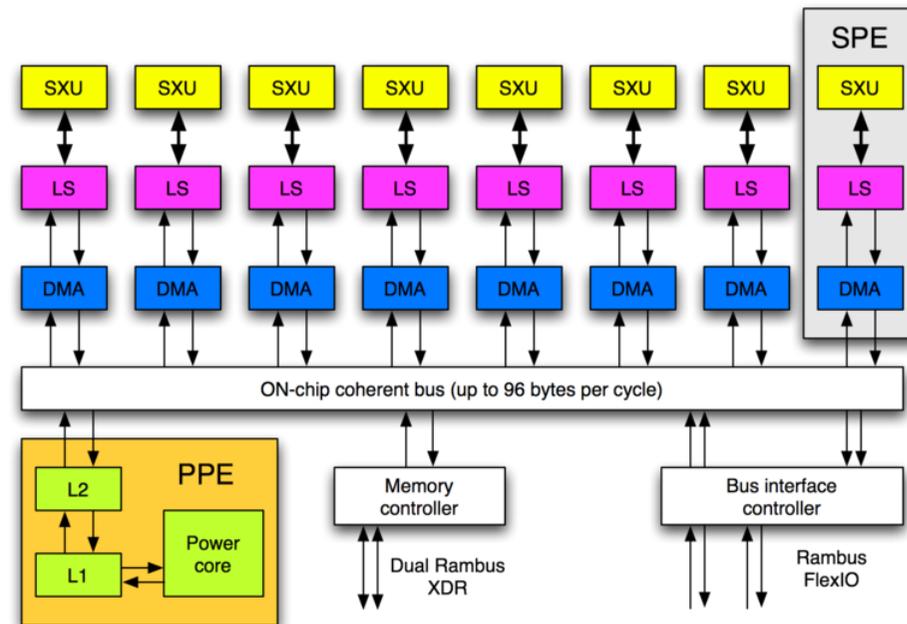
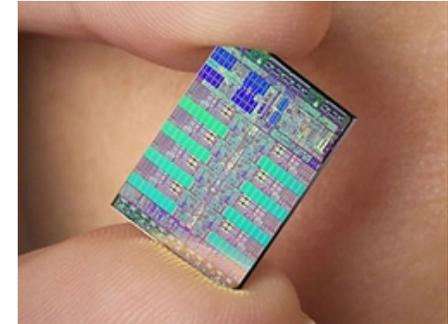
# Komplexität Eingebetteter Systeme

---

- Systems-on-Chip (SoC)
  - Basis aktueller eingebetteter Systeme
  - Integration kompletter Systeme auf einem Baustein
- Heute: Multiprozessor SoCs (MPSoCs)
  - Bis zu 188 Prozessor-Cores auf einem Chip
    - TILERA/Cisco METRO-Chip
  - Zusätzlich: Peripherie, Busse, Speicher
  - Selbst einfache Systeme sind oft MPSoCs
- Steigende Komplexität von SoCs
  - Längere Entwurfsdauer, aber kürzere Produktzyklen
  - Steigende Kosten der Entwicklung

# MPSoC-Beispiel: CELL

- IBM/Toshiba/Sony CELL-Prozessor
  - Entwicklungsstart: März 2001
  - Entwicklungsdauer: ca. 4 Jahre
  - > 400 beteiligte Entwickler
  - Entwicklungskosten:  
**400 Millionen US\$**



---

# CELL: Details

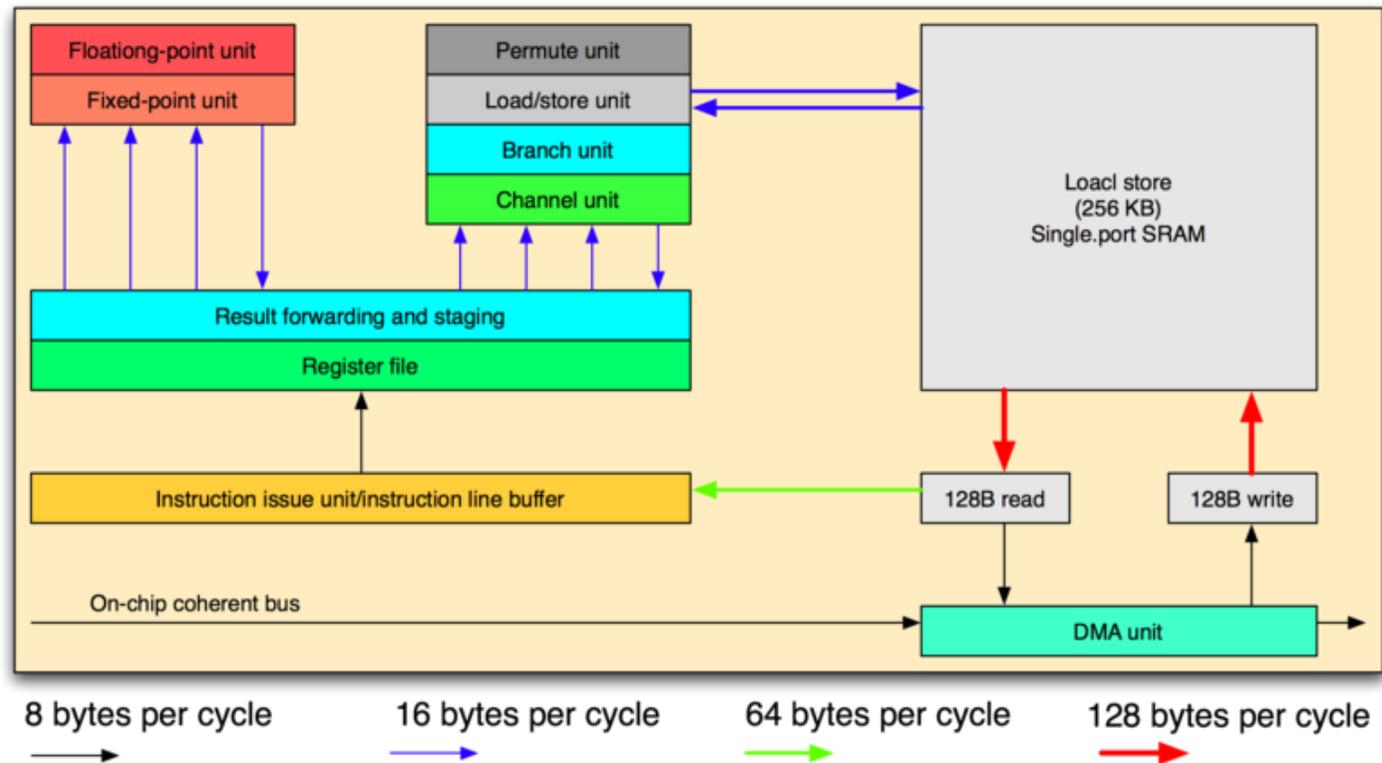
---

Technische Daten des CELL:

- **241 Millionen Transistoren** auf 235mm<sup>2</sup> Chipfläche (90nm), 3.2 GHz
- Acht Synergistic Processing Elements (SPE)
  - Je eine Recheneinheit (ALU) mit vierfachem SIMD
  - 128 Register, die jeweils 128 Bit groß sind
  - Memory Flow Controller (MFC): DMA-Transfers
  - Lokaler Speicher von 256 kB
  - Je **21 Millionen Transistoren**, davon ~2/3 für RAM
- Ein PowerPC Processing Element (PPE)
  - 64-Bit-PowerPC-Architektur von IBM
  - In-Order-Ausführung, zwei Threads gleichzeitig
  - 512 kB L2-Cache
- Element Interconnect Bus (EIB)
  - Ringstruktur
  - Bis zu 96 Byte pro Takt übertragbar

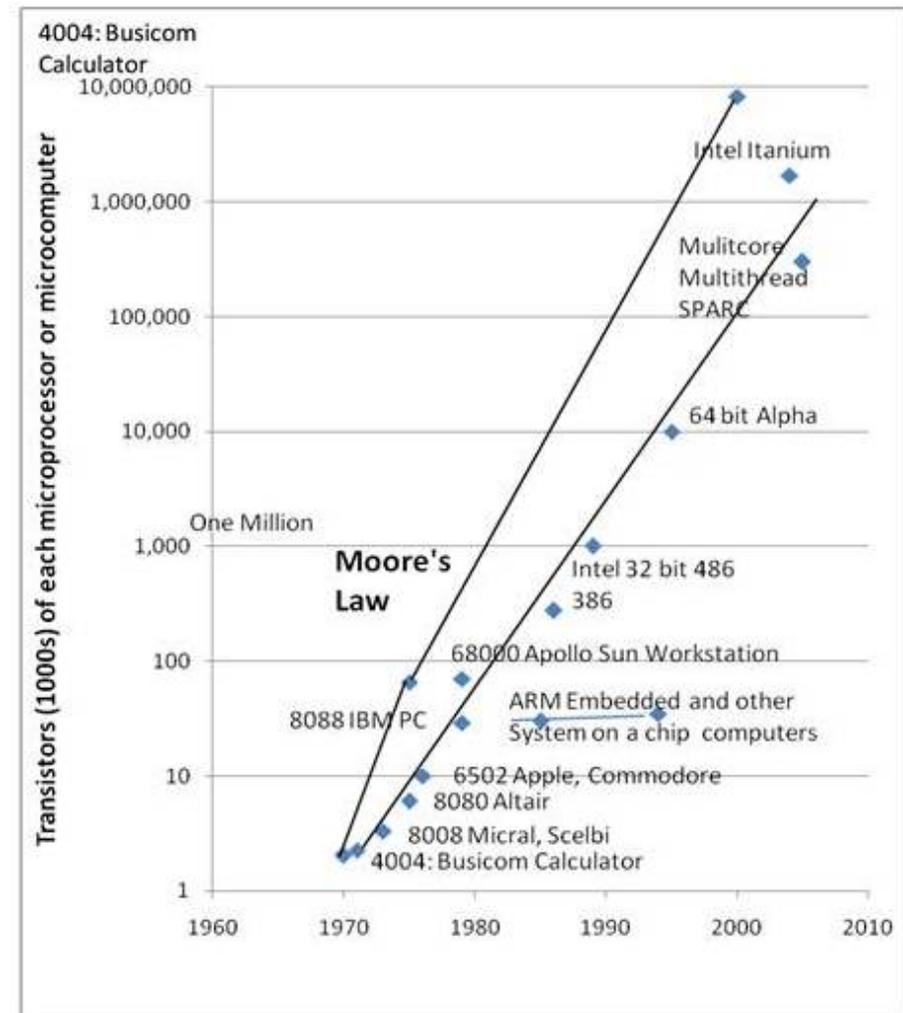
# CELL: Details (2)

- Struktur der CELL SPU:



# Entwicklung der Komplexität

- Komplexität von Chips, Systemen und Software steigt immens
  - Moore's Law: doppelte Anzahl Transistoren pro Chip alle 18 Monate
- Anzahl Chips/System sinkt
  - Aber: Anzahl benötigter Verbindungen steigt!
  - 6502: 40 Pins (1976)
  - Intel i7: 1366 Pins (2011)
- Softwarekomplexität
  - Apple ][: 20 kB ROM
  - Windows 7: ... ☺



[http://www.ieee.org/portal/cms\\_docs\\_sscs/sscs/08Fall/BellFig6.JPG](http://www.ieee.org/portal/cms_docs_sscs/sscs/08Fall/BellFig6.JPG)

---

# Electronic System Level Modeling (ESL)

---

- **Neue, effizientere Entwurfsmethoden erforderlich**
- ESL: “Concurrent design of hardware and software”
- Zwei Entwurfsebenen:
  - *Verhaltensebene*
    - ESL-Entwurf *vor* Hardware/Software-Partitionierung
  - *Architekturebene*
    - ESL-Entwurf *nach* Hardware/Software-Partitionierung
    - Architekturentwurf
      - Entwurf in einer ESL-Sprache
      - Verwendet **Synthesetechnologie**, um RTL-Beschreibung zu erzeugen
    - Plattform-basierter Entwurf
      - Entwurf basierend auf ESL-Modell, verwendet existierende Plattform und **Abbildungstechniken** zur Erzeugung einer RTL-Beschreibung
    - Softwarespezifikation, -entwurf und Implementierung



---

# Synthese

---

- Definitionen [2]:
  - „**Design synthesis can be defined as the transformation of a design to a level of lower abstraction.**“
- Präzisierung:
  - „Transformation of a design from a point in the functional domain to one in the structural domain“
- **High-Level-Synthese (HLS)**
- **Logiksynthese**
  - „maps RTL-descriptions onto a specific structure suitable for the target architecture: **low-level synthesis**“

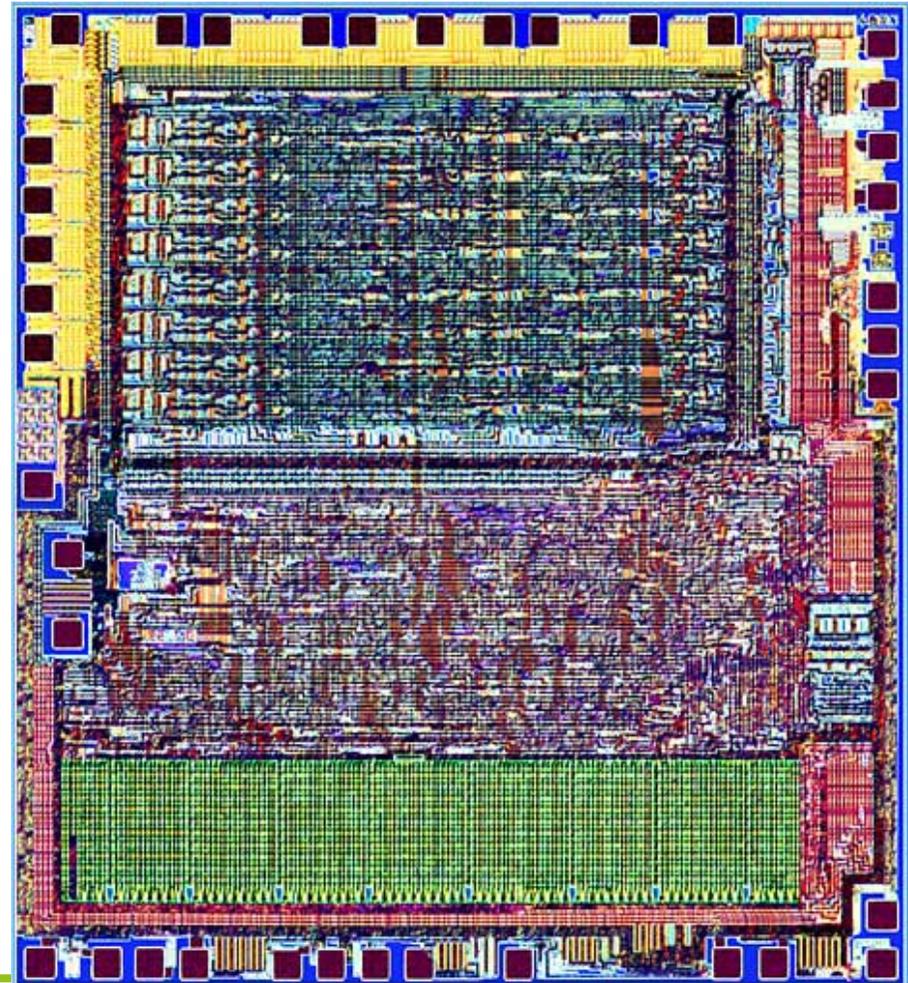
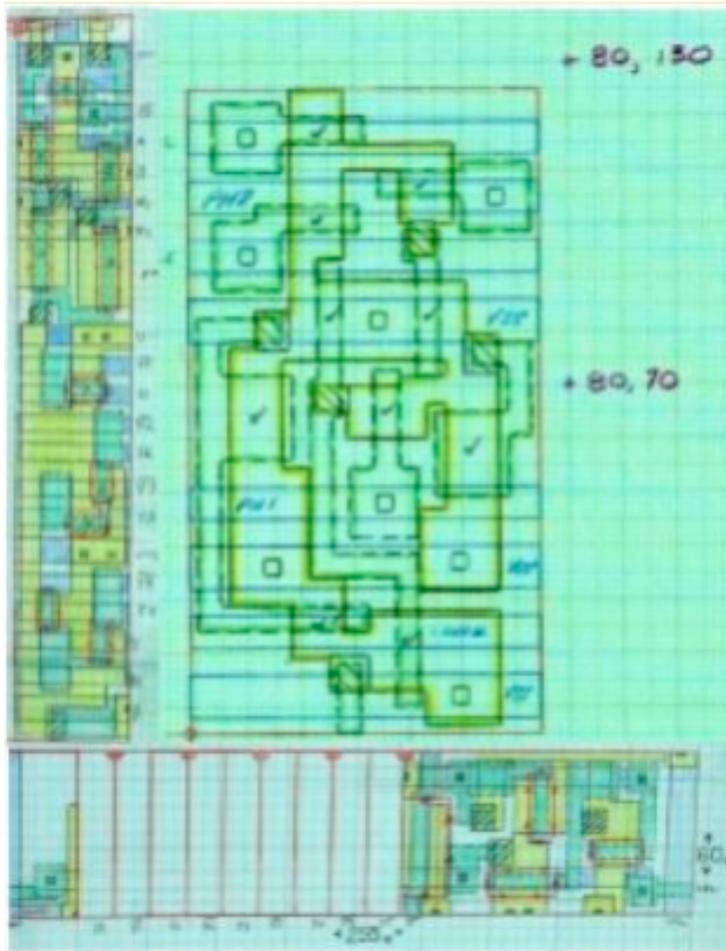
# Low-Level-Synthese: Historie

- Anfänge der Mikroprozessoren in den 60er Jahren: Fairchild, TI
- Bis Ende der 70er Jahre: kaum Software-Unterstützung
  - Layouts für Chips auf Transistorebene manuell
    - Komplexität: einige 1000 Transistoren
    - MOS6502 CPU: 3520 Tr. (1976)
  - Leiterplattenlayout für Systeme manuell
    - Komplexität: 10–100 ICs
    - z.B. Apple ][: ca. 100 ICs (1977)
- Erste CAD-Werkzeuge
  - Leiterplattenlayout
- Hardwarebeschreibungssprachen
  - MIMOLA (DO), Karl-3 (KL)



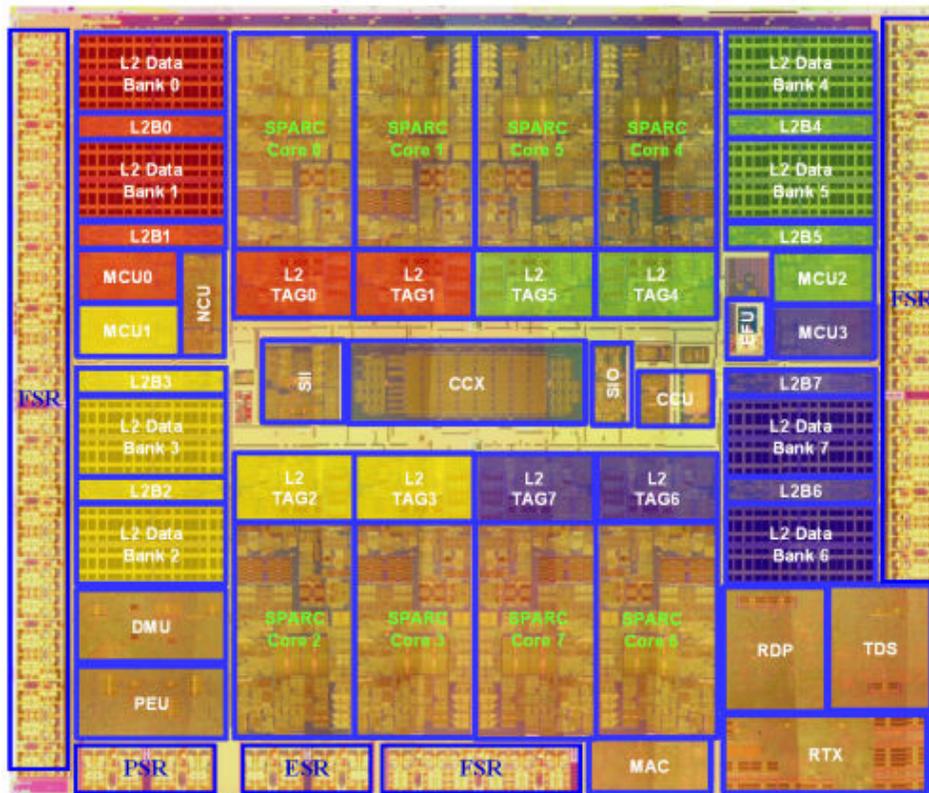
# Physikalisches Layout: Transistor-Layout-Ebene

- Geometrische Anordnung der Transistoren auf einem Chip



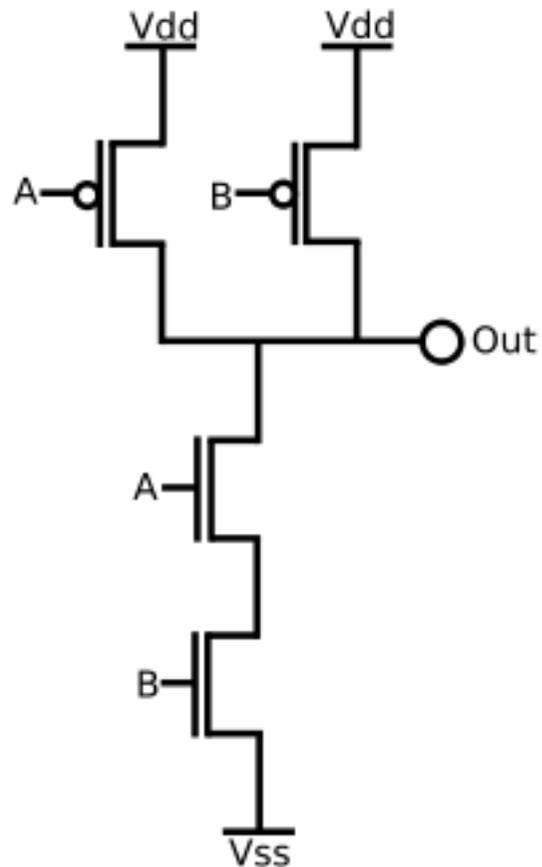
# Physikalisches Layout: Höhere Ebenen

- Cell, Module, Floorplans, Physical Partitions

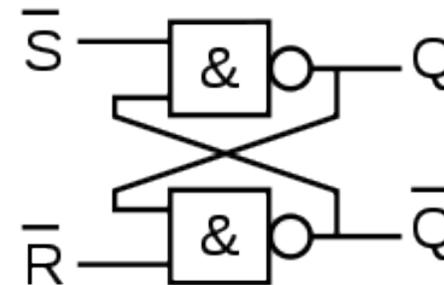


# Strukturelles Layout: Transistoren und Gatter

- Verschaltung einzelner Transistoren zu Logikeinheiten

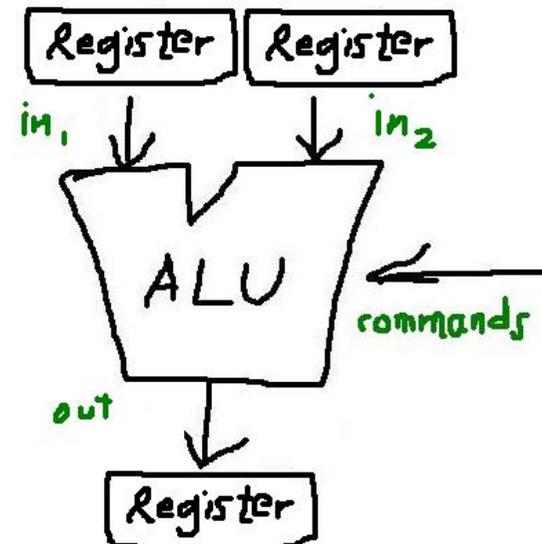
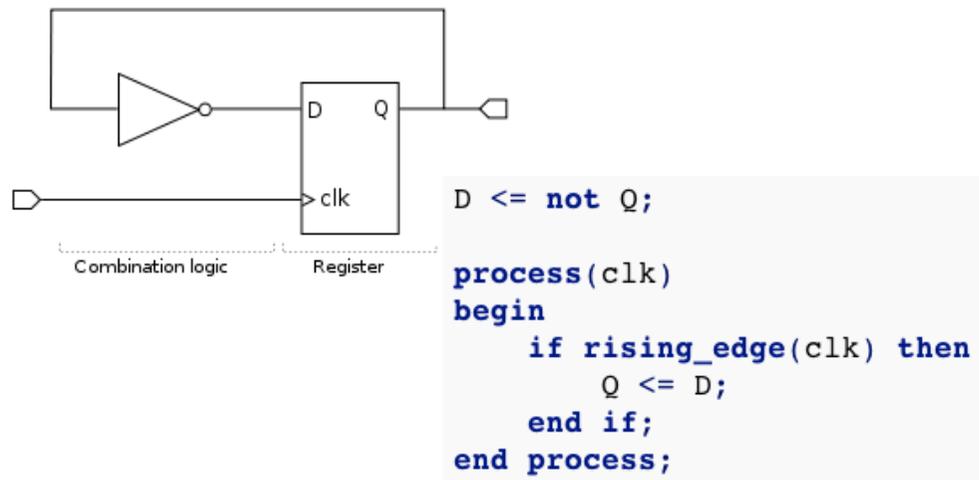


- Verschaltung einzelner Gatter und Flip-Flops zu Automaten und Logik



# Registertransfer, Strukturelles Layout

- Registertransfer
  - Synchrone Schaltungen (Schaltwerke)
  - Kombinatorische Logik + Register
  - Hardwarebeschreibungssprache: VHDL, Verilog
- Komplexe Komponenten
  - z.B. ALUs, Speicher



# Beschreibungsabstraktionen

- Von den Anforderungen zum Chip
- Gajskis Y-Chart

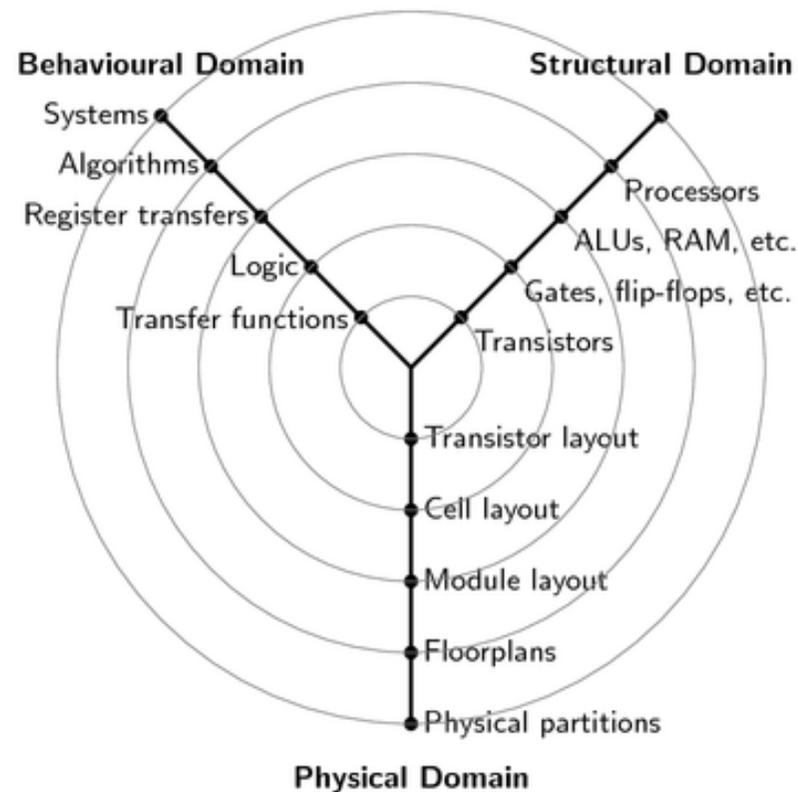


Figure 1: Gajski-Kuhn Y-chart

---

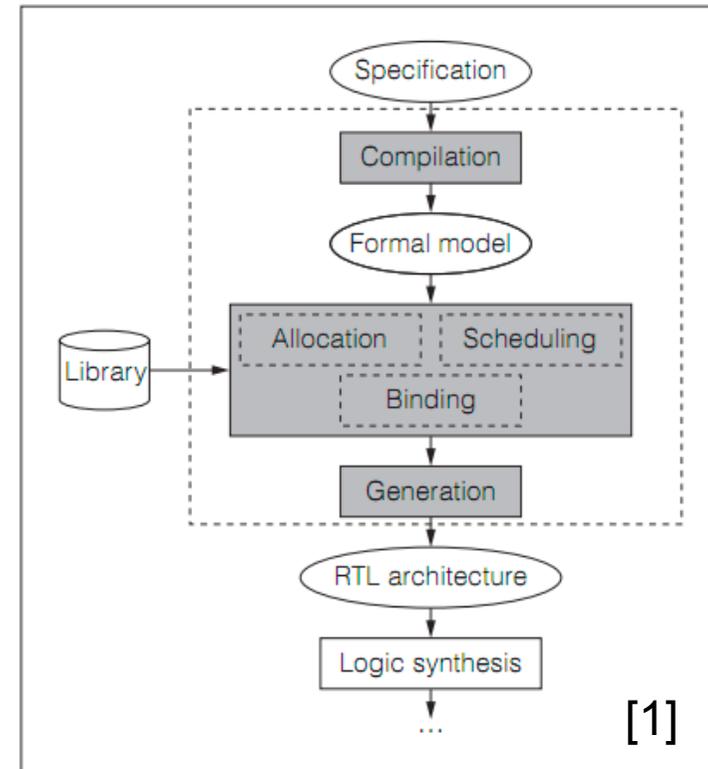
# High-Level-Synthese

---

- Herkömmliche Entwurfsmethoden
  - Zu aufwendig, langwierig und unflexibel
  - Schlechte Wiederverwendbarkeit
- Lösung: High-Level-Synthese (HLS) [1]
  - „High-level Synthesis, also known as architectural or behavioural synthesis, allows a design to be specified functionally at the **level of algorithms** and then be converted using a set of constraints into the RTL's structural connection of functional units and registers. During this process both the **temporal** and **spatial** locations of each function must be determined, i.e. during which clock cycles will a function occur and what physical functional unit will it be bound to.“
- Temporale Zuordnung: *Scheduling*
- Räumliche Zuordnung: *Mapping*

# High-Level-Synthese: Entwurfsfluss

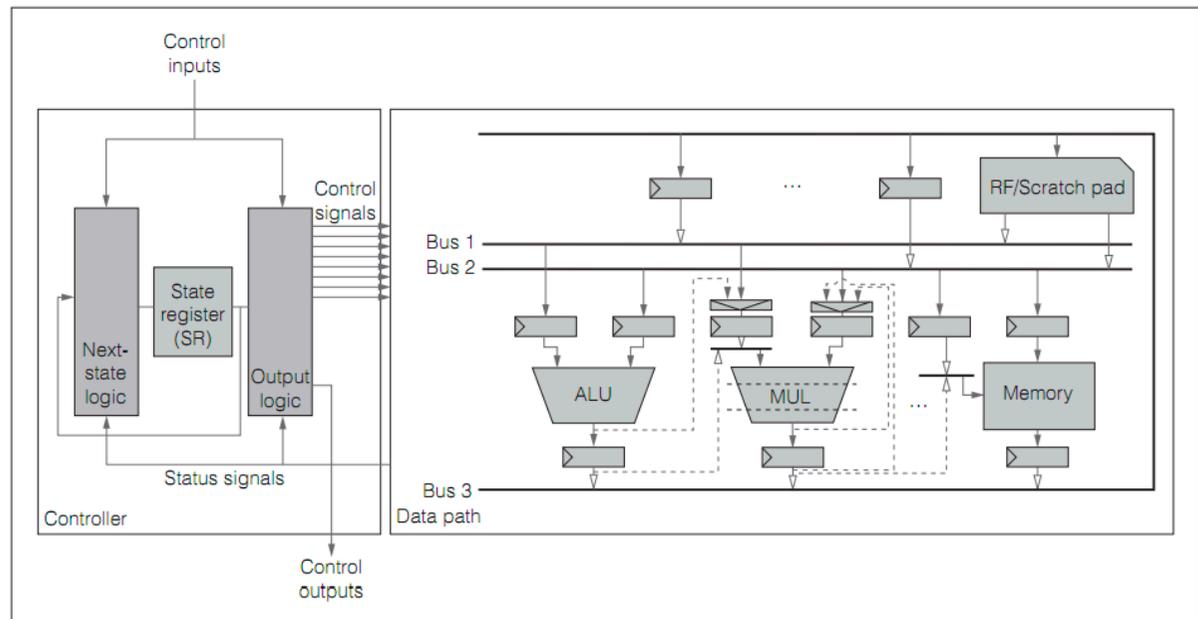
- Vorhanden:
  - High-Level-Beschreibung der Anwendung (C/C++/SystemC)
  - Bibliothek von RTL-Komponenten
  - Entwurfsconstraints
- HLS-Syntheseschritte:
  - Übersetzung der Spezifikation
  - Allokation von HW-Ressourcen
    - Funktionseinheiten, Speicher, Busse...
  - Scheduling von Operationen
  - Zuordnung von Operationen zu Funktionseinheiten
  - Zuordnung von Variablen zu Speichern
  - Zuordnung von Transfers zu Bussen
  - Erzeugung der Beschreibung der RTL-Architektur



# Ausführungsplattform: RTL-Ebene

## RTL-Architektur: Registertransfer-Komponenten

- Controller
  - Endlicher Automat (FSM), steuert Datenpfad durch Signale
- Datenpfad
  - Speicherelemente (Register, Registerbänke, Speicher)
  - Funktionale Einheiten (ALUs, Multiplizierer, Schieberegister)
  - Verbindungen
    - Busse
    - Multiplexer
  - Mehrere Instanzen
    - Verbindung: Busse



# Unterschiede in RTL-Beschreibungen

RTL-Ausgabemodell der HLS abhängig von Zuordnungsentscheidungen

- Unterschiedliche Detaillierung der erzeugten RTL-Beschreibung

- Beispiel:

- Übersetzung der High-Level-Instruktion

$$a = b + c$$

ausgeführt im Zustand  $n$

- Unterschiedliche Detaillierung der Zuordnung von Komponenten
- Fehlende Zuordnungen müssen von der Logik-(low-level-)Synthese übernommen werden
  - Ebenso die zugehörige Optimierung

Without any binding:

```
state (n): a = b + c;  
go to state (n + 1);
```

With storage binding:

```
state (n): RF(1) = RF(3) + RF(4);  
go to state (n + 1);
```

With functional-unit binding:

```
state (n): a = ALU1 (+, b, c);  
go to state (n + 1);
```

With storage and functional-unit binding:

```
state (n): RF(1) = ALU1 (+, RF(3), RF(4));  
go to state (n + 1);
```

With storage, functional-unit, and connectivity binding:

```
state (n): Bus1 = RF(3); Bus2 = RF(4);  
Bus3 = ALU1 (+, Bus1, Bus2);  
RF(1) = Bus3;  
go to state (n + 1);
```

# Vorteile der High-Level-Synthese

- Kompakte Beschreibung auf abstrakter Ebene
- Schnellere Entwicklungszeit
  - Erleichtert *Prototyping* und *Design Space Exploration*
- Höhere Abstraktionsebene für Hardwarebeschreibung
  - Ermöglicht Architekturentscheidungen auf Systemebene
  - Wiederverwendung für verschiedene Technologien

```
"What are the 2 biggest reasons to use High Level Synthesis?"  
  
Faster time to RTL : ##### 64%  
Faster verification time : ##### 49%  
Fewer engineering resources : ##### 31%  
Fewer Bugs : ##### 19%  
RTL better than hand-coded : ##### 14%  
Faster ECO implementation : ### 8%  
Better product differentiation : ### 7%  
Other : ## 4%
```

[3]

# High-Level-Synthese: Erfahrungswerte

- Ist HLS heute schon sinnvoll einsetzbar?
  - Vergleich HDL–SystemC

Block A: AutoESL results vs. hand-coded (both results after running through Synopsys Design Compiler + Talus P&R)

	AutoPilot 1st result -----	AutoPilot final result -----
Area	2% larger	1% smaller
Power	2% higher power	12% lower
Latency	40% higher latency	6% lower

Original design: 800 lines of ANSI C code  
 Hand-coded design: 4000 lines of VHDL RTL code  
 AutoESL-generated design: 100,000 lines of Verilog RTL code

[4]

Lines of C code: 20  
 Lines of Catapult output VHDL: 450  
 Lines of manual VHDL: 60

	Area (k GE)	Power (mW)	Throughput rate (Mbps)
Hand coded VHDL	13	32	100
Catapult C	12.8	31	100

[5]

---

# Zusammenfassung

---

- Komplexere elektronische Systeme
  - ...erfordern Entwurf auf Systemebene
  - ...benötigen neue Entwurfsmethoden und –werkzeuge
  - ...profitieren von höheren Abstraktionsebenen
- Vorlesung SeS: zwei wichtige Entwurfsansätze
  - High-Level-Synthese: SystemC
  - Wiederverwendung von IP: Mapping auf Multicores
- Weitere Themen
  - Exkurs: „Traditionelle“ Hardwarebeschreibungssprachen
  - FPGAs: Strukturen und Funktionsweise
  - Prozessorbeschreibungssprachen: ArchC

---

# Literatur

---

1. Philippe Coussy, Daniel Gajski, Michael Meredith, and Andres Takach.  
*An Introduction to High-Level Synthesis*  
IEEE Journal on Design and Test, Vol. 26 Issue 4, July 2009  
<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1608648>
2. Brian Bailey and Grant Martin.  
*ESL Models and their Application: Electronic System Level Design and Verification in Practice*  
Springer-Verlag, 1st edition, 2009
3. Umfrage unter Kunden von Mentor Graphics:  
<http://www.deepchip.com/items/0479-04.html>
4. <http://www.deepchip.com/items/0485-04.html>
5. <http://www.deepchip.com/items/0485-08.html>