

Synthese Eingebetteter Systeme

Wintersemester 2012/13

2 – SystemC–Überblick

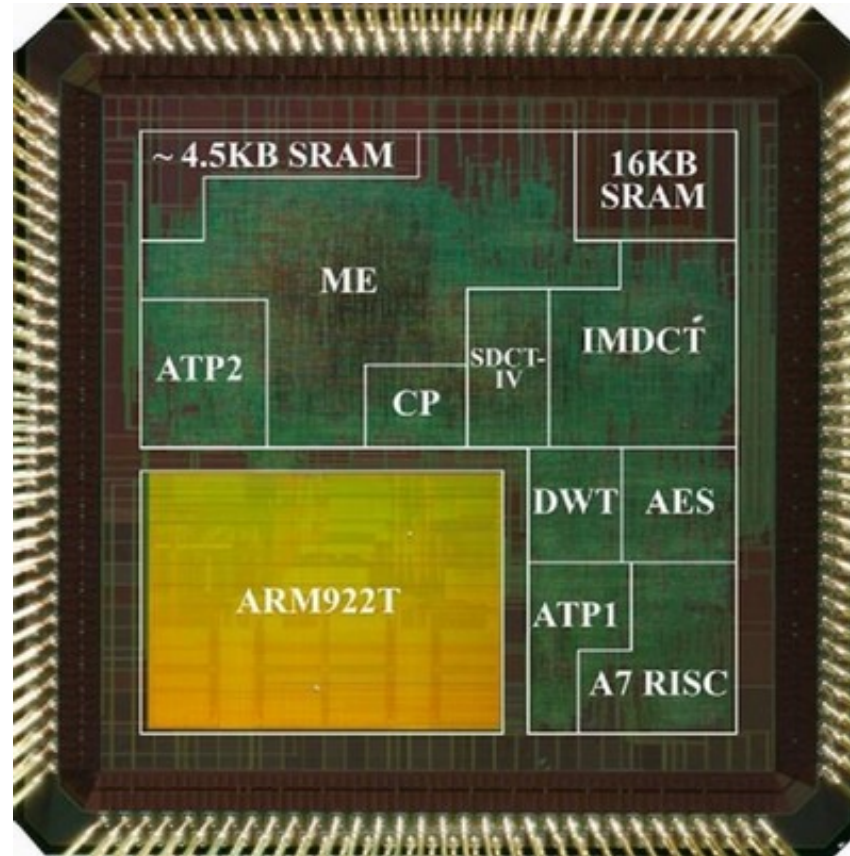
Michael Engel
Informatik 12
TU Dortmund

2012/10/22

Überblick

- ESL-Sprache: SystemC
- SystemC-Struktur und Entwurfsflüsse
- Codebeispiel
- SystemC-Komponenten
 - Zeitverhalten
 - Datentypen
 - Instanziierung

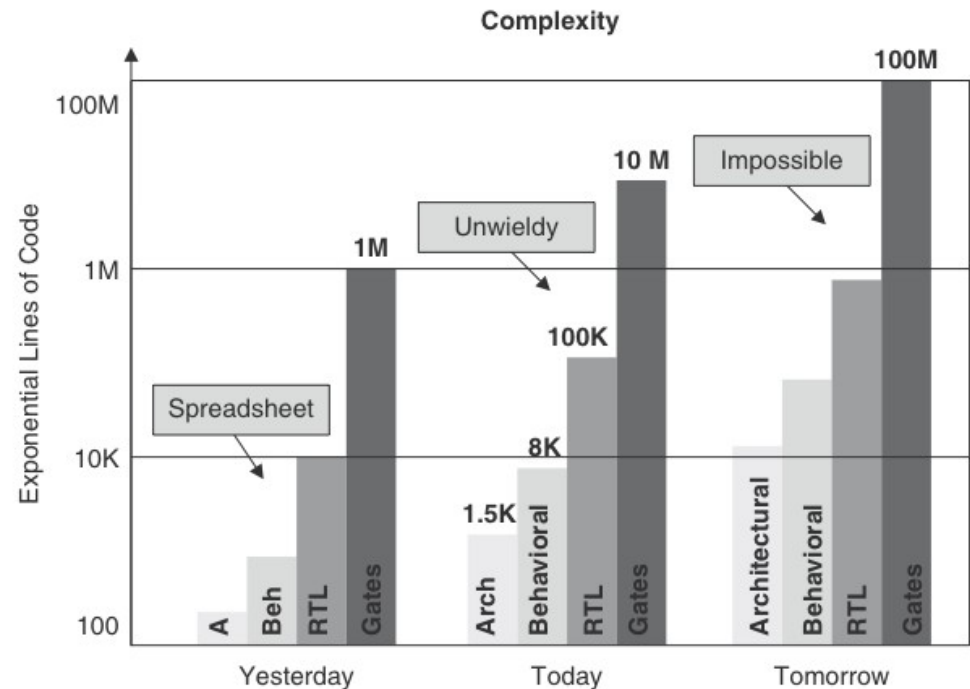
Motivation



- Aktuelle komplexe Systeme bestehen aus HW & SW
- Ein Modell für Hardware und Software!

Komplexität von Entwürfen

- Aktuelle Schaltungen: ~10 Millionen Gatter
- Zukünftige Schaltungen: ~100 Millionen Gatter
 - Diese werden heute entworfen...
 - Größe als RTL:
~1 Million Zeilen!
- Komplexität steigt weiter durch...
 - Mehrere Chips
 - MPSoCs
 - Software!



Gründe für eine ESL-Sprache

Fragestellungen beim Systementwurf:

- Soll eine Funktion in Hardware, in Software oder mit einem besseren Algorithmus implementiert werden?
- Benötigt diese Funktion als Hardware- oder als Software-Implementierung weniger Energie?
- Ist genügend Verbindungsbandbreite für den Algorithmus verfügbar?
- Was ist die minimal benötigte Präzision, damit der Algorithmus funktioniert?

→ RTL-Beschreibungen sind hier zu unflexibel!

Idee: Verwendung einer *höheren Abstraktionsebene*

- Eingebettete Software meist in C/C++ entwickelt
- Ist C/C++ eine sinnvolle Sprache für ESL-Modellierung?

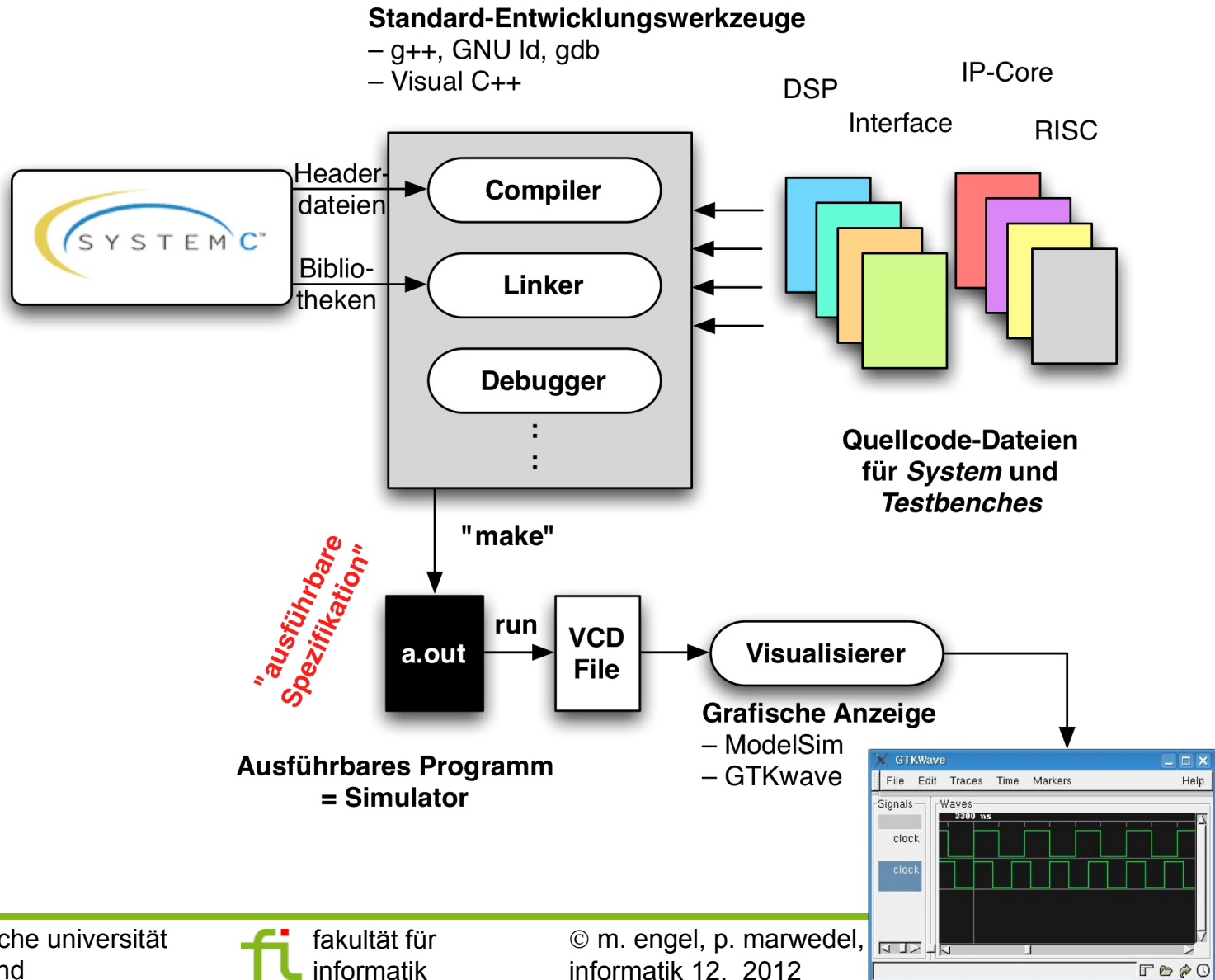
Nachteile eines C/C++-basierten Entwurfsflusses

- C/C++ war *nicht* für den Hardwareentwurf gedacht!
 - C/C++ mangelt es an
 - Hardware-naher Kommunikation - Signale, Protokolle
 - Zeitdarstellung - Takte, Zeitsequentielle Operationen
 - Nebenläufigkeit - Hardware ist inhärent nebenläufig und arbeitet grundsätzlich parallel
 - Reaktivität - Hardware ist grundsätzlich reaktiv
 - Reagiert auf *Stimuli*
 - Interagiert mit der Umgebung (erfordert Ausnahmebehandlung)
 - Hardware-Datentypen
 - Bits, Bit-Vektoren, Mehrwertige Logiktypen, Festkommatypen
 - Fehlende Verbindung zur Hardware beim Debugging
- Entwicklung von SystemC (seit 1999)

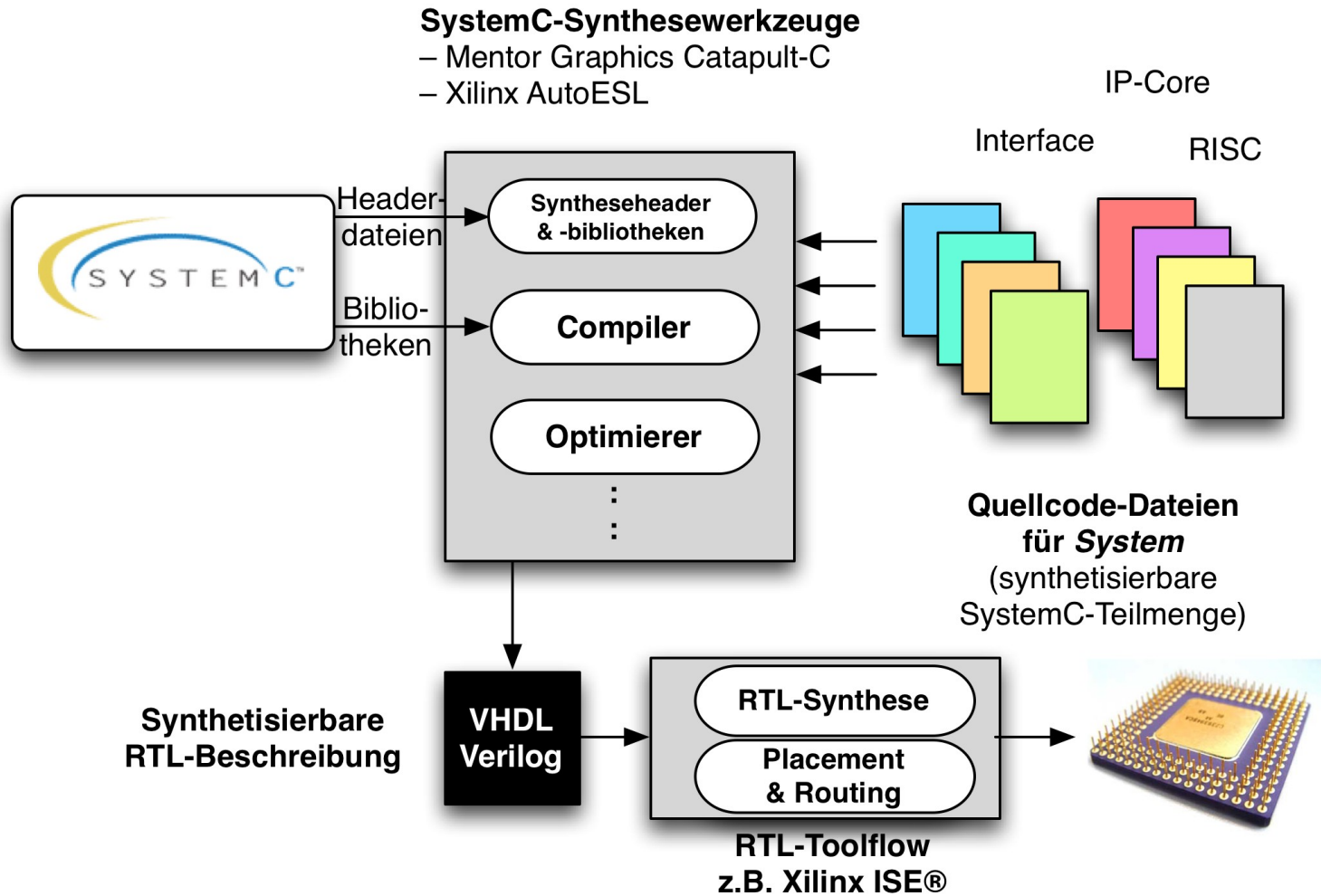
Was ist SystemC®?

- Systementwurfssprache
 - Systeme aus Hard- und Software-Komponenten
- Bibliothek für C++ mit Unterstützung für
 - Funktionalität & Kommunikation,
 - Software & Hardware,
 - Verschiedene Abstraktionsebenen,
 - Nebenläufigkeit,
 - Daten und Kontrollflüsse
- Verwendbar für zyklengenaue Modelle von SW-
Algorithmen, HW-Architekturen und Schnittstellen

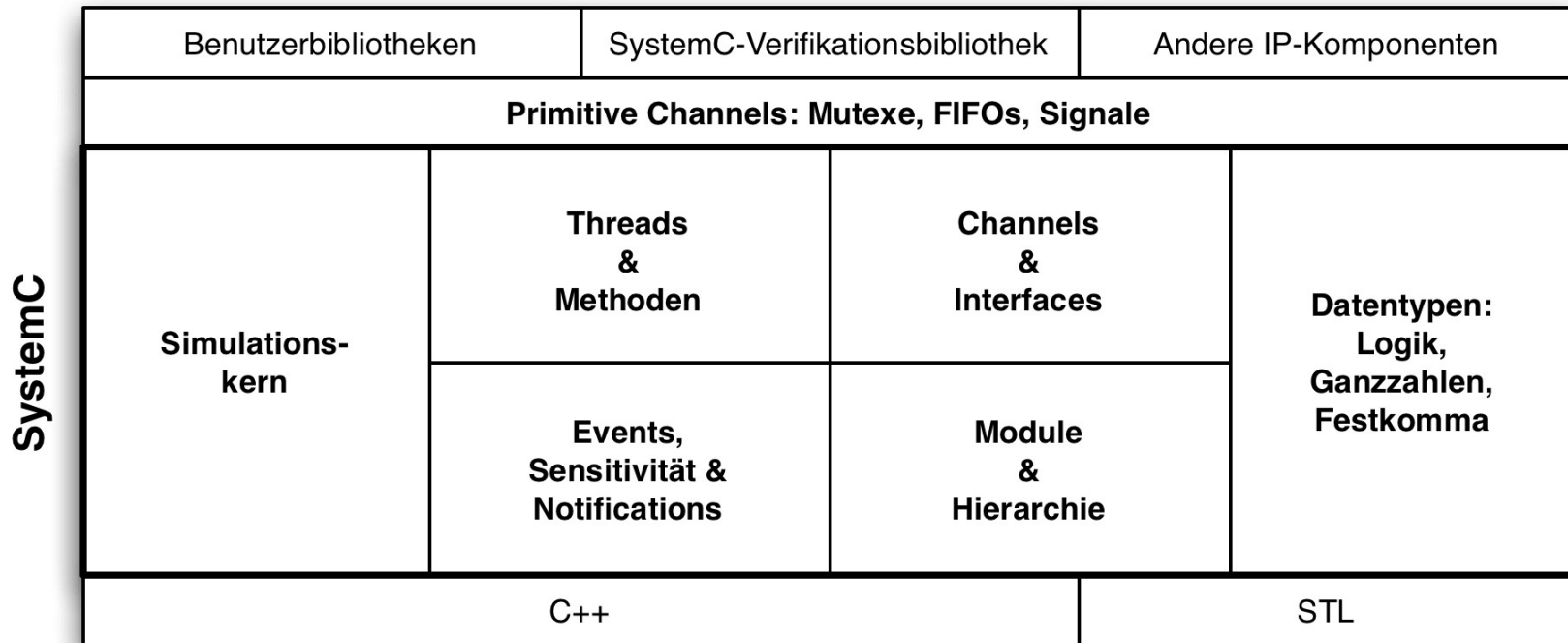
SystemC-Entwurfsmethode: Simulation



SystemC-Entwurfsmethode: Synthese



SystemC-Architektur



SystemC-Spracharchitektur

- Modellierung von Hardware und Software
 - SystemC-Schwerpunkt liegt auf Hardwareentwurf
 - C++-Erweiterungen, um Hardware zu modellieren
- Hardwarenahe Eigenschaften von SystemC:
 - Zeitmodell
 - Hardware-Datentypen
 - Modulhierarchie:
 - Darstellung von Struktur und Hierarchie
 - Nebenläufigkeitsmodell
 - Kommunikationsverwaltung zwischen nebenläufigen Vorgängen
- Auf SystemC-Basis von SystemC sind bekannte Berechnungsmodelle (Models of Computation, MOC) implementierbar
- Untere Ebenen von SystemC können unabhängig von den oberen Ebenen verwendet werden, z.B. für RTL-nahe Modelle

SystemC-Beispiel: Hello, World!

```
#include <Hello_SC.h>
```

```
int sc_main(int argc, char* argv[]) {  
    const sc_time t_PERIOD(8,SC_NS);  
    sc_clock clk("clk",t_PERIOD);  
    Hello_SC iHello_SystemC  
        ("iHello_SystemC");  
    iHello_SystemC.clk_pi(clk);  
    sc_start(10);  
    return 0;  
}
```

Main.cpp

```
#include <Hello_SC.h>
```

```
void Hello_SC::main_method(void)  
{  
    std::cout << sc_time_stamp() <<  
        "Hello world!" << std::endl;  
}
```

Hello_SC.cpp

```
#ifndef HELLO_SYSTEMC_H  
#define HELLO_SYSTEMC_H
```

```
#include <systemc.h>  
#include <iostream>
```

```
SC_MODULE(Hello_SC) {  
    sc_in_clk clk_pi;  
    void main_method(void);
```

```
    SC_CTOR(Hello_SC) {  
        SC_METHOD(main_method);  
        sensitive << clk_pi.neg();  
        dont_initialize();
```

```
    }  
};  
#endif
```

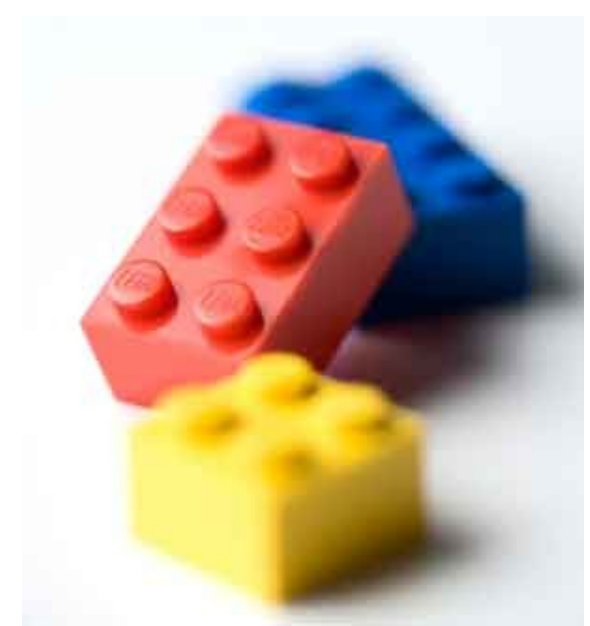
Hello_SC.h

Compilieren mit:

```
g++ -I. -o Hello_SC Hello_SC.cpp \  
    Main.cpp -lsystemc
```

SystemC-Komponenten

- Zeitmodell
- Datentypen
- Instanziierung
- Stolpersteine
- Hierarchie und Struktur
- Ports, Interfaces und Kanäle
- Kommunikation
- Nebenläufigkeit
- Module
- Ereignisse, Sensitivität und Notifications



Zeitmodell und Einheiten

NICHT
SYNTHETISIERBAR



- SystemC verwendet ganzzahlige absolute Zeitangaben
- Intern: unsigned integer, ≥ 64 Bit
- Zeit Beginnt bei 0, monoton steigend
- `sc_time`-Typ
 - stellt Zeit oder Zeitintervall dar
- Zeitobjekte sind Tupel
 - (Zeitwert, Zeiteinheit)
- Modelle, die einen Takt benötigen, können `sc_clock` verwenden

Einheit	Größe
<code>SC_SEC</code>	Sekunden
<code>SC_MS</code>	Millisekunden
<code>SC_US</code>	Mikrosekunden
<code>SC_NS</code>	Nanosekunden
<code>SC_PS</code>	Picosekunden
<code>SC_FS</code>	Femtosekunden

Deklaration und Verwendung

Syntax:

- `sc_time name, ...; // keine Initialisierung!`
- `sc_time name(Groesse, Zeiteinheit), ...;`

Deklarationen:

- `sc_time t_PERIOD (5, SC_NS);`
- `sc_time t_TIMEOUT(100, SC_MS);`

Verwendung:

- `t_MEASURE = (t_CURRENT - t_LAST_CLOCK);`
- `if (t_MEASURE > t_HOLD) { error ("Zeitfehler"); };`
- `wait(t_HOLD) // Innerhalb SC_THREAD erlaubt (s.u.)`

sc_start()



`sc_start()` startet die Simulationsphase

- Optionale Zeitangabe als `sc_time` begrenzt Simulationsdauer

Beispiele:

- `sc_start();` // keine maximale Dauer
- `sc_start(t_TIMEOUT);` // Simulation bis t_TIMEOUT

Anzeigen der Zeit



- `sc_time_stamp()` liefert aktuelle Simulationszeit
- `sc_simulation_time()` liefert aktuelle Zeit als **double**
- Zeit kann mit dem iostream “<<“-Operator angezeigt werden. Beispiele:
 - `cout << sc_time_stamp() << endl;`
 - `std::cout << " Timeout: "
<< t_TIMEOUT << std::endl;`

Zeitauflösung

- **Zeitauflösung:** kleinste Zeitspanne, die von allen `sc_time`-Objekten dargestellt werden kann
Standardauflösung: 1 ps
 - Standard änderbar vor weiterer Verwendung von `sc_time`: `sc_set_time_resolution(value,unit)`
 - Aktuelle Zeitauflösung abfragbar durch Aufruf von `sc_get_time_resolution()`
- **Standardzeiteinheit:** wird bei fehlender Einheitenangabe verwendet
 - Änderbar vor weiterer Verwendung von `sc_time`: `sc_set_default_time_unit(value,unit)`

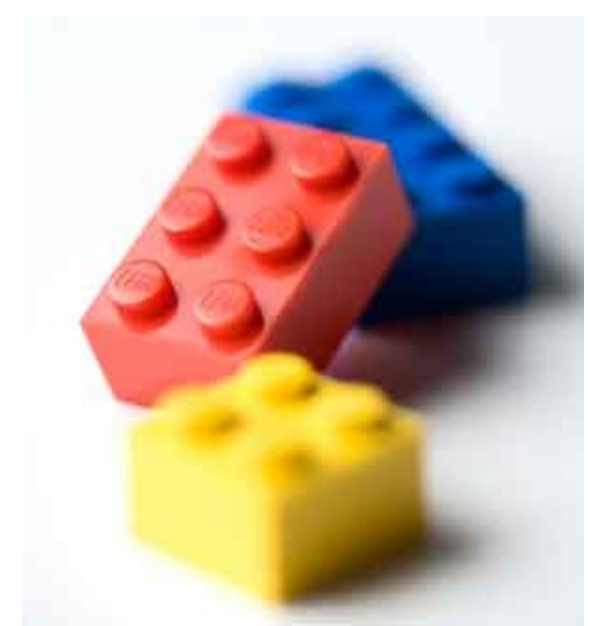
Beispiele

```
int sc_main ...
sc_set_time_resolution(1,SC_MS);
sc_set_default_time_unit (1,SC_SEC);
simple_process instance("instance");
sc_start(7200, SC_SEC); // maximale Laufzeit 2h
double t = sc_simulation_time();
unsigned hours = int (t/3600.0);
t-=3600.0*hours;
unsigned minutes = int (t/60.0);
```

Source & ©: D. Black, J. Donovan: SystemC
from the ground up, Springer, 2004

SystemC-Komponenten

- Zeitmodell
- Datentypen
- Instanziierung
- Stolpersteine
- Hierarchie und Struktur
- Ports, Interfaces und Kanäle
- Kommunikation
- Nebenläufigkeit
- Module
- Ereignisse, Sensitivität und Notifications



Datentypen

SystemC unterstützt:

- C++-eigene Datentypen
- SystemC-Typen
- Benutzerdefinierte Typen



SystemC-Typen:

- Zweiwertige ('0'/'1') Logik und Logikvektoren
- Vierwertige ('0'/'1'/'Z'/'X') Logik und Logikvektoren
- Ganzzahlen beliebiger Größe (mit/ohne Vorzeichen)
- Festkomma-Typen
 - Mit/ohne Vorzeichen, mit/ohne Templates

C++-Datentypen

Bits:

- bool

Ganzzahlen:

- (unsigned) char, (unsigned) short, (unsigned) int, (unsigned) long

Gleitkomma:

- float, double, long double

In Simulation: C++-Datentypen *schneller* als die SystemC-Äquivalente

- “bool” häufig zur Darstellung einzelner Bits verwendet

SystemC-Datentypen

- **sc_bit** – Zweiwertige einzelne Bits
- **sc_logic** – Vierwertige einzelne Bits
- **sc_int** – Ganzzahl mit Vorzeichen, 1–64 Bit
- **sc_uint** – Ganzzahl ohne Vorzeichen, 1–64 Bit
- **sc_bigint** – Ganzzahl beliebiger Größe
- **sc_biguint** – Ganzzahl beliebiger Größe (ohne VZ.)
- **sc_bv** – Beliebig großer zweiwertiger Vektor
- **sc_lv** – Beliebig großer vierwertiger Vektor
- **sc_fixed** – Festkommatyp (Template) mit VZ.
- **sc_ufixed** – Festkommatyp (Template) ohneVZ.
- **sc_fix** – Festkommatyp mit VZ.
- **sc_ufix** – Festkommatyp ohneVZ.

Typ `sc_bit`

`sc_bit` ist ein zweiwertiger Datentyp

- Stellt ein einzelnes Bit dar
- Eine Variable vom Typ `sc_bit` kann nur die Werte `'0'`(false) oder `'1'`(true) annehmen

`sc_bit`-Operatoren

Bitweise	<code>&</code> (und)	<code> </code> (oder)	<code>^</code> (xor)	<code>~</code> (nicht)
Zuweisung	<code>=</code>	<code>&=</code>	<code> =</code>	<code>^=</code>
Gleichheit	<code>==</code>	<code>!=</code>		

Deklaration eines Objekts vom Typ `sc_bit`:

```
sc_bit s;
```

- Aus Performancegründen (Simulation) wird oft der Typ `bool` anstelle von `sc_bit` verwendet!

Typ `sc_logic`

Einzelnes Bit mit vier möglichen Werten:

- '0'(false), '1'(true)
- 'X' (unbekannt) und 'Z' (hochohmig oder offener Kontakt)

Modelliert Busse mit mehreren Teilnehmern, Weitergabe von 'X'-Werten, Initialisierungswerte und offene Busse

`sc_logic`-Operatoren: wie bei Typ `sc_bit`

Beispielzuweisung:

```
sc_logic x;           // Deklaration
x = '1';              // assign a 1 value
x = 'Z';              // assign a Z value
```

- Verhalten der Operatoren für 'X'- und 'Z'-Werte? → Übung!

Vorzeichenlose Ganzzahlen mit fester Breite

SystemC-Ganzzahlen sind vorzeichenlos und vorzeichenbehaftet mit Breiten von 1 bis 64 Bit verfügbar

- `sc_int<n>` VZ-behaftete Ganzzahl mit `n` Bit Breite
- `sc_uint<n>` Vorzeichenlose Ganzzahl mit `n` Bit Breite

Vorzeichenbehaftete Typen als Zweierkomplement dargestellt

Beispiele:

```
sc_int<64> x;      // deklariert 64-Bit Ganzzahl mit VZ.  
sc_uint<48> y;    // deklariert 48-Bit Ganzzahl ohne VZ.
```

Ganzzahlen fester Breite

Ganzzahloperatoren

Bitweise	~	&		^	>>	<<			
Arithmetisch	+	-	*	/	%				
Zuweisung	=	+=	-=	*=	/=	%=	&=	=	^=
Gleichheit	==	!=							
Relational	<	<=	>	>=					
Autoinkrement	++								
Autodekrement	--								
Bitselektion	[x] → überladener Array-Operator								
Teilbitfolge	range()								
Konkatenation	(,) → überladener Reihenfolge-Operator								

Ganzzahlen mit beliebiger Breite

- Für Operanden mit mehr als 64 Bit:
 - `sc_biguint<n>` (VZ-lose Ganzzahl bel. Breite)
 - `sc_bigint<n>` (Ganzzahl bel. Breite mit VZ.)
- Für Ganzzahlen beliebiger Größe verwendbar, nur durch Systemeigenschaften begrenzt
 - Simulation deutlich **langsamer** als `sc_(u)int!`

Operatoren identisch zu denen für Ganzzahlen fester Breite

Die Typen `sc_biguint`, `sc_bigint`, `sc_int`, `sc_uint` und normale C++-Typen können in Ausdrücken zusammen verwendet werden.

Typkonversion durch Zuweisungsoperator “=”

Bitvektoren beliebiger Länge

- Zweiwertiger Vektor beliebiger Länge: `sc_bv`-Typ für die Manipulation großer Bitvektoren

Operatoren auf Bitvektoren beliebiger Länge

Bitweise	<code>~</code>	<code>&</code>	<code> </code>	<code>^</code>	<code><<</code>	<code>>></code>
Zuweisung	<code>=</code>	<code>&=</code>	<code> =</code>	<code>^=</code>		
Gleichheit	<code>==</code>	<code>!=</code>				
Bitselektion	<code>[x]</code>					
Teilbitfolge	<code>range()</code>					
Konkatenation	<code>(,)</code>					
Reduktion	<code>and_reduce()</code>	<code>or_reduce()</code>	<code>xor_reduce()</code>			

Logikvektoren beliebiger Länge

- **sc_lv<n>** ist ein Logikvektor beliebiger Länge, jedes Bit kann einen von vier Werten annehmen
- **sc_lv<n>** ist variabel großes Array von sc_logic-Objekten

Deklarationsbeispiel:

```
sc_signal<sc_lv<64> > databus; // 64 Bit breites Signal  
                          // mit Namen "databus"
```

sc_lv verwendet die selben Operatoren wie **sc_bv**.
sc_bv wird wesentlich schneller als **sc_lv** simuliert!

sc_bv / sc_lv

- **Eigenschaften:**
 - Werte zwischen **sc_bv** und **sc_lv** zuweisbar
 - Zuweisung konstanter Werte über Stringkonstanten
 - Konversion zwischen **sc_bv/sc_lv** und SystemC-Ganzzahltypen ist verfügbar
 - Keine arithmetischen Operationen

Festkomma-Typen

- DSP-Anwendungen benötigen oft Festkommadatentypen
- SystemC besitzt Festkommatypen mit & ohne Vorzeichen, um Hardware akkurat zu modellieren

4 Basis-Festkommatypen:

- **sc_fixed**: statischer Wert (zur Compilezeit bekannt)
- **sc_ufixed**: dto.
- **sc_fix**: variable Werte (zur Laufzeit konfigurierbar)
- **sc_ufix**: dto.

Zusätzlich gibt es "schnelle" Versionen **sc_fix_fast**,

- Auf 53 Bit beschränkt
- **#define SC_INCLUDE_FX** vor **#include <systemc.h>**

Festkomma-Typen

Beispiel:

- 1er-Komplement von $(0001.1100)_2 = (1110.0011)_2$
- 2er-Komplement von $(0001.1100)_2 = (1110.0100)_2$
- *my_var*:

Festkomma-Typen

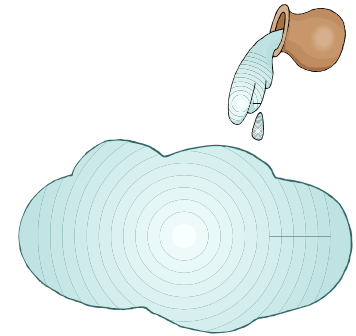
- Syntax zur Deklaration von Festkomma-Objekten:
 - `sc_fixed<wl, iwl, q_mode, o_mode, n_bits> x;`
 - `sc_ufixed<wl, iwl, q_mode, o_mode, n_bits> y;`
 - `sc_fix x(Liste der Optionen);`
 - `sc_ufix y(Liste der Optionen);`

Mit

- `wl` Gesamte Wortlänge
- `iwl` # Bits links vom Dezimalkomma
- `q_mode` Quantisierungsmodus
- `o_mode` Überlaufmodus
- `n_bits` Anzahl saturierter Bits
- `x,y` Objektname, Name des Festkomma-Objekts

Bedeutung der Optionen

<i>Name</i>	<i>Überlaufsteuerung</i>
SC_SAT	Sättigungsarithmetik
SC_WRAP	Überlauf
...	(weitere Optionen)



<i>Name</i>	<i>Quantisierungsmodus</i>
SC_RND	Runden
SC_RND_ZERO	Nach Null hin runden
SC_RND_MIN_INF	Nach $-\infty$ hin runden
SC_RND_INF	Nach $+\infty$ hin runden
SC_TRN	Abschneiden
...	(weitere Optionen)



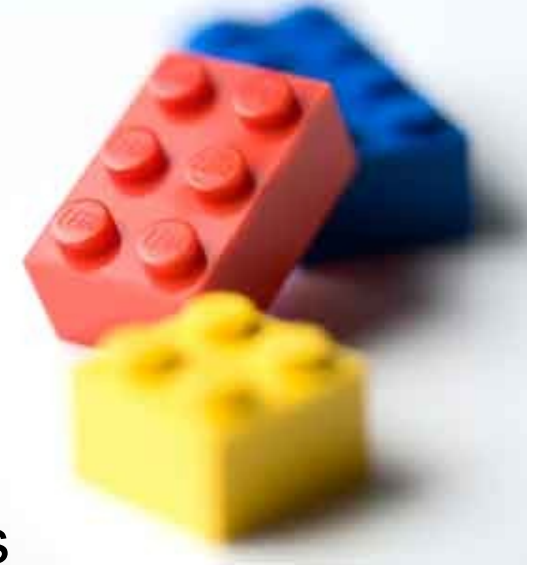
Hohe Abstraktionsebenen und die STL

- STL-Containerklassen sind verwendbar
 - string
 - vector
 - map
 - list
 - deque
- Außerdem
 - for_each
 - count
 - min_element
 - reverse
 - sort
 - search
 -



SystemC-Komponenten

- Zeitmodell
- Datentypen
- **Instanziierung**
- Hierarchie und Struktur
- Ports, Interfaces und Kanäle
- Kommunikation
- Nebenläufigkeit
- Module
- Ereignisse, Sensitivität und Notifications
- Stolpersteine



sc_main()–Funktion

- **sc_main()** ist der Einsprungpunkt aus der SystemC-Bibliothek in die Simulation → main() ist Teil von SystemC!
 - Prototyp identisch zu main:
int sc_main(int argc, char* argv[]);
 - Argumente **argc** und **argv[]** sind die gewohnten Befehlszeilenparameter
 - An **sc_main()** von der **main()**–Funktion übergeben
 - Funktion **sc_main()** konfiguriert Simulationsvariablen(Zeiteinheit, Zeitauflösung etc.), instanziiert die Modul- hierarchie und Kanäle, startet die Simulation start, räumt danach auf und liefert Statuscode zurück

sc_main()–Funktion

- Instanziierungs-Syntax:

```
module_type module_instance_name(“string_name”);
```

- mit:

- **module_type**: Typ des Moduls
(von **sc_module** abgeleitete Klasse)
- **module_instance_name**: Name der Modulinstanz
(Objektname)
- **string_name**: String, mit der die Modulinstanz initialisiert wird

sc_main()–Funktion

- Nach der Instanziierung in **sc_main()** können die Ports eines Moduls an Kanäle gebunden werden

- Explizites Binden von Ports:

```
module_instance_name.port_name(channel_name);
```

- mit:

- **port_name** Instanzname des zu bindenden Ports
- **channel_name** Instanzname des Kanals, an welche der Port gebunden werden soll

Ausblick: SystemC-Beispiel

- „Echte“ Hardware
 - 8-Bit-Zähler
- Eingänge:
 - Enable
 - Clock
 - Reset
- Ausgänge:
 - Out
- Internes Signal:
 - Count

```
#include "systemc.h"

SC_MODULE (up_down_counter) {
    //-----Input Ports-----
    sc_in    <bool> enable, clk, reset;
    //-----Output Ports-----
    sc_out   <sc_uint<8> > out;
    //-----Internal Variables-----
    sc_uint<8> count;

    //-----Code Starts Here-----
    void counter () {
        if (reset.read()) {
            count = 0 ;
        } else if (enable.read()) {
            count = count + 1;
        }
        out.write(count);
    }

    SC_CTOR(up_down_counter) {
        SC_METHOD (counter);
        sensitive << clk.pos();
    }
};
```

Stolpersteine



Den ersten Entwurf zu übersetzen kann nervenaufreibend sein – ein paar Tips:

- Häufigster Fehler:
 - Vergessen von “;” am Ende von SC_MODULE
 - SC_MODULE ist ein Makro, das eine Klasse darstellt (→Übung)
 - SystemC verwendet viele Templates
 - Problem (z.B. bei gcc): *geschachtelte Templates*
 - `sc_out<sc_uint<8>> output;`
 - Verwechslung mit Rechtsschiebe-Operator “>>”
- ```
design.cc:5: error: template argument 1 is invalid
```
- Lösung – **Leerzeichen:** `sc_out<sc_uint<8> >`

# Zusammenfassung

---

- Komplexere elektronische Systeme
  - ...erfordern Entwurf auf Systemebene
  - ...ESL-Sprache: SystemC
- SystemC
  - Library für C++
  - Modellierung von Hardware-Datentypen und -eigenschaften
  - Simulation und Synthese
    - nicht alle Konstrukte sind synthetisierbar!
- SystemC-Sprachkonstrukte
  - Zeitverhalten
  - Datentypen
  - Instanziierung
  - „Klassische“ Fehler von SystemC-Anfängern

# Literatur

---

1. D. Black, J. Donovan: *SystemC: From the Ground Up, Second Edition*, Springer, 2010
2. <http://www.doulos.com/knowhow/systemc>
3. SystemC 2.2 Language Reference Manual
4. SystemC™ Version 2.2 User's Guide, <http://www.systemc.org>
5. Joachim Gerlach: *System-on-Chip Design with SystemC*, U. Tübingen, Wilhelm-Schickard-Institut, Department of Computer Engineering
6. Thorsten Grötter, Stan Liao, Grant Martin, Stuart Swan, *System Design with SystemC™*, Kluwer Academic Publishers
7. SystemC Quick Reference Card:  
[http://comelec.enst.fr/hdl/sc\\_docs/systemc\\_quickreference.pdf](http://comelec.enst.fr/hdl/sc_docs/systemc_quickreference.pdf)