Verlässliche Echtzeitsysteme

Fehlerinjektion

Peter Ulbrich

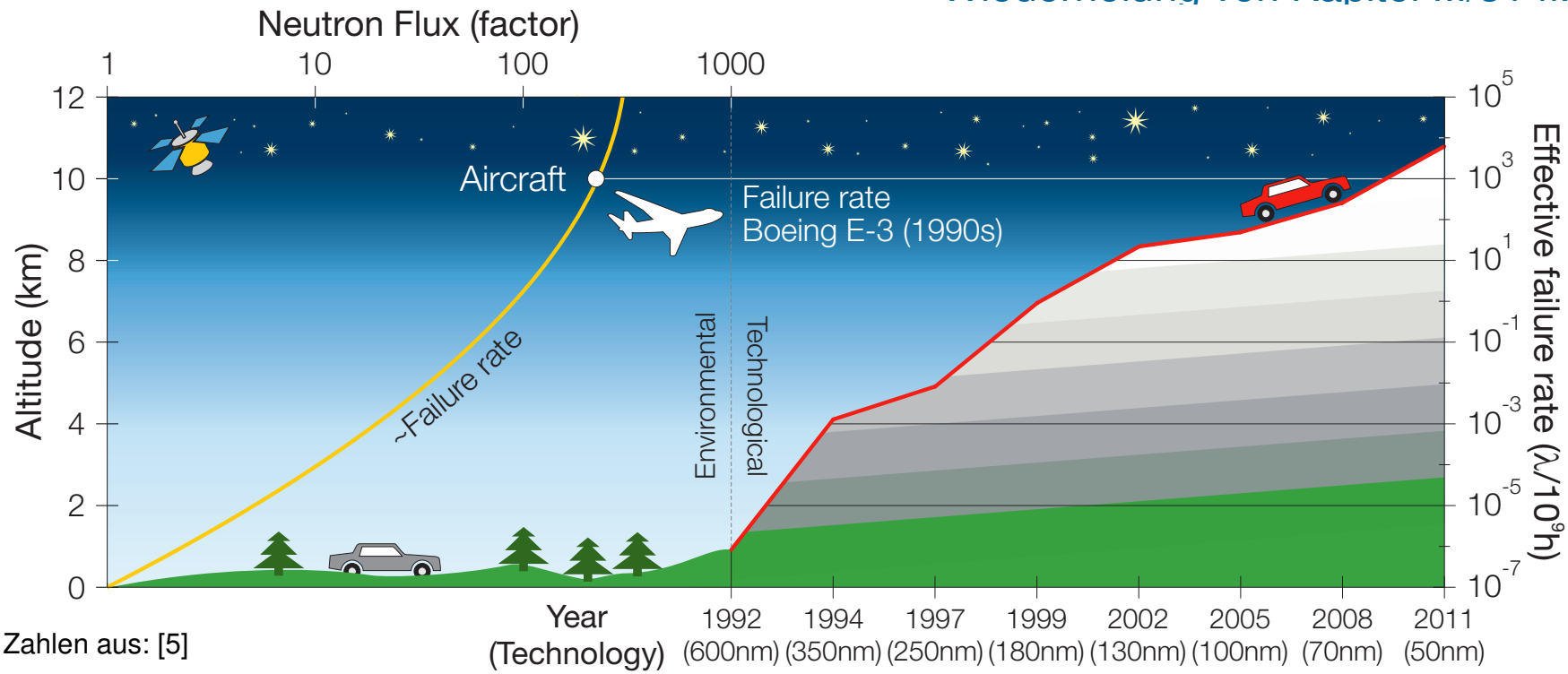
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)

www4.informatik.uni-erlangen.de

16. Juni 2015

Fehlerraten transienter Fehler

Wiederholung von Kapitel III/31 ff.



Zahlen aus: [5]

- 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“

- Man braucht entsprechend Fehler, um diese Mechanismen zu testen

→ Konkrete Umsetzung ist jedoch aufwendig . . .

- Fehler (auch „häufige“ transiente Fehler) lassen sich nicht einfach abwarten
- Fehler verursachen mitunter sehr hohe Kosten

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 – Was braucht man da alles?

- Erstmals festgelegt im FARM-Modell [2]
  - 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

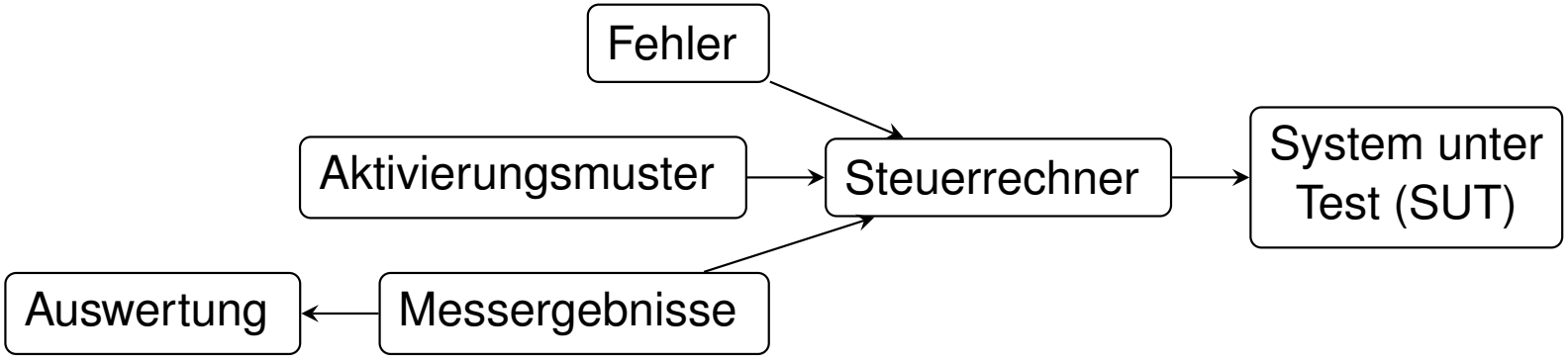
- Insassen würde schwere innere Verletzungen erleiden
- Wie zuverlässig ist mein System?

Fehlerinjektion – Was braucht man da alles? (Forts.)

Irgendwie muss sich das auch noch bewegen . . .

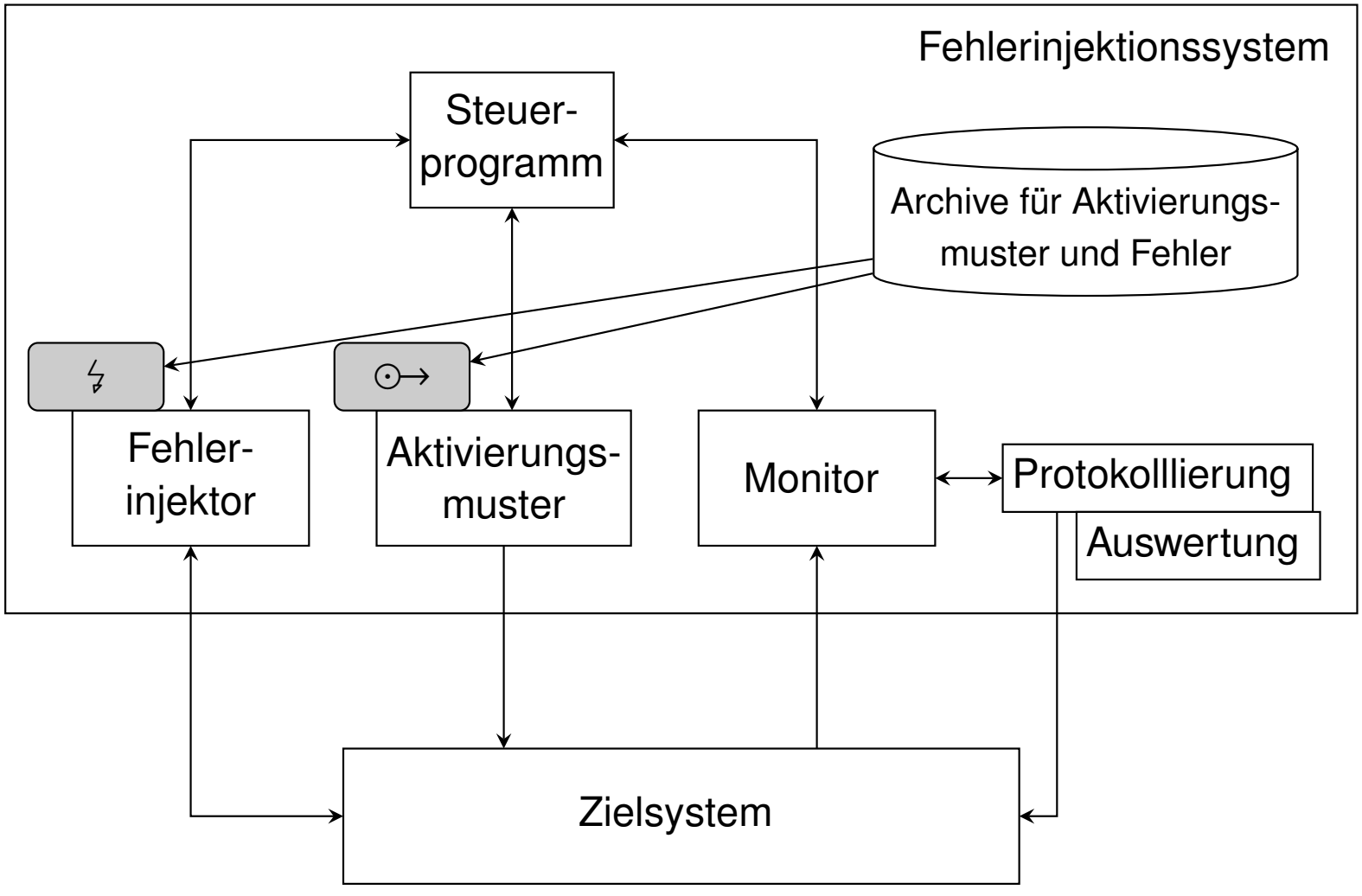
- Auswahl des zu injizierenden Fehlers
  - Unterschiedliche Prüfstände für Frontal- bzw. Seitenaufprall
- Ausführung des Aktivierungsmusters
  - Beschleunigung des Fahrzeugs auf die gewünschte Geschwindigkeit
- Beobachtung der Folgen der Fehlersituation
  - Sensoren erfassen Beschleunigungen, Verwindungen,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

☞ ein Steuerrechner übernimmt i. d. R. die Fehlerinjektion in Rechner



Genereller Aufbau von Fehlerinjektionswerkzeugen

Quelle Grafik: [3]



Ablauf einer Fehlerinjektion

- Fehlerinjektion besteht aus Experimenten:
  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, ...

⚠ Eine Kampagne (engl. *campaign*) beinhaltet mehrerer Experimente

- Der Fehlerraum ist meist sehr groß $\rightsquigarrow$ eine Vielzahl von Fehlern
- Hinzu kommen die Möglichkeiten für ihre Aktivierung

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 die Fehlerinjektion

- Insbesondere die Mengen F und A hängen von ihnen ab
- Fehlerhypothese: durch Software beobachtbare transiente Fehler

→ Konzentration auf empirische/physikalische Modelle

Fehlerraum

- Transiente Fehler haben ihren Ursprung im physikalischen Modell
  - Umwelteinflüsse bewirken Zustands-/Ladungsveränderungen
    - Spannungsschwankungen bei der Datenübertragung
    - Umladen von der Kondensatoren in Speicherzellen (EMV, Strahlung)
    - Veränderung der Leitfähigkeit durch Hitzeeinwirkung
    - Fehlerhafte Berechnungen in arithmetischen Einheiten

    ...

  → Annahme: diese Veränderungen werden in der Software sichtbar

- ☞ Als „Bitkipper“ im empirischen Modell beobachtbar
  - In der Halbleitertechnik der Hardware

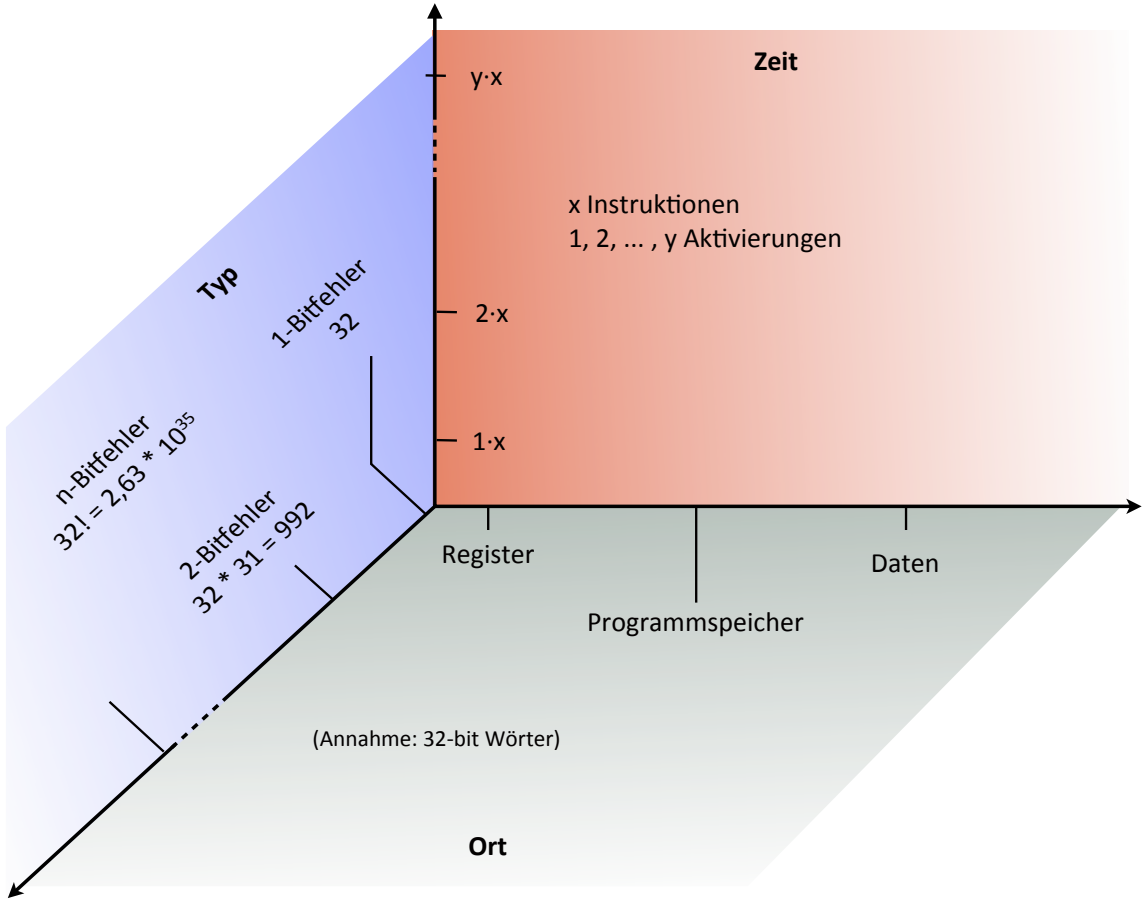
  → Hierfür existieren sehr, sehr viele Möglichkeiten

- ☞ Wir interessieren uns für in Software sichtbare „Bitkipper“
  - Register, Speicher, Instruktionen, ...

  → Woher sie kommen, ist nicht so sehr von Belang!

Fehlerraum (Forts.)

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 Hadwareimplementierungen anwendbar
    - Präparation anwendungsspezifischer, passender Eingabedaten
    - Sensordaten, Netzwerkpakete, . . .
  - Kombinationen aus Soft- und Hardware ⇝ Kontrollfluss
    → Unterbrechungen werden hier zum Problem
  - Echtzeitsysteme erfordern eine Umgebungssimulation (s. IV/33 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

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

Physikalisches vs. empirisches Modell

Besteht ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Welten?

Vereinfachung: In Software sichtbare Fehler $\rightsquigarrow$ Bitkipper

- Ihr Zustandekommen ist uninteressant
- Verzicht auf eine indirekte physikalische Fehlerinjektion
  - Diese ist sehr aufwendig und schlecht kontrollierbar
  - Benötigt beispielsweise EMV-Messkammern oder Ionen-Kanonen
  - Welches Bit in welchem Register wurde denn nun beeinflusst?

Fehlerinjektion bringen Bitkipper direkt 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

- Man spricht von: **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)

Gliederung

Fehlerinjektionstechniken

- Injektion von Fehler auf allen Ebenen eines Rechensystems möglich

☞ es existiert eine Vielzahl verschiedener Techniken [6]

  - 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 VHDL
  - Emulations-basierte Techniken
    - Beschleunigt Simulation durch Synthetisierung des Modells
  - Hybride Ansätze
    - Vereinigt zwei oder mehr der oben genannten Ansätze

Hardware-basierte Fehlerinjektion

- Hardware-basierte Implementierung $\rightsquigarrow$ „Simulation“
  - Enthaltene Testschaltungen injizieren direkt transiente Fehler
  - Basiert auf dem komplett gefertigten Schaltkreis
    - Gefertigter und getesteter Schaltkreis verhalten sich identisch

    $\rightarrow$ 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 ⇝ geringe Portierbarkeit
– Eingeschränkte Kontrollier- und Beobachtbarkeit
  - Nur bestimmte Fehlertypen sind injizierbar
  - Nicht alle Stellen des Schaltkreises sind direkt zugänglich

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

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“)

Gliederung

Fehlerinjektion: Praktische Probleme

- Validierung von CoRed (s. IX/34 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 Emulatoren

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

Lösungsansatz: FAIL* [4]

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

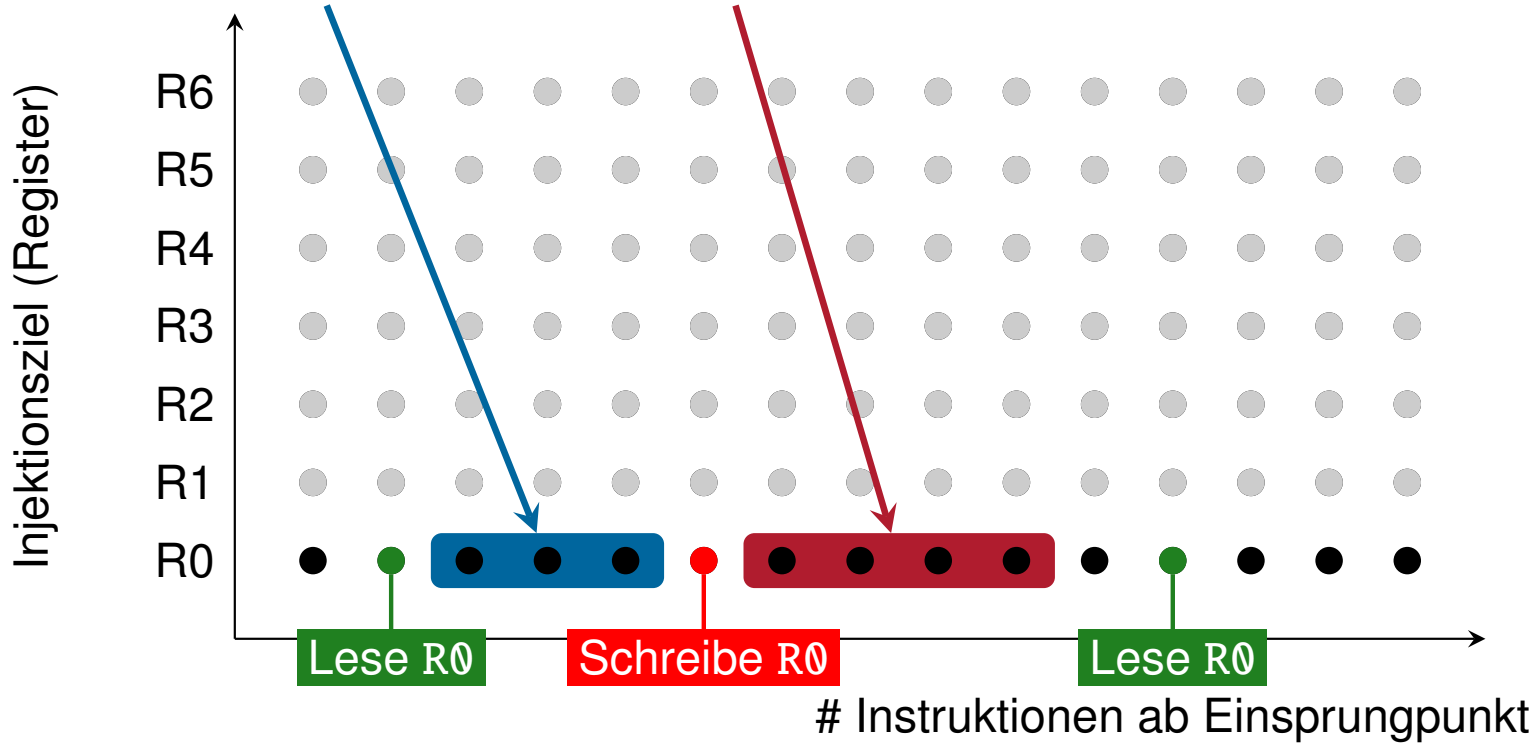
☞ Verwendung existierender virtueller Plattformen (Bochs, OVP, . . .)
- Aktuelle, gewartete Softwarebasis
- Schneller Wirtsrechner $\rightsquigarrow$ schnelle Durchführung von Experimenten
- Voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform

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

⚠ Mehr dazu 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

Zusammenfassung

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, emulations}-basiert

FAIL* $\mapsto$ Grundlage für generische Fehlerinjektion?

- Basierend auf virtuellen Zielsystemen
- flexible Plattform für Fehlerinjektion
- schnelle Experimentdurchführung durch Parallelisierung

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] 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.)

[4] 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

[5] 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

[6] 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