# Verlässliche Systemsoftware

## Fehlerinjektion

**Peter Ulbrich**

Lehrstuhl für Informatik 12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware

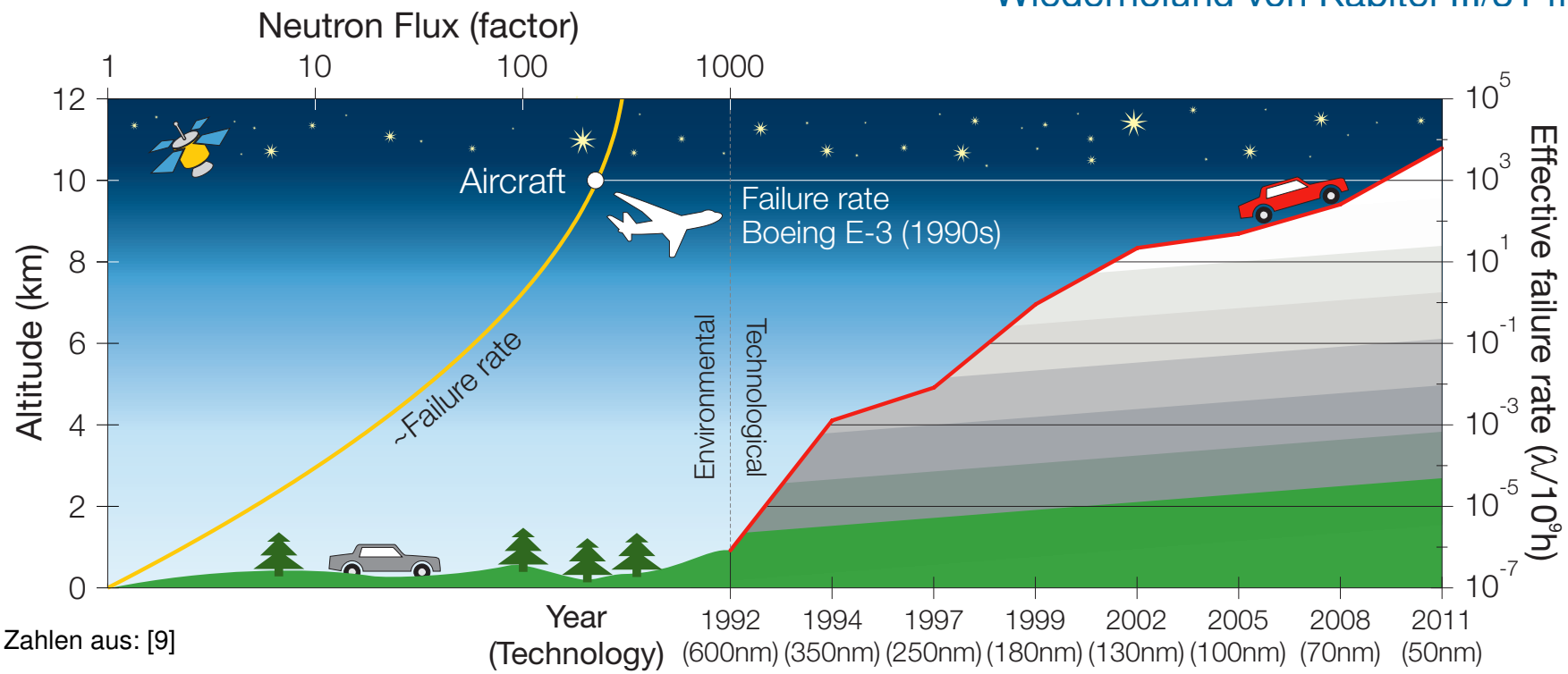
Technische Universität Dortmund

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

KW49 2020

# Fehlerraten transienter Fehler

Wiederholung von Kapitel III/31 ff




Zahlen aus: [9]

- 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

# Fragestellungen

⚠ 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

☞ Artifizielle Fehlerinjektion als Mittel der Wahl

- Gezielte und reproduzierbare Erzeugung von Fehlern

→ Validierung von Fehlertoleranzmechanismen

→ Bewertung von Fehlertoleranz

- Inhärente Robustheit, Fehlerausbreitung, Fehlererkennungslatenz und -rate

# 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

# Gliederung


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

# Fehlerinjektion – Abstrakte Definition

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

**F**ault $\leadsto$ Fehlerraum
- Frontal- oder Seitenaufprall, Geschwindigkeit, . . .
- Bezieht sich auf eine realistische Fehlerhypothese

**A**ctivation $\leadsto$ Aktivierungsmuster
- Das beschleunigte Auto fährt auf den Prellbock zu
- Das Auftreten des Fehler wird herbeigeführt

**R**eadout $\leadsto$ Messergebnisse
- Deformierung der Fahrgastzelle, . . .
- Erhebung der beobachtbaren Folgen des Fehlers

**M**easure $\leadsto$ Bewertung der Messergebnisse
- Insassen würde schwere innere Verletzungen erleiden
- Wie zuverlässig ist mein System?

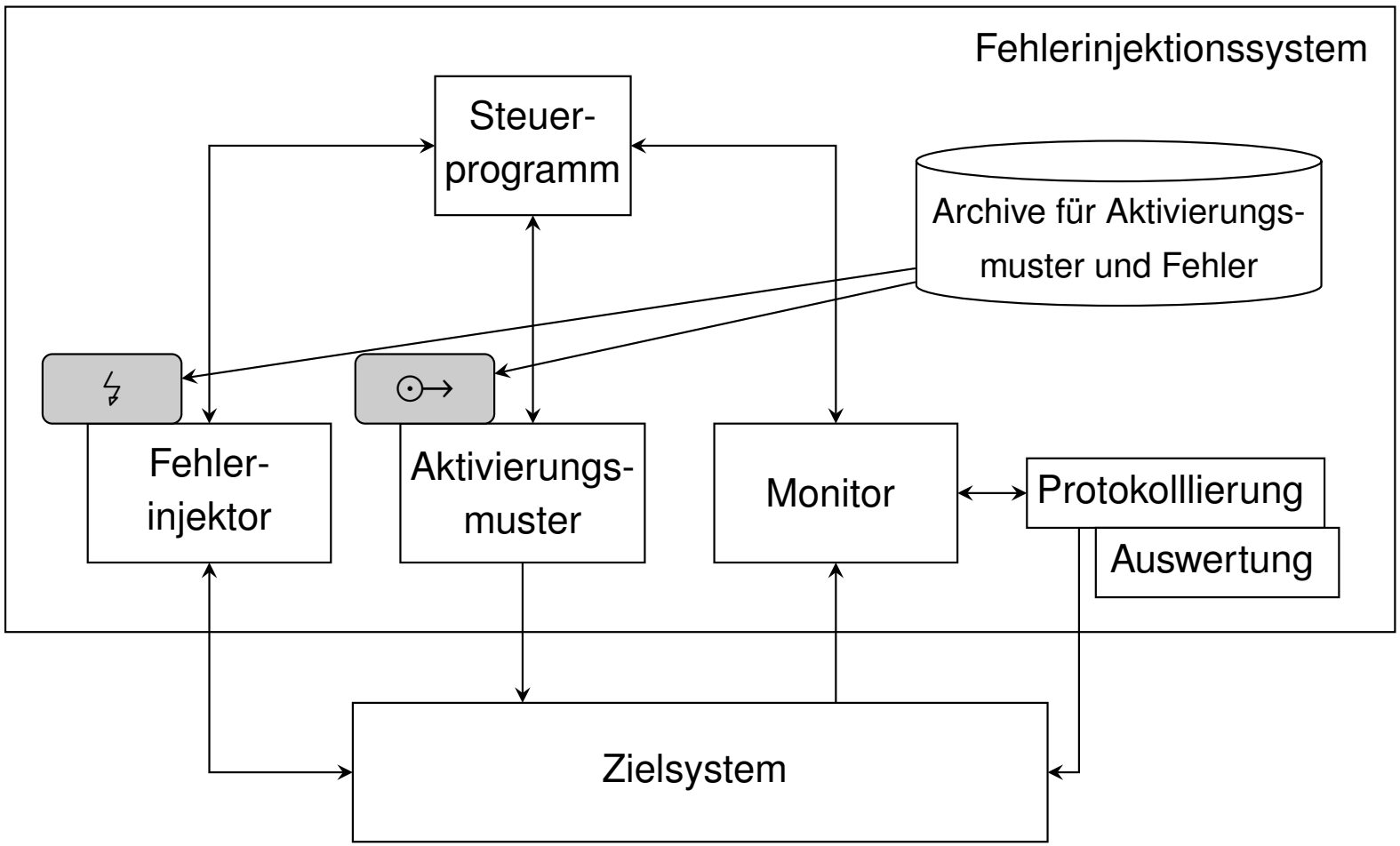
# Fehlerinjektion – Technische Realisierung (Forts.)

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 $\leadsto$ Schluss auf Verletzungen

☞ Ein Werkzeug übernimmt i. d. R. die Fehlerinjektion
   - Strahlungsquellen, Testschaltungen, Steuerrechner, Debugger, ...

# Genereller Aufbau von Fehlerinjektionswerkzeugen

Quelle Grafik: [4]



# Fehlerinjektion – Abstraktionsebenen

- 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

# Fehlermodell: Transiente Hardwarefehler

- 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`)

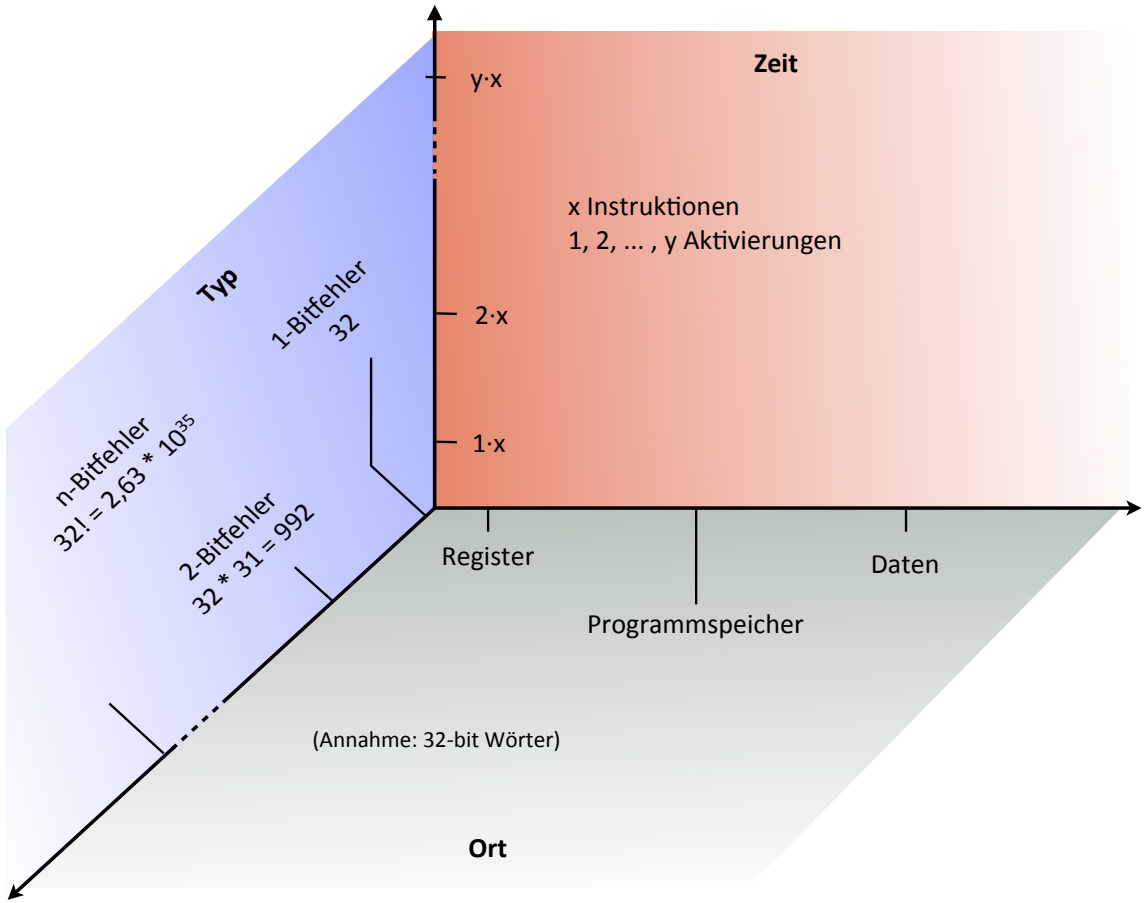
⚠ Dies ist eine starke Vereinfachung

- 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]

# Fehlerraum

## 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?

# Aktivierungsmuster

- 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 ⇝ Kontrollfluss
    → Unterbrechungen werden hier zum Problem
  - Echtzeitsysteme erfordern eine Umgebungssimulation (s. VII/34 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

# Experiment und Kampagne

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, ...

# Gliederung


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

# Fehlerinjektionstechniken

- 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 Fehlerinjektion

- 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

# Hardware-basierte Fehlerinjektion (Forts.)

## 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)

# Software-basierte 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
- 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

# Software-basierte Fehlerinjektion (Forts.)

## 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

# Simulations-basierte Fehlerinjektion

- 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: „boshaft“ 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

# Simulations-basierte Fehlerinjektion (Forts.)



⚠ 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

■ **S**oft**w**are **I**mplemented **F**ault **I**njection (SWIFI)

- Falls eine Softwareimplementierung die Verfälschung durchführt
- Alternativ: Verwendung spezialisierter Debug-Schnittstellen (z. B. JTAG)

→ **S**can-**C**hain **I**mplemented **F**ault **I**njection (SCIFI)

# Simulations-basierte Fehlerinjektion (Forts.)

## 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 ($\leadsto$ keine „Echtzeitsimulation“)

# Historischer Abriss



- 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 $\rightsquigarrow$ 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 Emulatore

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

# Lösungsansatz: FAIL* [7]



- FAIL* $\rightsquigarrow$ **Fa**ult **I**njection **L**everaged
  - Vorrangiges Entwurfsziel: Flexibilität bei der Fehlerinjektion

→ Effizient durch intelligente Reduktion des Fehlerraums

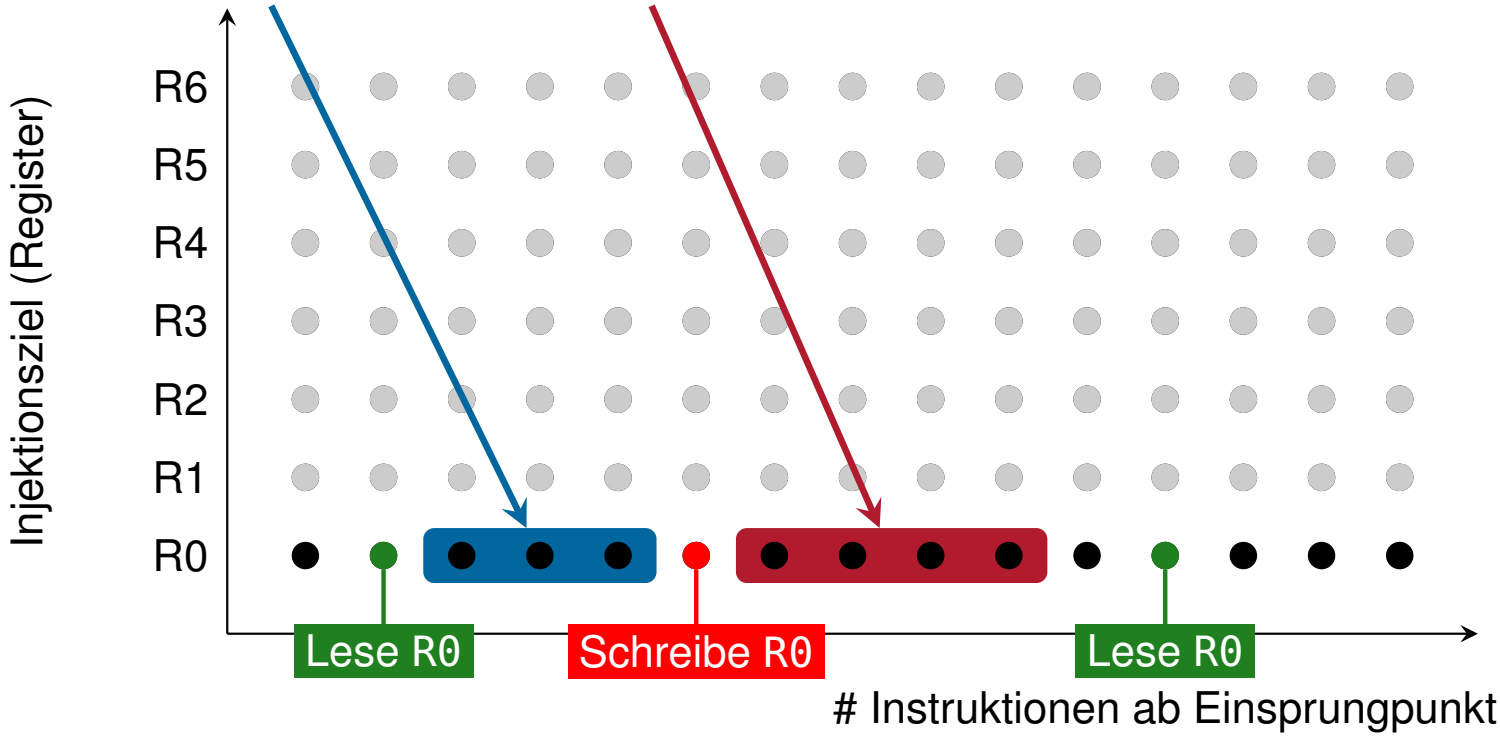
☞ Verwendung existierender virtueller Plattformen
- Aktuelle, gewartete Softwarebasis
- Schneller Wirtsrechner $\rightsquigarrow$ schnelle Durchführung von Experimenten
- Voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform
- Verschiedene Zielplattformen (Bochs, Gem5, OpenOCD, . . . )

☞ Schaffung einer abstrakten Schnittstelle zu diesen Plattformen
- Wiederverwendbare Beschreibung von Experimenten

⚠ Mehr zur Anwendung von FAIL* in den Übungen!

# Reduktion der Kampagnendauer

- Reduktion des Fehlerraums 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

# Gliederung


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

# 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

# Zuverlässigkeitsmetriken – Süße Verführung



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

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

⚠ Gültigkeit nur bei Äquivalenz der Fehlerräume
  - Beziehungsweise einer statistisch signifikanten Überapproximation
  - Klassisches Vorgehen bei hardware-basierter Fehlerinjektion

    → Strahlungsquelle bleibt beispielsweise immer gleich

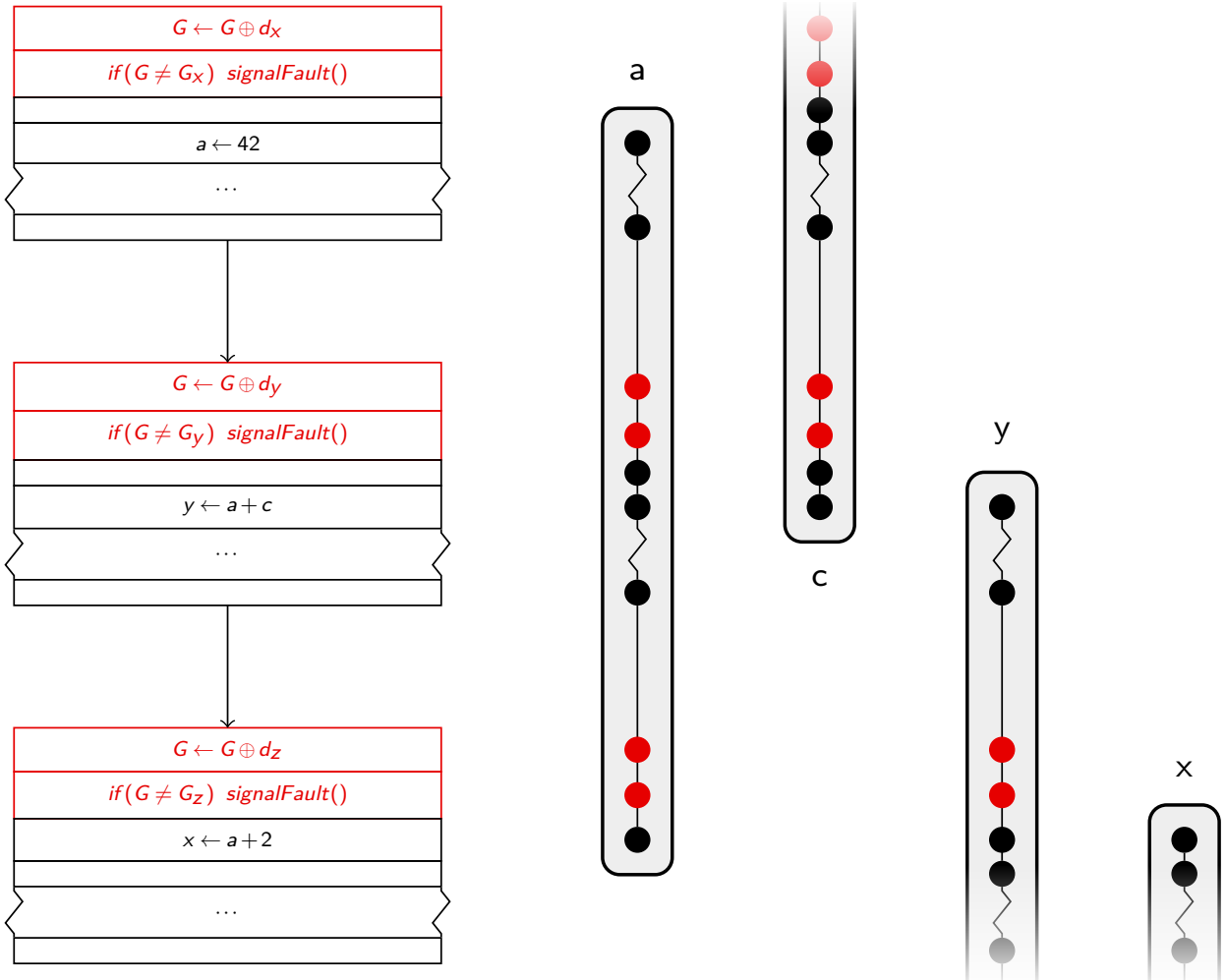
→ Hinreichend große Montecarlo-Experimente

☞ Softwarebasierte Fehlerinjektion erfordert ein Umdenken [6]
  - Fehlerräume unterscheiden sich konzeptbedingt
  - Systematische Fehlerinjektion (wie in FAIL*) bietet keine Überapproximation
  - Reduktion des Fehlerraums muss berücksichtigt werden

→ Absolute Fehlerzahlen anstatt Fehlerraten!

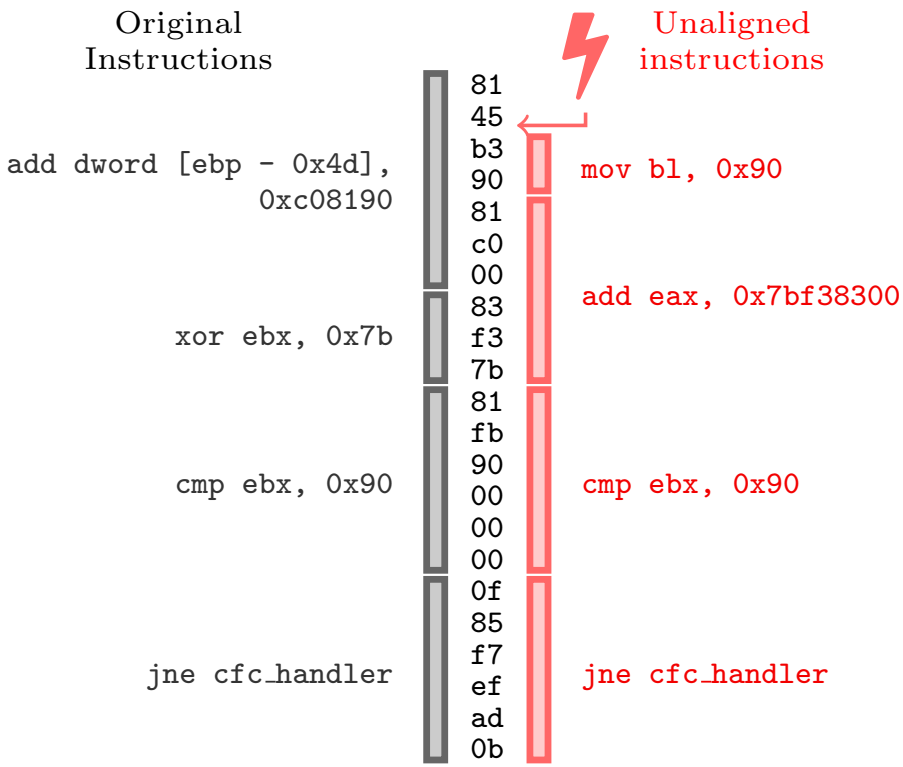
# Beispiel: Lebensdauer von Daten

Äquivalenzklassen in FAIL*, Grafik: [8]



# Beispiel: Sprung in Instruktionsstrom






- Architekturen mit variabler Instruktionsbreite

☞ Schwierig illegale Instruktionen zu detektieren

# Gliederung


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

# 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

# Literaturverzeichnis


[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

# Literaturverzeichnis (Forts.)


[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

# Literaturverzeichnis (Forts.)


[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. ; DeBardeleben, N. ; Blanchard, S. ; Gurumurthi, 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