

# Verlässliche Echtzeitsysteme

## Dynamisches Testen

**Peter Ulbrich**

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de>

08. Juni 2017



- ☞ Korrektheit der Software hat viele Gesichter
  - Wurde das 1) richtige 2) korrekt implementiert?
  - Alle relevanten Eigenschaften sind zu überprüfen!

- ☞ Korrektheit der Software hat viele Gesichter
    - Wurde das 1) richtige 2) korrekt implementiert?
- Alle relevanten Eigenschaften sind zu überprüfen!

## 1 Funktionale Eigenschaften (hier: Übereinstimmung mit der Spezifikation)

- Müssen **explizit implementiert** werden ↔  
`int regelschritt(int sensorwert)`
- Eine **fehlerhafte** Funktion kann nicht-funktional **korrekt** sein

- ☞ Korrektheit der Software hat viele Gesichter
  - Wurde das 1) richtige 2) korrekt implementiert?
  - Alle relevanten Eigenschaften sind zu überprüfen!

## 1 Funktionale Eigenschaften (hier: Übereinstimmung mit der Spezifikation)

- Müssen **explizit implementiert** werden →  
`int regelschritt(int sensorwert)`
- Eine **fehlerhafte** Funktion kann nicht-funktional **korrekt** sein

## 2 Nicht-funktionale Eigenschaften (z.B. Laufzeitverhalten)

- Können nur **implizit implementiert** werden
- Sind **querschneidend**  $\rightsquigarrow$  erst im konkreten Kontext bestimmt
- Eine **korrekte** Funktion kann nicht-funktional **fehlerhaft** sein
- ⚠ **Robustheit** (Kapitel 3-6) ist eine nicht-funktionale Eigenschaft

- ☞ Korrektheit der Software hat viele Gesichter
    - Wurde das 1) richtige 2) korrekt implementiert?
- Alle relevanten Eigenschaften sind zu überprüfen!

### 1 Funktionale Eigenschaften (hier: Übereinstimmung mit der Spezifikation)

- Müssen **explizit implementiert** werden →  
`int regelschritt(int sensorwert)`
- Eine **fehlerhafte** Funktion kann nicht-funktional **korrekt** sein

### 2 Nicht-funktionale Eigenschaften (z.B. Laufzeitverhalten)

- Können nur **implizit implementiert** werden
  - Sind **querschneidend** ↪ erst im konkreten Kontext bestimmt
  - Eine **korrekte** Funktion kann nicht-funktional **fehlerhaft** sein
- ⚠ **Robustheit** (Kapitel 3-6) ist eine nicht-funktionale Eigenschaft



Es kommt auf die Betrachtungsebene an!

- **Laufzeitfehler** (engl. *bugs*) stellen eine nicht-funktionale Eigenschaft dar
- Aus Sicht des **Übersetzers** (engl. *compilers*) sind dies jedoch funktionale Fehler



# Zuverlässig Software entwickeln?

---



Ziel: Aussagen zur Korrektheit von **funktionalen** und **nicht-funktionalen Eigenschaften** von Software treffen

- Fokus der Vorlesung: **Korrektheit** oder zumindest **Absenz von Defekten**
- Schrittweise Annäherung über **Qualität** und **Verhalten**



# Zuverlässig Software entwickeln?



Ziel: Aussagen zur Korrektheit von **funktionalen** und **nicht-funktionalen Eigenschaften** von Software treffen

- Fokus der Vorlesung: **Korrektheit** oder zumindest **Absenz von Defekten**
- Schrittweise Annäherung über **Qualität** und **Verhalten**

■ Hierfür existieren unterschiedliche Ansätze:

- **Informelle Methoden**
  - Inspection, Review, Walkthrough, ...
- **Analytische Methoden**
  - Metriken, Kodierrichtlinien, ...
- **Dynamisches Testen**
  - Black-Box, White-Box, Regression, Unit, ...
- **Formale Methoden**
  - Statische Code-Analyse, Model Checking, ...



# Zuverlässig Software entwickeln?



Ziel: Aussagen zur Korrektheit von **funktionalen** und **nicht-funktionalen Eigenschaften** von Software treffen

- Fokus der Vorlesung: **Korrektheit** oder zumindest **Absenz von Defekten**
- Schrittweise Annäherung über **Qualität** und **Verhalten**

■ Hierfür existieren unterschiedliche Ansätze:

- **Informelle Methoden**
  - Inspection, Review, Walkthrough, ...
- **Analytische Methoden**
  - Metriken, Kodierrichtlinien, ...
- **Dynamisches Testen**
  - Black-Box, White-Box, Regression, Unit, ...
- **Formale Methoden**
  - Statische Code-Analyse, Model Checking, ...

} Aussagen über die **Qualität**



# Zuverlässig Software entwickeln?



Ziel: Aussagen zur Korrektheit von **funktionalen** und **nicht-funktionalen Eigenschaften** von Software treffen

- Fokus der Vorlesung: **Korrektheit** oder zumindest **Absenz von Defekten**
- Schrittweise Annäherung über **Qualität** und **Verhalten**

■ Hierfür existieren unterschiedliche Ansätze:

- **Informelle Methoden**

- Inspection, Review, Walkthrough, ...

- **Analytische Methoden**

- Metriken, Kodierrichtlinien, ...

- **Dynamisches Testen**

- Black-Box, White-Box, Regression, Unit, ...

- **Formale Methoden**

- Statische Code-Analyse, Model Checking, ...

} Aussagen über die **Qualität**

} Aussagen über das **Verhalten**



# Zuverlässig Software entwickeln?



Ziel: Aussagen zur Korrektheit von **funktionalen** und **nicht-funktionalen Eigenschaften** von Software treffen

- Fokus der Vorlesung: **Korrektheit** oder zumindest **Absenz von Defekten**
- Schrittweise Annäherung über **Qualität** und **Verhalten**

■ Hierfür existieren unterschiedliche Ansätze:

- **Informelle Methoden**

- Inspection, Review, Walkthrough, ...

- **Analytische Methoden**

- Metriken, Kodierrichtlinien, ...

- **Dynamisches Testen**

- Black-Box, White-Box, Regression, Unit, ...

- **Formale Methoden**

- Statische Code-Analyse, Model Checking, ...

} Aussagen über die **Qualität**

} Aussagen über das **Verhalten**



In dieser Vorlesung steht das **Testen des Verhaltens** im Vordergrund

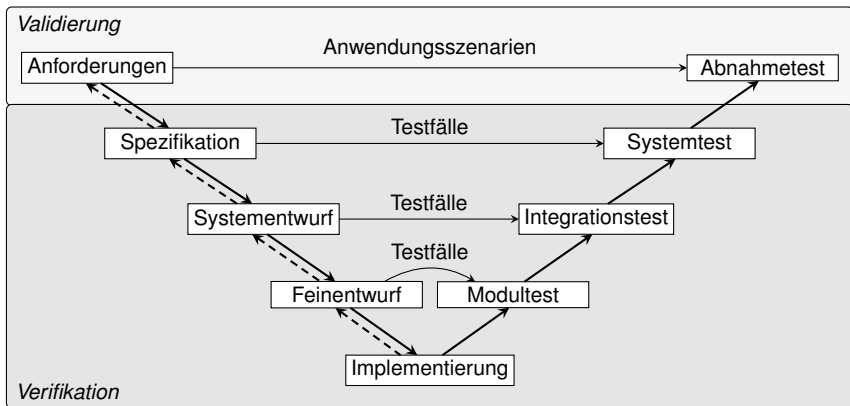


- 1 Testarten und Konzepte**
  - Entwicklungsprozess
  - Modultests
  - Black-Box- vs. White-Box-Tests
- 2 Bewertung von Testfällen
  - McCabe's Cyclomatic Complexity
  - Testüberdeckung
  - Grenzen dynamischen Testens
- 3 Durchführung und Testumgebung
  - Problemfeld
  - Reproduzierbarkeit
  - Beobachtbarkeit
  - Kontrollierbarkeit
- 4 Zusammenfassung



# Einordnung in den Entwicklungsprozess

Softwareentwicklung nach dem V-Modell wird zugrunde gelegt



- Weit verbreitetes Vorgehensmodell in der Softwareentwicklung
  - **Absteigender Ast**  $\rightsquigarrow$  Spezifikation, Entwurf, Implementierung
  - **Aufsteigender Ast**  $\rightsquigarrow$  Verifikation & Validierung
  - **Querbeziehungen**  $\rightsquigarrow$  Testfalleableitung



## Modultest (engl. *unit testing*)

- Diskrepanz zwischen Implementierung und Entwurf/Spezifikation

## Integrationstest (engl. *integration testing*)

- Probleme beim Zusammenspiel mehrere Module

## Systemtest (engl. *system testing*)

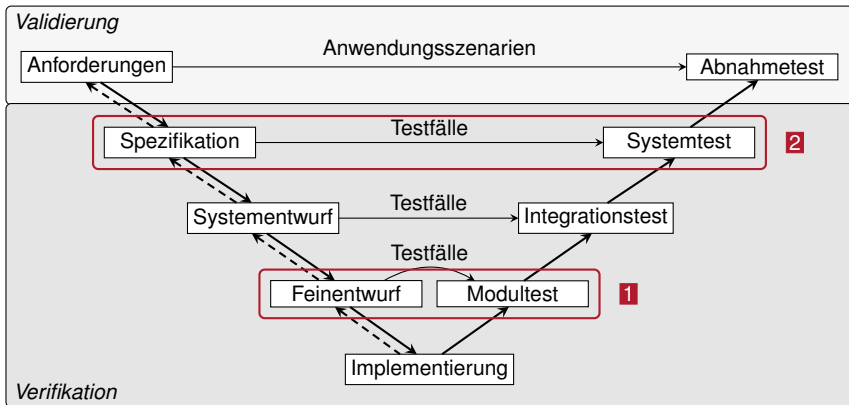
- Black-Box-Test auf Systemebene
- Vergleich: geforderte Leistung ↔ tatsächliche Leistung
  - Funktional: sind alle Merkmale verfügbar
  - Nicht-funktional: wird z.B. ein bestimmter Durchsatz erreicht

## Abnahmetest (engl. *acceptance testing*)

- Erfüllt das Produkt die Anforderungen des Auftraggebers
- Korrektheit, Robustheit, Performanz, Dokumentation, . . .
- Wird durch Anwendungsszenarien demonstriert/überprüft
  - Hier findet also eine Validierung statt, keine Verifikation



# Fokus der heutigen Vorlesung



**1** Modultests  $\leadsto$  Grundbegriffe und Problemstellung

$\rightarrow$  Black- vs. White-Box, Testüberdeckung

**2** Systemtest  $\leadsto$  Testen verteilter Echtzeitsysteme

$\rightarrow$  Problemstellung und Herausforderungen



- Modultests beziehen sich auf **kleine Softwareeinheiten**
  - Meist auf Ebene einzelner Funktionen
    - Die **Testbarkeit** ist zu gewährleisten  $\leadsto$  Begrenzung der notwendigen Testfälle



- Modultests beziehen sich auf **kleine Softwareeinheiten**
  - Meist auf Ebene einzelner Funktionen
    - Die **Testbarkeit** ist zu gewährleisten  $\leadsto$  Begrenzung der notwendigen Testfälle
- Modultests erfolgen in **Isolation**
  - Für den (Miss-)Erfolg ist **nur** das getestete Modul verantwortlich
  - Andere Module werden durch **Attrappen** (engl. *mock-objects*) ersetzt



# Eigenschaften von Modultests

- Modultests beziehen sich auf **kleine Softwareeinheiten**
  - Meist auf Ebene einzelner Funktionen
    - Die **Testbarkeit** ist zu gewährleisten  $\leadsto$  Begrenzung der notwendigen Testfälle
- Modultests erfolgen in **Isolation**
  - Für den (Miss-)Erfolg ist **nur** das getestete Modul verantwortlich
  - Andere Module werden durch **Attrappen** (engl. *mock-objects*) ersetzt
- Modultests werden **fortlaufend** durchgeführt
  - Jede Änderung am Quelltext sollte auf ihre Verträglichkeit geprüft werden
  - **Regressionstests** (engl. *regression testing*)  $\leadsto$  Automatisierung notwendig



- Modultests beziehen sich auf **kleine Softwareeinheiten**
  - Meist auf Ebene einzelner Funktionen
    - Die **Testbarkeit** ist zu gewährleisten  $\leadsto$  Begrenzung der notwendigen Testfälle
- Modultests erfolgen in **Isolation**
  - Für den (Miss-)Erfolg ist **nur** das getestete Modul verantwortlich
  - Andere Module werden durch **Attrappen** (engl. *mock-objects*) ersetzt
- Modultests werden **fortlaufend** durchgeführt
  - Jede Änderung am Quelltext sollte auf ihre Verträglichkeit geprüft werden
  - **Regressionstests** (engl. *regression testing*)  $\leadsto$  Automatisierung notwendig
- Modultests sollten auch den **Fehlerfall** prüfen
  - Es genügt nicht, zu prüfen, dass ein korrektes Ergebnis berechnet wurde
  - Der Fehlerfall (Eingaben, Zustand, ...) soll einbezogen werden




# Eigenschaften von Modultests

- Modultests beziehen sich auf **kleine Softwareeinheiten**
  - Meist auf Ebene einzelner Funktionen
    - Die **Testbarkeit** ist zu gewährleisten  $\leadsto$  Begrenzung der notwendigen Testfälle
- Modultests erfolgen in **Isolation**
  - Für den (Miss-)Erfolg ist **nur** das getestete Modul verantwortlich
  - Andere Module werden durch **Attrappen** (engl. *mock-objects*) ersetzt
- Modultests werden **fortlaufend** durchgeführt
  - Jede Änderung am Quelltext sollte auf ihre Verträglichkeit geprüft werden
  - **Regressionstests** (engl. *regression testing*)  $\leadsto$  Automatisierung notwendig
- Modultests sollten auch den **Fehlerfall** prüfen
  - Es genügt nicht, zu prüfen, dass ein korrektes Ergebnis berechnet wurde
  - Der Fehlerfall (Eingaben, Zustand, ...) soll einbezogen werden
- Modultest betrachten die **Schnittstelle**
  - Anwendung des **Design-By-Contract**-Prinzips  $\leadsto$  **Black-Box-Tests**
  - Interne Details ( $\leadsto$  **White-Box-Tests**) führen zu fragilen Testfällen



## ■ Black-Box-Tests

- Keine Kenntnis der internen Struktur
- Testfälle basieren ausschließlich auf der Spezifikation
- Synonyme: funktionale, datengetriebene, E/A-getriebene Tests

 **Frage:** Wurden **alle** Anforderungen (**fehlerfrei**) implementiert?



# Black-Box- vs. White-Box-Tests

## ■ Black-Box-Tests

- Keine Kenntnis der internen Struktur
- Testfälle basieren ausschließlich auf der Spezifikation
- Synonyme: funktionale, datengetriebene, E/A-getriebene Tests

👉 **Frage:** Wurden **alle** Anforderungen (**fehlerfrei**) implementiert?

## ■ White-Box-Tests

- Kenntnis der internen Struktur zwingend erforderlich
- Testfälle basieren auf Programmstruktur, Spezifikation wird ignoriert
- Synonyme: strukturelle, pfadgetriebene, logikgetriebene Tests

👉 **Frage:** Wurden **nur** Anforderungen (**fehlerfrei**) implementiert?



## ■ Black-Box-Tests

- Keine Kenntnis der internen Struktur
- Testfälle basieren ausschließlich auf der Spezifikation
- Synonyme: funktionale, datengetriebene, E/A-getriebene Tests

👉 **Frage:** Wurden **alle** Anforderungen (**fehlerfrei**) implementiert?

## ■ White-Box-Tests

- Kenntnis der internen Struktur zwingend erforderlich
- Testfälle basieren auf Programmstruktur, Spezifikation wird ignoriert
- Synonyme: strukturelle, pfadgetriebene, logikgetriebene Tests

👉 **Frage:** Wurden **nur** Anforderungen (**fehlerfrei**) implementiert?



Weiterer Verlauf der Vorlesung: Fokus auf **White-Box-Verfahren**

- Abstrakte Interpretation, Model Checking, Coverage, WP-Kalkül, ...



# Problem: Kombinatorische Explosion

Ohne Einsicht in die Programmstruktur ist Testen sehr mühsam!

- Beispiel: Modultests für OSEK OS [3]
  - Verschiedene Betriebssystemdienste
    - Fadenverwaltung, Fadensynchronisation, Nachrichtenkommunikation, ...
  - Hohe Variabilität
    - 4 Konformitätsklassen: BCC1, BCC2, BCC3, BCC4
    - 3 Varianten der Ablaufplanung: NON, MIXED, FULL
    - 2 Betriebsmodi: Betrieb (STANDARD), Entwicklung (EXTENDED)
    - 24 Varianten für jeden Testfall



# Problem: Kombinatorische Explosion

Ohne Einsicht in die Programmstruktur ist Testen sehr mühsam!

- Beispiel: Modultests für OSEK OS [3]
  - Verschiedene Betriebssystemdienste
    - Fadenverwaltung, Fadensynchronisation, Nachrichtenkommunikation, ...
  - Hohe Variabilität
    - 4 Konformitätsklassen: BCC1, BCC2, BCC3, BCC4
    - 3 Varianten der Ablaufplanung: NON, MIXED, FULL
    - 2 Betriebsmodi: Betrieb (STANDARD), Entwicklung (EXTENDED)
    - 24 Varianten für jeden Testfall
- Black-Box  $\rightsquigarrow$  kein Wissen über die interne Struktur nutzbar
  - konservative Annahme: Parameter beeinflussen sich gegenseitig
  - Alle Kombinationen sind relevant: **Kombinatorische Explosion!**



# Problem: Kombinatorische Explosion

Ohne Einsicht in die Programmstruktur ist Testen sehr mühsam!

- Beispiel: Modultests für OSEK OS [3]
  - Verschiedene Betriebssystemdienste
    - Fadenverwaltung, Fadensynchronisation, Nachrichtenkommunikation, ...
  - Hohe Variabilität
    - 4 Konformitätsklassen: BCC1, BCC2, BCC3, BCC4
    - 3 Varianten der Ablaufplanung: NON, MIXED, FULL
    - 2 Betriebsmodi: Betrieb (STANDARD), Entwicklung (EXTENDED)
    - 24 Varianten für jeden Testfall
- Black-Box  $\rightsquigarrow$  kein Wissen über die interne Struktur nutzbar
  - konservative Annahme: Parameter beeinflussen sich gegenseitig
  - Alle Kombinationen sind relevant: **Kombinatorische Explosion!**
- Kombination aus Black- und White-Box-Tests
  - Unabhängigkeit der Parameter kann evtl. sichergestellt werden
  - Reduktion der Testfälle bzw. deren Varianten



- 1 Testarten und Konzepte
  - Entwicklungsprozess
  - Modultests
  - Black-Box- vs. White-Box-Tests
- 2 **Bewertung von Testfällen**
  - McCabe's Cyclomatic Complexity
  - Testüberdeckung
  - Grenzen dynamischen Testens
- 3 Durchführung und Testumgebung
  - Problemfeld
  - Reproduzierbarkeit
  - Beobachtbarkeit
  - Kontrollierbarkeit
- 4 Zusammenfassung



### ■ Kriterium: Anzahl der Testfälle

#### ■ Basierend auf Metriken

- McCabe's Cyclomatic Complexity (MCC), Function/Feature Points, ...

#### ■ Mithilfe von Statistiken aus früheren Projekten

- Kennzahlen früherer Projekte  $\leadsto$  Anzahl zu erwartender Defekte
- Wie viele Defekte hat man bereits gefunden, wie viele sind noch im Produkt?
- Wie viele Defekte will/kann man ausliefern?
- $\rightarrow$  Übertragbarkeit?

### ■ Kriterium: Testüberdeckung

#### ■ Welcher Anteil des Systems wurde abgetestet?

- Wurden ausreichend viele Programmpfade absolviert?
- Wurden alle Variablen, die definiert wurden, auch verwendet?



# McCabe's Cyclomatic Complexity [2, Kapitel 8.1]



Maß für die Anzahl der unabhängigen Pfade durch ein Programm

→ je höher die MCC, desto höher die Komplexität

■ Berechnung basiert auf dem **Kontrollflussgraphen**

■ Knoten repräsentieren **Anweisungen**, Kanten **Pfade**

→ Komplexität  $C$ :

$$C = e - n + 2$$

–  $e \hat{=}$  Anzahl der Kanten,  $n \hat{=}$  Anzahl der Knoten

■ Beispiele:



Sequenz

$C = 1$



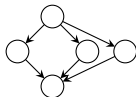
Verzweigung

$C = 2$



Do-While

$C = 2$



Fallunterscheidung

$C = 3$



**Untere Schranke** für die Anzahl der Testfälle!

■ In der Praxis gilt ein Wert im Bereich 1 - 10 als akzeptabel



$C_0 = s/S$  Anweisungsüberdeckung (engl. *statement coverage*)

- $s \rightsquigarrow$  erreichte Anweisungen,  $S \rightsquigarrow$  alle Anweisungen
- Findet nicht erreichbaren/getesteten/übersetzten Code
- **Nachteile:**
  - Gleichgewichtung aller Anweisungen
  - Keine Berücksichtigung leerer Pfade oder Datenabhängigkeiten



$C_0 = s/S$  Anweisungsüberdeckung (engl. *statement coverage*)

- $s \rightsquigarrow$  erreichte Anweisungen,  $S \rightsquigarrow$  alle Anweisungen
- Findet nicht erreichbaren/getesteten/übersetzten Code
- **Nachteile:**
  - Gleichgewichtung aller Anweisungen
  - Keine Berücksichtigung leerer Pfade oder Datenabhängigkeiten

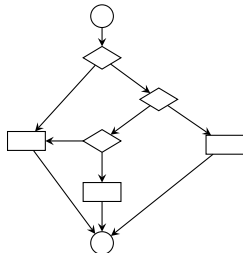
$C_1 = b/B$  Zweigüberdeckung (engl. *branch coverage*)

- $b \rightsquigarrow$  ausgeführte primitive Zweige,  $B \rightsquigarrow$  alle primitiven Zweige
  - Verzweigungen hängen u.U. voneinander ab
  - > Zweigüberdeckung und dafür benötigte Testfälle sind **nicht proportional**
  - > Primitive Zweige sind **unabhängig** von anderen Zweigen
- Findet nicht erreichbare Zweige, **Defekterkennungsrate ca. 33%**
- **Nachteile:** unzureichende Behandlung von
  - Abhängigen Verzweigungen
  - Schleifen  $\rightsquigarrow$  **Pfadüberdeckung**
  - Komplexe Verzweigungsbedingungen  $\rightsquigarrow$  **Bedingungsüberdeckung**



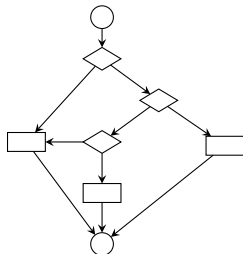
## Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
  if((a > b && a > c) || c < 0) {  
    if(a < b) return 1;  
    else {  
      if(b < c) return 2;  
    }  
  }  
  return 4;  
}
```



## Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
  if((a > b && a > c) || c < 0) {  
    if(a < b) return 1;  
    else {  
      if(b < c) return 2;  
    }  
  }  
  return 4;  
}
```



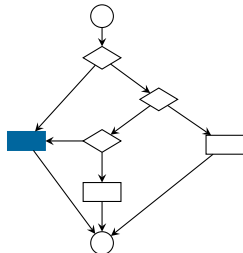
■ Anweisungsüberdeckung

■ Zweigüberdeckung



## Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
  if((a > b && a > c) || c < 0) {  
    if(a < b) return 1;  
    else {  
      if(b < c) return 2;  
    }  
  }  
  return 4;  
}
```



### ■ Anweisungsüberdeckung

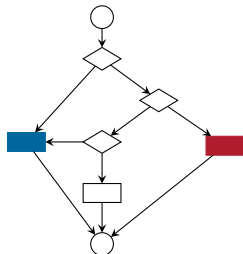
- Test 1: foo(0,0,0)

### ■ Zweigüberdeckung



# Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
    if((a > b && a > c) || c < 0) {  
        if(a < b) return 1;  
        else {  
            if(b < c) return 2;  
        }  
    }  
    return 4;  
}
```



## ■ Anweisungsüberdeckung

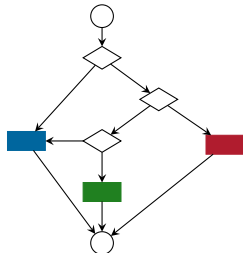
- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)

## ■ Zweigüberdeckung



# Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
    if((a > b && a > c) || c < 0) {  
        if(a < b) return 1;  
        else {  
            if(b < c) return 2;  
        }  
    }  
    return 4;  
}
```



## ■ Anweisungsüberdeckung

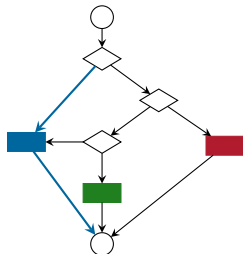
- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)

## ■ Zweigüberdeckung



# Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
  if((a > b && a > c) || c < 0) {  
    if(a < b) return 1;  
    else {  
      if(b < c) return 2;  
    }  
  }  
  return 4;  
}
```



## ■ Anweisungsüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)

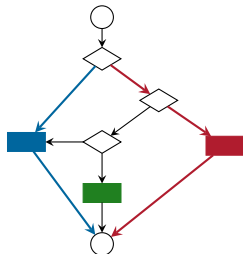
## ■ Zweigüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)



# Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
  if((a > b && a > c) || c < 0) {  
    if(a < b) return 1;  
    else {  
      if(b < c) return 2;  
    }  
  }  
  return 4;  
}
```



## ■ Anweisungsüberdeckung

- **Test 1:** foo(0,0,0)
- **Test 2:** foo(0,1,-1)
- **Test 3:** foo(2,0,1)

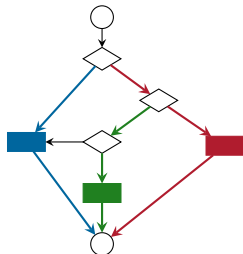
## ■ Zweigüberdeckung

- **Test 1:** foo(0,0,0)
- **Test 2:** foo(0,1,-1)



# Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
    if((a > b && a > c) || c < 0) {  
        if(a < b) return 1;  
        else {  
            if(b < c) return 2;  
        }  
    }  
    return 4;  
}
```



## ■ Anweisungsüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)

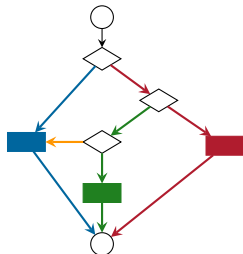
## ■ Zweigüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)



# Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
  if((a > b && a > c) || c < 0) {  
    if(a < b) return 1;  
    else {  
      if(b < c) return 2;  
    }  
  }  
  return 4;  
}
```



## ■ Anweisungsüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)

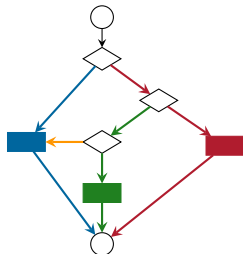
## ■ Zweigüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)
- Test 4: foo(2,1,1)



# Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
    if((a > b && a > c) || c < 0) {  
        if(a < b) return 1;  
        else {  
            if(b < c) return 2;  
        }  
    }  
    return 4;  
}
```



## ■ Anweisungsüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)

## ■ Zweigüberdeckung

- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)
- Test 4: foo(2,1,1)

■ 100% Zweigüberdeckung  $\mapsto$  100% Anweisungsüberdeckung

■ Zweigüberdeckung: Weite industrielle Verbreitung

- Moderater Aufwand, gute Defekterkennungsrate



$C_2 = p/P$  Pfadüberdeckung (engl. *path coverage*)

- Pfade vom Anfangs- bis zum Endknoten im Kontrollflussgraphen



$C_2 = p/P$  Pfadüberdeckung (engl. *path coverage*)

- Pfade vom Anfangs- bis zum Endknoten im Kontrollflussgraphen

- Abstufungen der Pfadüberdeckung

$C_{2a}$  vollständige Pfadüberdeckung

- Abdeckung **aller** möglichen Pfade
- **Problem:** durch Schleifen entstehen u. U. unendlich viele Pfade

$C_{2b}$  boundary-interior Pfadüberdeckung

- Wie  $C_{2a}$ , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf  $\leq 2$  beschränkt

$C_{2c}$  strukturierte Pfadüberdeckung

- Wie  $C_{2b}$ , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf  $\leq n$  beschränkt

- Bedeutung **Boundary-Interior**

**boundary** Jede Schleife wird 0-mal betreten

Jede Schleife wird 1-mal betreten, alle Pfade im Rumpf abgearbeitet

**interior** Beschränkung: mit 2 bzw.  $n$  Durchläufen erreichbare Pfade im Rumpf



$C_2 = p/P$  Pfadüberdeckung (engl. *path coverage*)

- Pfade vom Anfangs- bis zum Endknoten im Kontrollflussgraphen

- Abstufungen der Pfadüberdeckung

$C_{2a}$  vollständige Pfadüberdeckung

- Abdeckung **aller** möglichen Pfade
- **Problem:** durch Schleifen entstehen u. U. unendlich viele Pfade

$C_{2b}$  boundary-interior Pfadüberdeckung

- Wie  $C_{2a}$ , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf  $\leq 2$  beschränkt

$C_{2c}$  strukturierte Pfadüberdeckung

- Wie  $C_{2b}$ , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf  $\leq n$  beschränkt

- Bedeutung **Boundary-Interior**

**boundary** Jede Schleife wird 0-mal betreten

Jede Schleife wird 1-mal betreten, alle Pfade im Rumpf abgearbeitet

**interior** Beschränkung: mit 2 bzw.  $n$  Durchläufen erreichbare Pfade im Rumpf

- **Hohe Defekterkennungsrate**



$C_2 = p/P$  Pfadüberdeckung (engl. *path coverage*)

- Pfade vom Anfangs- bis zum Endknoten im Kontrollflussgraphen

- Abstufungen der Pfadüberdeckung

$C_{2a}$  vollständige Pfadüberdeckung

- Abdeckung **aller** möglichen Pfade
- **Problem:** durch Schleifen entstehen u. U. unendlich viele Pfade

$C_{2b}$  boundary-interior Pfadüberdeckung

- Wie  $C_{2a}$ , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf  $\leq 2$  beschränkt

$C_{2c}$  strukturierte Pfadüberdeckung

- Wie  $C_{2b}$ , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf  $\leq n$  beschränkt

- Bedeutung **Boundary-Interior**

**boundary** Jede Schleife wird 0-mal betreten

Jede Schleife wird 1-mal betreten, alle Pfade im Rumpf abgearbeitet

**interior** Beschränkung: mit 2 bzw.  $n$  Durchläufen erreichbare Pfade im Rumpf

- **Hohe Defekterkennungsrate**

- Bestimmte Pfade können nicht erreicht werden, **hoher Aufwand**



## $C_3$ Bedingungsüberdeckung (engl. *condition coverage*)

- $C_{0,1,2}$ : Unzureichende Betrachtung von Bedingungen
  - Ihre Zusammensetzung/Hierarchie wird nicht berücksichtigt



## $C_3$ Bedingungsüberdeckung (engl. *condition coverage*)

- $C_{0,1,2}$ : Unzureichende Betrachtung von Bedingungen
  - Ihre Zusammensetzung/Hierarchie wird nicht berücksichtigt
- Abstufungen der Bedingungsüberdeckung

### $C_3a$ Einfachbedingungsüberdeckung

- Jede atomare Bedingung wird einmal mit `true` und `false` getestet

### $C_3b$ Mehrfachbedingungsüberdeckung

- Alle Kombinationen atomarer Bedingungen werden getestet

### $C_3c$ minimale Mehrfachbedingungsüberdeckung

- Jede atomare/komplexe Bedingung wird einmal mit `true` und `false` getestet

## MC/DC (engl. *modified condition/decision coverage*)

- Sonderform der  $C_3c$ -Überdeckung
- Jede atomare Bedingung wird mit `true` und `false` getestet und ...
- Muss zusätzlich die umgebende komplexe Bedingung beeinflussen



## $C_3$ Bedingungsüberdeckung (engl. *condition coverage*)

- $C_{0,1,2}$ : Unzureichende Betrachtung von Bedingungen
  - Ihre Zusammensetzung/Hierarchie wird nicht berücksichtigt

- Abstufungen der Bedingungsüberdeckung

### $C_3a$ Einfachbedingungsüberdeckung

- Jede atomare Bedingung wird einmal mit `true` und `false` getestet

### $C_3b$ Mehrfachbedingungsüberdeckung

- Alle Kombinationen atomarer Bedingungen werden getestet

### $C_3c$ minimale Mehrfachbedingungsüberdeckung

- Jede atomare/komplexe Bedingung wird einmal mit `true` und `false` getestet

## MC/DC (engl. *modified condition/decision coverage*)

- Sonderform der  $C_3c$ -Überdeckung
- Jede atomare Bedingung wird mit `true` und `false` getestet und ...
- Muss zusätzlich die umgebende komplexe Bedingung beeinflussen

- Sehr hohe Fehlererkennungsrate



## $C_3$ Bedingungsüberdeckung (engl. *condition coverage*)

- $C_{0,1,2}$ : Unzureichende Betrachtung von Bedingungen
  - Ihre Zusammensetzung/Hierarchie wird nicht berücksichtigt

- Abstufungen der Bedingungsüberdeckung

### $C_3a$ Einfachbedingungsüberdeckung

- Jede atomare Bedingung wird einmal mit `true` und `false` getestet

### $C_3b$ Mehrfachbedingungsüberdeckung

- Alle Kombinationen atomarer Bedingungen werden getestet

### $C_3c$ minimale Mehrfachbedingungsüberdeckung

- Jede atomare/komplexe Bedingung wird einmal mit `true` und `false` getestet

### MC/DC (engl. *modified condition/decision coverage*)

- Sonderform der  $C_3c$ -Überdeckung
- Jede atomare Bedingung wird mit `true` und `false` getestet und ...
- Muss zusätzlich die umgebende komplexe Bedingung beeinflussen

- Sehr hohe Fehlererkennungsrate
- Bestimmte Pfade können nicht erreicht werden, **hoher Aufwand**



## Beispiel: Bedingungsüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
    if((a > b && a > c) || c < 0) {  
        if(a < b) return 1;  
        else {  
            if(b < c) return 2;  
        }  
    }  
    return 4;  
}
```

### ■ Fokus auf die Bedingung:

$(a > b \ \&\& \ a > c) \ || \ c < 0$

### ■ 3 atomare Teilbedingungen

- $a > b$
- $a > c$
- $c < 0$



# Beispiel: Bedingungsüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
    if((a > b && a > c) || c < 0) {  
        if(a < b) return 1;  
        else {  
            if(b < c) return 2;  
        }  
    }  
    return 4;  
}
```

## ■ Fokus auf die Bedingung:

$(a > b \ \&\& \ a > c) \ || \ c < 0$

## ■ 3 atomare Teilbedingungen

- $a > b$
- $a > c$
- $c < 0$

## ■ Einfachbedingungsüberdeckung

$a > b$	$a > c$	$c < 0$	Testfall
w	w	w	$f(1,0,-1)$
f	f	f	$f(0,1,1)$



# Beispiel: Bedingungsüberdeckung

```
int foo(int a,int b,int c) {  
    if((a > b && a > c) || c < 0) {  
        if(a < b) return 1;  
        else {  
            if(b < c) return 2;  
        }  
    }  
    return 4;  
}
```

## ■ Fokus auf die Bedingung:

$(a > b \ \&\& \ a > c) \ || \ c < 0$

## ■ 3 atomare Teilbedingungen

- $a > b$
- $a > c$
- $c < 0$

## ■ Einfachbedingungsüberdeckung

$a > b$	$a > c$	$c < 0$	Testfall
w	w	w	$f(1,0,-1)$
f	f	f	$f(0,1,1)$

## ■ Modified Condition/Decision Coverage

$a > b$	$a > c$	$c < 0$	$(a > b \ \&\& \ a > c) \    \ c < 0$	Testfall
w	w	f	w	$f(1,0,0)$
f	w	f	f	$f(1,1,0)$
w	f	f	f	$f(1,0,1)$
f	f	w	w	$f(-1,0,-1)$



# Testen hat seine Grenzen!

---



Testen ist im Allgemeinen sehr **aufwändig!**

- Ziel müssen möglichst vollständige Tests sein!
- Aber woher weiß man, dass man genügend getestet hat?



# Testen hat seine Grenzen!



Testen ist im Allgemeinen sehr **aufwändig!**

- Ziel müssen möglichst vollständige Tests sein!
- Aber woher weiß man, dass man genügend getestet hat?



Vollständige Tests sind in der Praxis **unrealistisch**

- „. . . wir haben schon lange keinen Fehler mehr gefunden . . .“
  - Eine Auffassung, der man oft begegnet
  - Der entscheidende Fehler kann sich immer noch versteckt halten
- Therac 25 (s. Folie II/3 ff.) wurde > 2700 Stunden betrieben



# Testen hat seine Grenzen!



Testen ist im Allgemeinen sehr **aufwändig!**

- Ziel müssen möglichst vollständige Tests sein!
- Aber woher weiß man, dass man genügend getestet hat?



Vollständige Tests sind in der Praxis **unrealistisch**

- „. . . wir haben schon lange keinen Fehler mehr gefunden . . .“
  - Eine Auffassung, der man oft begegnet
  - Der entscheidende Fehler kann sich immer noch versteckt halten
- Therac 25 (s. Folie II/3 ff.) wurde > 2700 Stunden betrieben

## Fehlerfreie Software durch Testen?

- Praktisch sind Tests für einen **Korrektheitsnachweis** ungeeignet!
- Testen kann nur das **Vertrauen in Software** erhöhen!



# Testen hat seine Grenzen!



Testen ist im Allgemeinen sehr **aufwändig!**

- Ziel müssen möglichst vollständige Tests sein!
- Aber woher weiß man, dass man genügend getestet hat?



Vollständige Tests sind in der Praxis **unrealistisch**

- „. . . wir haben schon lange keinen Fehler mehr gefunden . . .“
  - Eine Auffassung, der man oft begegnet
  - Der entscheidende Fehler kann sich immer noch versteckt halten
- Therac 25 (s. Folie II/3 ff.) wurde > 2700 Stunden betrieben

## Fehlerfreie Software durch Testen?

- Praktisch sind Tests für einen **Korrektheitsnachweis** ungeeignet!
- Testen kann nur das **Vertrauen in Software** erhöhen!

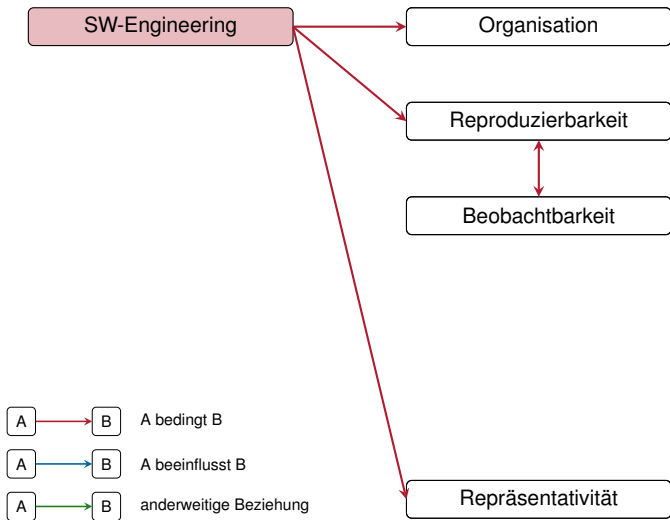
- **Formale Methoden** gehen einen anderen Weg
  - Weisen Übereinstimmung anstatt Abweichung nach
  - Gegenstand kommender Vorlesungen



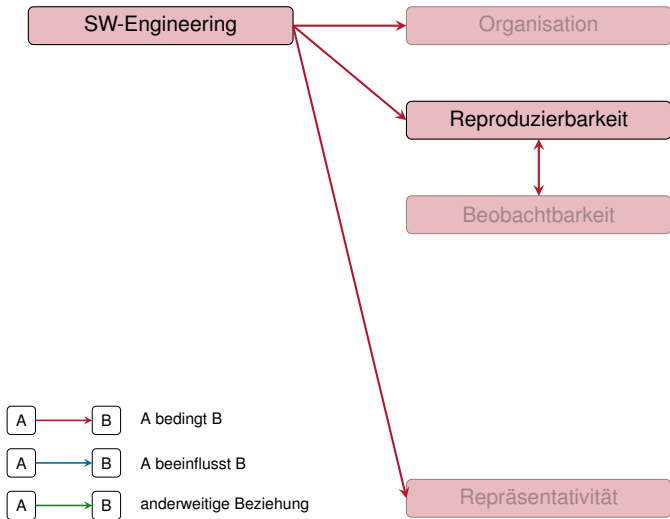
- 1 Testarten und Konzepte
  - Entwicklungsprozess
  - Modultests
  - Black-Box- vs. White-Box-Tests
- 2 Bewertung von Testfällen
  - McCabe's Cyclomatic Complexity
  - Testüberdeckung
  - Grenzen dynamischen Testens
- 3 Durchführung und Testumgebung
  - Problemfeld
  - Reproduzierbarkeit
  - Beobachtbarkeit
  - Kontrollierbarkeit
- 4 Zusammenfassung



# Testen: Ein Problem des „SW-Engineering“



# Problemfeld: Reproduzierbarkeit



Für die Fehlersuche muss man das Fehlverhalten nachstellen können!



Wichtige Testvariante: **Regressionstests** (engl. *regression testing*)

- Wurde der Fehler auch wirklich korrigiert?
- Hat die Korrektur neue Defekte verursacht?



Für die Fehlersuche muss man das Fehlverhalten nachstellen können!

- ☞ Wichtige Testvariante: **Regressionstests** (engl. *regression testing*)
  - Wurde der Fehler auch wirklich korrigiert?
  - Hat die Korrektur neue Defekte verursacht?
  
- Voraussetzung für Regressionstests  $\leadsto$  **Reproduzierbarkeit**
  - Andernfalls ist keine Aussage zur Behebung des Fehler möglich
  - Verschiedene Ursachen können dasselbe Symptom hervorrufen



Für die Fehlersuche muss man das Fehlverhalten nachstellen können!

- ☞ Wichtige Testvariante: **Regressionstests** (engl. *regression testing*)
  - Wurde der Fehler auch wirklich korrigiert?
  - Hat die Korrektur neue Defekte verursacht?
  
- Voraussetzung für Regressionstests  $\rightsquigarrow$  **Reproduzierbarkeit**
  - Andernfalls ist keine Aussage zur Behebung des Fehler möglich
  - Verschiedene Ursachen können dasselbe Symptom hervorrufen
  
- ⚠ Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit ist:
  - **Beobachtbarkeit** und die
  - **Kontrollierbarkeit** des Systems
  - Testfälle müssen sich **deterministisch** verhalten (vgl. Replikdeterminismus IV/15 ff)



# Reproduzierbarkeit $\leftrightarrow$ Beobachtbarkeit

Fehlverhalten zu reproduzieren erfordert mehr Wissen, als es zu erkennen.



## Nicht-deterministische Operationen

- Abhängigkeiten z. B. vom Netzwerkverkehr
- Zufallszahlen, interne Systemzustände (`syscall()`), ...



# Reproduzierbarkeit ↔ Beobachtbarkeit

Fehlverhalten zu reproduzieren erfordert mehr Wissen, als es zu erkennen.



## Nicht-deterministische Operationen

- Abhängigkeiten z. B. vom Netzwerkverkehr
- Zufallszahlen, interne Systemzustände (`syscall()`), ...



## Ungenügendes Vorabwissen

- Fadensynchronisation
- Asynchrone Programmunterbrechungen (engl. *interrupts*)
- Zeitbasis der untersuchten Systeme



# Reproduzierbarkeit $\leftrightarrow$ Beobachtbarkeit

Fehlverhalten zu reproduzieren erfordert mehr Wissen, als es zu erkennen.



## Nicht-deterministische Operationen

- Abhängigkeiten z. B. vom Netzwerkverkehr
- Zufallszahlen, interne Systemzustände (`syscall()`), ...



## Ungenügendes Vorabwissen

- Fadensynchronisation
- Asynchrone Programmunterbrechungen (engl. *interrupts*)
- Zeitbasis der untersuchten Systeme

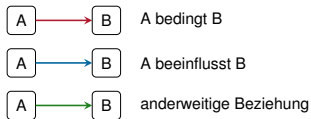
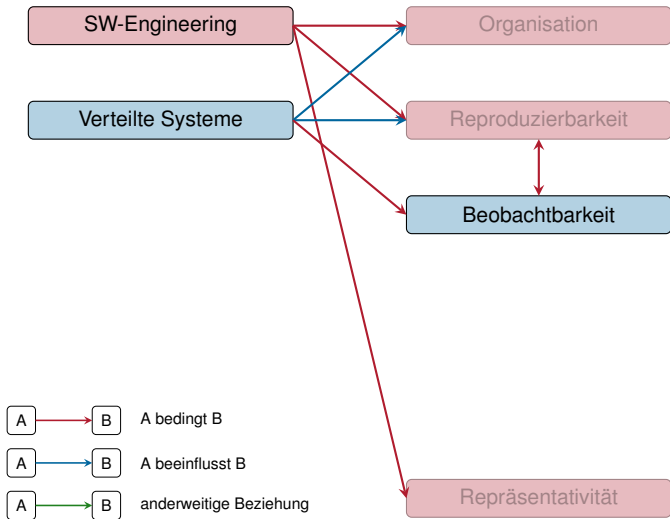


## Dies sind relevante Ereignisse

- Sie beeinflussen den Programmablauf
  - Hängen von der Anwendung ab
- Identifikation und Beobachtung erforderlich



# Problemfeld: Fokus „Verteilte Systeme“





### Beobachtung aller relevanten Zustände des Systems

- Ausgaben bzw. Ergebnisse
- Zwischenzustände und -ergebnisse

<sup>1</sup>Der Effekt/der Einflussnahme auf eine Komponente oder ein System durch die Messung. [1]



### Beobachtung aller relevanten Zustände des Systems

- Ausgaben bzw. Ergebnisse
- Zwischenzustände und -ergebnisse

### ■ **Problem: Ausgaben** beeinflussen das Systemverhalten

- Ausgaben verzögern Prozesse, Nachrichten, ...  $\rightsquigarrow$  **Termin**

<sup>1</sup>Der Effekt/der Einflussnahme auf eine Komponente oder ein System durch die Messung. [1]



### Beobachtung aller relevanten Zustände des Systems

- Ausgaben bzw. Ergebnisse
- Zwischenzustände und -ergebnisse

### ■ Problem: Ausgaben beeinflussen das Systemverhalten

- Ausgaben verzögern Prozesse, Nachrichten, ...  $\rightsquigarrow$  Termin

### ■ Problem: Debuggen $\mapsto$ Unmöglichkeit globaler Haltepunkte

- Perfekt synchronisierte Uhren existieren nicht
- $\rightarrow$  Wie soll man Prozesse gleichzeitig anhalten?

<sup>1</sup>Der Effekt/der Einflussnahme auf eine Komponente oder ein System durch die Messung. [1]



### Beobachtung aller relevanten Zustände des Systems

- Ausgaben bzw. Ergebnisse
- Zwischenzustände und -ergebnisse

### ■ Problem: Ausgaben beeinflussen das Systemverhalten

- Ausgaben verzögern Prozesse, Nachrichten, ...  $\leadsto$  Termin

### ■ Problem: Debuggen $\mapsto$ Unmöglichkeit globaler Haltepunkte

- Perfekt synchronisierte Uhren existieren nicht
- $\rightarrow$  Wie soll man Prozesse gleichzeitig anhalten?

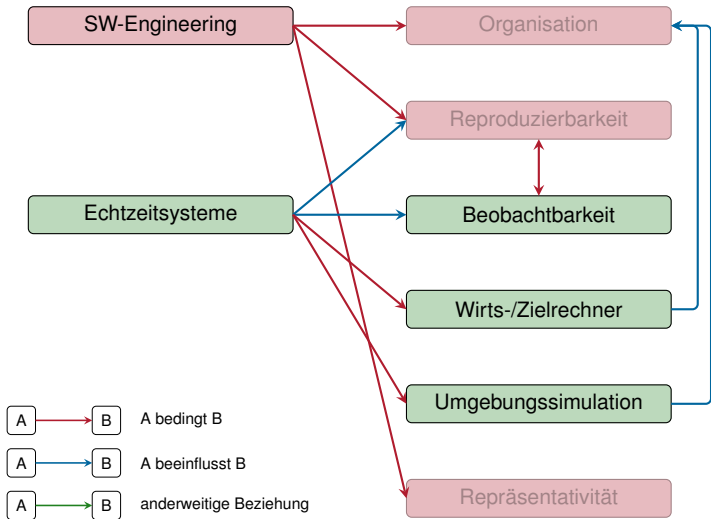
### Bekanntes Phänomen: Untersuchungseffekt (engl. *probe effect*)<sup>1</sup>

- Vergleiche Heisenbugs auf Folie III/26
- $\rightarrow$  „Vorführeffekt“ – sobald man hinsieht, ist der Fehler verschwunden
- $\rightarrow$  Muss vermieden oder kompensiert werden

---

<sup>1</sup>Der Effekt/der Einflussnahme auf eine Komponente oder ein System durch die Messung. [1]

# Problemfeld: Fokus „Echtzeitsysteme“



- Untersuchungseffekt auf **gleichzeitige Prozesse**
  - Systemzustand verteilt sich auf mehrere, gleichzeitig ablaufende Prozesse
  - Durch Beeinflussung einzelner Prozesse verändert sich der globale Zustand
  - Andere Prozesse enteilen dem beeinflussten Prozess
  - Ein Fehler lässt sich evtl. nicht reproduzieren



- Untersuchungseffekt auf **gleichzeitige Prozesse**
  - Systemzustand verteilt sich auf mehrere, gleichzeitig ablaufende Prozesse
  - Durch Beeinflussung einzelner Prozesse verändert sich der globale Zustand
  - Andere Prozesse enteilen dem beeinflussten Prozess
  - Ein Fehler lässt sich evtl. nicht reproduzieren
  
- Untersuchungseffekt auf **Zeitstempel**
  - Neben dem Datum ist häufig ein **Zeitstempel** notwendig
  - Das Erstellen des Zeitstempels selbst benötigt Zeit (Auslesen eine Uhr, ...)
  - Die zu protokollierende Datenmenge wächst ebenfalls an
  
- Untersuchungseffekt bei Kopplung an die **physikalische Zeit**
  - Das kontrollierte Objekt enteilt dem beeinflussten Prozess
  - Auch einzelne Prozesse sind anfällig



## Ignoranz

- Der **Untersuchungseffekt** wird schon nicht auftreten



## Ignoranz

- Der **Untersuchungseffekt** wird schon nicht auftreten

## Minimierung

- Hinreichend effiziente Datenaufzeichnung
- Kompensation der aufgezeichneten Daten
  - Verhindert nicht die Verfälschung des globalen Zustands



## Ignoranz

- Der **Untersuchungseffekt** wird schon nicht auftreten

## Minimierung

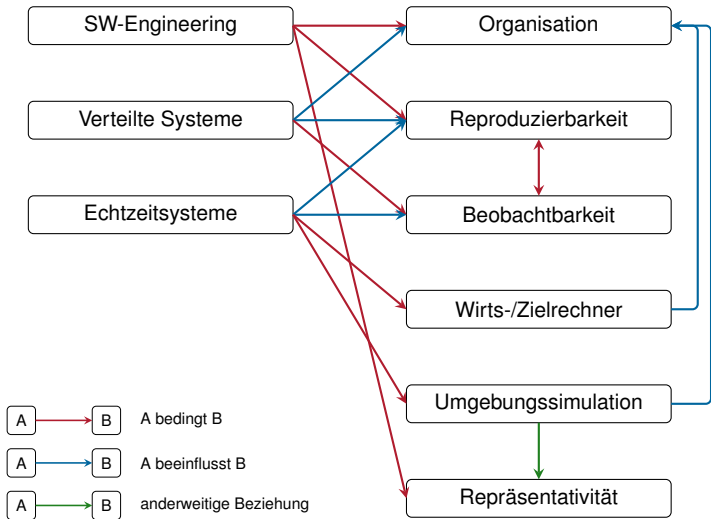
- Hinreichend effiziente Datenaufzeichnung
- Kompensation der aufgezeichneten Daten
  - Verhindert nicht die Verfälschung des globalen Zustands

## Vermeidung

- Datenaufzeichnung existiert auch im Produktivsystem
- Einsatz dedizierter Hardware für die Datenaufzeichnung
- Einflussnahme wird hinter einer logischen Uhr verborgen
  - Zeitliche Schwankungen sind nicht relevant
  - Solange sich eine gewisse Reihenfolge nicht ändert



# Kontrollierbarkeit: Ein umfassendes Problem



## Deterministische Ausführung relevanter Ereignisse

- Beibehaltung der ursprünglichen Reihenfolge
- Zeitlich akkurat
- Umfasst **alle relevanten Ereignisse**
  - Asynchrone Programmunterbrechungen
  - Interne Entscheidungen des Betriebssystems  $\leadsto$  Einplanung, Synchronisation



## Deterministische Ausführung relevanter Ereignisse

- Beibehaltung der ursprünglichen Reihenfolge
- Zeitlich akkurat
- Umfasst **alle relevanten Ereignisse**
  - Asynchrone Programmunterbrechungen
  - Interne Entscheidungen des Betriebssystems  $\leadsto$  Einplanung, Synchronisation

## ■ **Simulierte Zeit** statt **realer, physikalischer Zeitbasis**

- Entkopplung von der Geschwindigkeit der realen Welt
- Ansonsten könnte die Fehlersuche sehr, sehr lange dauern ...



## Deterministische Ausführung relevanter Ereignisse

- Beibehaltung der ursprünglichen Reihenfolge
- Zeitlich akkurat
- Umfasst **alle relevanten Ereignisse**
  - Asynchrone Programmunterbrechungen
  - Interne Entscheidungen des Betriebssystems  $\leadsto$  Einplanung, Synchronisation

## ■ Simulierte Zeit statt **realer, physikalischer Zeitbasis**

- Entkopplung von der Geschwindigkeit der realen Welt
- Ansonsten könnte die Fehlersuche sehr, sehr lange dauern ...

## ■ Ansätze zur **Kontrollierbarkeit**

- **Analytische** Ansätze
  - Record & Replay
- **Konstruktive** Ansätze
  - Statische Quelltextanalyse
  - Quelltexttransformation





Vermessung (engl. *monitoring*) zur Laufzeit

- Aufzeichnung **aller** relevanten Ereignisse
  - Dieser Mitschnitt wird später erneut abgespielt
- Event histories bzw. event traces





Vermessung (engl. *monitoring*) zur Laufzeit

- Aufzeichnung **aller** relevanten Ereignisse
- Dieser Mitschnitt wird später erneut abgespielt

→ **Event histories** bzw. **event traces**

■ **Vorteil:** Lösungen für verteilte Echtzeitsysteme existieren

- **Vermeiden** Untersuchungseffekt
- Decken eine **Vielzahl verschiedener Ereignisse** ab
  - Systemaufrufe, Kontextwechsel, asynchrone Unterbrechungen, ...
  - Synchronisation, Zugriffe auf gemeinsame Variablen, ...





Vermessung (engl. *monitoring*) zur Laufzeit

- Aufzeichnung **aller** relevanten Ereignisse
- Dieser Mitschnitt wird später erneut abgespielt

→ **Event histories** bzw. **event traces**

■ **Vorteil:** Lösungen für verteilte Echtzeitsysteme existieren

- **Vermeiden** Untersuchungseffekt
- Decken eine **Vielzahl verschiedener Ereignisse** ab
  - Systemaufrufe, Kontextwechsel, asynchrone Unterbrechungen, ...
  - Synchronisation, Zugriffe auf gemeinsame Variablen, ...



**Nachteil:** Enorm hoher Aufwand

- Häufig ist **Spezialhardware** erforderlich
- Es fallen **große Datenmengen** an
  - Aufzeichnung erfolgt i. d. R. auf Maschinenebene, Eingaben, ...
- Es können **nur beobachtete Szenarien** wiederholt werden
  - Änderungen am System machen existierende Mitschnitte u. U. wertlos
- Wiederholung & Mitschnitt müssen auf **demselben System** stattfinden



- Identifizierung möglicher Ausführungsszenarien
  - Berücksichtigung von Kommunikation, Synchronisation, Einplanung, ...

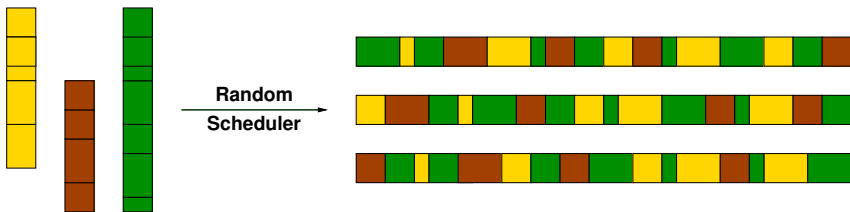


- Identifizierung möglicher Ausführungsszenarien
  - Berücksichtigung von Kommunikation, Synchronisation, Einplanung, ...
- Ausführungsszenarien werden erzwungen
  - **Random Scheduler**
    - Gleichzeitige Prozesse → sequentielles Programm
  - Teste Sequentialisierungen statt der gleichzeitigen Prozesse



# Konstruktion von Ausführungsszenarien

- Identifizierung möglicher Ausführungsszenarien
  - Berücksichtigung von Kommunikation, Synchronisation, Einplanung, ...
- Ausführungsszenarien werden erzwungen
  - **Random Scheduler**
    - Gleichzeitige Prozesse → sequentielles Programm
    - Teste Sequentialisierungen statt der gleichzeitigen Prozesse
- Vorgehen ist mit grob-granularem **Model Checking** vergleichbar



- Herausforderungen spezifisch für **Echtzeitsysteme**
  - **Starke Kopplung zur Umgebung**
    - Echtzeitsysteme interagieren vielfältig mit dem kontrollierten Objekt
  - **Voranschreiten der realen Zeit** nicht vernachlässigbar
    - Physikalische Vorgänge im kontrollierten Objekt sind an die Zeit gekoppelt
  - **Umgebung kann nicht beliebig beeinflusst werden**
    - Kontrollbereich der Aktuatoren ist beschränkt
  
- Herausforderungen spezifisch für **verteilte Systeme**
  - **Hohe Komplexität**
    - Verteilung erhöht Komplexität  $\rightsquigarrow$  Allokation, Kommunikation, ...
  - **Beobachtung und Reproduzierbarkeit** des Systemverhaltens
  - **Fehlende globale Zeit**  $\rightsquigarrow$  kein eindeutiger globaler Zustand
    - Globale, konsistente Abbilder sind ein großes Problem



- 1 Testarten und Konzepte
  - Entwicklungsprozess
  - Modultests
  - Black-Box- vs. White-Box-Tests
- 2 Bewertung von Testfällen
  - McCabe's Cyclomatic Complexity
  - Testüberdeckung
  - Grenzen dynamischen Testens
- 3 Durchführung und Testumgebung
  - Problemfeld
  - Reproduzierbarkeit
  - Beobachtbarkeit
  - Kontrollierbarkeit
- 4 Zusammenfassung



- Testen ist **die Verifikationstechnik** in der Praxis!
  - Modul-, Integrations-, System- und Abnahmetest
  - Kann die Absenz von Defekten aber nie garantieren
  
- Modultests sind i. d. R. **Black-Box-Tests**
  - **Black-Box-** vs. **White-Box-Tests**
  - **McCabe's Cyclomatic Complexity**  $\leadsto$  Minimalzahl von Testfällen
  - Kontrollflussorientierte **Testüberdeckung**
    - Anweisungs-, Zweig-, Pfad- und Bedinungsüberdeckung
    - Angaben zur Testüberdeckung sind immer **relativ!**
  
- Testdurchführung in (verteilten) Echtzeitsystemen sind **herausfordernd!**
  - Problemfeld: Testen verteilter Echtzeitsysteme
    - SW-Engineering, verteilte Systeme, Echtzeitsysteme
    - Untersuchungseffekt, Beobachtbarkeit, Kontrollierbarkeit, Reproduzierbarkeit



- [1] Hamburg, M. ; Hehn, U. :  
ISTQB®/GTB Standardglossar der Testbegriffe.  
(2010)
- [2] Laplante, P. A.:  
*Real-Time Systems Design and Analysis*.  
third.  
John Wiley & Sons, Inc., 2004. –  
ISBN 0-471-22855-9
- [3] OSEK/VDX Group:  
Operating System Specification 2.2.3 / OSEK/VDX Group.  
2005. –  
Forschungsbericht. –  
<http://portal.osek-vdx.org/files/pdf/specs/os223.pdf>, visited 2014-09-29
- [4] Schütz, W. :  
Fundamental issues in testing distributed real-time systems.  
In: *Real-Time Systems Journal* 7 (1994), Nr. 2, S. 129–157.  
<http://dx.doi.org/10.1007/BF01088802>. –  
DOI 10.1007/BF01088802. –  
ISSN 0922-6443

