

Verlässliche Echtzeitsysteme

Dynamisches Testen

Peter Ulbrich

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

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

27. Mai 2019



- ☞ 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

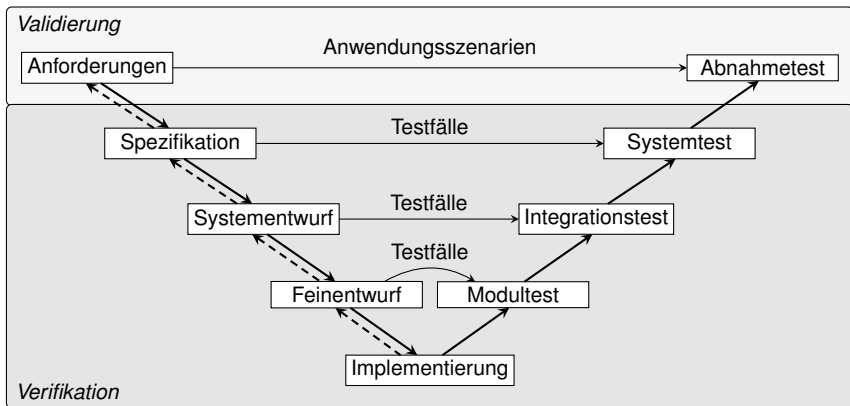


- 1 Testarten und Konzepte**
 - Entwicklungsprozess
 - Modultests
 - Black-Box- vs. White-Box-Tests
- 2 Bewertung von Testfällen
 - McCabe's Cyclomatic Complexity
 - Testüberdeckung
 - Grenzen dynamischen Testens
- 3 Durchführung und Testumgebung
 - Problemfeld
 - Reproduzierbarkeit
 - Beobachtbarkeit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

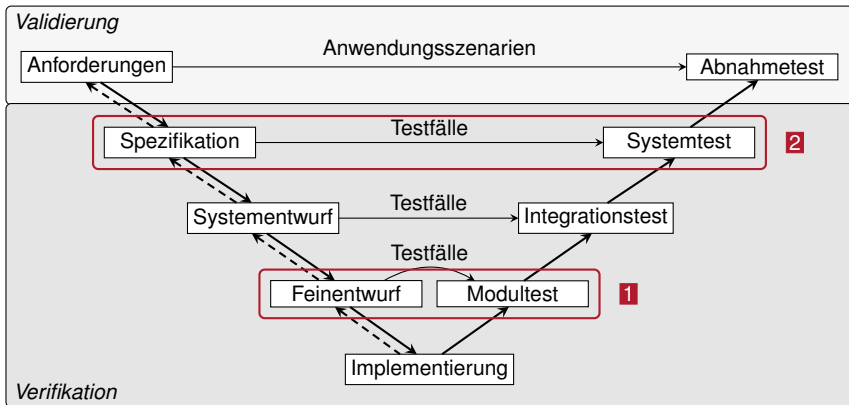
- Black-Box-Test auf Systemebene
- Vergleich: geforderte Leistung ↔ tatsächliche Leistung
 - Funktional: sind alle Merkmale verfügbar
 - Nicht-funktional: wird z.B. ein bestimmter Durchsatz erreicht

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- 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?



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 (Verdrängbarkeit): 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 (Verdrängbarkeit): 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 (Verdrängbarkeit): 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?
- 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**
 - Betrachtungsebene wichtig (wir betrachten C-Code)
 - Knoten repräsentieren **Anweisungen**, Kanten **Pfade**
 - Komplexität C :

$$C = e - n + 2$$

- $e \hat{=}$ Anzahl der Kanten (engl. edges), $n \hat{=}$ Anzahl der Knoten (engl. nodes)

■ Beispiele:



Sequenz

$$C = 1$$



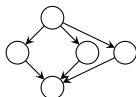
Verzweigung

$$C = 2$$



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

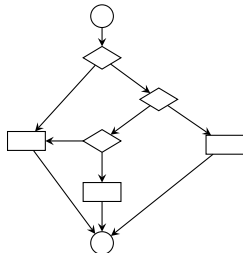
$C_1 = b/B$ Zweigüberdeckung (engl. *branch coverage*)

- $b \rightsquigarrow$ 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**



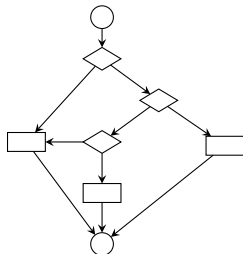
Beispiel: Anweisungs- und Zweigüberdeckung

```
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;  
}
```



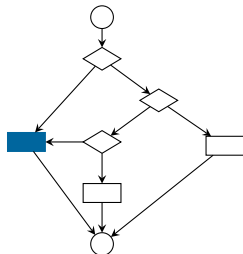
■ Anweisungsüberdeckung

■ 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

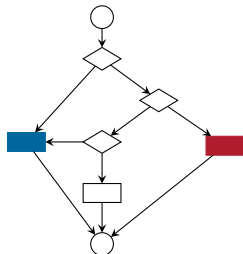
- Test 1: foo(0,0,0)

■ 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

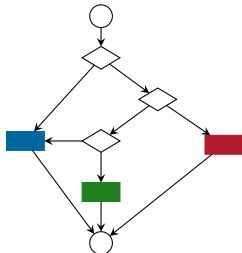
- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)

■ 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

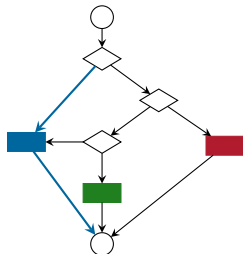
- Test 1: foo(0,0,0)
- Test 2: foo(0,1,-1)
- Test 3: foo(2,0,1)

■ 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)

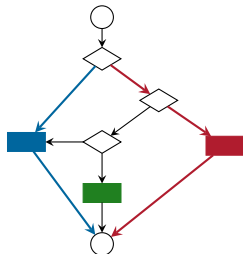
■ Zweigüberdeckung

- 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)

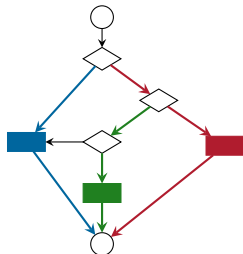
■ Zweigüberdeckung

- **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)

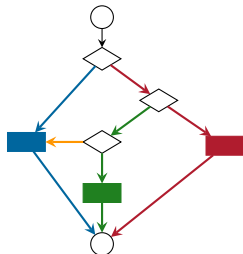
■ Zweigüberdeckung

- 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)

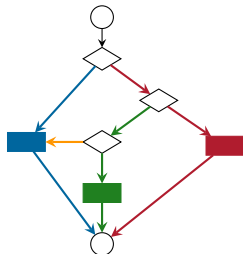
■ Zweigüberdeckung

- 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 (C_1 plus Beachtung des Pfadkontexts)
- **Problem:** durch Schleifen entstehen u. U. unendlich viele Pfade

C_2b boundary-interior Pfadüberdeckung

- Wie C_2a , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf ≤ 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 (C_1 plus Beachtung des Pfadkontexts)
- **Problem:** durch Schleifen entstehen u. U. unendlich viele Pfade

C_2b boundary-interior Pfadüberdeckung

- Wie C_2a , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf ≤ 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 (C_1 plus Beachtung des Pfadkontexts)
- **Problem:** durch Schleifen entstehen u. U. unendlich viele Pfade

C_2b boundary-interior Pfadüberdeckung

- Wie C_2a , Anzahl der Schleifendurchläufe wird auf ≤ 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 (bei C_2b und C_2c),

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 (z.B. in Schleifen) 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!

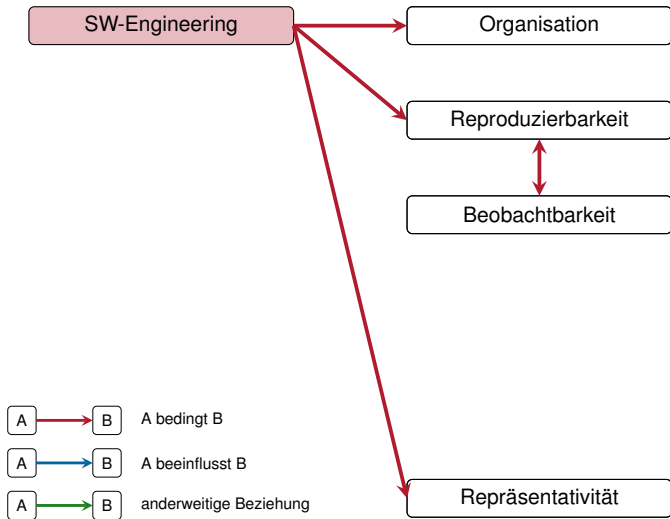
- **Formale Methoden** gehen einen anderen Weg
 - Weisen Übereinstimmung anstatt Abweichung nach
 - Gegenstand kommender Vorlesungen



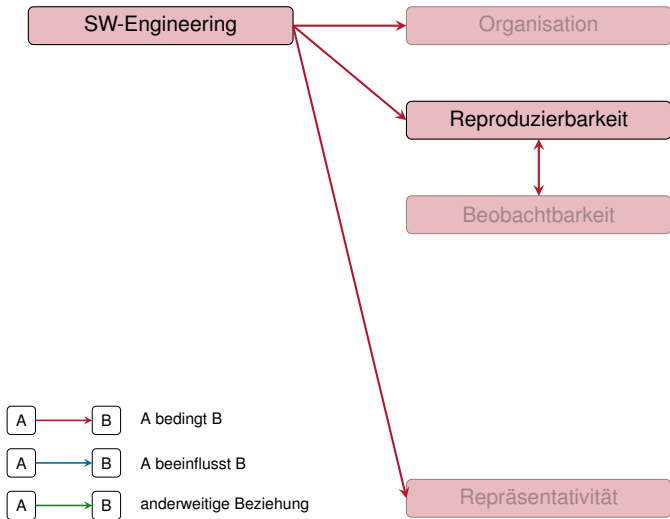
- 1 Testarten und Konzepte
 - Entwicklungsprozess
 - Modultests
 - Black-Box- vs. White-Box-Tests
- 2 Bewertung von Testfällen
 - McCabe's Cyclomatic Complexity
 - Testüberdeckung
 - Grenzen dynamischen Testens
- 3 Durchführung und Testumgebung
 - Problemfeld
 - Reproduzierbarkeit
 - Beobachtbarkeit
 - 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 \leadsto **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/16 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 ↔ 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

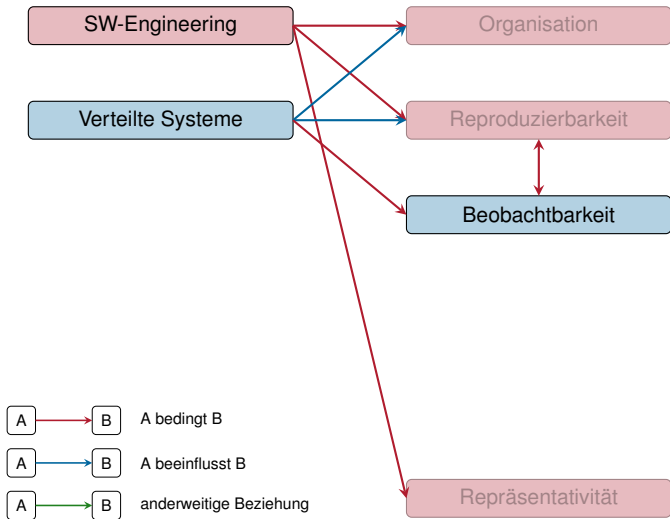


Dies sind relevante Ereignisse

- 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

¹Der 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**

¹Der 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?

¹Der 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?



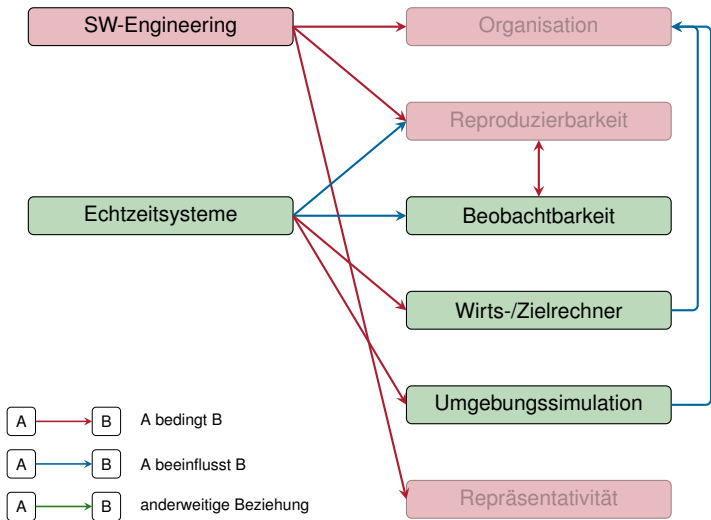
Bekanntes Phänomen: **Untersuchungseffekt** (engl. *probe effect*)¹

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

¹Der 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

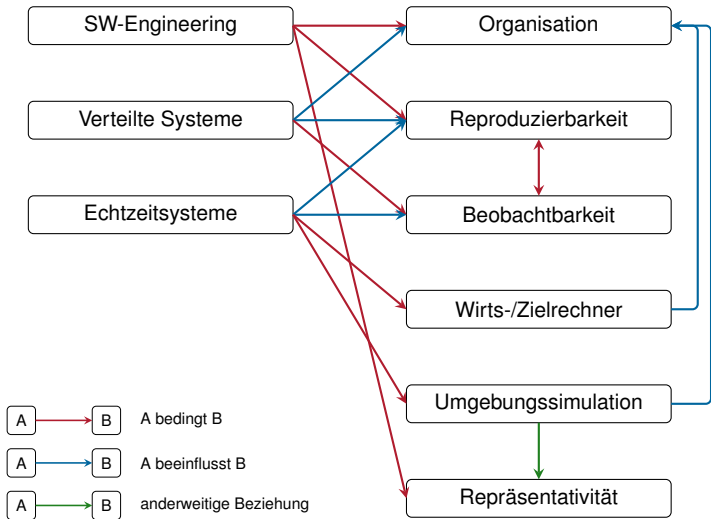
- Hinreichend effiziente Datenaufzeichnung
- Kompensation der aufgezeichneten Daten
 - Verhindert nicht die Verfälschung des globalen Zustands

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, ...

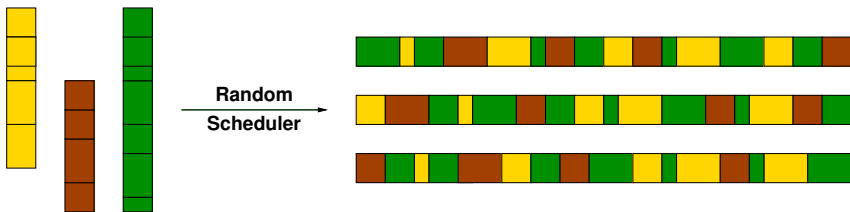


- Identifizierung möglicher Ausführungsszenarien
 - Berücksichtigung von Kommunikation, Synchronisation, Einplanung, ...
- Ausführungsszenarien werden erzwungen
 - **Random Scheduler**
 - Gleichzeitige Prozesse → sequentielles Programm
 - Teste Sequentialisierungen statt der gleichzeitigen Prozesse



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 **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



Ähnliche Herausforderungen wie bei **Fehlerinjektion**



- 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

- [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

