Test und Verlässlichkeit Foliensatz 7: Ausfälle und Fehlertoleranz

Prof. G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (TV_F7)

November 6, 2022

Inhalt Foliensatz TV_F7: Ausfälle und Fehlertoleranz

[19. Vorlesung]

Vorlesung	19	20
bis Abschn.	2.?? (??)	4.?? (??)

Ausfälle

Ausfälle

Hardware und Mechanik unterliegt einem Verschleiß, der zu Ausfällen führen kann. Bei einem Ausfall entsteht ein Fehler, der oft mehr FF als alle vom Test nicht erkannten Fehler zusammen oder ein komplettes Versagen[1] verursacht.

Maßnahmen zum Umgang mit Ausfällen:

- Voralterung,
- Wartung,
- Redundanz (kalte oder heiße Reserve).

In Software entstehen während des Betriebs keine neuen Fehler, ausgenommen

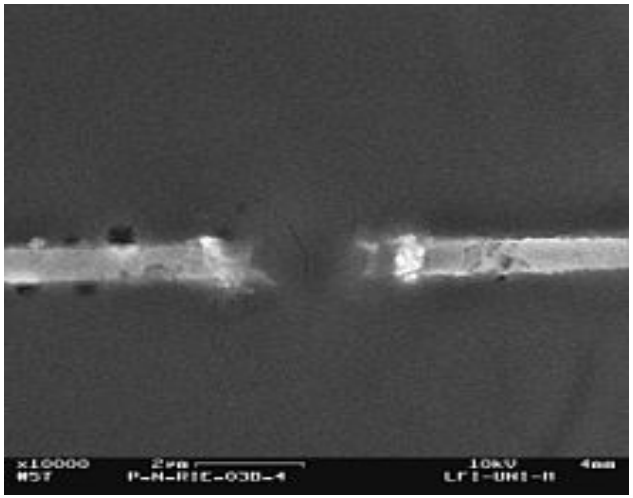
- einprogrammiertes Ausfallverhalten (geplante Obsoleszenz)
- und wenn Verfälschungen von (Programm-) Daten durch Fehler oder Störungen als Ausfälle gezählt werden.

[In dierer VL: geplante Obselesszenz ⇒ Feature, Datenverfälschungen ⇒ FF]

[1] Keine weiteren SL bis zur Reparatur.

Verschleiß elektronischer Bauteile

Langsam ablaufende physikalische Vorgänge:



- Korrosion (Stecker, Schalter, Isolationen, Leiterbahnen, ...).
- Elektromigation: strombedingte Wanderung von Metalatomen bei hohen Stromdichten.
- Parameterdrift: Widerstandswerte, Kapazitäten, Schwellspannungen etc.
- Gateoxiddurchschlag: Hochschaukelnde Tunnelströme, Ladungseinlagerung bis zum lokalen Schmelzen des Oxids. Bildung von Kurzschlüssen. Phänomen: Zunahme des Stromverbrauchs über Monate bis zum Ausfall.

Massnahmen zur Minderung der Ausfallhäufigkeit:

- Verbesserung Fertigung, Material etc.
- Fehlertoleranz. [Digitaltechnik]

Kenngrößen

Kenngrößen des Ausfallverhaltens

- Lebensdauer t_L: Zeit vom Beanspruchungsbeginn bis zum Ausfall. Verteilungsfunktion:

$$F(t) = \mathbb{P}[t_\mathrm{L} \leq t]$$

- Überlebenswahrscheinlichkeit:

$$R(t) = \mathbb{P}[t_\mathrm{L} > t] = 1 - F(t)$$

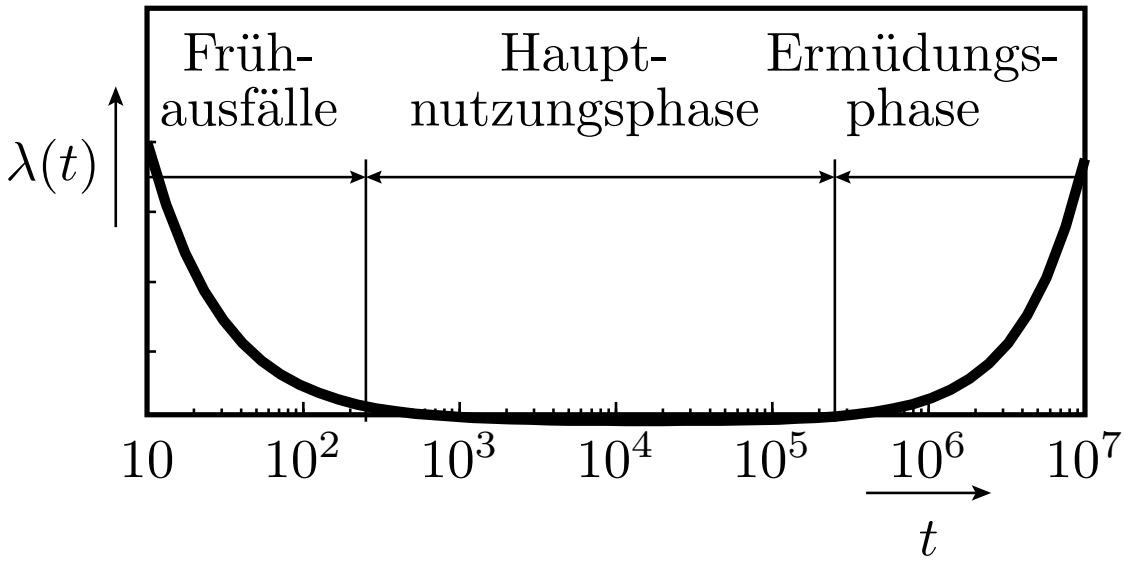
- Ausfallrate λ: Relative Abnahme der Überlebenswahrscheinlichkeit mit der Zeit:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{\mathrm{d}\,R(t)}{\mathrm{d}t}$$

- Mittlere Lebensdauer:

$$\mathbb{E}[t_\mathrm{L}] = \int_0^\infty R(t) \cdot \mathrm{d}t$$

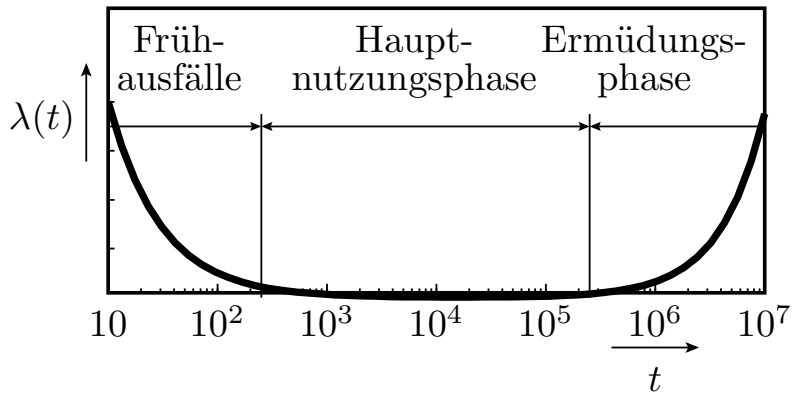
Ausfallphasen



- Frühausfälle (infant mortalities): Erhöhte Ausfallrate durch Schwachstellen (Materialrisse, lokal stark überhöhte Feldstärke oder Stromdichte, ...).
- Hauptnutzungsphase: Näherungsweise konstante Ausfallrate.
- Ermüdungsphase: Anstieg der Ausfallrate: Materialermüdung, ...

Hauptnutzungsphase

Hauptnutzungsphase



Konstante Ausfallrate:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{\mathrm{d}\,R(t)}{\mathrm{d}t} = \lambda = \text{konst.}$$

verlangt für Überlebenswahrscheinlichkeit und Vert. Lebensdauer:

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t} \tag{1}$$

$$F(t) = 1 - \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t}$$

(Exponentialverteilung). Mittlere Lebensdauer:

$$\bar{t}_\mathrm{L} = \mathbb{E}[t] = \int_0^\infty R(t) \cdot \mathrm{d}t = \frac{1}{\lambda}$$

Maßeinheit der Ausfallrate: fit (failure in time)

$$1\,\text{fit} = 1\,\text{Ausfall in } 10^9\,\text{Stunden}$$

System aus mehreren Komponenten

Ein System aus mehreren notwendigen Komponenten überlebt, solange alle Komponenten überleben:

$$R(t) = \prod_{i=1}^{\#K} R(t)_i$$

($\#K$ – Anzahl der Komponanten). Mit einer konstanten Ausfallrate λ_i für alle Komponenten:

$$R(t) = \prod_{i=1}^{\#K} \mathrm{e}^{-\lambda_i \cdot t} = \mathrm{e}^{-\left(\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \lambda_{\mathrm{i}}\right) \cdot \mathrm{t}}$$

Die Ausfallrate des Gesamtsystems ist die Summe der Ausfallraten aller Komponenten:

$$\lambda_{\mathrm{Sys}} = \sum_{i=1}^{\#K} \lambda_i$$

Ausfallraten in der Hauptnutzungsphase nach[2]

Bauteil	Ausfallrate in fit	Bauteil	Ausfallrate in fit
diskrete HBT	1 bis 100	Widerstände	1 bis 20
digitale IC	50 bis 200	Kondensatoren	1 bis 20
ROM	100 bis 300	Steckverbinder	1 bis 100
RAM	bis 500	Lötstellen	0,1 bis 1
analoge IC	20 bis 300		

(HBT – Halbleiterbauteile; IC – Schaltkreise)

- Ausfallrate = Ausfallanzahl / Bauteilanzahl
- Bei mehreren Bauteilen und konstanten Ausfallraten addieren sich die Ausfallraten.

[2] Kärger, R.: Diagnose von Computern, Teubner 1996, S. 68

Ausfallrate einer Baugruppe

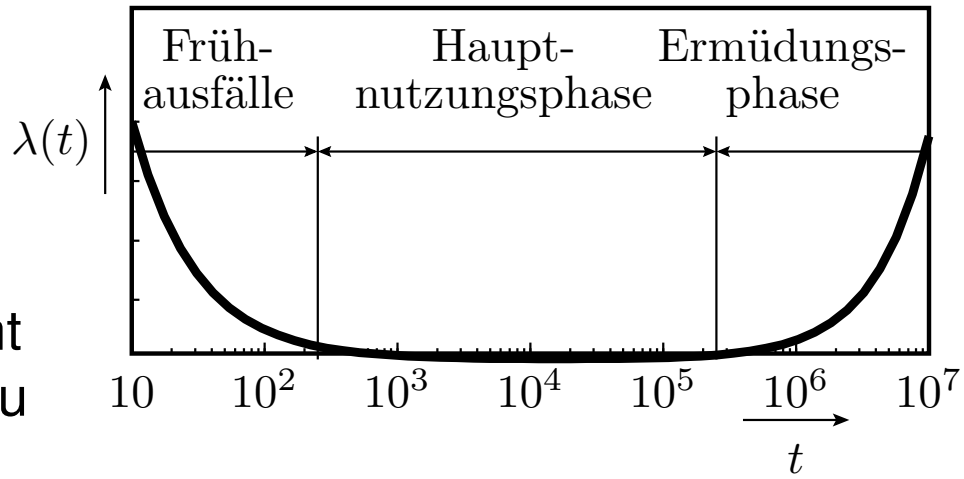
Bauteiltyp	Anzahl n	Ausfallrate λ	$n \cdot \lambda$
Schaltkreise	20	150 fit	3000 fit
diskrete BT	15	30 fit	450 fit
Kondensatoren	15	10 fit	250 fit
Widerstände	30	10 fit	300 fit
Lötstellen	2000	0,5 fit	1000 fit
Baugruppe			5000 fit

- Im Mittel 1 Ausfall in $2 \cdot 10^5$ Stunden ($\approx$23 Jahre) Betriebsdauer.
- Von den heutigen PCs, Handys, ... fallen pro Jahr und hundert Stück nur wenige aus.
- Nach 2 ... 5 Jahren erste Ermüdungsausfälle, z.B. durch Austrocknung von Elektrolytkondensatoren.

[Röhren früher $\bar{t}_\mathrm{L}$ einige 1000 h, mehrere Ausfälle pro Tag pro Rechner]
[von Neumann 3-Verionssystem]
[heute oft $\bar{t}_\mathrm{L} \gg$ Nutzungsdauer]

Voralterung

Frühausfälle

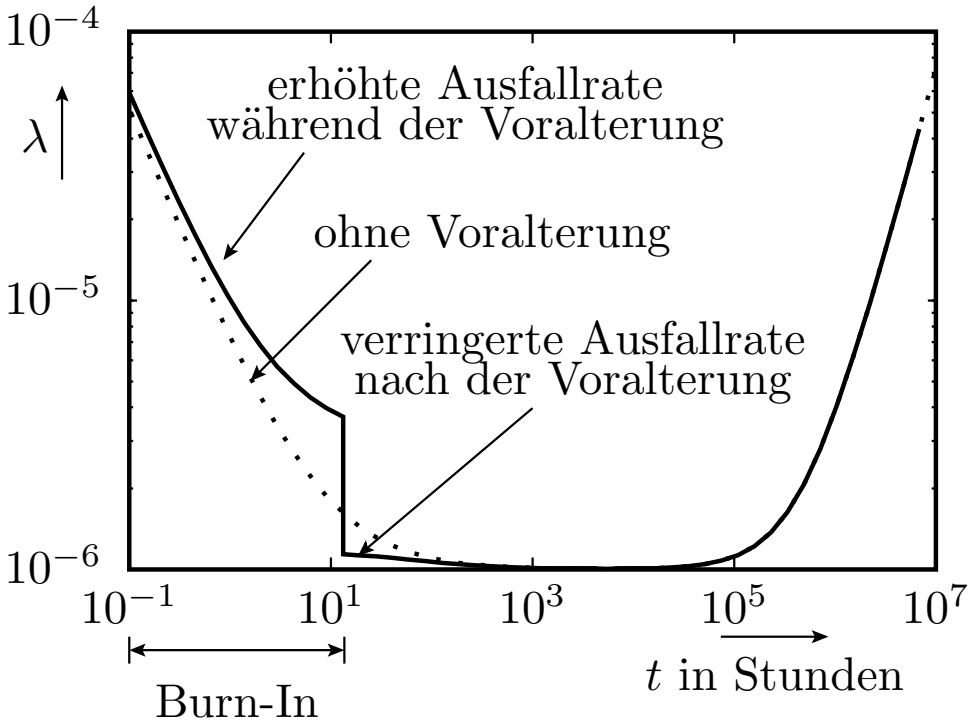


- Auf 100 richtige Fehler kommt etwa ein Beinahefehler, der zu einem Frühausfall führt[3].
- Bei 50% fehlerfreien und 50% aussortierten Schaltkreisen $50\%/100 = 0{,}5\%$ Beinahefehler.
- Die Hälfte wird mit dem Ausschuss aussortiert.
  - $\approx 0{,}25\%$ (jeder 400ste) Schaltkreis verursacht ein Frühausfall.
  - Bei 20 Schaltkreisen pro Gerät jedes zwanzigste Gerät.
  - Bei großen Systemen fast jedes System.
- Frühausfälle sind Garantiefälle und verursachen Kosten für Reparatur, Ersatz, Auftragsabwicklung, ... Was tun?

[Problem existiert auch bei Mechanik]

[3] Barnett, T. S., Singh, A. D.: Relating Yield Models to Burn-In Fall-Out in Time. ITC, 12/2003, S.77-84.

Voralterung (Burn-In)



- Beschleunigung der Alterung vor dem Einsatz durch »harte Umgebungsbedingungen«
  - überhöhte Spannung,
  - überhöhte Temperatur,
  - Stress (Burn-In).
- Einsatz erst nach der Frühphase (wenn die kränklichen Bauteile »gestorben« und ausgetauscht sind).

[Sterberate Mensch: Kindersterblichkeit, $\lambda = \text{konst.}$, Ermüdungsphase ca. ab Rente][
[Voralterung, Arbeits- und Lebensbedingungen, Rentenalter, Lebenserwartung]
[Wortspiel: Burn-In $\Leftrightarrow$ Burn-Out]

Redundanz

Reserveeinheiten (Redundanzen)

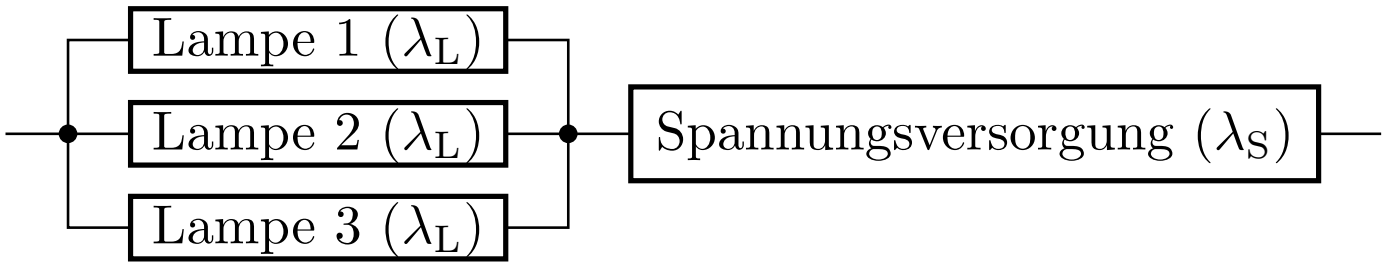
Reserveeinheiten (redundate Einheiten kurz Redundanzen) sind Komponenten,

- die für Aufrechterhaltung der Funktion nicht unbedingt erforderlich sind und
- nach einem Ausfall die Funktion der ausgefallenen Komponenten übernehmen.

Ausfallplan mit Reserveeinheiten

Im Ausfallplan werden notwendige Komponenten für die Verfügbarkeit des Services als Reihenschaltung und Reserveeinheiten (Redundanzen) als Parallelschaltung dargestellt.

Eine Flurbeleuchtung sei verfügbar, wenn mindestens eine von drei Lampen und die Spannungsversorgung funktioniert:



[Glühlampen Reihen- und Paralleschaltung als Vorbild, Weinachtsbaumbeleuchtung]

Reserveeinheiten sind erforderlich für

- Systeme ohne Reparaturmöglichkeit, die lange verfügbar sein müssen (z.B. Satelliten),
- hoher Verfügbarkeit (z.B. Serverdienste) durch Minimierung der Reparaturzeiten.

Kalte, warme und heiße Reserve

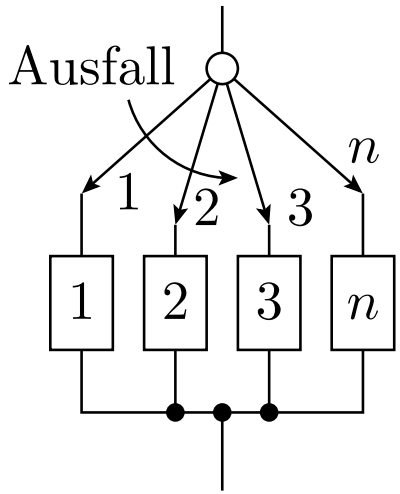
- Heiße Reserve: Reservekomponenten arbeiten parallel (z.B. Mehrversionssystem) und fallen mit derselben Wahrscheinlichkeit wie das aktive System aus. [frühere 3-Versions-Röhrenrechner]
- Kalte Reserve: Reservekomponenten werden geschont und funktionieren idealerweise noch alle zum Ausfallzeitpunkt der aktiven Komponente.
- Warme Reserve: Reserveeinheiten (z.B. das Reserverad im Auto) altern auch bei Nichtnutzung, nur langsamer.

Die beiden zusätzlichen Lampen auf der Folie zuvor, die für die Verfügbarkeit der Treppenbeleuchtung nicht unbedingt funktionieren müssen, bilden eine heiße Reserve, Ersatzlampen, die erst nach Ausfall der »Hauptlampe« eingeschaltet werden, eine kalte Reserve, ein Ersatzrad im Auto eine warme Reserve, weil der Gummi auch ohne Beanspruchung altert.

Zu erwartende Lebensdauer bei kalte Reserve

Für jede Komponente beginnt die Belastung erst nach Ausfall der vorherigen Komponente.

Phase	mittlere Dauer
1	$\mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L}.1}\right]$
2	$\mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L}.2}\right]$
3	$\mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L}.3}\right]$
...	...
Summe:	$\mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L.ges}}\right] = \sum_{i=1}^{n} \mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L}.i}\right]$



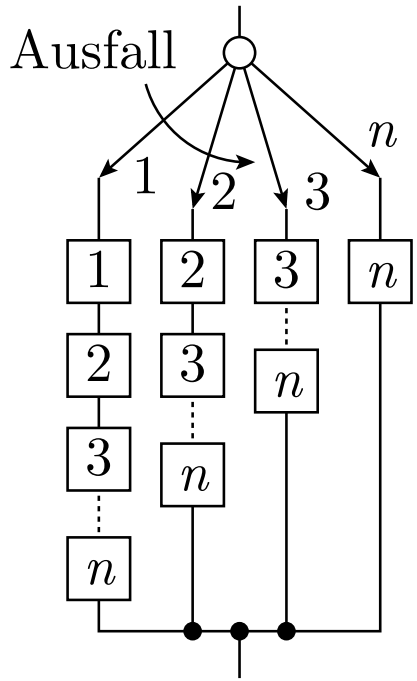
Die zu erwartenden Lebensdauern aller Komponenten addieren sich[4].

[4] Unter der Annahme, dass die Umschalter und die ungenutzten Reserveeinheiten Ausfallrate null haben.

Zu erwartende Lebensdauer bei heiße Reserve

Alle noch lebenden Komponenten können gleichermaßen ausfallen:

$$\mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L}.i}\right] = \frac{1}{\sum_{j=1}^{i} \lambda_j}$$

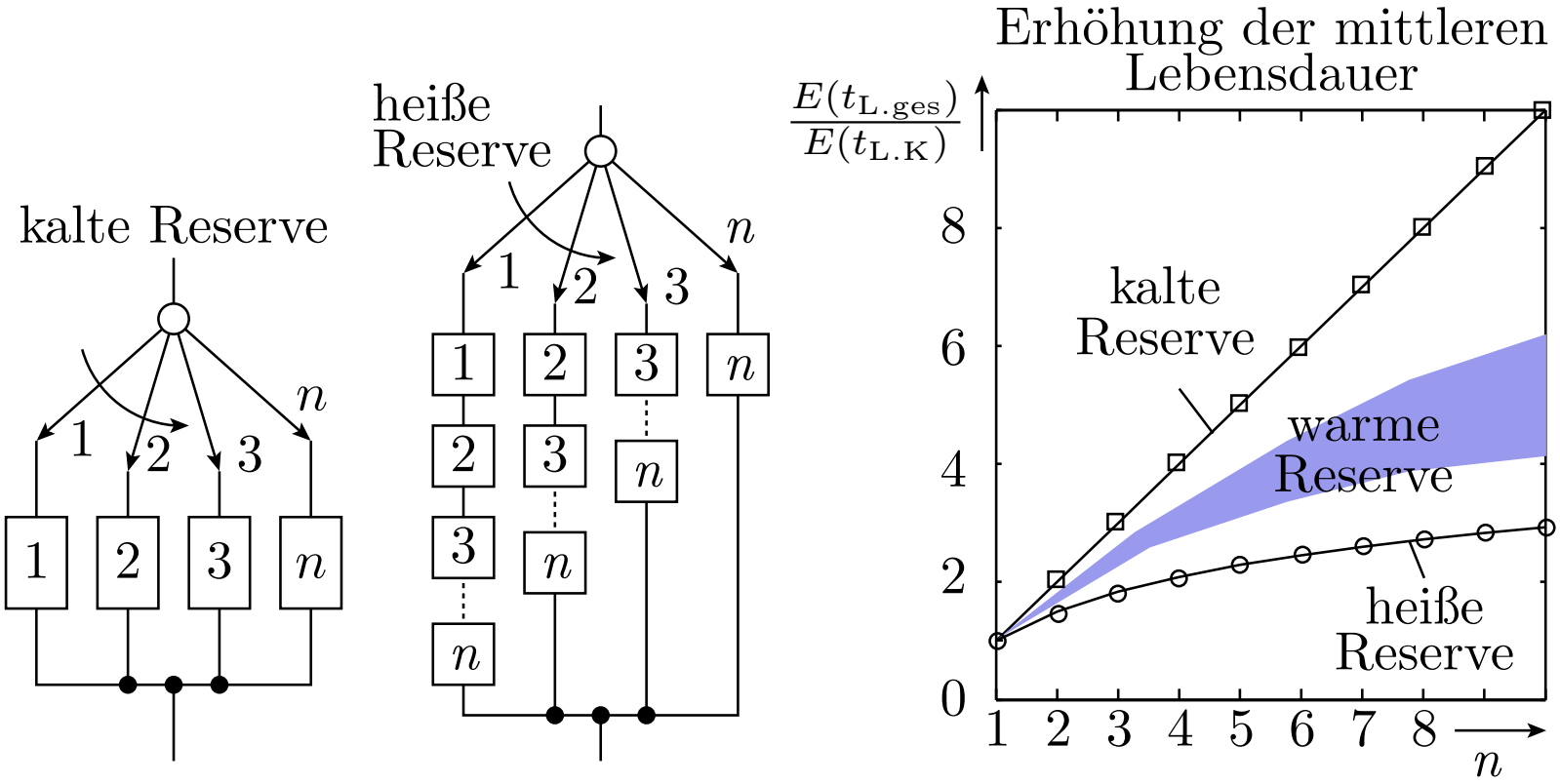


Komponenten mit gleicher Ausfallrate λ_{K}:

Phase	mittlere Dauer
1	$\frac{1}{n \cdot \lambda_{\mathrm{K}}} = \frac{\mathbb{E}[t_{\mathrm{L.K}}]}{n}$
2	$\frac{1}{(n-1) \cdot \lambda_{\mathrm{K}}} = \frac{\mathbb{E}[t_{\mathrm{L.K}}]}{n-1}$
...	...
Summe:	$\mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L.ges}}\right] = \mathbb{E}\left[t_{\mathrm{L.K}}\right] \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i}$

Die erste Reservekomponente erhöht die mittlere Lebensdauer um die Hälfte, die zweite um ein Drittel etc.

Zu erwartende Lebensdauer warme Reserve



- Die Ausfallrate der »kalten« Ersatzkomponenten ist kleiner als im aktiven Zustand, aber größer null.
- »Warme« Reserveeinheiten verlängert die Lebensdauer mehr als »heiße« und weniger als »kalte«.

Wartung

Wartung

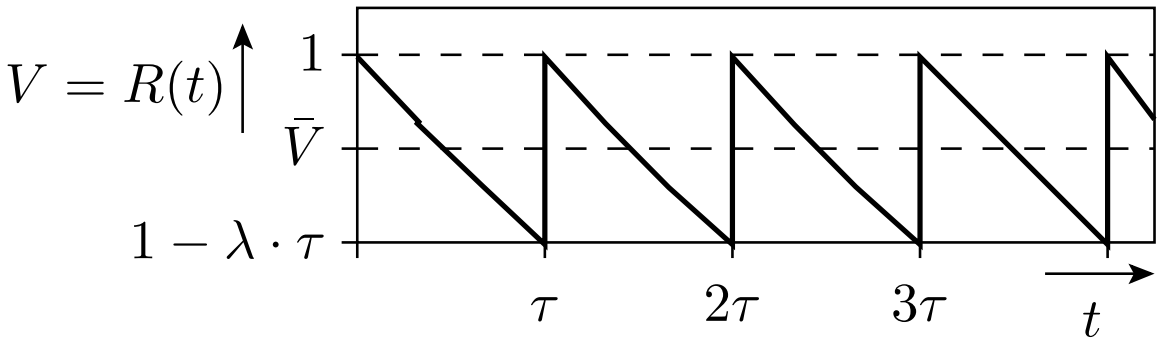
Wartung:

- Test und die Beseitigung aller erkennbaren Fehler, die seit der letzten Wartung entstanden sind, insbesondere auch der durch Ausfälle.
- Ergänzen und Ersatz von Betriebsstoffen und Verbrauchsmitteln (Getrieben Schmierstoffe, bei Druckern Papier und Toner).
- Planmäßiger Austausch von Verschleißteilen vor der Ermüdungsphase, in der die Ausfallrate stark zunimmt (in PCs die Batterien für den BIOS-RAM, in Servern die Festplatten).

Wartungsintervall τ: Zeit zwischen den Wartungen, z.B. 1 Jahr.

[KFZ-Wartungsintervall: TÜV alle 2 Jahre]

Mittlere Verfügbarkeit und PFD



Mittlere Verfügbarkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit), wenn der Wartungstest alle Ausfälle erkennt und $\lambda \cdot \tau \ll 1$:

$$\bar{V} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^\tau R\,(t) \cdot \mathrm{d}\tau = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^\tau \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t} \cdot \mathrm{d}\tau = \frac{1 - \mathrm{e}^{-\lambda \cdot \tau}}{\lambda \cdot \tau}$$

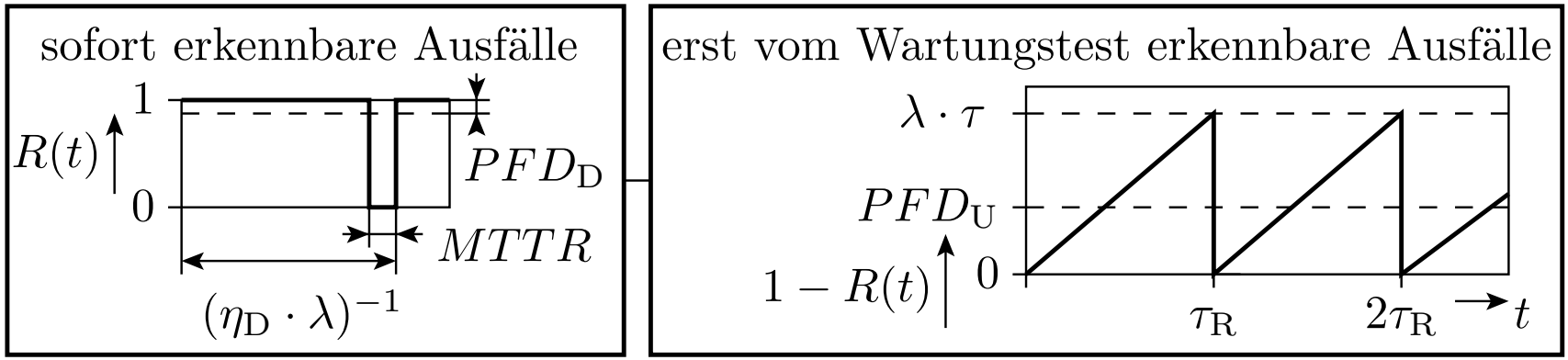
mit

$$\mathrm{e}^{-\lambda \cdot \tau} \approx 1 - \lambda \cdot \tau + \frac{(\lambda \cdot \tau)^2}{2}$$

$$\bar{V} = 1 - \frac{\lambda \cdot \tau}{2}; \quad PFD = 1 - \bar{V} = \frac{\lambda \cdot \tau}{2}$$

(τ – Wartungsintervall; λ – Ausfallrate; PFD – Probability of Failure on Demand, Wahrscheinlichkeit der Nichtverfügbarkeit, zu einem zufälligen Zeitpunkt).

Beseitigung sofort bemerkter Ausfälle

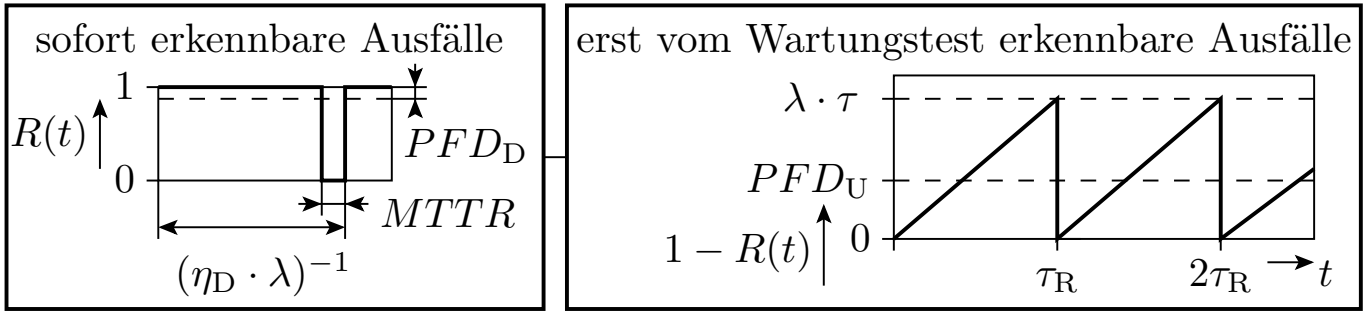


Ein Anteil η_D der Ausfälle wird sofort bemerkt und mit der $MTTR$ (Mean Time to Repair) beseitigt. Modellierung als Reihenschaltung

- eines Systems mit den sofort erkennbaren Ausfällen. Mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen $1/\left(\eta_\mathrm{D} \cdot \lambda\right)$. Mittlere Wahrscheinlichkeit, dass dieses Teilsystem ausgefallen ist:

$$PFD_\mathrm{D} = \eta_\mathrm{D} \cdot \lambda \cdot MTTR$$

- und eines Systems mit den Ausfällen, die erst beim der Wartung bemerkt und beseitigt werden ...



- ... erst bei der Wartung bemerkt und beseitigt werden:

$$PFD_{\mathrm{U}} = \frac{(1 - \eta_{\mathrm{D}}) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

Ein System ist nicht verfügbar, wenn

- es wegen der Beseitigung eines sofort erkennbaren ausfallbedingten Fehler **ODER** (sich ausschließender Ereignisse)
- wegen eines nicht sofort bemerkbaren Fehlers, der erst bei der Wartung erkannt und beseitigt wird

nicht verfügbar ist. Wahrscheinlichkeit, dass das System insgesamt zu einem zufälligen Anforderungszeitpunkt ausgefallen ist:

$$PFD = PFD_{\mathrm{D}} + PFD_{\mathrm{U}} = \eta_{\mathrm{D}} \cdot \lambda \cdot MTTR + \frac{(1 - \eta_{\mathrm{D}}) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

$$\bar{V} = 1 - PDF = 1 - \eta_{\mathrm{D}} \cdot \lambda \cdot MTTR - \frac{(1 - \eta_{\mathrm{D}}) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

Wiederholung[5] Sicherheitsstufen nach IEC 61508

Sicherheitsstufen für Industriegeräte nach IEC 61508:

- SIL1: Kleine Schäden an Anlagen und Eigentum.
- SIL2: Große Schäden an Anlagen, Personenverletzung.
- SIL3: Verletzung von Personen, einige Tote.
- SIL4: Katastrophen, viele Tote und gravierende Umweltschäden.

Mindest-$MTBF$ und Maximal-PFD:

SIL	1	2	3	4
$MTBF_{\min}$ in Jahren	10	10^2	10^3	10^4
$PFD_{\max}$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}

(SIL – **S**afety **I**ntegrity **L**evel). Aus den $MTBF$ und PFD leiten sich die Wartungsintervalle, erforderliche Redundanzen etc. ab.

[5] Wiederholung von Foliensatz 1, Abschn. 2.4 »Sicherheit«.

Beispiel 1

Ausfallrate $\lambda = 10^{-6}\,\mathrm{h}^{-1}$, Anteil der Ausfälle, die sofort beseitigt werden $\eta_\mathrm{D} = 75\%$. Wartungsintervall $\tau = 2 \cdot 10^3\,\mathrm{h}$, mittlere Reparaturzeit $MTTR = 4\,\mathrm{h}$. Gesucht PFD:

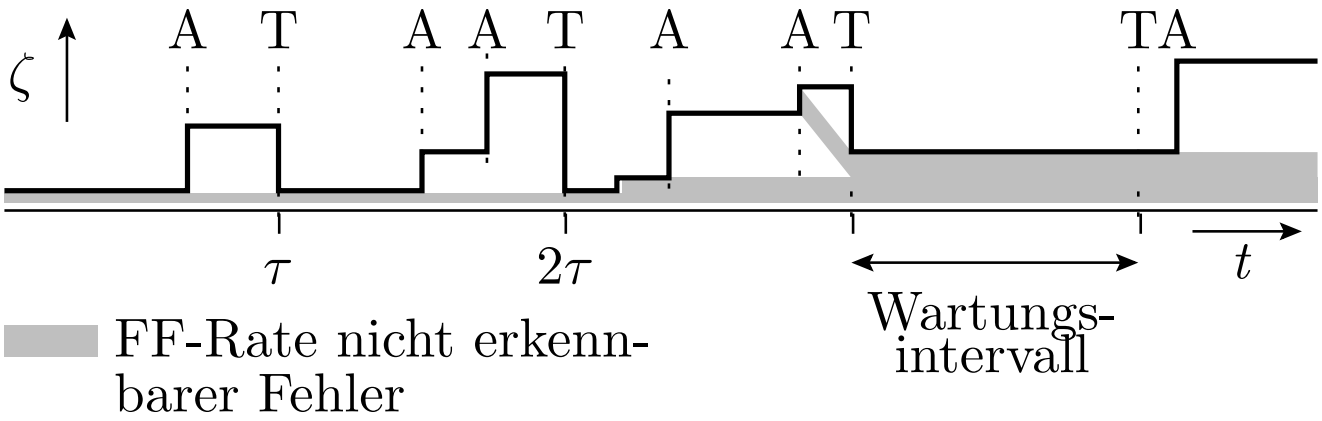
$$PFD = \eta_\mathrm{D} \cdot \lambda \cdot MTTR + \frac{(1-\eta_\mathrm{D}) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

$$= \underbrace{0{,}75 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{h}^{-1} \cdot 4\,\mathrm{h}}_{3 \cdot 10^{-6}} + \underbrace{\frac{0{,}25 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{h}^{-1} \cdot 2 \cdot 10^3 \mathrm{h}}{2}}_{2{,}5 \cdot 10^{-4}} = 2{,}53 \cdot 10^{-4}$$

- $MTBF = \frac{1}{\lambda} = 114\,\mathrm{Jahre}$ reicht nur für SIL 2. Eine höhere Sicherheitsstufe verlangt zuverlässigere Bauteile oder Redundanzen.

- $PFD = 2{,}53 \cdot 10^{-4}$ reicht für SIL 3.
- Für SIL 4 $\left(PFD \leq 10^{-4}\right)$ wäre es am einfachsten, das Wartungsintervall auf $\tau \approx 700\,\mathrm{h}$ zu verkürzen.
- Die mittlere Reperaturzeit dürfte in allen Fällen viel größer sein.

Zuverlässigkeitsverlust durch Ausfälle

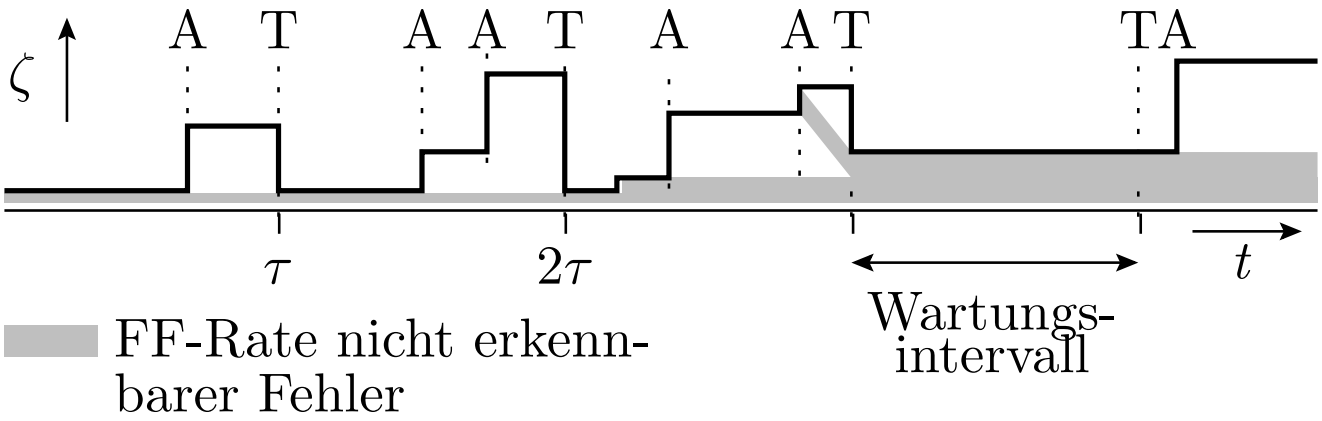


(A – Ausfall; T – Wartungstest und Beseitigung aller erkennbaren Fehler; τ – Wartungsintervall). Fehler durch Ausfälle mit kleinem ζ_A

- beeinträchtigen statt der Verfügbarkeit die Zuverlässigkeit und
- werden von Wartungs- und Einschalttests nur mit $FC < 1$ erkannt.

Auch bei regelmäßiger Wartung nimmt die FF-Rate mit der Nutzungsdauer zu und die Zuverlässigkeit ab.

Minderung der Zuverlässigkeitsabnahme



- Prophylaktischer Tausch von Hardware, wenn ein Zuverlässigkeitsverlust wahrgenommen wird[6].
- Gründlicher Wartungstest.
- Ersatz der Gesamtsystems, bevor erste Ausfälle zu erwarten sind.

[6]Die Ursache einer beobachtbaren Zuverlässigkeitsabnahmen kann auch geplante Obszeleszenz oder Schadware sein, erkennbar daran, dass ein prophylaktischen HW-Tausch nicht hilft.

Fehlertoleranz

Fehlertoleranz

Von lateinisch tolerare »erleiden«, »erdulden«. In der Technik, aufrechterhalten der Funktion bei internen FF durch Eingabefehler, Störungen, Fehler und Ausfälle. unvorhergesehene Eingaben, Ausfällen oder oder internen FF. Einteilung der Reaktionen auf FF:

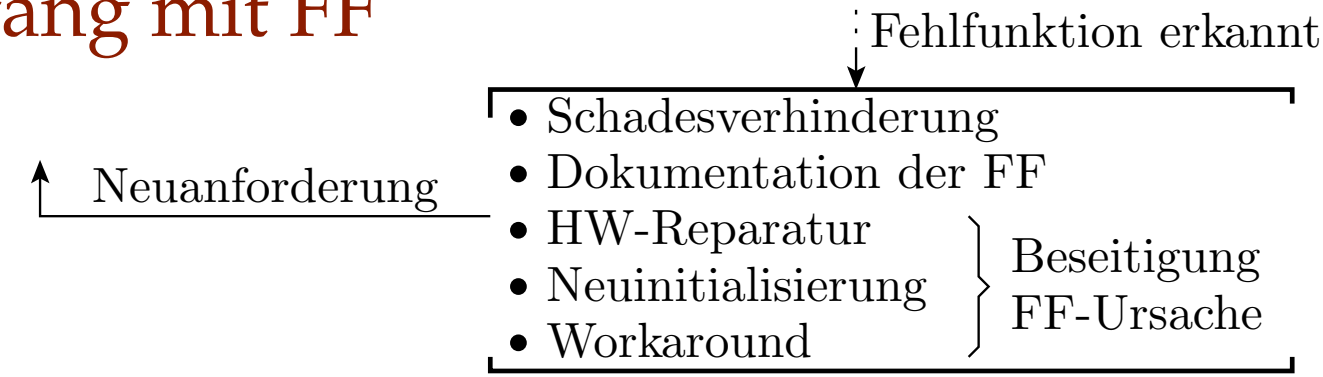
- go: System reagiert sicher und korrekt.
- fail-operational: Verbleib in einem betriebsfähigem Zustand.
- fail-soft: Systembetrieb sicher, aber Leistung vermindert
- fail-safe: Nur Systemsicherheit gewährleistet.
- fail-unsafe: unvorhersehbares Systemverhalten.

Auf Foliensatz F1 wurden zwei Kenngrößen zur Beschreibung des Einflusses der Reaktion auf FF auf die Verlässlichkeit definiert:

- Fehlertoleranz: Anteil FF mit Reaktion »go« und
- Robostheit: Anteil FF Mindestreaktion »fail-save«.

Sicherheit ist der Kehrwert des Anteils der FF mit Reaktion »fail-unsave«.

Umgang mit FF



Schadenverhinderung:

- Bearbeitungsabbruch, Daten sichern, ...
- Herstellen eines sicheren Zustands, z.B. Notausschaltung.

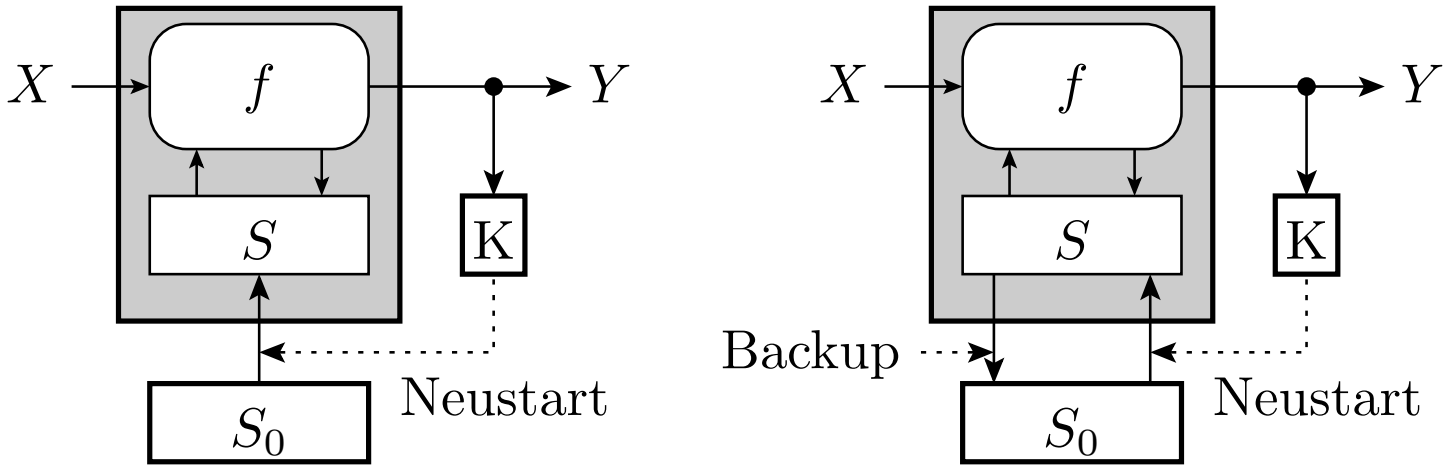
Dokumentation der FF:

- Fehlermeldung, Core-Dump, Cap-Datei (Windows) erzeugen, ...

Beseitigung der Entstehungsursache der FF:

- Reparatur ausgefallener HW oder
- Rekonfiguration mit/ohne verringerte Leistung, ...
- Wiederherstellung eines /des letzten zulässigen Systemzustands.
- Bei Fehlern als Ursache: Diversitäre Service-Anforderung durch Änderung der Eingabe, des Berechnungsflussenes, ...).

Rückkehr zu einem zulässigen Systemzustand



Bei einer FF werden mit hoher Warsch. interne Daten verfälscht. Zur Rückkehr in einen funktionsfähigen Zustand sind die interenen Daten mit zulässigen Werten zu initialisieren:

- Statische Neuinitialisierung (Reset): fester Anfangszustand,
- Dynamische Neuinitialisierung: Regelmäßiges Backup wärend des Betriebs. Laden des letzten Backups nach Crash.

Oft werden nur Daten gesichert, die sich nicht problemlos neu berechnen lassen, bei Editoren, Logistiksysteme, Datenbanken, ... die Eingaben seit dem letzten kompletten Backup.

Grundprinzipien für die Reaktion auf FF

- Fail-Fast: Abbruch bei erkannten FF, keine Korrekturversuche.
  [üblich in der Testphase, um möglichst viele Fehler zu finden]
- Fail-Slow: Funktion so lange wie möglich aufrechterhalten, z.B Ersatz fehlerhafter Daten durch sinnvolle Standardwerte,
  - Bei WB-Überlauf Begrenzung auf zulässige Werte,
  - Suche fehlender Dateien an anderen Orten, ...

  [Web-Browser HLTM-Fehler]

  [Erhöht Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit]
- Ruhestromprinzip: Konstruktionsprinzip, bei dem das System bei Versagen automatisch in einen sicheren Zustand übergeht.
  - Eisenbahnsignaltechnik: bei fehlendem Ruhestrom Störungsmeldung.
  - Brandmeldeanlage: bei Drahtbruch Alarm.
  - Fahrzeugbremse: Bremsen, wenn Bremsschlauch platzt.
  - ...

Fehlerisolation

Fehlerisolation

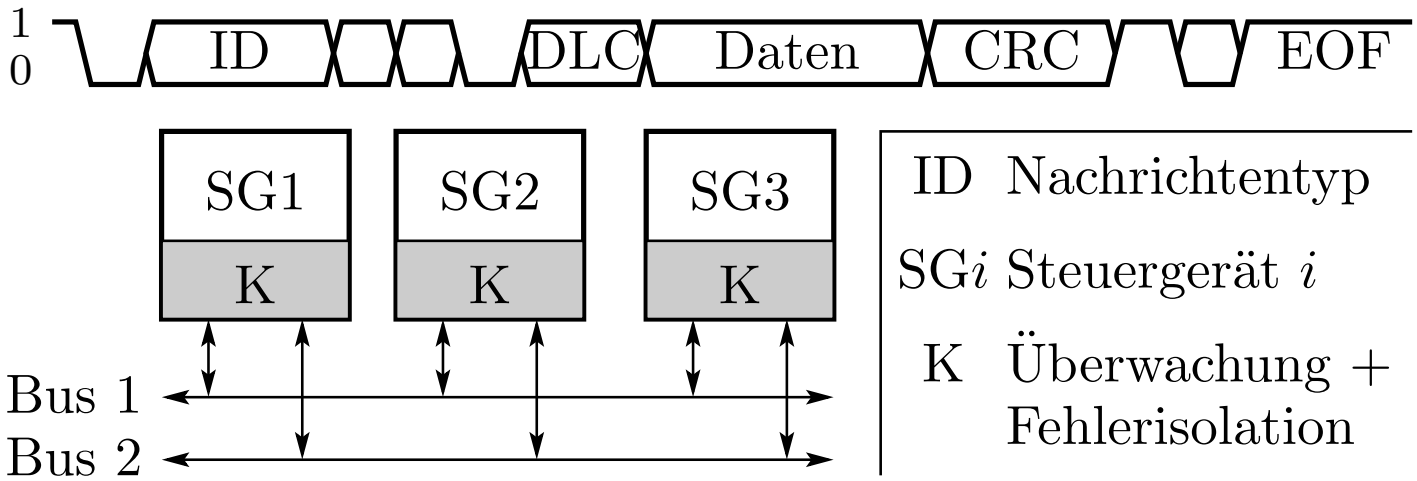
Eine sinnvolle automatische Reaktion auf eine FF benötigt

- von der FF nicht kontaminierte Daten und
- von der Entstehungsursache der FF unbeeinträchtigte Systemteile.

Techniken zur Fehlerisolation:

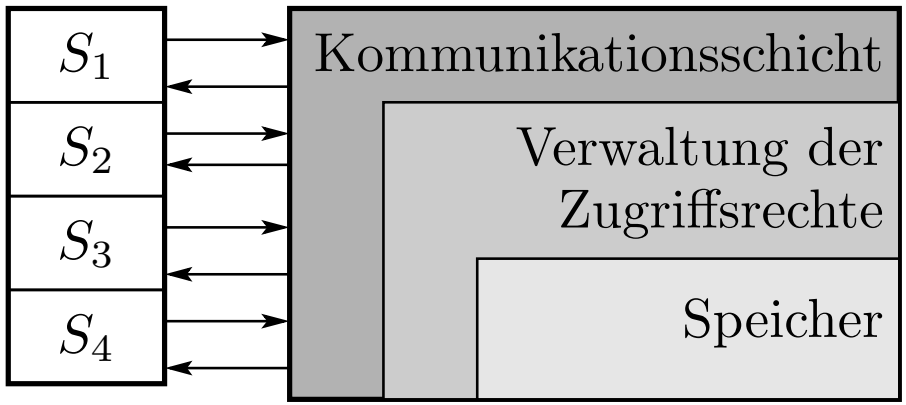
- Datenkontrolle an Schnittstellen zwischen Teilsystemen. Keine Weitergabe erkannter verfälschter Daten.
- Keine Zugriffmöglichkeit auf interne Daten fremder Funktionseinheiten.
- Physikatisch und räumlich getrennte Systeme (Risikominderung gleicher Fehler, zeitgleicher Ausfälle, ...).
- ...

Verteilte Steuergeräte



- Die Steuergeräten in KFZs kommunizieren nachrichtenbasiert.
- Jedes Steuergerät kontrolliert die Nachrichten aller anderen Steuergeräte.
- Bei ausbleibenden oder fehlerhaften Nachrichten Eintrag in Fehlerspeicher und jedes Steuergerät führt eine eigene Fehlerbehandlung aus.

Fehlerisolation in Betriebssystemen



Die zu isolierenden Teilsysteme sind die Prozesse S_i. Jeder Prozess

- sieht nur seinen eigenen virtuellen Speicher,
- die ihm zugeordneten Ein- und Ausgabegeräte und
- bekommt den Prozessor zeitscheibenweise zugeteilt.

Resourcen-Zuordnung (physikalischer Speicher, Ein- und Ausgabegeräte, Kommunikation zu anderen Prozessen, ...) nur über Systemrufe möglich. Nur der Betriebssystemkern hat Universalzugriff kann unbegrenzt Schaden anrichten.

3-Ebenen-Konzept (Automotive)

- L1: Funktionsebene: enthält Rahmen für die Regler und Zustandsautomaten
- L2: Funktionsüberwachungsebene
- L3: Rechnerüberwachungsebene: applikationsunabhängig, Bereitstellung mehrerer Fehlerreaktionsklassen (Abschaltpfade), hier auch Watchdog, Spannungs- und Temperaturüberwachung.

Vor Start von L1-Funktionen Sicherstellung der Integrität:

- Start im sicheren Zustand,
- verschiedene Diagnosen: Kontrolle alle sicherheitsrelevanten Code- und RAM-Sektionen auf Konsistenz, Begrenzung der Anzahl der Startversuche nach einem Fehler, ...

Aus der in der Funktions- und Funktionsüberwachungsebene L2 ausgeführten Software hat der Anwender über eine API jederzeit die Möglichkeit, das Steuergerät in den sicheren Zustand zu versetzen, um Daten zu Plausibilisieren, ...

Redundanz

Gleichschrittsysteme

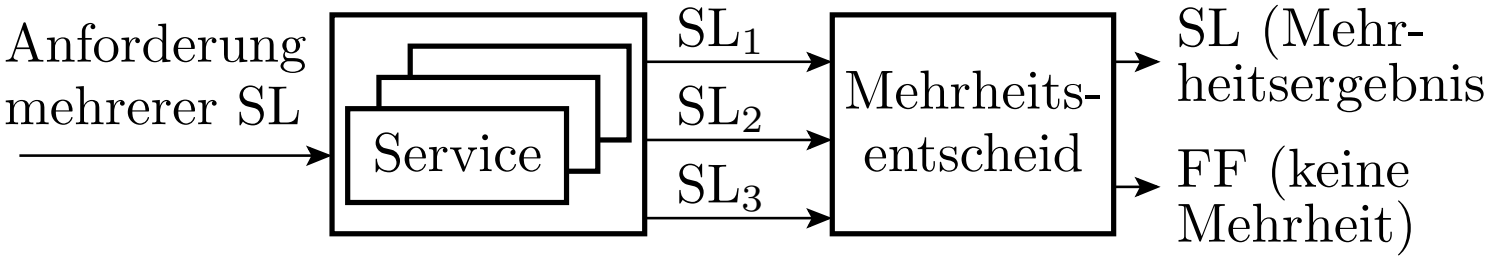
- Gleichschrittsysteme: Parallele Ausführung der SL auf replizierten Funktionsbausteinen. Im fehlerfreien Fall übereinstimmende SL und übereinstimmende interne Zustände.
- Sanfter Leistungsabfall (Graceful degradation): Nach Ausfall von Systemkomponenten Fortsetzung (eines Notbetriebs) mit verlängerter Verarbeitungszeit oder vermindertetem Service.

Noo$M$ (N out of M): N benötigte von M vorhandenen Repliken:

- 1oo1: Einfaches System. Nach Ausfall Reparatur.
- 1oo2: Überwachung durch Vergleich. Ab Teilsystemausfall bis Reparatur Betrieb als 1oo1.
- 2oo2: Überwachung durch Vergleich. Ab Teilsystemausfall bis Reparatur optional Betrieb als 1oo1 mit reduzierter Leistung.
- 2oo3: Mehrheitsentscheid. Ab Teilsystemausfall bis Reparatur Betrieb als 2oo2.

- Alle redundanzfreien Systeme, die regelmäßig gewartet werden, z.B. wie Autos zum TÜV müssen, sind 1oo1.
- Im Maschinenbau je nach Sicherheitsstufe: 1oo1- oder 1oo2.
- Prozessindustrie und Systeme ohne einen in kurzer Zeit erreichbaren sicheren Zustand (z. B.: Flugzeugsteuerungen, Atomkraftwerke, Chemiereaktoren) auch höhere Redundanzen 2oo2, 2oo3 oder 2oo4 üblich.

Mehrfachberechung und Mehrheitsentscheid



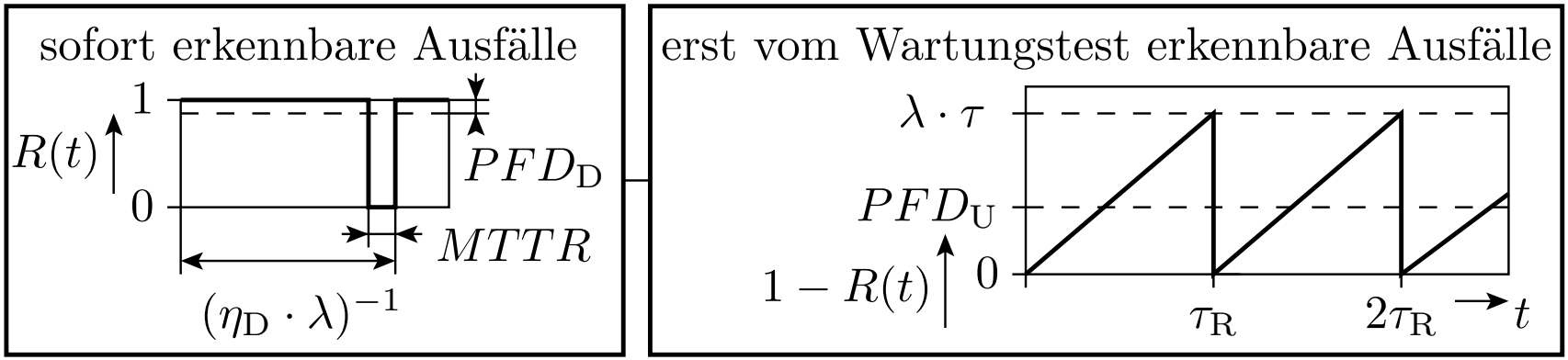
2oo3 System, bereits 1956 von »von Neumann« vorgeschlagen für die damaligen Röhrenrechner, in denen alle paar Stunden eine Röhre ausgefallen ist. HW-Ausfälle für getrennte Rechern haben eine große Diversität. Bei Ausfall eines Rechners konnten die anderen bis zur Reparatur als Master-Checker-Paar weiterarbeiten.

Sanfter Leistungsabfall

- Bei Komponentenausfall Umverteilung von Aufgaben auf andere Systembestandteile.
- Bei Notstromversorgung Abschalten von Systemteilen.
- Transmission Control Protocol (TCP): auch dann noch eine sichere Punkt-zu-Punkt-Verbindung, wenn einzelne Knoten im Netzwerk überlastet, falsch eingestellt sind oder Daten verfälschen.
- HTML ist aufwärtskompatibel so aufgebaut, dass älterer Browser neue HTML-Einheiten, die sie nicht kennen, ignorieren und den Rest des Dokuments trotzdem dargestellen.
- Ausschluss / Ersatz fehlerhafter Rechner-Knoten und Aufgabenumverteilung auf die verringerte Anzahl.

Verfügbarkeit 1oo1 mit Wartungsintervall τ

Gleich der PFD für eine System ohne Redundanz auf Folie 7.27:



Wahrscheinlichkeit eines sofort erkennbaren Ausfalls:

$$PFD_{1001\mathrm{D}} = \eta_{\mathrm{D}} \cdot \lambda \cdot MTTR$$

Wahrsch. eines eines bei der Wartung erkennbaren Ausfalls:

$$PFD_{1001\mathrm{U}} = \frac{(1 - \eta_{\mathrm{D}}) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

PFD, dass System insgesamt ausgefallen ist:

$$PFD_{1oo1} = PFD_{1001\mathrm{D}} + PFD_{1001\mathrm{U}}$$

λ – Ausfallrate, $MTTR$ – mittlere Reperaturzeit, η_{D} – Anteil Typ oben.

PFD und Verfügbarkeit eines Autos

KFZ: Wartungsintervall $\tau = \frac{10.000\text{km}}{50\,\text{km/h}} = 200\text{h}$, Ausfallrate $\lambda = 10^{-3}\,\text{h}^{-1}$, $\eta_\text{D} = 80\%$, Mittlere Reparaturzeit $MTTR = 2\,\text{h}$. Gesucht

1. PFD_KFZ und
2. Verfügbarkeit.

1. PFD (Probability of Failure on Demand):

$$PFD_\text{KFZ} = \eta_\text{D} \cdot \lambda \cdot MTTR + \frac{(1-\eta_\text{D}) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

$$= 0{,}8 \cdot 10^{-3}\,\text{h}^{-1} \cdot 2\,\text{h} + \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3}\,\text{h}^{-1} \cdot 200\text{h}}{2} = 2{,}16\%$$

2. Verfügbarkeit:

$$V_\text{KFZ} = 1 - PFD_\text{KFZ} = 97{,}84\%$$

Verfügbarkeit redundanter 1oo2-Systeme

Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine von zwei unabhängig ausfallenden Komponenten mit Überlebenswahrscheinlichkeit $e^{\lambda t}$ nicht ausgefallen ist:

$$\begin{aligned} R(t)_{1\text{oo}2\text{U}} &= 1 - \left(1 - e^{\lambda t}\right)^2 \\ &= 2 \cdot e^{\lambda t} - e^{2\lambda t} \end{aligned}$$

Verfügbarkeit als mittlere Überlebenswahrscheinlichkeit in einem Wartungsintervall τ:

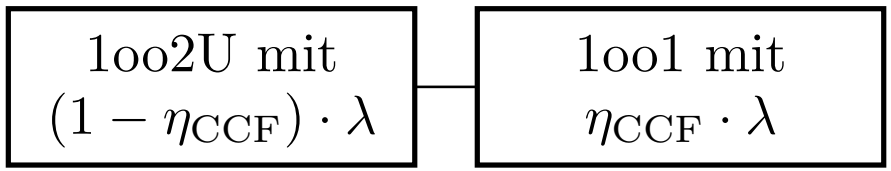
$$\begin{aligned} \bar{V}_{1\text{oo}2\text{U}} &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(2 \cdot e^{\lambda t} - e^{2\lambda t}\right) \cdot \mathrm{d}\tau \\ &= \frac{2}{\lambda\tau} \cdot \left(1 - e^{\lambda t}\right) - \frac{1}{2\lambda\tau} \cdot \left(1 - e^{2\lambda t}\right) \end{aligned}$$

Mit der Näherung:

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6}$$

$$\bar{V}_{1oo2U} = \frac{2}{\lambda\tau} \cdot \left(1 - \left(1 - \lambda\tau + \frac{(\lambda\tau)^2}{2} - \frac{(\lambda\tau)^3}{6}\right)\right)$$
$$- \frac{1}{2\lambda\tau} \cdot \left(1 - \left(1 - 2\lambda\tau + \frac{(2\lambda\tau)^2}{2} - \frac{(2\lambda\tau)^3}{6}\right)\right) = 1 - \frac{(\lambda\tau)^2}{3}$$

$$PFD_{1oo2U} = 1 - \bar{V}_{1oo2U} = \frac{(\lambda\tau)^2}{3}$$



Ein Anteil η_{CCF} der Ausfälle verursacht wegen gemeinsamer Ursachen (Common Cause Failurs) den gleichzeitigen Ausfall beider Systeme. Modellierung als Reihenschaltung:

- 1oo2-System für alle unabhängigen Ausfälle und

$$PFD_{1oo2U} = \frac{(1 - \eta_{CCF}) \cdot (\lambda\tau)^2}{3}$$

- ein 1oo1-System für die gleichzeitigen Ausfälle ...

- ein 1oo1-System für die gleichzeitigen Ausfälle:

$$PFD_{1oo1} = \eta_{CCF} \cdot \eta_D \cdot \lambda \cdot MTTR + \frac{\eta_{CCF} \cdot (1 - \eta_D) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

Gesamt-PDF für $PFD_{\ldots} \ll 1$ für Reparatur, solange noch eine Komponente verfügbar ist, erst zum Wartungstermin:

$$PFD_{1oo2} = \frac{((1 - \eta_{CCF}) \cdot \lambda \cdot \tau)^2}{3} + \eta_{CCF} \cdot \eta_D \cdot \lambda \cdot MTTR + \frac{\eta_{CCF} \cdot (1 - \eta_D) \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$$

Weitere N aus M Systeme

- 2oo2: Zwei identische Systeme (Master und Checker) im Gleichschritt mit Ergebnisvergleich. Sobald ein System versagt, nicht mehr sicher verfügbar. Verfügbarkeit und PFD wie 1oo1 mit der doppelten Ausfallrate:

$$PFD_{2oo2} = 2 \cdot \eta_D \cdot \lambda \cdot MTTR + (1 - \eta_D) \cdot \lambda \cdot \tau$$

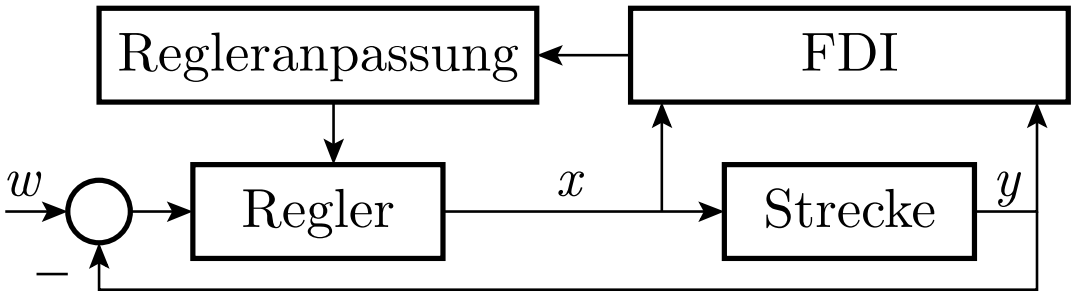
- PFD nach [3] für N von M funktionierende mit Ausfallrate λ unabhängig voneinander ausfallende identische Komponenten; Reparaturintervall τ:

N	Noo1	Noo2	Noo3	Noo4
1	$\frac{\lambda \cdot \tau}{2}$	$\frac{(\lambda \cdot \tau)^2}{3}$	$\frac{(\lambda \cdot \tau)^3}{4}$	$\frac{(\lambda \cdot \tau)^4}{5}$
2	-	$\lambda \cdot \tau$	$(\lambda \cdot \tau)^2$	$(\lambda \cdot \tau)^3$
3	-	-	$\frac{3 \cdot \lambda \cdot \tau}{2}$	$2 \cdot (\lambda \cdot \tau)^2$
4	-	-	-	$2 \cdot \lambda \cdot \tau$

Die Wahrscheinlichkeit für CCF nimmt unabhängig davon, wie viel M größer N ist linear mit $\lambda \cdot \tau$ zu. $M \gg N$ meist nicht zielführend.

Anwendungsspez. Lösungen

Fehlertolerantes Regelungssystem

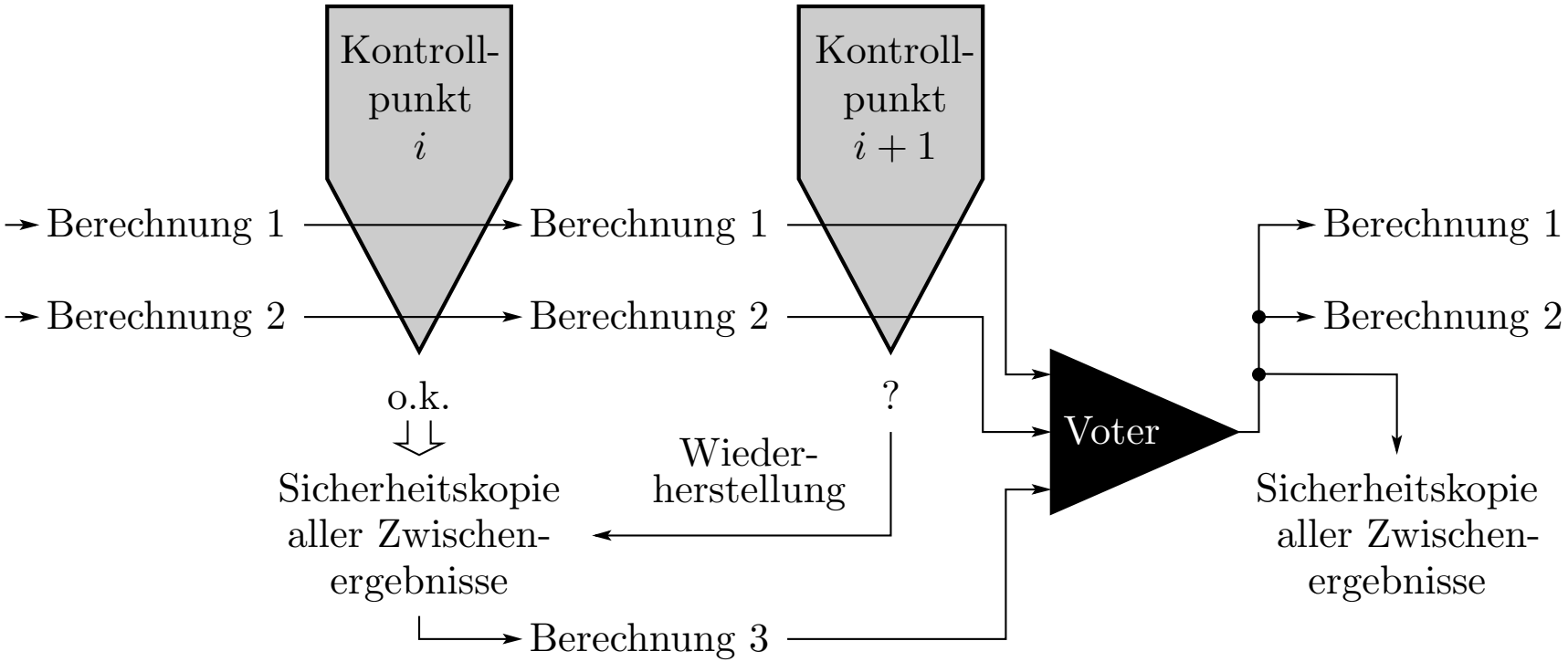


In einem Reglersystem wird vom Sollwert w der zu regelnde Ist-Wert y abgezogen. Aus der Differenz bildet der Regler den Stellwert x für die Regelstrecke (z.B. eine Heizung, wenn y eine Temperatur ist).

Fehlertoleranz gegenüber FF von Regler und Strecke:

- Zusatzmodul zur Fehlerdiagnose (Fehler Detektion, Isolation und Identifikation, FDI) überwacht Stellwert und Ist-Wert.
- Regleranpassung: Bei signalisierter FF, Änderung der Reglerfunktion so, dass eine Mindestfunktionalität gewährleistet bleibt.

Check-Point-Roll-Back-Recovery [2]



- Nur zwei parallel ausgeführte Berechnungen.
- An einprogrammierten Kontrollpunkten im Programm werden die Bearbeitungszustände[7] verglichen.

[7] Werte der Variablen, Register, ...

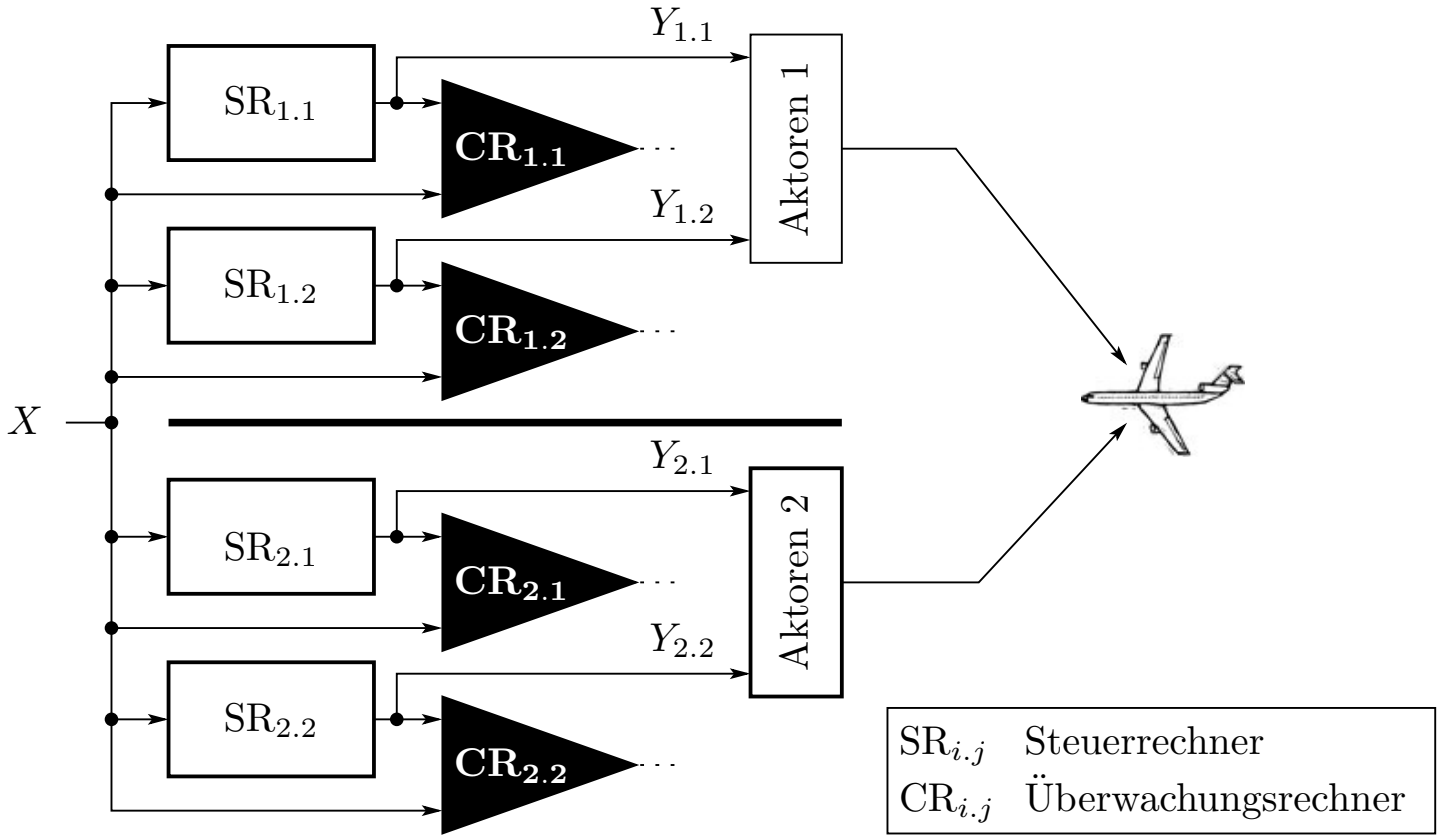
- Bei Übereinstimmung Speicherung des Bearbeitungszustands in einem geschützten Speicher.
- Bei Abweichung, Laden der letzten Sicherheitskopie und Berechnungswiederholung (Roll-Back Recovery).
- Nach Roll-Back Recovery am nächsten Kontrollpunkt wieder Vergleich.
- Wenn Übereinstimmung, diesen als gesicherten Zustand speichern, sonst Abbruch.

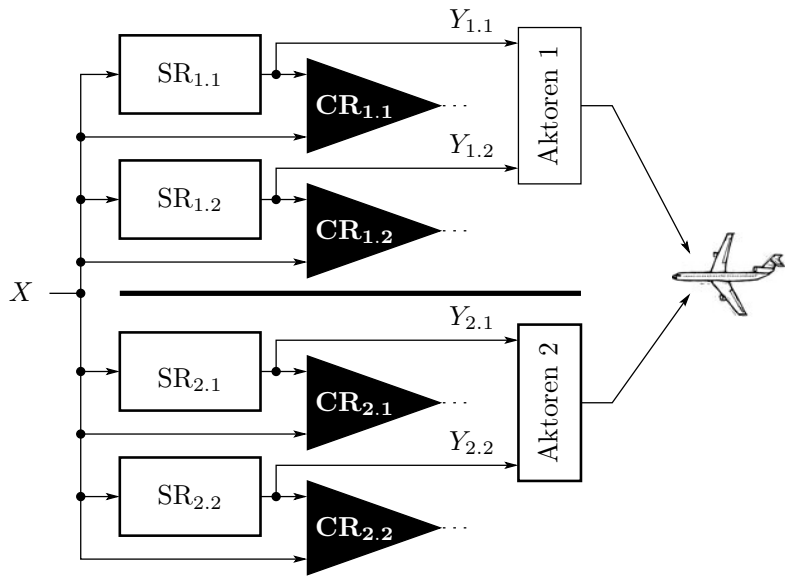
Sequoia-System [1]:

- Berechnung auf zwei Prozessoren mit eigenem Write-Back-Cache.
- Vergleich in jedem Takt.
- Zustands-Backup bei Ereignissen wie Stack-Überlauf und Prozesswechsel.
- Hauptspeicher hat die Funktion des stabilen Speichers.

Flugsteuersystem Airbus A3XX [4]

Hochsicherheitskritische Anwendungen müssen möglichst alle Fehlfunktionen, auch solche durch nicht erkannte Entwurfsfehler, nicht erkannte Fertigungsfehler und Ausfälle tolerieren.





- Zwei identische Systeme mit allen Sensoren, Aktoren und zwei Rechnerpaaren.
- Jedes Rechnerpaar besteht aus einem Steuerrechner $SR_{i.j}$, der die Aktoren ansteuert, und einem Überwachungsrechner $CR_{i.j}$.
- Normalzustand Rechner $SR_{1.1}$ steuert und $CR_{1.1}$ überwacht. Zweites Rechnerpaar Stand-By. System 2 abgeschaltet.
- Bei Ausfall übernimmt Rechnerpaar 1 von Rechnerpaar 2. Bei Komplett-, Sensor- oder Aktorausfällen übernimmt System 2 von System 1.

Diversität: Rechner unterschiedlicher Hersteller, getrennte Software-Entwicklung nach Spezifikationen, die unabhängig von einer gemeinsamen Basisspezifikation abgeleitet wurden.

RAID und Backup

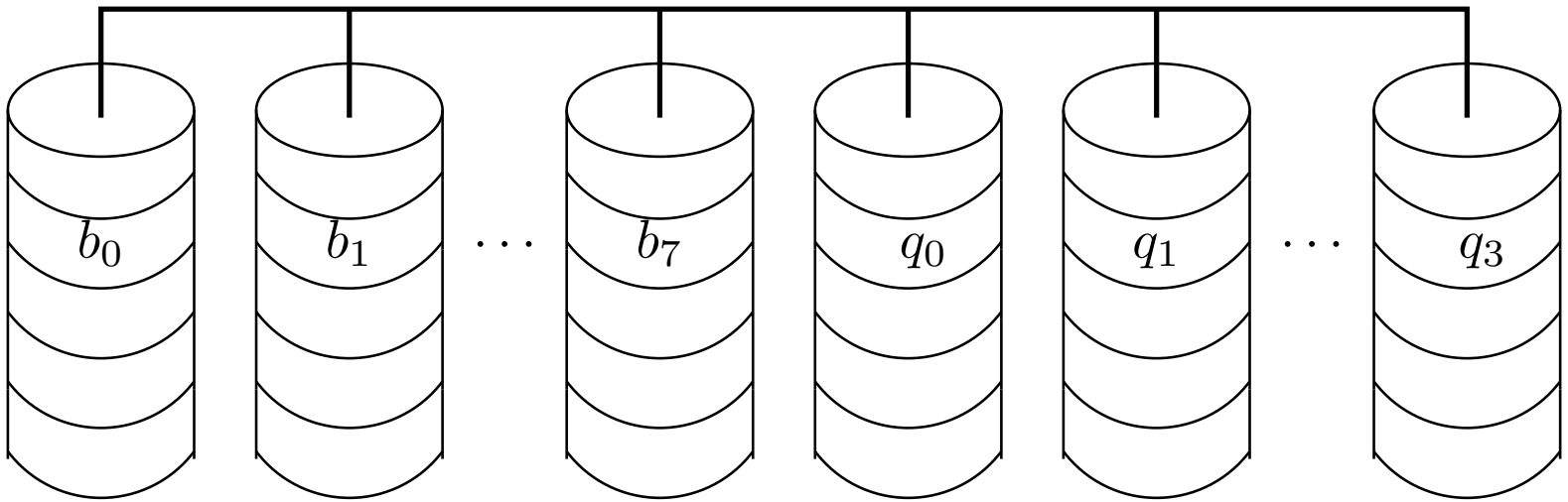
RAID, RAID Level 1

RAID – **R**edundant **A**rray of **I**ndependent **D**isks. Fehlertoleranz gegenüber Ausfall (einer) Platte.

RAID Level 1: Zwei gespiegelte Festplatten. Die Daten werden versetzt geschrieben, so dass das Schreiben etwas länger dauert, aber mit nahe doppelter Geschwindigkeit gelesen werden kann. Bei Ausfall einer Platte existieren alle Daten noch auf der zweiten Festplatte. Die Lesegeschwindigkeit reduziert sich, aber das System bleibt funktionsfähig.

RAID Level 2

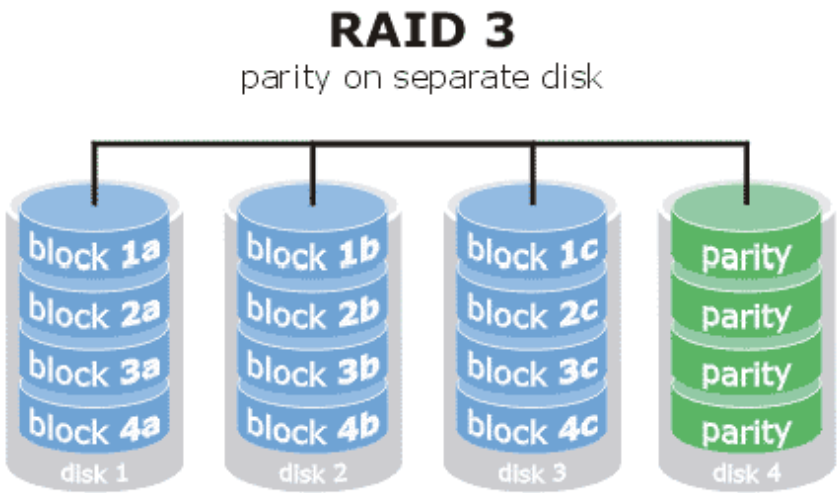
Bei RAID Level 2 werden die Daten in einem 1-Bit-korrigierenden Hamming-Code gespeichert, und zwar jedes der w Daten- und der r Kontrollbits auf einer anderen Platte, z.B. $w = 8$ Datenbit- und $r = 4$ Kontrollbitplatten. Im Vergleich zu RAID 1 werden statt der doppelten Plattenanzahl nur 50% mehr Platten benötigt.



Gilt als aufwändig und ungebräuchlich.

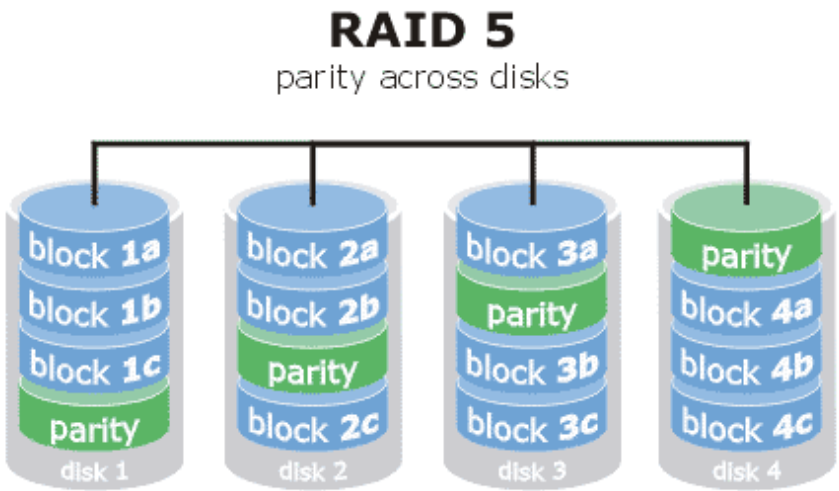
RAID Level 3

Auf einer Extra-Platte wird bitweise die Querparitätsbit der anderen Platten gebildet. Zusätzlich werden auf jeder Platte die Längsparitätsbits (oder Prüfkennzeichen) gespeichert. Mit einer zusätzlichen Blockparität ist eine 1-Bit-Fehlerkorrektur nach dem Prinzip der Kreuzparität möglich. Gleichfalls Tollerierung eines einzelnen Plattenausfalls.



RAID Level 5

Fehlertoleranz ähnlich wie Level 3, nur dass Datenzugriffe durch unabhängige Lese- und Schreiboperationen (statt ausschließlich parallel) erlaubt sind. Größere schreibbare Datenblöcke. Die Paritätsinformation verteilt sich auf alle Platten. Gleichfalls tolerant gegenüber einem einzelnen Plattenausfall. Am häufigsten genutzte RAID-Struktur.



RAID ist kein Backup-Ersatz

Backup: Sicherungskopien von (wichtigen / aufwändig neu zu erzeugenden) Daten. Typisch:

- Tägliche automatische Erstellung durch das Rechenzentrum.
- Nur Änderungen zum letzten Backup.
- Aufbewahrung mehrerer Versionen an einem getrennten Ort.

Wird benötigt zur Datenwiederherstellung nach

- gleichzeitiger Zerstörung aller Platten z.B. durch Überspannungsspitzen, Feuer, ...
- Diebstahl von Datenträgern,
- einem versehentlichen Löschen, das erst nach Stunden oder Wochen bemerkt wird.

Literatur

3. Literatur

[1] P.A. Bernstein.
Sequoia: a fault-tolerant tightly coupled multiprocessor for transaction processing.
Computer, 21(2):37–45, 1988.

[2] D. K. Pradhan, D. D. Sharma, and N. H Vaidya.
Roll-forward checkpointing schemes.
In *Lecture Notes in Computer Science 744*, pages 93–116. Springer Verlag, 1994.

[3] Marvin Rausand and Arnljot Hsyland.
Systems Reliability Theory, Models, Statistical Methods, and Applications.
Wiley-Interscience, 2004.

[4] Pascal Traverse.
Dependability of digital computers on board airplanes.
Dependable Computing for critical applications, 4:134–152, 1991.