Verlässliche Echtzeitsysteme

Fehlerinjektion

KW46 2022

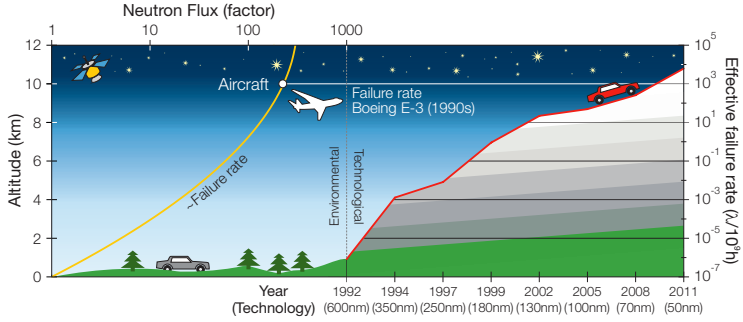
Peter Wägemann

Lehrstuhl für Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

https://sys.cs.fau.de

Fehlerraten transienter Fehler



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/11)
  - → 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

Fehlerinjektion – Abstrakte Definition

- *FARM-Modell* [2] definiert notwendige Voraussetzungen
  - Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie 3)

Fault ⇝ Fehlerraum
- Frontal- oder Seitenaufprall, Geschwindigkeit, …
- Bezieht sich auf eine ***realistische Fehlerhypothese***

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

Readout ⇝ Messergebnisse
- Deformierung der Fahrgastzelle, …
- Erhebung der *beobachtbaren Folgen* des Fehlers

Measure ⇝ Bewertung der Messergebnisse/***Metriken*** *anwenden*
- Insassen würde schwere innere Verletzungen erleiden
- Wie *zuverlässig* ist mein System?

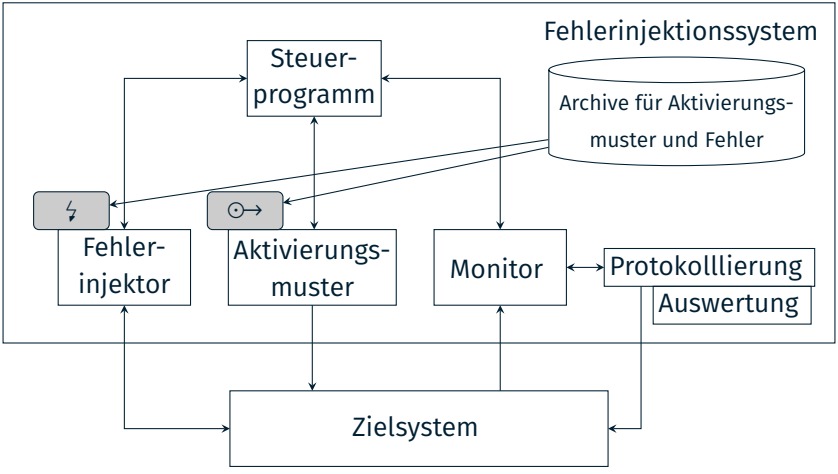
Fehlerinjektion – Technische Realisierung (Forts.)

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 $\rightsquigarrow$ 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`)

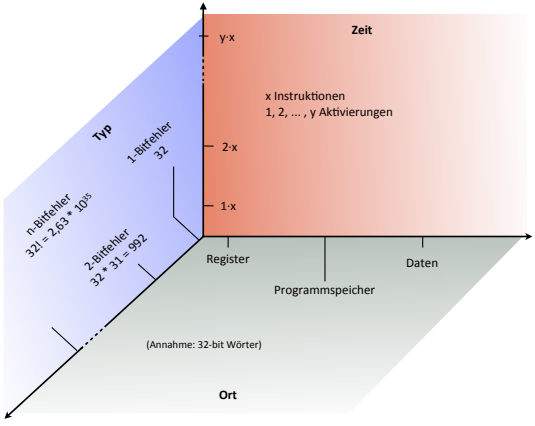
⚠ Dies ist eine starke Vereinfachung

- 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
    - Präparation *anwendungsspezifischer, passender Eingabedaten*
    - Sensordaten, Netzwerkpakete, …
  - Kombinationen aus Soft- und Hardware ⇝ Kontrollfluss
    - → Interrupts werden hier zum Problem
  - Echtzeitsysteme erfordern eine *Umgebungssimulation* (s. VII/33 ff.)
    - Durchführung am „realen Objekt“ häufig nicht möglich/zu gefährlich
    - Eingaben müssen 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 ein *3-Tupel* (f, a, r) beschrieben

☞ *Gesamtheit der Messergebnisse* $R \rightsquigarrow$ Zuverlässigkeitsmaße
- Fehlererkennungslatenz- und rate, Erholungszeit, …

Gliederung

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*) $\rightsquigarrow$ kein Probe-Effekt

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 ⇝ 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 $\rightsquigarrow$ 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* ⇝ vgl. software-basierte Lösung
  - *Saboteure:* „boshafte“ in das Modell eingebrachte Komponenten
    - Aktivierung ⇝ 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* ⇝ 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.)

Physikalisches vs. empirisches Modell:

⚠ Vereinfachung: In Software sichtbare Fehler ⇝ Bitkipper
- Ihr Zustandekommen ist uninteressant
- Verzicht auf eine physikalische Fehlerinjektion

→ Konsequenzen hinsichtlich der Validität des Fehlermodells (vgl. Folie 9)

☞ 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)

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 ($\rightsquigarrow$ 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

☞ Durchführung von Fehlerinjektion ist eine große Herausforderung
  - Man kämpft mit einem riesigen Fehlerraum
  - Experimentbeschreibung ist nicht standardisiert/wiederverwendbar
  - Hoher zeitl. 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 Emulatoren

  → 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
  - $\rightarrow$ Effizient durch intelligente Reduktion des Fehlerraums

☞ Verwendung *existierender virtueller Plattformen*

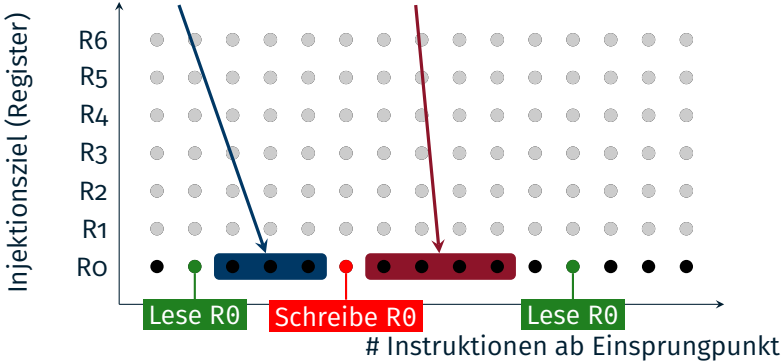
- Aktuelle, gewartete Softwarebasis
- Schneller Wirtsrechner $\rightsquigarrow$ schnelle Durchführung von Experimenten
- Voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform
- Verschiedene Zielplattformen (Bochs, Gem5, OpenOCD, …)

☞ Schaffung einer *abstrakten Schnittstelle* zu diesen Plattformen

- Wiederverwendbare Beschreibung von Experimenten

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

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

Umgang mit den gewonnen Messwerten:

- 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

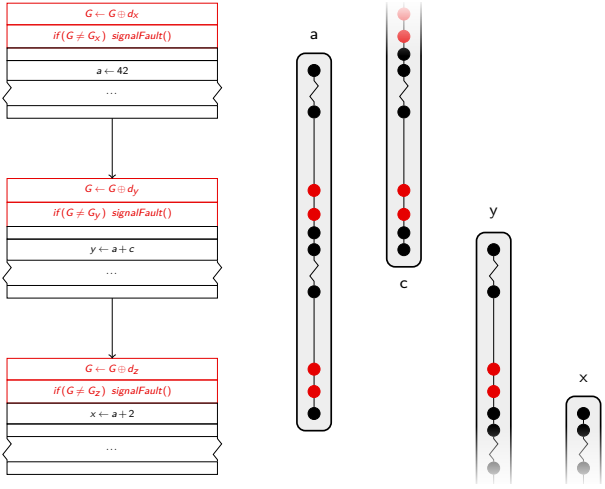
  → Hinreichend große Montecarlo-Experimente

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

  → **Absolute Fehlerzahlen** anstatt Fehlerraten!

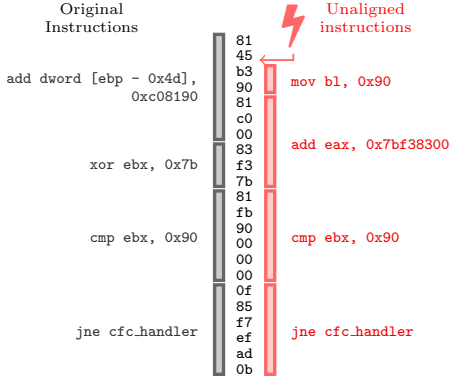
Beispiel: Lebensdauer von Daten

Äquivalenzklassen in FAIL*, Grafik: [8]



Beispiel: Sprung in Instruktionsstrom

Probleme bei der Interpretation der Fehlerursache:



- Architekturen mit variabler Instruktionsbreite

☞ Schwierig illegale Instruktionen zu detektieren

Gliederung

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)

[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`. –

Literaturverzeichnis (2)

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

Literaturverzeichnis (3)

[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

Literaturverzeichnis (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

Literaturverzeichnis (5)

[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

Literaturverzeichnis (6)

[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