Verlässliche Echtzeitsysteme

Zusammenfassung

Fabian Scheler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)

`www4.informatik.uni-erlangen.de`

15. Juli 2013

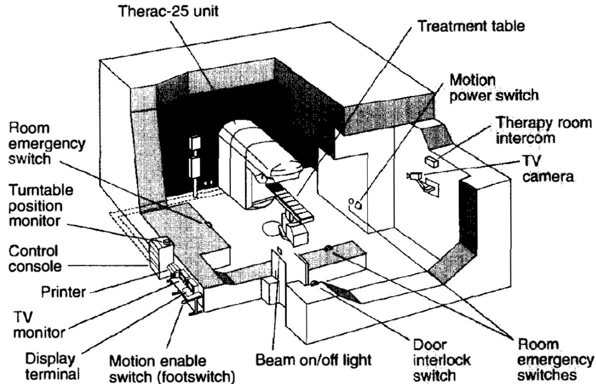
Überblick

15. April 2013 *Kapitel II*

Einleitung

Einleitung

- Der **Fehlerfall** verlässlicher Echtzeitsystem übersteigt die Kosten des Normalsfalls um Größenordnungen $\rightsquigarrow$ Beispiel: Therac 25.



(Quelle: Nancy Leveson)

☞ **Ziel:** zuverlässiger Betrieb, minimierte Ausfallwahrscheinlichkeit

Überblick

15. April 2013 *Kapitel II*

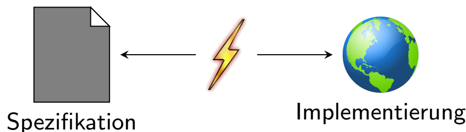
Einleitung

22. April 2013 *Kapitel III*

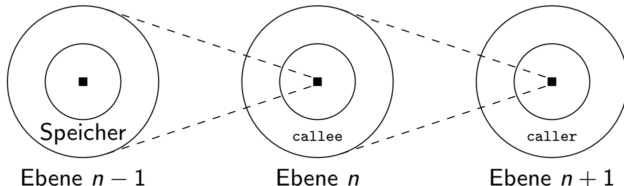
Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

Grundlagen

- **Fokus:** Wir kümmern uns ausschließlich um Fehler!
- Fehler bedeuten eine Abweichung von der Spezifikation



- Fehler breiten sich aus und führen zu beobachtbarem Fehlerverhalten



☞ **Ziel:** Reduktion des vom Benutzer beobachtbaren Fehlverhaltens!

Grundlagen (Forts.)

Fehler $\rightsquigarrow$ Alles dreht sich ausschließlich um Fehler!

- Fehlerfortpflanzung: fault $\rightsquigarrow$ error $\rightsquigarrow$ failure-Kette
- permanente, sporadische und transiente Fehler
- Vorbeugung, Entfernung, Vorhersage und Toleranz

Verlässlichkeitsmodelle $\rightsquigarrow$ Wie gut kann man mit Fehlern umgehen?

- Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Verfügbarkeit

Systementwurf $\rightsquigarrow$ Bereits hier werden Fehler berücksichtigt!

- Gefahren-, Risiko- und Fehlerbaumanalyse

Software- vs. Hardwarefehler $\rightsquigarrow$ Klassifikation & Ursachen

- Softwarefehler $\mapsto$ permanente Defekte, Komplexität
- Hardwarefehler $\mapsto$ permanente & transiente Fehler, Fertigung, ionisierende Strahlung, elektromagnetische Interferenz

Überblick

15. April 2013 *Kapitel II*

Einleitung

22. April 2013 *Kapitel III*

Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 *Kapitel IV*

Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

Überblick

15. April 2013 *Kapitel II*

Einleitung

22. April 2013 *Kapitel III*

Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 *Kapitel IV*

Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 *Kapitel V*

Testen

Testen

Validierung

Anforderungen —Anwendungsszenarien→ Abnahmetest

Spezifikation —Testfälle→ Systemtest [2]

Systementwurf —Testfälle→ Integrationstest

Feinentwurf —Testfälle→ Modultest [1]

Implementierung

Verifikation

1. Modultests ⤳ Grundbegriffe und Problemstellung
   ⤳ Black- vs. White-Box, Testüberdeckung
2. Systemtest ⤳ Testen verteilter Echtzeitsysteme
   ⤳ Problemstellung und Herausforderungen

Testen (Forts.)

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 ⇝ Minimalzahl von Testfällen
- Kontrollflussorientierte Testüberdeckung
  - Anweisungs-, Zweig-, Pfad- und Bedinungsüberdeckung
  - Angaben zur Testüberdeckung sind immer relativ!

Systemtests für verteilte Echtzeitsysteme sind herausfordernd!

- Problemfeld: Testen verteilter Echtzeitsysteme
  - SW-Engineering, verteilte Systeme, Echtzeitsysteme
  - Probe-Effect, Beobachtbarkeit, Kontrollierbarkeit, Reproduzierbarkeit

Überblick

15. April 2013 *Kapitel II*

Einleitung

22. April 2013 *Kapitel III*

Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 *Kapitel IV*

Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 *Kapitel V*

Testen

13. Mai 2013 *Kapitel VI*

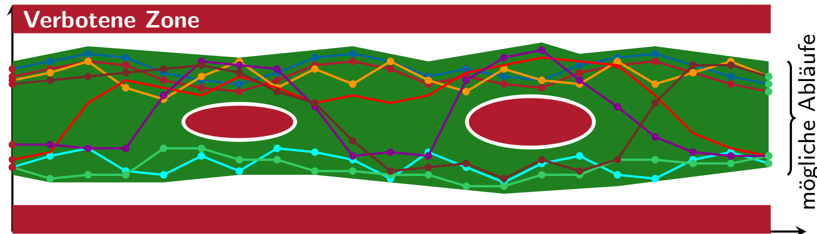
Abstrakte Interpretation

Abstrakte Interpretation

- **Ziel:** Enthält das Programm Software-Defekte?
  - Ganzzahl- oder Fließkommaüberläufe, nicht-initialisierte Variablen, ...
  - Können wir diese Frage vor der Laufzeit beantworten?

☞ Für die konkrete Programmsemantik geht das nicht!

- Eine sichere Abstraktion könnte für diesen Zweck aber ausreichen.
  - ⤳ Für Zugriffe auf Felder ist nur der möglichen Wertebereich des Index wichtig.
  - – Welcher konkrete Wert wann angenommen wird, ist nicht von Belang.



Abstrakte Interpretation (Forts.)

Konkrete Programmsemantik ist nicht berechenbar

$\rightsquigarrow$ Approximation durch eine abstrakte Semantik

- Korrektheit der Approximation ist entscheidend!
  - Nur so kann man einen Sicherheitsnachweis führen.
- Die Approximation muss präzise sein!
  - Nur so kann man Fehlalarme vermeiden.
- Die Approximation darf nicht zu komplex sein!
  - Nur so kann sie effizient berechnet werden.

Transitionssysteme beschreiben Programme

- Pfadsemantiken beschreiben die konkrete Programmsemantik
- Approximation durch Pfadpräfixe und Sammelsemantik

  $\rightsquigarrow$ abstrakte Interpretation approximiert die Sammelsemantik

Mathematische Grundlagen abstrakter Interpretation

- (vollständig) partiell geordnete Mengen, Verbände
- Galoiseinbettungen, lokale konsistente Funktionen, Widening
- Intervallabstraktion

Überblick

15. April 2013 *Kapitel II*

Einleitung

22. April 2013 *Kapitel III*

Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 *Kapitel IV*

Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 *Kapitel V*

Testen

13. Mai 2013 *Kapitel VI*

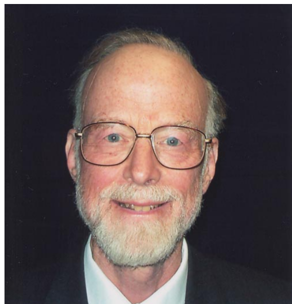
Abstrakte Interpretation

27. Mai 2013 *Kapitel VII*

WP-Kalkül

WP-Kalkül

- Überprüfung benutzerdefinierte Korrektheitsbedingungen
  - Angabe als Vor- und Nachbedingungen $\rightsquigarrow$ „Design by Contract“
- Hoare-Kalkül/WP-Kalkül $\rightsquigarrow$ denotationelle Semantik
  - schließt die Brücke zwischen Vertrag und Implementierung



C.A.R. Hoare

Edger W. Dijkstra

WP-Kalkül (Forts.)

Funktionale Programmeigenschaften $\mapsto$ Zusicherungen

- Vorbedingungen, Nachbedingungen und Invarianten
- beschrieben durch Ausdrücke der Prädikatenlogik

Prädikatentransformation $\leadsto$ symbolische Ausführung

- bildet Semantik durch Transformation von Zusicherungen nach
- strongest postcondition, weakest precondition

Hoare-Kalkül $\leadsto$ deduktive Ableitung von Nachbedingungen

- Hoare-Tripel, Axiome für leere Anweisungen und Zuweisungen
- Ableitungsregeln für Sequenzen, Verzweigungen und Iterationen
- Konsequenzregel passt Vor-/Nachbedingungen an

WP-Kalkül $\mapsto$ „Hoare-Kalkül rückwärts“

- wird von Frama-C in den Plug-Ins WP und Jessie implementiert

Grenzen des WP-Kalküls

Überblick

15. April 2013 — *Kapitel II*

Einleitung

22. April 2013 — *Kapitel III*

Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 — *Kapitel IV*

Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 — *Kapitel V*

Testen

03. Juni 2013 — *Kapitel VIII*

Redundante Ausführung

13. Mai 2013 — *Kapitel VI*

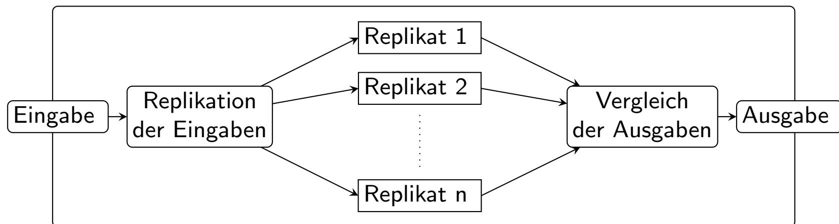
Abstrakte Interpretation

27. Mai 2013 — *Kapitel VII*

WP-Kalkül

Redundante Ausführung

- Fehlertoleranz erfordert Redundanz
  - räumliche, zeitliche oder funktionale Redundanz
- Maskierung von Fehlern durch redundante Ausführung
  - ein Mehrheitsentscheid kann ihre weitere Ausbreitung verhindern



- Reduktion der Kosten durch Redundanz auf Prozessebene
  - Replikation der Ausführung anstelle kompletter Knoten

$\leadsto$ Ausnutzung aktueller Mehrkernprozessoren

Redundante Ausführung (Forts.)

Fehlertypen $\mapsto$ Toleranz von SDCs und DUEs

Redundanz $\mapsto$ hat mehrere Dimensionen

- Grundvoraussetzung für Fehlertoleranz
- räumlich, zeitlich, funktional,{hot, warm, cold} standby
- Fehlererkennung, -diagnose, -eindämmung, -maskierung

Replikation $\mapsto$ koordinierter Einsatz von Redundanz

- Replikation der Eingaben, Abstimmung der Ausgaben
- Replikate für fail-silent, fail-consistent, malicious
- zeitliche und räumliche Isolation einzelner Replikate

Triple Modular Redundancy $\mapsto$ Hardwareredundanz

- dreifache Auslegung, toleriert Fehler im Wertbereich
- Zuverlässigkeit von Replikat und Gesamtsystem

Process Level Redundancy $\mapsto$ „TMR in Software“

- reduziert Kosten von TMR, zulasten eines geringeren Schutzes

Diversität $\mapsto$ versucht Gleichtaktfehler auszuschließen

Überblick

15. April 2013 — *Kapitel II*
Einleitung

22. April 2013 — *Kapitel III*
Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 — *Kapitel IV*
Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 — *Kapitel V*
Testen

13. Mai 2013 — *Kapitel VI*
Abstrakte Interpretation

27. Mai 2013 — *Kapitel VII*
WP-Kalkül

03. Juni 2013 — *Kapitel VIII*
Redundante Ausführung

10. Juni 2013 — *Kapitel IX*
Härtung von Code & Daten

Härtung von Code & Daten

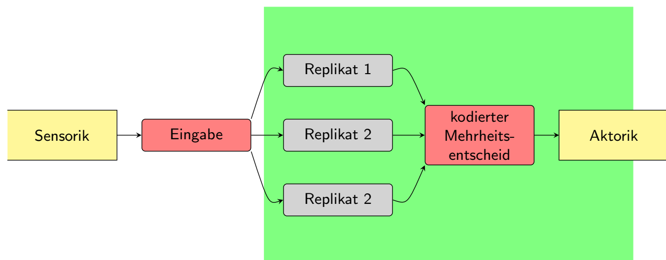
- ANBD-Kodierung härtet Daten und Kontrollfluss
  - Operanden-, Berechnungs- und Operatorfehler

$$x_c = Ax + B_x + D; \quad A > 1 \wedge B_x + D < A$$

    - Signatur B_x und Zeitstempel D

⇝ **Nachteil:** enorme hohe Laufzeitkosten

☞ „Combined Redundancy" ⇝ ANBD-Kodierung selektiv anwenden



  - sichert den „single point of failure" replizierter Ausführung
    ⇝ kodierte Implementierung des Mehrheitsentscheids

Härtung von Code & Daten (Forts.)

Fehlererkennung möglichst ohne redundante Ausführung

- Erkennung von Operanden-, Berechnungs- und Operatorfehlern

⤳ Einsatz räumlicher Redundanz durch Prüfbits

arithmetisch Kodierung

- (nicht-)systematisch und (nicht-)separiert

AN-Kodierung ⤳ Fehler im Wertbereich

- Kodierung: Multiplikation mit einem konstanten Faktor A
- kodierte Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division
- Aussagenlogik, Schiebeoperatoren, Fließkommaarithmetik

ANBD-Kodierung erweitert die AN-Kodierung

- um statische Signaturen und dynamische Zeitstempel
- Kodierung des Kontrollflusses ⤳ Signaturen für Grundblöcke

CoRed-Ansatz ⤳ selektive Anwendung der ANBD-Kodierung

- durchgehende arithmetische Kodierung wäre zu teuer

Überblick

15. April 2013 — *Kapitel II*

Einleitung

22. April 2013 — *Kapitel III*

Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 — *Kapitel IV*

Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 — *Kapitel V*

Testen

13. Mai 2013 — *Kapitel VI*

Abstrakte Interpretation

27. Mai 2013 — *Kapitel VII*

WP-Kalkül

03. Juni 2013 — *Kapitel VIII*

Redundante Ausführung

10. Juni 2013 — *Kapitel IX*

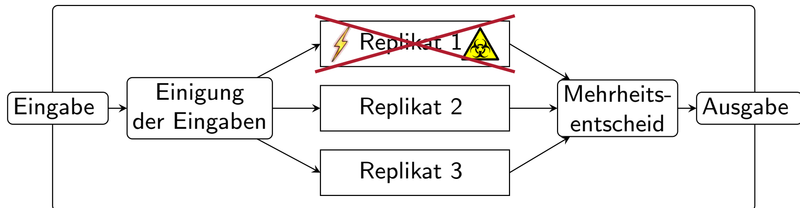
Härtung von Code & Daten

17. Juni 2013 — *Kapitel X*

Reintegration

Reintegration

- Ein Replikate fällt aus! ⇝ **Was dann?**



- Solange die verbliebenen Replikate korrekt arbeiten, ist alles in Ordnung.
- Was aber, wenn sie unterschiedliche Ergebnisse liefern?
  - Welches Replikat hat recht? ⇝ Patt-Situation

eine „Reparatur" ist für einen dauerhaften Betrieb unausweichlich

1. Fehlererkennung und -diagnose
2. Rekonfiguration ⇝ Isolation des fehlerhaften Knotens
3. Fehlererholung und Reintegration

Reintegration (Forts.)

Problemstellung ↦ ein Replikat fällt aus

- dies führt zu einer verminderten Fehlertoleranz

⇝ Reintegration des ausgefallene Knotens

Grundlagen für die Reintegration

- reaktiv, proaktiv und reaktiv-proaktiv
- Vorwärts- und Rückwartsbewegung
- Initialzustand und dynamischer Zustand
- Bestandteile und Minimierung des dynamischen Zustands

„Recovery Blocks“ Reintegration durch Rückwärtsbewegung

- „Distributed Recovery Blocks“ ↦ parallele Ausführung
- vorsorgliche Fehlererholung ⇝ Vorwärtsbewegung
  - Rückwärtsbewegung nur für die Fehlerbeseitigung

Zustandstransfer von einem funktionsfähigen Replikat

- „One-shot SR“ vs. Zustandstransfer über mehrere Schritte
- „Running SR“ vs. „Recursive SR“

Überblick

15. April 2013 — *Kapitel II*
Einleitung

22. April 2013 — *Kapitel III*
Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 — *Kapitel IV*
Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 — *Kapitel V*
Testen

13. Mai 2013 — *Kapitel VI*
Abstrakte Interpretation

27. Mai 2013 — *Kapitel VII*
WP-Kalkül

03. Juni 2013 — *Kapitel VIII*
Redundante Ausführung

10. Juni 2013 — *Kapitel IX*
Härtung von Code & Daten

17. Juni 2013 — *Kapitel X*
Reintegration

24. Juni 2013 — *Kapitel XI*
Fehlerinjektion

Fehlerinjektion

- Verifikation von Fehlertoleranzimplementierungen
  - durch das gezielte einbringen von Fehlern

☞ der Kreis schließt sich

- Evaluation der Fehlertoleranz ist im Produktivbetrieb nicht möglich

  - der durch Fehler verursachte Schaden ist nicht hinnehmbar
  - das Auftreten von Fehlern ist nicht deterministisch/reproudzierbar

Fehlerinjektion (Forts.)

FARM-Modell für Fehlerinjektion

- Fault, Activation, Readout, Measure
- Auswahl, Ausführung, Beobachtung, Auswertung
- Abstraktionsebenen – axiomatisch, empirisch, physikalisch
- genereller Aufbau und Ablauf von Fehlerinjektionswerkzeugen

Fehlerinjektionstechniken $\mapsto$ grundlegende Kategorisierung

- {hardware, software, simulations, emulations}-basiert

Xception $\mapsto$ ein Werkzeug für SWIFI

- Verwendung von prozessorspezifischen Ausnahmen
- vielseitige Fehlerinjektion (Stelle, Fehlertyp, Auslösung)

FAIL* $\mapsto$ Grundlage für generische Fehlerinjektion?

- basierend auf virtuellen Zielsystemen
- flexible Plattform für Fehlerinjektion
- schnelle Experimentdurchführung durch Parallelisierung

Überblick

15. April 2013 — *Kapitel II*
Einleitung

22. April 2013 — *Kapitel III*
Software-Defekte ⟵ **Grundlagen** ⟶ **transiente Fehler**

29. April 2013 — *Kapitel IV*
Gesetzliche Grundlage: ISO 26262

06. Mai 2013 — *Kapitel V*
Testen

13. Mai 2013 — *Kapitel VI*
Abstrakte Interpretation

27. Mai 2013 — *Kapitel VII*
WP-Kalkül

03. Juni 2013 — *Kapitel VIII*
Redundante Ausführung

10. Juni 2013 — *Kapitel IX*
Härtung von Code & Daten

17. Juni 2013 — *Kapitel X*
Reintegration

24. Juni 2013 — *Kapitel XI*
Fehlerinjektion

01. Juli 2013 — *Kapitel XII*
Fallstudien

Fallstudien

- Wie werden echte verlässliche Echtzeitsysteme entwickelt?
  - Wie wird die Korrektheit von Software sichergestellt?
  - Welche Laufzeitfehler sind insbesondere von Belang?
  - Welche Fehlertoleranzmechanismen werden implementiert?

Betrachtung zweier Fallstudien
  - primäres Reaktorschutzsystem „Sizewell B"
  - digitale Flugsteuerung Airbus A320/A330/A340

Fallstudien (Forts.)

Sizewell B $\leadsto$ primäres Reaktorschutzsystem

- einziger Zweck: sichere Abschaltung des Reaktors

Airbus $\leadsto$ digitale „Fly-by-Wire“-Flugsteuerung

- die Lenkung moderner Verkehrsflugzeuge

Redundanz $\leadsto$ Absicherung gegen Systemausfälle

- bis 7-fach redundante Systeme

Diversität $\leadsto$ Abfedern von Software-Defekten

- unterschiedliche Hardware und Software

Isolation $\leadsto$ Abschottung der einzelnen Replikate

- technisch $\mapsto$ optische Kommunikationsmedien
- zeitlich $\mapsto$ nicht-gekoppelte, eigenständige Rechner
- räumlich $\mapsto$ verschiedene Aufstellorte und Kabelrouten

Verifikation $\leadsto$ umfangreiche statische Prüfung von Software

- vielschichtiger Prozess, Betrachtung von Quell- und Binärcode