

---

# Rechnerstrukturen

Vorlesung im Sommersemester 2006

Prof. Dr. Wolfgang Karl

Universität Karlsruhe (TH)

Fakultät für Informatik

Institut für Technische Informatik



## Kapitel 1: Grundlagen

### 1.1 Einführung, Entwurfsfragen



- Entwurf einer Rechenanlage
  - Ingenieurmäßige Aufgabe der Kompromissfindung zwischen
    - Zielsetzungen
      - Einsatzgebiet, Anwendungsbereich, Leistung, Verfügbarkeit ...
    - Randbedingungen
      - Technologie, Größe, Geld, Energieverbrauch, Umwelt, ...
    - Gestaltungsgrundsätzen
      - Modularität, Sparsamkeit, Fehlertoleranz ...
    - Anforderungen
      - Kompatibilität, Betriebssystemanforderungen, Standards

- Zielsetzungen

- Benutzerfreundlichkeit

- Beziehung zwischen einem Rechensystem und Nutzer:
    - Anwendungsprogrammierer:
      - » problemorientierte Erstellung von Anwendungen
    - Administration
      - » Verwaltung, Wartung verteilter Systemressourcen
    - Bedienung durch nicht-technisches Personal, Anwender
  - Gestaltung der Schnittstelle zwischen dem Rechensystem und seinem Benutzer
    - Ziel der Software-Entwicklung
    - Techniken der benutzerfreundlichen Oberfläche erst durch spezielle Hardware-Techniken möglich

- Zielsetzungen
  - Verlässlichkeit / Robustheit
    - Gewährleistung einer minimalen Verfügbarkeit des Systems
      - Bei Ausfällen von Komponenten muss ein betriebsfähiger Kern bereit sein
        - » Vielfach Verwendung redundanter Komponenten
      - Wichtig für sicherheitskritische Anwendungen

- Zielsetzungen

- Erweiterbarkeit / Skalierbarkeit

- Charakterisiert ein System, das in jedem Zustand die Erweiterung seiner Fähigkeiten zulässt, aber in jedem Zwischenzustand korrekt funktionsfähig ist
      - Installation weiterer Ausbaustufen durch Hinzufügen von Komponenten

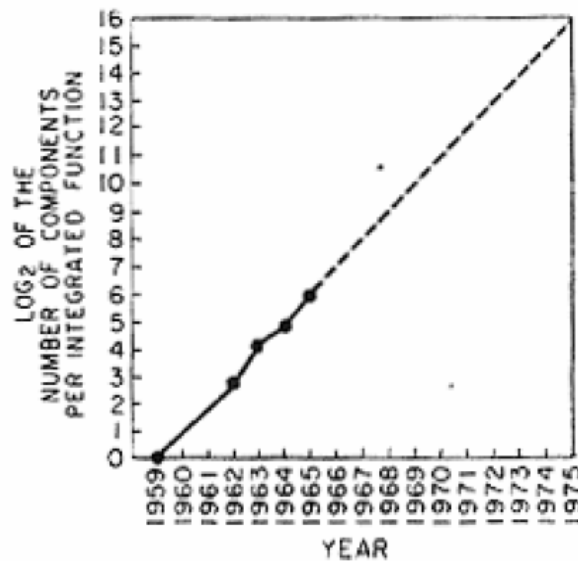
- Randbedingungen

- Technologische Entwicklungen

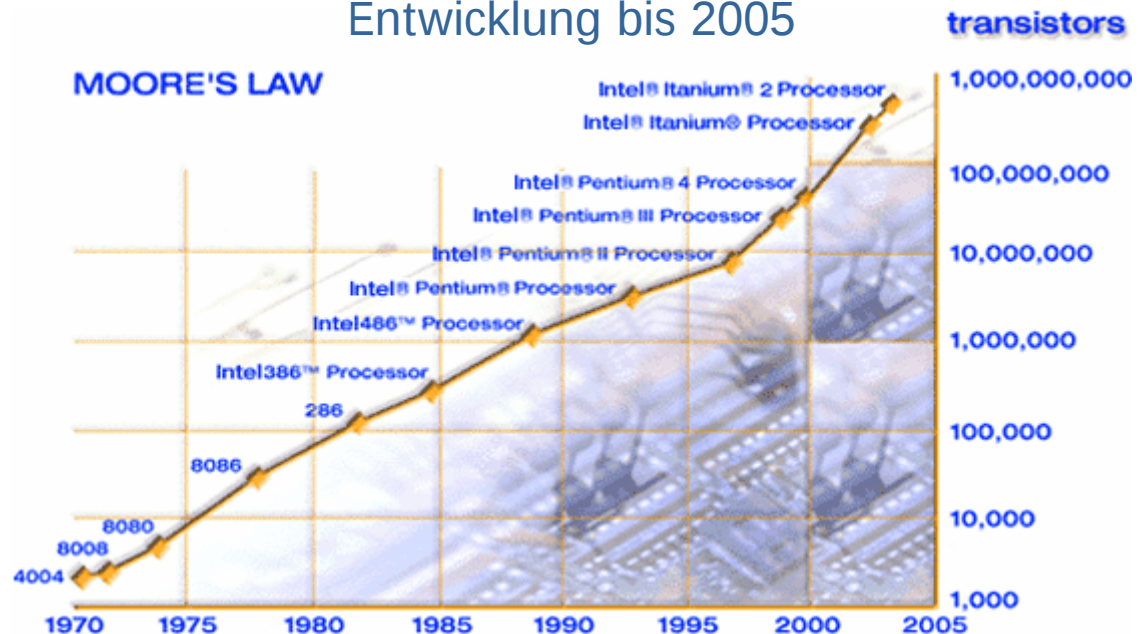
- Moore's Law

- Anzahl der Transistoren, die auf einem Chip integriert werden können, verdoppelt sich etwa alle 2 Jahre

Vorhersage 1965



Entwicklung bis 2005

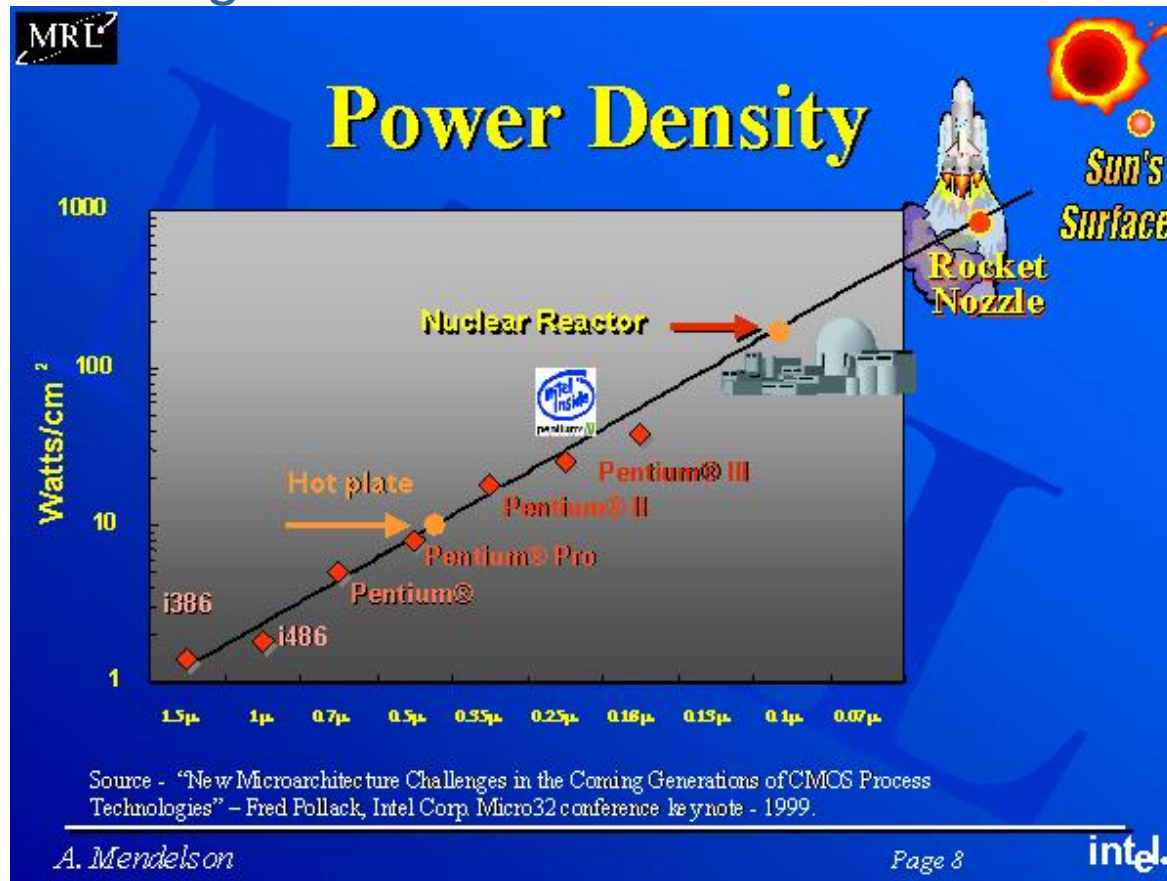


Gordon E. Moore: Cramming More Components  
Onto Integrated Circuits. Electronics, Vol. 38, No.8,  
April 19, 1965

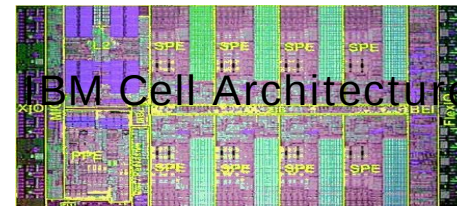
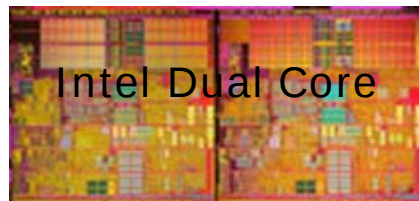
<http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>

- Randbedingungen
  - Technologische Entwicklungen
    - Entwicklung der Halbleitertechnologie (Henn./Patt. ,03)
      - Integrationsdichte
        - » Verbesserung um etwa 35% pro Jahr
      - Chipfläche
        - » Erhöhung um etwa 10% – 20% pro Jahr (schwieriger vorherzusagen)
      - Anzahl der Transistoren auf einem Chip
        - » Steigerung um etwa 55% pro Jahr
      - Vorhersagen durch die Semiconductor Industry Association (SIA), (<http://www.sia-online.org>)
        - » International Technology Roadmap for Semiconductors 2003 Edition (<http://public.itrs.net>)
        - » 2004 Update
  - Folgerung:
    - 1 Milliarde Transistoren auf einem Chip in wenigen Jahren

- Randbedingungen
  - Technologische Entwicklungen
- Energiedichte



- Randbedingungen
  - Technologische Entwicklungen
    - Energiedichte: Folgerungen
      - Leistungssteigerung durch Parallelverarbeitung, auch auf Chip-Ebene:
        - » Ausschöpfen der Leistung durch höhere Integration der Chip-, Modul- und Systemebenen
        - » Sinnvolles Zusammenwirken von HW/SW
      - Chip-Multiprozessoren (CMPs):
        - » Integration mehrerer Prozessorkerne auf einem Chip:



- Randbedingungen
  - Technologische Entwicklungen
    - Entwicklung der DRAM-Technologie (Henn./Patt. ,03)
      - Integrationsdichte
        - » Verbesserung um etwa 40% - 60% pro Jahr
      - Zykluszeit
        - » Nur langsame Verbesserung: hat in 10 Jahren um etwa 1/3 abgenommen
      - Bandbreite
        - » Steigerung doppelt so hoch wie bei der Latenz

- Randbedingungen
  - Technologische Entwicklungen
    - Entwicklung der Magnetplattentechnologie (Henn./Patt. ,03)
      - Speicherdichte
        - » Verbesserung um etwa 100% pro Jahr
        - » Bis 1990 Steigerung um etwa 30% pro Jahr
      - Zugriffszeit
        - » Verbesserung um etwa 1/3 in 10 Jahren

- Randbedingungen

- Technologische Entwicklungen

- Entwicklung der Netzwerktechnologie (Henn./Patt. ,03)
    - Leistung des Netzwerks hängt von der Leistung der Switches und der Leistung des Übertragungssystems ab
  - Beobachtungen:
    - Die Anzahl der logischen Netzwerkverbindungen wächst mit der Anzahl  $N$  der Internetknoten um  $N \times (N-1)/2$  (Matcalfe's Law)
    - Steigerung der Bandbreite um den Faktor 1000 in 15 Jahren von 1MB Ethernet – 10GBit Ethernet
    - Die Bandbreite verdoppelt sich alle 6 Monate (Gilder's Law)
  - Folgerung:
    - Leistungsfähigkeit des Netzwerks wächst schneller als die Rechenleistung

- Randbedingungen
  - Technologische Entwicklungen
    - Folgerungen
      - Drastisch steigende Komplexität der Systeme
      - Verteilte Systemressourcen
      - Selbstorganisierende Systeme
        - » Selbst-konfigurierend
        - » Selbst-optimierend
        - » Selbst-heilend
        - » Selbst-schützend
        - » ...

- **Gestaltungsgrundsätze (nach Ungerer, 2000)**
  - **Konsistenz:**
    - Eigenschaft eines Systems mit folgerichtiger, schlüssiger Aufbau
    - Bei Kenntnis eines Teils des Systems muss der Rest vorhersagbar sein
    - Beispiel:
      - Bei Erweiterung des Befehlssatzes ist die Realisierung eines neuen Befehls weitgehend durch die bereits vorliegenden Befehle festgelegt
  - **Orthogonalität / Modularität**
    - Funktional unabhängige Teilelemente sind unabhängig voneinander spezifiziert und realisiert.
    - Beispiel:
      - Befehlssatz ist orthogonal, wenn sich jeder arithmetisch-logische Befehl mit jeder Adressierungsart kombinieren lässt

- **Gestaltungsgrundsätze**

- **Symmetrie**

- Eigenschaft eines Systems, mathematisch symmetrische Eigenschaften des Systems auch symmetrisch zu entwerfen
    - Beispiel:
      - Die Verwendung der Subtraktion sollte in gleichartiger Weise erfolgen können, wie die Addition, d.h. mit denselben Daten- und Befehlsformaten

- **Angemessenheit**

- Die Elemente eines Systems sind angemessen, wenn ihre Funktionen bei der Lösung der vorgesehenen Problemstellung ausgeschöpft werden
    - Beispiel:
      - Abstimmung von Prozessor und Speicher

- **Gestaltungsgrundsätze**

- **Sparsamkeit**

- Kosten des Systems möglichst gering halten. Sie ist in Abhängigkeit von der Technologie zu sehen
    - Beispiel:
      - Kosten, Ausbeute bei der Chip-Herstellung

- **Wiederverwendbarkeit**

- Einsatz von Komponenten, die von vorne herein auf allgemeine Verwendbarkeit hin entwickelt wurden
    - Beispiel:
      - Standardisierung von Bussen (PCI-Bus)
      - Einsatz von Standardkomponenten bei der Entwicklung von Höchstleistungsrechnern

- **Gestaltungsgrundsätze**

- **Transparenz**

- Ein System ist transparent, wenn verschiedene Funktionen des Gesamtsystems unsichtbar bleiben
    - Beispiel:
      - Prozesse im Hintergrund

- **Virtualität**

- Eigenschaft eines Systems, Funktionen anzubieten, die real gar nicht vorhanden sind
    - Beispiel:
      - Virtuelle Speicherverwaltung

- Literatur:
  - Hennessy/Patterson: Computer Architecture – A Quantative Approach: Kap. 1, Ab. 1.1 – 1.4

- Entwurf von Rechensystemen

- Legt die grobe Gliederung des Rechensystems (Struktur) und die Schnittstellen fest

- Befehlssatzarchitektur

- Festlegung des Maschinenbefehlssatzes
      - Festlegung der durch den Maschinenbefehlssatz angesprochenen Objekte

- Prozessor- / Rechnerentwurf

- Festlegung der Organisation und Hardware (Implementierung)

- Hinweis:

- Vorlesung „Optimierung und Synthese eingebetteter Systeme (Eingebettete Systeme I), Dr. F. Feldbusch

- **Aufgaben beim Entwurf**
  - Festlegung der Zielvorgaben und Analyse der Randbedingungen
    - Spezifikation
      - Festlegung, was das System können muss
      - Gewünschtes Verhalten
      - Schnittstellen
      - Vorgaben (Leistung, Kosten, Größe, ...)
    - Realisierung
      - Umsetzung der Spezifikation in eine konkrete Implementierung des zu entwerfenden Systems
    - Test / Validierung

- **Abstraktionsebenen:**

- **Systemebene**

- Beschreibung des zu entwerfenden Gesamtsystems
    - Komplexe miteinander kommunizierende Teilsysteme

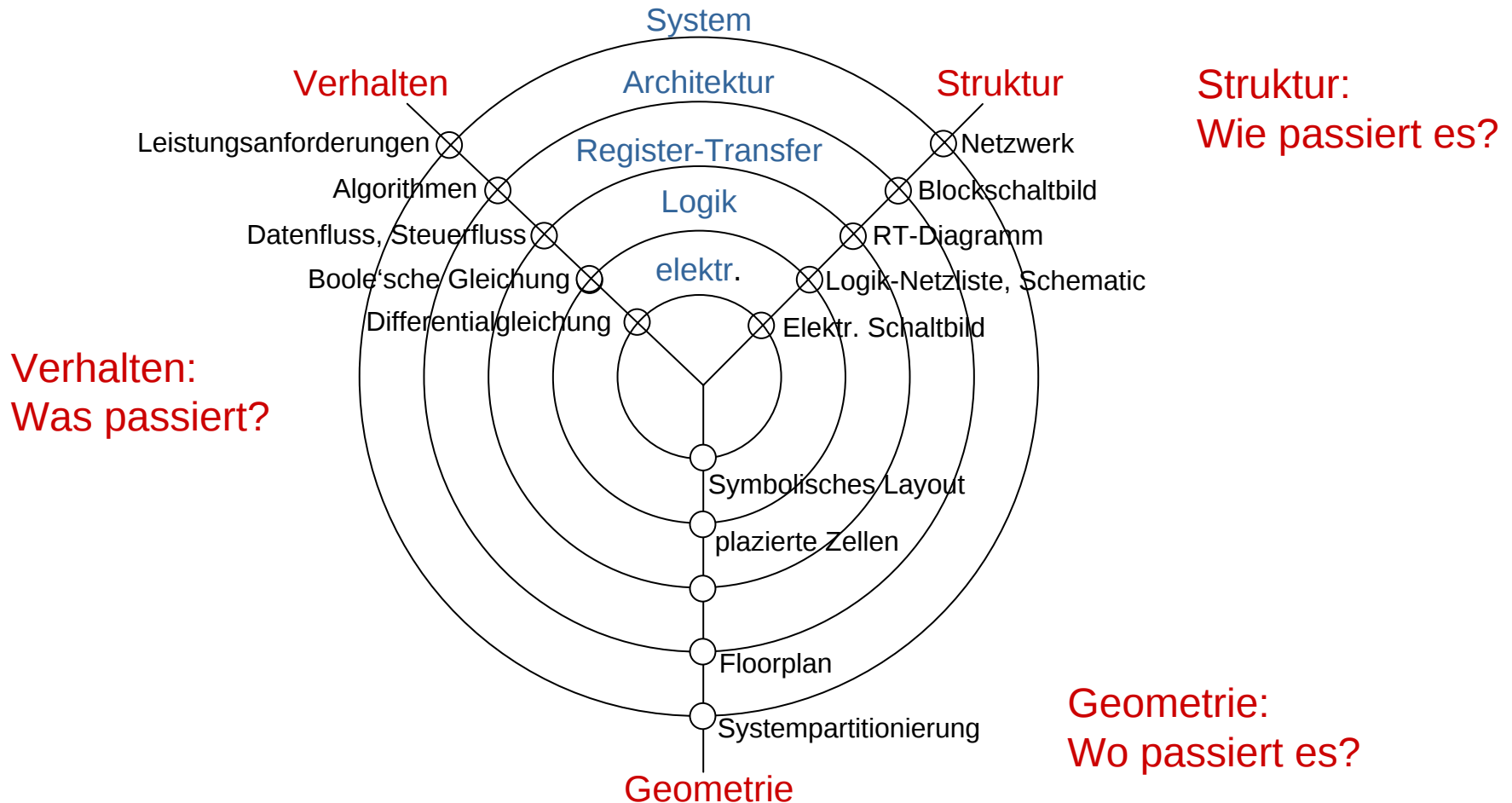
- **Organisationsebene**

- Komplexe miteinander kommunizierende funktionale Blöcke
      - Ausführung der arith.-logischen Operationen
      - Datenpfade
      - ...

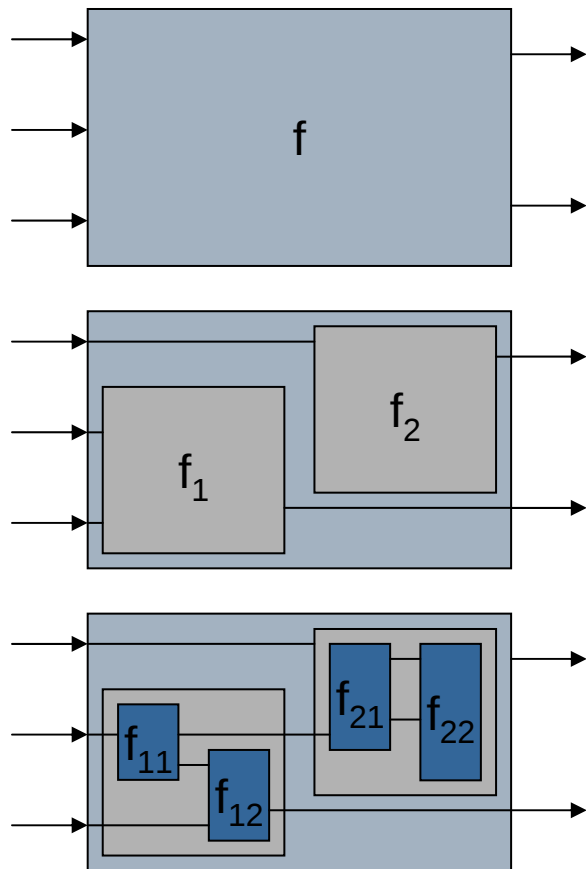
- **Logikebene**

- Beschreibung der miteinander verbundenen Gatter, die Boole'sche Funktionen berechnen

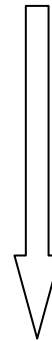
## • Abstraktionsebenen (Chip-Entwurf):



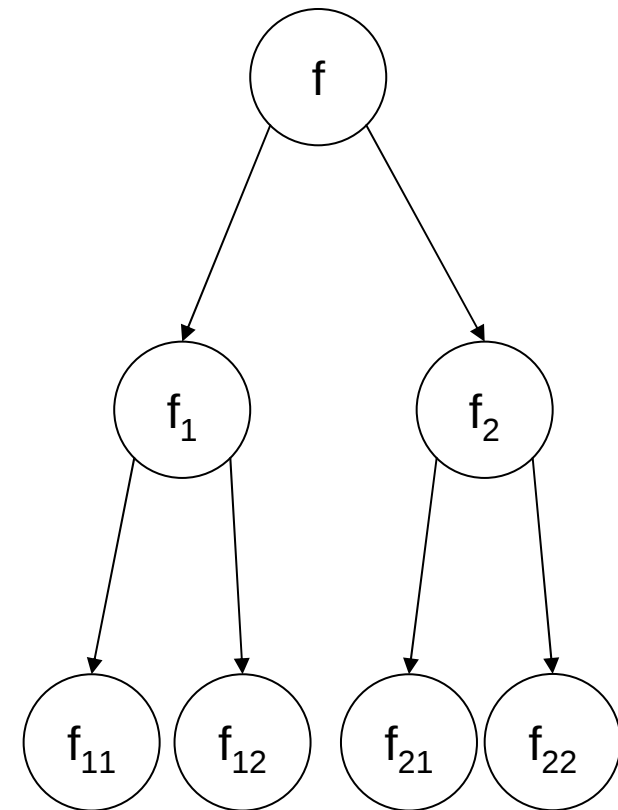
- **Top-Down-Entwurf (Chip-Entwurf)**
  - Schrittweise Verfeinerung, ausgehend von einer hohen Abstraktionsebene



komplexes Verhalten  
wenig Struktur

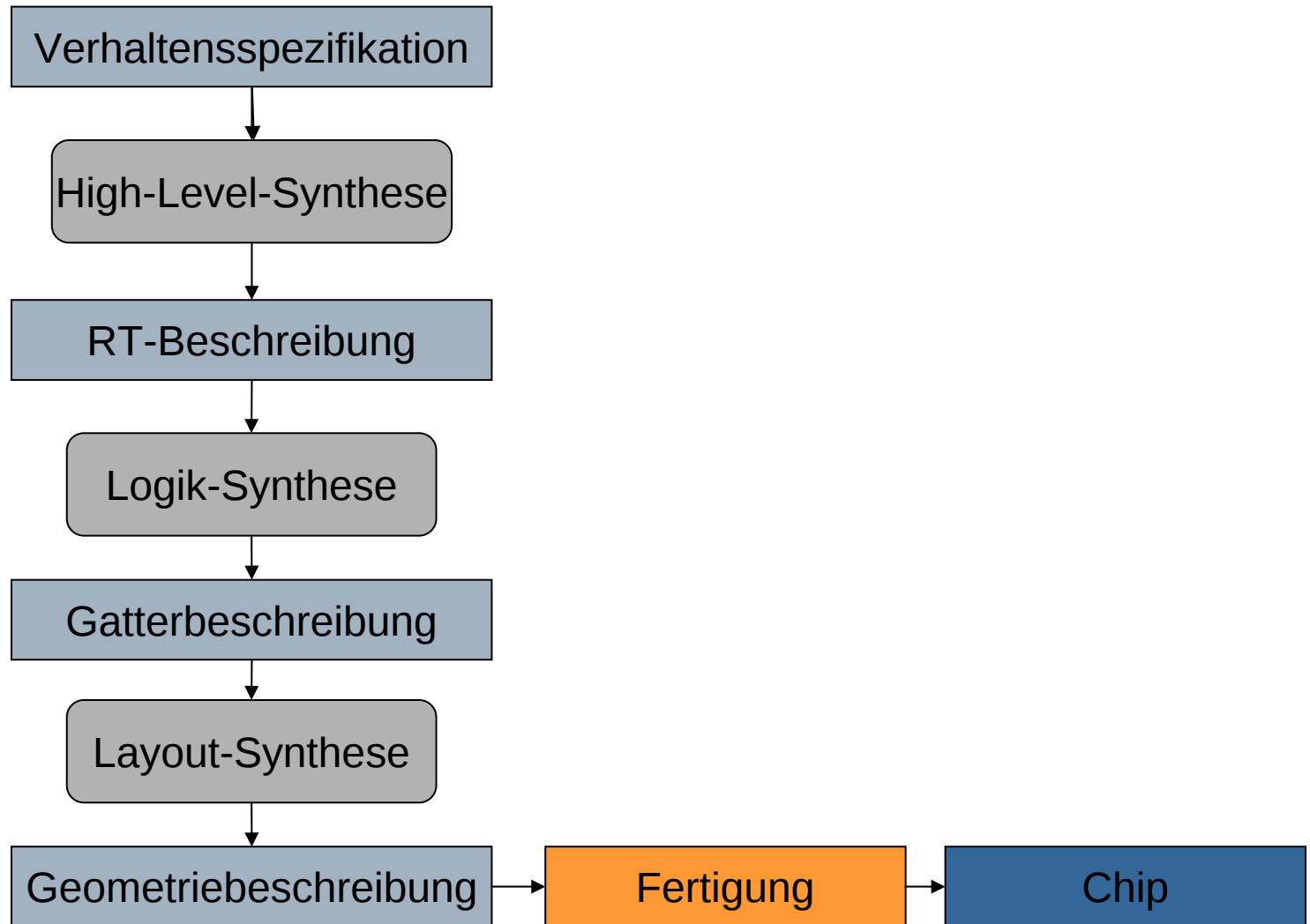


viel Struktur  
einfaches Verhalten



- **Bottom-Up-Entwurf (Rechnerentwurf)**
  - Umgekehrte Vorgehensweise wie bei Top-Down
    - Ausgehend von den zur Verfügung stehenden Platinen oder Chips wird in mehreren Entwurfsschritten festgelegt, wie die Funktionen einer Entwurfsebene zu Funktionen der jeweils darüber liegenden Ebene zusammengesetzt werden

- Entwurf mit Synthesewerkzeugen



- Automatische Synthese

- Vorteile

- Eingabespezifikation auf höherer Ebene
  - Kürzere Entwurfszeit
  - Komplexere Entwürfe möglich
  - Weniger Entwurfsfehler
- Ausschöpfung des Entwurfsraums
  - Mehrere Entwürfe können durchgespielt werden
  - Nutzung des Optimierungspotentials
- Flexibilität
  - Änderung der Spezifikation
  - Änderung der Zieltechnologie
- Weniger fehleranfällig

- Automatische Synthese

- Nachteile

- Auswirkung von Randbedingungen
      - Constraint propagation
      - Formulierung auf einer Ebene möglich, aber Auswirkung andere Ebenen nur schwer zu beurteilen!
    - Qualität des Syntheseergebnisse
    - Integration verschiedener Werkzeuge

- **Die Hardware-Beschreibungssprache VHDL**

- VHSIC-Programm der Vereinigten Staaten (Very High Speed Integrated Circuits)
- Standardisierte Hardware-Beschreibungssprache
- VHDL wurde 1987 IEEE-Standard, mittlerweile in überarbeiteter Form
- Die verschiedenen Schaltungsbeschreibungen des gesamten Entwurfsablaufs können dargestellt werden – von der algorithmischen Spezifikationen bis hin zu realisierungsnahen Strukturen.
- Ursprünglich als Modellierungssprache nur für die Simulation konzipiert
- Heute zunehmend auch als Sprache für die Synthese und die Verifikation eingesetzt
- Eingesetzt zum ASIC- und FPGA-Entwurf
- Enthält alle Elemente einer klassischen Programmiersprache (ADA), erweitert um Konstrukte für den Schaltungsentwurf

- **Chip-Entwurf mit VHDL**

- Grundlage des Entwurfs ist die Spezifikation der Schaltung:
- das gewünschte Verhalten,
- die Schnittstellen (Zahl und Art der Ein-/Ausgänge)
- Vorgaben bezüglich Geschwindigkeit, Kosten, Fläche, Leistungsverbrauch etc.

- Chip-Entwurf mit VHDL

- Entwurfsschritte

- Verhaltensverfeinerung

- Strukturverfeinerung

- wie eine spezifizierte Funktion durch eine Verschaltung von Komponenten mit einfacherer Funktionalität realisiert werden kann.

- Datenverfeinerung

- Realisierung abstrakter Datentypen durch einfachere Typen.

- Chip-Entwurf mit VHDL

- Entwurfsschritte

- Verhaltensverfeinerung

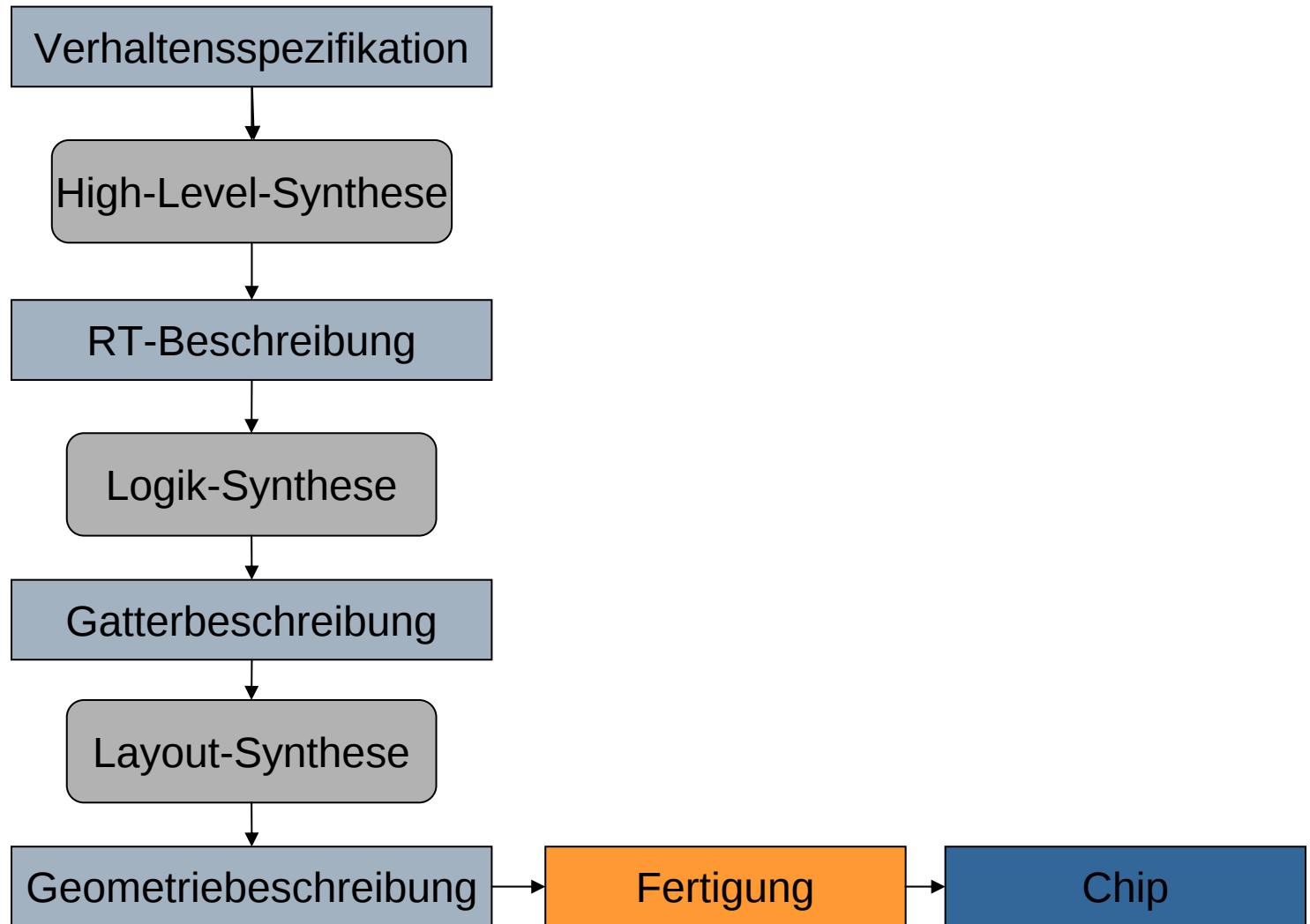
- Strukturverfeinerung

- wie eine spezifizierte Funktion durch eine Verschaltung von Komponenten mit einfacherer Funktionalität realisiert werden kann.

- Datenverfeinerung

- Realisierung abstrakter Datentypen durch einfachere Typen.

- Entwurf mit Synthesewerkzeugen



- **Chip-Entwurf mit VHDL**

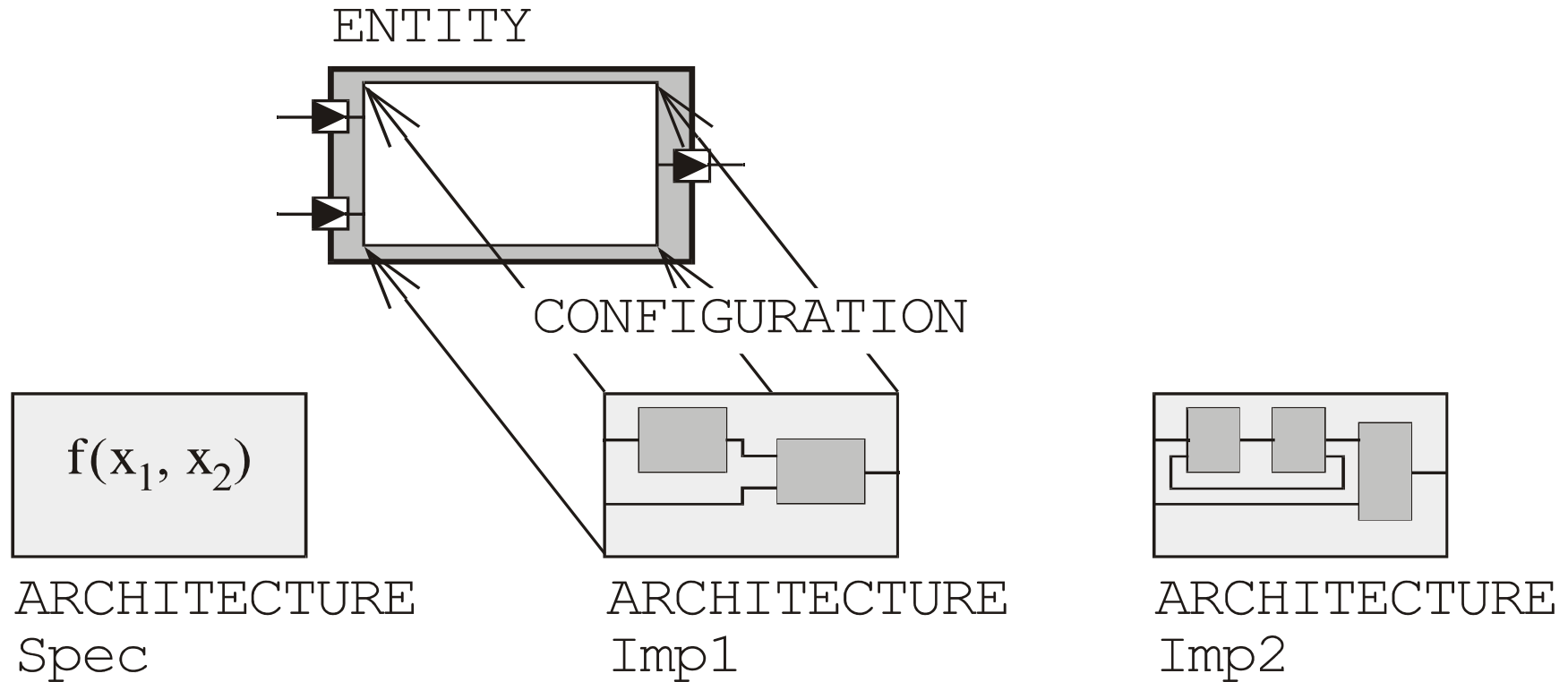
- Ein zu entwerfender Chip oder ein Modul ist durch seine Schnittstellen nach außen sowie durch seinen internen Aufbau festgelegt.
- Der innere Aufbau ist zu Beginn des Entwurfs im allgemeinen nur durch eine funktionale Spezifikation des Verhaltens repräsentiert, die im weiteren Verlauf zu einer strukturellen Implementierung, bestehend aus Submodulen, verfeinert wird.

- Chip-Entwurf mit VHDL

- VHDL erlaubt die getrennte Definition:

- der Schnittstellen eines Moduls (**ENTITY**),
    - der internen Verhaltens- oder Strukturrealisierungen (**ARCHITECTURE**) sowie
    - der Zuordnung, die angibt, welche interne Realisierung für das Modul aktiv ist (**CONFIGURATION**) und beispielsweise für eine Simulation oder für eine Synthese verwendet wird.

- Chip-Entwurf mit VHDL



- **Chip-Entwurf mit VHDL**
  - Beispiel: Schnittstellendefinition eines NAND-Gatters

```
ENTITY Nand2 IS  
    PORT(  
        X1, X2: IN Std_Logic;  
        Y : OUT Std_Logic);  
END Nand2;
```

- Für einen Baustein darf es nur eine Schnittstellendefinition, jedoch beliebig viele interne Realisierungen (ARCHITECTURE ) geben
- Vorsicht: der ARCHITECTURE-Begriff von VHDL hat nichts mit der Definition von „Architektur“ vs. „Mikroarchitektur“ bei Prozessoren zu tun!

- Chip-Entwurf mit VHDL
  - Beispiel: Schema einer ARCHITECTURE

```
ARCHITECTURE Architecture-Name OF Entity-  
Name IS  
    <Daten-, Komponenten- und  
    Unterprogrammdeklarationen>  
BEGIN  
    <Realisierung, z.B. durch Prozesse>  
END Spec;
```

- Chip-Entwurf mit VHDL

- Strukturbeschreibung einer ARCHITECTURE

- besteht aus verschiedenen Submodulen und deren Verschaltung.
- Variable Zuordnung einer ARCHITECTURE („Implementierung“) zu einer ENTITY („Schnittstellenbeschreibung“).
- Die in einer ARCHITECTURE verwendeten Submodule sind im allgemeinen nicht direkte Kopien einer ENTITY. Man verwendet vielmehr „leere Hülssen“ von Modulen, so genannte *components* oder Komponenten.

- Chip-Entwurf mit VHDL

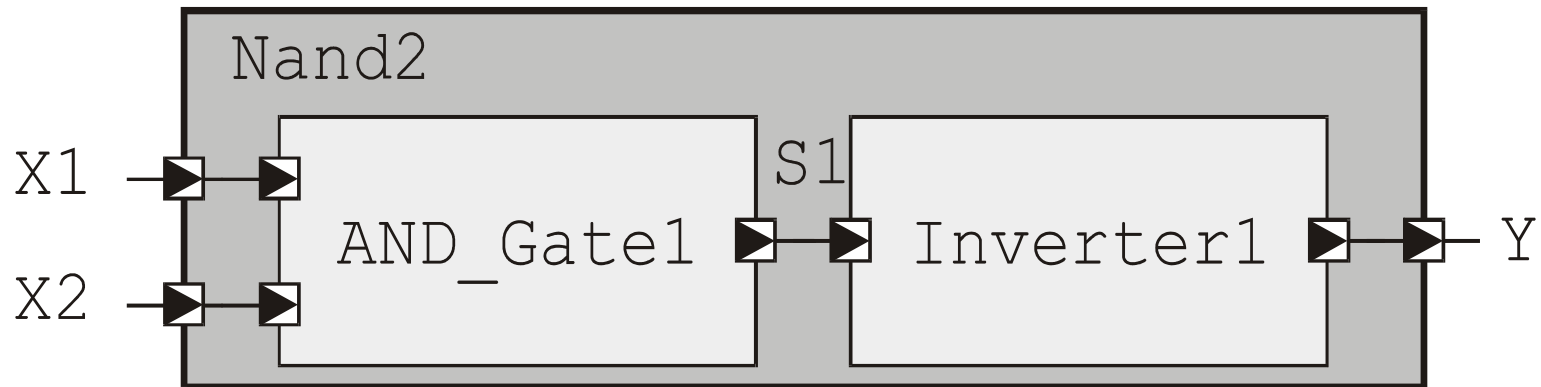
- Strukturbeschreibung einer ARCHITECTURE

- Komponenten werden zu Beginn einer ARCHITECTURE bekannt gemacht (*component declaration*).
- Anschließend werden Kopien (*instances*) der Komponente erzeugt (*component instantiation*) und die Verbindungsstruktur angegeben.
- Abbildung Konfigurationen (*component configuration*), d. h. welche COMPONENT durch welche ENTITY mit welcher ARCHITECTURE realisiert werden soll (separat in einer *configuration unit*).

- Chip-Entwurf mit VHDL

- Beispiel: ein NAND-Gatter soll für die bereits deklarierte ENTITY Nand2 aus einem AND-Gatter und einem Inverter realisiert werden.

- Modulstruktur von Nand2:



- Chip-Entwurf mit VHDL
  - Beispiel: ARCHITECTURE

```
ARCHITECTURE Structure of Nand2 IS
    COMPONENT Inverter
        PORT (
            In1 : IN Std_Logic;
            Out1 : OUT Std_Logic);
    END COMPONENT
    COMPONENT And_Gate
        PORT (
            In1, In2: IN Std_Logic;
            Out1 : OUT Std_Logic);
    END COMPONENT
    SIGNAL S1: Std_Logic;
    BEGIN
        And_Gate1 : And_Gate PORT MAP (X1, X2, S1);
        Inverter1 : Inverter PORT MAP (S1, Y);
    END Structure;
```

- Chip-Entwurf mit VHDL

- Beispiel: Realisierung der Komponenten  
Inverter und And\_Gate

```
ENTITY An2 IS
    GENERIC Delay : Time;
    PORT(
        X1, X2 : IN Std_Logic;
        Y : OUT Std_Logic);
END An2;

ENTITY Inv IS
    PORT(
        Y : OUT Std_Logic;
        X1 : IN Std_Logic);
END Inv;
```

- Chip-Entwurf mit VHDL

- CONFIGURATION-Deklaration

- Möchte man diese Elemente für die Komponenten von Nand2 benutzen, wobei für beide jeweils eine ARCHITECTURE „Behavior“ ausgewählt werden soll, so wird dies durch eine CONFIGURATION vereinbart.
- In einer CONFIGURATION wird
  - die Zuordnung von ENTITY und ARCHITECTURE zu konkreten Instanzen jeder COMPONENT gegeben
  - eventuell eine „Umverdrahtung“ der Signale mit PORT MAP oder eine Verfügung von Parametern mit GENERIC MAP durchgeführt.
  - Diejenigen Schnittstellensignale und Parameter, die in COMPONENT und zu verwendender ENTITY in Zahl und Anordnung übereinstimmen, müssen nicht explizit angegeben werden.

- Chip-Entwurf mit VHDL
  - Beispiel: CONFIGURATION

```
CONFIGURATION Nand_Conf OF Nand2 IS

  -- Angabe der ENTITY
    -- Angabe der ARCHITECTURE
  FOR Structure
    FOR Inverter1 : Inverter
      USE ENTITY Work.Inv1(Behavior);
      PORT MAP (X1 => In1, Y => Out1);
    END FOR;
    FOR And_Gate1: And_Gate
      USE ENTITY Work.An2(Behavior);
      GENERIC MAP (10 ns)
    END FOR;
  END FOR;
END Nand_Conf;
```

**Work** ist hierbei die Bibliothek, in der Inverter und AND\_Gate abgelegt werden.

Die **FOR**-Anweisung gibt hier nicht eine Iterationsschleife an, sondern legt fest, wie bestimmte Einheiten realisiert werden sollen.

- **Chip-Entwurf mit VHDL**
  - Die komplette Beschreibung einer Entwurfseinheit besteht aus:
    - einer ENTITY,
    - mindestens einer ARCHITECTURE und
    - mindestens einer CONFIGURATION.