Verlässliche Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Triple Modular Redundancy

Florian Schmaus, Simon Schuster

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
https://www4.cs.fau.de

30. April 2018

Keynote: Challenges in Safety-Critical Software

Chris Hobbs

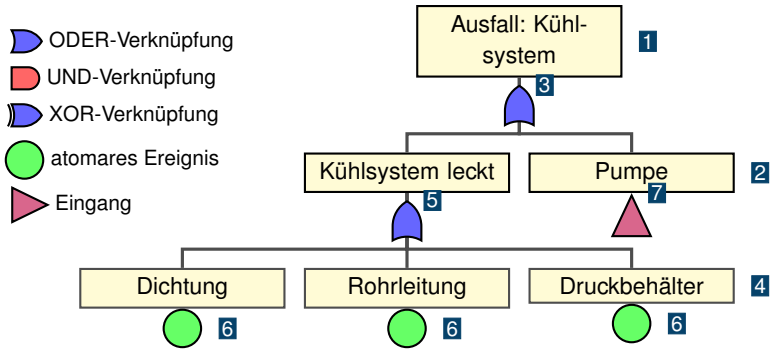
- Senior Developer bei QNX
- *Ten Truths about Building Safe Embedded Software Systems*
- IEC 61508, IEC 62304/ISO 14971, ISO 26262, EN 5012x
- Standards sind laufend in Entwicklung
- Bitflips vs. Rowhammering
- Safety vs. Security

☞ *Need for qualified developers*

Überblick

Überblick

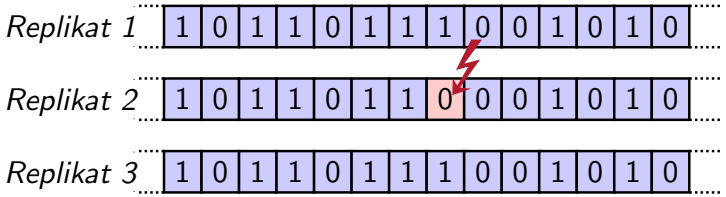
Fehlerbäume – Wiederholung



1. Schadensereignis
2. Ereignisse auf Ebene 2
3. Logische Verknüpfung
4. Ereignisse auf Ebene 3
5. Logische Verknüpfung
6. Atomare Ereignisse
7. Eingänge zerlegen den Fehlerbaum ↦ Neuer Teilbaum

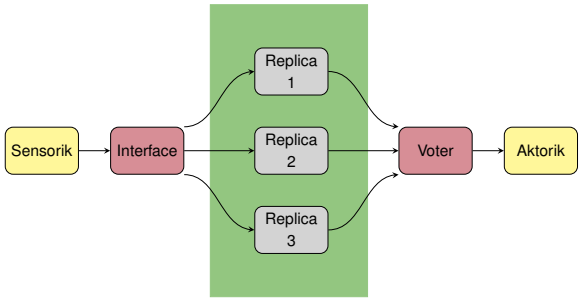
Überblick

Fehlerhypothese



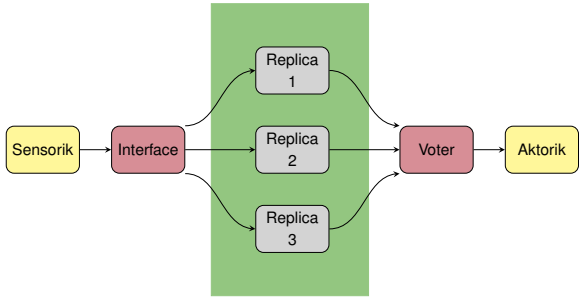
- **Wie viele Replikate** benötigt man?
- Arten des Fehlverhaltens (von n Replikaten sind f fehlerhaft)
  1. fail-silent ↦ Anzahl Replikate: $n = f + 1$
  2. fail-consistent ↦ Anzahl Replikate: $n = 2f + 1$
  3. malicious ↦ Anzahl Replikate: $n = 3f + 1$

Triple Modular Redundancy



- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Verteilt Daten und aktiviert Replikate
- Mehrheitsentscheider (Voter) wählt Ergebnis
- Ergebnis wird an Aktuator versendet

Triple Modular Redundancy



Redundanzbereich

Ausschließlich Replikatausführung

- Erweiterung der Ausgangsseite mit Informationsredundanz
- Mehrheitsentscheid über Berechnungsergebnisse

Replikdeterminismus

Replikat 1

```
void repl_2(void* p){
  ticks_t time =
    ezs_get_time();

  ...
}
```

Replikat 2

```
void repl_2(void* p){
  ticks_t time =
    ezs_get_time();

  ...
}
```

Replikat 3

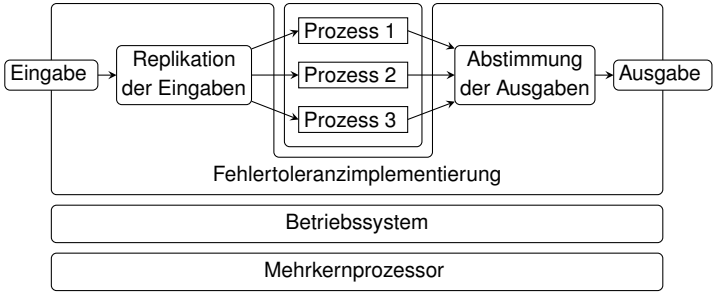
```
void repl_3(void* p){
  ticks_t time =
    ezs_get_time();

  ...
}
```

Sicherstellung Replikdeterminismus

- Globale diskrete Zeitbasis
- Einigung über Eingabewerte
- Statische Kontrollstruktur der Replikate
- Deterministische Algorithmen

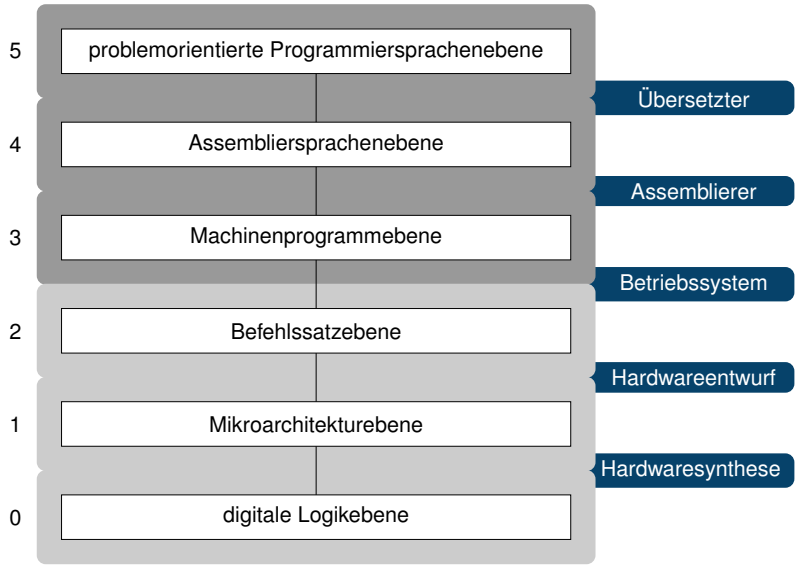
☞ Sicherstellung, dass Replikat *innerhalb Zeitspanne* Ergebnis liefert

Process-Level Redundancy



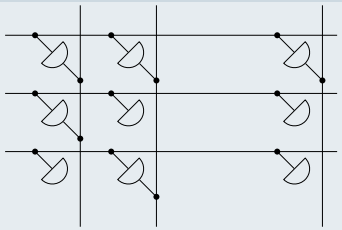
Überblick

Ebenen

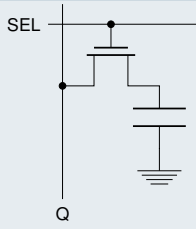


Digitale Logikebene

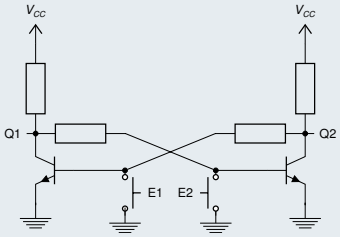
ROM



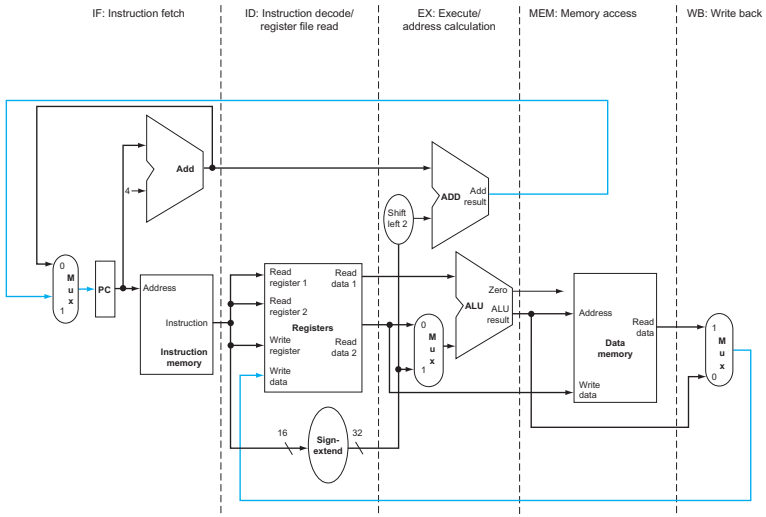
DRAM



RS - FlipFlop

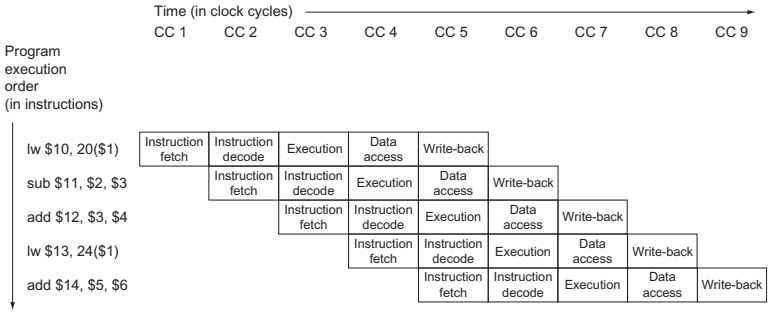


MIPS: Single-Cycle



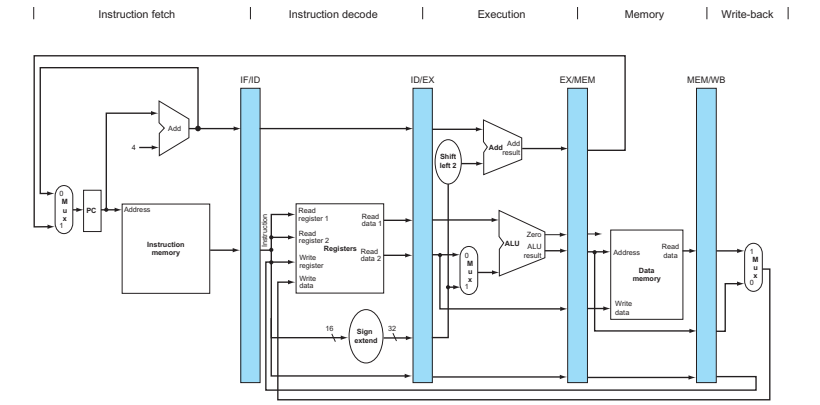
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



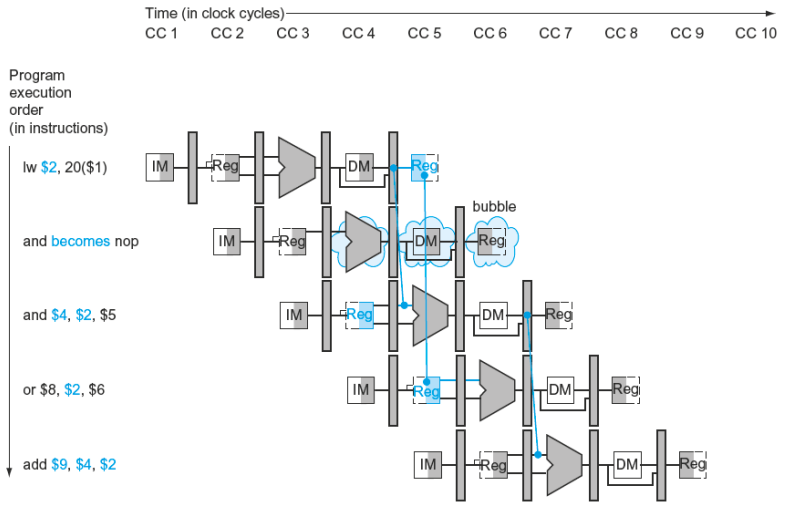
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



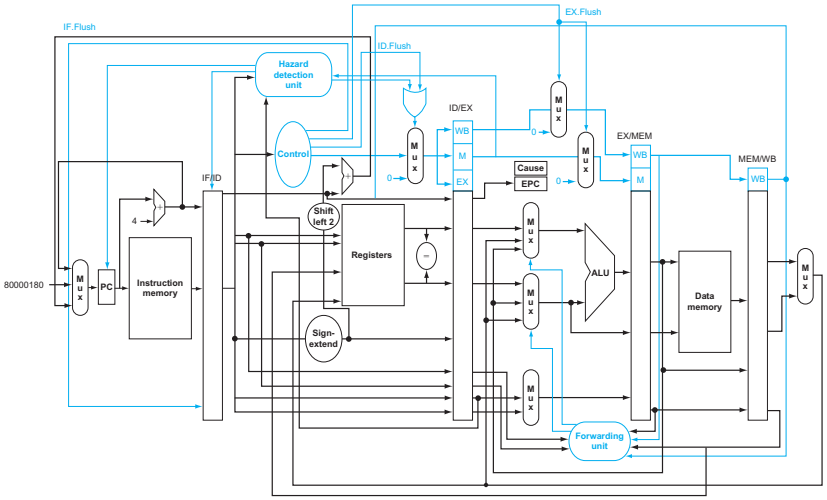
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

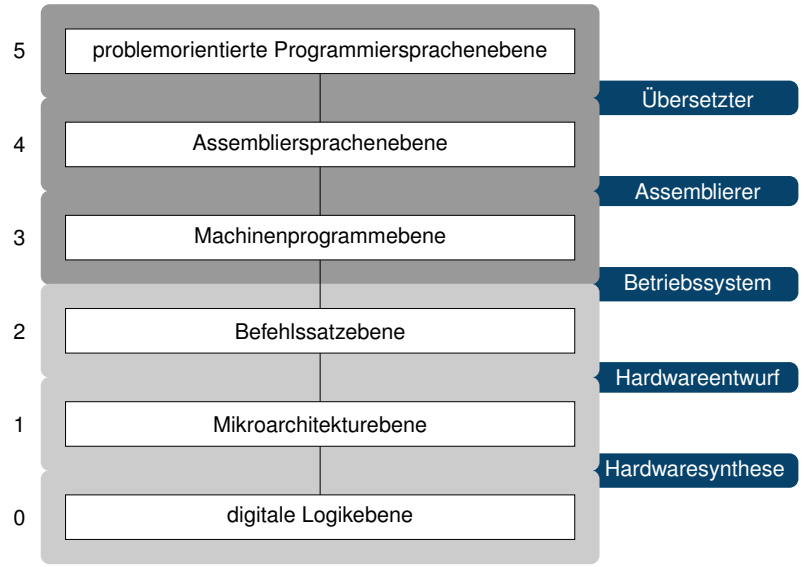
Eigenschaften von CPU-Architekturen

- Mikroprogrammierbar vs. Fixed-Function
- Out-of-Order-Prozessoren
- Sprungvorhersage
- Transaktionaler Speicher
- Superskalarität
- Mehrkernarchitekturen
- Hyperthreading
- ...

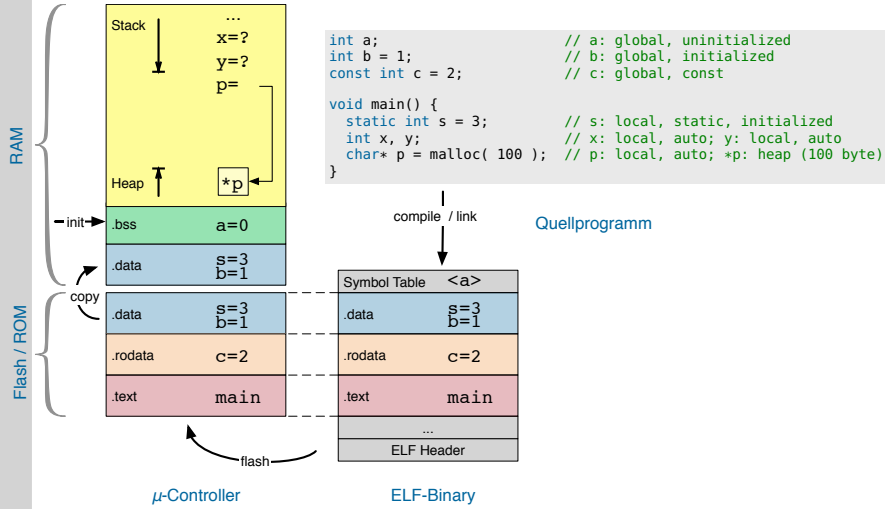
☞ All diese zusätzlichen Fehlerpunkte müssen im Fehlermodell berücksichtigt werden

☞ Ein Ein-Bit-Fehler in einer dieser Komponenten kann zu komplexen Mehrbitfehlern auf ISA-Ebene führen

Ebenen



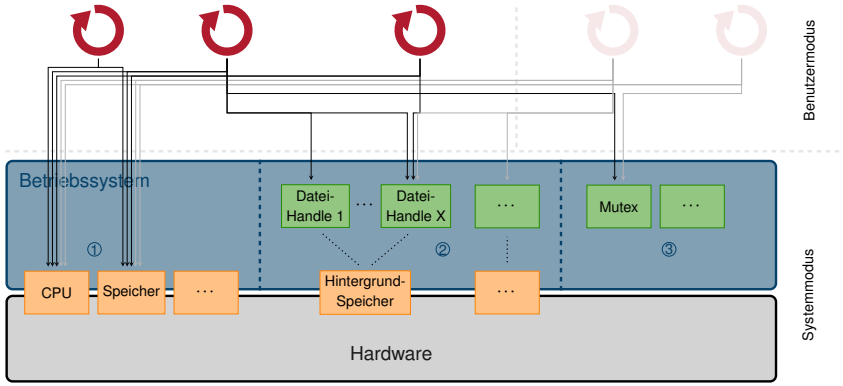
Speicherorganisation auf einem Mikrocontroller



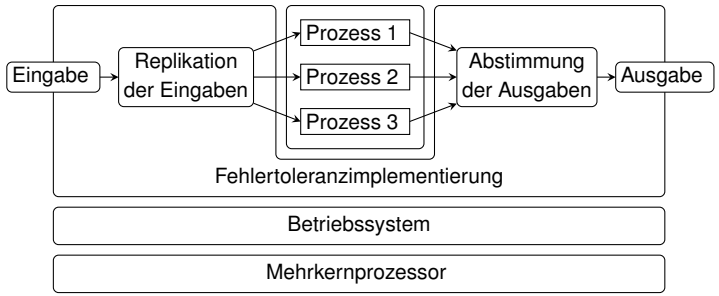

```
int a;                          // a: global, uninitialized
int b = 1;                      // b: global, initialized
const int c = 2;                // c: global, const

void main() {
  static int s = 3;             // s: local, static, initialized
  int x, y;                     // x: local, auto; y: local, auto
  char* p = malloc( 100 );      // p: local, auto; *p: heap (100 byte)
}
```

Quellprogramm

Betriebssystem



Process-Level Redundancy



C-Code vs. Assembler-Code

C-Code

```
int a;
int b = 1;
const int c = 2;
  void main() {
  static int s = 3;
  int x, y;
  char* p = malloc( 100 );
}
```

Assembler-Code

```
4004f0 <main>:
  4004f0: push   %rbp
  4004f1: mov    %rsp,%rbp
  4004f4: sub    $0x10,%rsp
  4004f8: movabs $0x64,%rdi
  4004ff: 00 00 00
  400502: callq  4003e0 <malloc@plt>
  400507: mov    %rax,-0x10(%rbp)
  40050b: add    $0x10,%rsp
  40050f: pop    %rbp
  400510: retq
```

Wo können Datenfehler auftreten?

1. RAM: `-0x10(%rbp)`
2. Allgemeine CPU-Register: `%rsp`
3. Sonstige CPU-Register: `%rip`, `%rflags`

Überblick

Code-Replikation: Stringification

Stringification von CPP

```
1 #define CMP_FUNC(pre, repl, type, op) \
2     type pre##repl(type a, type b) {  \
3         return a op b ? a : b;        \
4     }
5
6 CMP_FUNC(max, 1, int, >); // Funktion ?max1
7 CMP_FUNC(max, 2, int, >); // Funktion ?max2
8 ...
9 CMP_FUNC(min, 1, int, <); // Funktion ?min1
```

- Verwendung des C-Präprozessors (CPP)
- ##: „Token Pasting Operator“
- Konkatenieren zweier Token zu einem
- Aufruf & Deklaration müssen erstellt werden

☞ Es geht eleganter ...

C++ Templates

C++ Template

```
1  template <typename T>
2  T max(T x, T y) {
3    T value;
4    if (x < y)
5      value = y;
6    else
7      value = x;
8    return value;
9  }
10 ...
11 double md = max<double>(2.3, 4.2);
12 auto   mi = max<int>(23U, 42);
```

- Templates ermöglichen generische Programmierung
- Wiederverwendung durch **Parametrisierung**
- Unterscheidung von Funktions- & Klassen-Templates
- Expansion zur Compilezeit ⇝ Quelltext muss verfügbar sein (im Header)
- „Code Bloat” beim Compilieren → **nutzbar für Replikation von Code**

C++ Templates

C++ Template Spezialisierung

```
1  template <float T>
2  T my_func(T x, T y) { // specialized template for T == float
3    T a = x;
4    ...
5  }
```

- Spezialisierungen von Templates möglich
  - Effizientere Implementierung für bestimmte Typen
- Nutzbar zum „Zählen” von Templates

Mehrere Template-Parameter

```
1  template <typename A, typename B, typename C>
2  T my_other_func(A x, B y, C z) {
3    ...
4  }
5  my_other_func<Dog, Cat, Mouse>(m, n, o);
```

Umgang mit Assembly-Code I

Symboltabellen in ELF-Dateien

```
1  0000000000201028 B __bss_start
2  0000000000201028 b completed.6983
3  ...
4  000000000000061a T main
5  0000000000000580 t register_tm_clones
6  0000000000000510 T _start
7  ...
8  000000000000066d t int inc<0>(int)
9  000000000000067c t int inc<1>(int)
10 000000000000068b t int inc<2>(int)
```

- `nm`: Ausgabe der Symboltabelle
- Nützliche Optionen
  - `-C`: Dekodieren der C++-Namensmangelung:
    `_Z3incILi0EEii` ⇒ `int inc<0>(int)`
    `_Z3incILi1EEii` ⇒ `int inc<1>(int)`

Umgang mit Assembly-Code II

Assembly-Code gemischt mit Source-Code

```
1  int main(){
2    4007cd: 55                push   %rbp
3    4007ce: 48 89 e5          mov    %rsp,%rbp
4    4007d1: 48 83 ec 10       sub    $0x10,%rsp
5  int a = max<int>(23U, 42);
6    4007d5: be 2a 00 00 00    mov    $0x2a,%esi
7    4007da: bf 17 00 00 00    mov    $0x17,%edi
8    4007df: e8 04 01 00 00    callq  4008e8 <_Z3maxIiET_S0_S0_>
9    4007e4: 89 45 fc          mov    %eax,-0x4(%rbp)
10 std::cout << a << "\n";
11   4007e7: 8b 45 fc          mov    -0x4(%rbp),%eax
12   ...
```

- `objdump`: Ausgabe von Informationen von Objektdateien
- Nützliche Optionen
  - `-S`: Ausgabe von Quell-Code im Assembly-Code (Debug-Symbole notwendig)
  - `-D`: alle Sektionen disassemblieren

C-Code in C++ Einbinden

C Linkage

```
1  // C++ code
2  extern "C" void f(int); // one way
3  extern "C" {            // another way
4    int g(double);
5    double h();
6  };
7  void code(int i, double d)
8  {
9    f(i);
10   int ii = g(d);
11   double dd = h();
12   // ...
13 }
```

- Name mangling von C++ verhindern

⇒ C++-Code aus C-Code aufrufen