Verlässliche Echtzeitsysteme

Fehlerinjektion

Peter Ulbrich

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

`www4.informatik.uni-erlangen.de`

19. Mai 2014

Fragestellungen

- Wie sichert man die Wirksamkeit von Fehlertoleranzmechanismen?
  - Hilft uns die vielfältige Redundanz weiter?
    - Information, Daten, Berechnungen und Hardware

☞ Testmethoden für Fehlertoleranzmechanismen müssen her!

⇝ Fehlertoleranzmechanismen „verarbeiten Fehler“
- man braucht also Fehler, um diese Mechanismen zu testen

⇝ Fehler sind in ihrer Handhabung aber nicht so einfach . . .
- sie treten vergleichsweise selten auf (auch „häufige“ transiente Fehler)
- Fehler verursachen 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]
  - die beispielhaften Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie VI/3)

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

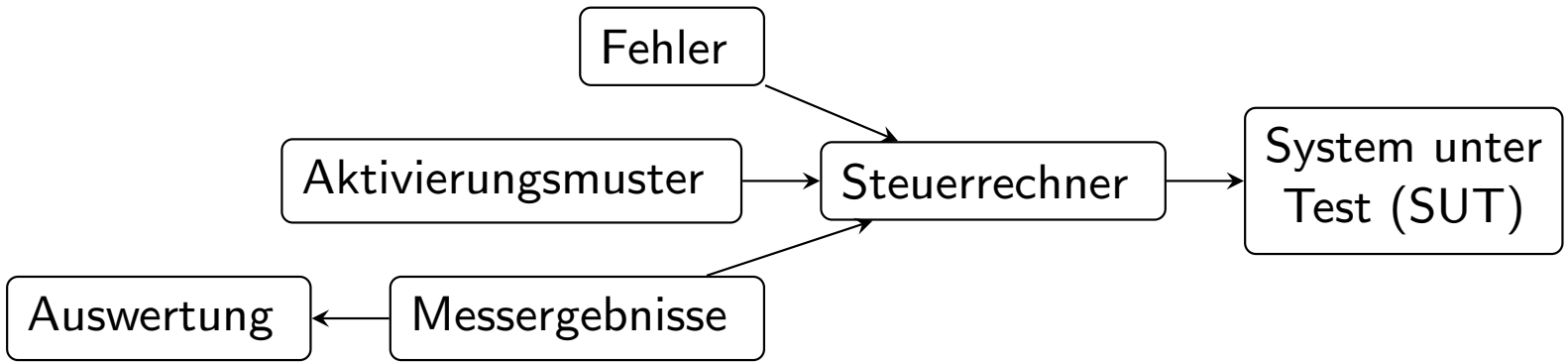
Measure $\rightsquigarrow$ Bewertung der Messergebnisse
- Insassen würde schwere innere Verletzungen erleiden
- Wie zuverlässig ist mein System?

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

Irgendwie muss sich das auch noch bewegen . . .

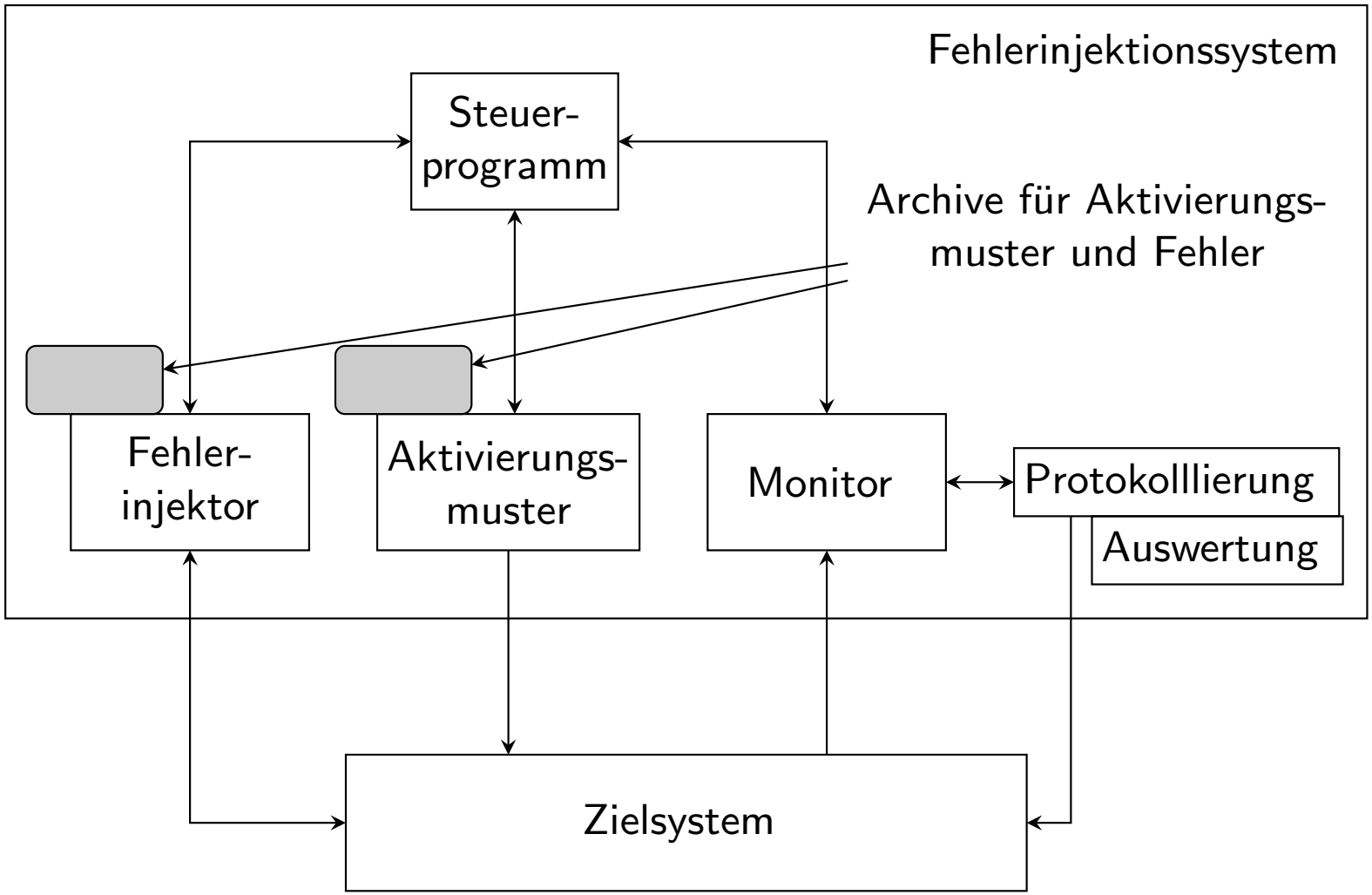
- Auswahl des zu injizierenden Fehlers
  - unterschiedliche Prüfstände für Frontal- bzw. Seitenaufprall
- Ausführung des Aktivierungsmusters
  - Beschleunigung des Fahrzeugs auf die gewünschte Geschwindigkeit
- Beobachtung der Folgen der Fehlersituation
  - Sensoren erfassen Beschleunigungen, Verwindungen, 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
- eine Kampagne (engl. *campaign*) beinhaltet mehrerer Experimente
  - der Fehlerraum ist meist sehr groß $\rightsquigarrow$ eine Vielzahl von Fehlern
  - es gibt mannigfaltig Möglichkeiten für ihre Aktivierung
- Gesamtheit der Messergebnisse $R \rightsquigarrow$ Zuverlässigkeitsmaße
  - Fehlererkennungslatenz- und rate, Erholungszeit, ...

Fehlerinjektion – Abstraktionsebenen

- Fehler können auf verschiedenen Ebenen injiziert werden

  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

☞ diese Ebenen haben signifikanten Einfluss auf die Fehlerinjektion

- insbesondere die Mengen F und A hängen von ihnen ab

☞ im Folgenden $\rightsquigarrow$ Konzentration auf empirische/physikalische Modelle

- Fehlerhypothese: durch Software beobachtbare transiente Fehler

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

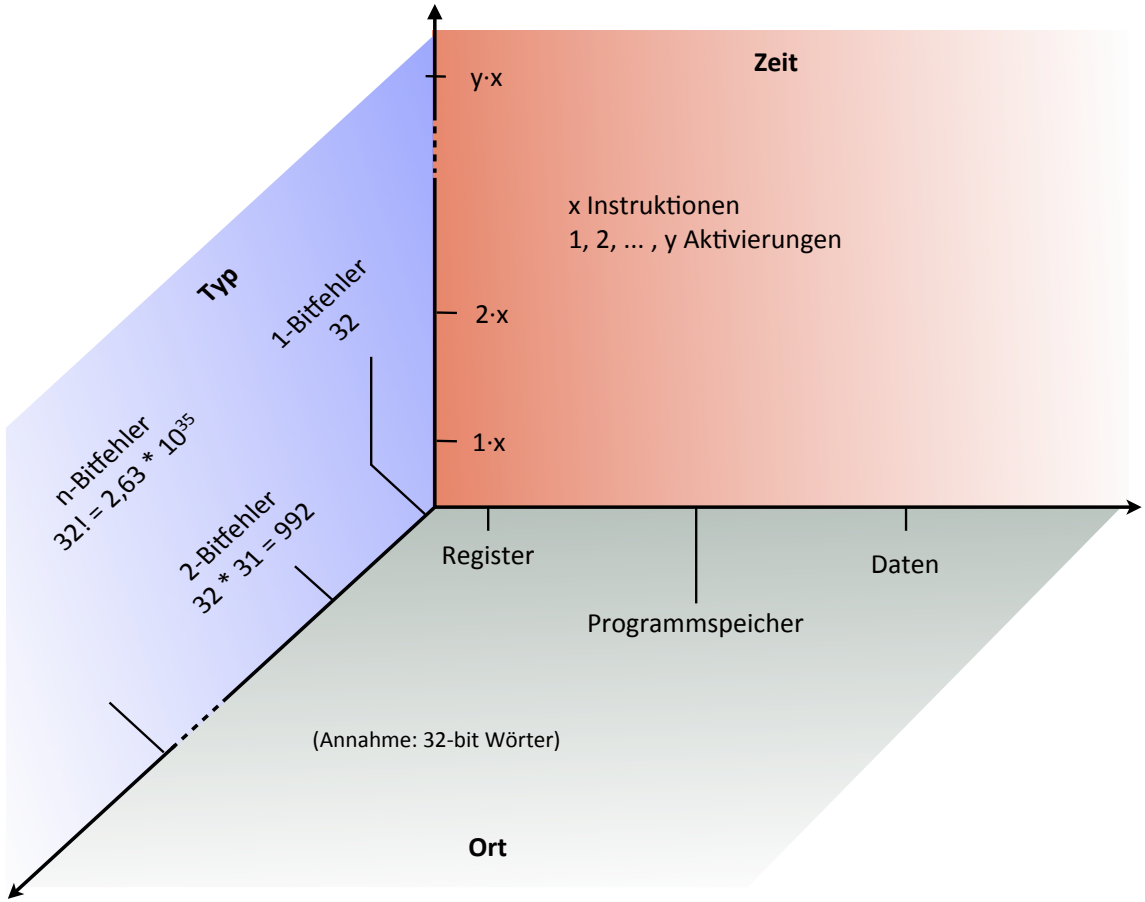
☞ als „Bitkipper“ im empirischen Modell beobachtbar
  - in Registern, Daten, Programmspeicher, ...

- wir interessieren vor allem für diese „Bitkipper“

⇝ hierfür gibt es immer noch sehr viele Möglichkeiten
  - woher sie kommen, ist nicht so sehr von Belang

Fehlerraum (Forts.)

Ein Musterbeispiel für eine kombinatorische Explosion



- selbst die Beschränkung auf 1-Bitfehler lässt vieles offen
  - In welchem Register möchte man ein Bit kippen lassen?
  - Nach welcher Instruktion soll das Bit gekippt werden?

Aktivierungsmuster

- Durchführung der zu schützenden Berechnung
  - einfachster Fall: Vektoren von Eingabeparametern
    - i. d. R. nur für einfache Soft- oder Hadwareimplementierungen anwendbar
    - Kombinationen aus Soft- und Hardware erfordern meist auch Kontrollfluss
  - Präparation anwendungsspezifischer, passender Eingabedaten
    - Sensordaten, Netzwerkpakete, Unterbrechungen, ...
  - Echtzeitsysteme erfordern eine Umgebungssimulation (s. Folie **??** ff.)
    - Durchführung am „realen Objekt“ häufig nicht möglich/zu gefährlich
    - Eingaben müssen das Verhalten des physikalischen Objekts widerspiegeln
- ein 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?

☞ hierraus 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?

- uns interessieren eigentlich nur „Bitkipper“
  - ihr Zustandekommen ist hingegen eher 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 ...

☞ im Zuge der Fehlerinjektion bringen wir direkt „Bitkipper“ ein

- statt sie durch physikalische Manipulation zu erzeugen

⇝ 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 [4]

- 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

grundsätzlich 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 Implementierung $\rightsquigarrow$ „Simulation“

- enthaltene Testschaltungen injizieren direkt transiente Fehler
- basiert auf dem komplett gefertigten Schaltkreis
  - gefertigter und getesteter Schaltkreis verhalten sich identisch

  $\rightsquigarrow$ das Verfahren ist nicht-intrusiv (engl. *non-intrusive*)

Hardware-basierte Fehlerinjektion (Forts.)

Vorteile

+ hohe zeitliche Auflösung der Injektion und Beobachtung
  - $\rightsquigarrow$ 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

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

  $\rightsquigarrow$ 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)
    - dafür werden sie direkt in den Signalweg eingebracht
  - 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 ($\leadsto$ keine „Echtzeitsimulation“)

Gliederung

Fehlerinjektion: Praktische Probleme

- Validierung von CoRed (s. Folie V/**??** ff.) durch Fehlerinjektion
  - Fehlerinjektion über die 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
  - Beschreibung von Experimenten ist nicht standardisiert/wiederverwendbar
  - hoher zeitlicher Aufwand: 1s/Experiment $\rightsquigarrow$ 110h/400000 Experimente

☞ 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

$\rightsquigarrow$ eine einfache Verwendung „out-of-the-box“ unmöglich

Lösungsansatz: FAIL* [1]

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

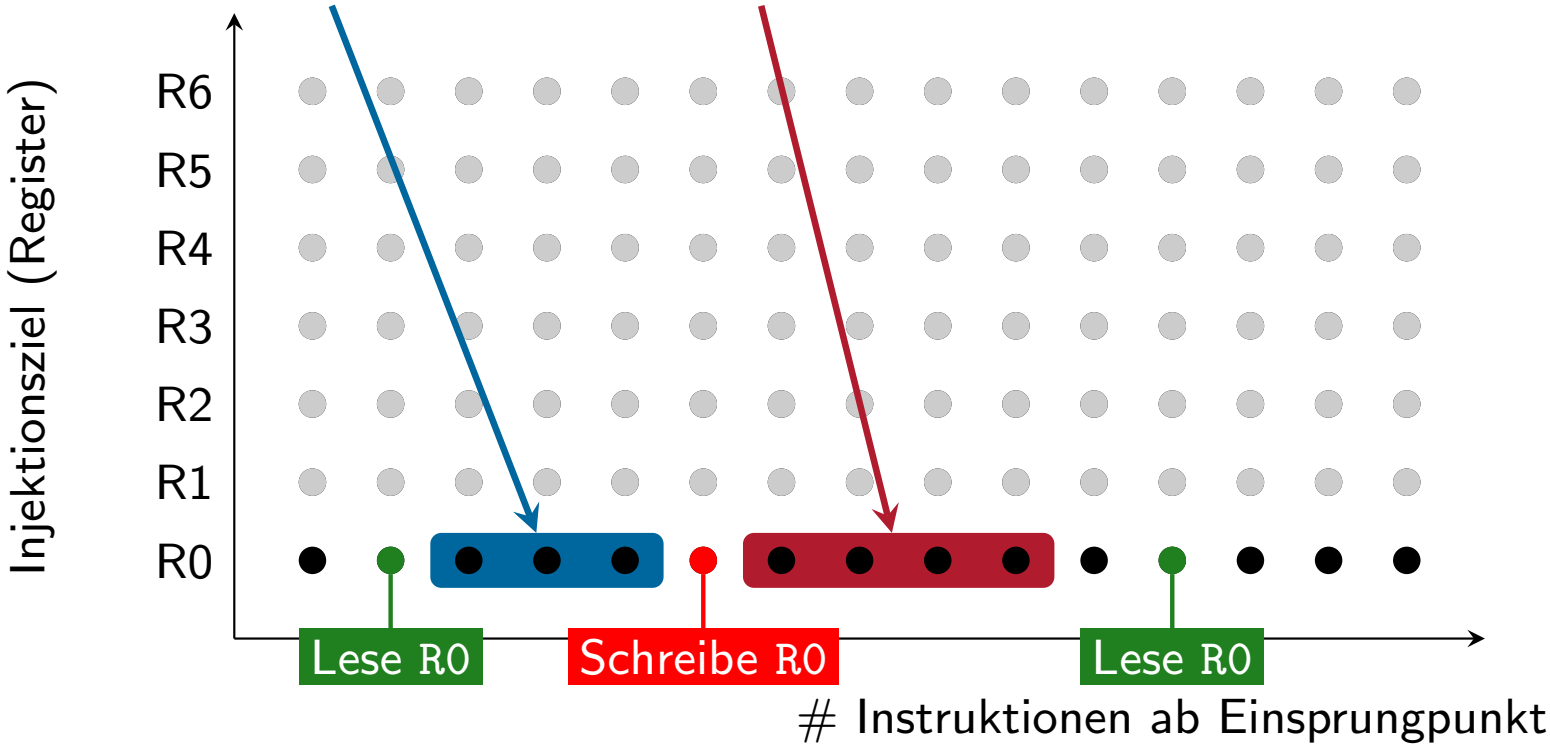
☞ Verwendung existierender virtueller Plattformen (Bochs, OVP, . . .)
  - aktuelle, gewartete Softwarebasis
  - schneller Wirtsrechner $\rightsquigarrow$ schnelle Durchführung von Experimenten
  - voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform

☞ 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] al., H. S.:
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

[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] 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