

Verlässliche Echtzeitsysteme

Zusammenfassung

Peter Ulbrich, Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

KW04 2021

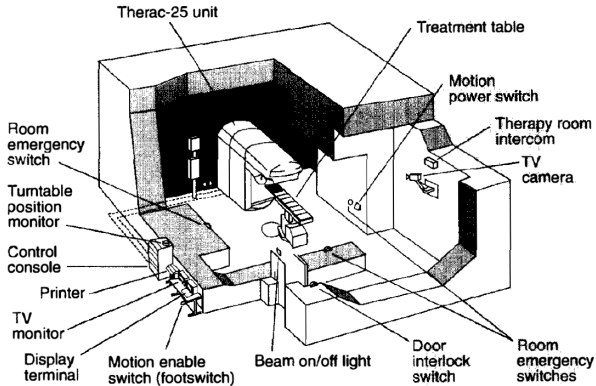


Einleitung





Der **Fehlerfall** verlässlicher Echtzeitsystem **übersteigt** die Kosten des Normalfalls um **Größenordnungen** $\leadsto$ Beispiel: Therac 25



(Quelle: Nancy Leveson)



Ziel: zuverlässiger Betrieb, minimierte Ausfallwahrscheinlichkeit



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Grundlagen



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

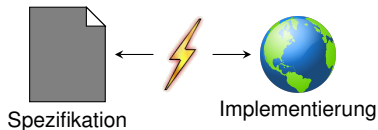
KW18 2020

Kapitel III

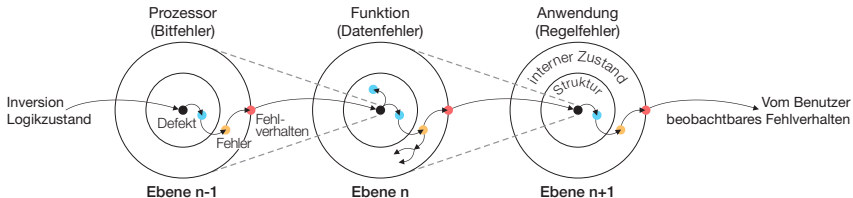
Softwaredefekte ← ——— **Grundlagen** ——— → **Fehlertoleranz**



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



- Fehler breiten sich aus und führen zu **beobachtbarem Fehlverhalten**



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



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

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

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

- Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Verfügbarkeit

Systementwurf $\leadsto$ Bereits hier werden Fehler berücksichtigt!

- Gefahren-, Risiko- und Fehlerbaumanalyse

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

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



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW19 2020

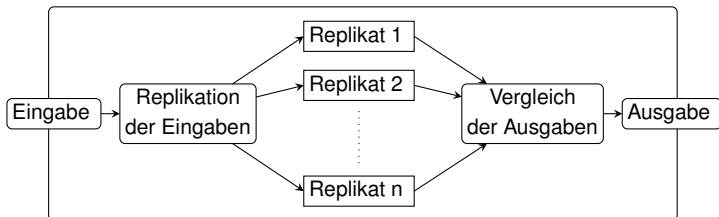
Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz



Redundante Ausführung

- Fehlertoleranz erfordert **Redundanz**
 - Redundanz in der **Struktur**, **Funktion**, **Information** oder **Zeit**
- Ausnutzung struktureller Redundanz $\leadsto$ **Replikation**
 - Replikation der **Eingaben**, Abstimmung der **Ausgaben**
 - Fehlererkennung durch **Relativtest**
 - **Zeitliche** und **räumliche Isolation** einzelner Replikate



- Replikdeterminismus
 - Einigung über die Eingabewerte $\mapsto$ Akzeptanzmaskierer
 - Deterministische Umsetzung der Funktion



Fehlertypen $\mapsto$ SDCs und DUEs

Kritische Bruchstellen $\mapsto$ Bereiche ohne Redundanz

Hardwarenasierte Replikation $\mapsto$ TMR

- {hot, warm, cold} standby
- 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



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW20 2020

Kapitel V

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss



Fehlererkennung $\mapsto$ Durch Codierung

- $\leadsto$ Einsatz von Informationsredundanz durch Prüfbits
- Fehlererkennung durch Akzeptanztest (Absoluttest)

AN-Codierung $\mapsto$ Codierung von Berechnungen

- Codierung: Multiplikation mit einem konstanten Faktor A
- (nicht-)systematisch und (nicht-)separiert
- Codierte Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division
- Aussagenlogik, Schiebeoperatoren, Fließkommaarithmetik

ANBD-Codierung $\mapsto$ Erweitert die AN-Codierung

- Um statische Signaturen und dynamische Zeitstempel
- $\leadsto$ Vollständige Fehlererfassung von Operanden-, Berechnungs- und Operatorfehlern
- Codierung des Kontrollflusses $\leadsto$ Signaturen für Grundblöcke

CoRed-Ansatz $\mapsto$ ANBD-Codierung der Replikationsinfrastruktur

- Durchgehende arithmetische Codierung wäre zu teuer



■ ANBD-Codierung härtet Daten und Kontrollfluss

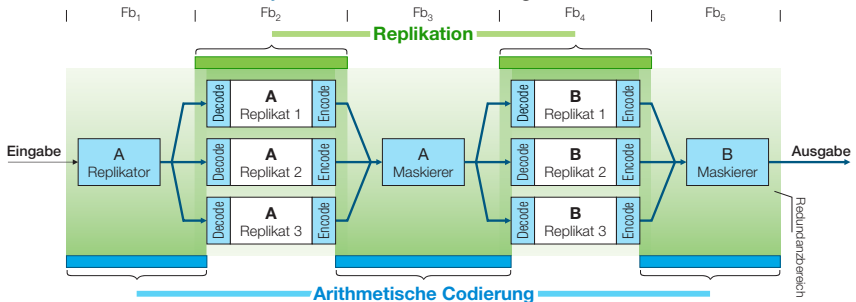
- Operanden-, Berechnungs- und Operatorfehler

$$v_c = Av + B_v + D; \quad A > 1 \wedge B_v + D < A$$

- Signatur B_v und Zeitstempel D

→ **Nachteil:** enorme hohe Laufzeitkosten

☞ „Combined Redundancy“ → ANBD-Codierung selektiv anwenden



- Sichert den „single point of failure“ replizierter Ausführung

→ Codierte Implementierung des Mehrheitsentscheids



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW20 2020

Kapitel V

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW21 2020

Kapitel VI

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/reproduzierbar



FARM-Modell Für Fehlerinjektion

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

Fehlerinjektionstechniken → grundlegende Kategorisierung

- {hardware, software, simulations}-basiert

FAIL* → Grundlage für generische Fehlerinjektion?

- Basierend auf virtuellen Zielsystemen
- Flexible Plattform für Fehlerinjektion
- Schnelle Experimentdurchführung durch Parallelisierung

Zuverlässigkeitsmetriken → Messung und Auswertung

- Absolute Zahlen versus Fehlerwahrscheinlichkeit



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW22 2020

Kapitel VII

Dynamisches Testen

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW25 2020

Kapitel VIII

Statische Programmanalyse

KW20 2020

Kapitel V

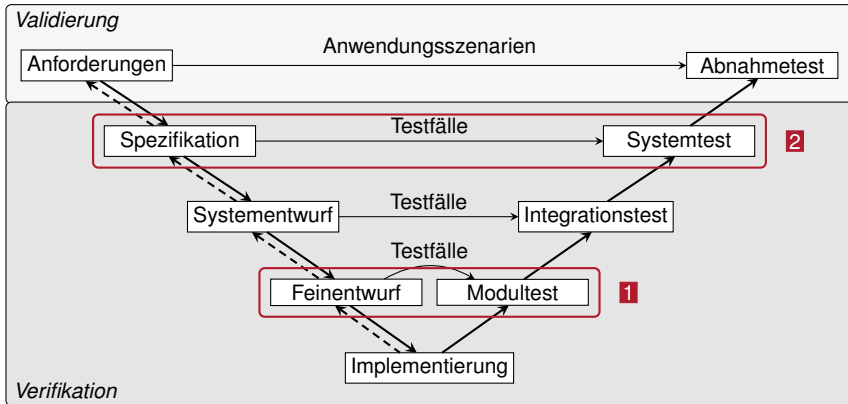
Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW21 2020

Kapitel VI

Fehlerinjektion





1 Modultests $\leadsto$ Grundbegriffe und Problemstellung

→ Black- vs. White-Box, Testüberdeckung

2 Systemtest $\leadsto$ Testen verteilter Echtzeitsysteme

→ Problemstellung und Herausforderungen





Testen ist **die Verifikationstechnik** in der Praxis!

- Modul-, Integrations-, System- und Abnahmetest
- Kann die Absenz von Defekten aber nie garantieren

■ Modultests

- Black-Box- vs. White-Box-Tests
- McCabe's Cyclomatic Complexity $\leadsto$ Minimalzahl von Testfällen
- Kontrollflussorientierte Testüberdeckung
 - Anweisungs-, Zweig-, Pfad- und Bedingungsüberdeckung
 - 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



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW22 2020

Kapitel VII

Dynamisches Testen

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW25 2020

Kapitel VIII

Statische Programmanalyse

KW20 2020

Kapitel V

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW26 2020

Kapitel IX

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

KW21 2020

Kapitel VI

Fehlerinjektion



Abstrakte Interpretation

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

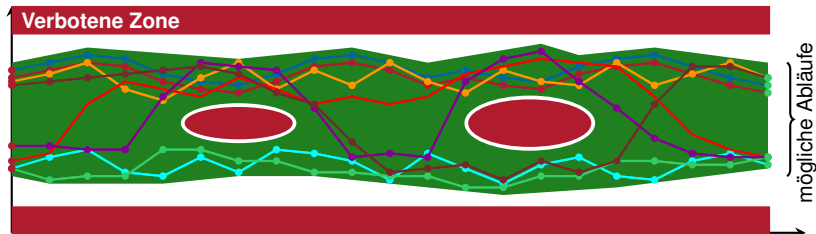


Für die **konkrete Programmsemantik** geht das nicht

- Eine **sicher 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



Einsatz einer **abstrakten Programmsemantik**



- Die **abstrakte Semantik** stellt eine Approximation dar
 - **Korrektheit** (Vollständigkeit) ist entscheidend
 - Nur so kann man einen **Sicherheitsnachweis** führen
 - Die Approximation muss **präzise** sein
 - Nur so kann man **Fehlalarme** vermeiden
 - Gleichzeitig eine **geringe Komplexität** aufweisen
 - Nur so kann sie **effizient berechnet** werden
- Abstraktion und Konkretisierung implizieren keinen Präzisionsverlust!
- Analyse und Vereinfachung
 - **Pfadsemantiken** beschreiben die konkrete Programmsemantik
 - Approximation durch **Pfadpräfixe** und **Sammelsemantik**



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW22 2020

Kapitel VII

Dynamisches Testen

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW25 2020

Kapitel VIII

Statische Programmanalyse

KW20 2020

Kapitel V

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW26 2020

Kapitel IX

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

KW21 2020

Kapitel VI

Fehlerinjektion

KW27 2020

Kapitel X

Verifikation funktionaler Eigenschaften



Der Stapelspeicher (Stack)

In eingebetteten Systemen typischerweise die einzige Form dynamischen Speichers

- Überabschätzung führt zu unnötigen Kosten



Unterabschätzung des Speicherverbrauchs führt zu Stapelüberlauf

- Schwerwiegendes und komplexes Fehlermuster
- undefiniertes Verhalten, Datenfehler oder Programmabsturz

→ Schwer zu finden, reproduzieren und beheben!



Messbasierter Ansatz (Die Praxis!!)

- Water-Marking, Überwachung zur Laufzeit

→ Reaktiv $\leadsto$ Keine Aussagen zum maximalen Verbrauch

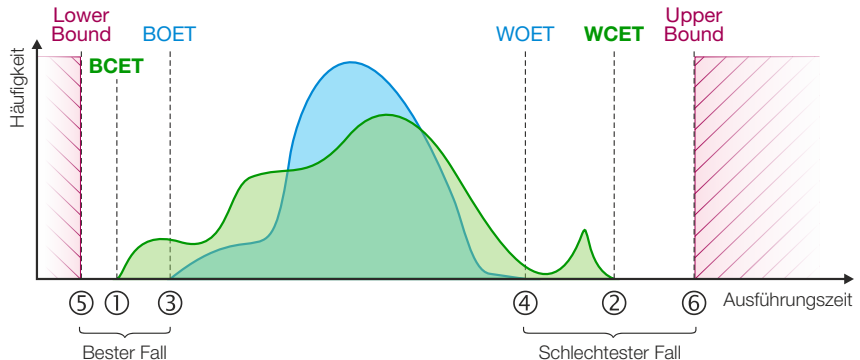


Statische Programmanalyse

- Pufferüberlauf als weitere Form von Laufzeitfehler

→ Bestimmt obere Schranke für den Speicherverbrauch





- Messbasierte Laufzeitbestimmung $\leadsto$ Beobachtung
 - Statische WCET-Analyse $\leadsto$ Obere/untere Schranke
 - Zu finden: Längster Pfad (Timing Schema, Zeitanalysegraph)
 - Dauer der Elementaroperationen: Hardware-Analyse
- $\rightarrow$ Die Analyse ist **sicher** (sound) falls Upper Bound $\geq$ WCET



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW22 2020

Kapitel VII

Dynamisches Testen

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW25 2020

Kapitel VIII

Statische Programmanalyse

KW20 2020

Kapitel V

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW26 2020

Kapitel IX

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

KW21 2020

Kapitel VI

Fehlerinjektion

KW27 2020

Kapitel X

Verifikation funktionaler Eigenschaften

KW28 2020

Kapitel XI

Fallstudie: Sizewell B



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



C.A.R. Hoare



Edger W. Dijkstra



Funktionale Programmeigenschaften $\mapsto$ Zusicherungen

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

Prädikamentransformation $\rightsquigarrow$ symbolische Ausführung

- Bildet Semantik durch Transformation von Zusicherungen nach
- Strongest postcondition, weakest precondition

Hoare-Kalkül $\rightsquigarrow$ 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“

Praxisbezug $\rightsquigarrow$ Astreé implementiert dieses Konzept nur teilweise!



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW22 2020

Kapitel VII

Dynamisches Testen

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW25 2020

Kapitel VIII

Statische Programmanalyse

KW20 2020

Kapitel V

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW26 2020

Kapitel IX

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

KW21 2020

Kapitel VI

Fehlerinjektion

KW27 2020

Kapitel X

Verifikation funktionaler Eigenschaften

KW28 2020

Kapitel XI

Fallstudie: Sizewell B

KW29 2020

Industrievortrag



■ Wie werden **echte verlässliche Echtzeitsysteme** entwickelt?

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



Betrachtung am Beispiel des primären Reaktorschutzsystems (PPS) des Sizewell B Kernkraftwerks



Sizewell B $\leadsto$ primäres Reaktorschutzsystem

- Einziger Zweck: sichere Abschaltung des Reaktors

Redundanz $\leadsto$ Absicherung gegen Systemausfälle

- Vierfach

Diversität $\leadsto$ Abfedern von Software-Defekten

- Unterschiedliche Hardware und Software
- Analoges Sekundärsystem

Isolation $\leadsto$ Abschottung der einzelnen Replikat

- 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



KW17 2020

Kapitel II

Einleitung

KW18 2020

Kapitel III

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertoleranz**

KW22 2020

Kapitel VII

Dynamisches Testen

KW19 2020

Kapitel IV

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW25 2020

Kapitel VIII

Statische Programmanalyse

KW20 2020

Kapitel V

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW26 2020

Kapitel IX

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

KW21 2020

Kapitel VI

Fehlerinjektion

KW27 2020

Kapitel X

Verifikation funktionaler Eigenschaften

KW28 2020

Kapitel XI

Fallstudie: Sizewell B

KW29 2020

Industrievortrag



KW17 2020

Einleitung

Kapitel II



KW18 2020

Softwaredefekte

Grundlagen

Fehlertoleranz

Kapitel III



KW22 2020

Dynamisches Testen

Kapitel VII

KW19 2020

Fehlertoleranz durch Redundanz

Kapitel IV

KW25 2020

Statische Programmanalyse

Kapitel VIII

KW20 2020

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

Kapitel V

KW26 2020

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

Kapitel IX

KW21 2020

Fehlerinjektion

Kapitel VI

KW27 2020

Verifikation funktionaler Eigenschaften

Kapitel X

KW28 2020

Fallstudie: Sizewell B

Kapitel XI

KW29 2020

Industrievortrag



KW17 2020

Einleitung

Kapitel II



KW18 2020

Softwaredefekte

Grundlagen

Fehlertoleranz

Kapitel III



KW22 2020

Dynamisches Testen

Kapitel VII

KW19 2020

Fehlertoleranz durch Redundanz

Kapitel IV



KW25 2020

Statische Programmanalyse

Kapitel VIII

KW20 2020

Härtung v. Daten- & Kontrollflüssen

Kapitel V



KW26 2020

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

Kapitel IX

KW21 2020

Fehlerinjektion

Kapitel VI



KW27 2020

Verifikation funktionaler Eigenschaften

Kapitel X

KW28 2020

Fallstudie: Sizewell B

Kapitel XI

KW29 2020

Industrievortrag



KW17 2020

Einleitung

Kapitel II



KW18 2020

Softwaredefekte

← Grundlagen →

Fehlertoleranz

Kapitel III



KW22 2020

Dynamisches Testen

Kapitel VII



KW19 2020

Fehlertoleranz durch Redundanz

Kapitel IV



KW25 2020

Statische Programmanalyse

Kapitel VIII



KW20 2020

Härtung v. Daten- & Kontrollflüssen

Kapitel V



KW26 2020

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

Kapitel IX



KW21 2020

Fehlerinjektion

Kapitel VI



KW27 2020

Verifikation funktionaler Eigenschaften

Kapitel X



KW28 2020

Fallstudie: Sizewell B

Kapitel XI

KW29 2020

Industrievortrag



KW17 2020

Einleitung

Kapitel II



KW18 2020

Softwaredefekte

← Grundlagen →

Fehlertoleranz

Kapitel III



KW22 2020

Dynamisches Testen

Kapitel VII



KW19 2020

Fehlertoleranz durch Redundanz

Kapitel IV



KW25 2020

Statische Programmanalyse

Kapitel VIII



KW20 2020

Härtung v. Daten- & Kontrollflüssen

Kapitel V



KW26 2020

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

Kapitel IX



KW21 2020

Fehlerinjektion

Kapitel VI



KW27 2020

Verifikation funktionaler Eigenschaften

Kapitel X



KW28 2020

Fallstudie: Sizewell B

Kapitel XI



KW29 2020

Industrievortrag



1 Zusammenfassung

- Einleitung
- Grundlagen
- Redundante Ausführung
- Härtung von Daten- und Kontrollfluss
- Fehlerinjektion
- Testen
- Statische Programmanalyse
- Statische Analyse nicht-funktionaler Eigenschaften
- Statische Analyse funktionaler Eigenschaften
- Fallstudie: Sizewell B
- Vorträge
- Prüfungsrelevanz

2 Abschlussarbeiten



{B, M}-Arbeiten ... Promotion

Forschungs-/Entwicklungsprojekte: Universität, Forschungseinrichtungen, Industrie

<https://www4.cs.uni-erlangen.de/Theses>
oder besser noch: Kommt vorbei!

