Verlässliche Echtzeitsysteme - Übungen

Triple Modular Redundancy

Wintersemester 2024

Eva Dengler, Peter Wägemann

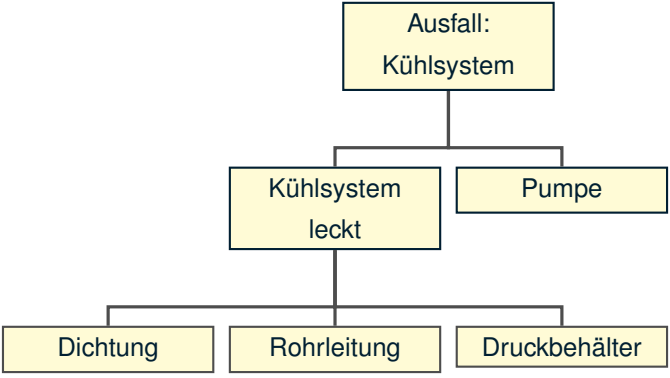
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)
https://sys.cs.fau.de

Überblick

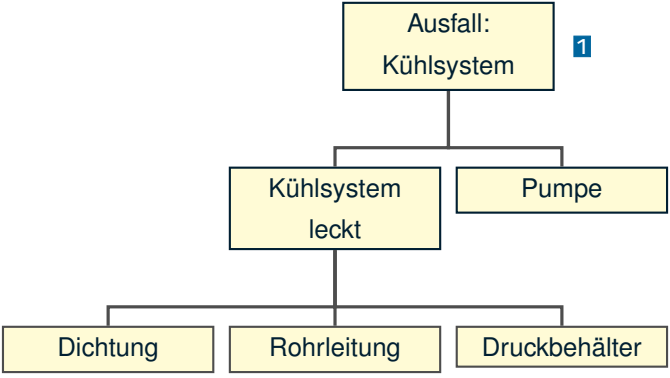
1. Wiederholung: Grundlagen Fehlerbäume
2. Wiederholung: Triple Modular Redundancy
3. Ausblick: Rechnerarchitektur, Replikation und Redundanz
4. Replikation von Code

Überblick

Fehlerbäume – Wiederholung

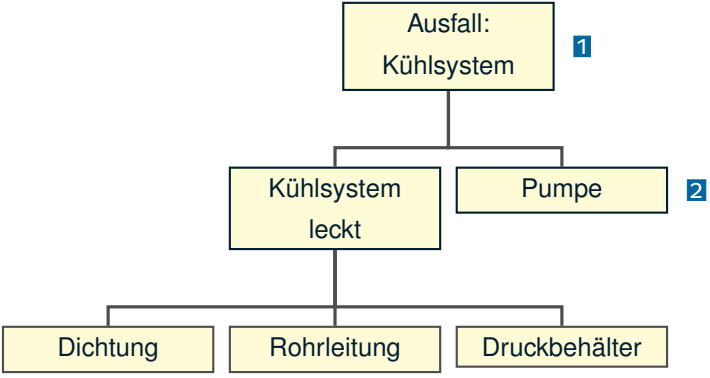


Fehlerbäume – Wiederholung



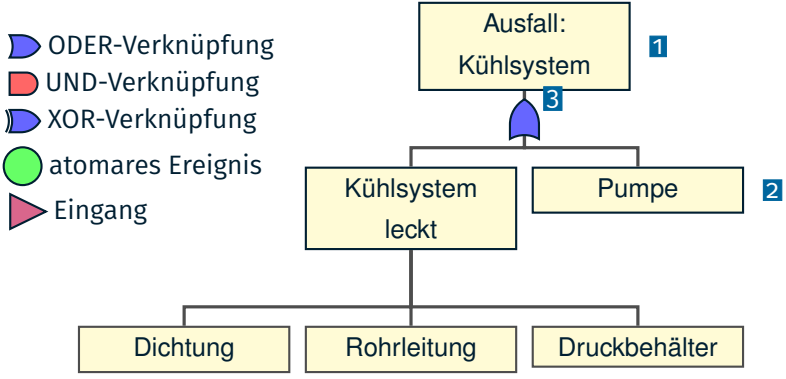
1. Schadensereignis

Fehlerbäume – Wiederholung



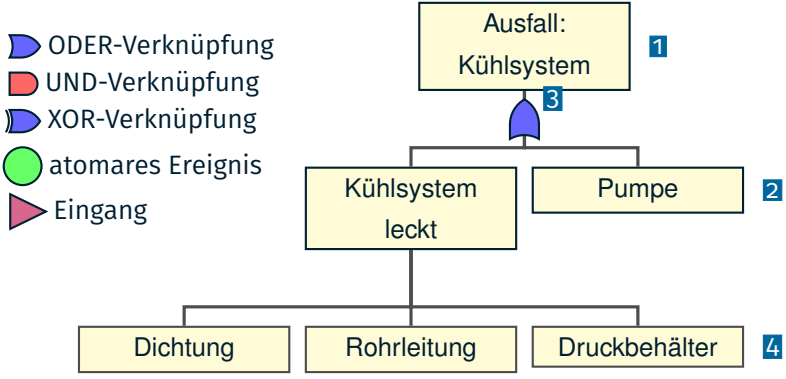
1. Schadensereignis
2. Ereignisse auf Ebene 2

Fehlerbäume – Wiederholung



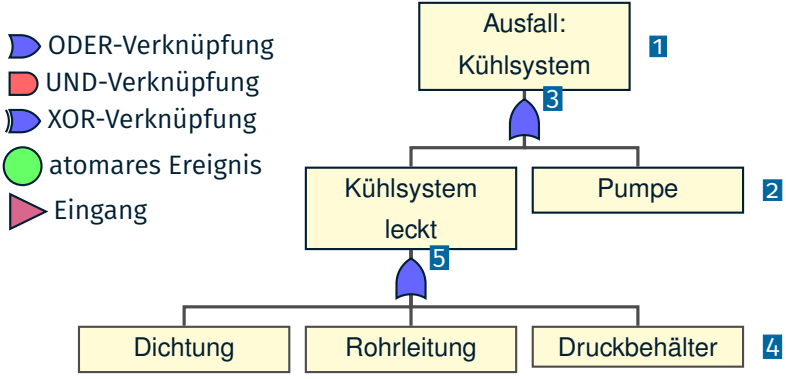
1. Schadensereignis
2. Ereignisse auf Ebene 2
3. Logische Verknüpfung

Fehlerbäume – Wiederholung



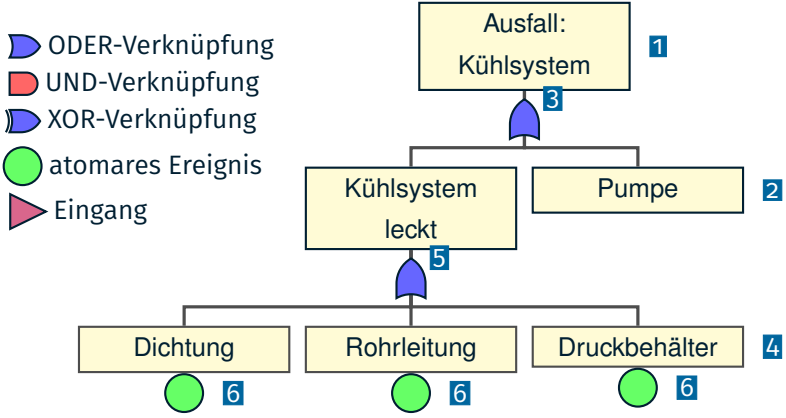
1. Schadensereignis
2. Ereignisse auf Ebene 2
3. Logische Verknüpfung
4. Ereignisse auf Ebene 3

Fehlerbäume – Wiederholung



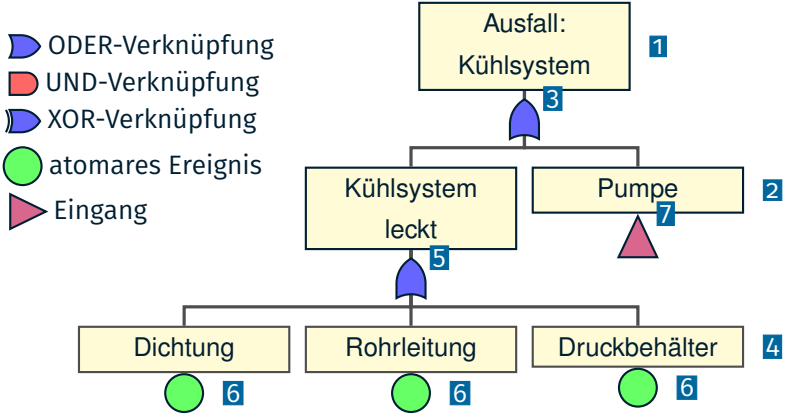
1. Schadensereignis
2. Ereignisse auf Ebene 2
3. Logische Verknüpfung
4. Ereignisse auf Ebene 3
5. Logische Verknüpfung

Fehlerbäume – Wiederholung



1. Schadensereignis
2. Ereignisse auf Ebene 2
3. Logische Verknüpfung
4. Ereignisse auf Ebene 3
5. Logische Verknüpfung
6. Atomare Ereignisse

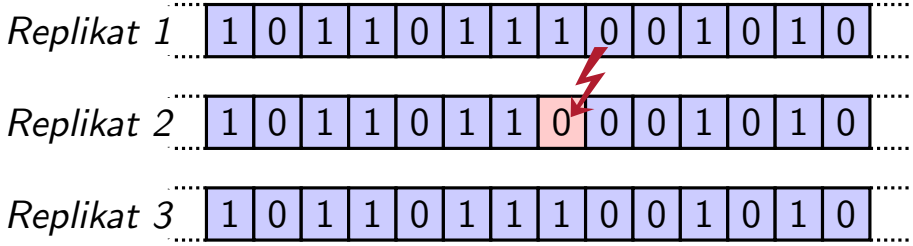
Fehlerbäume – Wiederholung



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

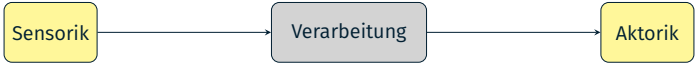
Überblick

Fehlerhypothese

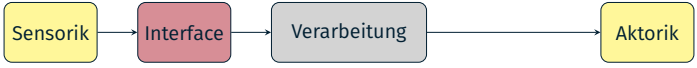


- **Wie viele Replikate** benötigt man zur Fehlermaskierung?
- Arten des Fehlverhaltens (von n Replikaten sind f fehlerhaft)
  1. fail-silent $\mapsto$ # Replikate: $n = f + 1$
  2. fail-consistent $\mapsto$ # Replikate: $n = 2f + 1$
  3. malicious $\mapsto$ # Replikate: $n = 3f + 1$, bösartige verteilte Systeme

Triple Modular Redundancy

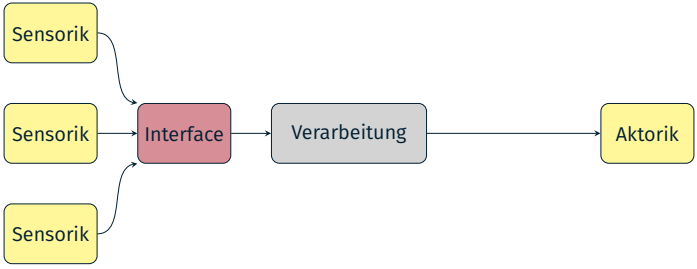


Triple Modular Redundancy



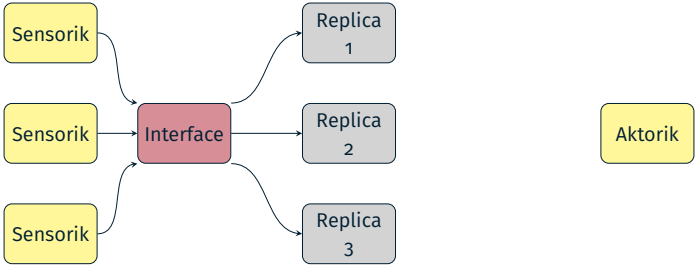
- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)

Triple Modular Redundancy



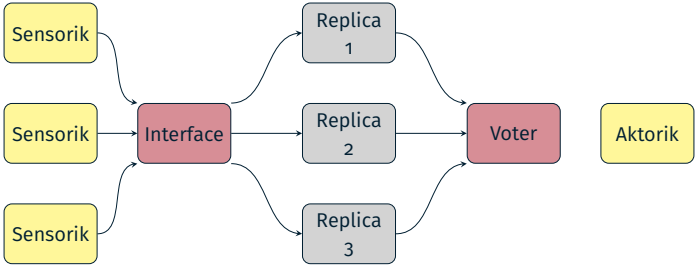
- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Insbesondere: Mögl. Mehrheitsentscheid für redundante Sensordaten

Triple Modular Redundancy



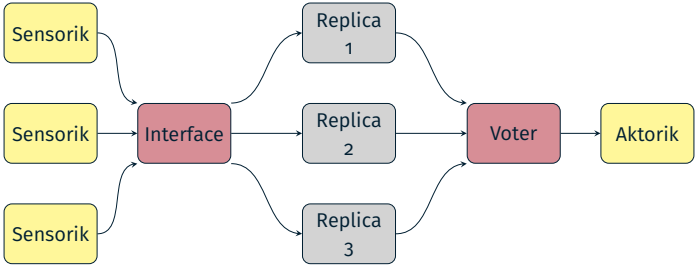
- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Insbesondere: Mögl. Mehrheitsentscheid für redundante Sensordaten
- Verteilt Daten und aktiviert Replikate

Triple Modular Redundancy



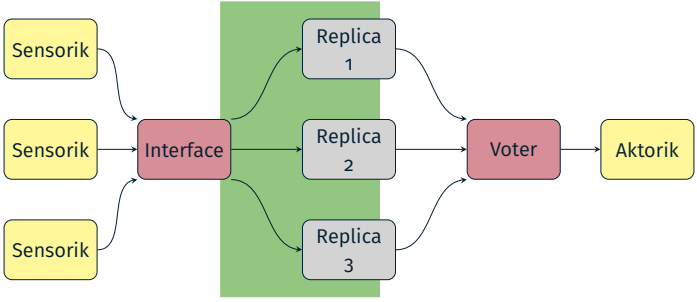
- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Insbesondere: Mögl. Mehrheitsentscheid für redundante Sensordaten
- Verteilt Daten und aktiviert Replikate
- Mehrheitsentscheider (Voter) wählt Ergebnis

Triple Modular Redundancy



- Schnittstelle sammelt Eingangsdaten (Replikdeterminismus)
- Insbesondere: Mögl. Mehrheitsentscheid für redundante Sensordaten
- Verteilt Daten und aktiviert Replikate
- Mehrheitsentscheider (Voter) wählt Ergebnis
- Ergebnis wird an Aktuator versendet

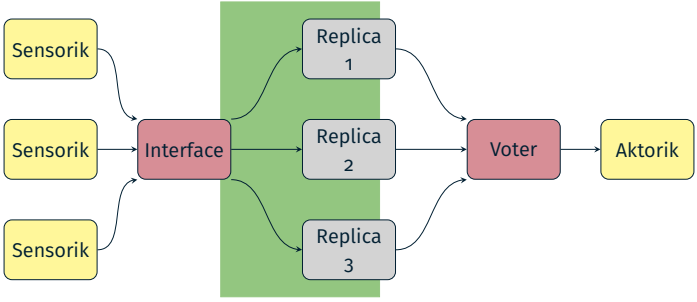
Triple Modular Redundancy



Redundanzbereich

Ausschließlich Replikatausführung

Triple Modular Redundancy



Redundanzbereich

Ausschließlich Replikatausführung

- Mehrheitsentscheid über Berechnungsergebnisse
- Erweiterung der Ausgangsseite mit Informationsredundanz

Replikdeterminismus

Replikat 1

```
void repl_1(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();

  ...
}
```

Replikdeterminismus

Replikat 1

```
void repl_1(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

Replikdeterminismus

Replikat 1

```
void repl_1(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 — Single Core

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

Replikdeterminismus

Replikat 1

```
void repl_1(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 — Single Core

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

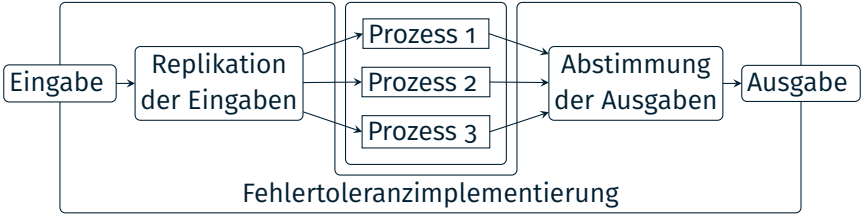
Sicherstellung Systemverhalten

☞ Replikate müssen *innerhalb bestimmter Zeitspanne* terminieren

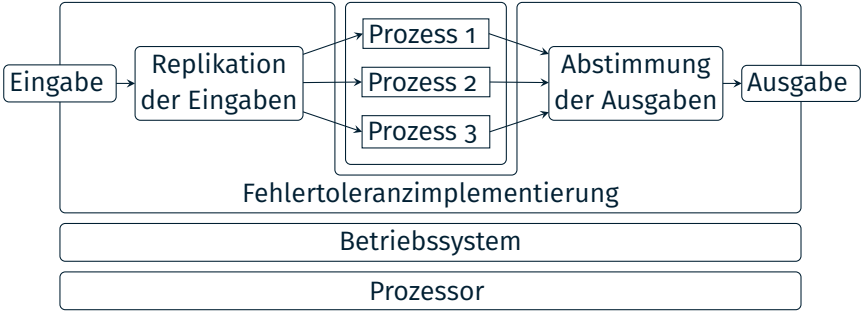
Process-Level Redundancy

Process-Level Redundancy

Process-Level Redundancy

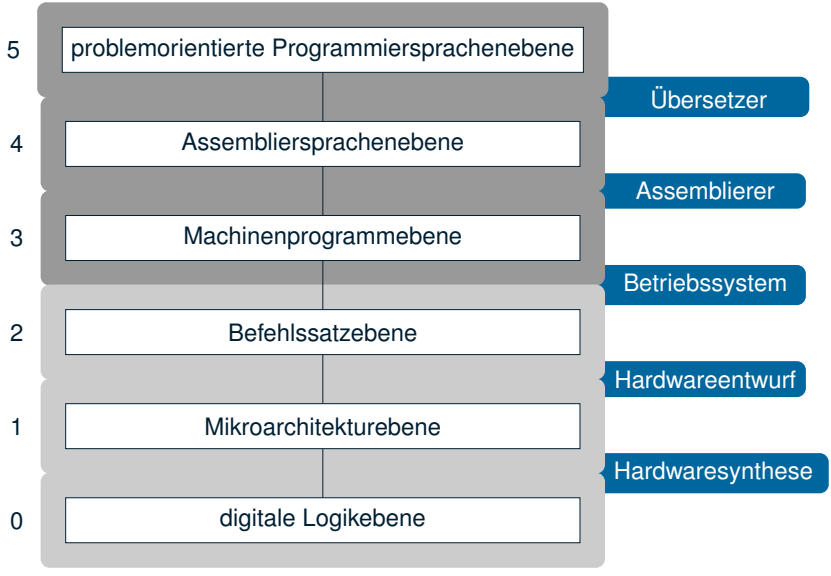


Process-Level Redundancy



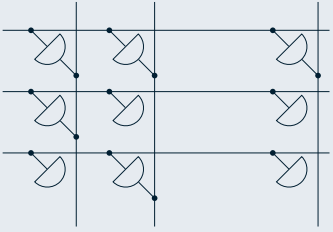
Überblick

Ebenen

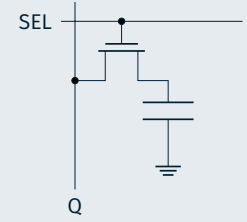

5
problemorientierte Programmiersprachenebene
Übersetzer
4
Assembliersprachenebene
Assemblierer
3
Machinenprogrammebene
Betriebssystem
2
Befehlssatzebene
Hardwareentwurf
1
Mikroarchitekturebene
Hardwaresynthese
0
digitale Logikebene

Digitale Logikebene

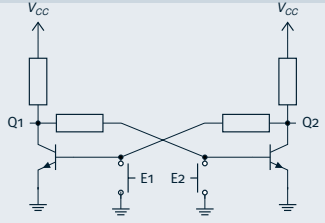
ROM



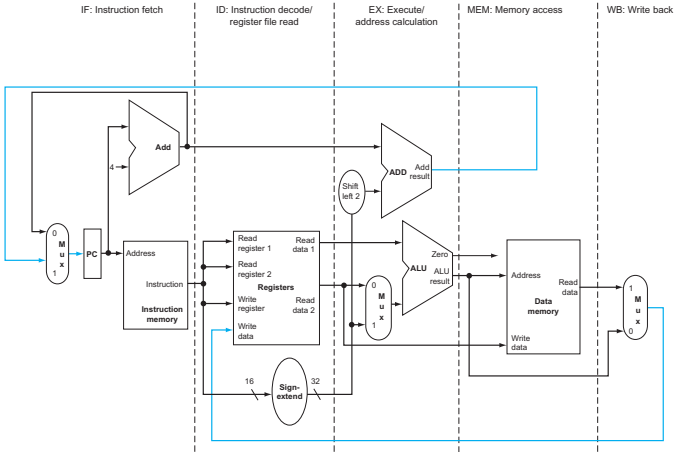
DRAM



RS - FlipFlop

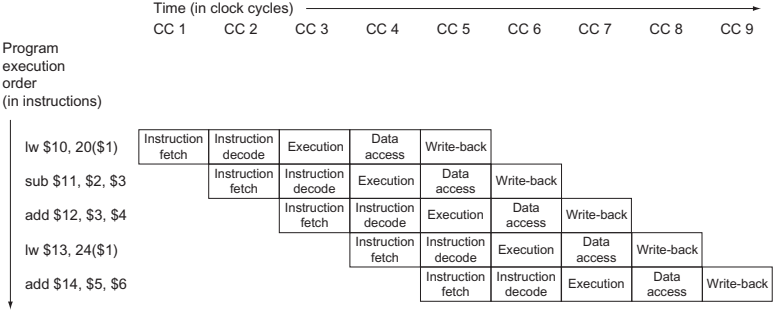


MIPS: Single-Cycle



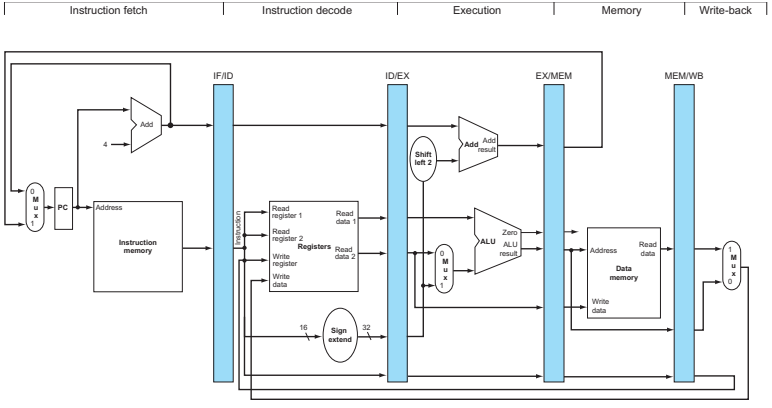
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



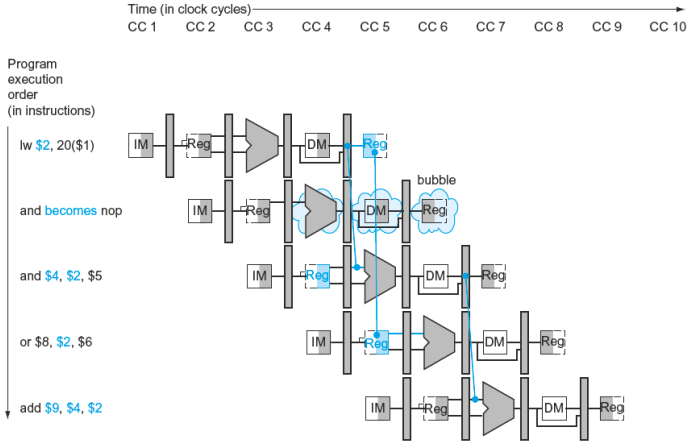
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

MIPS: Pipelining



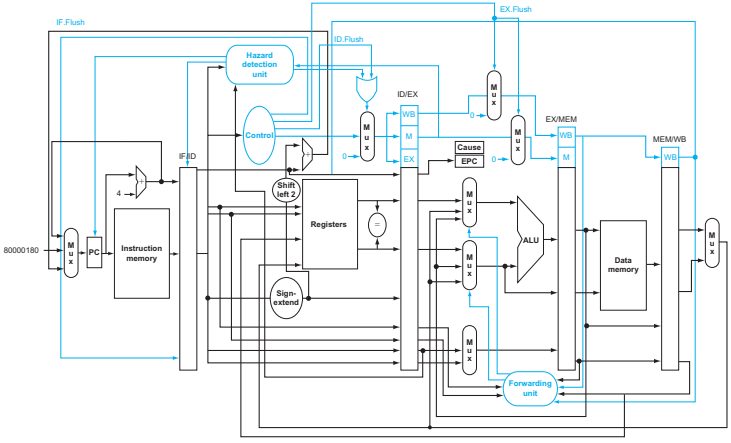
Source: D. A. Patterson und J. L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., 2012

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
- ...

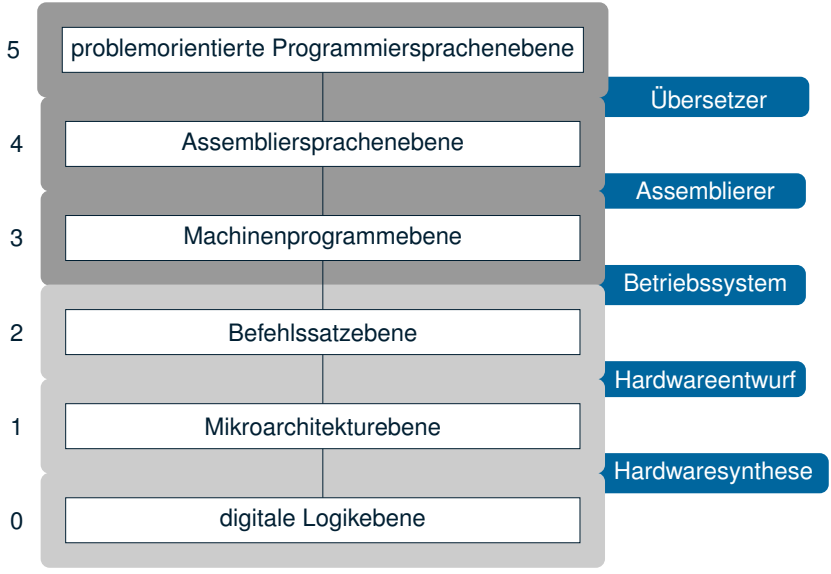
Eigenschaften von CPU-Architekturen

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

☞ All diese zusätzlichen Fehlerpunkte müssen im Fehlermodell berücksichtigt werden

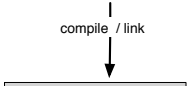
☞ Ein Ein-Bit-Fehler in einer dieser Komponenten kann zu komplexen Mehrbitfehlern auf ISA-Ebene führen

Ebenen

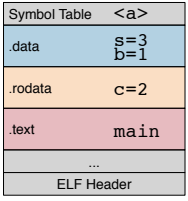

5
problemorientierte Programmiersprachenebene
Übersetzer
4
Assembliersprachenebene
Assemblierer
3
Machinenprogrammebene
Betriebssystem
2
Befehlssatzebene
Hardwareentwurf
1
Mikroarchitekturebene
Hardwaresynthese
0
digitale Logikebene

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)
}
```



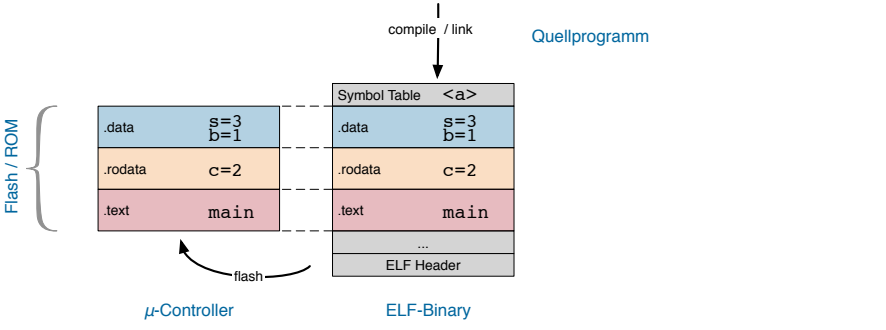
Quellprogramm



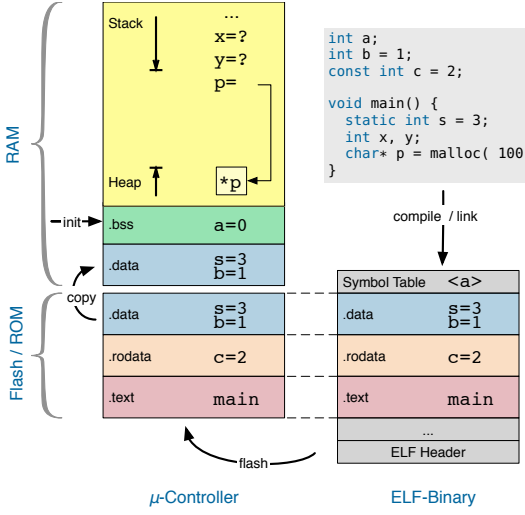
ELF-Binary

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)
}
```



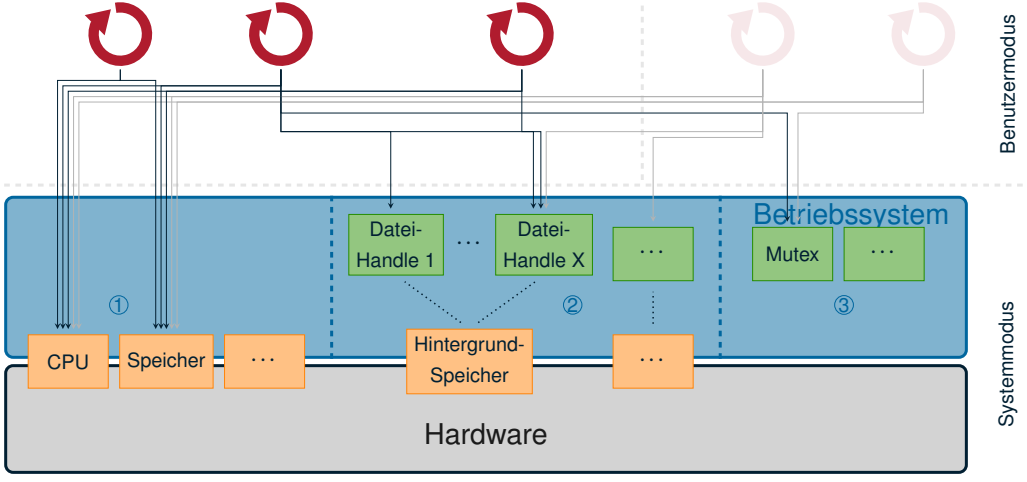
Speicherorganisation auf einem Mikrocontroller



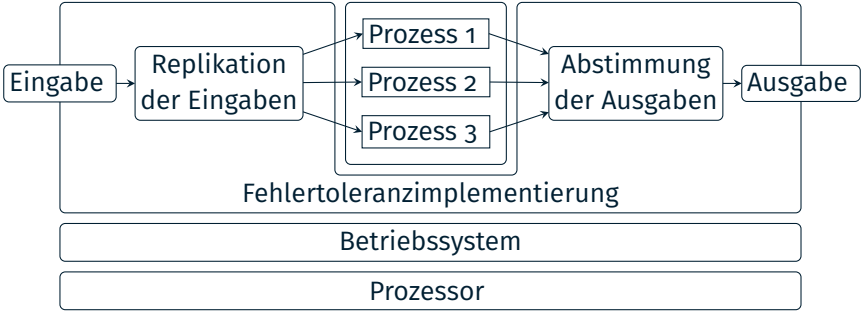

```c
int a;                          // a: global, uninitialized
int b = 1;                      // b: global, initialized
const int c = 2;                // c: global, const

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
  400502: callq  4003e0 <malloc@plt>
  400507: mov    %rax,-0x10(%rbp)
  40050b: add    $0x10,%rsp
  40050f: pop    %rbp
  400510: retq
```

Wo können Datenfehler auftreten?

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
  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)`
   - ⇝ Stack, globale Daten, Heap, (Programmcode)
2. Allgemeine CPU-Register: `%rsp`
3. Sonstige CPU-Register: `%rip`, `%rflags`

Überblick

Code-Replikation: Stringification

Stringification von CPP

```
#define CMP_FUNC(pre, repl, type, op) \
    type pre##repl(type a, type b) {  \
        return a op b ? a : b;        \
    }

CMP_FUNC(max, 1, int, >); // Funktion ?
CMP_FUNC(max, 2, int, >); // Funktion ?
...
CMP_FUNC(min, 1, int, <); // Funktion ?
```

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

  ☞ Es geht eleganter ...

Code-Replikation: Stringification

Stringification von CPP

```
#define CMP_FUNC(pre, repl, type, op) \
    type pre##repl(type a, type b) {  \
        return a op b ? a : b;        \
    }

CMP_FUNC(max, 1, int, >); // Funktion max1
CMP_FUNC(max, 2, int, >); // Funktion max2
...
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

```
template <typename T>
T max(T x, T y) {
  T value;
  if (x < y) value = y;
  else value = x;
  return value;
}
double md = max<double>(2.3, 4.2);
auto   mi = max<int>(23U, 42);
```

- Templates ermöglichen generische Programmierung
- Wiederverwendung durch **Parametrisierung**
- Unterscheidung von Funktions- & Klassen-Templates
- Expansion zur Compilezeit $\rightsquigarrow$ Quelltext muss verfügbar sein (Header)
- „Code Bloat" beim Compilieren $\rightarrow$ **nutzbar für Replikation von Code**

C++ Templates

- Explizite Typen als Templateparameter möglich
- Nutzbar zum „Zählen” von Templates

Indizierte Template-Spezialisierung

```
template <typename T, unsigned INDEX>
T max(T x, T y) {
  T value;
  if (x < y)
    value = y;
  else
    value = x;
  return value;
}
...
auto m0 = max<int, 0>(23, 42);
auto m1 = max<int, 1>(23, 42);
```

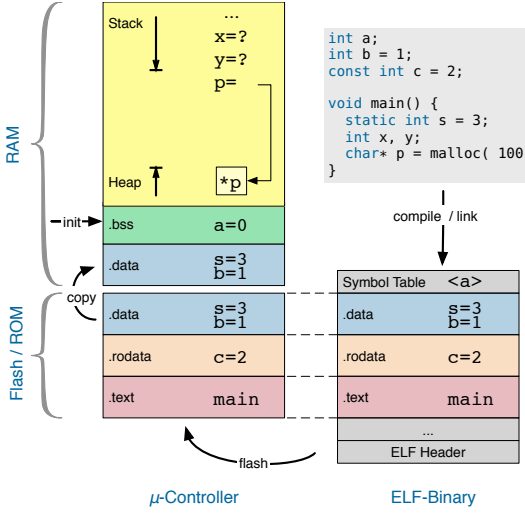
Einbinden von C++-Code in C

C Linkage

```
// C++ code
extern "C" void f(int); // one way
extern "C" {            // another way
  int g(double);
  double h();
};
void code(int i, double d)
{
  f(i);
  int ii = g(d);
  double dd = h();
  // ...
}
```

- C++ betreibt name mangling
  ⇒ `int test(int)` ↦ `_Z4testi`
- Name mangling verhindern
  ⇒ C++-Code aus C-Code aufrufbar

Speicherorganisation und Sektionsgrößen




```c
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

```
$ size --format=berkeley a.out
text data bss  dec hex filename
2592    8   4 2604 a2c     a.out
```

Sektionsgrößen in Byte,
„`text`“ umfasst hier: `.text` + `.rodata`

Umgang mit Assembly-Code I

nm: Ausgabe der Symboltabelle

```
0000000000004028 D var_initialized
...
0000000000201028 B __bss_start
0000000000201028 b var_uninitialized
...
000000000000061a T main
0000000000000580 t register_tm_clones
0000000000000510 T _start
...
000000000000066d t int max<int,0u>(int,int)
000000000000067c t int max<int,1u>(int,int)
```

- Nützliche Optionen
  - `-C, --demangle`: Dekodieren der C++-Namensmangelung:

    `_Z3maxIiLj0EET_S0_S0_` ⇒ `int max<int, 0u>(int, int)`
  - `-S, --print-size`: Ausgabe der Symbolgrößen

    `000000000000061 a 00000028 T main`

Umgang mit Assembly-Code II

`objdump`: Ausgabe von Informationen über Objektdateien

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

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

Fragen...