Verlässliche Echtzeitsysteme

Grundlagen

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://www4.cs.fau.de`

21. April 2016

Überblick

Wir kümmern uns ausschließlich um Fehler

→ Das ist nur ein kleiner Aspekt zuverlässiger Systeme!

Fehler stellen jedoch einen sehr komplexen Aspekt dar

- Was genau ist ein Fehler überhaupt?
- Beeinflusst jeder Fehler das Verhalten eines Systems?

Wie schwerwiegend ist ein Fehler?

- Welchen Schaden kann ein Fehler verursachen?

Wo entstehen Fehler und was beeinflussen sie?

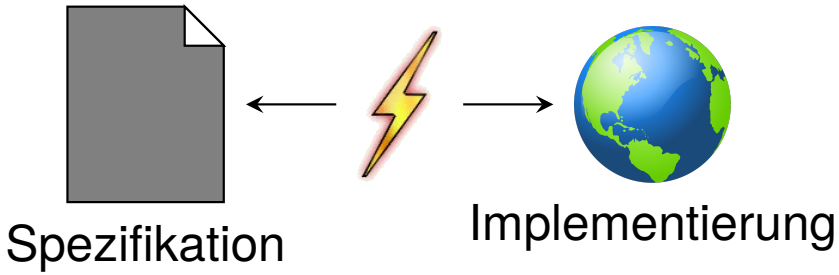
- Software- vs. Hardware-Fehler
- Grundlegende Klassifikation, Ursachen und Entstehung

Was bedeutet es, mit Fehlern umgehen zu können?

- Worin unterscheiden sich etwa Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit?

Gliederung

Definition: Fehler



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

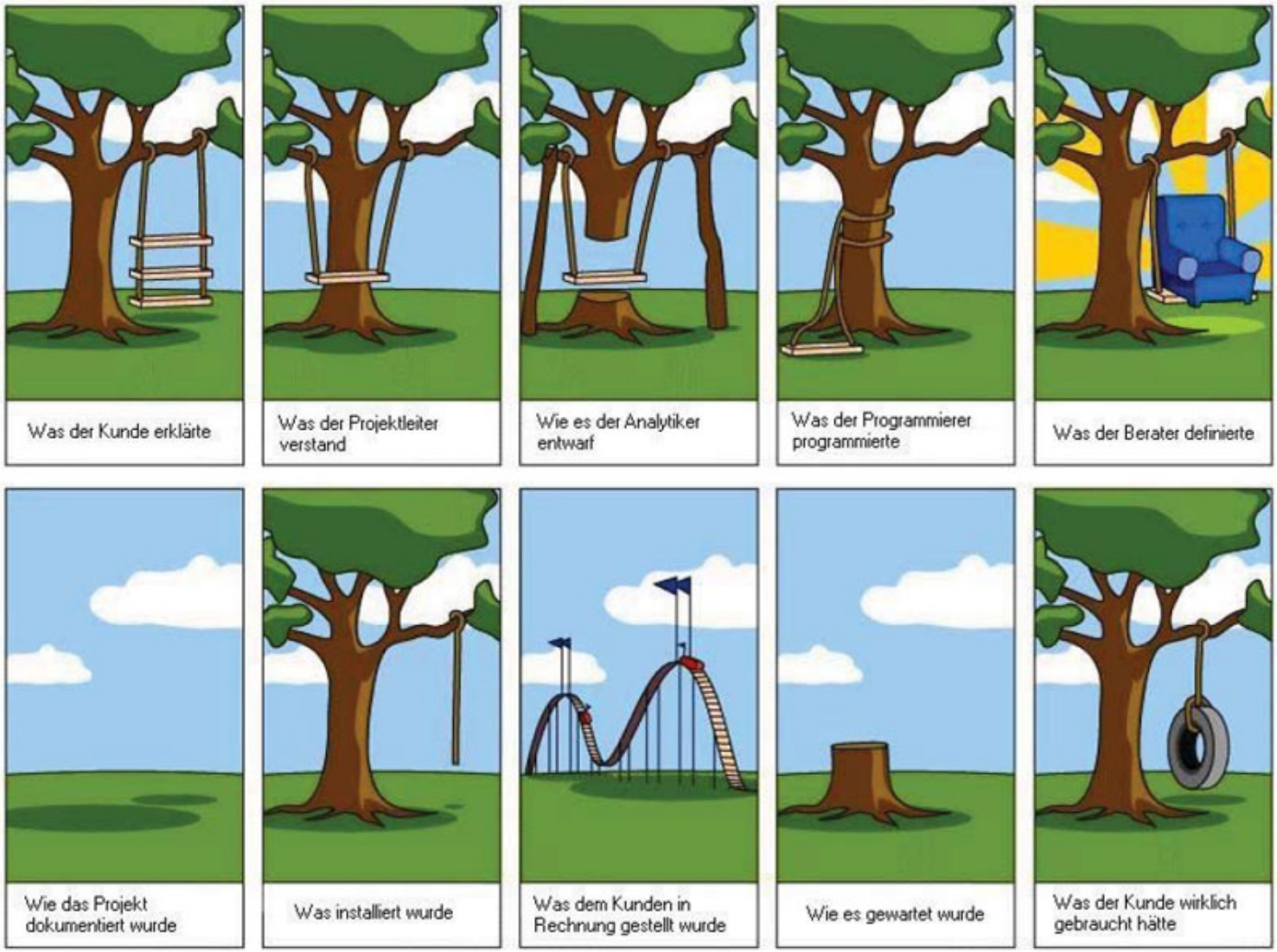
- Fehler kennen demzufolge viele Ausprägungen
  - Sie können lediglich als störend empfunden werden
    - Sie eigentliche Funktion ist noch vorhanden, es geht aber Komfort verloren
  - Sie können die Funktionalität beeinträchtigen
    - Das Abspielen eines Videos „ruckelt“, die Bildrate wird nicht erreicht
  - Sie können aber auch zum vollständigen Systemversagen führen
    - Eine fehlerhafte Fluglageregelung kann den I4Copter abstürzen lassen

⚠ Wichtig: Bezugspunkt ist die Spezifikation $\rightsquigarrow$ Verifikation

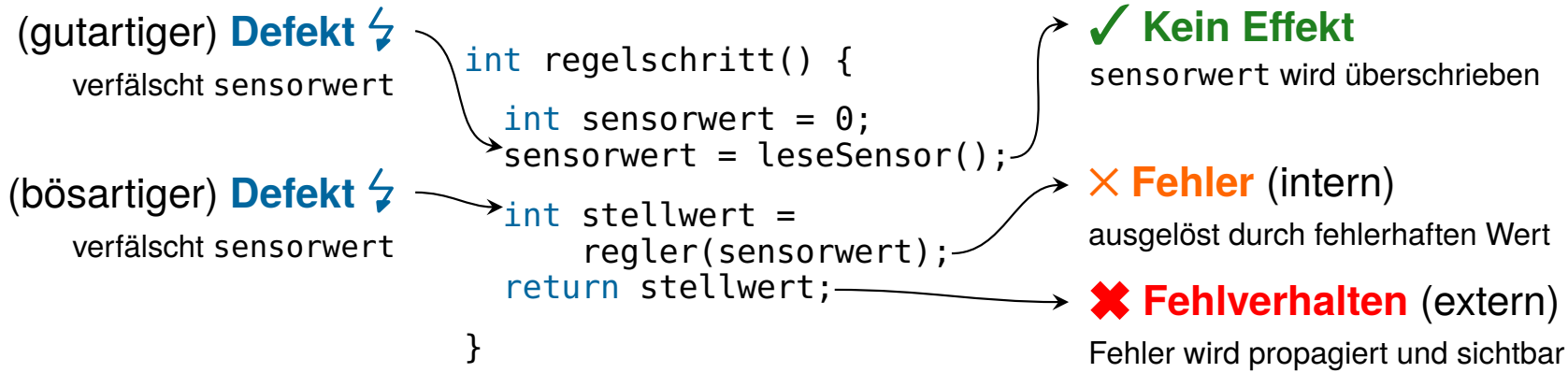
→ Haben wir das System korrekt implementiert?

Abgrenzung: Keine Validierung

Haben wir das korrekte System implementiert?



Wann ist ein Fehler nun ein Fehler?



1 Defekte (engl. *faults*) sind die Quelle allen Übels

- Ursachen: Software-Bugs, Produktionsfehler, äußere Einflüsse, ...
- Beziehen sich auf Strukturelemente (Daten, Anweisungen, ...)
- Gutartige Defekte (engl. *benign faults*) führen *nicht* zu einem Fehler

2 Manifestation eines Defekts ist ein innerer Fehler (engl. *error*)

→ Defekt ist also bösartig (engl. *malign fault*)

- Fehler beziehen sich auf den nicht sichtbaren, inneren Zustand

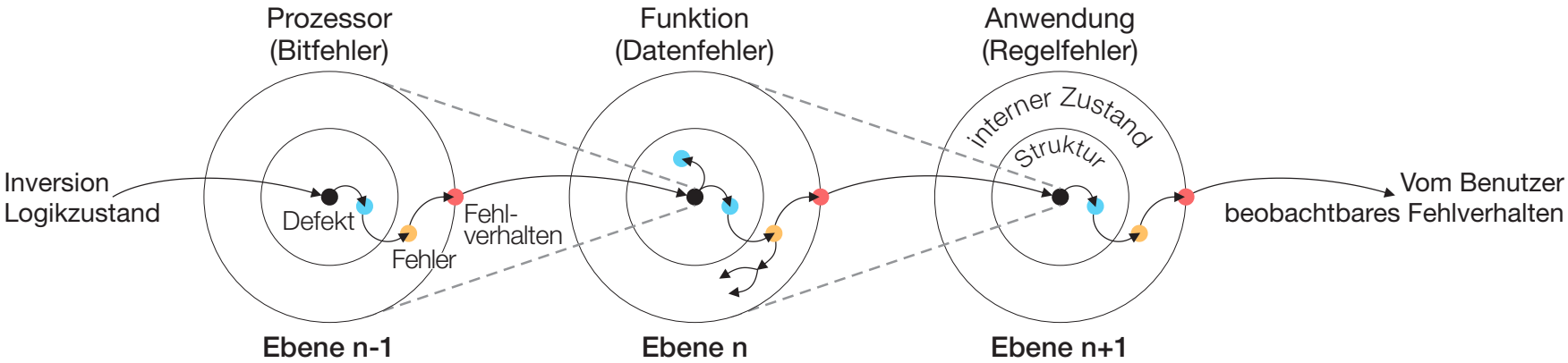
3 Sichtbarkeit des Fehlers führt zum Fehlverhalten (engl. *failure*)

- Beziehen sich auf das beobachtbare Verhalten

☞ Die sogenannte Fehlerkette [11, Kapitel 1] (fault $\rightsquigarrow$ error $\rightsquigarrow$ failure)

Fehlerkette: Sichtbarkeit und Betrachtungsebene

Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit



☞ Über die Fehlerkette pflanzen sich Fehler im System fort

- Gutartige Defekte haben keinen Einfluss
- Bösartige Defekte/innere Fehler beeinflussen den internen Zustand
  - Bezogen auf die aktuelle Betrachtungsebene
  - Intern kann sich der Fehler zunächst unbemerkt weiter verbreiten
- Äußere Fehler bezeichnen ein Fehlverhalten der aktuellen Ebene

⚠ Fehlerausbreitung kann schließlich zum beobachtbaren, vollständigen Systemversagen führen

Klassifikation nach dem Auftreten

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

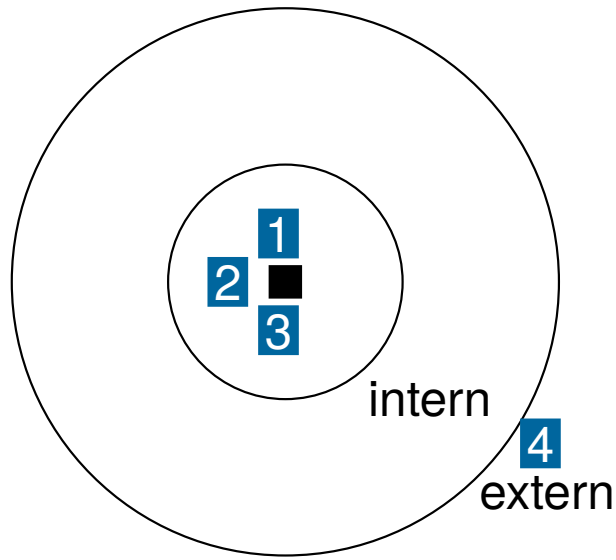
Implikationen aus der Fehlerkette:

- Normalerweise: transiente Defekte $\not\rightsquigarrow$ permanentes Fehlverhalten
- Möglich: permanenter Defekt $\rightsquigarrow$ transientes Fehlverhalten
  - Falls sie nur unregelmäßig den inneren Sichtbarkeitsbereich verlassen

Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

Versuchen die Fehlerkette 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
4. Toleranz – verhindert nicht den Defekt, aber die Fortpflanzung zum Fehlverhalten
   - z.B. durch Maskierung innerer Fehler



☞ Ziel: Reduktion des vom Benutzer beobachtbaren Fehlverhaltens

Folgen von Fehlern

☞ Nicht jedes beobachtbare Fehlverhalten wird entdeckt:

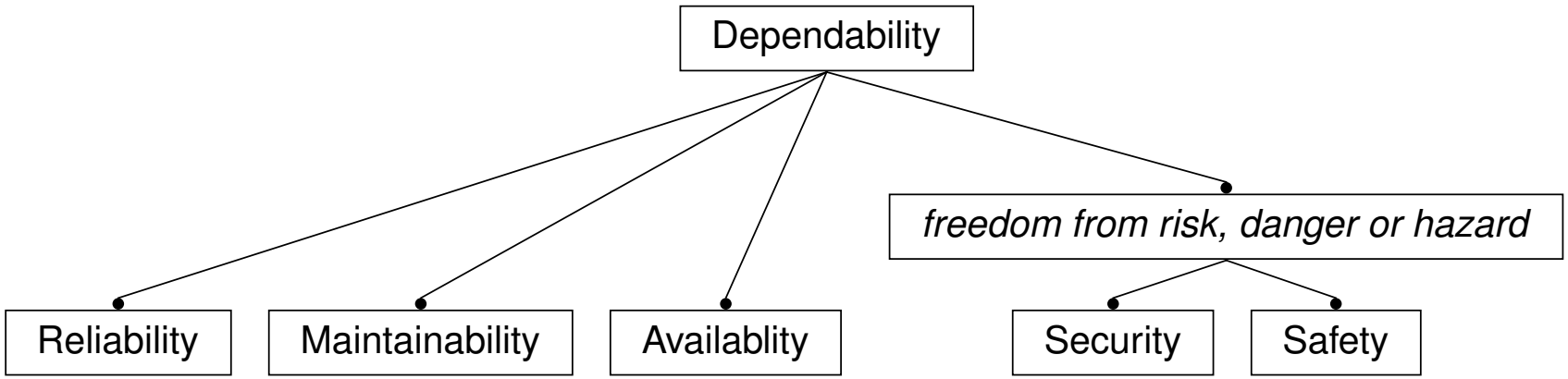
- Unerkannte Datenfehler (engl. *silent data corruption, SDC*)
  - Unbemerkte Fehlerfortpflanzung innerhalb oder außerhalb
    - Fehlerhafte Berechnungsergebnisse oder Ausgabewerte

  ⚠ Sehr, sehr schwer ausfindig zu machen
    - Zusammenhang Ursache ⟷ Fehlverhalten nicht erkennbar
  - Fehlererkennung verhindert die unbemerkte Fehlerausbreitung
    - Überführt unerkannte Datenfehler in erkannte Datenfehler
- Erkannte, nicht korrigierbare Fehler (engl. *detected unrecoverable error, DUE*)
  - Eine Fortpflanzung kann gezielt unterbunden werden
  - Fehlerstellen lassen sich vergleichsweise einfach herausfinden, z. B. durch eine Ablaufverfolgung (engl. *backtrace*)

  → Eine Fortführung der Funktion ist jedoch nicht möglich ⇝ fail-stop

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*)

☞ $R(t)$: Wahrscheinlichkeit, dass ein System seinen Dienst bis zum Zeitpunkt t leisten wird, sofern es bei 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
    - Kfz sei durchschnittlich eine Stunde täglich in Betrieb

    → Jährlich nur ein Fehler pro eine Million Kfz auftreten
  - Beispiele: Eisenbahnsignalanlagen, Kernkraftwerküberwachung

Wartbarkeit (engl. *maintainability*)

☞ $M(d)$: Wahrscheinlichkeit, dass das System innerhalb Zeitspanne d 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. . .

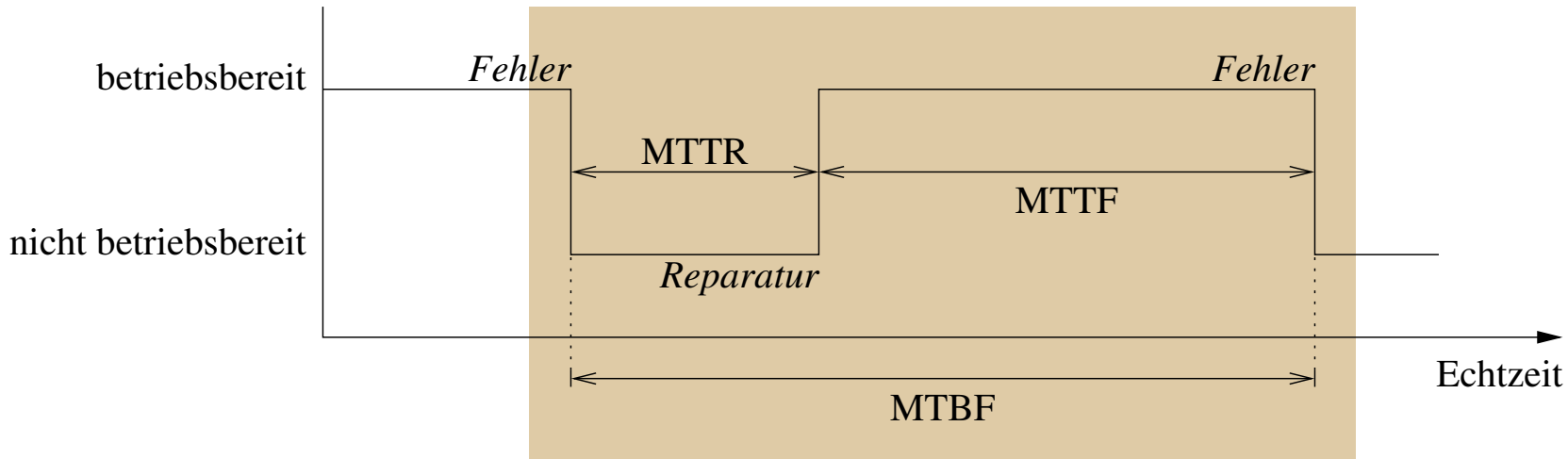
⚠ Beim Entwurf von Produkten für den Massenmarkt geht die Zuverlässigkeit meist auf Kosten von Wartbarkeit

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: $A = MTTF/(MTTF + MTTR)$
- $MTTF + MTTR$: *mean time between failures* (MTBF)



⚠ Hohe Verfügbarkeit bedeutet kurze MTTR und/oder lange MTTF

Sicherheit ↦ *Security* und *Safety*

Security: Schutz von Informationen und Informationsverarbeitung vor „intelligenten“ Angreifern

- Allgemein in Bezug auf Datenbasen
  - Vertraulichkeit (engl. *confidentiality*)
  - Datenschutz (engl. *privacy*)
  - Glaubwürdigkeit (engl. *authenticity*)
- Speziell z.B. Diebstahlsicherung
  - Kryptographie (engl. *cryptography*)

Safety: Schutz von Menschen und Sachwerten vor dem Versagen technischer Systeme

- Zuverlässigkeit trotz Fehlverhaltens
  - Kosten liegen um Größenordnungen über dem 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 ($\rightsquigarrow$ fail-soft)
  - Sie werden meist auf höheren Ebenen abgefangen (z. B. TCP/IP)

$\rightarrow$ Kurze Fehlererholung steht im Vordergrund

Langlebige Systeme z. B. Satelliten

- Müssen auch nach Jahren noch funktionieren ($\rightsquigarrow$ fail-slow)
- Eine Fehlerbehebung ist oft technisch nicht möglich

$\rightarrow$ Hohe Zuverlässigkeit steht im Vordergrund

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

- Zuverlässig und ununterbrochene Funktion ($\rightsquigarrow$ fail-safe)
  - Diese Anlagen sind nur sinnvoll, wenn sie im Betrieb sind!
- Hohe Ansprüche an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Gliederung

Schweregrad des Fehlverhaltens

- 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?

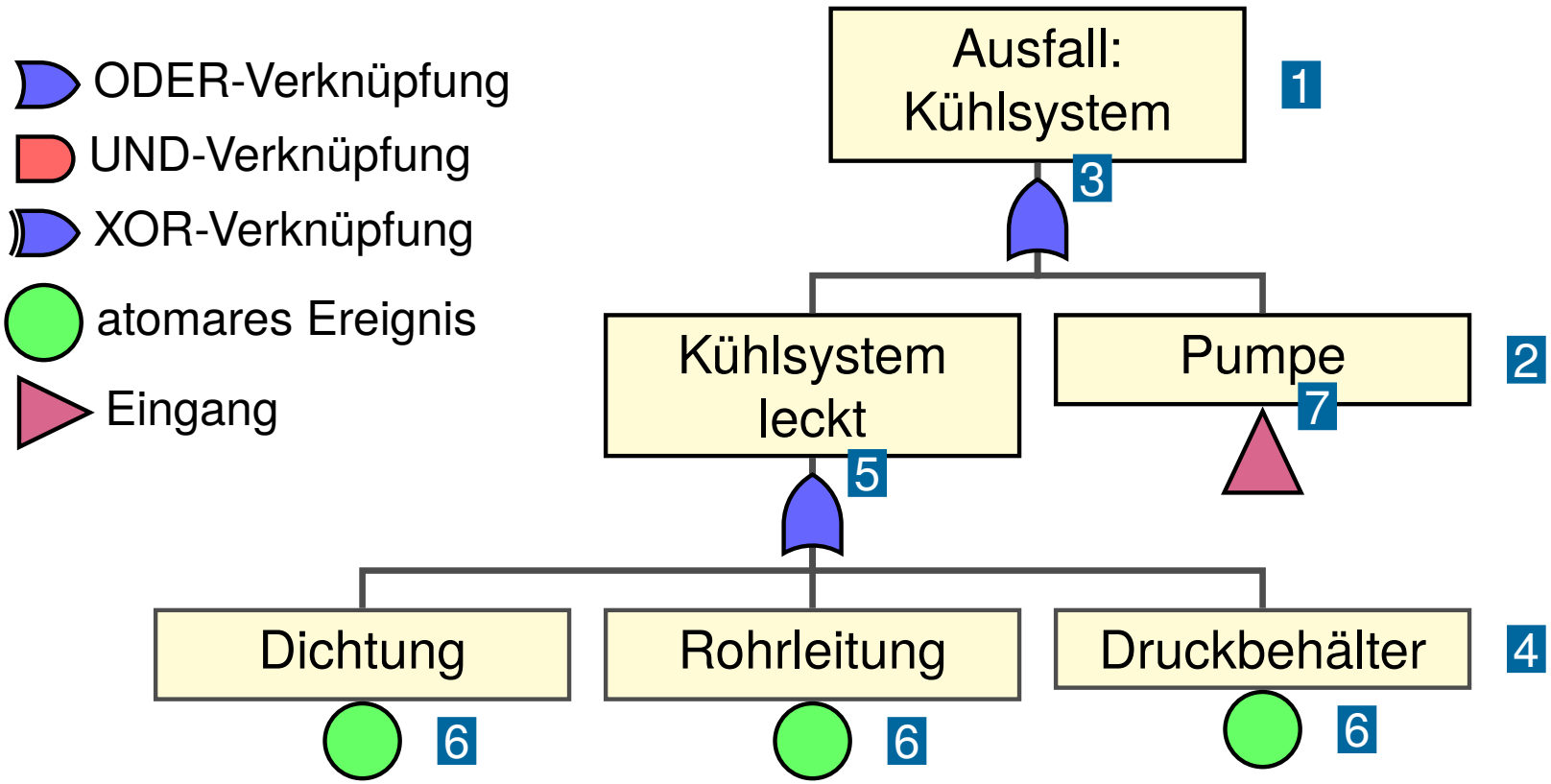
Eine Fehlerbaumanalyse (engl. *fault-tree analysis*) [3] ermittelt die zum beobachtbaren Systemverhalten führen Ereignisse:

- 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 Schadensereignis

2 Ereignisse auf Ebene 2

3 Logische Verknüpfung

4 Ereignisse auf Ebene 3

5 Logische Verknüpfung

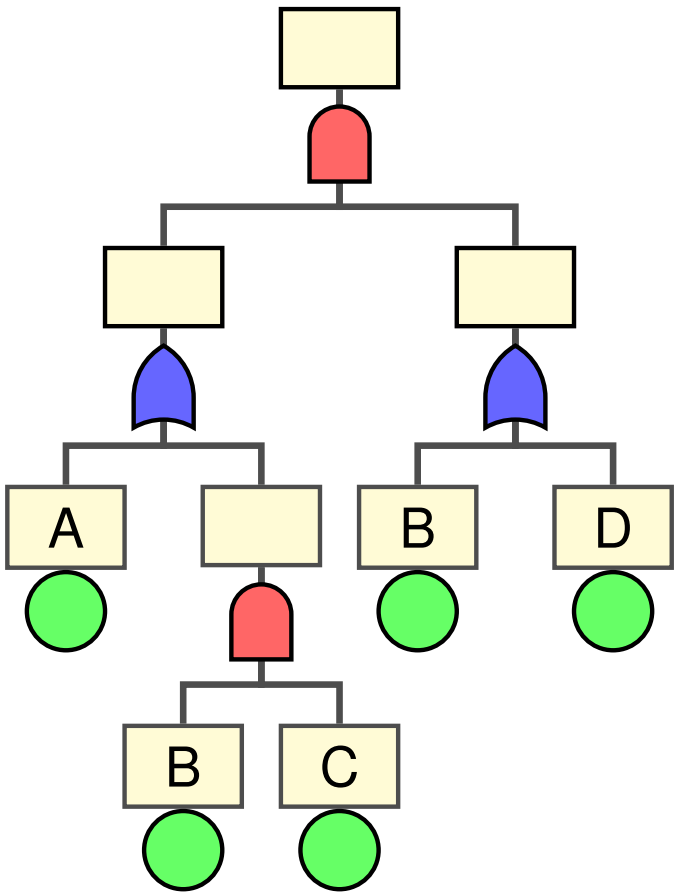
6 Atomare Ereignisse

7 Eingänge zerlegen den Fehlerbaum ↦ Neuer Teilbaum

Schnitte und Fehlerbäume

Welche Defekte führen letztendlich zum Systemausfall?

☞ Ein Schnitt (engl. *cut-set*) enthält genau die atomaren Ereignisse, die das Schadensereignis verursachen:



- $\{A, B, D\}$ wäre eine solche Menge
- Minimalschnitte (engl. *minimal cut-sets*) besonders interessant
  - Minimaler Auslöser
  - z. B. $\{A, B\}$, $\{A, D\}$, $\{B, C\}$
- Fehlerbäume als logische Ausdrücke
  - Umformung durch Aussagenlogik

→ Bestimmung durch SAT-Solving

Schnitte und Fehlerbäume (Forts.)

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

Diese Defekte(-szenarien) sind zu vermeiden!

- Duales Konzept: Minimalpfade (engl. *minimal path-sets*)
  - Die minimale Menge atomarer Ereignisse, welche das unerwünschte Schadensereignis 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*)

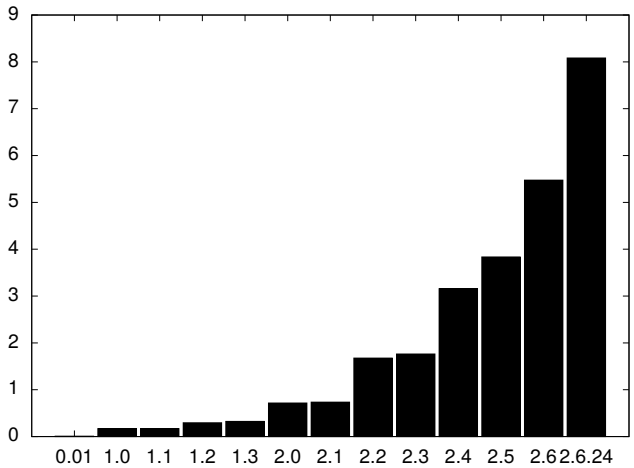
- Softwarefehler sind stets permanente Defekte
  - Manifestieren sich nicht zwingend in permanentem Fehlverhalten
    - Beispiel: Therac-25 (vgl. Folien II/3 ff)
  - Beispiel: Heisenbugs verursacht durch Nebenläufigkeitsfehler
    - Auch Bohrbugs, Mandelbugs oder Schrödinbugs
    - Treten manchmal auf, manchmal nicht $\rightsquigarrow$ sehr schwer zu reproduzieren
- Ursache: Fehlerhaften Umsetzung der Spezifikation
  - In der Regel durch den Programmierer, Architekten, ...
  - Ursprung: Anforderungserhebung, Entwurf, Implementierung, ...
- Softwarefehler sind systematische Fehler
  - Betrieb mehrere Instanzen unter gleichen, äußeren Bedingungen führt zu identischen Fehlern
    - Äußeren Bedingungen sind allerdings nicht ohne Weiteres reproduzierbar
    - Beispiel: Ausfall von SRI 1 und SRI 2 (vgl. Folien II/16 ff) der Ariane 5 [9]

Softwarefehler – Ursachenforschung

Komplexität ist der natürliche Feind korrekter Programme

- Komplexität nimmt stetig zu: (Million-)LOC

Linux Kernel



Microsoft Windows [10]

Jahr	Produkt	Dev	Test	MLOC
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: bis zu 10 Defekten je 1000 LOC aus

→ Hunderttausende 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

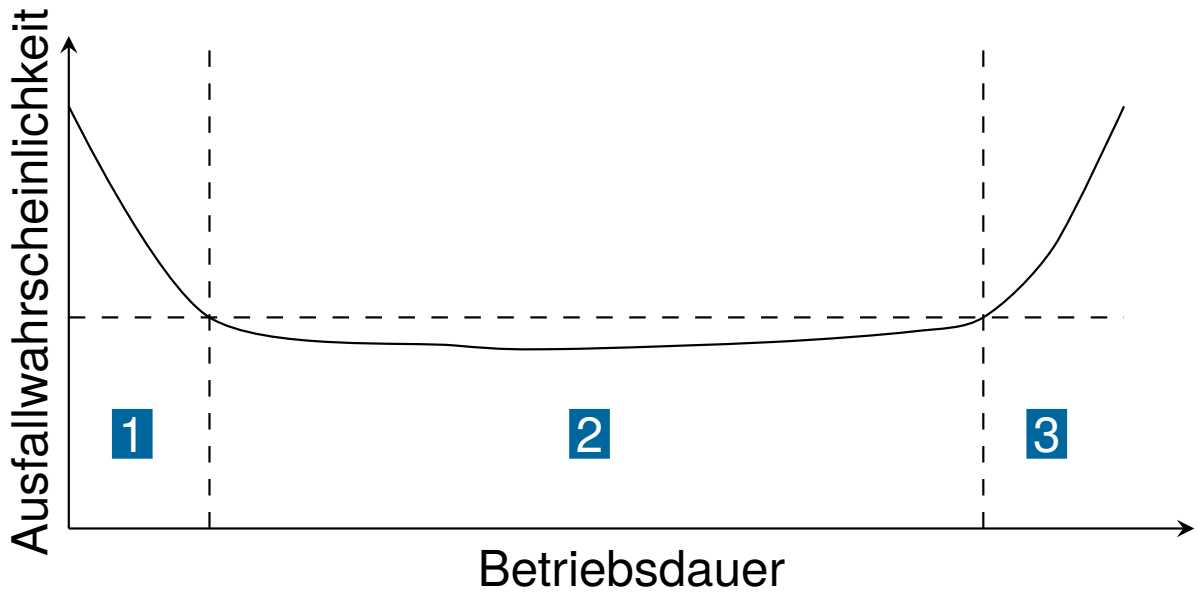
    → Collateral Evolution bedingt durch Refactoring
- Kim, ICSE 2011 [8]: Welche Rolle spielt Refactoring?
  - Ergebnis: Mehr Fehlerbehebungen nach Refactoring
    - Fehler durch fehlerhaftes Refactoring, Refactoring für die Fehlerbehebung

Hardwarefehler

- Permanente Hardwarefehler
  - Extrinsischer Natur: Herstellungsbedingte Materialfehler
    - z. B. fehlerhafte Dotierung eines Halbleiters oder Materialunreinheiten
    - Treten meist zu Beginn der Lebenszeit auf ($\leadsto$ Säuglingssterblichkeit)
  - Intrinsischer Natur: Verschleißerscheinungen
    - Kündigen sich meist durch sporadische Fehler an
    - Treten meist am Ende der Lebenszeit auf
- Transiente Hardwarefehler $\mapsto$ Umwelteinflüsse
  - Mannigfaltige Ursachen
    - Radioaktive Strahlung
    - Elektromagnetische Interferenz
    - Instabile Spannungsversorgung
    - Fertigungsstreuung bei einzelnen Transistoren
    - Temperaturschwankungen führen zum temporären Materialdefekten
    - …

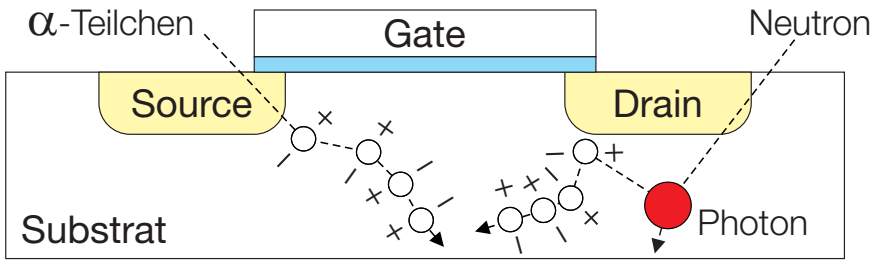
  $\rightarrow$ Treten als schwer zu fassende „Bitkipper“ in Erscheinung

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 (engl. *soft errors*)



- ☞ Bitkipper durch Umladungen in Speicherzellen und Schaltkreisen
  → Ionisierende Strahlung erzeugt Elektronen-Loch-Paaren (Defektelektronen)
- Direkt durch Alphateilchen
  - Quelle: Kontaminierten Chipgehäusen oder Lötkugeln
  - Die „ersten transienten Fehler“ [11, Kapitel 1.1]
- Indirekt durch Neutronen aus der kosmischen Strahlung
  - Primäre kosmische Strahlung: Galaktische und solare Partikel
  - Sekundäre Strahlung: Wechselwirkung in der Erdatmosphäre
  - Terrestrische Strahlung: Die Erdoberfläche erreichende Partikel
- ☞ Elektromagnetische Interferenzen
  - Verfälschung von Kommunikation auf Bussen
  - z. B. in Automobilen gibt es starke Quellen für Wechselfelder

  → Sparsame elektronische Abschirmung macht dies zum Problem

Anfälligkeit für transiente Fehler

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

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

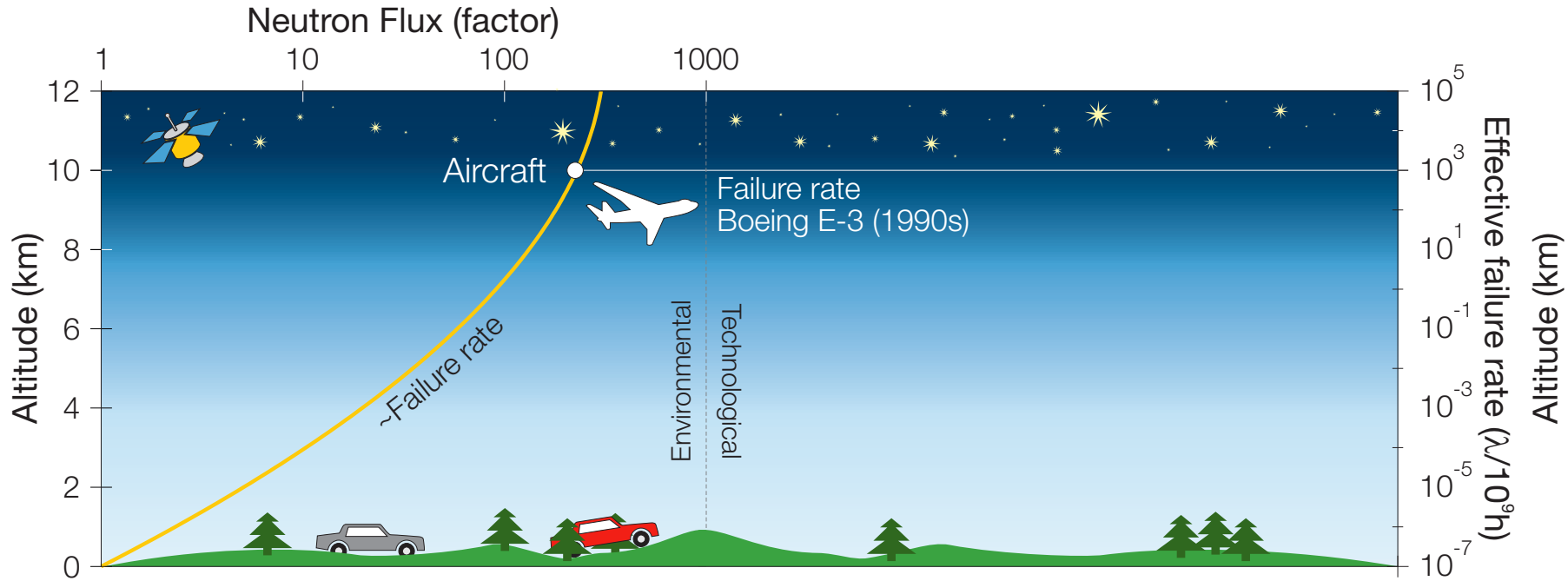
- C prozess- und schaltkreisspezifische Konstante
- Fläche des Schaltkreises
- Q_{crit} minimale für eine Fehlfunktion notwendige Ladung
  - Typischer Wert: 1 fC
- Q_{coll} Effizienz der Ladungsaufnahme
  - Bestimmt durch die für die Erzeugung der Elektronen-Loch-Paare notwendige Energie
  - Abhängig von Material und Fertigungsprozess $\mapsto$ Bremsvermögen (engl. *stopping power*)
  - Typischer Wert: $4.5\,\text{fC}\,\mu\text{m}^{-1} \rightsquigarrow 22\,\text{keV}$ Teichenenergie ausreichend

Kleinere Halbleiterstrukturen sind Fluch und Segen zugleich

→ Kleinere Fläche $\rightsquigarrow$ kleinere SER

→ Kleinere Q_{crit} $\rightsquigarrow$ größere SER

Fehlerraten – Entwicklung und Tendenzen



Zahlen aus: [13]

⚠ Exakte Fehlerrate ist schwer zu ermitteln

- Fehlerrate pro Bit stagniert oder verbessert sich
- 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

Zusammenfassung

Fehler $\rightsquigarrow$ Alles dreht sich ausschließlich um Fehler!

- Fehlerfortpflanzung: Defekt $\rightsquigarrow$ Fehler $\rightsquigarrow$ Fehlverhalten-Kette
- permanente, sporadische und transiente Fehler
- Vorbeugung, Entfernung, Vorhersage und Toleranz

Verlässlichkeitsmodelle $\rightsquigarrow$ Umgang mit Fehlern?

- Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Verfügbarkeit

Systementwurf $\rightsquigarrow$ Bereits hier werden Fehler berücksichtigt!

- Gefahren-, Risiko- und Fehlerbaumanalyse

Software- vs. Hardwarefehler $\rightsquigarrow$ Klassifikation & Ursachen

- Softwarefehler $\mapsto$ permanente Defekte, Komplexität
- Hardwarefehler $\mapsto$ 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