

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



Wir kümmern uns ausschließlich um Fehler!

~ Das ist nur ein kleiner Aspekt zuverlässiger Systeme!



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

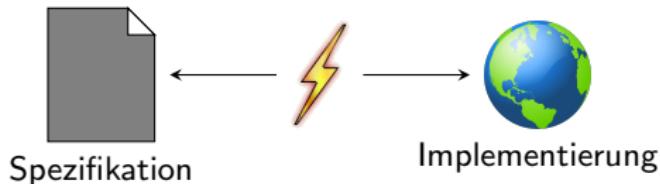


- 1 Überblick
- 2 Fehler
- 3 Verlässlichkeitsmodelle
- 4 Fehler und Systementwurf
- 5 Software- und Hardwarefehler
- 6 Zusammenfassung



Definition: Fehler

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

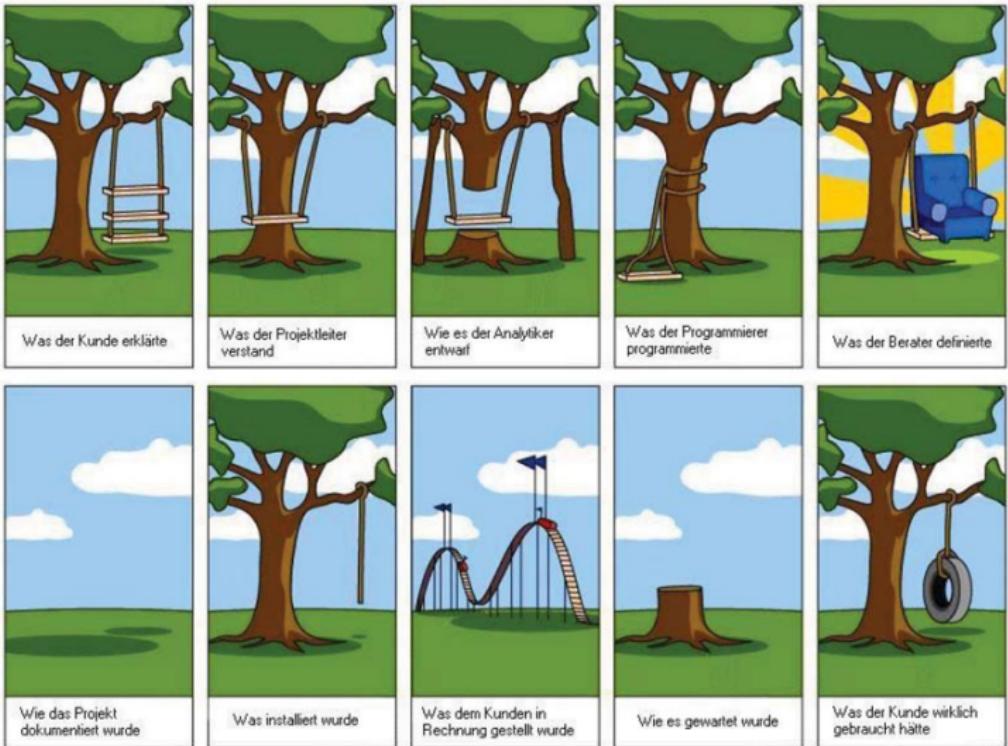


- Fehler kennen demzufolge viele Ausprägungen, ...
 - sie können lediglich als störend empfunden werden
 - die eigentliche Funktion ist noch vorhanden, es geht aber Komfort verloren
 - sie können die Funktionalität beeinträchtigen
 - das Abspielen eines Videos „ruckelt“, die Bildrate wird nicht erreicht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

```
int regelschritt() {  
    int sensorwert = 0;  
    sensorwert = leseSensor();  
    int stellwert =  
        regler(sensorwert);  
    return stellwert;  
}
```



Wann ist ein Fehler nun ein Fehler?

Das Problem beginnt, wenn der Schuh drückt!

(gutartiger) **Defekt ↗**
verfälscht sensorwert

```
int regelschritt() {  
    int sensorwert = 0;  
    sensorwert = leseSensor();  
  
    int stellwert =  
        regler(sensorwert);  
    return stellwert;  
}
```

- **Defekte** (engl. *faults*) sind die Quelle allen Übels
 - Ursachen: Software-Bugs, Produktionsfehler, äußere Einflüsse, ...
 - beziehen sich auf die **Struktur**



Wann ist ein Fehler nun ein Fehler?

Das Problem beginnt, wenn der Schuh drückt!

(gutartiger) **Defekt** ↗
verfälscht sensorwert

```
int regelschritt() {  
    int sensorwert = 0;  
    sensorwert = leseSensor();  
  
    int stellwert =  
        regler(sensorwert);  
    return stellwert;  
}
```

✓ **Kein Effekt**
sensorwert wird überschrieben

- **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



Wann ist ein Fehler nun ein Fehler?

Das Problem beginnt, wenn der Schuh drückt!

(gutartiger) Defekt ↳

verfälscht sensorwert

(bösertiger) Defekt ↳

verfälscht sensorwert

```
int regelschritt() {  
    int sensorwert = 0;  
    sensorwert = leseSensor();  
  
    int stellwert =  
        regler(sensorwert);  
    return stellwert;  
}
```

✓ Kein Effekt

sensorwert wird überschrieben

✗ Fehler (intern)

ausgelöst durch fehlerhaften Wert

- 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 bösertig (engl. *malign fault*)
 - beziehen sich auf den nicht sichtbaren, inneren Zustand



Wann ist ein Fehler nun ein Fehler?

Das Problem beginnt, wenn der Schuh drückt!

(gutartiger) Defekt ↳
verfälscht Sensorwert

(bösertiger) Defekt ↳
verfälscht Sensorwert

```
int regelschritt() {  
    int sensorwert = 0;  
    sensorwert = leseSensor();  
  
    int stellwert =  
        regler(sensorwert);  
    return stellwert;  
}
```

✓ Kein Effekt

Sensorwert wird überschrieben

✗ Fehler (intern)

ausgelöst durch fehlerhaften Wert

✗ Fehlverhalten (extern)

Fehler wird propagiert und sichtbar

- 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 bösertig (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



Wann ist ein Fehler nun ein Fehler?

Das Problem beginnt, wenn der Schuh drückt!

(gutartiger) Defekt ↳
verfälscht Sensorwert

(bösertiger) Defekt ↳
verfälscht Sensorwert

```
int regelschritt() {  
    int sensorwert = 0;  
    sensorwert = leseSensor();  
  
    int stellwert =  
        regler(sensorwert);  
    return stellwert;  
}
```

✓ Kein Effekt
sensorwert wird überschrieben

✗ Fehler (intern)
ausgelöst durch fehlerhaften Wert

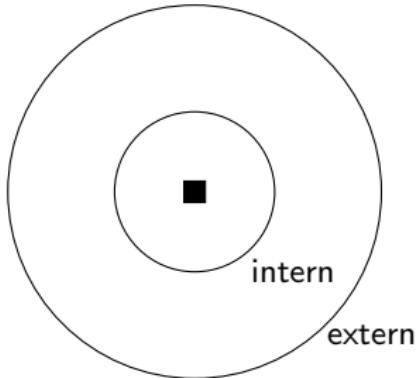
✗ Fehlverhalten (extern)
Fehler wird propagiert und sichtbar

- 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 bösertig (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

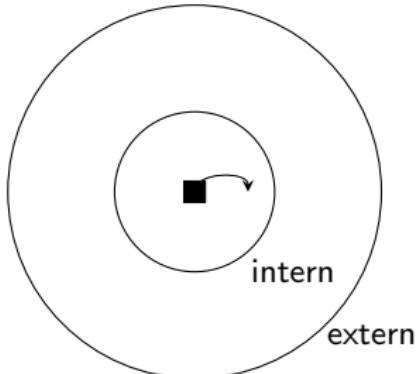
Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!



Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit

Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!

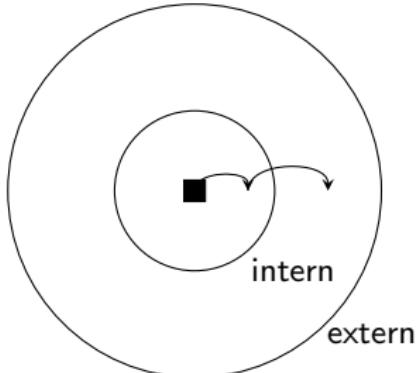
- gutartige Defekte haben keinen Einfluss auf das korrekte Systemverhalten



Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit

Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!

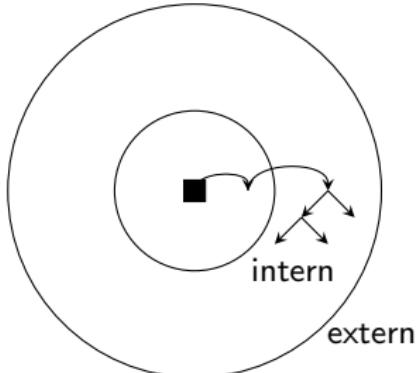
- gutartige Defekte haben keinen Einfluss auf das korrekte Systemverhalten
- bösartige Defekte/innere Fehler beeinflussen den internen Zustand



Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit

Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!

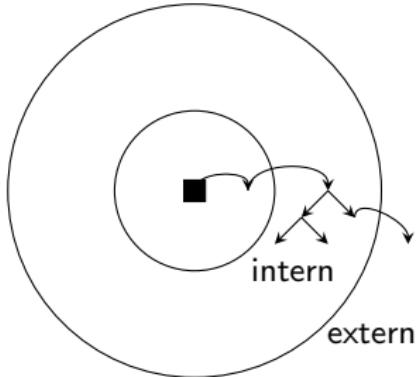
- gutartige Defekte haben keinen Einfluss auf das korrekte Systemverhalten
- bösartige Defekte/innere Fehler beeinflussen den internen Zustand
 - intern kann sich der Fehler weiter verbreiten



Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit

Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!

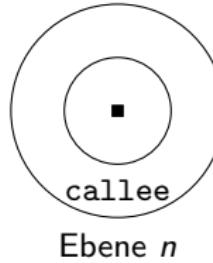
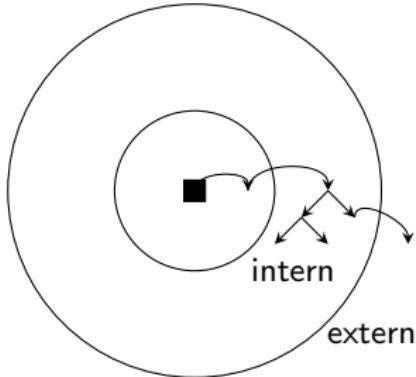
- gutartige Defekte haben keinen Einfluss auf das korrekte Systemverhalten
- bösartige Defekte/innere Fehler beeinflussen den internen Zustand
 - intern kann sich der Fehler weiter verbreiten
- wird der innerer Fehler nach außen gereicht, ist er als Fehlverhalten sichtbar



Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit

Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!

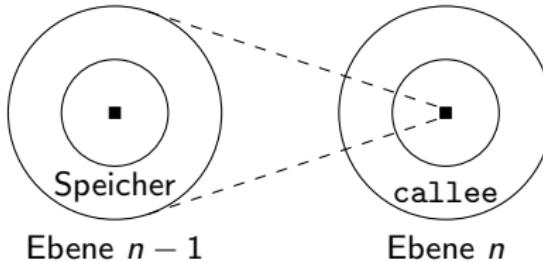
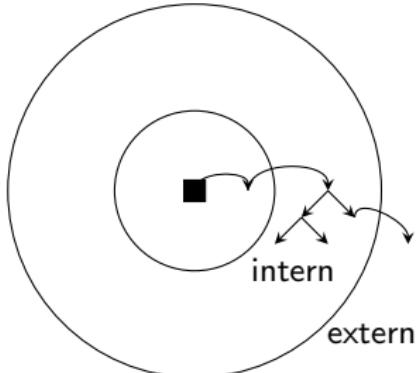
- gutartige Defekte haben keinen Einfluss auf das korrekte Systemverhalten
- bösartige Defekte/innere Fehler beeinflussen den internen Zustand
 - intern kann sich der Fehler weiter verbreiten
- wird der innerer Fehler nach außen gereicht, ist er als Fehlverhalten sichtbar
- über die fault ~ error ~ failure-Kette pflanzen sich Fehler fort



Es ist alles eine Frage der Sichtbarkeit

Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß!

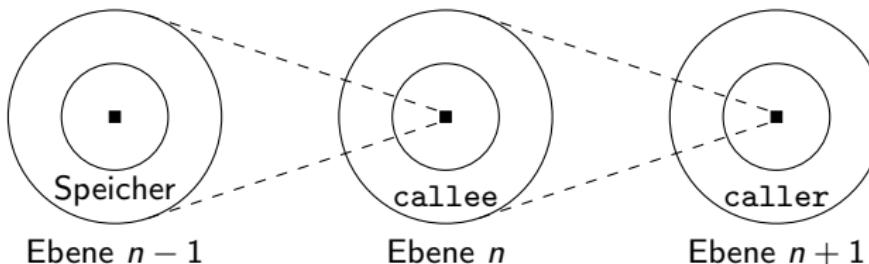
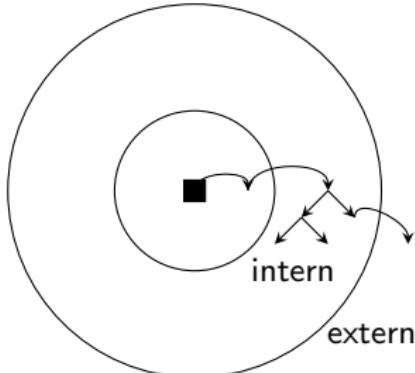
- gutartige Defekte haben keinen Einfluss auf das korrekte Systemverhalten
- bösartige Defekte/innere Fehler beeinflussen den internen Zustand
 - intern kann sich der Fehler weiter verbreiten
- wird der innerer Fehler nach außen gereicht, ist er als Fehlverhalten sichtbar
- über die fault \leadsto error \leadsto failure-Kette pflanzen sich Fehler fort



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 \leadsto error \leadsto failure-Kette pflanzen sich Fehler fort



- und können schließlich zum vollständigen Systemversagen führen



- 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



- 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

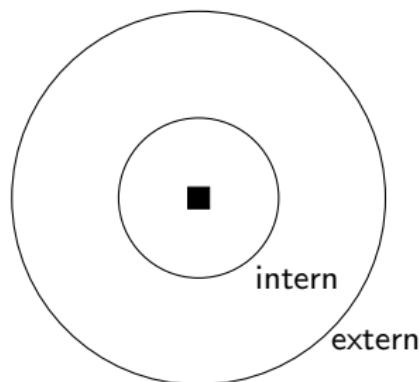
- Implikationen aus der fault \rightsquigarrow error \rightsquigarrow failure-Kette:

- normalerweise: transiente Defekte $\not\rightsquigarrow$ permanentes Fehlverhalten
- möglich: permanenter Defekt \rightsquigarrow transientes Fehlverhalten
 - wenn sie nur unregelmäßig den inneren Sichtbarkeitsbereich verlassen



Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

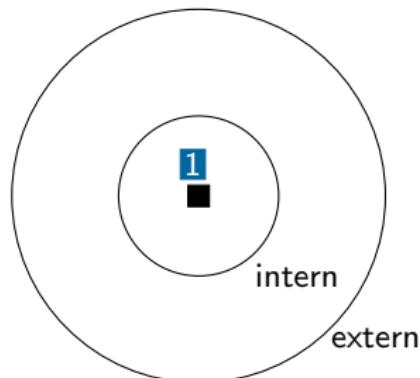
Versuchen die fault \rightsquigarrow error \rightsquigarrow failure-Kette aufzubrechen



Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

Versuchen die fault \rightsquigarrow error \rightsquigarrow failure-Kette aufzubrechen

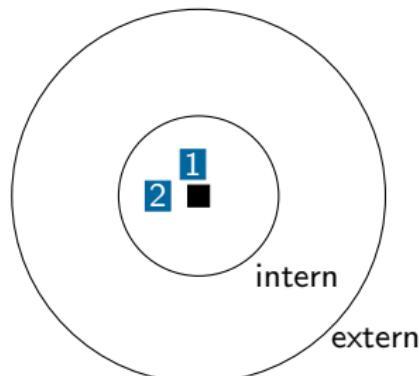
- 1 Vorbeugung – versucht die Entstehung von Defekten in der Produktion zu verhindern
 - z.B. durch Entwicklungsmethoden



Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

Versuchen die fault \rightsquigarrow error \rightsquigarrow failure-Kette aufzubrechen

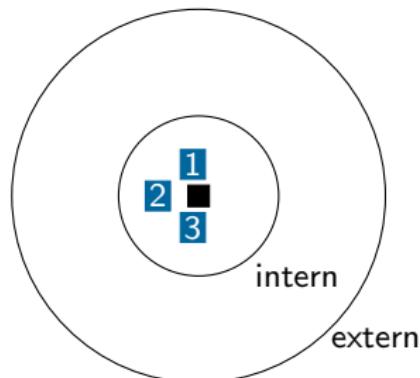
- 1 Vorbeugung – versucht die Entstehung von Defekten in der Produktion zu verhindern
 - z.B. durch Entwicklungsmethoden
- 2 Entfernung – vor der Auslieferung oder im Zuge einer planmäßigen Wartung
 - erfordert die Erkennung von Defekten \mapsto Qualitätssicherung



Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

Versuchen die fault \leadsto error \leadsto failure-Kette aufzubrechen

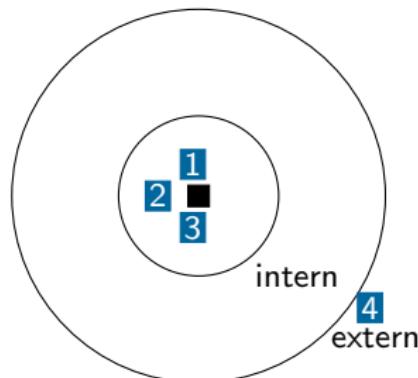
- 1 Vorbeugung – versucht die Entstehung von Defekten in der Produktion zu verhindern
 - z.B. durch Entwicklungsmethoden
- 2 Entfernung – vor der Auslieferung oder im Zuge einer planmäßigen Wartung
 - erfordert die Erkennung von Defekten \mapsto Qualitätssicherung
- 3 Vorhersage – Wo treten evtl. Defekte auf?
 - ermöglicht die Entfernung oder ihre Umgehung



Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

Versuchen die fault \leadsto error \leadsto failure-Kette aufzubrechen

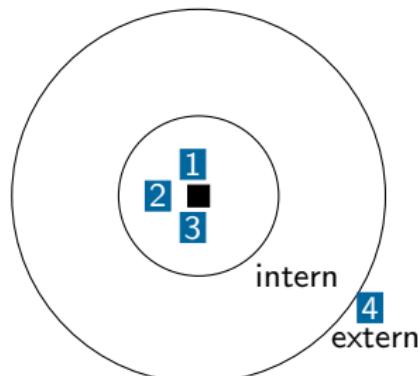
- 1 Vorbeugung – versucht die Entstehung von Defekten in der Produktion zu verhindern
 - z.B. durch Entwicklungsmethoden
- 2 Entfernung – vor der Auslieferung oder im Zuge einer planmäßigen Wartung
 - erfordert die Erkennung von Defekten \mapsto Qualitätssicherung
- 3 Vorhersage – Wo treten evtl. Defekte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



Maßnahmen zum Umgang mit Fehlern

Versuchen die fault \leadsto error \leadsto 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 \mapsto 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 \rightsquigarrow error \rightsquigarrow failure-Kette zugeschlagen hat ...

Nicht jedes beobachtbare Fehlverhalten muss auch entdeckt werden:



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



Folgen von Fehlern

Wenn die fault \rightsquigarrow error \rightsquigarrow failure-Kette zugeschlagen hat ...

Nicht jedes beobachtbare Fehlverhalten muss auch entdeckt werden:



unerkennbare 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*)

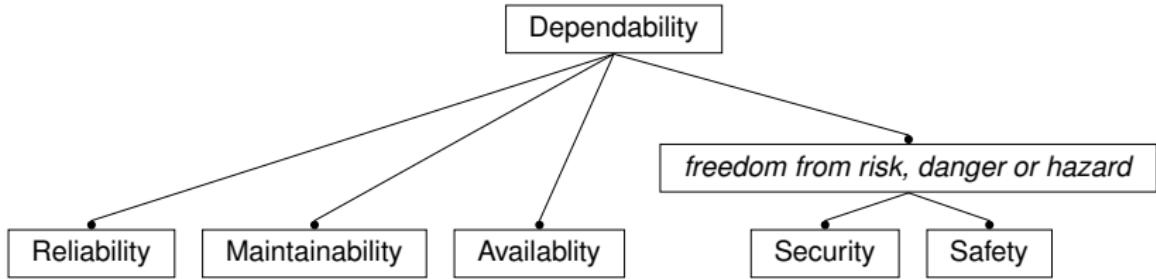
- eine Fortpflanzung kann gezielt unterbunden werden (\rightsquigarrow **fail-stop**)
- die Stellen, an diese Fehler auftreten, lassen sich vergleichsweise einfach herausfinden, z. B. durch eine **Ablaufverfolgung** (engl. *backtrace*)



- 1 Überblick
- 2 Fehler
- 3 Verlässlichkeitsmodelle
- 4 Fehler und Systementwurf
- 5 Software- und Hardwarefehler
- 6 Zusammenfassung



„Verlässlichkeit“ ist ein vielschichtiger Begriff



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



$R(t)$ 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)



$R(t)$ 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



$M(d)$ 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)



$M(d)$ 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...



$M(d)$ 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**: $A = \text{MTTF}/(\text{MTTF} + \text{MTTR})$
- $\text{MTTF} + \text{MTTR}$ auch kurz: *mean time between failures* (MTBF)

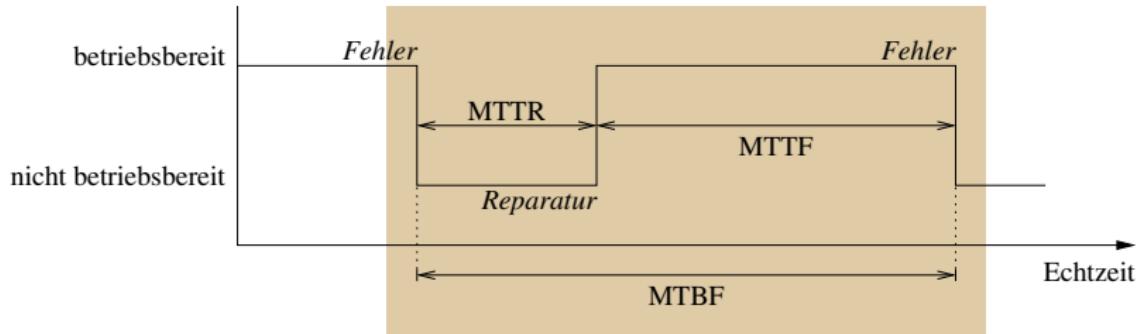


Verfügbarkeit (engl. *availability*)

MTTF und MTTR im Zusammenhang

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

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

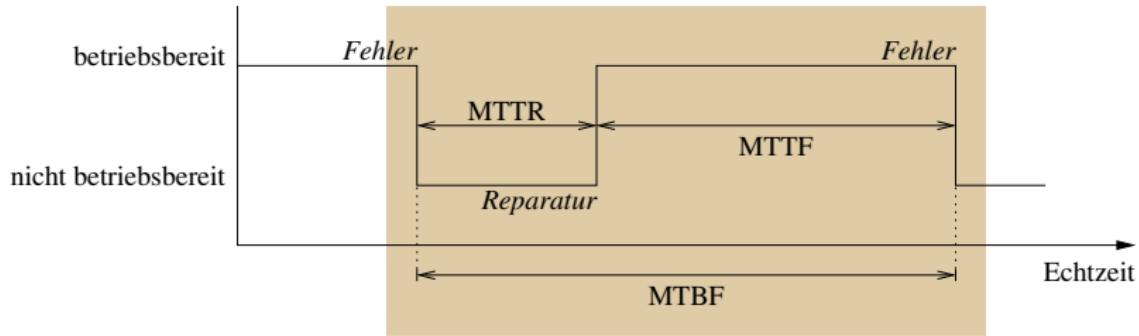


Verfügbarkeit (engl. *availability*)

MTTF und MTTR im Zusammenhang

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

- Zeitanteil der **Betriebsbereitschaft**: $A = \text{MTTF}/(\text{MTTF} + \text{MTTR})$
- $\text{MTTF} + \text{MTTR}$ 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 Echtzeitystems
 - Vertraulichkeit (engl. *confidentiality*)
 - Datenschutz (engl. *privacy*)
 - Glaubwürdigkeit (engl. *authenticity*)
- speziell z.B. Diebstahlsicherung: Zündungssperre im Kfz
 - **Kryptographie** (engl. *cryptography*)



security Schutz von Informationen und Informationsverarbeitung vor „intelligenten“ Angreifern

- allgemein in Bezug auf Datenbasen des Echtzeitystems
 - 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



Automobil eine Bestandsaufnahme vom Jahr 2005 ...



Automobil eine Bestandsaufnahme vom Jahr 2005 ...

- etwa 90 % der Innovationen im Auto bringt die Elektronik ein
 - gut 80 % davon sind Software



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



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 (\sim fail-soft)
 - sie werden meist auf höheren Ebenen abgefangen (z. B. TCP/IP)
- \rightsquigarrow kurze Fehlererholung steht im Vordergrund



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 (\sim fail-soft)
 - sie werden meist auf höheren Ebenen abgefangen (z. B. TCP/IP)
- \leadsto kurze Fehlererholung steht im Vordergrund

Langlebige Systeme z. B. Satelliten

- müssen auch nach Jahren noch funktionieren (\sim fail-slow)
 - eine Fehlerbehebung ist oft technisch nicht möglich
- \leadsto hohe Zuverlässigkeit steht im Vordergrund



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 (\leadsto fail-soft)
 - sie werden meist auf höheren Ebenen abgefangen (z. B. TCP/IP)
- \leadsto kurze Fehlererholung steht im Vordergrund

Langlebige Systeme z. B. Satelliten

- müssen auch nach Jahren noch funktionieren (\leadsto fail-slow)
 - eine Fehlerbehebung ist oft technisch nicht möglich
- \leadsto hohe Zuverlässigkeit steht im Vordergrund

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

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



- 1 Überblick
- 2 Fehler
- 3 Verlässlichkeitsmodelle
- 4 Fehler und Systementwurf**
- 5 Software- und Hardwarefehler
- 6 Zusammenfassung



Wie schwer wiegt das Fehlverhalten eines Systems?

- Klärung durch eine Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung



Wie schwer wiegt das Fehlverhalten eines Systems?

- Klärung durch eine Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung
 - Identifikation gefährlicher Ereignisse und
 - ihre Klassifikation hinsichtlich verschiedener Kriterien
- Faustregel: $\text{Risiko} = \text{Wahrscheinlichkeit} \times \text{Schweregrad}$
 - Wahrscheinlichkeit: Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses
 - der Schwergrad bemisst sich häufig als „Konsequenz / Ereignis“
 - ~~ Risiko \approx Wahrscheinlichkeit der Konsequenz
 - der entstehende finanzielle Schaden ist oft ein Maß für die Konsequenz



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 \times Schweregrad
 - Wahrscheinlichkeit: Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses
 - der Schweregrad bemisst sich häufig als „Konsequenz / Ereignis“
 - ~ Risiko \approx Wahrscheinlichkeit der Konsequenz
 - der entstehende finanzielle Schaden ist oft ein Maß für die Konsequenz
- Normen reglementieren die Klassifikation, z. B. ISO 26262 [7]



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 \times Schweregrad
 - Wahrscheinlichkeit: Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses
 - der Schweregrad bemisst sich häufig als „Konsequenz / Ereignis“
 - ~~ Risiko \approx Wahrscheinlichkeit der Konsequenz
 - der entstehende finanzielle Schaden ist oft ein Maß für die Konsequenz

- Normen reglementieren die Klassifikation, z. B. ISO 26262 [7]

■ Kriterien: Schweregrade nach ISO 26262:

■ Schweregrad	S0	keine Verletzungen
■ Wahrscheinlichkeit	S1	leichte Verletzungen
■ Kontrollierbarkeit	S2	schwere o. lebensbedrohliche Verletzungen
	S3	lebensbedrohliche o. tödliche Verletzungen



Zusammenhang: Defekt \leftrightarrow 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
 - \leftrightarrow Zuverlässigkeitssblockdiagrammen (engl. *reliability block diagrams*)
 - diese befassen sich mit dessen korrekter Funktion



Zusammenhang: Defekt \leftrightarrow 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
 - \leftrightarrow Zuverlässigkeitssblockdiagrammen (engl. *reliability block diagrams*)
 - diese befassen sich mit dessen korrekter Funktion
- Beispiel: Reaktorkühlsystem eines Kernkraftwerks fällt aus
 - das Kühlsystem leckt oder
 - die Kühlmittelpumpe funktioniert nicht



Zusammenhang: Defekt \leftrightarrow 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
 - \leftrightarrow Zuverlässigkeitssblockdiagrammen (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



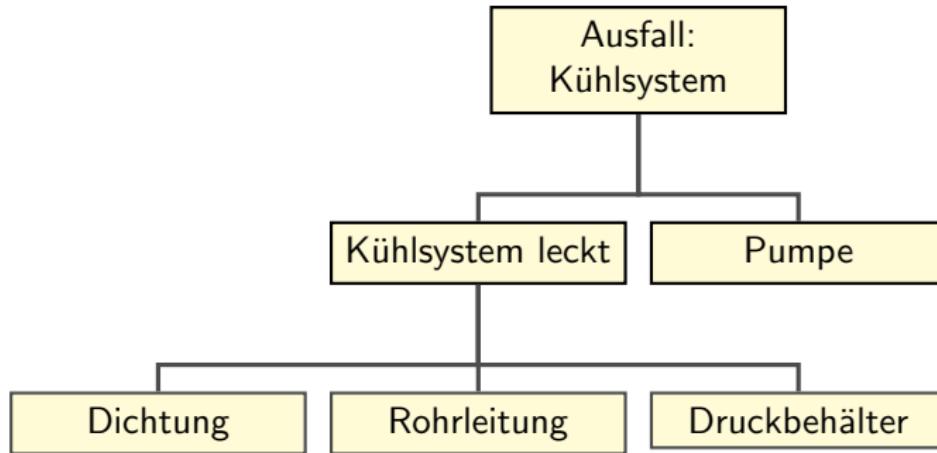
Zusammenhang: Defekt \leftrightarrow Fehlverhalten

Welche Defekte führen zum beobachtbaren Fehlverhalten?

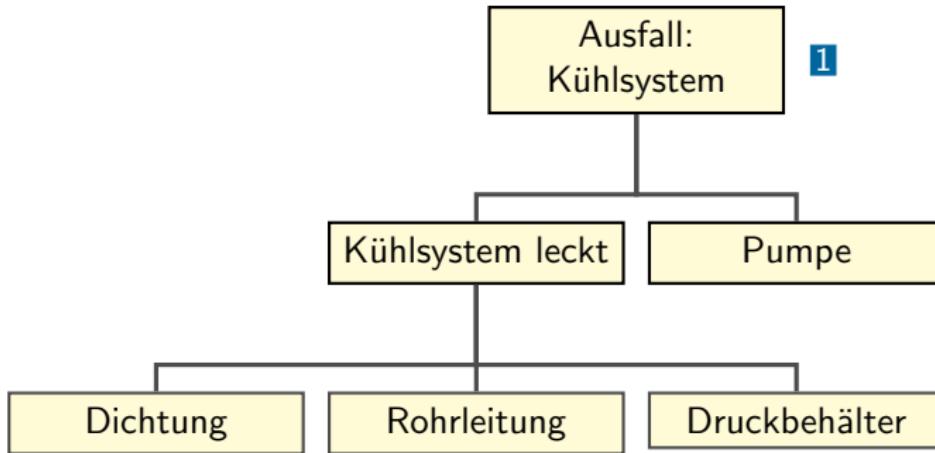
- eine Fehlerbaumanalyse (engl. *fault-tree analysis*) [3] ermittelt die Ereignisse, die zum beobachtbaren Systemverhalten führen
 - verfeinernde Analyse (engl. *top-down analysis*)
 - das unerwünschte Fehlverhalten bildet die Wurzel des Fehlerbaumes
 - ausgehend davon werden die Ursachen des Fehlverhaltens identifiziert
 - arbeitet auf dem Fehlerraum (engl. *failure space*) des Systems
 - \leftrightarrow Zuverlässigkeitssblockdiagrammen (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



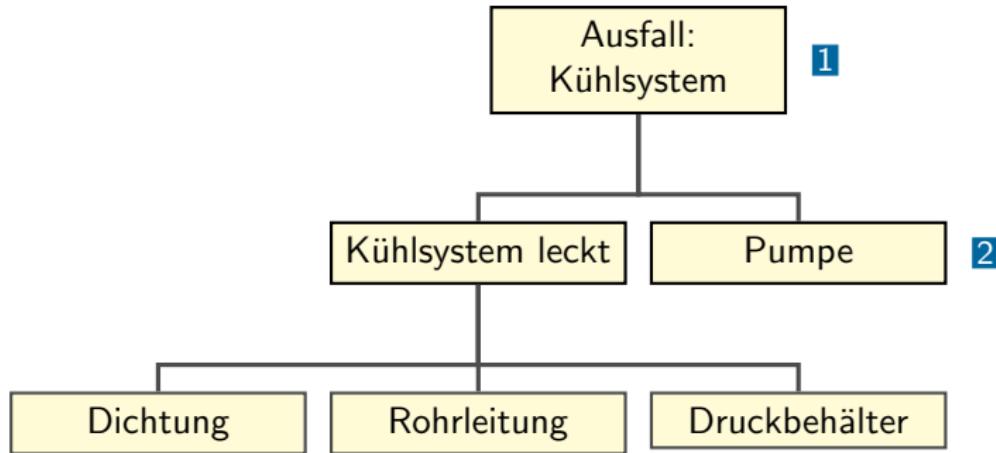
Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen



1 ~ „Top-Level“-Ereignis



Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen

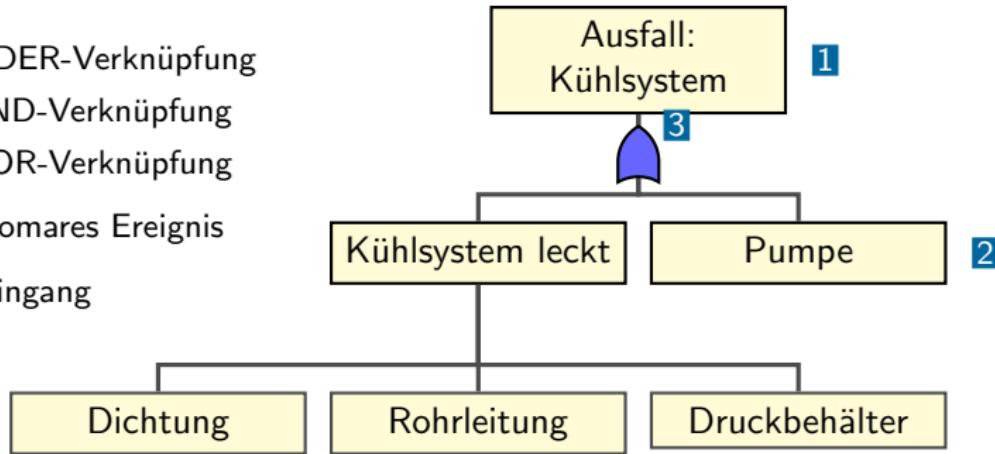


- 1 ~ „Top-Level“-Ereignis
- 2 ~ Ereignisse auf Ebene 2



Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen

- ▶ ODER-Verknüpfung
- ◀ UND-Verknüpfung
- ▶ XOR-Verknüpfung
- atomares Ereignis
- ▶ Eingang

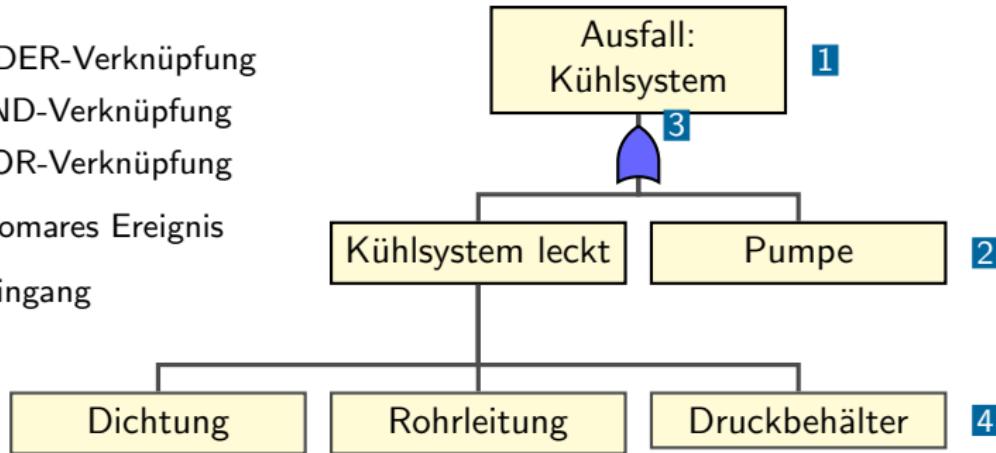


- 1 \leadsto „Top-Level“-Ereignis
- 2 \leadsto Ereignisse auf Ebene 2
- 3 verknüpfe sie logisch



Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen

- ▶ ODER-Verknüpfung
- ◀ UND-Verknüpfung
- ▶ XOR-Verknüpfung
- atomares Ereignis
- ▶ Eingang

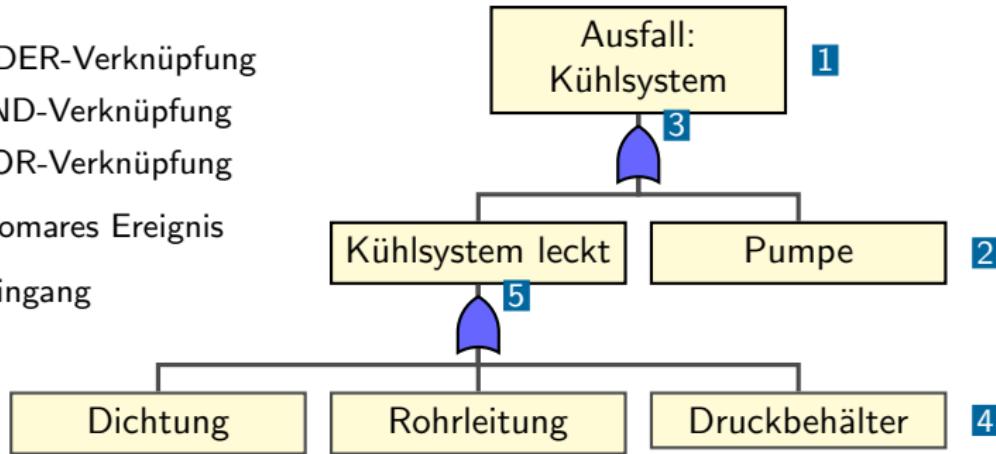


- 1 → „Top-Level“-Ereignis
- 2 → Ereignisse auf Ebene 2
- 3 verknüpfe sie logisch
- 4 → Ereignisse auf Ebene 3



Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen

- ▶ ODER-Verknüpfung
- ◀ UND-Verknüpfung
- ▶ XOR-Verknüpfung
- atomares Ereignis
- ▶ Eingang

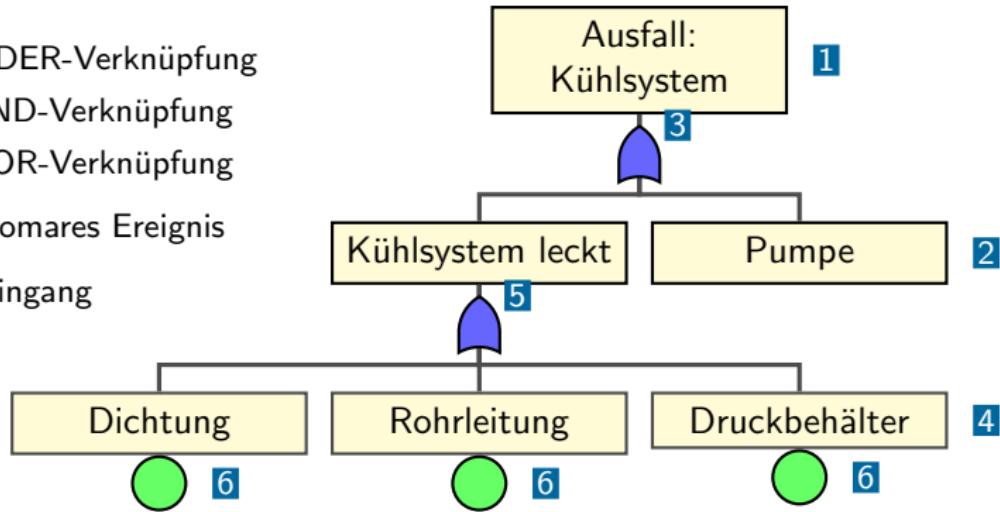


- 1 ~ „Top-Level“-Ereignis 5 verknüpfe sie logisch
- 2 ~ Ereignisse auf Ebene 2
- 3 verknüpfe sie logisch
- 4 ~ Ereignisse auf Ebene 3



Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen

- ▶ ODER-Verknüpfung
- ◀ UND-Verknüpfung
- ▶ XOR-Verknüpfung
- atomares Ereignis
- ▲ Eingang

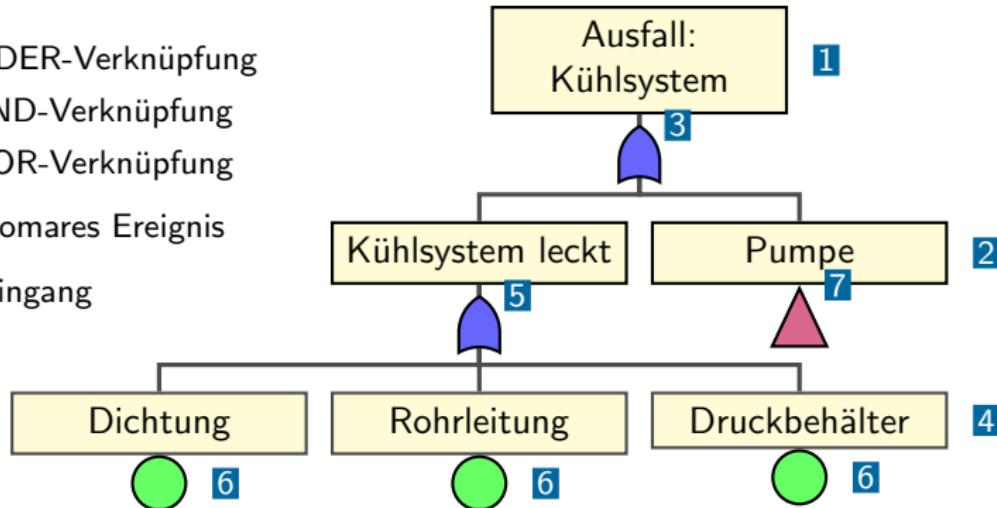


- 1 ~ „Top-Level“-Ereignis
- 2 ~ Ereignisse auf Ebene 2
- 3 verknüpfe sie logisch
- 4 verknüpfe sie logisch
- 5 verknüpfe sie logisch
- 6 atomare Ereignisse beenden Gliederung



Aufbau und Erstellung von Fehlerbäumen

- ODER-Verknüpfung
- UND-Verknüpfung
- XOR-Verknüpfung
- atomares Ereignis
- Eingang



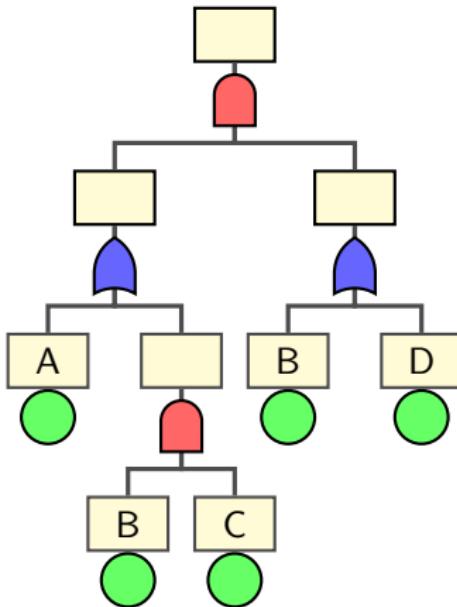
- 1 ~ „Top-Level“-Ereignis
- 2 ~ Ereignisse auf Ebene 2
- 3 verknüpfe sie logisch
- 4 ~ Ereignisse auf Ebene 3
- 5 verknüpfe sie logisch
- 6 atomare Ereignisse beenden Gliederung
- 7 Eingänge zerlegen den Fehlerbaum ~ neuer Fehlerbaum



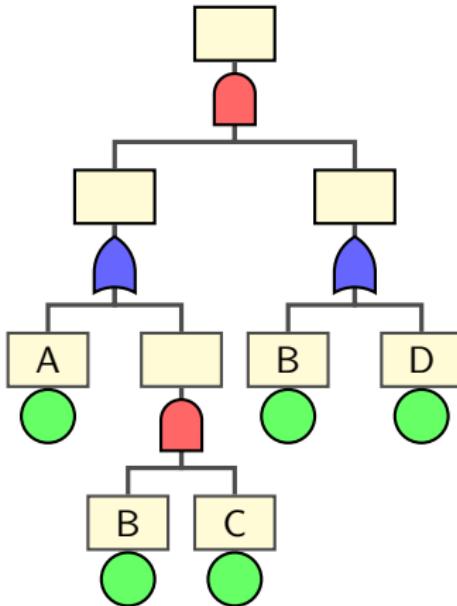
Ein **Schnitt** (engl. *cut-set*) enthält genau die atomaren Ereignisse, die das „Top-Level“-Ereignis verursachen:



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

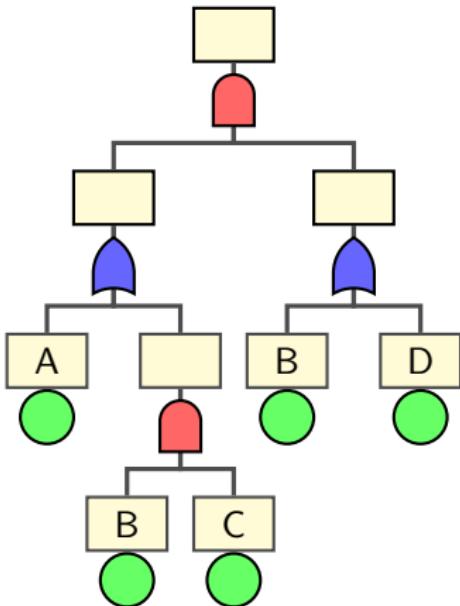


Ein **Schnitt** (engl. *cut-set*) enthält genau die atomaren Ereignisse, die das „Top-Level“-Ereignis verursachen:



- $\{A, B, D\}$ wäre eine solche Menge

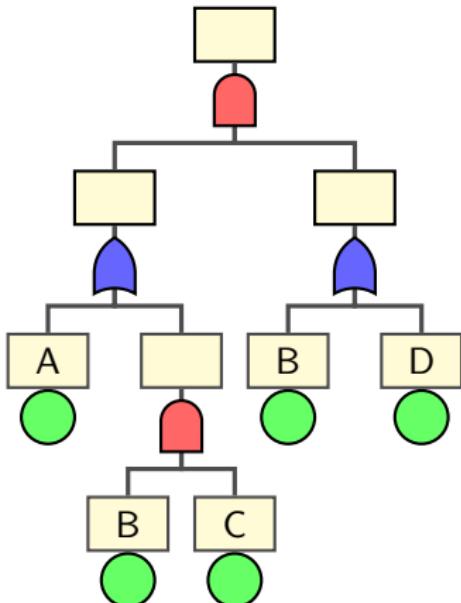
Ein **Schnitt** (engl. *cut-set*) enthält genau die atomaren Ereignisse, die das „Top-Level“-Ereignis verursachen:



- $\{A, B, D\}$ wäre eine solche Menge
- **Minimalschnitte** sind besonders interessant
 - eng. *minimal cut-sets*
 - z. B. $\{A, B\}, \{A, D\}, \{B, C\}$



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 \leftrightarrow **logische Ausdrücke**
 - Umformung durch Aussagenlogik
 - Minimalschnitte \Leftrightarrow **Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik** (engl. *boolean satisfiability problem*)
 - ~ Bestimmung durch **SAT-Solving**

- Minimalschnitte liefern genau die **kritischen atomaren Ereignisse**, die ein unerwünschtes Systemverhalten hervorrufen
- ☞ Es **lohnt sich**, diese Defekte zu vermeiden!



- 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!



- 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 entsprechenden Minimalschnitte



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



- 1 Überblick
- 2 Fehler
- 3 Verlässlichkeitsmodelle
- 4 Fehler und Systementwurf
- 5 Software- und Hardwarefehler
- 6 Zusammenfassung



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



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



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

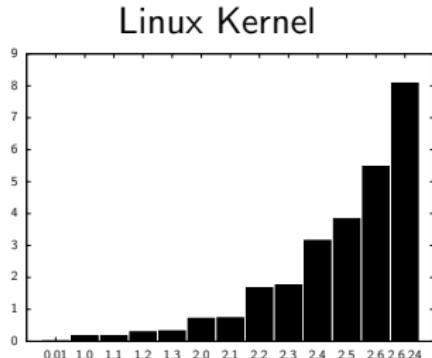
- sind **permanente Defekte**
 - manifestieren sich aber nicht unbedingt in einem inneren Fehler, von außen beobachtbarem Fehlverhalten oder einem Systemausfall
 - Beispiel: sog. **Heisenbugs** verursacht durch Nebenläufigkeitsfehler
 - auch **Bohrbugs**, **Mandelbugs** oder **Schrödinbugs**
 - treten 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 derselben 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

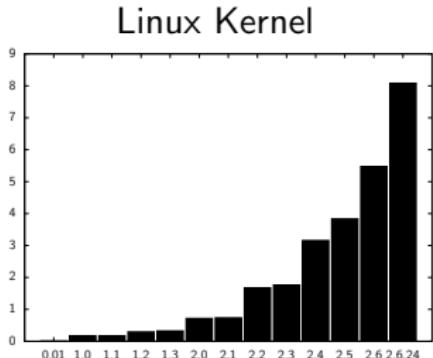


Microsoft Windows [10]

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

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



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!



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



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
- Padoleau, 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**



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
- Padoleau, 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

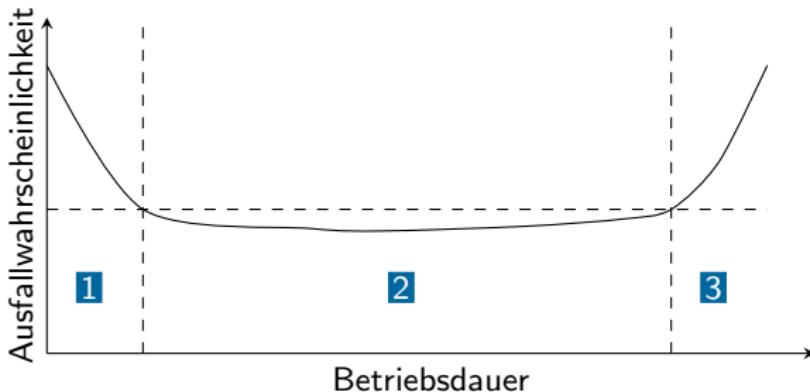


- permanente **Hardwarefehler** sind ...
 - **extrinsischer Natur:** herstellungsbedingte Materialfehler
 - z. B. fehlerhafte Dotierung eines Halbleiters oder Materialunreinheiten
 - treten meist zu Beginn der Lebenszeit auf (\sim Säuglingssterblichkeit)
 - **intrinsischer Natur:** Verschleißerscheinungen
 - kündigen sich meist durch sporadische Fehler an
 - treten meist am Ende der Lebenszeit auf



- permanente Hardwarefehler sind ...
 - extrinsischer Natur: herstellungsbedingte Materialfehler
 - z. B. fehlerhafte Dotierung eines Halbleiters oder Materialunreinheiten
 - treten meist zu Beginn der Lebenszeit auf (\sim 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





- 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 Halbleiterbauelemente unterliegen einem Verschleißprozess
 - z. B. Elektromigration, Spannungsrisse durch thermische Belastungen, Verschleiß der Oxidschicht am Gate ...



- 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



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

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



Anfälligkeit eines Schaltkreises für transiente Fehler

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

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

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



Anfälligkeit eines Schaltkreises für transiente Fehler

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

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

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

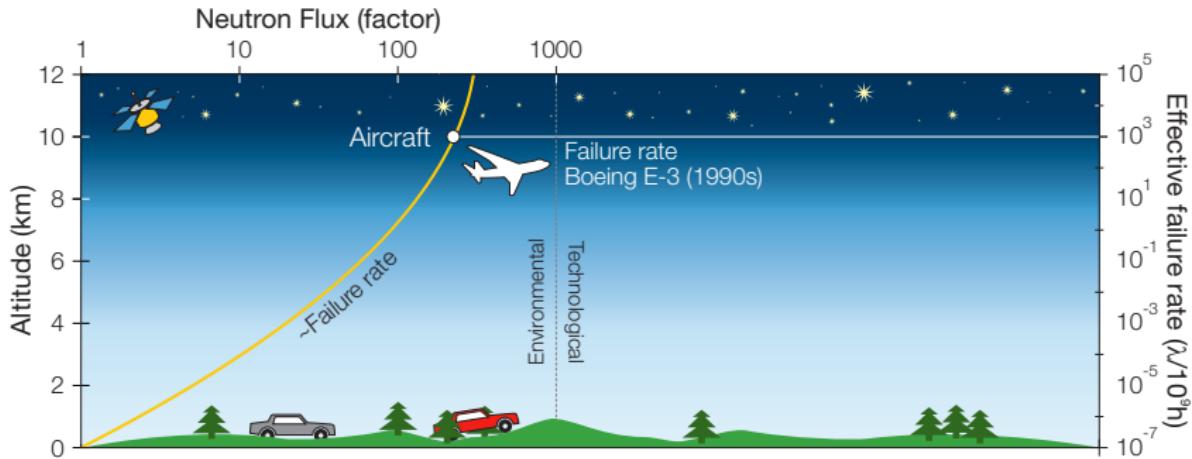
- **kleinere Halbleiterstrukturen** sind Fluch und Segen zugleich

~ kleinere Fläche ~ kleinere SER

~ kleinere Q_{crit} ~ größere SER



Fehlerraten – Entwicklung und Tendenzen



Zahlen aus: [13]

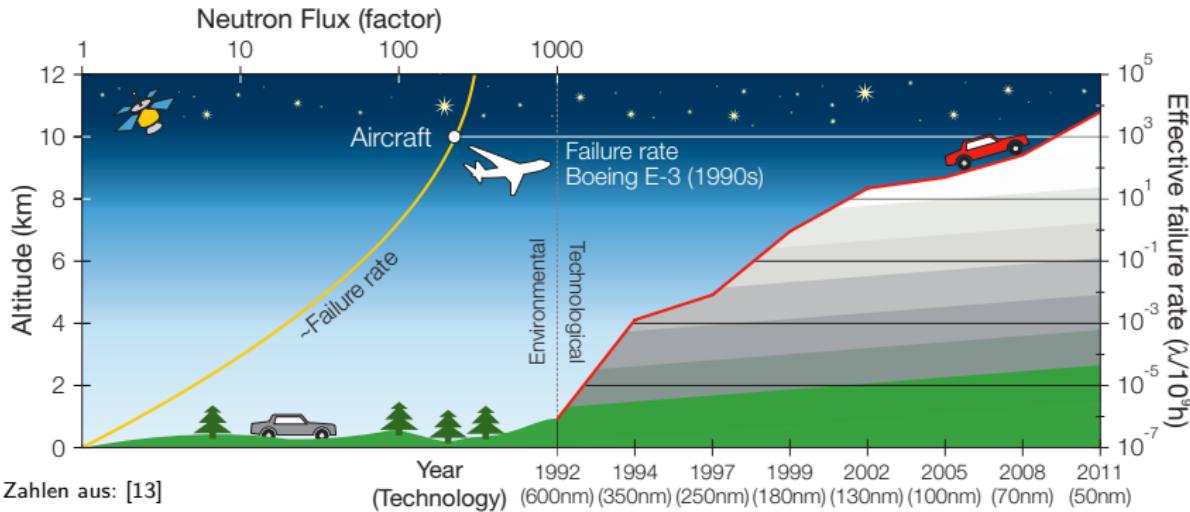


Exakte Fehlerrate schwer zu ermitteln

- 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



Fehlerraten – Entwicklung und Tendenzen



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



- 1 Überblick
- 2 Fehler
- 3 Verlässlichkeitsmodelle
- 4 Fehler und Systementwurf
- 5 Software- und Hardwarefehler
- 6 Zusammenfassung



Fehler \rightsquigarrow Alles dreht sich ausschließlich um Fehler!

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

Verlässlichkeitsmodelle \rightsquigarrow Wie gut kann man mit Fehlern umgehen?

- 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)



- [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



- [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] PADOLEAU, 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



- [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

