

Verlässliche Echtzeitsysteme

Fehlerinjektion

Fabian Scheler

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

www4.informatik.uni-erlangen.de

24. Juni 2013



- 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



- 1 Überblick
- 2 FARM**
- 3 Fehlerinjektionstechniken
- 4 Xception
- 5 FAIL*
- 6 Zusammenfassung



Fehlerinjektion – Was braucht man da alles?

- erstmals festgelegt im **FARM-Modell** [1]
 - die beispielhaften Anmerkungen beziehen sich auf Crashtests (s. Folie X/3)

Fault \leadsto Fehlerraum

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

Activation \leadsto Aktivierungsmuster

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

Readout \leadsto Messergebnisse

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

Measure \leadsto Bewertung der Messergebnisse

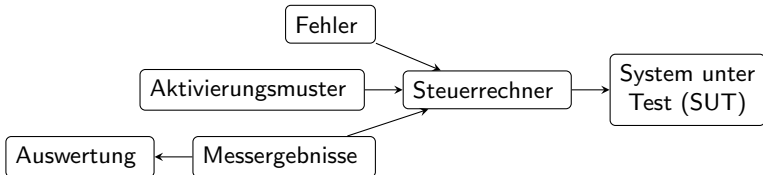
- Insassen würde schwere innere Verletzungen erleiden
- Wie **zuverlässig** ist mein System?

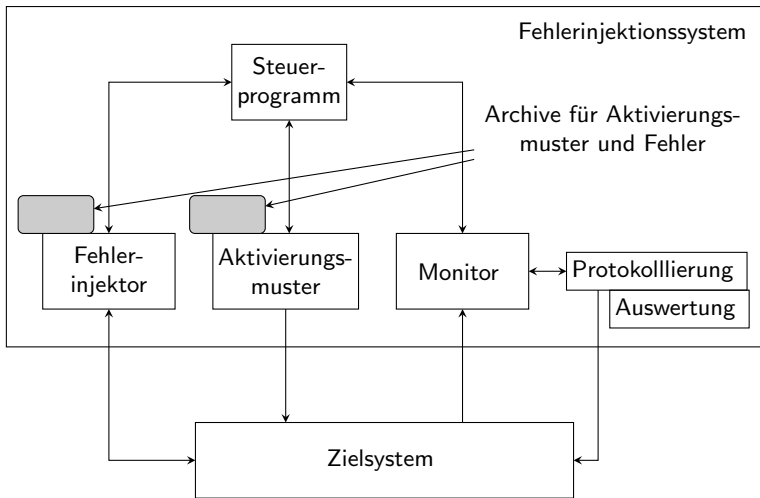


- **Auswahl** des zu injizierenden Fehlers
 - unterschiedliche Prüfstände für Frontal- bzw. Seitenaufprall
- **Ausführung** des Aktivierungsmusters
 - Beschleunigung des Fahrzeugs auf die gewünschte Geschwindigkeit
- **Beobachtung** der Folgen der Fehlersituation
 - Sensoren erfassen Beschleunigungen,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



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





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 \leadsto eine Vielzahl von Fehlern
 - es gibt mannigfaltig Möglichkeiten für ihre Aktivierung
- Gesamtheit der Messergebnisse $R \leadsto$ Zuverlässigkeitsmaße
 - Fehlererkennungslatenz- und rate, Erholungszeit, ...



- Fehler können auf verschiedenen Ebene 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

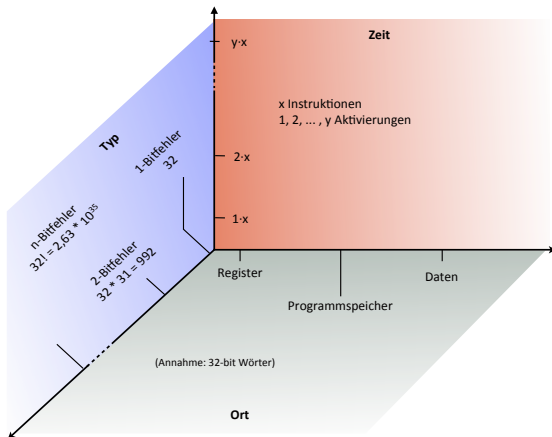
- Fehlerhypothese: durch Software beobachtbare transiente Fehler



- **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



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?



- Durchführung der zu schützenden Berechnung
 - einfachster Fall: Vektoren von Eingabeparametern
 - i. d. R. nur für einfache Soft- oder Hardwareimplementierungen anwendbar
 - Kombinationen aus Soft- und Hardware erfordern meist auch Kontrollfluss
 - Präparation **anwendungsspezifischer, passender Eingabedaten**
 - Sensordaten, Netzwerkpakete, Unterbrechungen, ...
 - Echtzeitsysteme erfordern eine **Umgebungssimulation** (s. Folie V/21 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: **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)**



- 1 Überblick
- 2 FARM
- 3 Fehlerinjektionstechniken**
- 4 Xception
- 5 FAIL*
- 6 Zusammenfassung



- Injektion von Fehler auf allen Ebenen eines Rechensystems möglich

 es existiert eine Vielzahl verschiedener Techniken [5]

- **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*)



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



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

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)
 - 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 \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



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“)



- 1 Überblick
- 2 FARM
- 3 Fehlerinjektionstechniken
- 4 Xception**
- 5 FAIL*
- 6 Zusammenfassung

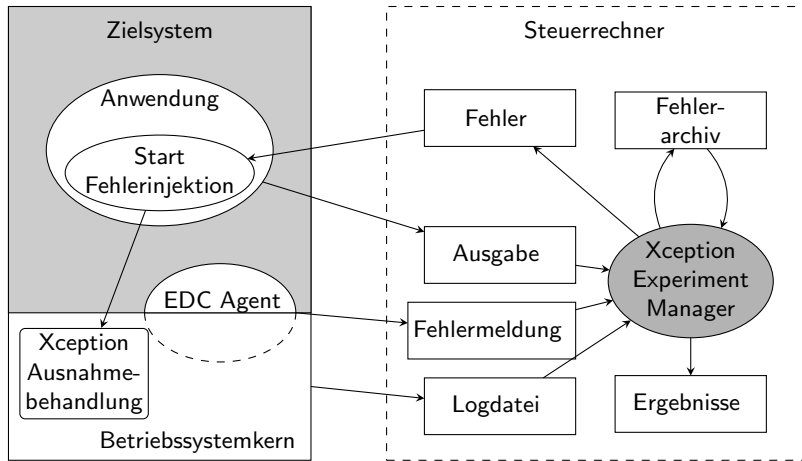


- SWIFI mithilfe von **Ausnahmen** (engl. *exceptions/traps*)
 - moderne Prozessoren bringen dedizierte Unterstützung für Debugger mit
 - Haltepunkte (engl. *break-points*) für Kontrollfluss und Daten
 - Einzelschrittmodus (engl. *trace mode*) für schrittweise Ausführung
 - bestimmte Prozessoreinheiten lassen sich gezielt kontrollieren
 - Ein-/Ausschalten der **Fließkommaeinheit** (engl. *floating-point unit, FPU*)
 - Speicher **Speicherverwaltung** (engl. *memory-management unit, MMU*)
 - „traditionelle“ Peripheriegeräte
 - **Zeitgeber** (engl. *timer*) laufen einmal/periodisch ab

↪ gezielte Aktivierung der Fehlerinjektion durch diese Ausnahmen
- Evaluierung der Fehlertoleranz durch **Profilierung** (engl. *profiling*)
 - moderne Prozessoren integrieren hierfür spezielle Zähler
 - Anzahl von Speicherzugriffen, Instruktionen, Cache-Treffern, ...

↪ Auswertung wann Defekte aktiviert und gefunden werden





- **Zielsystem** \leadsto Durchführung der Fehlerinjektion
- **Steuerrechner** \leadsto Auswahl/Start der Experimente, Ergebnisprotokoll



- Elemente des Zielsystems
 - Xception Ausnahmebehandlungen
 - werden direkt aktiviert, sind **kein Bestandteil der Anwendung/Betriebssystem**
 - die Ausführung findet im Kontext des Betriebssystems statt
 - ~> Fehlerinjektion ist in der Anwendung und im Betriebssystem möglich
 - Xception Laufzeitbibliothek
 - Fehlerinjektion muss durch die Anwendung aktiviert werden
 - Xception Beobachtungskomponenten, EDC Agent
 - liefern evtl. erzeugte Fehlermeldungen an den Steuerrechner
 - Auslesen etwaiger Zählerregister des Prozessors
- Elemente des Steuerrechners
 - Xception Experiment Manager
 - die Benutzerschnittstelle von Xception
 - Aggregation der eingesammelten Informationen ~> **Ergebnisprotokoll**
 - Fehlermeldungen des EDC Agenten. Logdatei des Betriebssystemkerns
 - Ausgaben der getesteten Anwendung



- Injektion **transienter Fehler** in die Funktionseinheiten eines Prozessors
 - Injektion **permanenter Fehler** im Einzelschrittmodus **zu teuer**
- in folgende **Funktionseinheiten** können Fehler injiziert werden:
 - Instruktionausführung
 - Ganzzahl- und Fließkommaeinheiten
 - Speicher und Speicherverwaltung
 - interner Daten- und Adressbus
 - Allgemeinzweck- und Statusregister
- die Grenzen zwischen den Einheiten sind fließend
 - Injektion in den Datenbus ist nicht von einer Injektion in die Instruktionausführung oder die Ganzzahleinheit unterscheidbar
- teilweise setzt die Hardware aber Grenzen
 - Injektion direkt in den Speicher ist wegen ECC schwierig



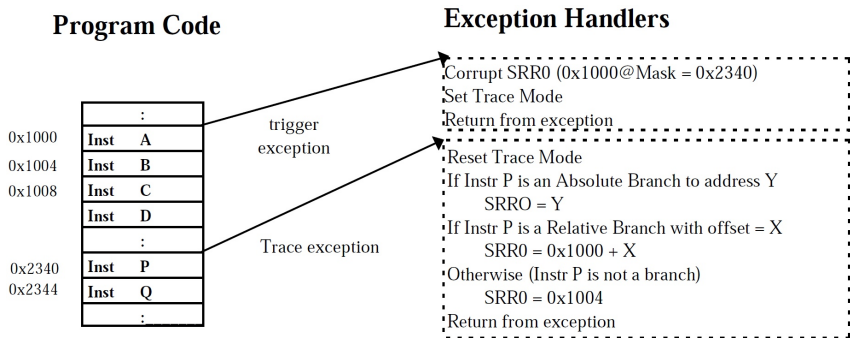
- **Auslöser für Injektionen sind**
 - **Laden einer Instruktion** von einer bestimmten Adresse
 - **Laden eines Operanden** von einer bestimmten Adresse
 - **Schreiben eines Operanden** an eine bestimmte Adresse
 - **Auszeiten** relativ zum Beginn des Programms
 - **Kombinationen** aus den obigen Auslösern
- **injizierte Fehlertypen**
 - Manipulation beliebig vieler Bits in einem 32-Bit-Wort
 - angegeben durch eine entsprechende Bitmaske
 - verschiedene logische Verknüpfungen für diese Bits sind möglich
 - „stuck-at-zero“, „stuck-at-one“, „bitflip“, „bridging“, . . .
 - generative Beschreibung zu injizierender Fehler möglich
 - z. B. gibt eine Bitmaske die unteren 16 Bit eines 32-Bit-Worts an
 - hiervon sollen immer 2 Bits durch „bitflip“ manipuliert werden



- Xception stellt dem Anwender folgende Information zur Verfügung
 - **Zustand der Injektion**
 - War die Injektion erfolgreich? Wurde der Defekt aktiviert?
 - Welche Speicheradresse oder welche Instruktion wurde geändert?
 - **Ausführungszeit**
 - Wie lange wurde das Programm ausgeführt? Gab es eine Auszeit?
 - **Rückgabewert**
 - Was ist der Rückgabewert der ausgeführten Anwendung?
 - **Fehlermeldung des Betriebssystem**
 - Vom zugrunde liegenden Betriebssystem erkannte Fehler
 - **Ausgabe der Anwendung**
 - Stimmt das berechnete Ergebnis mit dem des Referenzlaufs überein?
 - **Fehlererkennung** (engl. *error detection mechanism, EDM*)
 - Wurden auf dem Zielsystem Fehler durch den erkannt? \leadsto „EDM-Agent“
 - **Laufzeitinformation**
 - über die Zähler des Prozessors erfasste Messwerte
 - Anzahl von Instruktionen, Schreib- und Lesezugriffe, Sprungvorhersage, ...



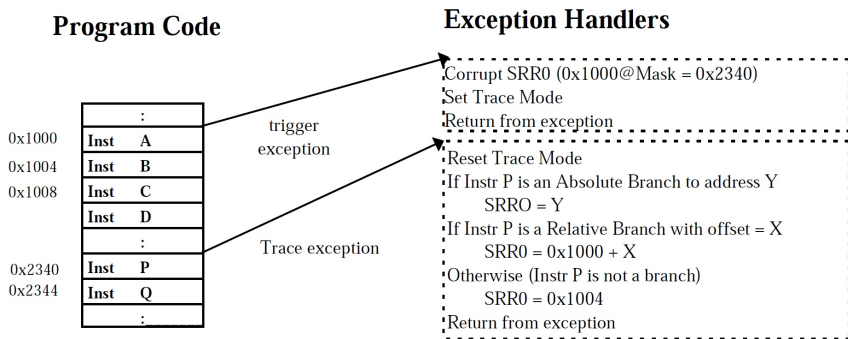
- korrumpierte Adresse auf dem Adressbus beim Laden einer Instruktion



- 1 Programmiere Debug-Register \leadsto Ausnahme an Adresse 0x1000
 - 2 Ausnahme korrumpiert Rücksprungadresse
 - diese wird hier im Register SRR0 gespeichert
- \leadsto beim Rücksprung wird die Instruktion an Adresse 0x2340 ausgeführt



- korrumpierte Adresse auf dem Adressbus beim Laden einer Instruktion



- 3 an Adresse 0x2340: das Programm korrekte fortsetzen
 - würde an Adresse 0x2344 fortgefahren wäre das ein anderer Fehlertyp
 - es soll nur einmal eine falsche Instruktion gelesen werden
 - Fortsetzungsadresse hängt von der entsprechenden Instruktion ab



- 1 Überblick
- 2 FARM
- 3 Fehlerinjektionstechniken
- 4 Xception
- 5 FAIL***
- 6 Zusammenfassung



- Validierung von CoRed (s. Folie IX/29 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 \leadsto 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
- ~> eine einfache Verwendung „out-of-the-box“ unmöglich



- FAIL* \leadsto **Fault Injection Leveraged**

- vorrangiges Entwurfsziel: Flexibilität bei der Fehlerinjektion

- ☞ Verwendung **existierender virtueller Plattformen** (Bochs, OVP, ...)

- aktuelle, gewartete Softwarebasis
- schneller Wirtsrechner \leadsto schnelle Durchführung von Experimenten
- voller Zugriff auf und volle Kontrolle über die Plattform

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

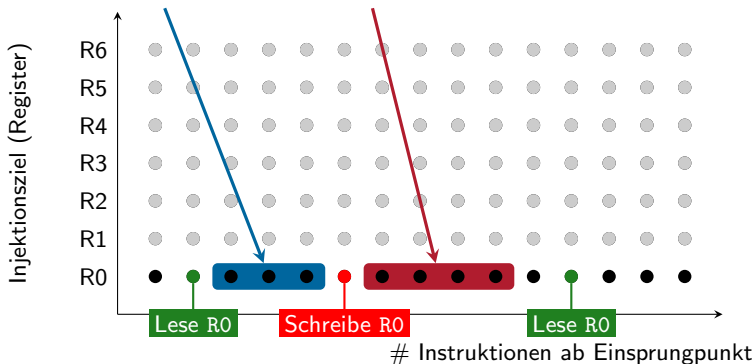
- wiederverwendbare Beschreibung von Experimenten

- ☞ mehr dazu in den Übungen!



Reduktion der Kampagnendauer

- Reduktion des Fehlerrisikos 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 Überblick
- 2 FARM
- 3 Fehlerinjektionstechniken
- 4 Xception
- 5 FAIL*
- 6 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, emulations}-basiert

Xception → ein Werkzeug für SWIFI

- Verwendung von **prozessorspezifischen Ausnahmen**
- **vielseitige Fehlerinjektion** (Stelle, Fehlertyp, Auslösung)

FAIL* → Grundlage für **generische Fehlerinjektion**?

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



- [1] 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

- [2] CARREIRA, J. ; MADEIRA, H. ; SILVA, J. G. ; SILVA, J. G.:
Xception: Software Fault Injection and Monitoring in Processor Functional Units.
In: *IFIP Working Conference on Dependable Computing for Critical Applications (DCCA-5)*, 1995, S. 135–149

- [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



- [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] 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

