

---

# Verlässliche Systemsoftware

## Fehlerinjektion

**Peter Ulbrich**

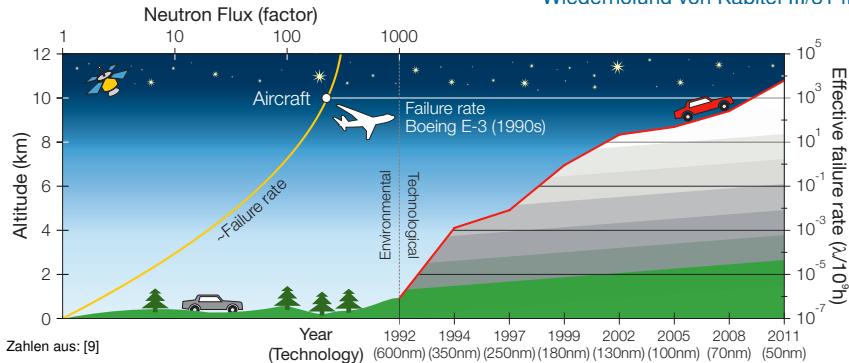
Lehrstuhl für Informatik 12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware

Technische Universität Dortmund

<https://sys.cs.tu-dortmund.de>

KW46 2021





- Bitkipper durch **Umladungen in Speicherzellen und Schaltkreisen**
  - Verursacht durch **ionisierende Strahlung**
  - Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren im Halbleitermaterial
- Rauschen durch **elektromagnetische Interferenz**
  - Verfälschung von **Kommunikation auf Bussen**
  - z. B. in Automobilen gibt es verschiedene Quellen für Wechselfelder



Extern verursachte Fehler sind die (**absolute**) **Ausnahme!**

- Ausfallrate  $\ll$  Überlebensfunktion (vgl. auch III/12)

→ Nachweis der **Wirksamkeit von Fehlertoleranzmechanismen?**




Extern verursachte Fehler sind die (**absolute**) **Ausnahme!**

- Ausfallrate  $\ll$  Überlebensfunktion (vgl. auch III/12)
- Nachweis der **Wirksamkeit von Fehlertoleranzmechanismen?**



Dedizierte **Testmethoden** sind vonnöten

- Fehlertoleranzmechanismen „verarbeiten Fehler“
  - Test dieser Mechanismen erfordert entsprechende Fehler
- Konkrete Umsetzung der Testverfahren ist aufwendig ...
  - Fehler (auch „häufige“ transiente Fehler) lassen sich **nicht einfach abwarten**
  - Fehler verursachen mitunter **sehr hohe Kosten**

 Extern verursachte Fehler sind die (**absolute**) **Ausnahme!**

- Ausfallrate  $\ll$  Überlebensfunktion (vgl. auch III/12)
- Nachweis der **Wirksamkeit von Fehlertoleranzmechanismen?**

 Dedizierte **Testmethoden** sind vonnöten

- Fehlertoleranzmechanismen „verarbeiten Fehler“
  - Test dieser Mechanismen erfordert entsprechende Fehler
- Konkrete Umsetzung der Testverfahren ist aufwendig ...
  - Fehler (auch „häufige“ transiente Fehler) lassen sich **nicht einfach abwarten**
  - Fehler verursachen mitunter **sehr hohe Kosten**

 Artificielle **Fehlerinjektion** als Mittel der Wahl

- Gezielte und reproduzierbare Erzeugung von Fehlern
- **Validierung** von Fehlertoleranzmechanismen
- **Bewertung** von Fehlertoleranz
  - **Inhärente Robustheit, Fehlerausbreitung, Fehlererkennungslatenz und -rate**

- Moderne Automobile umfassen eine Vielzahl von Schutzsystemen
  - Air-Bag (Fahrer, Beifahrer, ...), Seitenaufprallschutz, Gurtstraffer, ...
  - Frage: Wie wirksam sind diese Systeme?

- Moderne Automobile umfassen eine Vielzahl von Schutzsystemen
    - Air-Bag (Fahrer, Beifahrer, ...), Seitenaufprallschutz, Gurtstraffer, ...
- Frage: Wie wirksam sind diese Systeme?



Daten aus dem täglichen Betrieb von Autos mit realen Unfällen ...

- ... sind **nicht ausreichend vorhanden** (eher seltene Unfälle)
- ... sind **viel zu teuer** (Verlust von Menschenleben inakzeptabel)

# Beispiel: Problemstellung

Fehlerinjektion gibt es nicht nur bei Computern

- Moderne Automobile umfassen eine Vielzahl von Schutzsystemen
  - Air-Bag (Fahrer, Beifahrer, ...), Seitenaufprallschutz, Gurtstraffer, ...
- Frage: Wie wirksam sind diese Systeme?



Daten aus dem täglichen Betrieb von Autos mit realen Unfällen ...

- ... sind **nicht ausreichend vorhanden** (eher seltene Unfälle)
- ... sind **viel zu teuer** (Verlust von Menschenleben inakzeptabel)



Fehlerinjektion durch Crashtests





- 1 Grundlagen
  - Aufbau
  - Fehlermodell & Fehlerraum
  - Aktivierungsmuster
- 2 Fehlerinjektionstechniken
  - Hardware-basierte Techniken
  - Software-basierte Techniken
  - Simulations-basierte Techniken
  - Evaluierung CoRed: FAIL\*
- 3 Auswertung und Interpretation
- 4 Zusammenfassung

- **FARM-Modell** [2] definiert notwendige Voraussetzungen
  - Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie 4)

- **FARM-Modell** [2] definiert notwendige Voraussetzungen
  - Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie 4)

**Fault**       $\rightsquigarrow$  Fehlerraum

- Frontal- oder Seitenaufprall, Geschwindigkeit, ...
- Bezieht sich auf eine **realistische Fehlerhypothese**

- **FARM-Modell** [2] definiert notwendige Voraussetzungen
  - Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie 4)

**Fault**       $\rightsquigarrow$  Fehlerraum

- Frontal- oder Seitenaufprall, Geschwindigkeit, ...
- Bezieht sich auf eine **realistische Fehlerhypothese**

**Activation**  $\rightsquigarrow$  Aktivierungsmuster

- Das beschleunigte Auto fährt auf den Prellbock zu
- Das **Auftreten des Fehler** wird herbeigeführt

- **FARM-Modell** [2] definiert notwendige Voraussetzungen
  - Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie 4)

**Fault**       $\rightsquigarrow$  Fehlerraum

- Frontal- oder Seitenaufprall, Geschwindigkeit, ...
- Bezieht sich auf eine **realistische Fehlerhypothese**

**Activation**  $\rightsquigarrow$  Aktivierungsmuster

- Das beschleunigte Auto fährt auf den Prellbock zu
- Das **Auftreten des Fehler** wird herbeigeführt

**Readout**     $\rightsquigarrow$  Messergebnisse

- Deformierung der Fahrgastzelle, ...
- Erhebung der **beobachtbaren Folgen** des Fehlers

# Fehlerinjektion – Abstrakte Definition

- **FARM-Modell** [2] definiert notwendige Voraussetzungen

- Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie 4)

**Fault**       $\rightsquigarrow$  Fehlerraum

- Frontal- oder Seitenaufprall, Geschwindigkeit, ...
- Bezieht sich auf eine **realistische Fehlerhypothese**

**Activation**  $\rightsquigarrow$  Aktivierungsmuster

- Das beschleunigte Auto fährt auf den Prellbock zu
- Das **Auftreten des Fehler** wird herbeigeführt

**Readout**    $\rightsquigarrow$  Messergebnisse

- Deformierung der Fahrgastzelle, ...
- Erhebung der **beobachtbaren Folgen** des Fehlers


**Measure**    $\rightsquigarrow$  Bewertung der Messergebnisse

- Insassen würde schwere innere Verletzungen erleiden
- Wie **zuverlässig** ist mein System?

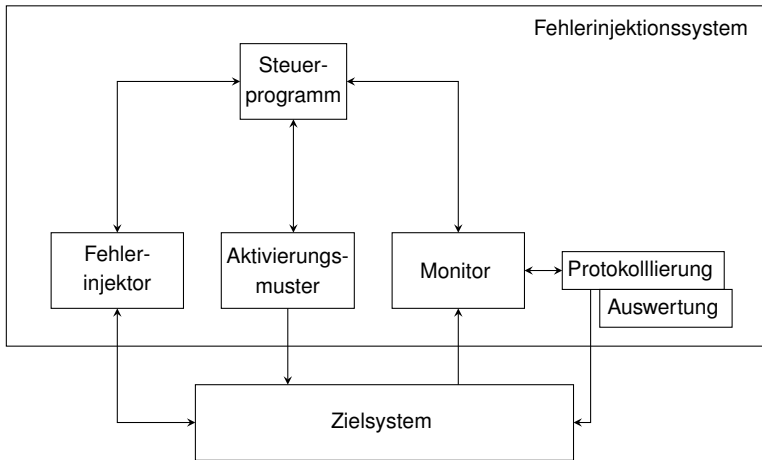


- 1 Auswahl** des zu injizierenden Fehlers
  - Unterschiedliche Prüfstände für Frontal- bzw. Seitenaufprall
- 2 Ausführung** des Aktivierungsmusters
  - Beschleunigung des Fahrzeugs auf die gewünschte Geschwindigkeit
- 3 Beobachtung** der Folgen der Fehlersituation
  - Sensoren erfassen Beschleunigungen, Verwindungen, Verformungen, ...
- 4 Auswertung** der Messergebnisse
  - Abgleich mit á-priori Wissen  $\rightsquigarrow$  Schluss auf Verletzungen



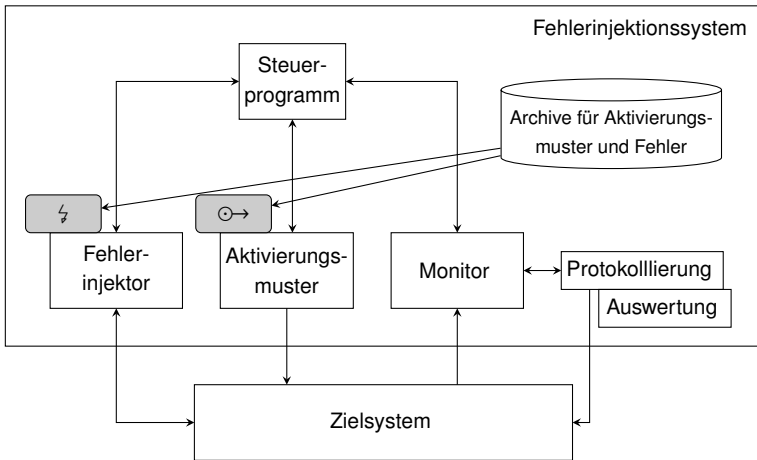
- 1 Auswahl** des zu injizierenden Fehlers
    - Unterschiedliche Prüfstände für Frontal- bzw. Seitenaufprall
  - 2 Ausführung** des Aktivierungsmusters
    - Beschleunigung des Fahrzeugs auf die gewünschte Geschwindigkeit
  - 3 Beobachtung** der Folgen der Fehlersituation
    - Sensoren erfassen Beschleunigungen, Verwindungen, Verformungen, ...
  - 4 Auswertung** der Messergebnisse
    - Abgleich mit á-priori Wissen  $\rightsquigarrow$  Schluss auf Verletzungen
-  Ein **Werkzeug** übernimmt i. d. R. die Fehlerinjektion
- Strahlungsquellen, Testschaltungen, Steuerrechner, Debugger, ...





# Genereller Aufbau von Fehlerinjektionswerkzeugen

Quelle Grafik: [4]



- Fehler können auf verschiedenen Ebenen injiziert werden [1]

## Axiomatische Modelle

- Analytische Modelle bilden das Verhalten des Systems ab
- Markov-Ketten, Petri-Netze, Zuverlässigkeitsblockdiagramme

## Empirische Modelle

- Detailliertere Modelle für Systemverhalten und -struktur
- Erfordern i. d. R. simulationsbasierte Ansätze

## Physikalische Modelle

- Reale Implementierung des Systems in Hard- und/oder Software



- Fehler können auf verschiedenen Ebenen injiziert werden [1]

## Axiomatische Modelle

- Analytische Modelle bilden das Verhalten des Systems ab
- Markov-Ketten, Petri-Netze, Zuverlässigkeitsblockdiagramme

## Empirische Modelle

- Detailliertere Modelle für Systemverhalten und -struktur
- Erfordern i. d. R. simulationsbasierte Ansätze

## Physikalische Modelle

- Reale Implementierung des Systems in Hard- und/oder Software



Wahl der Ebene hat signifikanten Einfluss auf das Fehlermodell

- Insbesondere die Mengen  $F$  und  $A$  hängen von ihnen ab
  - Fehlerhypothese: durch Software beobachtbare transiente Fehler
- Konzentration auf empirische/physikalische Modelle



- **Transiente Fehler** haben ihren Ursprung im physikalischen Modell
  - Umwelteinflüsse bewirken **Zustands-/Ladungsveränderungen**
  - Als **Bitkipper** im empirischen Modell beobachtbar
- Annahme: Bitkipper werden in der Software **sichtbar**



- **Transiente Fehler** haben ihren Ursprung im physikalischen Modell
  - Umwelteinflüsse bewirken **Zustands-/Ladungsveränderungen**
  - Als **Bitkipper** im empirischen Modell beobachtbar
- Annahme: Bitkipper werden in der Software **sichtbar**



Klassisches Fehlermodell → **Einzelbit-Einzelfehler-Annahme**

- Fehler sind **gleichverteilt** und **unabhängig**
- Bitfehler treten **im Speicher** auf
- Zielsystem ist einfache **RISC-Architektur** (load/store)



- **Transiente Fehler** haben ihren Ursprung im physikalischen Modell
  - Umwelteinflüsse bewirken **Zustands-/Ladungsveränderungen**
  - Als **Bitkipper** im empirischen Modell beobachtbar
- Annahme: Bitkipper werden in der Software **sichtbar**

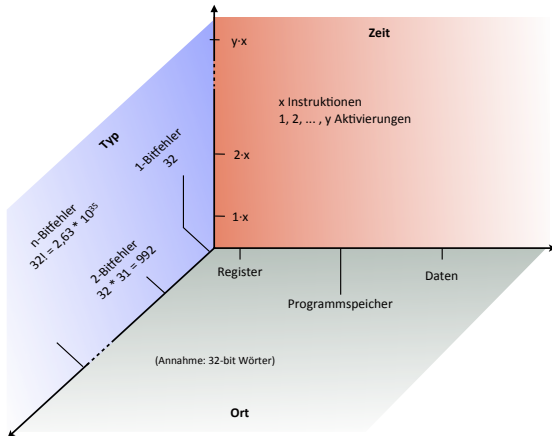
☞ Klassisches Fehlermodell → **Einzelbit-Einzelfehler-Annahme**

- Fehler sind **gleichverteilt** und **unabhängig**
- Bitfehler treten **im Speicher** auf
- Zielsystem ist einfache **RISC-Architektur** (load/store)

⚠ **Dies ist eine starke Vereinfachung**

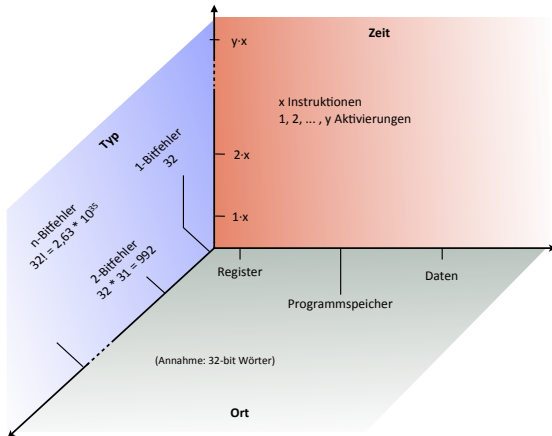
- Fehlermuster können deutlich **komplexer** sein (z.B. durch Pipelines) [3]
  - Fehler treten als **Bündelstörungen** (engl. *error bursts*) auf
  - Anfälligkeit der Hardware für **Gleichtaktfehler** (z.B. CPU-Takt-Kontrolle)
- In der Praxis wurden 95 % Einzelbit-Fehler beobachtet [5, 10]

## Ein Musterbeispiel für eine kombinatorische Explosion





Ein Musterbeispiel für eine kombinatorische Explosion



Selbst 1-Bitfehler spannen einen **dramatisch großen Fehlerraum** auf!

- In welchem Register möchte man ein Bit kippen lassen?
- Nach welcher Instruktion soll das Bit gekippt werden?



- Umfassen die Durchführung der zu schützenden Berechnung
  - Einfachster Fall: Vektoren von Eingabeparametern
    - i. d. R. nur für einfache Soft- oder Hardwareimplementierungen anwendbar
    - Präparation **anwendungsspezifischer, passender Eingabedaten**
    - Sensordaten, Netzwerkpakete, ...
  - Kombinationen aus Soft- und Hardware  $\rightsquigarrow$  Kontrollfluss
    - Unterbrechungen werden hier zum Problem
  - Echtzeitsysteme erfordern eine **Umgebungssimulation** (s. VII/?? ff.)
    - Durchführung am „realen Objekt“ häufig nicht möglich/zu gefährlich
    - Eingaben müssen das Verhalten des physikalischen Objekts widerspiegeln

- Umfassen die Durchführung der zu schützenden Berechnung
  - Einfachster Fall: Vektoren von Eingabeparametern
    - i. d. R. nur für einfache Soft- oder Hardwareimplementierungen anwendbar
    - Präparation **anwendungsspezifischer, passender Eingabedaten**
    - Sensordaten, Netzwerkpakete, ...
  - Kombinationen aus Soft- und Hardware  $\rightsquigarrow$  Kontrollfluss
    - Unterbrechungen werden hier zum Problem
  - Echtzeitsysteme erfordern eine **Umgebungssimulation** (s. VII/?? ff.)
    - Durchführung am „realen Objekt“ häufig nicht möglich/zu gefährlich
    - Eingaben müssen das Verhalten des physikalischen Objekts widerspiegeln



**Referenzlauf** (engl. *golden run*) liefert das gewünschte Verhalten

- Bestimmung des Ergebnisses ohne Fehlerinjektion
  - Aufzeichnung des Ein-/Ausgabeverhaltens des SUT
- Dient dem späteren Abgleich und der Erkennung von SDCs

- Umfassen die Durchführung der zu schützenden Berechnung
  - Einfachster Fall: Vektoren von Eingabeparametern
    - i. d. R. nur für einfache Soft- oder Hardwareimplementierungen anwendbar
    - Präparation **anwendungsspezifischer, passender Eingabedaten**
    - Sensordaten, Netzwerkpakete, ...
  - Kombinationen aus Soft- und Hardware  $\rightsquigarrow$  Kontrollfluss
    - Unterbrechungen werden hier zum Problem
  - Echtzeitsysteme erfordern eine **Umgebungssimulation** (s. VII/?? ff.)
    - Durchführung am „realen Objekt“ häufig nicht möglich/zu gefährlich
    - Eingaben müssen das Verhalten des physikalischen Objekts widerspiegeln

 **Referenzlauf** (engl. *golden run*) liefert das gewünschte Verhalten

- Bestimmung des Ergebnisses ohne Fehlerinjektion
  - Aufzeichnung des Ein-/Ausgabeverhaltens des SUT
- Dient dem späteren Abgleich und der Erkennung von SDCs

 Anschließend folgt die **eigentliche Fehlerinjektion**

→ Einbringen des gewünschten Fehlers





Eine **Kampagne** (engl. *campaign*) beschreibt einen Testfall

- Ein bestimmter Ausführungspfad des Systems
- Hieraus ergeben sich konkrete Möglichkeiten der **Fehleraktivierung**
- Der entstehende Fehlerraum  $\rightsquigarrow$  Vielzahl von Einzelexperimenten



Eine **Kampagne** (engl. *campaign*) beschreibt einen Testfall

- Ein bestimmter Ausführungspfad des Systems
- Hieraus ergeben sich konkrete Möglichkeiten der **Fehleraktivierung**
- Der entstehende Fehlerraum  $\rightsquigarrow$  Vielzahl von Einzelexperimenten

■ Fehlerinjektion führt die einzelnen **Experimenten** aus:

- 1 Der Steuerrechner wählt
  - Einen **Fehler**  $f$  aus dem **Fehlerraum**  $F$  und
  - Ein **Aktivierungsmuster**  $a$  aus der **Menge der Aktivierungsmuster**  $A$



Eine **Kampagne** (engl. *campaign*) beschreibt einen Testfall

- Ein bestimmter Ausführungspfad des Systems
- Hieraus ergeben sich konkrete Möglichkeiten der **Fehleraktivierung**
- Der entstehende Fehlerraum  $\rightsquigarrow$  Vielzahl von Einzelexperimenten

■ Fehlerinjektion führt die einzelnen **Experimenten** aus:

**1** Der Steuerrechner wählt

- Einen **Fehler**  $f$  aus dem **Fehlerraum**  $F$  und
- Ein **Aktivierungsmuster**  $a$  aus der **Menge der Aktivierungsmuster**  $A$

**2** Anschließend wird die Fehlerinjektion durchgeführt

- Starten des Aktivierungsmusters  $a$
- Injizieren des Fehlers  $f$





Eine **Kampagne** (engl. *campaign*) beschreibt einen Testfall

- Ein bestimmter Ausführungspfad des Systems
- Hieraus ergeben sich konkrete Möglichkeiten der **Fehleraktivierung**
- Der entstehende Fehlerraum  $\rightsquigarrow$  Vielzahl von Einzelexperimenten

■ Fehlerinjektion führt die einzelnen **Experimenten** aus:

**1** Der Steuerrechner wählt

- Einen **Fehler**  $f$  aus dem **Fehlerraum**  $F$  und
- Ein **Aktivierungsmuster**  $a$  aus der **Menge der Aktivierungsmuster**  $A$

**2** Anschließend wird die Fehlerinjektion durchgeführt

- Starten des Aktivierungsmusters  $a$
- Injizieren des Fehlers  $f$

**3** Abschließend werden die **Messergebnisse**  $r$  erfasst







Eine **Kampagne** (engl. *campaign*) beschreibt einen Testfall

- Ein bestimmter Ausführungspfad des Systems
- Hieraus ergeben sich konkrete Möglichkeiten der **Fehleraktivierung**
- Der entstehende Fehlerraum  $\rightsquigarrow$  Vielzahl von Einzelexperimenten

■ Fehlerinjektion führt die einzelnen **Experimenten** aus:

**1** Der Steuerrechner wählt

- Einen **Fehler**  $f$  aus dem **Fehlerraum**  $F$  und
- Ein **Aktivierungsmuster**  $a$  aus der **Menge der Aktivierungsmuster**  $A$

**2** Anschließend wird die Fehlerinjektion durchgeführt

- Starten des Aktivierungsmusters  $a$
- Injizieren des Fehlers  $f$

**3** Abschließend werden die **Messergebnisse**  $r$  erfasst

- Jedes Experiment wird durch einen **Tupel**  $(f, a, r)$  beschrieben



⚠ Eine **Kampagne** (engl. *campaign*) beschreibt einen Testfall

- Ein bestimmter Ausführungspfad des Systems
- Hieraus ergeben sich konkrete Möglichkeiten der **Fehleraktivierung**
- Der entstehende Fehlerraum  $\rightsquigarrow$  Vielzahl von Einzelexperimenten

■ Fehlerinjektion führt die einzelnen **Experimenten** aus:

1 Der Steuerrechner wählt

- Einen **Fehler**  $f$  aus dem **Fehlerraum**  $F$  und
- Ein **Aktivierungsmuster**  $a$  aus der **Menge der Aktivierungsmuster**  $A$

2 Anschließend wird die Fehlerinjektion durchgeführt

- Starten des Aktivierungsmusters  $a$
- Injizieren des Fehlers  $f$

3 Abschließend werden die **Messergebnisse**  $r$  erfasst

- Jedes Experiment wird durch einen **Tupel**  $(f, a, r)$  beschrieben



Eine **Kampagne** (engl. *campaign*) beschreibt einen Testfall

- Ein bestimmter Ausführungspfad des Systems
- Hieraus ergeben sich konkrete Möglichkeiten der **Fehleraktivierung**
- Der entstehende Fehlerraum  $\rightsquigarrow$  Vielzahl von Einzelexperimenten

■ Fehlerinjektion führt die einzelnen **Experimenten** aus:

**1** Der Steuerrechner wählt

- Einen **Fehler**  $f$  aus dem **Fehlerraum**  $F$  und
- Ein **Aktivierungsmuster**  $a$  aus der **Menge der Aktivierungsmuster**  $A$

**2** Anschließend wird die Fehlerinjektion durchgeführt

- Starten des Aktivierungsmusters  $a$
- Injizieren des Fehlers  $f$

**3** Abschließend werden die **Messergebnisse**  $r$  erfasst

- Jedes Experiment wird durch einen **Tupel**  $(f, a, r)$  beschrieben



**Gesamtheit der Messergebnisse**  $R \rightsquigarrow$  **Zuverlässigkeitsmaße**

- Fehlererkennungslatenz- und rate, Erholungszeit, ...



## 1 Grundlagen

- Aufbau
- Fehlermodell & Fehlerraum
- Aktivierungsmuster

## 2 Fehlerinjektionstechniken

- Hardware-basierte Techniken
- Software-basierte Techniken
- Simulations-basierte Techniken
- Evaluierung CoRed: FAIL\*

## 3 Auswertung und Interpretation

## 4 Zusammenfassung

- Injektion von Fehler auf allen Ebenen eines Rechensystems möglich

- Injektion von Fehler auf allen Ebenen eines Rechensystems möglich

☞ Es existiert eine Vielzahl verschiedener Techniken [11]

- **Hardware-basierte** Techniken
  - Integriert spezialisierte Hardware in das zu testende System
- **Software-basierte** Techniken
  - Modifiziert die zu testende Software, um fehlerhaftes Verhalten zu erzeugen
- **Simulations-basierte** Techniken
  - Simulation des zu testenden Systems, basierend z. B. auf Emulator
- **Hybride Ansätze**
  - Vereinigt zwei oder mehr der oben genannten Ansätze

- Hardware-basierte Implementierung
  - Enthaltene Testschaltungen injizieren direkt transiente Fehler
  - Basiert auf dem komplett gefertigten Schaltkreis
    - Gefertigter und getesteter Schaltkreis verhalten sich identisch
    - Das Verfahren ist **nicht-intrusiv** (engl. *non-intrusive*)

Hierbei stehen folgende Möglichkeiten offen:

- Hardware-basierte Implementierung
  - Enthaltene Testschaltungen injizieren direkt transiente Fehler
  - Basiert auf dem komplett gefertigten Schaltkreis
    - Gefertigter und getesteter Schaltkreis verhalten sich identisch
    - Das Verfahren ist **nicht-intrusiv** (engl. *non-intrusive*)

Hierbei stehen folgende Möglichkeiten offen:

- **Mit Kontakt**  $\rightsquigarrow$  direkte Manipulation elektrischer Signale
  - Anbringungen aktiver Messfühler an einzelnen Prozessorpins
    - Hängen gebliebene Signale (engl. *stuck-at*, *stuck-open*)
    - Überbrückung mehrerer Signale (engl. *bridging*)
  - Verwendung von **Zwischensockeln** (engl. *socket insertion*)
    - Implementierung beliebiger Funktionen auf den eingehenden Signalen



- Hardware-basierte Implementierung
  - Enthaltene Testschaltungen injizieren direkt transiente Fehler
  - Basiert auf dem komplett gefertigten Schaltkreis
    - Gefertigter und getesteter Schaltkreis verhalten sich identisch
    - Das Verfahren ist **nicht-intrusiv** (engl. *non-intrusive*)

Hierbei stehen folgende Möglichkeiten offen:

- **Mit Kontakt**  $\rightsquigarrow$  direkte Manipulation elektrischer Signale
  - Anbringungen aktiver Messfühler an einzelnen Prozessorpins
    - Hängen gebliebene Signale (engl. *stuck-at*, *stuck-open*)
    - Überbrückung mehrerer Signale (engl. *bridging*)
  - Verwendung von **Zwischensockeln** (engl. *socket insertion*)
    - Implementierung beliebiger Funktionen auf den eingehenden Signalen
- **Ohne Kontakt**  $\rightsquigarrow$  indirekte Manipulation elektrischer Signale
  - Der Schaltkreis wird physikalischen Phänomenen ausgesetzt
    - Radioaktive Strahlung, elektromagnetische Interferenz, Hitze, ...
    - Rufen (relativ unkontrolliert) transiente/permanente Fehler hervor

## Vorteile

- + Hohe zeitliche Auflösung der Injektion und Beobachtung
  - Ermöglicht akkurate Aussagen zu Fehlererkennungsrate und -latenz
- + Unterstützt nicht-intrusive Fehlerinjektion
  - Betrachtet das komplette System, sowohl Soft- als auch Hardware
- + Durchführung der Experimente ist sehr schnell

## Vorteile

- + Hohe zeitliche Auflösung der Injektion und Beobachtung
  - Ermöglicht akkurate Aussagen zu Fehlererkennungsrate und -latenz
- + Unterstützt nicht-intrusive Fehlerinjektion
  - Betrachtet das komplette System, sowohl Soft- als auch Hardware
- + Durchführung der Experimente ist sehr schnell

## Nachteile

- Eine Beschädigung des getesteten Systems ist möglich
- Hohe Integrationsdichten erschweren die Fehlerinjektion
- Erfordert spezielle Hardware  $\rightsquigarrow$  geringe Portierbarkeit
- Eingeschränkte Kontrollier- und Beobachtbarkeit
  - Nur bestimmte Fehlertypen sind injizierbar
  - Nicht alle Stellen des Schaltkreises sind direkt zugänglich
- Fehlerabdeckung unbekannt (kontaktlose Verfahren)

- Spezielle Softwarekomponenten übernehmen die Fehlerinjektion



- **Spezielle Softwarekomponenten** übernehmen die Fehlerinjektion
- **Zur Übersetzungszeit** (engl. *compile-time*)
  - Wird das Programmabbild verändert, bevor es geladen wird
    - Für die Fehlerinjektion werden gezielt Software-Defekte eingebracht
    - Die eigentliche Fehlerinjektion ist also die Erzeugung des Abbilds
  - Ausführung des Abbilds aktiviert die eingefügten Defekte
    - Diese simulieren transiente/permanente Hard-/Softwarefehler



- **Spezielle Softwarekomponenten** übernehmen die Fehlerinjektion
- **Zur Übersetzungszeit** (engl. *compile-time*)
  - Wird das Programmabbild verändert, bevor es geladen wird
    - Für die Fehlerinjektion werden gezielt Software-Defekte eingebracht
    - Die eigentliche Fehlerinjektion ist also die Erzeugung des Abbilds
  - Ausführung des Abbilds aktiviert die eingefügten Defekte
    - Diese simulieren transiente/permanente Hard-/Softwarefehler
- **Zur Laufzeit** (engl. *run-time*)
  - Erfordert die Aktivierung des Fehlerinjektionsmechanismus
    - z. B. durch **Auszeiten**, **Traps** oder **Instrumentierung**
    - Die Behandlung der Ereignisse führt die Fehlerinjektion durch
  - Instrumentierung bereitet die Fehlerinjektion vor
    - Bringt gezielt Instruktionen in das Programmabbild ein
    - Diese aktivieren dann die Fehlerinjektion

## Vorteile

- + Sehr flexible Injektion von Fehlern möglich
  - Fehler in Registern, Speicher, bei der Kommunikation, im Zeitbereich
  - Injektion ist in Simulationen und realen Systemen möglich
- + Durchführung der Experimente ist sehr schnell
- + Keine Spezialhardware erforderlich



## Vorteile

- + Sehr flexible Injektion von Fehlern möglich
  - Fehler in Registern, Speicher, bei der Kommunikation, im Zeitbereich
  - Injektion ist in Simulationen und realen Systemen möglich
- + Durchführung der Experimente ist sehr schnell
- + Keine Spezialhardware erforderlich

## Nachteile

- Eingeschränkte Auswahl von Injektionsstellen
  - i. d. R. auf der Ebene von Assemblerinstruktionen
- Eingeschränkte Kontrollier- und Beobachtbarkeit
- Erfordert eine Modifikation der getesteten Software
  - Letztendlich wird ein anderes Programmabbild verwendet
  - Injektionsverfahren ist intrusiv  $\leadsto$  es beeinflusst das Verhalten





- Ein Modell des zu testenden Systems wird im Simulator ausgeführt
  - Das Modell umfasst z. B. Prozessor, Peripherie, Kommunikation, ...

- Ein Modell des zu testenden Systems wird im Simulator ausgeführt
  - Das Modell umfasst z. B. Prozessor, Peripherie, Kommunikation, ...




Fehlerinjektion basiert auf:

- **Modifikation des Systemmodells**  $\leadsto$  vgl. software-basierte Lösung
  - **Saboteure:** „boshafte“ in das Modell eingebrachte Komponenten
    - Aktivierung  $\leadsto$  Ausführung der Fehlerinjektion (z. B. Signalstörung)
    - Ansonsten verhalten sie sich unauffällig
  - **Mutanten:** „boshafft“ veränderte Komponenten des Modells
    - Veränderte, existierende Komponenten injizieren Fehler


- Ein Modell des zu testenden Systems wird im Simulator ausgeführt
  - Das Modell umfasst z. B. Prozessor, Peripherie, Kommunikation, ...

☞ Fehlerinjektion basiert auf:

- **Modifikation des Systemmodells**  $\leadsto$  vgl. software-basierte Lösung
  - **Saboteure:** „boshafte“ in das Modell eingebrachte Komponenten
    - Aktivierung  $\leadsto$  Ausführung der Fehlerinjektion (z. B. Signalstörung)
    - Ansonsten verhalten sie sich unauffällig
  - **Mutanten:** „boshafft“ veränderte Komponenten des Modells
    - Veränderte, existierende Komponenten injizieren Fehler
- **Modifikation der Simulation**  $\leadsto$  vgl. hardware-basierte Lösung
  - Erfordert keine Veränderung des Modells sondern des Simulators
  - Injektion von Fehlern an beliebigen Stellen/Zeitpunkten
    - Modifikation von Zuständen oder Signalen

 Vereinfachung: In Software sichtbare Fehler  $\rightsquigarrow$  **Bitkipper**

- Ihr Zustandekommen ist uninteressant
  - Verzicht auf eine physikalische Fehlerinjektion
- Konsequenzen hinsichtlich der Validität des Fehlermodells (vgl. Folie 10)


 Vereinfachung: In Software sichtbare Fehler  $\rightsquigarrow$  **Bitkipper**

- Ihr Zustandekommen ist uninteressant
- Verzicht auf eine physikalische Fehlerinjektion
- Konsequenzen hinsichtlich der Validität des Fehlermodells (vgl. Folie 10)

 Fehlerinjektion bringen Bitkipper direkt in den Ausführungsstrom ein

- Keine direkte, physikalische Manipulation notwendig
- **Simulation von Fehlern auf Registertransferebene**
  - Nicht zu verwechseln mit **Fehlersimulation** (engl. *fault simulation*)
  - Hier wird ein Schaltkreis in Anwesenheit von Fehlern simuliert



 Vereinfachung: In Software sichtbare Fehler  $\leadsto$  **Bitkipper**

- Ihr Zustandekommen ist uninteressant
- Verzicht auf eine physikalische Fehlerinjektion
- Konsequenzen hinsichtlich der Validität des Fehlermodells (vgl. Folie 10)

 Fehlerinjektion bringen Bitkipper direkt in den Ausführungsstrom ein

- Keine direkte, physikalische Manipulation notwendig
- **Simulation von Fehlern auf Registertransferebene**
  - Nicht zu verwechseln mit **Fehlersimulation** (engl. *fault simulation*)
  - Hier wird ein Schaltkreis in Anwesenheit von Fehlern simuliert

### ■ **Software Implemented Fault Injection (SWIFI)**

- Falls eine Softwareimplementierung die Verfälschung durchführt
- Alternativ: Verwendung spezialisierter Debug-Schnittstellen (z. B. JTAG)
- **Scan-Chain Implemented Fault Injection (SCIFI)**



## Vorteile

- + Größtmögliche Flexibilität: Abstraktionsebene/Fehlerhypothese
  - Auf elektrischer, logischer, funktionaler und architektureller Ebene
  - Injektion zeitlicher, transienter und permanenter Fehler
- + Nicht-intrusive Injektion möglich (unverändertes Programmabbild)
- + Erfordert keine Spezialhardware
- + Maximaler Grad an Kontrollier- und Beobachtbarkeit

## Vorteile

- + Größtmögliche Flexibilität: Abstraktionsebene/Fehlerhypothese
  - Auf elektrischer, logischer, funktionaler und architektureller Ebene
  - Injektion zeitlicher, transienter und permanenter Fehler
- + Nicht-intrusive Injektion möglich (unverändertes Programmabbild)
- + Erfordert keine Spezialhardware
- + Maximaler Grad an Kontrollier- und Beobachtbarkeit

## Nachteile

- Hoher Zeitaufwand
  - Erfordert die Entwicklung von (detaillierten) Systemmodellen
  - Die Simulationsgeschwindigkeit ist häufig niedrig
- Hängt von der Akkuratheit des Systemmodells ab
  - Kein 100%-iges Abbild der Realität (→ keine „Echtzeitsimulation“)





- Validierung von CoRed (s. V/36 ff.) durch Fehlerinjektion
  - Erster Ansatz: Debug-Schnittstelle des TriCore (OCDS)
  - Steuerrechner: Debugger Trace 32 von Lauterbach
    - Skriptgesteuerte Ausführung von Ausführung, Injektion und Protokollierung



- Validierung von CoRed (s. V/36 ff.) durch Fehlerinjektion
  - Erster Ansatz: Debug-Schnittstelle des TriCore (OCDS)
  - Steuerrechner: Debugger Trace 32 von Lauterbach
    - Skriptgesteuerte Ausführung von Ausführung, Injektion und Protokollierung
- ☞ Durchführung von Fehlerinjektion ist eine **große Herausforderung**
  - Man kämpft mit einem **riesigen Fehlerraum**
  - Experimentbeschreibung ist **nicht standardisiert/wiederverwendbar**
  - **Hoher zeitlicher Aufwand:** 1s/Experiment \* 400.000 Experimente  $\leadsto$  110 h



### ■ Validierung von CoRed (s. V/36 ff.) durch Fehlerinjektion

- Erster Ansatz: Debug-Schnittstelle des TriCore (OCDS)
- Steuerrechner: Debugger Trace 32 von Lauterbach
  - Skriptgesteuerte Ausführung von Ausführung, Injektion und Protokollierung

### ☞ Durchführung von Fehlerinjektion ist eine **große Herausforderung**

- Man kämpft mit einem **riesigen Fehlerraum**
- Experimentbeschreibung ist **nicht standardisiert/wiederverwendbar**
- **Hoher zeitlicher Aufwand**: 1s/Experiment \* 400.000 Experimente  $\leadsto$  110 h

### ⚠ Prinzipiell existiert eine Vielzahl von Werkzeugen, **aber**:

- Diese sind **hochgradig proprietär**
  - Eigene Fehlermodelle, Experimentbeschreibung, Ergebnisauswertung
- An **bestimmte Zielplattformen** gebunden
  - Erweitern häufig (veraltete Versionen) existierender Emulatoren

→ Eine einfache Verwendung „out-of-the-box“ unmöglich



- FAIL\*  $\rightsquigarrow$  **Fault Injection Leveraged**
  - Vorrangiges Entwurfsziel: **Flexibilität** bei der Fehlerinjektion
  - Effizient durch intelligente **Reduktion des Fehlerraums**



## ■ FAIL\* $\rightsquigarrow$ Fault Injection Leveraged

- Vorrangiges Entwurfsziel: **Flexibilität** bei der Fehlerinjektion
- Effizient durch intelligente **Reduktion des Fehlerraums**

## ☞ Verwendung existierender virtueller Plattformen

- Aktuelle, gewartete Softwarebasis
- Schneller Wirtsrechner  $\rightsquigarrow$  schnelle Durchführung von Experimenten
- Voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform
- Verschiedene Zielplattformen (Bochs, Gem5, OpenOCD, ...)



## ■ FAIL\* $\rightsquigarrow$ **Fault Injection Leveraged**

- Vorrangiges Entwurfsziel: **Flexibilität** bei der Fehlerinjektion
- Effizient durch intelligente **Reduktion des Fehlerraums**

## ☞ Verwendung **existierender virtueller Plattformen**

- Aktuelle, gewartete Softwarebasis
- Schneller Wirtsrechner  $\rightsquigarrow$  schnelle Durchführung von Experimenten
- Voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform
- Verschiedene Zielplattformen (Bochs, Gem5, OpenOCD, ...)

## ☞ Schaffung einer **abstrakten Schnittstelle** zu diesen Plattformen

- Wiederverwendbare Beschreibung von Experimenten



## ■ FAIL\* $\rightsquigarrow$ Fault Injection Leveraged

- Vorrangiges Entwurfsziel: **Flexibilität** bei der Fehlerinjektion
- Effizient durch intelligente **Reduktion des Fehlerraums**

## ☞ Verwendung existierender virtueller Plattformen

- Aktuelle, gewartete Softwarebasis
- Schneller Wirtsrechner  $\rightsquigarrow$  schnelle Durchführung von Experimenten
- Voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform
- Verschiedene Zielplattformen (Bochs, Gem5, OpenOCD, ...)

## ☞ Schaffung einer **abstrakten Schnittstelle** zu diesen Plattformen

- Wiederverwendbare Beschreibung von Experimenten

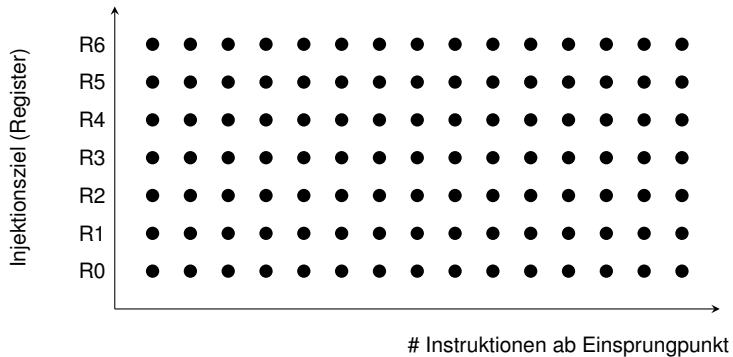


Mehr zur Anwendung von FAIL\* in den Übungen!



# Reduktion der Kampagnendauer

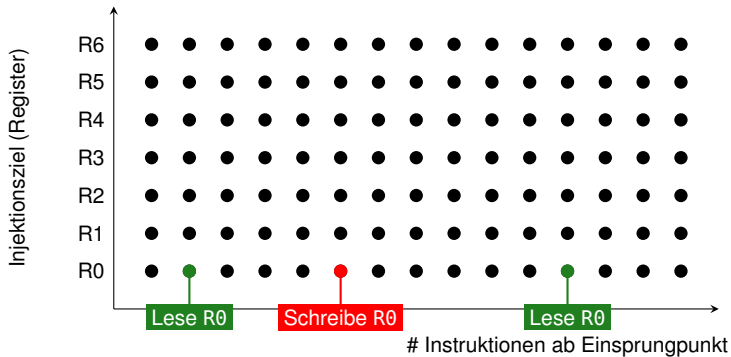
- Reduktion des Fehlerrums durch „fault-space pruning“





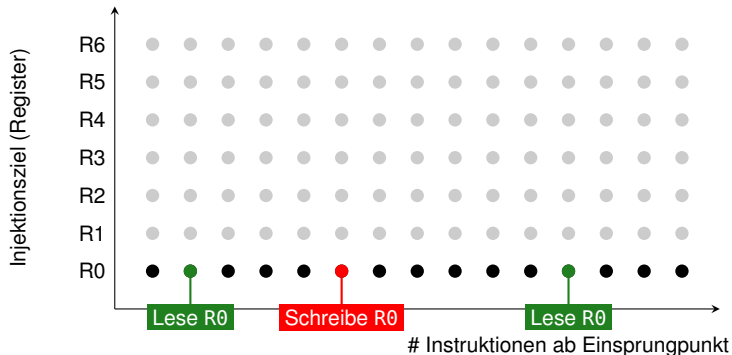
# Reduktion der Kampagnendauer

- Reduktion des Fehlerraus durch „fault-space pruning“



# Reduktion der Kampagnendauer

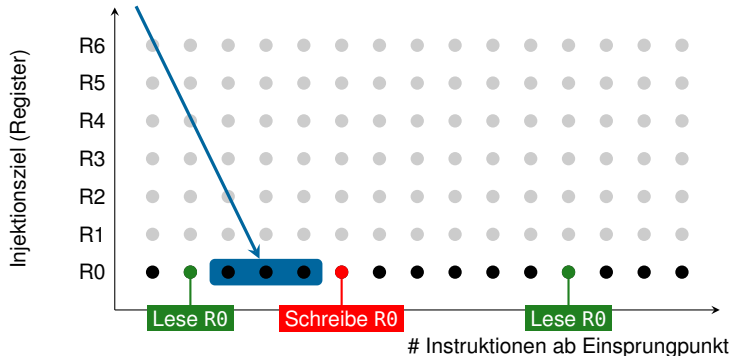
- Reduktion des Fehlerrums durch „fault-space pruning“
  - Register R1 ... R6 sind uninteressant



# Reduktion der Kampagnendauer

## ■ Reduktion des Fehlerrahms durch „fault-space pruning“

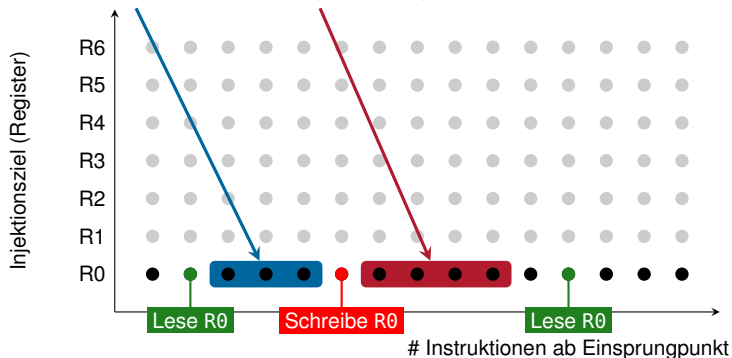
- Register R1 ... R6 sind uninteressant
- Eliminiere **unwirksame** und



# Reduktion der Kampagnendauer

## ■ Reduktion des Fehlerrums durch „fault-space pruning“

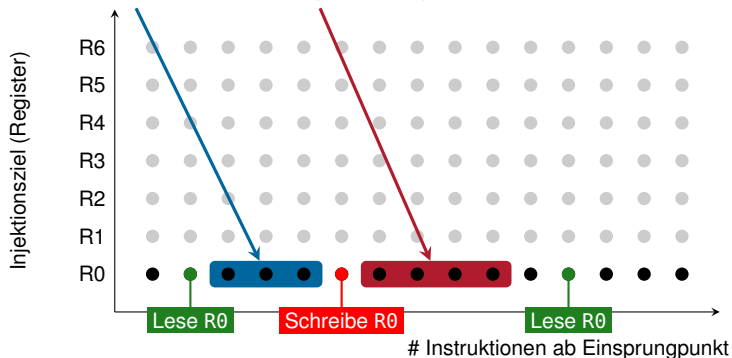
- Register R1 ... R6 sind uninteressant
- Eliminiere **unwirksame** und **idempotente** Injektionen



# Reduktion der Kampagnendauer

## ■ Reduktion des Fehlerrahms durch „fault-space pruning“

- Register R1 ... R6 sind uninteressant
- Eliminiere **unwirksame** und **idempotente** Injektionen



## ■ Einzelne Experimente sind **unabhängig voneinander**

→ Sie lassen sich **hervorragend parallelisieren**

- Auf mehreren Kernen, Prozessoren, Rechnern, ... in der Cloud



## 1 Grundlagen

- Aufbau
- Fehlermodell & Fehlerraum
- Aktivierungsmuster

## 2 Fehlerinjektionstechniken

- Hardware-basierte Techniken
- Software-basierte Techniken
- Simulations-basierte Techniken
- Evaluierung CoRed: FAIL\*

## 3 Auswertung und Interpretation

## 4 Zusammenfassung



- Mächtigkeit des Zielsystems bestimmt erfassbare Messergebnisse

- Mächtigkeit des Zielsystems bestimmt erfassbare Messergebnisse



Hilfreich sind folgende Informationen

- Fehlerparameter
  - Wann und wo wurde der Fehler injiziert? Welcher Typ wurde injiziert?
- Systemkontext
  - Werte der Register, Auszug eines Speicherbereichs
  - Was hat der Fehler verändert? Wie hat er sich fortgepflanzt?
- Rückgabewerte, Rechenergebnisse
  - Hat die Fehlerinjektion die Berechnung beeinflusst?
- Ausführungszeit
  - Wie lange dauert es bis der Fehler aktiviert, entdeckt oder maskiert wurde?
- Fehlererkennungsmechanismen
  - Welcher Fehlerdetektor schlug an?



# Messergebnisse und ihre Bewertung

---

- Mächtigkeit des Zielsystems bestimmt erfassbare Messergebnisse



Hilfreich sind folgende Informationen

- Fehlerparameter

- Wann und wo wurde der Fehler injiziert? Welcher Typ wurde injiziert?

- Systemkontext

- Werte der Register, Auszug eines Speicherbereichs
- Was hat der Fehler verändert? Wie hat er sich fortgepflanzt?

- Rückgabewerte, Rechenergebnisse

- Hat die Fehlerinjektion die Berechnung beeinflusst?

- Ausführungszeit

- Wie lange dauert es bis der Fehler aktiviert, entdeckt oder maskiert wurde?

- Fehlererkennungsmechanismen

- Welcher Fehlerdetektor schlug an?



Hieraus werden **Maße zur Beurteilung der Fehlertoleranz** bestimmt

- Rate der Fehlererkennung und Maskierung, Latenz, Erholungszeit



- Wie viel sicherer ist mein System durch Fehlertoleranz geworden?
  - Typische Antwort: x % besser
  - Basierend auf den beobachteten Fehlerwahrscheinlichkeit:

$$r = \frac{P(sdc)_{\text{Ungeschützt}}}{P(sdc)_{\text{Fehlertolerant}}}$$

- Wie viel sicherer ist mein System durch Fehlertoleranz geworden?
  - Typische Antwort: x % besser
  - Basierend auf den beobachteten Fehlerwahrscheinlichkeit:

$$r = \frac{P(sdc)_{\text{Ungeschützt}}}{P(sdc)_{\text{Fehlertolerant}}}$$



Gültigkeit nur bei **Äquivalenz der Fehlerräume**

- Beziehungsweise einer statistisch signifikanten Überapproximation
- Klassisches Vorgehen bei hardware-basierter Fehlerinjektion
  - Strahlungsquelle bleibt beispielsweise immer gleich
- Hinreichend große Montecarlo-Experimente

- Wie viel sicherer ist mein System durch Fehlertoleranz geworden?
  - Typische Antwort: x % besser
  - Basierend auf den beobachteten Fehlerwahrscheinlichkeit:

$$r = \frac{P(sdc)_{\text{Ungeschützt}}}{P(sdc)_{\text{Fehlertolerant}}}$$



Gültigkeit nur bei **Äquivalenz der Fehlerräume**

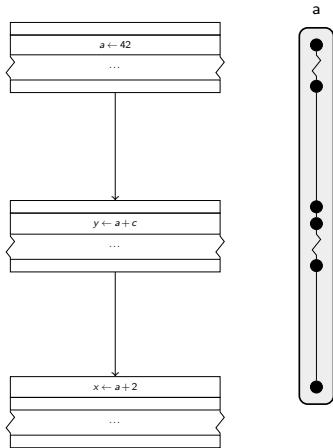
- Beziehungsweise einer statistisch signifikanten Überapproximation
- Klassisches Vorgehen bei hardware-basierter Fehlerinjektion
  - Strahlungsquelle bleibt beispielsweise immer gleich
- Hinreichend große Montecarlo-Experimente

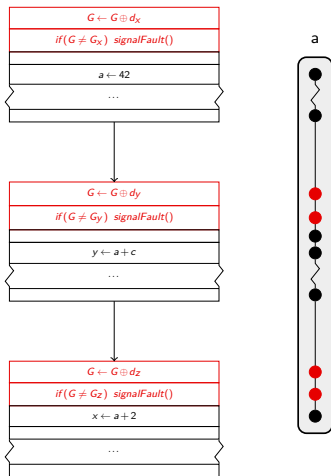


Softwarebasierte Fehlerinjektion erfordert ein Umdenken [6]

- Fehlerräume unterscheiden sich konzeptbedingt
- Systematische Fehlerinjektion (wie in FAIL\*) bietet keine Überapproximation
- Reduktion des Fehlerrausms muss berücksichtigt werden
- **Absolute Fehlerzahlen** anstatt Fehlerraten!

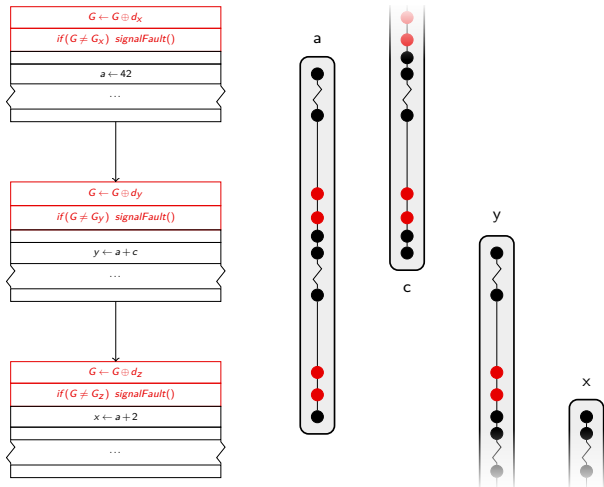






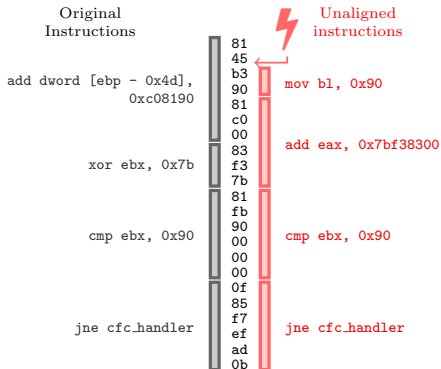
# Beispiel: Lebensdauer von Daten

Äquivalenzklassen in FAIL\*, Grafik: [8]



# Beispiel: Sprung in Instruktionsstrom

## Probleme bei der Interpretation der Fehlerursache



■ Architekturen mit variabler Instruktionsbreite

☞ Schwierig illegale Instruktionen zu detektieren





## 1 Grundlagen

- Aufbau
- Fehlermodell & Fehlerraum
- Aktivierungsmuster

## 2 Fehlerinjektionstechniken

- Hardware-basierte Techniken
- Software-basierte Techniken
- Simulations-basierte Techniken
- Evaluierung CoRed: FAIL\*

## 3 Auswertung und Interpretation

## 4 Zusammenfassung

## 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



Absolute Fehlerauswertung

- [1] Arlat, J. ; Crouzet, Y. ; Laprie, J.-C. :  
Fault injection for dependability validation of fault-tolerant computing systems.  
In: *Proceedings of the 19th International Symposium on Fault-Tolerant Computing (FTCS-19)*,  
1989, S. 348–355
- [2] Arlat, J. ; Aguera, M. ; Amat, L. ; Crouzet, Y. ; Fabre, J.-C. ; Laprie, J.-C. ; Martins, E. ; Powell, D.  
:  
Fault Injection for Dependability Validation: A Methodology and Some Applications.  
In: *IEEE Transactions on Software Engineering* 16 (1990), Febr., Nr. 2, S. 166–182.  
<http://dx.doi.org/10.1109/32.44380>. –  
DOI 10.1109/32.44380. –  
ISSN 0098–5589
- [3] Cho, H. ; Mirkhani, S. ; Cher, C.-Y. ; Abraham, J. ; Mitra, S. :  
Quantitative evaluation of soft error injection techniques for robust system design.  
In: *Proceedings of the 50th annual Design Automation Conference*, 2013. –  
ISSN 0738–100X, S. 1–10
- [4] Hsueh, M.-C. ; Tsai, T. K. ; Iyer, R. K.:  
Fault Injection Techniques and Tools.  
In: *IEEE Computer* 30 (1997), Apr., Nr. 4, S. 75–82.  
<http://dx.doi.org/10.1109/2.585157>. –  
DOI 10.1109/2.585157. –  
ISSN 0018–9162

- [5] Maiz, J. ; Hareland, S. ; Zhang, K. ; Armstrong, P. :  
**Characterization of multi-bit soft error events in advanced SRAMs.**  
In: *Proceedings of the IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM '03)*.  
New York, NY, USA : IEEE Press, 2003, S. 21.4.1–21.4.4
- [6] Schirmeier, H. ; Borchert, C. ; Spinczyk, O. :  
**Avoiding Pitfalls in Fault-Injection Based Comparison of Program Susceptibility to Soft Errors.**  
In: *Proceedings of the 45th International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN '15)*.  
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, Jun. 2015
- [7] Schirmeier, H. ; Hoffmann, M. ; Kapitza, R. ; Lohmann, D. ; Spinczyk, O. :  
**FAIL\*: Towards a Versatile Fault-Injection Experiment Framework.**  
In: Mühl, G. (Hrsg.) ; Richling, J. (Hrsg.) ; Herkersdorf, A. (Hrsg.): *25th International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS '12), Workshop Proceedings Bd. 200*,  
Gesellschaft für Informatik, März 2012 (Lecture Notes in Informatics). –  
ISBN 978–3–88579–294–9, S. 201–210
- [8] Schuster, S. :  
**Control-Flow Monitoring for KESO Applications.**  
Bachelor thesis, University of Erlangen-Nuremberg, Germany, Mai 2015

- [9] Shivakumar, P. ; Kistler, M. ; Keckler, S. W. ; Burger, D. ; Alvisi, L. :  
Modeling the Effect of Technology Trends on the Soft Error Rate of Combinational Logic.  
In: *Proceedings of the 32nd International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN '02)*.  
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, Jun. 2002, S. 389–398
- [10] Sridharan, V. ; Stearley, J. ; DeBardleben, N. ; Blanchard, S. ; Gurusurthi, S. :  
Feng Shui of Supercomputer Memory: Positional Effects in DRAM and SRAM Faults.  
In: *Proceedings of SC13: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*.  
New York, NY, USA : ACM Press, 2013 (SC '13). –  
ISBN 978–1–4503–2378–9, S. 22:1–22:11
- [11] Ziade, H. ; Ayoubi, R. A. ; Velazco, R. :  
A Survey on Fault Injection Techniques.  
In: *The International Arab Journal of Information Technology* 1 (2004), Nr. 2, S. 171–186