Verlässliche Systemsoftware

Zusammenfassung

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Informatik 12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware

Technische Universität Dortmund

`https://sys.cs.tu-dortmund.de`

KW30 2020

technische universität
dortmund

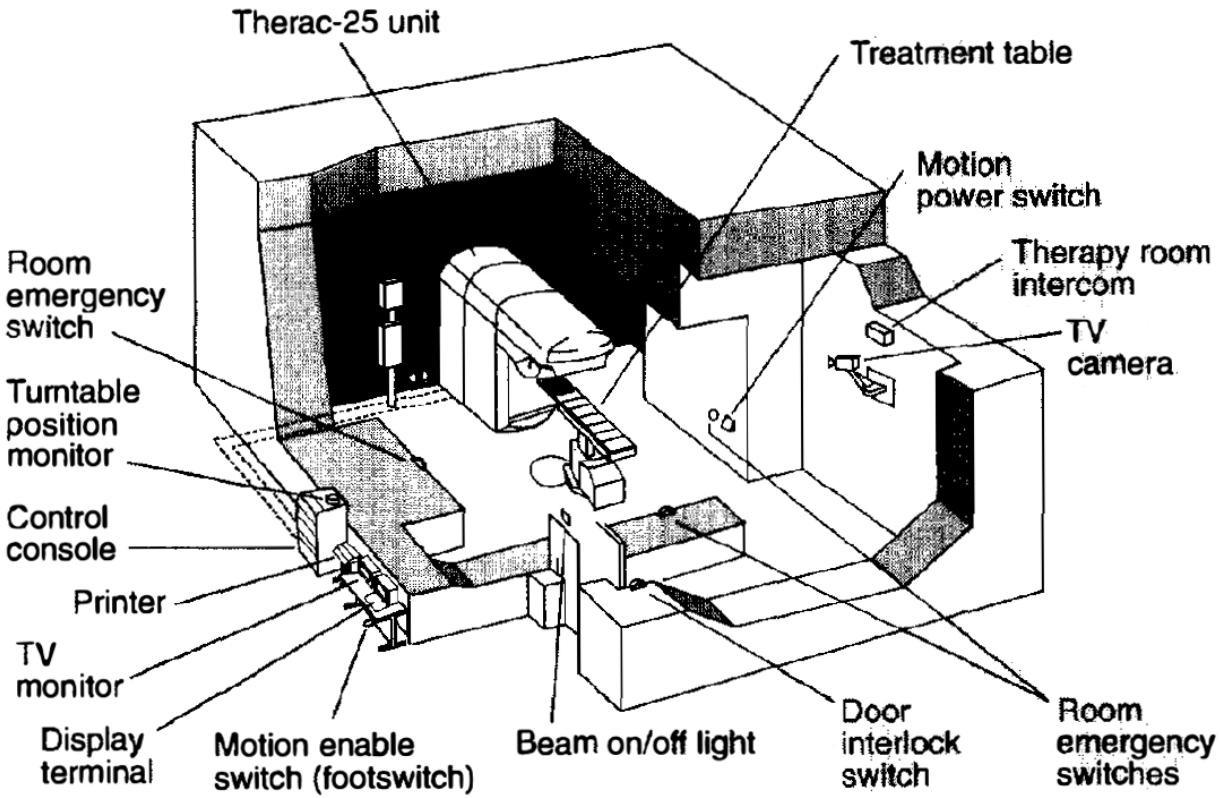
arbeitsgruppe
systemsoftware

Überblick

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

KW45 2020 *Kapitel II*

Einleitung

KW46 2020 *Kapitel III*

Grundlagen

Überblick

KW45 2020 *Kapitel II*

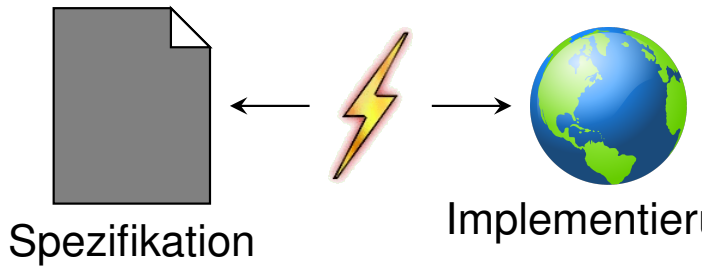
Einleitung

KW46 2020 *Kapitel III*

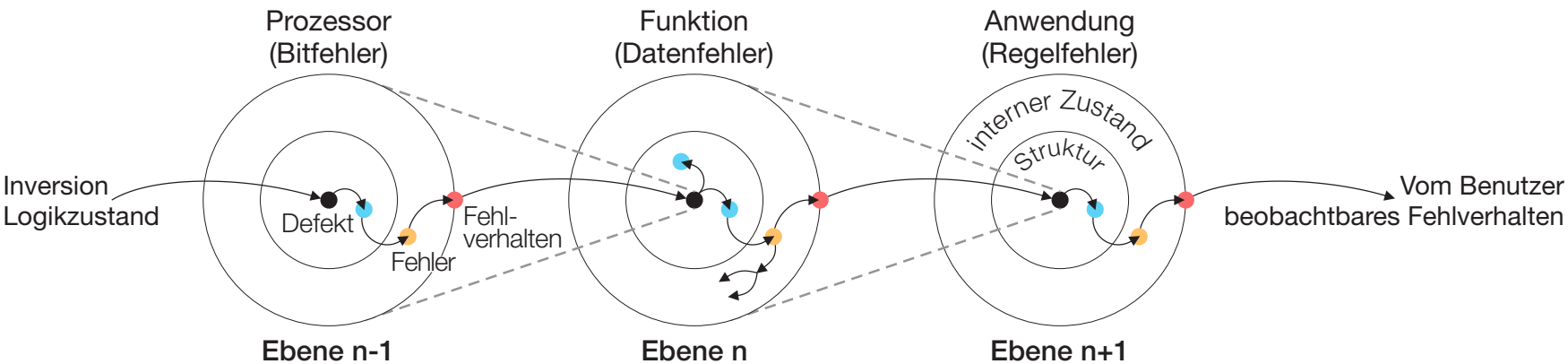
Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertolerenz**

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

KW45 2020 *Kapitel II*

Einleitung

KW46 2020 *Kapitel III*

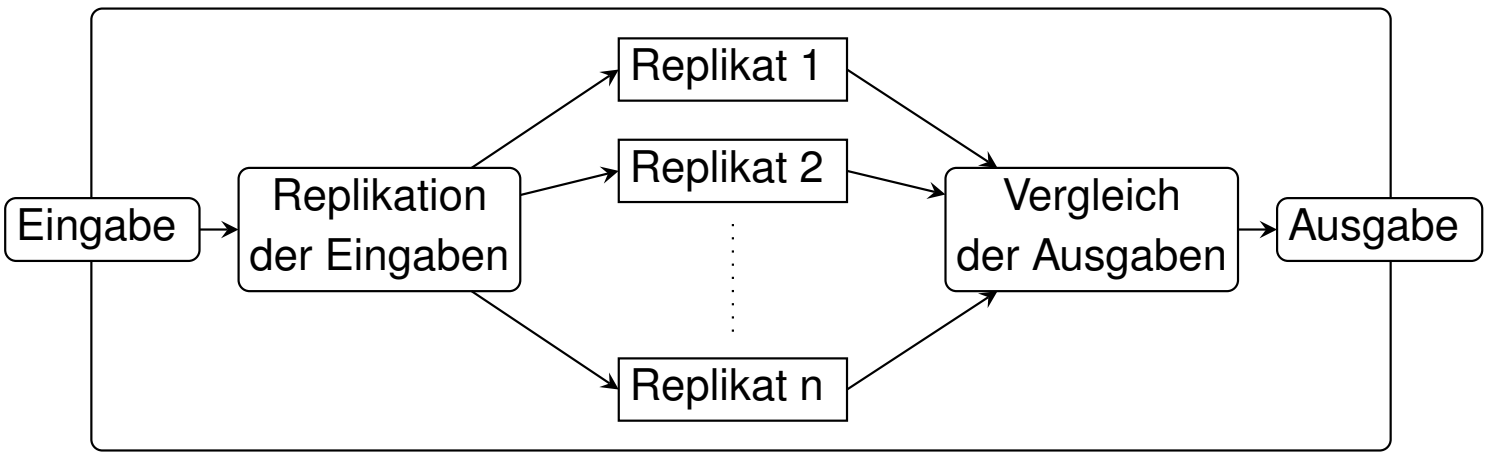
Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertolerenz**

KW47 2020 *Kapitel IV*

Fehlertoleranz durch Redundanz

Redundante Ausführung

- Fehlertoleranz erfordert Redundanz
  - Redundanz in der Struktur, Funktion, Information oder Zeit
- Ausnutzung struktureller Redundanz $\rightsquigarrow$ 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

Redundante Ausführung (Forts.)

Fehlertypen ↦ SDCs und DUEs

Kritische Bruchstellen ↦ Bereiche ohne Redundanz

Hardwarenasierte Replikation ↦ TMR

- {hot, warm, cold} standby
- Dreifache Auslegung, toleriert Fehler im Wertbereich
- Zuverlässigkeit von Replikat und Gesamtsystem

Process Level Redundancy ↦ „TMR in Software“

- Reduziert Kosten von TMR, zulasten eines geringeren Schutzes

Diversität ↦ versucht Gleichtaktfehler auszuschließen

Überblick

KW45 2020 *Kapitel II*

Einleitung

KW46 2020 *Kapitel III*

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertolerenz**

KW47 2020 *Kapitel IV*

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW48 2020 *Kapitel V*

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

Härtung von Code & Daten

Fehlererkennung $\mapsto$ Durch Codierung

$\rightsquigarrow$ 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

$\rightsquigarrow$ Vollständige Fehlererfassung von Operanden-, Berechnungs- und Operatorfehlern

- Codierung des Kontrollflusses $\rightsquigarrow$ Signaturen für Grundblöcke

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

- Durchgehende arithmetische Codierung wäre zu teuer

Härtung von Code & Daten (Forts.)

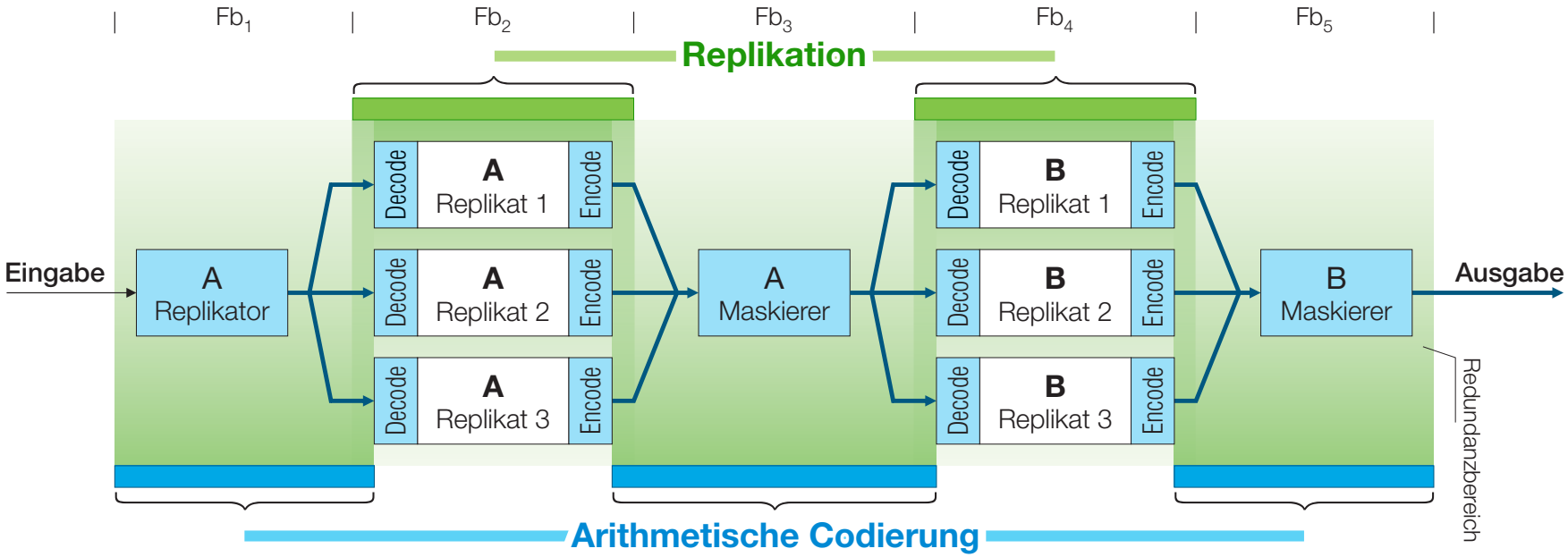
- ANBD-Codierung härtet Daten und Kontrollfluss
  - Operanden-, Berechnungs- und Operatorfehler

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

  - 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

Überblick

KW45 2020 *Kapitel II*

Einleitung

KW46 2020 *Kapitel III*

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertolerenz**

KW47 2020 *Kapitel IV*

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW48 2020 *Kapitel V*

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW49 2020 *Kapitel VI*

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}-basiert

FAIL* $\mapsto$ Grundlage für generische Fehlerinjektion?

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

Zuverlässigkeitsmetriken $\mapsto$ Messung und Auswertung

- Absolute Zahlen versus Fehlerwahrscheinlichkeit

Überblick

KW45 2020 *Kapitel II*

Einleitung

KW46 2020 *Kapitel III*

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertolerenz**

KW50 2020 *Kapitel VII*

Dynamisches Testen

KW51 2020 *Kapitel VIII*

Statische Programmanalyse

KW47 2020 *Kapitel IV*

Fehlertoleranz durch Redundanz

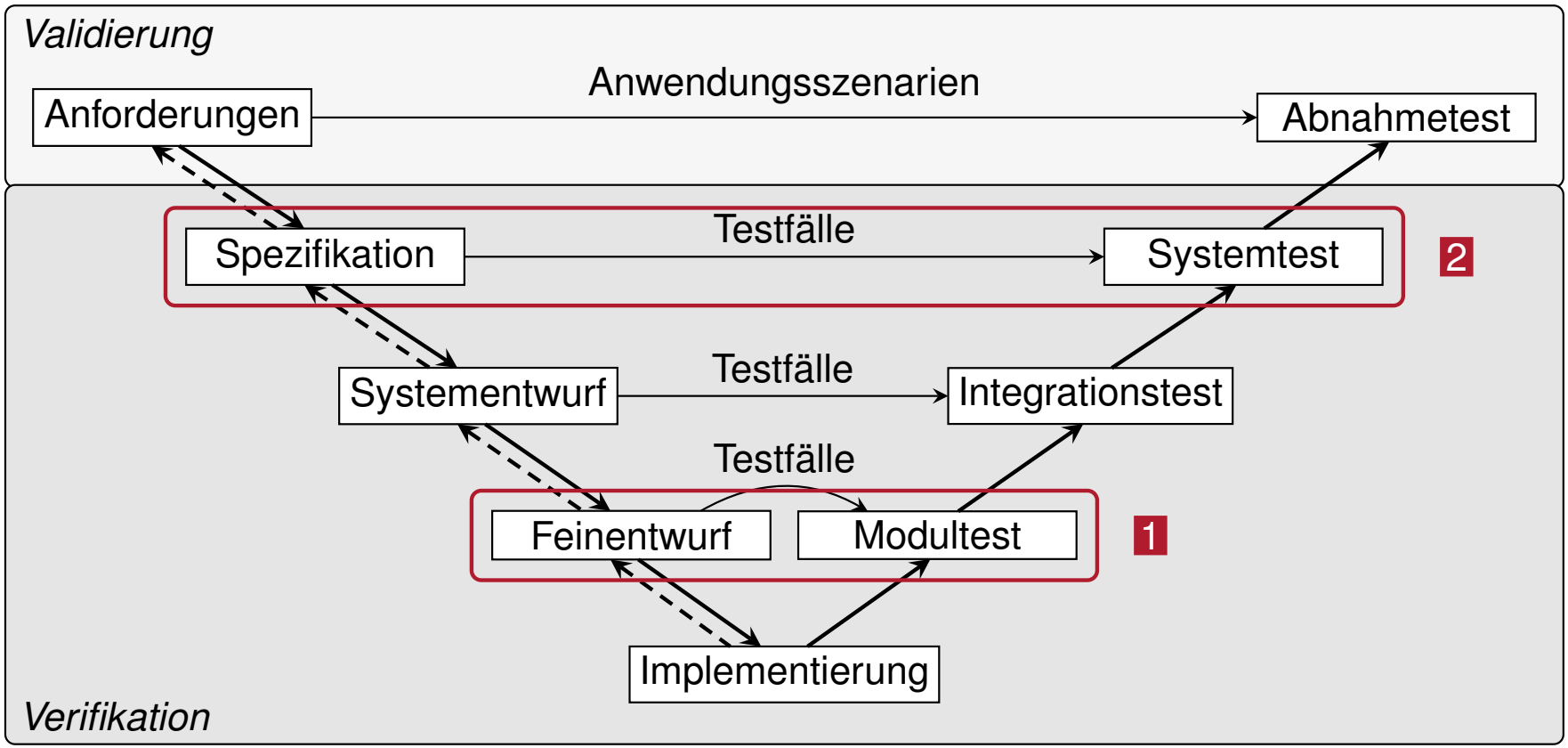
KW48 2020 *Kapitel V*

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW49 2020 *Kapitel VI*

Fehlerinjektion

Testen



1 Modultests ⇝ Grundbegriffe und Problemstellung

→ Black- vs. White-Box, Testüberdeckung

2 Systemtest ⇝ Testen verteilter Echtzeitsysteme

→ Problemstellung und Herausforderungen

Testen (Forts.)

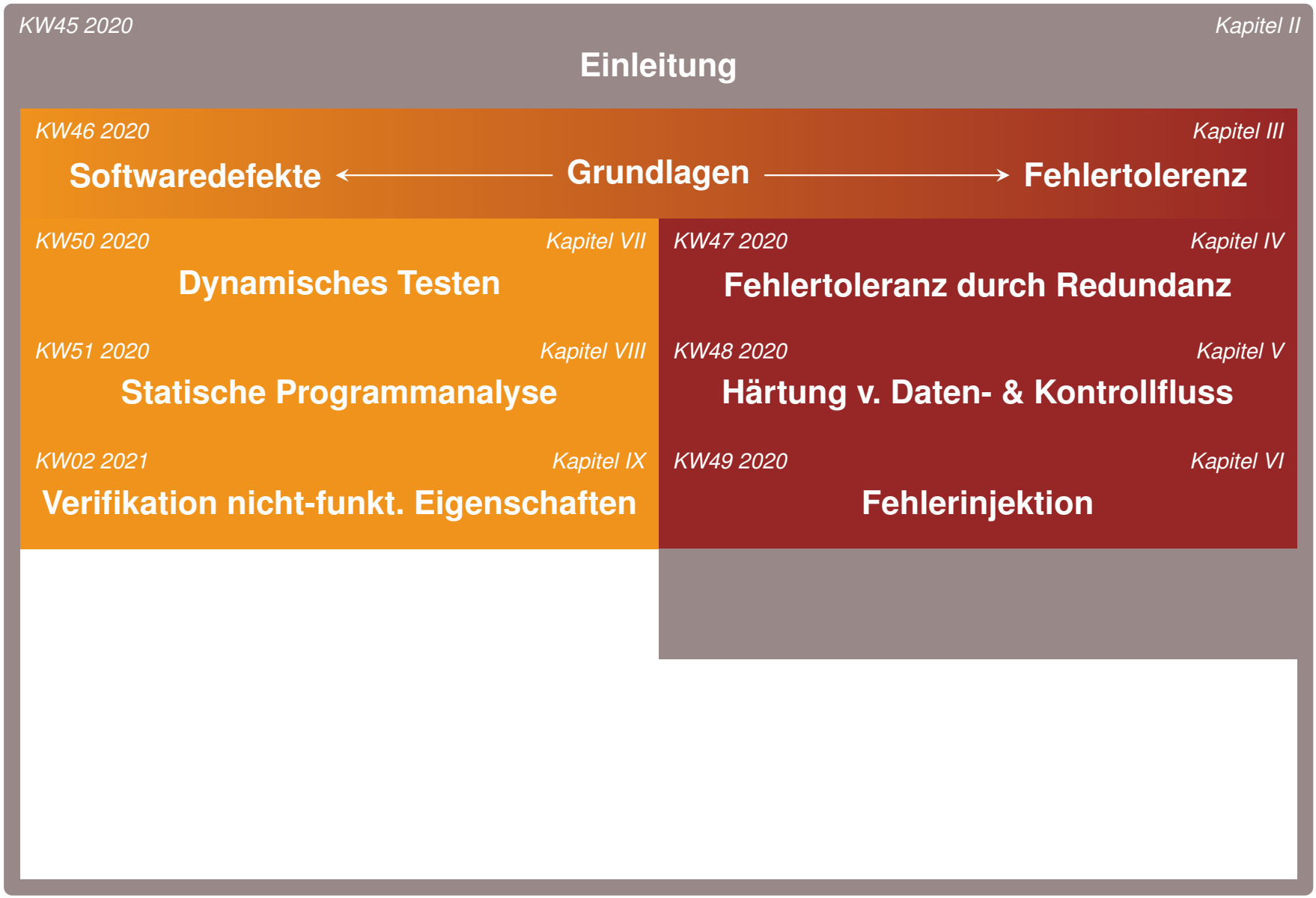
Testen ist **die** Verifikationstechnik in der Praxis!

- Modul-, Integrations-, System- und Abnahmetest

→ Kann die Absenz von Defekten aber nie garantieren

- Modultests
  - Black-Box- vs. White-Box-Tests
  - McCabe's Cyclomatic Complexity $\rightsquigarrow$ 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


KW45 2020
Kapitel II
Einleitung
KW46 2020
Kapitel III
Softwaredefekte
Grundlagen
Fehlertolerenz
KW50 2020
Kapitel VII
Dynamisches Testen
KW47 2020
Kapitel IV
Fehlertoleranz durch Redundanz
KW51 2020
Kapitel VIII
Statische Programmanalyse
KW48 2020
Kapitel V
Härtung v. Daten- & Kontrollfluss
KW02 2021
Kapitel IX
Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften
KW49 2020
Kapitel VI
Fehlerinjektion

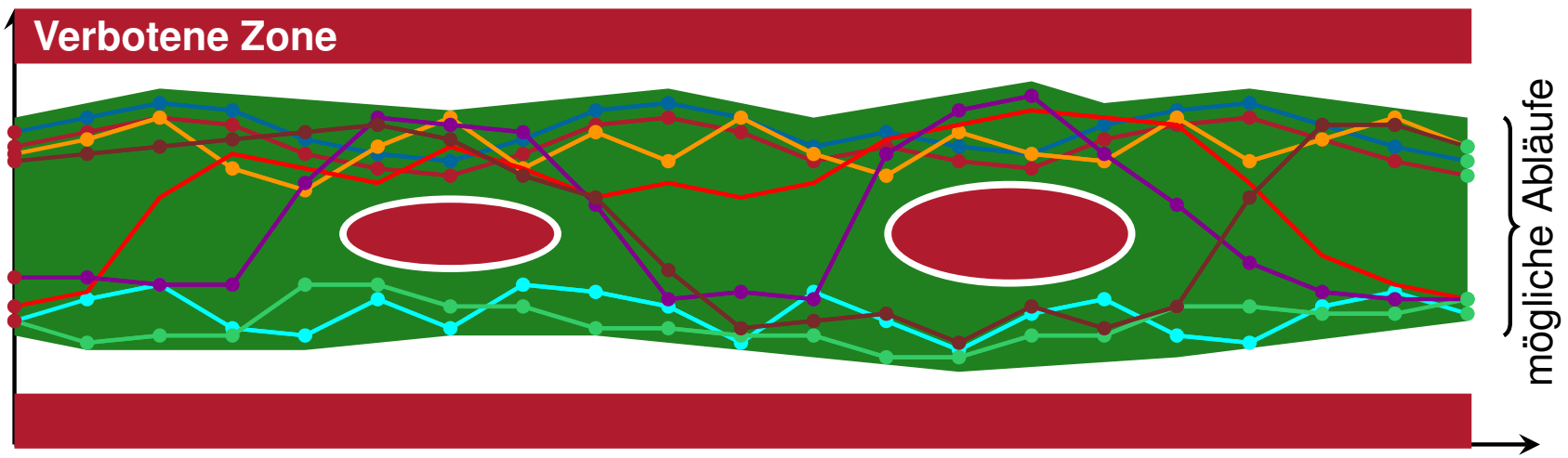
Abstrakte Interpretation

- 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



Abstrakte Interpretation (Forts.)

- 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

Überblick

KW45 2020 — *Kapitel II*

Einleitung

KW46 2020 — *Kapitel III*

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlertolerenz**

KW50 2020 — *Kapitel VII*

Dynamisches Testen

KW51 2020 — *Kapitel VIII*

Statische Programmanalyse

KW02 2021 — *Kapitel IX*

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

KW03 2021 — *Kapitel X*

Verifikation funktionaler Eigenschaften

KW47 2020 — *Kapitel IV*

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW48 2020 — *Kapitel V*

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW49 2020 — *Kapitel VI*

Fehlerinjektion

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

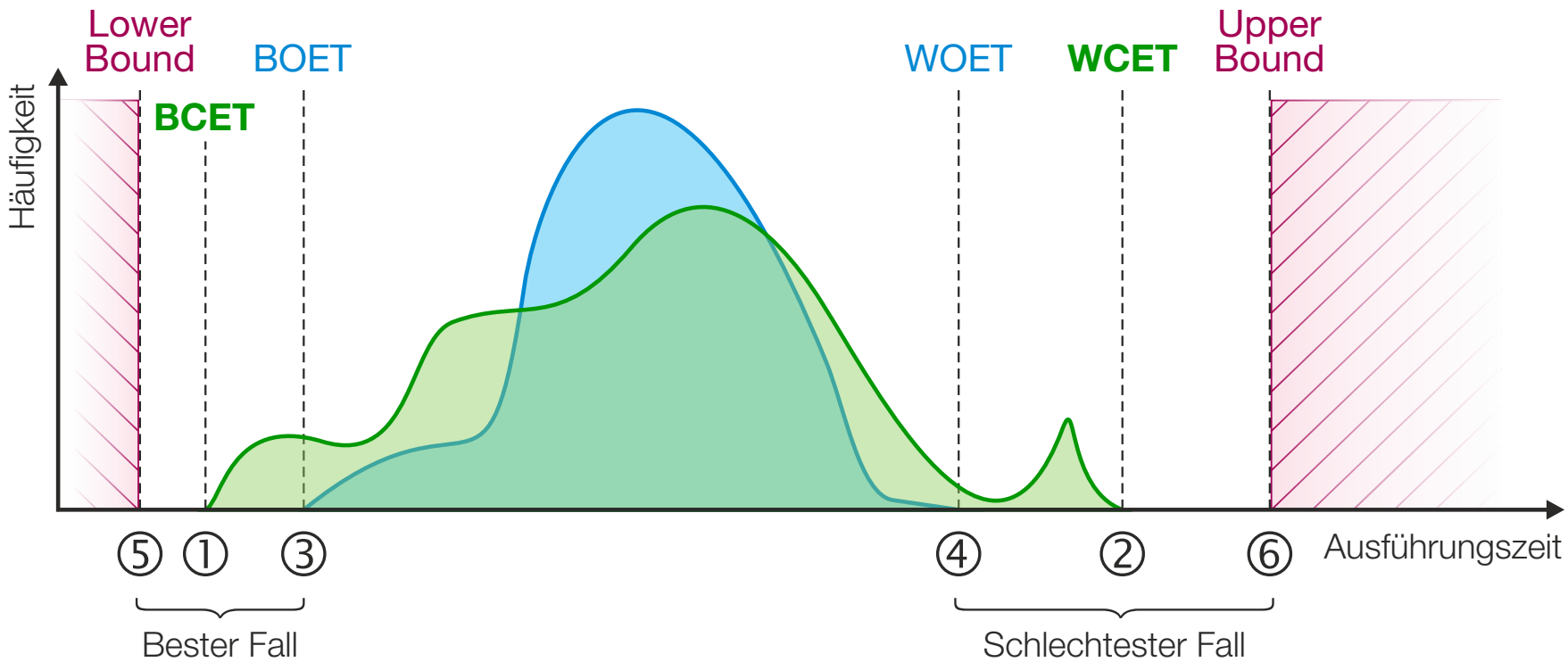
→ Reaktiv ⇝ Keine Aussagen zum maximalen Verbrauch

☞ Statische Programmanalyse

- Pufferüberlauf als weitere Form von Laufzeitfehler

→ Bestimmt obere Schranke für den Speicherverbrauch

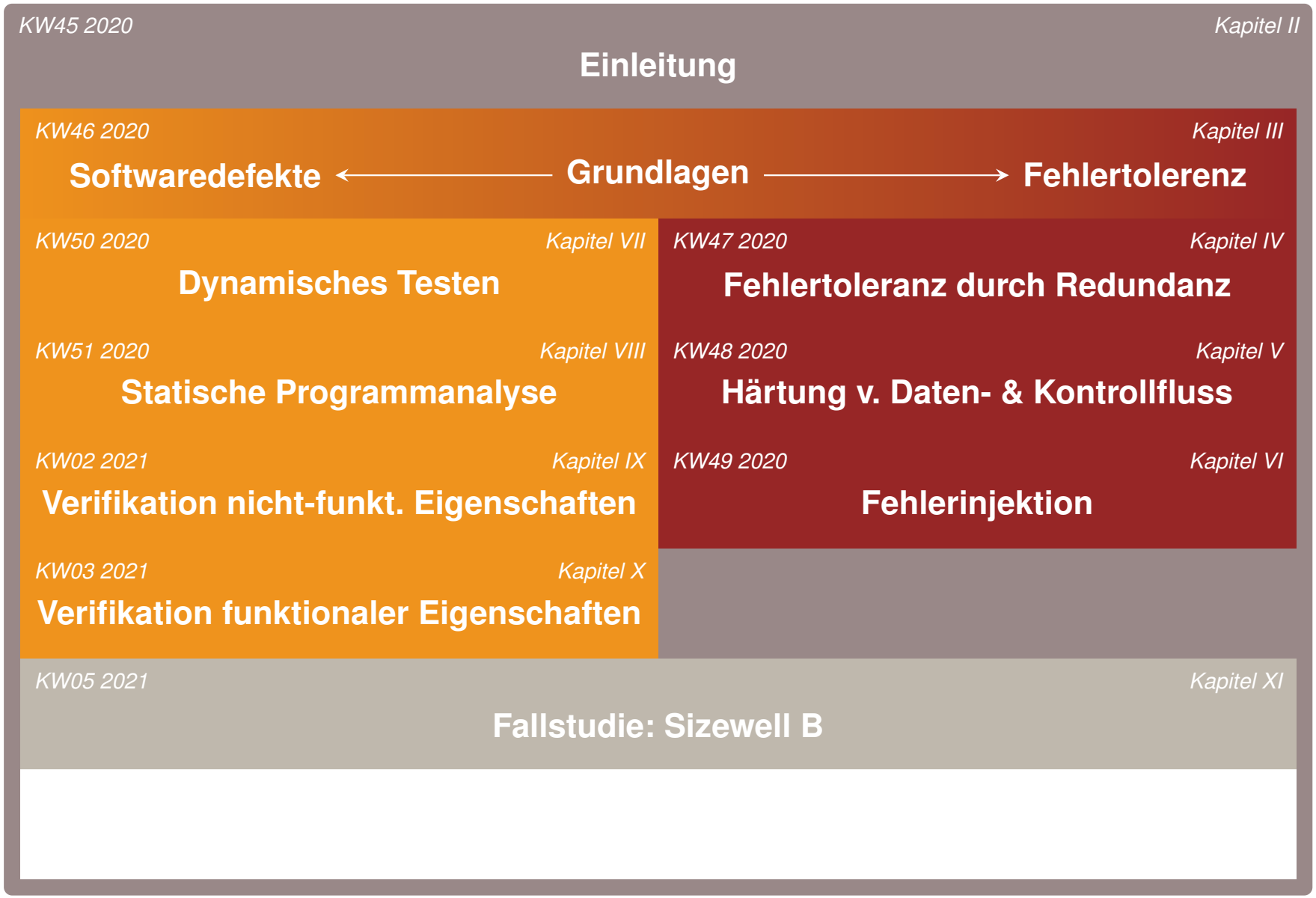
Die Laufzeit



- Messbasierte Laufzeitbestimmung $\rightsquigarrow$ Beobachtung
- Statische WCET-Analyse $\rightsquigarrow$ Obere/untere Schranke
  - Zu finden: Längster Pfad (Timing Schema, Zeitanalysegraph)
  - Dauer der Elementaroperationen: Hardware-Analyse

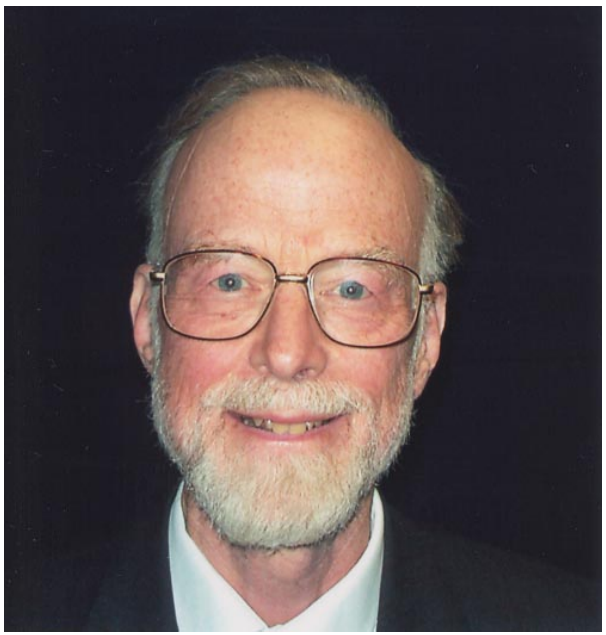
$\rightarrow$ Die Analyse ist sicher (sound) falls Upper Bound $\geq$ WCET

Überblick


KW45 2020
Kapitel II
Einleitung
KW46 2020
Kapitel III
Softwaredefekte
Grundlagen
Fehlertolerenz
KW50 2020
Kapitel VII
Dynamisches Testen
KW47 2020
Kapitel IV
Fehlertoleranz durch Redundanz
KW51 2020
Kapitel VIII
Statische Programmanalyse
KW48 2020
Kapitel V
Härtung v. Daten- & Kontrollfluss
KW02 2021
Kapitel IX
Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften
KW49 2020
Kapitel VI
Fehlerinjektion
KW03 2021
Kapitel X
Verifikation funktionaler Eigenschaften
KW05 2021
Kapitel XI
Fallstudie: Sizewell B

Design-by-Contract

- 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

Design-by-Contract (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

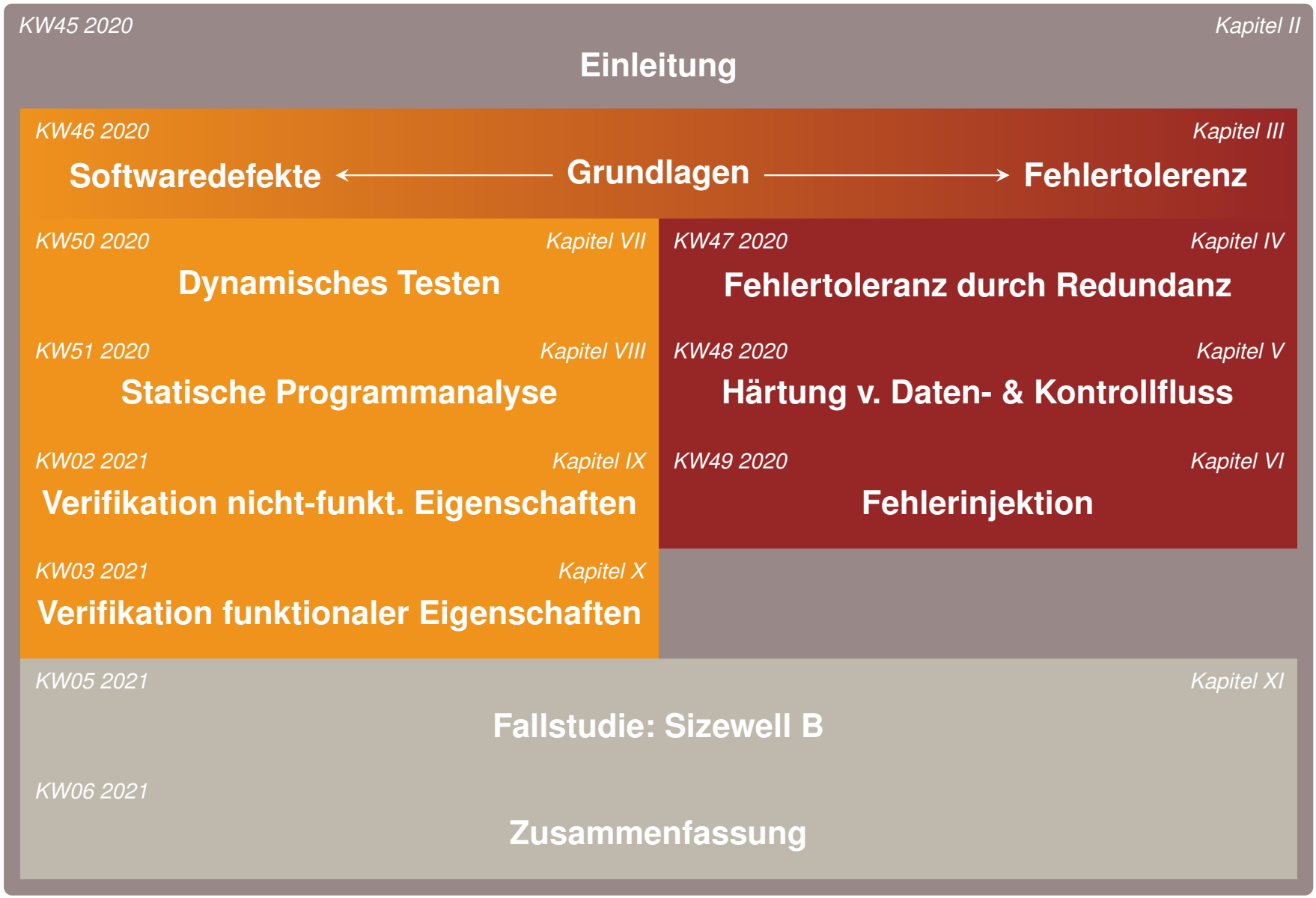
Hoare-Kalkül $\leadsto$ deduktive Ableitung von Nachbedingungen

- 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“

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

Überblick


KW45 2020
Kapitel II
Einleitung
KW46 2020
Kapitel III
Softwaredefekte
Grundlagen
Fehlertolerenz
KW50 2020
Kapitel VII
Dynamisches Testen
KW47 2020
Kapitel IV
Fehlertoleranz durch Redundanz
KW51 2020
Kapitel VIII
Statische Programmanalyse
KW48 2020
Kapitel V
Härtung v. Daten- & Kontrollfluss
KW02 2021
Kapitel IX
Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften
KW49 2020
Kapitel VI
Fehlerinjektion
KW03 2021
Kapitel X
Verifikation funktionaler Eigenschaften
KW05 2021
Kapitel XI
Fallstudie: Sizewell B
KW06 2021
Zusammenfassung

Fallstudie: Sizewell B

- 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

Fallstudien (Forts.)

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

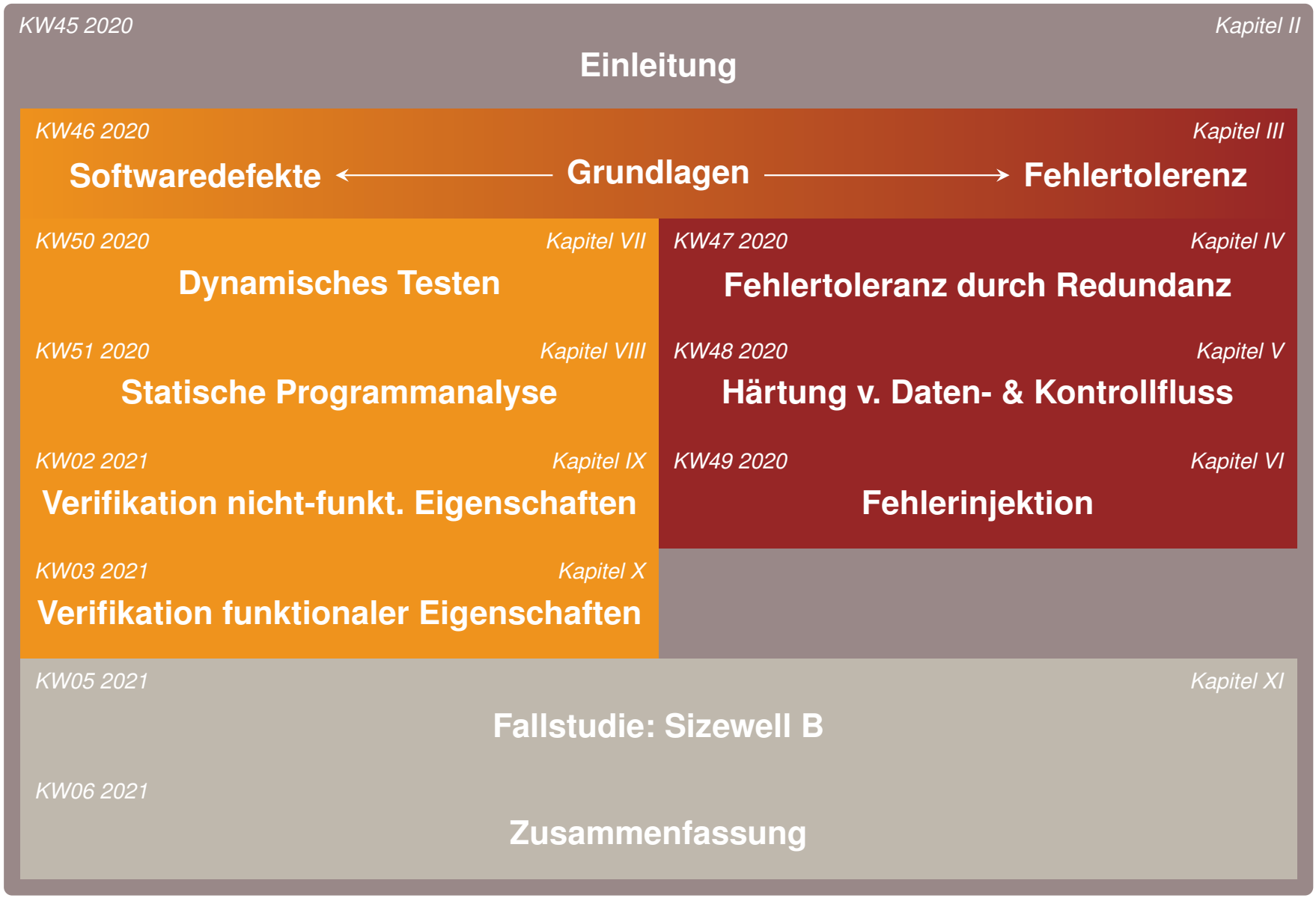
Isolation $\leadsto$ Abschottung der einzelnen Replikate

- 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

Überblick


KW45 2020
Kapitel II
Einleitung
KW46 2020
Kapitel III
Softwaredefekte
Grundlagen
Fehlertolerenz
KW50 2020
Kapitel VII
Dynamisches Testen
KW47 2020
Kapitel IV
Fehlertoleranz durch Redundanz
KW51 2020
Kapitel VIII
Statische Programmanalyse
KW48 2020
Kapitel V
Härtung v. Daten- & Kontrollfluss
KW02 2021
Kapitel IX
Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften
KW49 2020
Kapitel VI
Fehlerinjektion
KW03 2021
Kapitel X
Verifikation funktionaler Eigenschaften
KW05 2021
Kapitel XI
Fallstudie: Sizewell B
KW06 2021
Zusammenfassung

Überblick

KW45 2020 — *Kapitel II*

Einleitung

KW46 2020 — *Kapitel III*

Softwaredefekte ← **Grundlagen** → **Fehlerto**

KW50 2020 — *Kapitel VII*

Dynamisches Testen

KW51 2020 — *Kapitel VIII*

Statische Programmanalyse

KW02 2021 — *Kapitel IX*

Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften

KW03 2021 — *Kapitel X*

Verifikation funktionaler Eigenschaften

KW47 2020 — *Kapitel IV*

Fehlertoleranz durch Redundanz

KW48 2020 — *Kapitel V*

Härtung v. Daten- & Kontrollfluss

KW49 2020 — *Kapitel VI*

Fehlerinjektion

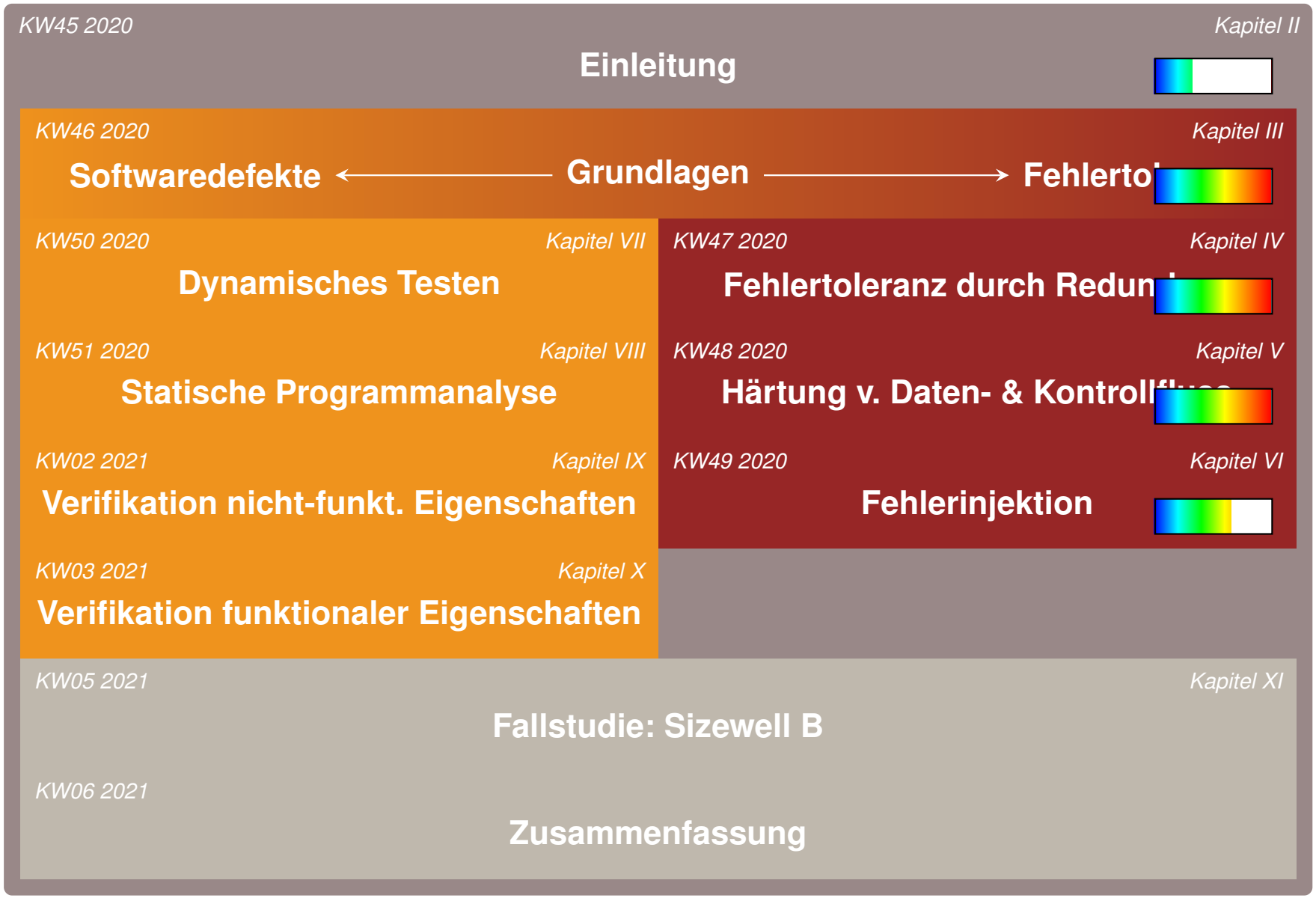
KW05 2021 — *Kapitel XI*

Fallstudie: Sizewell B

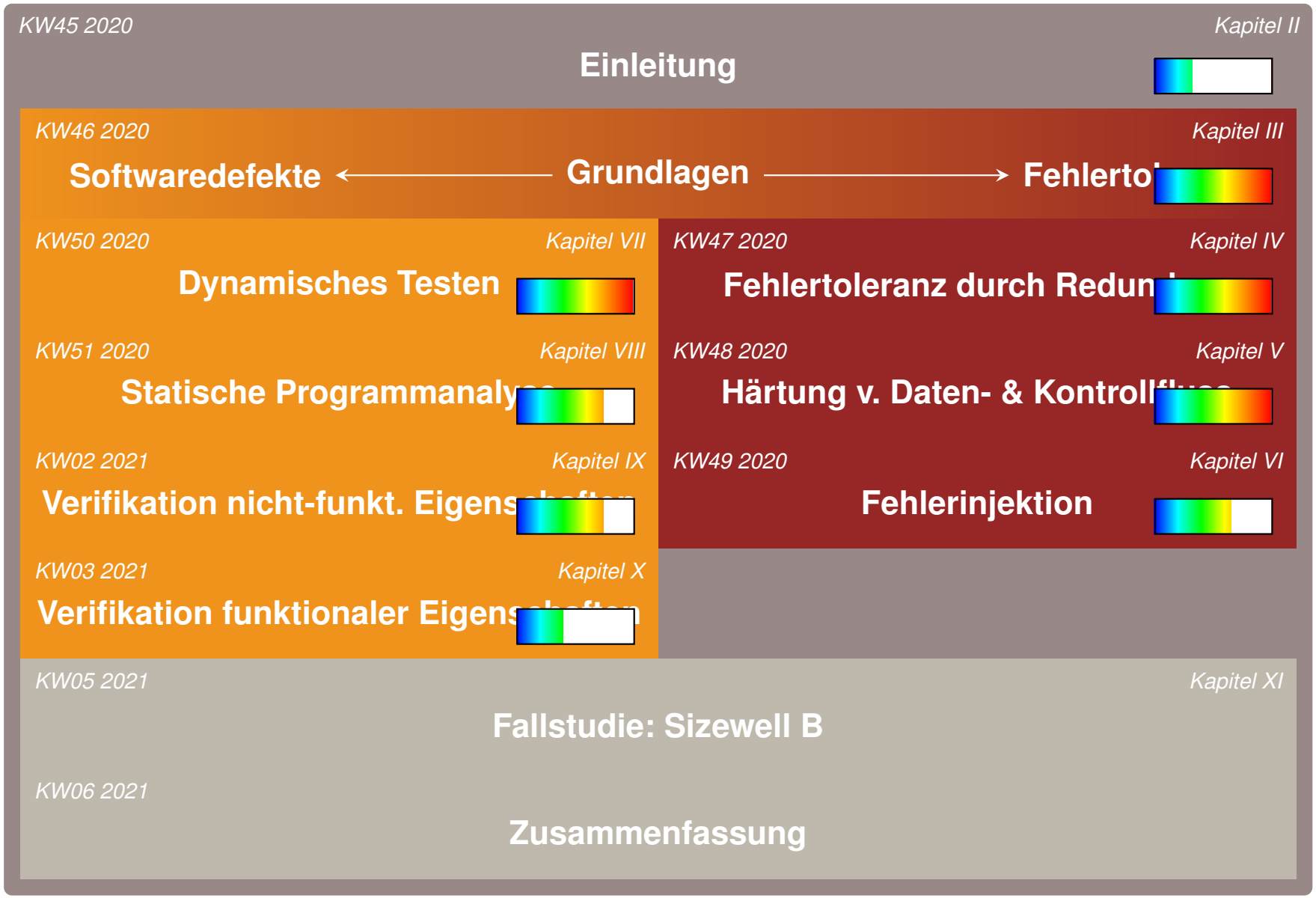
KW06 2021

Zusammenfassung

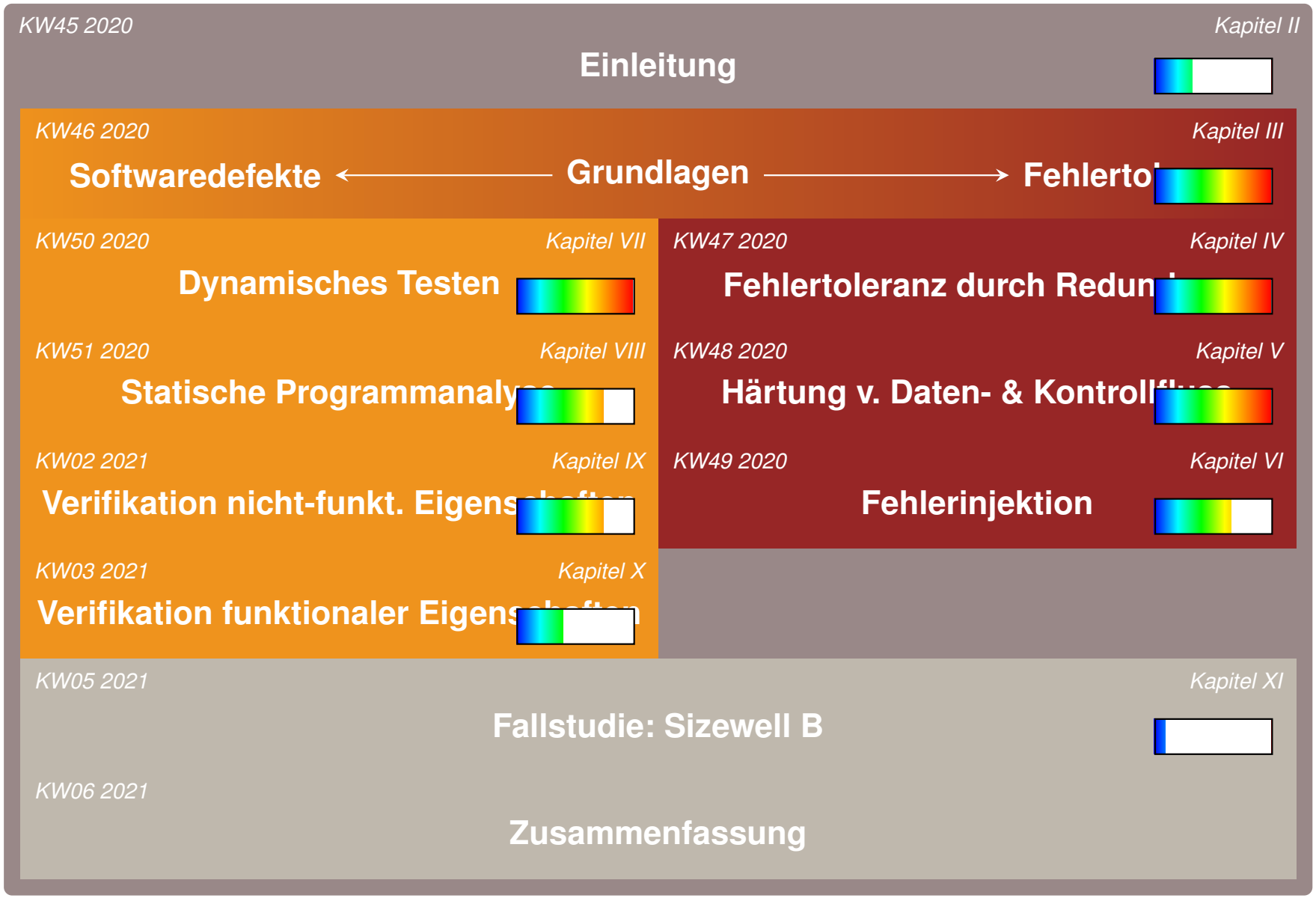
Überblick


KW45 2020
Kapitel II
Einleitung
KW46 2020
Kapitel III
Softwaredefekte
Grundlagen
Fehlertol
KW50 2020
Kapitel VII
Dynamisches Testen
KW47 2020
Kapitel IV
Fehlertoleranz durch Redun
KW51 2020
Kapitel VIII
Statische Programmanalyse
KW48 2020
Kapitel V
Härtung v. Daten- & Kontroll
KW02 2021
Kapitel IX
Verifikation nicht-funkt. Eigenschaften
KW49 2020
Kapitel VI
Fehlerinjektion
KW03 2021
Kapitel X
Verifikation funktionaler Eigenschaften
KW05 2021
Kapitel XI
Fallstudie: Sizewell B
KW06 2021
Zusammenfassung

Überblick


KW45 2020
Kapitel II
Einleitung
KW46 2020
Kapitel III
Softwaredefekte
Grundlagen
Fehlertol
KW50 2020
Kapitel VII
Dynamisches Testen
KW47 2020
Kapitel IV
Fehlertoleranz durch Redun
KW51 2020
Kapitel VIII
Statische Programmanaly
KW48 2020
Kapitel V
Härtung v. Daten- & Kontroll
KW02 2021
Kapitel IX
Verifikation nicht-funkt. Eigens
KW49 2020
Kapitel VI
Fehlerinjektion
KW03 2021
Kapitel X
Verifikation funktionaler Eigens
KW05 2021
Kapitel XI
Fallstudie: Sizewell B
KW06 2021
Zusammenfassung

Überblick


KW45 2020
Kapitel II
Einleitung
KW46 2020
Kapitel III
Softwaredefekte
Grundlagen
Fehlertol
KW50 2020
Kapitel VII
Dynamisches Testen
KW47 2020
Kapitel IV
Fehlertoleranz durch Redun
KW51 2020
Kapitel VIII
Statische Programmanaly
KW48 2020
Kapitel V
Härtung v. Daten- & Kontroll
KW02 2021
Kapitel IX
Verifikation nicht-funkt. Eigens
KW49 2020
Kapitel VI
Fehlerinjektion
KW03 2021
Kapitel X
Verifikation funktionaler Eigens
KW05 2021
Kapitel XI
Fallstudie: Sizewell B
KW06 2021
Zusammenfassung

Gliederung

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://sys.cs.tu-dortmund.de/`

oder besser noch: Schreibt mir!