Verlässliche Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Phillip Raffeck, Florian Schmaus, Simon Schuster

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

Sommersemester 2019

Überblick

Überblick

Umgang mit Ganzzahlfehlern

- C bietet viele subtile Fehlermöglichkeiten
- Im C-Quiz haben wir einige kennengelernt
- Was uns noch fehlt:
  - *Wie verhält man sich als Programmierer richtig?*

  ⇝ Heute ein paar Beispiele

Addition

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
2   return a + b;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <limits.h>
2 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
3   if (UINT_MAX - a < b) { raise("wraparound"); }
4   return a + b;
5 }
```

Nachbedingungstest

```
1 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
2   unsigned int ret = a + b;
3   if (ret < a) { raise("wraparound"); }
4   return ret;
5 }
```

Subtraktion

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
2   return a - b;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
2   if (a < b) { raise("wraparound"); }
3   return a - b;
4 }
```

Nachbedingungstest

```
1 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
2   unsigned int ret = a - b;
3   if (ret > a) { raise("wraparound"); }
4   return ret;
5 }
```

Multiplikation

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
2   return a * b;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <limits.h>
2 unsigned int func(unsigned int a, unsigned int b) {
3   if (a == 0 or b == 0) { return 0; }
4   if (UINT_MAX / a < b) { raise("wraparound"); }
5   return a * b;
6 }
```

Explizite Typumwandlung

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 unsigned int func(signed int a) {
2   return (unsigned int) a; /* keine Compilerwarnung wg. Cast */
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 unsigned int func(signed int a) {
2   if (a < 0) { raise("wraparound"); }
3   return (unsigned int) a;
4 }
```

Explizite Typumwandlung

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 unsigned char func(unsigned long int a) {
2   return (unsigned char) a; /* keine Compilerwarnung wg. Cast */
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 unsigned char func(unsigned long int a) {
2   if (a > UCHAR_MAX) { raise("overflow"); }
3   return (unsigned char) a; /* keine Compilerwarnung wg. Cast */
4 }
```

Explizite Typumwandlung

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed char func(unsigned long int a) {
2   return (signed char) a; /* keine Compilerwarnung wg. Cast */
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <limits.h>
2 signed char func(unsigned long int a) {
3   if (a > SCHAR_MAX) { raise("overflow"); }
4   return (signed char) a;
5 }
```

Explizite Typumwandlung

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed char func(signed long int a) {
2   return (signed char) a; /* keine Compilerwarnung wg. Cast */
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <iso646.h>
2 #include <limits.h>
3 signed char func(signed long int a) {
4   if (a < SCHAR_MIN or SCHAR_MAX < a) { raise("overflow"); }
5   return (signed char) a; /* keine Compilerwarnung wg. Cast */
6 }
```

Addition

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed int func(signed int a, signed int b) {
2   return a + b;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <iso646.h>
2 #include <limits.h>
3 signed int func(signed int a, signed int b) {
4   if ((b > 0 and a > INT_MAX - b)
5    or (b < 0 and a < (INT_MIN - b))) { raise("overflow"); }
6   return a + b;
7 }
```

Subtraktion

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed int func(signed int a, signed int b) {
2   return a - b;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <iso646.h>
2 #include <limits.h>
3 signed int func(signed int a, signed int b) {
4   if ((b > 0 and a < INT_MIN + b)
5    or (b < 0 and a > INT_MAX + b)) { raise("overflow"); }
6   return a - b;
7 }
```

Division

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed long func(signed long a, signed long b) {
2   return a / b;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <iso646.h>
2 #include <limits.h>
3 signed long func(signed long a, signed long b) {
4   if (b == 0) { raise("division by 0"); }
5   return a / b;
6 }
```

Division

- Reicht das schon?

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed long func(signed long a, signed long b) {
2   if (b == 0) { raise("division by 0"); }
3   return a / b;
4 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <iso646.h>
2 #include <limits.h>
3 signed long func(signed long a, signed long b) {
4   if (b == 0) { raise("division by zero"); }
5   if (a == LONG_MIN and b == -1) { raise("overflow"); }
6   return a / b;
7 }
```

Modulo

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed long func(signed long a, signed long b) {
2   return a % b;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <iso646.h>
2 #include <limits.h>
3 signed long func(signed long a, signed long b) {
4   if (b == 0) { raise("division by zero"); }
5   if (a == LONG_MIN and b == -1) { raise("overflow"); }
6   return a % b;
7 }
```

Negation

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed long func(signed long a) {
2   return -a;
3 }
```

Vorbedingungstest

```
1 #include <limits.h>
2 signed long func(signed long a) {
3   if (a == LONG_MIN) { raise("overflow"); }
4   return -a;
5 }
```

Multiplikation

Was soll da schon schiefgehen...

```
1 signed int func(signed int a, signed int b) {
2   return a * b;
3 }
```

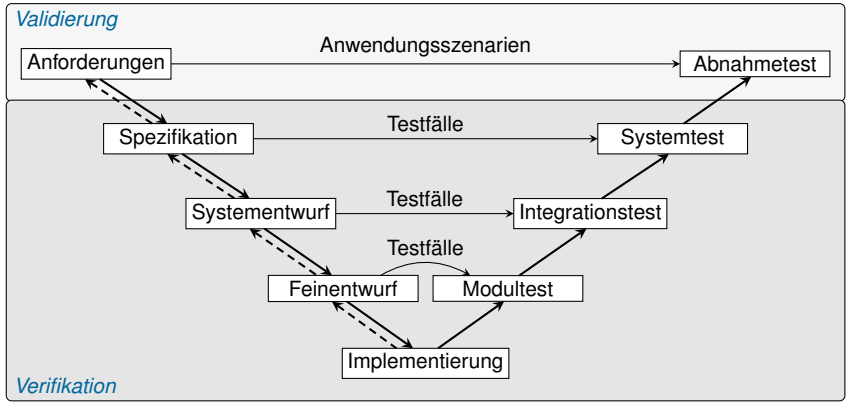
Vorbedingungstest

```
1  #include <iso646.h>
2  #include <limits.h>
3  signed int func(signed int a, signed int b) {
4    if (a == 0 or b == 0) { return 0; }
5    if (a > 0 and b > 0 and a > INT_MAX / b) { raise("overflow"); }
6    if (a > 0 and b < 0 and b < INT_MIN / a) { raise("overflow"); }
7    if (a < 0 and b > 0 and a < INT_MIN / b) { raise("overflow"); }
8    if (a < 0 and b < 0 and b < INT_MAX / a) { raise("overflow"); }
9    return a * b;
10 }
```

Überblick

Einordnung in den Entwicklungsprozess

Softwareentwicklung nach dem V-Modell wird zugrunde gelegt



Testen

- Erste Grundregeln:
  - Testbarkeit von vornherein einplanen
    - ⇝ Feingranulare Testfälle
    - ⇝ *Ein Testfall für jede einzelne Funktion!*
  - Teste Datentypen an ihren Wertebereichsgrenzen
    - → `INT16_MAX, INT16_MIN, ...`
  - *Minimale Testabdeckung*: erreichbarer Code/Zeilenüberdeckung
- Hilfsmittel:
  - Automatisierte Testinfrastruktur
  - Code-Coverage-Analysewerkzeug

Vorsicht!

- Testfälle können nur die Anwesenheit von Fehlern zeigen
- Nicht deren Abwesenheit! (→ vgl. formale Verifikation)

⇝ Alle *Randfälle* erkennen und abdecken

Testfallintegration mit CMake

- Integration von Tests im Softwareprojekt
- Automatisierte Ausführung und Auswertung von Testläufen
- Konfigurationsdatei: `tests/CMakeLists.txt`
  - Ausführbares Target:
    `add_executable(plus_test plus_test.c)`
  - Hinzubinden der zu testenden Bibliothek:
    `target_link_libraries(plus_test mathe)`
  - Bekanntmachen als Testfall:
    `add_test(MatheTest_PLUS plus_test)`
- Ausführung der Tests: `make && make test`
- Automatische Testauswertung:
  - Anhand Rückgabewert (0 → OK, -1 → Fehler)
  - Notfalls auch Parsen von Ausgaben
- Ausgaben der Tests (`(f)printf`) protokolliert in Datei `Testing/Temporary/LastTest.log`

Testfallintegration mit CMake

In EZS im Speziellen

- Tests sind Programme im Unterverzeichnis `tests`

```
tests
|-- CMakeLists.txt
|-- priority_queue_test1.c
|-- priority_queue_test1.c
`-- priority_queue_test_malloc.c
```

- Die Datei `tests/CMakeLists.txt` definiert drei Gruppen von Testfällen:

```
############## CONFIGURATION SECTION, add your testcases below
# Generelle Testfälle, sowohl für die eigene wie auch die Fremde
    Implementierung
set(EZS_PQ_GENERAL_TESTS priority_queue_test1
                         priority_queue_test2)

# Mit dem Address-sanetizer inkompatible Tests
set(EZS_PQ_MALLOC_TESTS priority_queue_test_malloc)

# Testfälle ausschließlich für die eigene Implementirung
set(EZS_PQ_OWN_ONLY_TESTS "")
```

- Aktivieren eigener Tests: Eintrag in die entsprechende Liste

Peer-Review und Quality-Assurance

1. ✉ Betreff: “Euer QA-Team wartet”
2. `make doxy`: Dokumentation lesen und implementieren
3. `make pack-review`
4. ✉ `./build/review.tar.xz`: “Unsere Lösung” (Fester Termin!)
5. Entpacken nach `./review/libpriority_queue_alien.a`

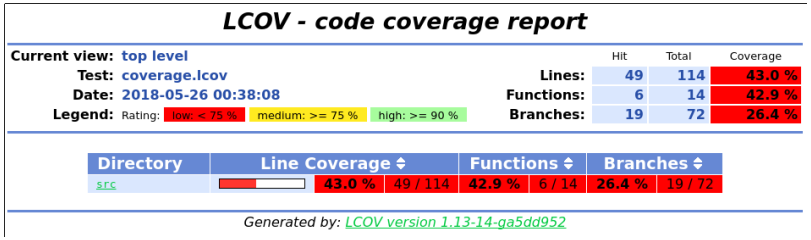
To: i4ezsmux+projectX-dev@i4.cs.fau.de
Subject: Mögliche Fehler

Hallo liebes Dev-Team,

bei uns schlagen die folgenden Tests mit euerer Implementierung fehl:
- unordered_insert:
  Der Test fügt in inverser Reihenfolge ein und prüft den folgenden Satz der Spezifikation “...”
  Ausgabe: ...
- ...

Sagt Bescheid, wenn ihr mehr Infos benötigt.

Codeüberdeckung: gcov/lcov



LCOV - code coverage report

			Hit	Total	Coverage
Current view:	top level	Lines:	49	114	43.0 %
Test:	coverage.lcov	Functions:	6	14	42.9 %
Date:	2018-05-26 00:38:08	Branches:	19	72	26.4 %
Legend:	Rating: low: < 75 % medium: >= 75 % high: >= 90 %				

Directory	Line Coverage		Functions		Branches	
src	43.0 %	49 / 114	42.9 %	6 / 14	26.4 %	19 / 72

Generated by: LCOV version 1.13-14-ga5dd952

- Werkzeug aus der gcc-Toolchain
- Instrumentierung des Binärcodes ⇝ *Laufzeitkosten*
- Protokollieren der Programmausführung
  - Wie oft wird jede Codezeile ausgeführt?
  - Welche Zeilen werden überhaupt ausgeführt?
  - Welche Verzweigungen wurden genommen?
- HTML Ausgabe: lcov

→ Tests solange erweitern, bis *vollständige Verzweigungsüberdeckung* erreicht!

Aufdecken von Laufzeitfehlern – AddressSanitizer

- *„Im besten Fall kracht es bei Speicherzugriffsfehlern!"*
- In Übungen: Verwendung von Clang AddressSanitizer [1][1]
- Checks zur Laufzeit
  - falsche Verwendung von Zeigern
  - nicht-definierte Integer-Operationen
  - Lesen uninitialisierten Speichers
  - Integer-Überlauf
  - ...

Entdeckt Fehler . . .

. . . nur, wenn die verwendeten Testfälle diese auslösen.

☞ **zur Laufzeit**

- Laufzeitkosten: ≈ 2 x

[1] `http://clang.llvm.org/docs/AddressSanitizer.html`

Clang AddressSanitizer – Verwendung

```
1 // program.cpp
2 int main(int argc, char **argv) {
3   int *array = new int[100];
4   delete[] array;
5   return array[argc];  // BOOM
6 }
```

```
$ clang++ -O1 -g -fsanitize=address program.cpp
$ ./a.out
ERROR: AddressSanitizer: heap-use-after-free on address 0x602e0001fc64 at pc ...
```

- Wird von cmake-Skripten automatisch verwendet, wenn
  - Debugging aktiviert ist
  - und clang als Compiler verwendet wird
  - siehe `cmake/sanitizer.cmake`
- Aufruf von cmake

⇝ `CC=clang CXX=clang++ cmake -DCMAKE_BUILD_TYPE=Debug ..`

Statische Programmanalyse – Clang Static Analyzer

- Analyse des Quellcodes (C, C++, Objective-C)
- Keine Ausführung des Codes auf Hardware ⇝ „statische Analyse"
- Eingabewerte als *symbolisch* angenommen

→ *symbolische Ausführung/Erreichbarkeitsanalyse*

- Verfügbare Checks[2]
  - Wertebereichsanalysen: Division mit Null
  - Verwendung uninitialisierter Variablen
  - ...
- Analyse ist *nicht fehlerfrei* (engl. sound)
  - Nicht möglich alle Fehler zu finden (engl. false negatives)
- Analyse ist *nicht präzise* (engl. precise)
  - Falsche positive Befunde sind möglich (engl. false positives)

[2] `http://clang-analyzer.llvm.org/available_checks.html`

Clang Static Analyzer – Verwendung

```
1  void test() {
2    int i, a[10];
       1 'i' declared without an initial value →
3    int x = a[i]; // warn: array subscript is undefined
       2 ← Array subscript is undefined
4  }
```

- Einzelne Datei überprüfen: `scan-build clang -c program.c`
- Übung: Aufruf von `scan-build` mit `cmake` als Argument

  ⇝ `CC=clang CXX=clang++ scan-build cmake ..`

  ⇝ `scan-build make`
- Fehler/Warnungen gefunden → Ausgabe von HTML Dateien
- Aufruf von `scan-view` wie in Ausgabe beschrieben

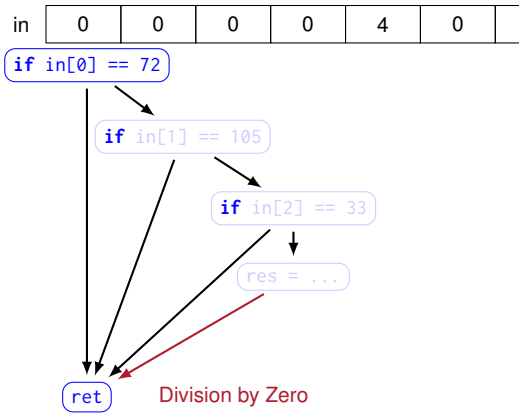
Überdeckungsgesteuertes Wuscheln (engl. *Fuzzing*)

- Raten möglicher Eingaben
- Strukturiertes Vorgehen: möglichst alle Blöcke gleichmäßig abdecken

  ⇝ Aus Modifikation von Eingaben die zum Vorgänger führten

  ⇝ *Mutation*: Zufällige Veränderung
  Crossover: Kombination existierender Eingaben
- Beispiel:

```
if (size < 4) return 0;
if(in[0] == 72)
  if(in[1] == 105)
    if(in[2] == 33)
      res = 42 / in[3];
return res;
```



Verzeichnisstruktur

- Quellverzeichnis

```
% tree ~/source
~/source
|-- CMakeLists.txt
|-- include
|   `-- mathe.h
|-- src
|   |-- CMakeLists.txt
|   |-- abs.c
|   `-- plusminus.c
`-- tests
    |-- CMakeLists.txt
    |-- abs_test.c
    `-- plus_test.c
```

- Binärverzeichnis

```
% cd ~/binary
% cmake ../
-- The C compiler identification is GNU
-- The CXX compiler identification is GNU
-- Checking whether C compiler has -isysroot
...
-- Configuring done
-- Generating done
-- Build files have been written to: ~/build
% make
[ 20%] Building C object src/CMakeFiles/mathe.dir/plusminus.c.o
[ 40%] Building C object src/CMakeFiles/mathe.dir/abs.c.o
Linking C static library libmathe.a
[ 60%] Built target mathe
Scanning dependencies of target abs_test
[ 80%] Building C object tests/CMakeFiles/abs_test.dir/abs_test.c.o
Linking C executable abs_test
[ 80%] Built target abs_test
Scanning dependencies of target plus_test
[100%] Building C object tests/CMakeFiles/plus_test.dir/plus_test.c.o
Linking C executable plus_test
[100%] Built target plus_test
% make test
Running tests...
Test project ~/build
    Start 1: MatheTest_PLUS
1/2 Test #1: MatheTest_PLUS .......   Passed    0.00 sec
    Start 2: MatheTest_ABS
2/2 Test #2: MatheTest_ABS  ........***Failed    0.00 sec

50% tests passed, 1 tests failed out of 2

Total Test time (real) =   0.02 sec

The following tests FAILED:
     2 - MatheTest_ABS (Failed)
Errors while running CTest
```


Überblick

Aufgabe 5 – Testen

- Verwendung von GNU/Linux (kein eCos mehr)
- Ziele
  1. Testfokusierter Softwareentwurf
  2. Testfallentwurf
     - Vollständige Pfadüberdeckung
     - Abdecken aller Randfälle
  3. Implementierung von Software und Testfällen
     - Getrennte Implementierung von Software und Testfällen
     - Möglichst durch verschiedene Übungsteilnehmer
     - ⇝ Peer-Review
- Implementiert werden soll eine *Prioritätswarteschlange*
- Einfügen, Entfernen, *Iterieren*

⇝ `for (... x = ...; x = ...; ++x) ...`!

- Implementierung?

Iterator – 1. Versuch

- *Datenstruktur als Array* im Header vereinbaren
- Zugriff durch Zeigerarithmetik

```
1 typedef struct Element { ... } Element;
2 Element elements[ELEMENTS_SIZE];
3 ...
4   for (size_t i = 0; i < ELEMENTS_SIZE; ++i)
5     { use(elements[i]); }
```

- *Vorteile:*
  - Einfache Implementierung
  - Für den Compiler leicht zu optimieren
- *Nachteil:* Implementierung offen gelegt

⇝ Verpflichtung gegenüber Benutzer

Iterator – 2. Versuch

- *Iterator als Teil des Objekts*
- Header:

```
1 typedef struct Elements Elements;
2 void El_reset_iterator(Elements *self);
3 void El_next(Elements *self);
4 bool El_isAtEnd(Elements *self);
5 int64_t El_iterator_value(Elements *self);
```

- Verwendung:

```
1 El_reset_iterator(dings);
2 while(!El_isAtEnd(dings)) {
3   use(El_iterator_value(dings));
4   El_next(dings);
5 }
```

Iterator – 2. Versuch

- Implementierung:

```
1  typedef struct Element { int64_t value; } Element;
2  struct Elements {
3    Element elements[ELEMENTS_SIZE];
4    Element *it;
5  };
6  void El_reset_iterator(Elements *self)
7    { self->it = &self->elements }
8  void El_next(Elements *self)
9    { self->it = self->it + 1; }
10 bool El_isAtEnd(Elements *self)
11   { return self->it
12       == &(self->elements[ELEMENTS_SIZE]); }
13 int64_t El_iterator_value(Elements *self)
14   { return self->it->value; }
```

- *Vorteil:* Kapselung sehr gut
- *Nachteile:*
  - Für den Compiler evtl. nicht mehr optimierbar (Schleife ausrollen)
  - So nur ein Iterator gleichzeitig möglich

Iterator – 3. Versuch

- *Iterator als eigenes Objekt*
- Header:

```
typedef struct Elements Elements;
typedef struct El_Iterator El_Iterator;

El_Iterator *El_begin(Elements *self);
void El_Iterator_destroy(El_Iterator *self);
void El_Iterator_next(El_Iterator *self);
bool El_Iterator_isAtEnd(El_Iterator *self);
int64_t El_Iterator_value(El_Iterator *self);
```

- Verwendung:

```
El_Iterator *it;
for (it = El_begin(dings);
     not El_Iterator_isAtEnd(it);
     El_Iterator_next(it)) {
  use(El_Iterator_value(it))
}
El_Iterator_destroy(it);
```

Iterator – 3. Versuch

- Implementierung:

1em

```
typedef struct Element { int64_t value; } Element;
struct Elements { Element elements[ELEMENTS_SIZE]; };
struct El_Iterator {
  Element *position;
  Element *end;
};

El_Iterator *El_begin(Elements *self) {
  El_Iterator *ret = malloc(sizeof(El_Iterator));
  if (ret == NULL) { return NULL; }
  ret->position = self->elements;
  ret->end = &self->elements[ELEMENTS_SIZE];
  return ret;
}

void El_Iterator_next(El_Iterator *self)
  { self->position += 1; }
bool El_Iterator_isAtEnd(El_Iterator *self) { ... }
int64_t El_Iterator_value(El_Iterator *self) { ... }
void El_Iterator_destroy(El_Iterator *self) { ... }
```

Iterator – 3. Versuch

- *Vorteile:*
  - Vollständige Kapselung
  - Beliebig viele Iteratoren möglich
- *Nachteil:*
  - Iterator muss nach Gebrauch beseitigt werden
  - Compiler hat evtl. Probleme zu optimieren

Literatur I

Konstantin Serebryany, Derek Bruening, Alexander Potapenko, and Dmitriy Vyukov.
AddressSanitizer: A fast address sanity checker.
In *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*, pages 309–318, 2012.