Verlässliche Echtzeitsysteme

Grundlagen

Peter Ulbrich

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
www4.informatik.uni-erlangen.de

21. April 2015

Überblick

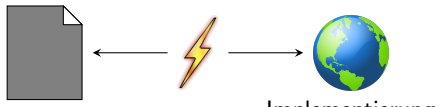
Wir kümmern uns ausschließlich um Fehler!

- ⇝ Das ist nur ein kleiner Aspekt zuverlässiger Systeme!
- . . . aber dennoch sind nicht alle Fehler gleich . . .
  - Beeinflusst jeder Fehler das Verhalten eines Systems?
- Was bedeutet es, mit Fehlern umgehen zu können?
  - Wie gibt man z. B. an, dass ein korrektes Ergebnis geliefert werden wird?
  - Worin unterscheiden sich etwa Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit?
- Wie schwerwiegend ist ein Fehler?
  - Welchen Schaden kann ein Fehler verursachen?
- Software- vs. Hardware-Fehler
  - grundlegende Klassifikation, Ursachen und Entstehung

Gliederung

Definition: Fehler

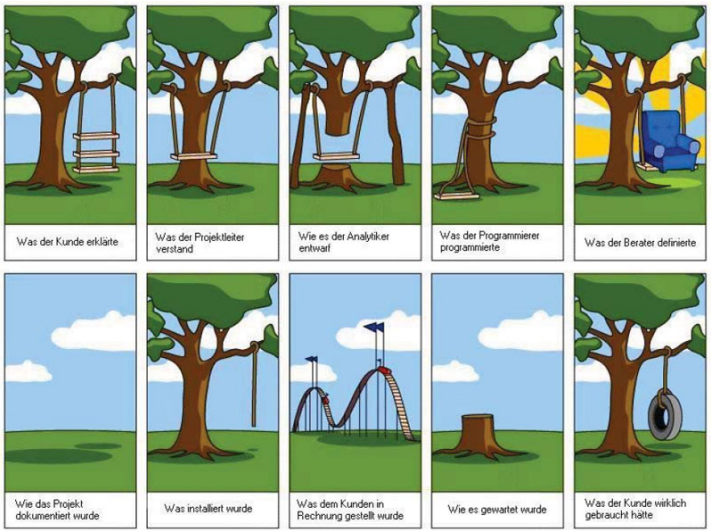
- laut DIN EN ISO 8402:1995-08 [4] ist ein Fehler die „Nichterfüllung einer festgelegten Forderung“



- Fehler kennen demzufolge viele Ausprägungen, . . .
  - sie können lediglich als störend empfunden werden
    - die eigentliche Funktion ist noch vorhanden, es geht aber Komfort verloren
  - sie können die Funktionalität beeinträchtigen
    - das Abspielen eines Videos „ruckelt“, die Bildrate wird nicht erreicht
  - sie können aber auch zum vollständigen Systemversagen führen
    - eine fehlerhafte Fluglageregelung kann den I4Copter abstürzen lassen
- **Wichtig:** der Bezugspunkt ist die Spezifikation ⇝ **Verifikation**
  - Haben wir das System korrekt implementiert?

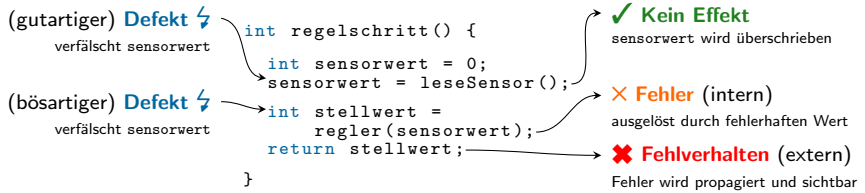
Abgrenzung: Keine Validierung

Haben wir das korrekte System implementiert?



Wann ist ein Fehler nun ein Fehler?

Das Problem beginnt, wenn der Schuh drückt!

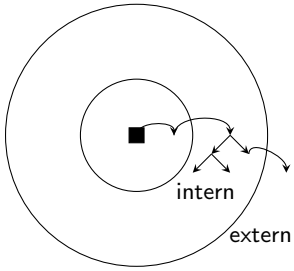


- Defekte (engl. *faults*) sind die Quelle allen Übels
  - Ursachen: Software-Bugs, Produktionsfehler, äußere Einflüsse, ...
  - beziehen sich auf die Struktur
  - gutartige Defekte (engl. *benign faults*) führen nicht zu einem Fehler
- die Manifestation eines Defekts ist ein innerer Fehler (engl. *error*)
  - ⇝ der Defekt ist also bösartig (engl. *malign fault*)
  - beziehen sich auf den nicht sichtbaren, inneren Zustand
- außen sichtbare, innere Fehler heißen Fehlverhalten (engl. *failure*)
  - beziehen sich auf das beobachtbare Verhalten
  - man spricht von der fault ⇝ error ⇝ failure-Kette [11, Kapitel 1]

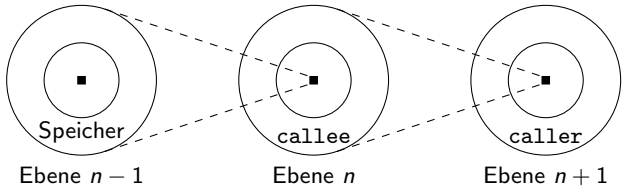
Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit

Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!

- gutartige Defekte haben keinen Einfluss auf das korrekte Systemverhalten
- bösartige Defekte/innere Fehler beeinflussen den internen Zustand
  - intern kann sich der Fehler weiter verbreiten
- wird der innerer Fehler nach außen gereicht, ist er als Fehlverhalten sichtbar



- über die fault ⇝ error ⇝ failure-Kette pflanzen sich Fehler fort



- und können schließlich zum vollständigen Systemversagen führen

Klassifikation nach dem Auftreten

Weiter Eigenschaften von Fehlern

- Fehler müssen nicht immer auftreten ...

permanente Fehler (engl. *permanent fault/error/failure*)
  - bestehen eine unbegrenzt lange Zeitdauer
  - bis sie durch eine korrigierende Maßnahme behoben werden

sporadische Fehler (engl. *intermittent fault/error/failure*)
  - treten unregelmäßig auf, häufen sich aber in vielen Fällen und ...
  - sind oft Vorboten drohender, permanenter Fehler

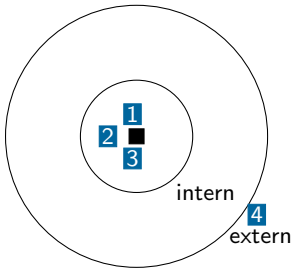
transiente Fehler (engl. *transient fault/error/failure*)
  - treten wie sporadische Fehler unregelmäßig auf ...
  - münden i. d. R. aber nicht in einem permanenten Fehler

- Implikationen aus der fault ⇝ error ⇝ failure-Kette:
  - normalerweise: transiente Defekte $\not\rightsquigarrow$ permanentes Fehlverhalten
  - möglich: permanenter Defekt ⇝ transientes Fehlverhalten
    - wenn sie nur unregelmäßig den inneren Sichtbarkeitsbereich verlassen

Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

Versuchen die fault ⇝ error ⇝ failure-Kette aufzubrechen

1. Vorbeugung – versucht die Entstehung von Defekten in der Produktion zu verhindern
   - z.B. durch Entwicklungsmethoden
2. Entfernung – vor der Auslieferung oder im Zuge einer planmäßigen Wartung
   - erfordert die Erkennung von Defekten ↦ Qualitätssicherung
3. Vorhersage – Wo treten evtl. Defekte auf?
   - ermöglicht die Entfernung oder ihre Umgehung
4. Toleranz – verhindert nicht den Defekt, aber die Fortpflanzung zum Fehlverhalten
   - z.B. durch Maskierung innerer Fehler



Ziel zuverlässiger Systeme

☞ Reduktion des vom Benutzer beobachtbaren Fehlverhaltens

Folgen von Fehlern

Wenn die fault ⇝ error ⇝ failure-Kette zugeschlagen hat . . .

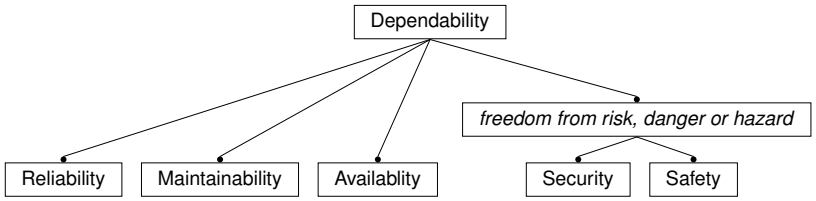
Nicht jedes beobachtbare Fehlverhalten muss auch entdeckt werden:

☞ unerkannte Datenfehler (engl. *silent data corruption, SDC*)
- unbemerkte Fehlerfortpflanzung innerhalb oder außerhalb des Systems
  - fehlerhafte Berechnungsergebnisse oder Ausgabewerte
- sehr, sehr schwer ausfindig zu machen
  - das verursachte Fehlverhalten wird erst viel später sichtbar
- die Fehlererkennung verhindert die unbemerkte Fehlerausbreitung
  - Zusicherungen (engl. *assertions*) übernehmen genau diese Aufgabe

☞ erkannte, nicht korrigierbare Fehler (engl. *detected unrecoverable error, DUE*)
- eine Fortpflanzung kann gezielt unterbunden werden (⇝ fail-stop)
- die Stellen, an diese Fehler auftreten, lassen sich vergleichsweise einfach herausfinden, z. B. durch eine Ablaufverfolgung (engl. *backtrace*)

Gliederung

„Verlässlichkeit“ ist ein vielschichtiger Begriff



> *The trustworthiness of a computing system which allows reliance to be justifiably placed on the service it delivers. [6]*

Zuverlässigkeit (engl. *reliability*)

Mittlere Betriebsdauer

$R(t)$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein System seinen Dienst bis zum Zeitpunkt t leisten wird, sofern es bei $t = t_0$ betriebsbereit war

- Annahme: eine konstante Fehlerrate von λ Fehler/Stunde
- Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t: $R(t) = exp(-\lambda(t - t_0))$
  - mit $t - t_0$ gegeben in Stunden
- Inverse $1/\lambda$ ist die (engl. *mean time to failure*) (MTTF)

ultra-hohe Zuverlässigkeit $\mapsto \lambda \leq 10^{-9}$ Fehler/Stunde

- Beispiel: elektronisch gesteuerte Bremsanlage im Automobil
  - das Kfz sei durchschnittlich eine Stunde täglich in Betrieb
  - dann darf jährlich nur ein Fehler pro eine Million Kfz auftreten
- Beispiele: Eisenbahnsignalanlagen, Kernkraftwerküberwachung

Wartbarkeit (engl. *maintainability*)

Mittlere Reparaturdauer

$M(d)$ die Wahrscheinlichkeit, dass das System innerhalb Zeitspanne d nach einem reparierbaren Fehler wieder hergestellt ist

- Ansatz: konstante Reparaturrate von μ Reparaturen/Stunde
- die Inverse $1/\mu$ ist dann die *mean time to repair* (MTTR)

Fundamentaler Konflikt zwischen Zuverlässigkeit und Wartbarkeit:

- ein wartbares System erfordert einen modularen Aufbau
  - kleinste ersetzbare Einheit (engl. *smallest replaceable unit*, SDU)
  - über Steckverbindungen lose gekoppelt mit anderen SDUs
  - dadurch ist jedoch eine höhere (physikalische) Fehlerrate gegeben
  - darüberhinaus verbuchen sich höhere Herstellungskosten
- ein zuverlässiges System ist aus einem Guss gefertigt...

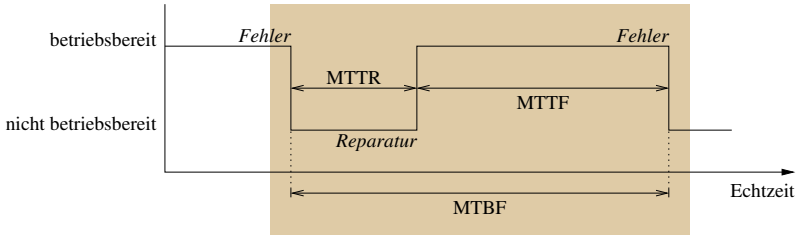
> *Beim Entwurf von Produkten für den Massenmarkt geht die Zuverlässigkeit meist auf Kosten von Wartbarkeit.*

Verfügbarkeit (engl. *availability*)

MTTF und MTTR im Zusammenhang

Maß zur Bereitstellung einer Funktion vor dem Hintergrund eines abwechselnd korrekt und fehlerhaft arbeitenden Systems

- Zeitanteil der Betriebsbereitschaft: $A = MTTF/(MTTF + MTTR)$
- $MTTF + MTTR$ auch kurz: *mean time between failures* (MTBF)



☞ hohe Verfügbarkeit bedeutet kurze MTTR und/oder lange MTTF

Sicherheit $\mapsto$ *Security* und *Safety*

Robustheit des Echtzeitrechensystems stärken

security Schutz von Informationen und Informationsverarbeitung vor „intelligenten“ Angreifern

- allgemein in Bezug auf Datenbasen des Echtzeitsystems
  - Vertraulichkeit (engl. *confidentiality*)
  - Datenschutz (engl. *privacy*)
  - Glaubwürdigkeit (engl. *authenticity*)
- speziell z.B. Diebstahlsicherung: Zündungssperre im Kfz
  - Kryptographie (engl. *cryptography*)

safety Schutz von Menschen und Sachwerten vor dem Versagen technischer Systeme

- Zuverlässigkeit trotz bösartigen Fehlverhaltens
  - Kosten liegen um Größenordnungen über den Normalbetrieb
- Abgrenzung von unkritischen, gutartigen Fehlern
- oft ist Zertifizierung (engl. *certification*) erforderlich

Verlässlichkeit ↔ Komplexität

Automobil eine Bestandsaufnahme vom Jahr 2005 ...

- etwa 90 % der Innovationen im Auto bringt die Elektronik ein
  - gut 80 % davon sind Software
- etwa ein Drittel aller Pannen liegen an fehlerhafter Elektronik
  - gut 80 % davon sind Softwarefehler

> *Everything should be made as simple as possible, but no simpler. (Albert Einstein)*

> *Vollkommenheit entsteht offensichtlich nicht dann, wenn man nichts mehr hinzuzufügen hat, sondern wenn man nichts mehr wegnehmen kann. (Antoine de Saint Exupery)*

Verlässlichkeit unterscheidet sich je nach System

Je nachdem, wie kritisch sich ein einzelner Fehler auswirkt.

Hochverfügbare Systeme z. B. Telekommunikationstechnik

- müssen ihren Dienst möglichst ununterbrochen verrichten
- einzelne Fehler sind jedoch verkraftbar (⇝ fail-soft)
  - sie werden meist auf höheren Ebenen abgefangen (z. B. TCP/IP)

⇝ kurze Fehlererholung steht im Vordergrund

Langlebige Systeme z. B. Satelliten

- müssen auch nach Jahren noch funktionieren (⇝ fail-slow)
- eine Fehlerbehebung ist oft technisch nicht möglich

⇝ hohe Zuverlässigkeit steht im Vordergrund

Sicherheitskritische Systeme z. B. Flugzeuge, Kernkraftwerke, Eisenbahn, Industrieanlagen, Medizintechnik ...

- zuverlässig und ununterbrochene Funktion (⇝ fail-safe)
  - Diese Anlagen sind nur sinnvoll, wenn sie im Betrieb sind!
- hohe Ansprüche an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Gliederung

Wie schwer wiegt das Fehlverhalten eines Systems?

- Klärung durch eine Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung
  - Identifikation gefährlicher Ereignisse und
  - ihre Klassifikation hinsichtlich verschiedener Kriterien
- Faustregel: Risiko = Wahrscheinlichkeit × Schweregrad
  - Wahrscheinlichkeit: Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses
  - der Schweregrad bemisst sich häufig als „Konsequenz / Ereignis“

⇝ Risiko ≈ Wahrscheinlichkeit der Konsequenz

- der entstehende finanzielle Schaden ist oft ein Maß für die Konsequenz

- Normen reglementieren die Klassifikation, z. B. ISO 26262 [7]
- Kriterien:
  - Schweregrad
  - Wahrscheinlichkeit
  - Kontrollierbarkeit

Schweregrade nach ISO 26262:

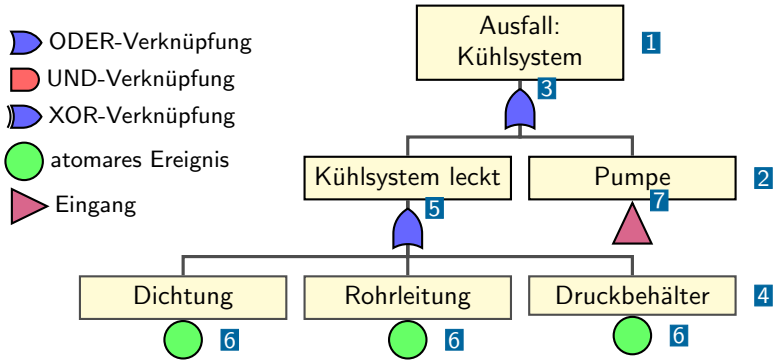
S0	keine Verletzungen
S1	leichte Verletzungen
S2	schwere o. lebensbedrohliche Verletzungen
S3	lebensbedrohliche o. tödliche Verletzungen

Zusammenhang: Defekt ↔ Fehlverhalten

Welche Defekte führen zum beobachtbaren Fehlverhalten?

- eine Fehlerbaumanalyse (engl. *fault-tree analysis*) [3] ermittelt die Ereignisse, die zum beobachtbaren Systemverhalten führen
  - verfeinernde Analyse (engl. *top-down analysis*)
    - das unerwünschte Fehlverhalten bildet die Wurzel des Fehlerbaumes
    - ausgehend davon werden die Ursachen des Fehlverhaltens identifiziert
  - arbeitet auf dem Fehlerraum (engl. *failure space*) des Systems
  - ↔ Zuverlässigkeitsblockdiagrammen (engl. *reliability block diagrams*)
    - diese befassen sich mit dessen korrekter Funktion
- Beispiel: Reaktorkühlsystem eines Kernkraftwerks fällt aus
  - das Kühlsystem leckt oder
    - eine Dichtung ist defekt oder
    - eine Rohrleitung hat einen Riss oder
    - der Reaktordruckbehälter hat einen Riss
  - die Kühlmittelpumpe funktioniert nicht
    - die Pumpe ist defekt oder
    - die Energieversorgung ist ausgefallen

Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen

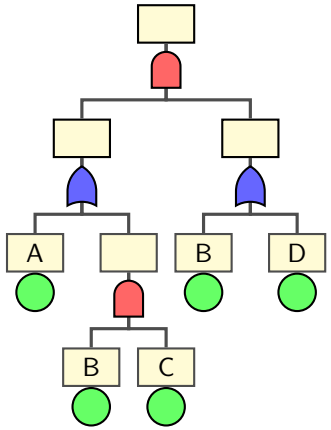


1. ⇝ „Top-Level"-Ereignis
2. ⇝ Ereignisse auf Ebene 2
3. verknüpfe sie logisch
4. ⇝ Ereignisse auf Ebene 3
5. verknüpfe sie logisch
6. atomare Ereignisse beenden Gliederung
7. Eingänge zerlegen den Fehlerbaum ⇝ neuer Fehlerbaum

Schnitte und Fehlerbäume

Welche Defekte führen letztendlich zum Systemausfall?

Ein Schnitt (engl. *cut-set*) enthält genau die atomaren Ereignisse, die das „Top-Level"-Ereignis verursachen:



- $\{A, B, D\}$ wäre eine solche Menge
- Minimalschnitte sind besonders interessant
  - eng. *minimal cut-sets*
  - z. B. $\{A, B\}$, $\{A, D\}$, $\{B, C\}$
- Fehlerbäume ↔ logische Ausdrücke
  - Umformung durch Aussagenlogik
  - Minimalschnitte ⇔ Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik (engl. *boolean satisfiability problem*)

⇝ Bestimmung durch SAT-Solving

Schnitte und Fehlerbäume (Forts.)

- Minimalschnitte liefern genau die kritischen atomaren Ereignisse, die ein unerwünschtes Systemverhalten hervorrufen

☞ Es lohnt sich, diese Defekte zu vermeiden!

- duales Konzept: Minimalpfade (engl. *path-sets*)
  - die minimale Menge atomarer Ereignisse, die das unerwünschte „Top-Level"-Ereignis verhindern
    - sofern die mit ihnen verbundenen Defekte nicht auftreten
  - Es genügt also, diese Defekte auszuschließen!
  - Berechnung: tausche UND- und ODER-Verknüpfungen

⇝ bestimme anschließend die entsprechendenden Minimalschnitte

- im Beispiel auf Folie III/23 sind dies: $\{A, B\}$, $\{A, C\}$, $\{B, D\}$

Gliederung

Softwarefehler (engl. *software bugs*) ...

- sind permanente Defekte
  - manifestieren sich aber nicht unbedingt in einem inneren Fehler, von außen beobachtbarem Fehlverhalten oder einem Systemausfall
  - Beispiel: sog. Heisenbugs verursacht durch Nebenläufigkeitsfehler
    - auch Bohrbugs, Mandelbugs oder Schrödinbugs
    - treten manchmal auf, manchmal nicht ⇝ sehr schwer zu reproduzieren
- resultieren aus einer fehlerhaften Umsetzung der Spezifikation
  - in der Regel durch den Programmierer, Architekten, ...
  - Ursprung: Anforderungserhebung, Entwurf, Implementierung, ...
    - betroffen ist der komplette Zyklus der Softwareerstellung
- sind systematische Fehler
  - Betreibt man mehrere Instanzen derselben Softwareversion
  - mehrfach unter identischen, äußeren Bedingungen,

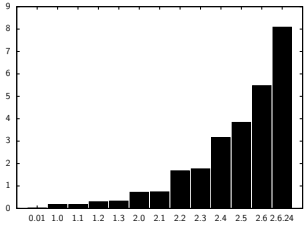
  ⇝ werden alle Instanzen dieselben beobachtbaren Fehler zeigen.
    - die äußeren Bedingungen sind allerdings nicht ohne Weiteres reproduzierbar
    - vgl. Trägerrakete Ariane 5 [9]: Ausfall von SRI 1 und SRI 2 aufgrund desselben Softwarefehlers

Ursachenforschung – Wie entstehen Softwarefehler?

Eine Facette eines komplexen Problems

- Komplexität ist der natürliche Feind korrekter Programme
  - ... und die Komplexität nimmt stetig zu: (Million-)LOC

Linux Kernel



Microsoft Windows [10]

Jahr	Produkt	Dev	Test	LOC
1993	NT 3.1	200	140	4-5
1994	NT 3.5	300	230	7-8
1995	NT 3.51	450	325	9-10
1996	NT 4.0	800	700	11-12
1999	NT 5.0	1400	1700	> 29
2001	NT 5.1	1800	2200	40
2003	NT 5.2	2000	2400	50

  - angefangen hat Linux in Version 1.0 mit ca. 170 KLOC
  - in Version 3.0 ist Linux bei ca. 15 Millionen LOC angekommen
- Faustregel: ca. 3 Defekte je 1000 LOC
  - pessimistischere Schätzungen gehen von bis 10 Defekten je 1000 LOC aus

  ⇝ ca. 1,5 bzw. 5 Millionen Defekte in Linux 3.0 bzw. Windows NT 5.2

Software will gepflegt werden!

Anforderungen an langlebige Softwaresysteme unterliegen ständigem Wandel

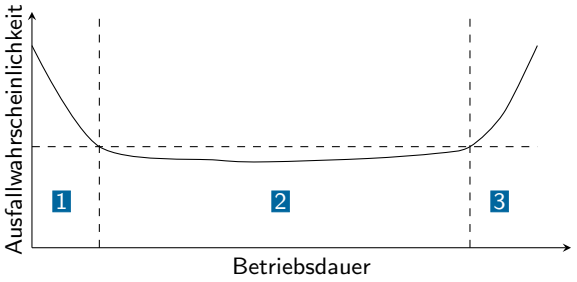
- Folgender Zusammenhang ist einfach interessant
  - Hier wird explizit keine Kausalbeziehung aufgestellt!
- Chou, SOSP 2001 [2]: den Großteil der Softwaredefekte im Linux-Kern findet man in Gerätetreibern
  - wenig verwunderlich: der Großteil des Linux-Kerns sind Gerätetreiber
  - aber: auch die Fehlerrate ist in Gerätetreibern am größten
- Padioleau, EuroSys 2006 [12]: Gerätetreiber und die zugehörigen Bibliotheken wachsen im Linux-Kern am stärksten
  - Bibliotheken und Treiber ändern sich ständig
    - Änderungen an den Bibliotheken erfordern Änderungen in den Treibern

  ⇝ Collateral Evolution bedingt durch Refactoring
- Kim, ICSE 2011 [8]: Welche Rolle spielt Refactoring?
  - ein Ergebnis: nach einem Refactoring gibt es mehr Fehlerbehebungen
    - Fehler durch fehlerhaftes Refactoring, Refactoring für die Fehlerbehebung

Hardwarefehler

- permanente Hardwarefehler sind ...
  - extrinsischer Natur: herstellungsbedingte Materialfehler
    - z. B. fehlerhafte Dotierung eines Halbleiters oder Materialunreinheiten
    - treten meist zu Beginn der Lebenszeit auf (⇝ Säuglingssterblichkeit)
  - intrinsischer Natur: Verschleißerscheinungen
    - kündigen sich meist durch sporadische Fehler an
    - treten meist am Ende der Lebenszeit auf
- Umwelteinflüsse verursachen transiente Hardwarefehler
  - mannigfaltige Ursachen
    - radioaktive Strahlung
    - elektromagnetische Interferenz
    - instabile Spannungsversorgung
    - Fertigungsstreuung bei einzelnen Transistoren
    - Temperaturschwankungen führen zum temporären Materialdefekten
    - ...
  - treten als schwer zu fassende „Bitkipper“ in Erscheinung

Wahrscheinlichkeit permanenter Hardwarefehler



1. erhöhte Säuglingssterblichkeit durch fertigungsbedingte Defekte
   - eine Einbrennphase (engl. *burn-in*) filtert fehlerhafte Elemente heraus
2. normaler, sinnvoll nutzbarer Betriebszeitraum
   - Ausfallrate nahe an der durchschnittlichen Ausfallwahrscheinlichkeit
3. durch Verschleiß bedingte Ausfälle
   - auch Halbleiterbauelement unterliegen einem Verschleißprozess
   - z. B. Elektromigration, Spannungsrisse durch thermische Belastungen, Verschleiß der Oxidschicht am Gate ...

Transiente Hardwarefehler

- Bitkipper durch Umladungen in Speicherzellen und Schaltkreisen

☞ verursacht durch ionisierende Strahlung

- Alphateilchen aus kontaminierten Chipgehäusen oder Lötkugeln
  - das waren „die ersten transienten Fehler“ [11, Kapitel 1.1]
  - direkte Erzeugung transienter Fehler durch Erzeugung von Elektronen und Löchern (engl. *holes*), die sich nicht rekombinieren
- Neutronen aus kosmischer Strahlung

  primäre kosmische Strahlung galaktische und solare Partikel

  sekundäre kosmische Strahlung entsteht durch Wechselwirkung primärer Strahlung mit Atomen aus der Erdatmosphäre

  terrestrische kosmische Strahlung bezeichnet die Partikel kosmischer Strahlung, die schließlich die Erdoberfläche erreichen

- Verfälschung von Kommunikation auf Bussen

☞ verursacht durch elektromagnetische Interferenz ⇝ Rauschen

- z. B. in Automobilen gibt es verschiedene Quellen für Wechselfelder
  - elektronischer Anlasser, Lichtmaschine, ...
- eine sparsame elektronische Abschirmung macht dies zum Problem

Anfälligkeit eines Schaltkreises für transiente Fehler

- die transiente Fehlerate (engl. *soft-error rate, SER*) eines Schaltkreises hängt (stark vereinfacht) von folgenden Faktoren ab:

$$\text{SER} = C \times \text{Neutronenfluss} \times \text{Fläche} \times e^{-Q_{crit}/Q_{coll}}$$

C prozess- und schaltkreisspezifische Konstante

Fläche des Schaltkreises

Q_{crit} minimale für eine Fehlfunktion notwendige Ladung
- wird mit Hilfe von Simulationen bestimmt

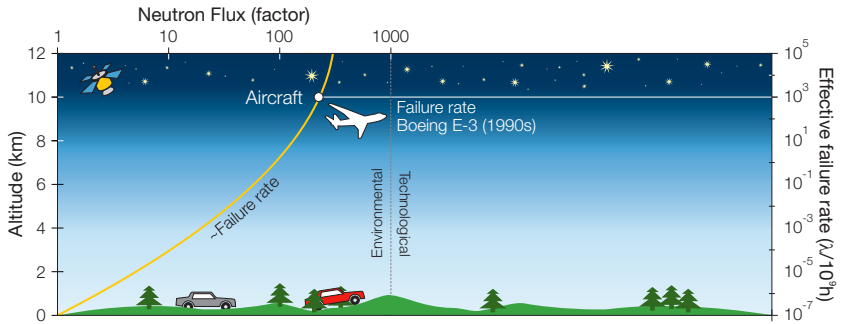
Q_{coll} Effizienz der Ladungsaufnahme
- abhängig von der Dotierung und der Versorgungsspannung V_{CC}
- je größer das Bremsvermögen (engl. *stopping power*) eines Teilchens ist, desto größer ist auch Q_{coll}
  - das Bremsvermögen beschreibt die Energie, die ein Teilchen auf einer bestimmten Wegstrecke an die umliegende Materie abgeben kann

- kleinere Halbleiterstrukturen sind Fluch und Segen zugleich

⇝ kleinere Fläche ⇝ kleinere SER

⇝ kleinere Q_{crit} ⇝ größere SER

Fehlerraten – Entwicklung und Tendenzen



Zahlen aus: [13]

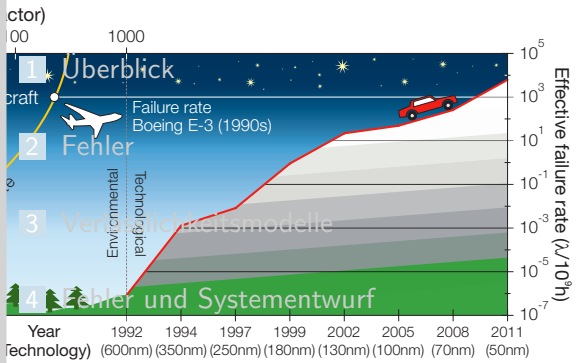
☞ Exakte Fehlerrate schwer zu ermitteln

- Fehlerrate pro Bit stagniert oder verbessert sich
  - deutet auf das Erreichen eines Sättigungsbereichs hin
  - ⇝ jede elektrische Beeinflussung bedeutet einen Bitkipper
- Fehlerrate des Systems hängt indes von vielen Faktoren ab

☞ Vorhersagen von Forschern und Herstellern [1, 5]

- Mehr Leistung und Parallelität ⇝ Auf Kosten der Zuverlässigkeit

Gliederung



6 Zusammenfassung

Zusammenfassung

Fehler ⇝ Alles dreht sich ausschließlich um Fehler!

- Fehlerfortpflanzung: fault ⇝ error ⇝ failure-Kette
- permanente, sporadische und transiente Fehler
- Vorbeugung, Entfernung, Vorhersage und Toleranz

Verlässlichkeitsmodelle ⇝ Wie gut kann man mit Fehlern umgehen?

- Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Verfügbarkeit

Systementwurf ⇝ Bereits hier werden Fehler berücksichtigt!

- Gefahren-, Risiko- und Fehlerbaumanalyse

Software- vs. Hardwarefehler ⇝ Klassifikation & Ursachen

- Softwarefehler ↦ permanente Defekte, Komplexität
- Hardwarefehler ↦ permanente & transiente Fehler, Fertigung, ionisierende Strahlung, elektromagnetische Interferenz

Literaturverzeichnis

[1] Borkar, S. :
Designing reliable systems from unreliable components: the challenges of transistor variability and degradation.
In: *IEEE Micro* 25 (2005), November, Nr. 6, S. 10–16.
http://dx.doi.org/10.1109/MM.2005.110. –
DOI 10.1109/MM.2005.110. –
ISSN 0272–1732

[2] Chou, A. ; Yang, J. ; Chelf, B. ; Hallem, S. ; Engler, D. :
An empirical study of operating systems errors.
In: Marzullo, K. (Hrsg.) ; Satyanarayanan, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '01)*.
New York, NY, USA : ACM Press, 2001. –
ISBN 1–58113–389–8, S. 73–88

[3] Deutsches Institut für Normung:
Fehlerbaumanalyse; Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes.
Berlin, Wien, Zürich : Beuth-Verlag, 1990 (DIN 25424)

[4] Deutsches Institut für Normung:
Qualitätsmanagement - Begriffe.
Berlin, Wien, Zürich : Beuth-Verlag, 1995 (DIN 8402)

Literaturverzeichnis (Forts.)

[5] Dixit, A. ; Heald, R. ; Wood, A. :
Trends from ten years of soft error experimentation.
In: *Proceedings of the 5th Workshop on Silicon Errors in Logic – System Effects (SLSE '09)*, 2009

[6] IFIP:
Working Group 10.4 on Dependable Computing and Fault Tolerance.
http://www.dependability.org/wg10.4, 2003

[7] International Organization for Standardization:
Part 3: Concept phase.
Genf, Schweiz : International Organization for Standardization, 2011 (ISO 26262: Road vehicles – Functional safety)

[8] Kim, M. ; Cai, D. ; Kim, S. :
An empirical investigation into the role of API-level refactorings during software evolution.
In: Taylor, R. N. (Hrsg.) ; Gall, H. (Hrsg.) ; Medvidović, N. (Hrsg.): *Proceedings of the 33nd International Conference on Software Engineering (ICSE '11)*.
New York, NY, USA : ACM Press, Mai 2011. –
ISBN 978–1–4503–0445–0, S. 151–160

Literaturverzeichnis (Forts.)

[9] Le Lann, G. :
An analysis of the Ariane 5 flight 501 failure – a system engineering perspective.
In: *Proceedings of International Conference and Workshop on Engineering of Computer-Based Systems (ECBS 1997)*.
Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, März 1997. –
ISBN 0–8186–7889–5, S. 339–346

[10] Maraia, V. :
The Build Master: Microsoft's Software Configuration Management Best Practices.
Addison-Wesley. –
ISBN 978–0321332059

[11] Mukherjee, S. :
Architecture Design for Soft Errors.
San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2008. –
ISBN 978–0–12–369529–1

[12] Padioleau, Y. ; Lawall, J. L. ; Muller, G. :
Understanding Collateral Evolution in Linux Device Drivers.
In: Berbers, Y. (Hrsg.) ; Zwaenepoel, W. (Hrsg.): *Proceedings of the ACM SIGOPS/EuroSys European Conference on Computer Systems 2006 (EuroSys '06)*.
New York, NY, USA : ACM Press, Apr. 2006. –
ISBN 1–59593–322–0, S. 59–71

Literaturverzeichnis (Forts.)

[13] 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