



Test und Verlässlichkeit 3: Themenspezifische Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung

Prof. G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (TV_F3.pdf)
10. November 2024



Inhalt Foliensatz 3

3.1 Wahrscheinlichkeit

3.1.1 Definition und Abschätzung

—— Vorlesung 8 (3.9) ——

3.1.2 Verkettete Ereignisse

3.1.3 Zählwertgraphen

3.1.4 Fehlerbäume

3.1.5 Markov-Ketten

—— Vorlesung 9 (3.40) ——

3.2 Fehlernachweis

3.2.1 Nachweis und Zuverlässigkeit

3.2.2 Service mit Gedächtnis

3.2.3 Fehler und Modellfehler

3.2.4 Operationsprofil

—— Vorlesung 10 (3.100) ——

3.3 Fehlerbeseitigung

3.3.1 Ersatz

3.3.2 Reparatur

3.3.3 Reifeprozesse

3.4 Fehlerentstehung



Verlässlichkeit und alle ihre Teilaspekte werden in der Vorlesung durch Zählwerte bzw. Häufigkeiten positiver und negativer Erfahrungen beschrieben. Für große Zählwerte streben Häufigkeiten gegen Wahrscheinlichkeiten.

Für die Arbeit mit Wahrscheinlichkeiten bietet die Mathematik einen großen Werkzeugkasten, von dem wir auch schon einiges genutzt haben.

Wir unseren eigen Werkzeugkasten.



Wahrscheinlichkeit



Definition, Abschätzung



Wahrscheinlichkeit

Wird ein Zufallsexperiment unter konstanten Versuchsbedingungen n -mal wiederholt, so strebt die relative Häufigkeit $\#A/n$, dass ein Ereignis A eintritt, gegen die Eintrittswahrscheinlichkeit:

$$\mathbb{P}[A] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\#A}{n} \quad (3.1)$$

Viele der bisher eingeführten Kenngrößen streben für große Zählwerte gegen Wahrscheinlichkeiten:

- Anteil der erbrachten Service-Leistungen η_{DS}
- Fehlfunktionsrate ζ ,
- Fehlerabdeckung FC , ...

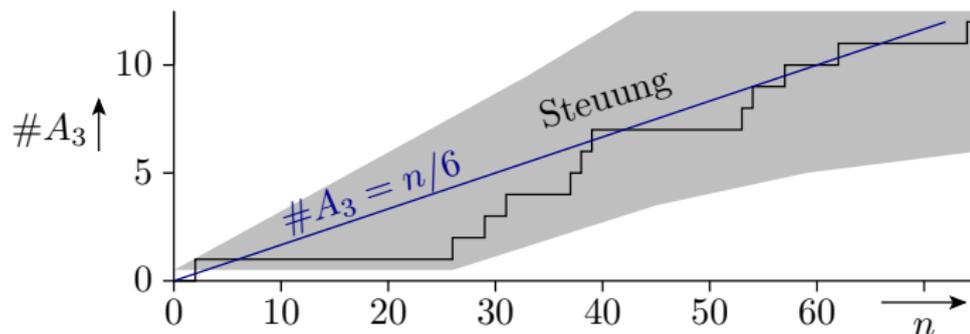
Die Wahrscheinlichkeit ist die beste Vorhersage für die zu erwartende relative Häufigkeit. Deshalb hier eine themenspezifische Einführung.

Anschließend speziell Fehlernachweis, Fehlerbeseitigung und Fehlerentstehung.

$\mathbb{P}[A]$	Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignis A .
$\#A$	Anzahl, wie oft Ereignis A eingetreten ist.

Beispiel »Würfel einer 3«

- Mögliche Ergebnisse: 1, 2, ..., 6, günstiges Ergebnis: 3
- Anzahl der Versuche: n



$$\mathbb{P}[A_3] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\#A_3}{n} = \frac{1}{6}$$

Satz 1

Wenn die möglichen Ereignisse eines Zufallsexperiments gleichmäßig sind, ist die Wahrscheinlichkeit der Anteil der günstigen Ereignisse.



Verkettete Ereignisse



Verkettete Ereignisse

Komplexe Ereignisse lassen sich oft in logische und andere Verknüpfungen einfacher zu untersuchender Ereignisse aufspalten. Im nachfolgenden wird bei jedem Experiment zweimal gewürfelt (Ereignisse A und B , Wertebereich jeweils $\{1, 2, \dots, 6\}$). Daraus werden mit Vergleichsoperatoren die zweiwertigen Ereignisse C und D gebildet und diese einmal UND- und einmal ODER verknüpft und gezählt.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	...	20	...	40
A	6	1	5	4	1	1	2	2	4	6	4	3	1		6		5
B	6	5	6	2	1	3	3	6	4	5	1	3	1		4		3
$C = (A > 3)$	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0		1		1
$D = (B < 3)$	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1		0		0
$E = (C \wedge D)$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0		0
$F = (C \vee D)$	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1		1		1
$\#C$	1	1	2	3	3	3	3	3	4	5	6	6	6		11		21
$\#D$	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	3	3	4		6		9
$\#E$	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2		5		6
$\#F$	1	1	2	3	4	4	4	4	5	6	7	7	8		13		24



Abschätzung der relativen Häufigkeiten

Ereignis	rel. Häufigkeit	Wahrscheinlichkeit
$C = (A > 3)$	$21/40 = 53\%$	$3/6 = 50\%$
$D = (B < 3)$	$9/40 = 23\%$	$2/6 = 33\%$
$E = (C \wedge D)$	$6/40 = 15\%$	$6/36 = 17\%$
$F = (C \vee D)$	$24/40 = 60\%$	$24/36 = 67\%$

Zu erwartende relative Häufigkeiten lassen sich sowohl über Zählwerte als auch über den Anteil der günstigen Ereignisse abschätzen. Von den 6 möglichen gleichwahrscheinlichen Würfelergebnissen sind für $C = (A > 2)$ drei und $D = (A < 3)$ 2 günstig. Die verketteten Ereignisse E und F haben $6^2 = 36$ gleichwahrscheinliche mögliche Ergebnisse, von denen für $E = C \wedge D$ sechs und für $F = C \vee D$ 24 günstig sind.

Die Abschätzung über Wahrscheinlichkeitsbeziehungen erscheint im Beispiel deutlich einfacher und Zählversuche mit nur 40 Wiederholung haben Schätzfehlerfehler von im Beispiel $\approx 10\%$ des Wahrscheinlichkeitswerts (siehe später Abschn. 4.2.7).



Das Konzept »bedingte Wahrscheinlichkeit«

Bei einer bedingten Wahrscheinlichkeit werden nur die Versuche und Ereignisse gezählt, die eine Bedingung erfüllen*, im. Beispiel:

$$E = C \vee D \text{ unter der Bedingung } C \wedge D = 0.$$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ	Σ
C	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	11	7
D	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	6	2
$C \vee D$	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	13	9

■ nicht mitgezählte Ereignisse bzw. Summe ohne diese Ereignisse

Sowohl die Anzahl der gezählten Versuche als auch die günstigen Ereignisse verringern sich um die vier nicht mitzuzählenden Ereignisse mit $C \wedge D = 1$.

Alle Zusatzbedingungen, die die Zählung beeinflussen, sind bei Wahrscheinlichkeitsabschätzungen zu berücksichtigen. Ob die nicht mitzuzählenden Ereignisse auftreten können oder nicht, ist dafür unwichtig

Regeln für bedingte Wahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit, dass A unter Bedingung B eintritt:

$$\mathbb{P}[A|B] = \frac{\mathbb{P}[A \wedge B]}{\mathbb{P}[B]} \quad (3.2)$$

Wahrscheinlichkeit, dass B unter Bedingung A eintritt:

$$\mathbb{P}[B|A] = \frac{\mathbb{P}[A \wedge B]}{\mathbb{P}[A]}$$

Satz von Bayes:

$$\mathbb{P}[B|A] = \mathbb{P}[A|B] \cdot \frac{\mathbb{P}[B]}{\mathbb{P}[A]} \quad (3.3)$$

A, B	Ereignisse.
$\mathbb{P}[A B]$	Wahrscheinlichkeit von Ereignis A unter der Bedingung B .
$\mathbb{P}[A \wedge B]$	Wahrscheinlichkeit von Ereignis A und B .
$\mathbb{P}[A \vee B]$	Wahrscheinlichkeit von Ereignis A oder B .

Beispiel 3.1: Fehlklassifizierung Corona-Test

- Zufallsvariable A Person infiziert: $\mathbb{P}[A] = 10^{-4}$
- Zufallsvariable B Test positiv: $\mathbb{P}[B] = 10^{-2}$
- Wahrscheinlichkeit Test positiv, wenn eine Person infiziert ist:
 $\mathbb{P}[B|A] = 99\%$

Mit welcher Wahrscheinlichkeit ist eine Person infiziert, wenn der Test positiv ist?

$$\mathbb{P}[A] = 10^{-4}, \mathbb{P}[B] = 10^{-2}, \mathbb{P}[B|A] = 99\%, \text{ gesucht } \mathbb{P}[A|B]$$



$\mathbb{P}[A] = 10^{-4}$, $\mathbb{P}[B] = 10^{-2}$, $\mathbb{P}[B|A] = 99\%$, gesucht $\mathbb{P}[A|B]$

Die Wahrscheinlichkeit $\mathbb{P}(A|B)$, dass eine Person infiziert, wenn der Test positiv ist:

$$\mathbb{P}[A|B] = \mathbb{P}[B|A] \cdot \frac{\mathbb{P}[A]}{\mathbb{P}[B]} = 99\% \cdot \frac{10^{-4}}{10^{-2}} \approx 1\%$$

Wenn der Test positiv ist, dann ist das mit den gegebenen Wahrscheinlichkeiten in 99% der Fälle ein Fehllarm.



$\mathbb{P}[A] = 10^{-4}$, $\mathbb{P}[B] = 10^{-2}$, $\mathbb{P}[B|A] = 99\%$, gesucht $\mathbb{P}[B|A]$

Kontrolle mit Beispielwerten:

		Test positiv	Test negativ	Summe	
infizierte Personen	$0,99\%$	9.900	100	10.000	10^{-4}
nicht infiz. Pers.	$\mathbb{P}(A B)$	≈ 1 Mio.	≈ 99 Mio.	99,99 Mio.	$\mathbb{P}(A)$
Summe		1 Mio.	99 Mio.	100 Mio.	
		1%	$\mathbb{P}(B)$		

Person infiziert:

$$\mathbb{P}[A] = \frac{10.000}{100 \text{ Mio.}} \approx 10^{-4}$$

Test positiv:

$$\mathbb{P}[B] = \frac{1 \text{ Mio.}}{100 \text{ Mio.}} = 0,99\%$$

Test positiv, wenn Person infiziert:

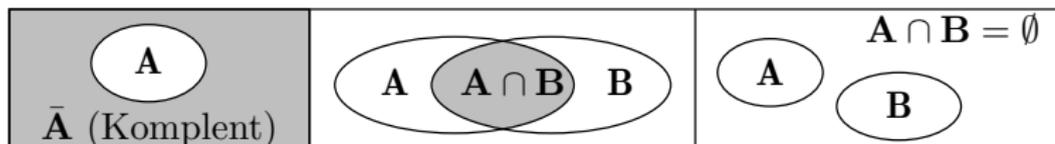
$$\mathbb{P}[B|A] = \frac{9.900}{10.000} = 99\%$$

Person infiziert, wenn Test positiv:

$$\mathbb{P}[A|B] = \frac{9.900}{1 \text{ Mio.}} = 0,99\% \checkmark$$



NOT / UND / ODER von Ereignissen



- NOT (Nichteintrittswahrscheinlichkeit):

$$\mathbb{P}[\bar{A}] = 1 - \mathbb{P}[A] \quad (3.4)$$

- UND (gleichzeitiges Eintreten der Ereignisse A und B)
 - stochastische Unabhängigkeit:

$$\mathbb{P}[A|B] = \mathbb{P}(A) = \frac{\mathbb{P}[A \cap B]}{\mathbb{P}[B]}$$

$$\mathbb{P}[A \cap B] = \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B] \quad (3.5)$$

- sich ausschließende Ereignisse:

$$\mathbb{P}[A \cap B] = 0 \quad (3.6)$$

A, B	Ereignismengen.
\cup, \emptyset	Vereinigungsmenge, leere Menge.
A, B	Ereignisse.

ODER (alternatives Eintreten von A und B):

$$\mathbb{P}[A \vee B] = \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B] - \mathbb{P}[A \wedge B]$$

- stochastische Unabhängigkeit:

$$\mathbb{P}[A \wedge B] = \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B]$$

$$\mathbb{P}(A \vee B) = \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B] - \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B] \quad (3.7)$$

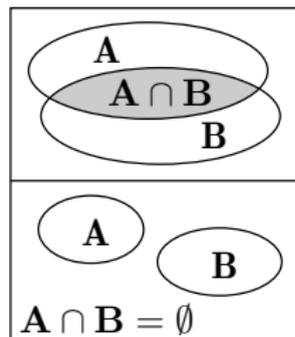
- sich ausschließende Ereignisse:

$$\mathbb{P}[A \wedge B] = 0$$

$$\mathbb{P}[A \vee B] = \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B] \quad (3.8)$$

A, B Ereignisse.
 $\mathbb{P}[\dots]$ Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses ...

Vereinigungsmenge





Abhängig, aber nicht ausschließend

Für abhängige, sich nicht ausschließende Ereignisse gibt es keine einfache Abschätzung.

Workaround:

- Annäherung des Sachverhalts durch logischen Ausdrücke unabhängige oder sich ausschließender Ereignisse.
- Umformung der logischen Ausdruck in UND und ODER unabhängiger oder sich ausschließender Terme, z.B.:

$$A \oplus B = \underbrace{(A \wedge \bar{B})}_{\text{unabhängig}} \vee \underbrace{(\bar{A} \wedge B)}_{\text{unabhängig}}$$

sich gegenseitig ausschließend

$$\mathbb{P}[A \oplus B] = \mathbb{P}[A] \cdot (1 - \mathbb{P}[B]) + (1 - \mathbb{P}[A]) \cdot \mathbb{P}[B]$$



Beispiel 3.2: Unabhängiger Fehlernachweis

Ein System enthält drei unabhängig nachweisbare Fehler mit den Nachweiswahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 5\%$ und $p_3 = 20\%$.

Hilfestellung:

- Definition von Ereignissen F_i für Fehler i nachweisbar.
- Definition von Ereignissen A , B , C und D für die günstigen Ereignisse je Aufgabenteil und Beschreibung durch logische Gleichungen.
- Umformung in UND unabhängiger und ODER sich ausschließender Ereignisse. Nutzung Gl. (3.4), (3.5) und (3.8).

- Mit welcher Wahrscheinlichkeit werden alle Fehler nachgewiesen?*
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird kein Fehler nachgewiesen?*
- Mit welcher Wahrsch. wird mindestens ein Fehler nachgewiesen?*
- Mit welcher Wahrsch. werden genau zwei Fehler nachgewiesen?*

$\mathbb{P}[F_i]$ Wahrscheinlichkeit, dass Fehler i nachweisbar ist.



Ein System enthält drei unabhängig nachweisbare Fehler mit den Nachweiswahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 5\%$ und $p_3 = 20\%$.

a) *Mit welcher Wahrscheinlichkeit werden alle Fehler nachgewiesen?*

Alle Fehler werden nachgewiesen, wenn der erste und der zweite und der dritte Fehler nachgewiesen wird. UND unabhängiger Ereignisse:

$$\mathbb{P}[F_i] = p_i$$

$$A = F_1 \wedge F_2 \wedge F_3$$

$$\mathbb{P}[A] = \mathbb{P}[F_1] \cdot \mathbb{P}[F_2] \cdot \mathbb{P}[F_3]$$

$$= p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = 10\% \cdot 5\% \cdot 20\% = 0,1\%$$

$\mathbb{P}[A]$

Wahrscheinlichkeit, dass alle Fehler nachgewiesen werden.



Ein System enthält drei unabhängig nachweisbare Fehler mit den Nachweiswahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 5\%$ und $p_3 = 20\%$.

b) *Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird kein Fehler nachgewiesen?*

Kein Fehler wird nachgewiesen, wenn nicht der erste oder der zweite oder der dritte Fehler nachgewiesen wird. Umformung nach der demorganschen Regel in UND unabhängiger Ereignisse:

$$\begin{aligned} B &= \overline{F_1 \vee F_2 \vee F_3} = \bar{F}_1 \wedge \bar{F}_2 \wedge \bar{F}_3 \\ \mathbb{P}[B] &= (1 - \mathbb{P}[F_1]) \cdot (1 - \mathbb{P}[F_2]) \cdot (1 - \mathbb{P}[F_3]) \\ &= (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) = 90\% \cdot 95\% \cdot 80\% = 68,4\% \end{aligned}$$

$\mathbb{P}[B]$ Wahrscheinlichkeit, dass kein Fehler nachgewiesen wird.



Ein System enthält drei unabhängig nachweisbare Fehler mit den Nachweiswahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 5\%$ und $p_3 = 20\%$.

c) *Mit welcher Wahrsch. wird mindestens ein Fehler nachgewiesen?*

Mindestens ein Fehler wird nachgewiesen, wenn nicht kein Fehler nachweisbar ist:

$$\begin{aligned} C &= \bar{B} \\ \mathbb{P}[C] &= 1 - \mathbb{P}[B] = 1 - 68,4\% = 31,6\% \end{aligned}$$

$\mathbb{P}[C]$ Wahrscheinlichkeit, dass mindestes ein Fehler nachgewiesen wird.



Ein System enthält drei unabhängig nachweisbare Fehler mit den Nachweiswahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 5\%$ und $p_3 = 20\%$.

d) *Mit welcher Wahrsch. werden genau zwei Fehler nachgewiesen?*

Genau 2 Fehler werden nachgewiesen, wenn

- die ersten beiden und der dritte nicht,
- die zweiten beiden und der erste nicht oder
- der erste und der dritte, aber nicht der zweite

nachgewiesen werden. Alle UND-verknüpften Ereignisse sind unabhängig und die ODER-verknüpften Terme schließen sich gegenseitig aus:

$$\begin{aligned} D &= (F_1 \wedge F_2 \wedge \bar{F}_3) \vee (\bar{F}_1 \wedge F_2 \wedge F_3) \vee (F_1 \wedge \bar{F}_2 \wedge F_3) \\ \mathbb{P}[D] &= p_1 \cdot p_2 \cdot (1 - p_3) + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot p_3 + p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \\ &= 10\% \cdot 5\% \cdot 80\% + 90\% \cdot 5\% \cdot 20\% + 10\% \cdot 95\% \cdot 20\% = 3,2\% \end{aligned}$$

$\mathbb{P}[D]$ **Wahrscheinlichkeit, dass genau zwei Fehler nachgewiesen werden.**



Beispiel 3.3: Abhängiger Fehlernachweis

Die Nachweiswahrscheinlichkeit für Fehler 1 beträgt unabhängig vom Nachweis von Fehler 2 $p_1 = 10\%$. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für Fehler 2 beträgt, wenn Fehler 1 nachgewiesen, $p_2 = 20\%$ und sonst 0, d.h. der Nachweis von Fehler 2 impliziert den Nachweis von Fehler 1.

$p_1 = 10\%$, $p_2 = 20\%$, wenn Fehler 1 nachweisbar, sonst 0

Wie groß sind die Wahrscheinlichkeiten, dass 0, 1 oder 2 Fehler nachweisbar sind?

Hilfestellung: Definition von Ereignissen F_i für Fehler i nachweisbar und E_i für i Fehler nachweisbar.



$p_1 = 10\%$, $p_2 = 20\%$, wenn Fehler 1 nachweisbar, sonst 0

Wie groß sind die Wahrscheinlichkeiten, dass 0, 1 oder 2 Fehler nachweisbar sind?

Kein Fehler ist nachweisbar, wenn Fehler 1 nicht nachweisbar ist.
Nachweis Fehler 2 und nicht Fehler 1 ausgeschlossen:

$$\begin{aligned}E_0 &= \bar{F}_1 \\ \mathbb{P}(E_0) &= 1 - \mathbb{P}[F_1] = 1 - p_1 = 1 - 10\% = 90\%\end{aligned}$$

Ein Fehler ist nachweisbar, wenn der erste Fehler nachweisbar ist und der zweite nicht:

$$\begin{aligned}E_1 &= F_1 \wedge \bar{F}_2 \\ \mathbb{P}(E_1) &= p_1 \cdot (1 - p_2) = 10\% \cdot 80\% = 8\%\end{aligned}$$



$p_1 = 10\%$, $p_2 = 20\%$, wenn Fehler 1 nachweisbar, sonst 0

Wie groß sind die Wahrscheinlichkeiten, dass 0, 1 oder 2 Fehler nachweisbar sind?

Zwei Fehler sind nachweisbar, wenn beide Fehler nachweisbar sind:

$$\begin{aligned} E_2 &= F_1 \wedge F_2 \\ \mathbb{P}(E_2) &= p_1 \cdot p_2 = 10\% \cdot 20\% = 2\% \end{aligned}$$

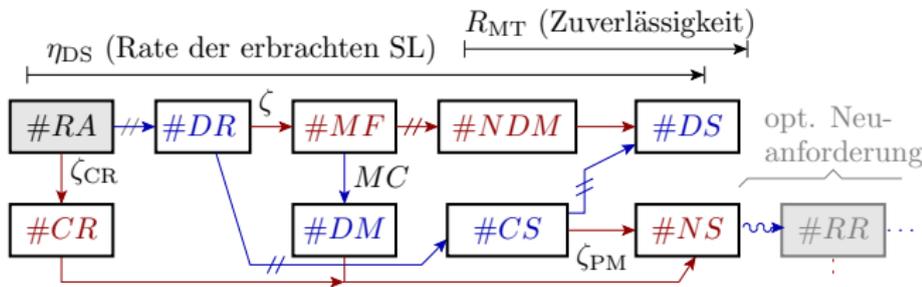
Probe: Die Summe der Wahrscheinlichkeiten der drei möglichen Ergebnisse muss 1 sein:

$$\mathbb{P}[E_0] + \mathbb{P}[E_1] + \mathbb{P}[E_2] = 90\% + 8\% + 2\% = 100\% \checkmark$$



CVA-Graph

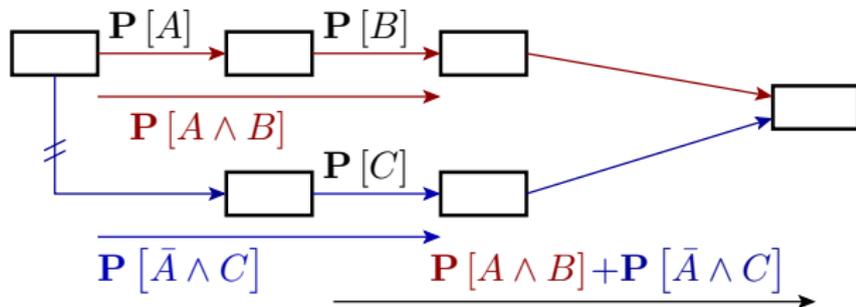
Beispiel für einen Zählwertzuordnungsgraphen



- Fehlfunktionen (MF) werden mit Häufigkeit MC erkannt (DM) und sonst nicht erkannt (NDM).
- Korrekte Service-Leistungen (CS) werden mit Häufigkeit ζ_{PM} wie Fehlfunktionen behandelt.
- Ohne Tolerierung werden Abstürze (CR), erkannte Fehlfunktionen (DM) und Phantom-MF nicht erbrachte Leistung (NS).

ζ_{CR}, ζ	Absturzrate, Fehlfunktionsrate.
MC, ζ_{PM}	Fehlfunktionsabdeckung, Phantomfehlfunktionsrate.
RA, CR	Akzeptierte Anforderung, Absturz.
DR, MF	Erbrachtes Ergebnis, Fehlfunktion.
DM, NDM	Erkannte Fehlfunktion, nicht erkannte Fehlfunktion.

Konstruktions- und Rechenregeln



Gerichteter Graph mit Zählwerten als Knoten und dem zu klassifizierenden Zählwert als Wurzel. Die Zuordnungshäufigkeiten an den Kanten sind Wahrscheinlichkeiten von Zuordnungsereignissen.

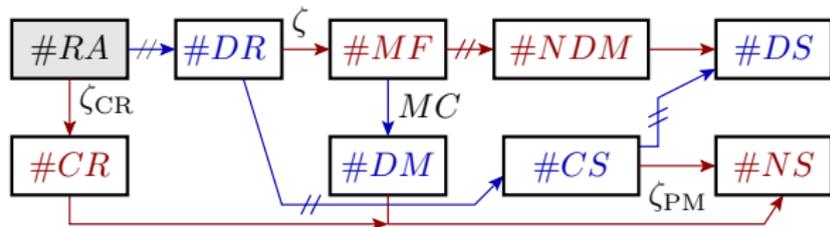
Der Übergang über mehrere Kanten beschreibt ein »UND« von Zuordnungsereignissen. Bei Unabhängigkeit Wahrscheinlichkeitsprodukt:

$$(3.5) \quad \mathbb{P}[A \wedge B] = \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B]$$

Bei Zusammenfassung von Pfaden »ODER«. Bei Ausschluss Wahrscheinlichkeitssumme nach

$$(3.8) \quad \mathbb{P}[A \vee B] = \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B]$$

Für das Beispiel



$$\eta_{DS} = \frac{\#DS}{\#RA} \Big|_{ACR} = (1 - \zeta_{CR}) \cdot \underbrace{\left((1 - \zeta) \cdot (1 - \zeta_{PM}) + \zeta \cdot (1 - MC) \right)}_{\text{gegenseitiger Ausschluss}}$$

Zuordnungsereignisse, für die Unabhängigkeit unterstellt wird:

- Absturz (ζ_{CR}), Fehlfunktionsentstehung (ζ),
- Fehlernachweis (MC), Phantomfehler (ζ_{Phan}).

Zusammenführung mit gegenseitigem Ausschluss:

- erkannte Fehlfunktionen (DM) und Phantom-Fehlfunktionen zu nicht erbrachten Leistungen (NS) und
- sonstige korrekte Leistungen und nicht erkannte Fehlfunktionen (NDM) zu erbrachten Leistungen (DS).



Fehlerbäume

Fehlerbaumanalyse (FTA – fault tree analysis)

Graphische Darstellung für logische Ereignisbeziehungen (UND, ODER, Nicht*) zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Gefahrensituationen, Ausfälle, Fehlfunktionen, ...

Unterschiedene Ereignistypen:



B_i Basisereignis mit bekannter oder auf anderem Wege abgeschätzter Eintrittswahrscheinlichkeit



U_i unerschlossenes Ereignis, über das nur unzureichende Informationen verfügbar sind



H_i Hausereignis im gewöhnlichen Betrieb, das mit anderen zusammen Probleme verursachen kann.

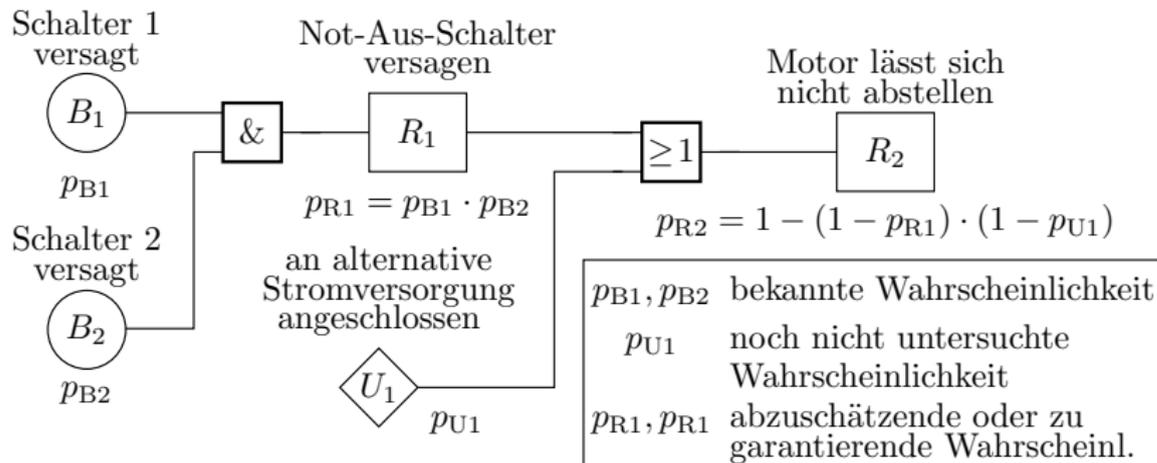


R_i resultierendes Ereignis, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit aus denen von \circ , \diamond oder \square folgt.

*

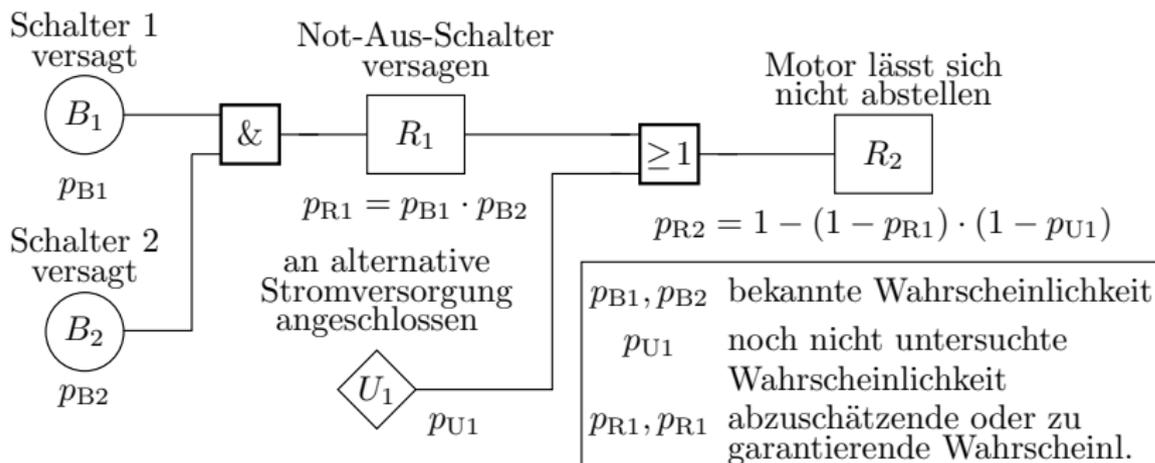
Abweichend von der klassischen Fehlerbaumdarstellung verwenden wir für logische UND-, ODER- und NICHT die Schaltsymbole aus der Digitaltechnik.

Beispiel 3.4: Motor lässt sich nicht abstellen



Ist $p_{R2} \leq 10^{-6}$ erzielbar mit $p_{B1} = p_{B2} = 10^{-3}$?

- B_i Basisereignis mit bekannter oder auf anderem Weg geschätzter Wahrscheinlichkeit.
- R_i Resultierendes Ereignis, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit geschätzt werden soll.
- U_i Unerschlossenes Ereignis, über das unzureichende Information vorliegt.



Ist $p_{R2} \leq 10^{-6}$ erzielbar mit $p_{B1} = p_{B2} = 10^{-3}$?

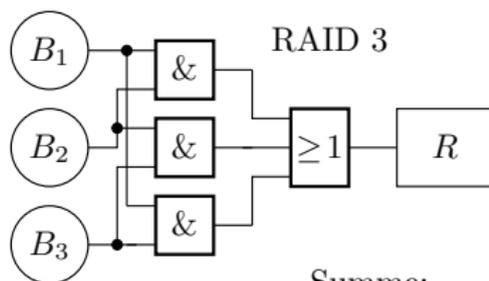
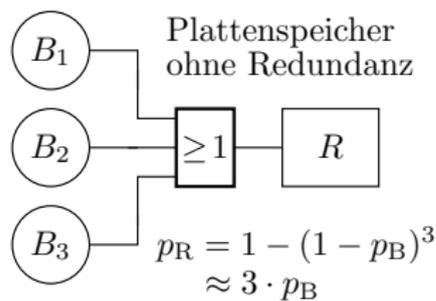
$$p_{R1} = p_{B1} \cdot p_{B2} = 10^{-6}$$

$$p_{R2} = 1 - (1 - p_{R1}) \cdot (1 - p_{U1}) \geq 10^{-6}$$

Es gibt nur die Lösung mit $p_{U1} = 0$. Lässt sich das Risiko einer alternativen Stromversorgung ausschließen oder muss die Gesamtlösung nachgebessert werden?

Datensicherheitsverbesserung durch ein RAID

Ein redundanzfreies Speichersystem aus drei Festplatten verliert Daten, wenn eine der drei Festplatten ausfällt, ein RAID 3 erst, wenn gleichzeitig zwei Platten ausfallen.



- B_i Ausfall Platte i
- R Datenverlust (result. Ereignis)
- p_B Ausfallwahrscheinlichkeit je Zeitschritt für eine Festplatte
- p_R Wahrscheinlichkeit Datenverlust je Zeitschritt Gesamtsystem

B_3	B_2	B_1	R
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Summe:

$$p_R = 3 \cdot p_B^2 - 2 \cdot p_B^3$$

$$p_B^2 \cdot (1 - p_B)$$

$$p_B^2 \cdot (1 - p_B)$$

$$p_B^2 \cdot (1 - p_B)$$

$$p_B^3$$

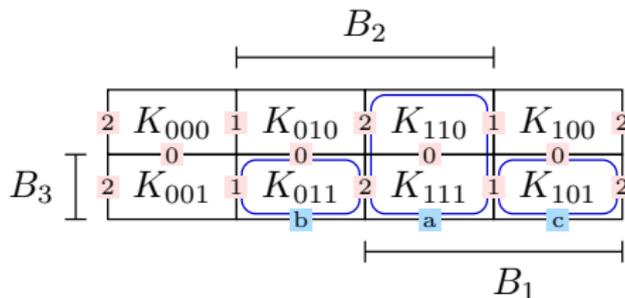
Rekonvergente Auffächerungen

Wenn sich der Bedingungsfluss verzweigt und wieder zusammentrifft, werden zum Teil abhängige Ereignisse verknüpft. Im Beispiel

$$R = B_1 B_2 \vee B_2 B_3 \vee B_1 B_3$$

haben die ODER-verknüpften UND-Terme jeweils eine gemeinsame Ereignisvariable. Für Wahrscheinlichkeitsabschätzung ungeeignet.

Umstellung in Terme sich ausschließender Ereignisse:



Überdeckungsfreie
Konjunktionen:

$$a: B_1 B_2$$

$$b: \bar{B}_1 B_2 B_3$$

$$c: B_1 \bar{B}_2 B_3$$

$$R = B_1 B_2 \vee \bar{B}_1 B_2 B_3 \vee B_1 \bar{B}_2 B_3$$

$$p_R = p_B^2 + p_B^2 \cdot (1 - p_B) + p_B^2 \cdot (1 - p_B) = 3 \cdot p_B^2 - 2 \cdot p_B^3$$



Geschichte der Fehlerbaumanalyse

- Einführung 1960: Abschluss sicherheitsbewertung von Interkontinentalraketen vom Typ LGM-30 Minuteman.
- Folgejahre: Auch für Sicherheitsbewertung kommerzieller Flugzeuge.
- Ab 70er bis 80er Jahre: Sicherheitsbewertung Atomkraftwerke.
- Später auch Automobilindustrie und deren Zulieferer.

Beim Einsatz zur Sicherheitsbewertung

- sind die sicherheitsrelevanten Ereignisse,
- die Basisereignisse und
- deren Wahrscheinlichkeiten

zuvor auf andere Weise abzuschätzen: Vorexperimente, Expertenbefragungen, Ursache-Wirkungs- (Ishikawa-) Diagramme, ...

Schätzfehler: unberücksichtigte Schadensereignisse, Einflüsse, ...
Für Interkontinentalraketen mit Atomsprenghköpfen nicht sehr vertrauenserweckend.

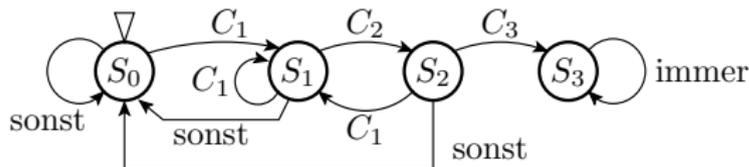


Markov-Ketten

Markov-Ketten

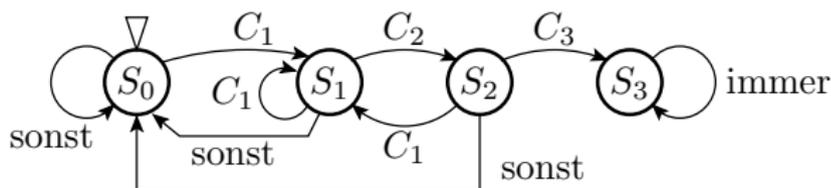
Eine Markov-Kette* (MC) ist ein stochastisches Modell für Ereignisfolgen, deren Verarbeitung sich durch einen endlichen Automaten beschreiben lässt.

Zustandsautomat Fehlernachweis mit Eingabefolge $C_1C_2C_3$:

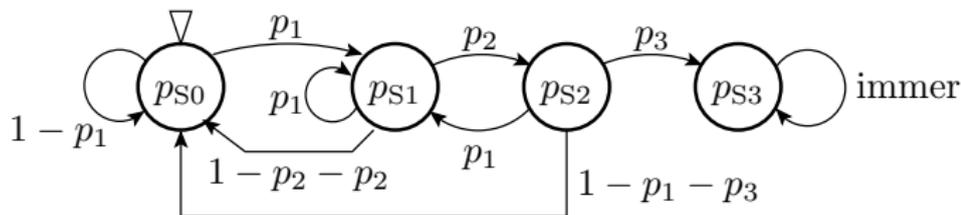


Start im Zustand S_0 »keine richtige Eingabe« und Verbleib nach drei richtigen Eingaben im Zustand S_3 »Fehler nachgewiesen«.

- S_i Zustand i der Markov-Kette (State i of Markov chain).
- C_j Übergangsbedingung j (Transitional condition j).
- * Andrej Andreevič Markov, russischer Mathematiker, 1856-1922.



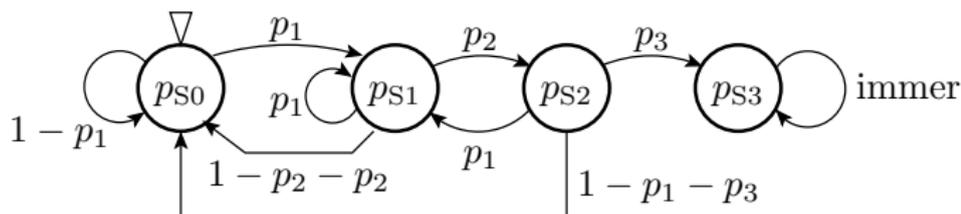
In der Markov-Kette werden Übergangsbedingungen durch die Übergangswahrscheinlichkeiten und Zustände durch Zustandswahrscheinlichkeiten ersetzt.



Zu Beginn hat der Startzustand S_0 die Wahrscheinlichkeit $p_{S_0} = 1$ und die anderen Zustände haben die Wahrscheinlichkeit $p_{S_i} |_{i \neq 0} = 0$.

In jedem Schritt verteilt jeder Knoten seine Wahrscheinlichkeit über seine abgehenden Kanten auf Zielknoten. $\sum p_{S_i}$ bleibt immer 100%.

- p_{S_i} Wahrscheinlichkeit, dass die Markov-Kette im Zustand S_i ist.
- p_i Übergangswahrscheinlichkeit hier von Zustand $i - 1$ in Zustand i .



Eine Markov-Kette beschreibt ein lineares Gleichungssystem zur Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten für den Folgeschritt:

$$\begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S1} \\ p_{S2} \\ p_{S3} \end{pmatrix}_n = \begin{pmatrix} 1-p_1 & 1-p_1-p_2 & 1-p_1-p_3 & 0 \\ p_1 & p_1 & p_1 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S1} \\ p_{S2} \\ p_{S3} \end{pmatrix}_{n-1}$$

mit $\begin{pmatrix} p_{S0} & p_{S1} & p_{S2} & p_{S3} \end{pmatrix}_0^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$.

Kontrollkriterien für Gleichungssystem und Simulationsergebnis:

- Summe der Wahrscheinlichkeiten je Matrixspalte eins.
- Summe aller $p_{S,i}$ nach jedem Schritt eins.

$(\dots)^T$
 n Transponierte Matrix (Tausch von Zeilen und Spalten).
 Schrittnummer der Simulation der Markov-Kette.



$$\begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S1} \\ p_{S2} \\ p_{S3} \end{pmatrix}_n = \begin{pmatrix} 1-p_1 & 1-p_1-p_2 & 1-p_1-p_3 & 0 \\ p_1 & p_1 & p_1 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S1} \\ p_{S2} \\ p_{S3} \end{pmatrix}_{n-1}$$

Simulation mit Octave bzw. Matlab:

```
p1 = ...; p2 = ...; p3 = ...;
```

```
M=[1-p1 1-p1-p2 1-p1-p3 0;
    p1    p1    0    0;
    0    p2    p1    0;
    0    0    p3    1];
```

```
S=[1; 0; 0; 0];
```

```
for idx=1:100
```

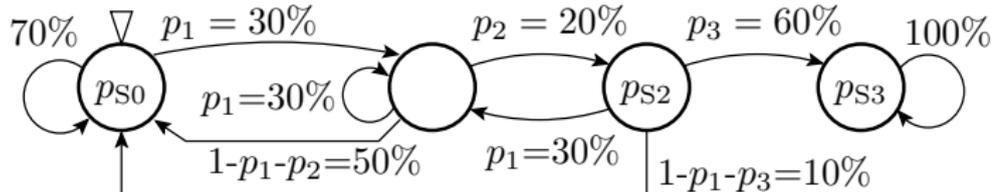
```
    S = M * S;
```

```
    printf ( '%3i  %6.2f%%  %6.2f%%  %6.2f%%  %6.2f%%\n' , idx , 100*S);
```

```
end;
```

Beispielsimulation

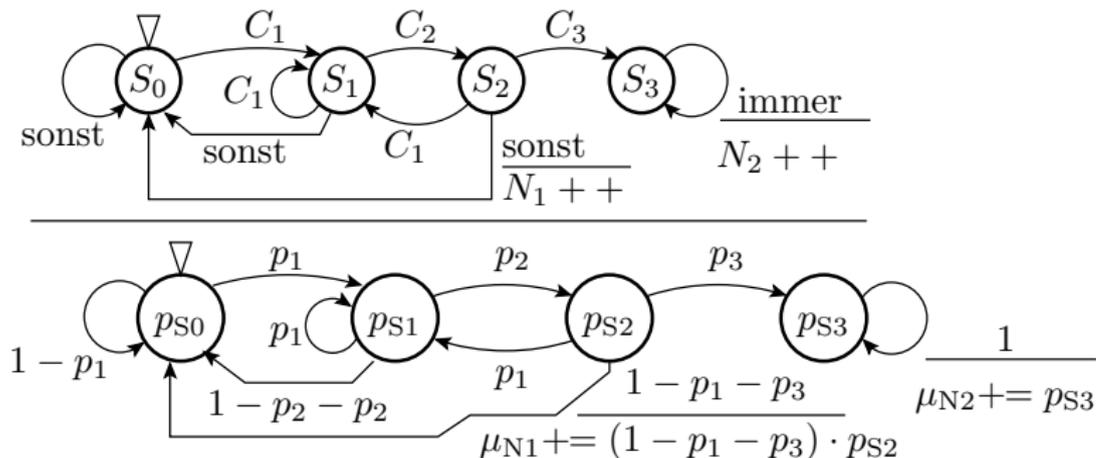
Übergangswahrscheinlichkeiten: $p_1 = 30\%$, $p_2 = 20\%$ und $p_3 = 60\%$:



Schritt	ps_0	ps_1	ps_2	ps_3	$\sum_{i=0}^3 ps_i$
0	100,00%	0	0	0	100%
1	70,00%	30,00%	0	0	100%
2	64,00%	30,00%	6,00%	0	100%
3	60,40%	28,20%	7,80%	3,60%	100%
4	57,16%	26,58%	7,89%	8,28%	100%
...
10	41,08%	19,06%	5,90%	33,96%	100%
...
50	4,54%	2,11%	0,65%	92,71%	100%
...
100	0,29%	0,13%	0,04%	99,44%	100%

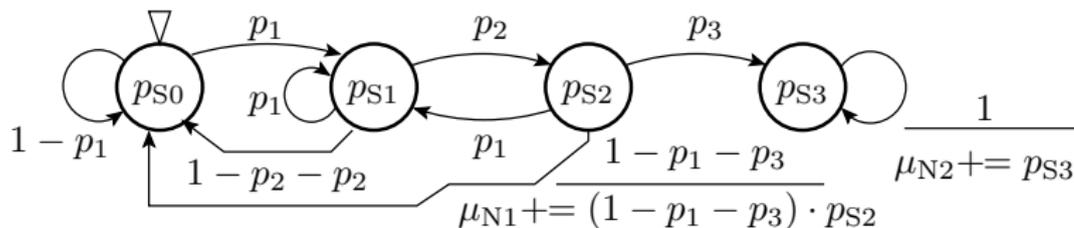
Kantenzähler

Mit Zählern an den Kanten lässt sich die Anzahl bzw. die zu erwartende Anzahl der Kantenübergänge, bestimmen:



- n Schrittnummer der Simulation der Markov-Kette.
- N_1 Zähler, wie oft nach zwei richtigen Eingaben eine falsche folgt.
- N_2 Zähler für die Anzahl der Schritte nach dem Fehlernachweis.
- μ_{N_i} Zu erwartende Kantenübergangsanzahl.
- $n - \mu_{N_2}$ Zu erwartende Schrittzahl bis zum Fehlernachweis.

In den Variablen $\mu_{...}$ werden die Wahrscheinlichkeiten der Kantenübergänge aufsummiert. Wie später gezeigt, sind das die Erwartungswerte der Anzahl der Übergänge. Analog auch Erwartungswert, wie oft System in eine Zustand ist, bestimmbar.



Erweiterung des Simulationsprogramms:

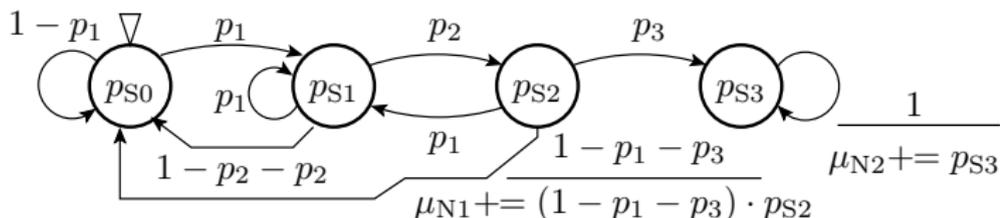
```

...
N1=0; N2=0;
for idx=1:100
    Z = M * Z;
    N1 = N1+Z(3)*(1 - p1 - p3);
    N2 = N2+Z(4);
    printf( '%3i_ %6.2 f%_ %6.2 f%_ %6.2 f%_ %6.2 f%_ ', idx , 100 * Z);
    printf( '%6.2 f_ %6.2 f\n', N1, N2);
end;

```

Beispielsimulation

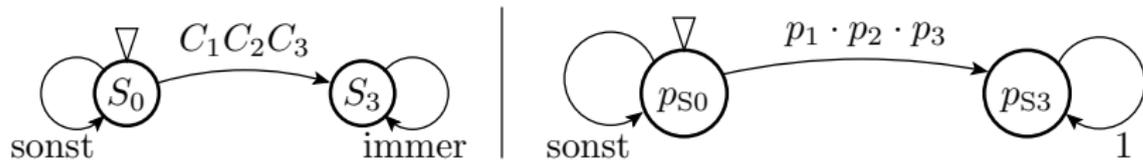
Übergangswahrscheinlichkeiten: $p_1 = 30\%$, $p_2 = 20\%$ und $p_3 = 60\%$



Schritt	ps_0	ps_1	ps_2	ps_3	μ_{N1}	μ_{N2}
1	70,00%	30,00%	0	0	0	0
2	64,00%	30,00%	6,00%	0	0,01	0
3	60,40%	28,20%	7,80%	3,60%	0,01	0,04
4	57,16%	26,58%	7,89%	8,28%	0,02	0,12
...
10	41,08%	19,06%	5,90%	33,96%	0,06	1,55
...
50	4,54%	2,11%	0,65%	92,71%	0,16	31,18
...
100	0.29%	0,13%	0,04%	99,44%	0,17	79,79

Zu erwartende Anzahl der Schritte bis zum Nachweis: $n - \mu_{N2} \approx 20$

»Drei richtige Eingaben« als Einzelereignis



Gleichungssystem
der modifizierten Markov-Kette:

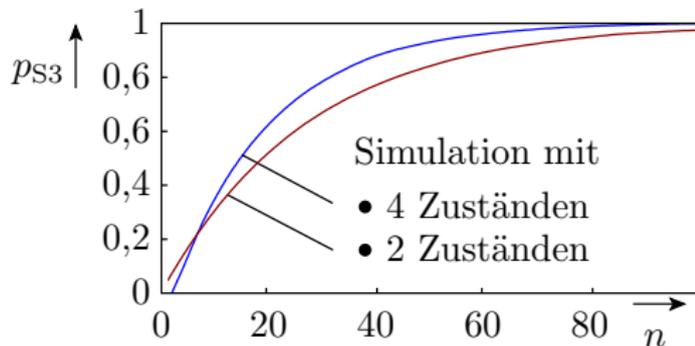
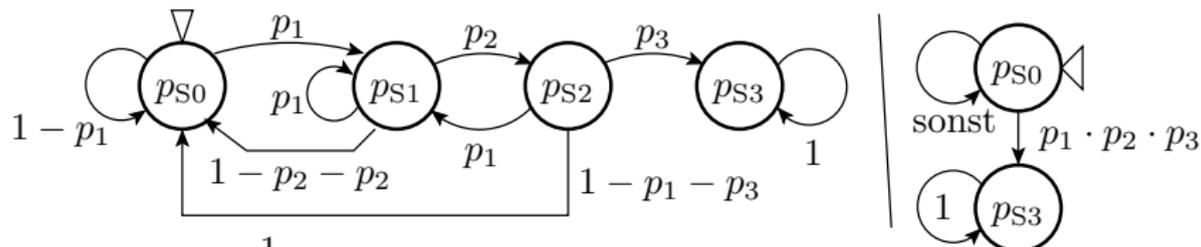
$$\begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S3} \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} 1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 & 0 \\ p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S3} \end{pmatrix}_n \quad \text{mit} \quad \begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S3} \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} p_{S0}(n) &= (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3) \cdot p_{S0}(n-1) = (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)^n \\ &= e^{\ln(1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3) \cdot n} \approx e^{-p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot n} \quad \text{für } p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \ll 1^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{S3}(n) &= 1 - p_{S0}(n) = 1 - (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)^n \\ &\approx 1 - e^{-p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot n} \quad \text{für } p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \ll 1^* \end{aligned}$$

* Annäherung durch erste Glied aylor-Reihe: $\ln(1 - x) = - \left(x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots \right)$.

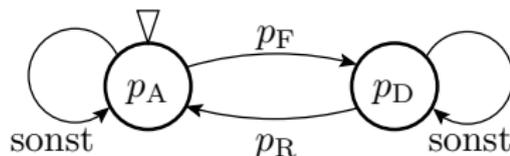
Unterschied zwischen beiden Markov-Ketten



Offenbar doch nicht ganz identisches Verhalten, aber sehr ähnliches.

Abschätzung einer Verfügbarkeit

Ein System sei zu Beginn funktionsfähig (Zustand A), fällt in jedem Zeitschritt, wenn es ganz ist, mit einer Wahrscheinlichkeit p_F aus (Übergang in Zustand D) und wird, wenn es kaputt ist, innerhalb des Zeitschritts mit einer Wahrscheinlichkeit p_R repariert (Übergang in Zustand A):

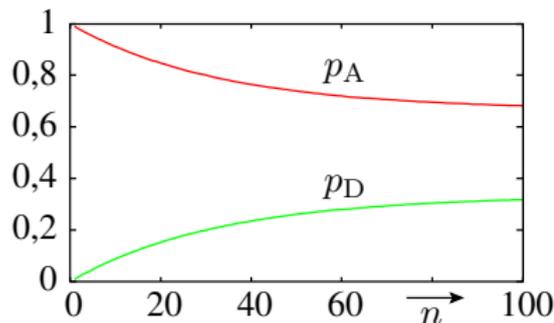
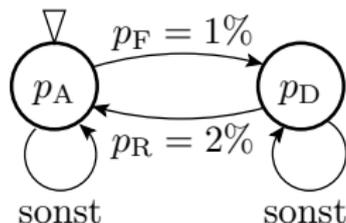


Modellierung als simulierbares Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} p_A \\ p_D \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} 1 - p_F & p_R \\ p_F & 1 - p_R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_A \\ p_D \end{pmatrix}_n \text{ mit } \begin{pmatrix} p_A \\ p_D \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

p_A	Wahrscheinlichkeit, dass das System verfügbar (available) ist.
p_D	Wahrscheinlichkeit, dass das System defekt ist.
p_F	Wahrscheinlichkeit, dass das System im Zeitschritt ausfällt.
p_R	Wahrscheinlichkeit, dass das System im Zeitschritt repariert wird.
n	Schrittnummer der Simulation der Markov-Kette.

Beispielsimulation



Stationärer Zustand:

$$p_A \cdot p_F = p_D \cdot p_R \quad \text{mit } p_A + p_D = 1$$

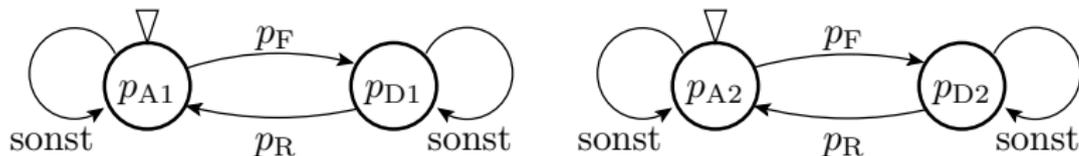
$$p_A = \frac{p_R}{p_R + p_F} = \frac{2\%}{1\% + 2\%} = 66,7\%$$

$$p_D = \frac{p_F}{p_R + p_F} = \frac{1\%}{1\% + 2\%} = 33,3\%$$

p_A	Wahrscheinlichkeit, dass das System verfügbar (available) ist.
p_D	Wahrscheinlichkeit, dass das System defekt ist.
p_F	Wahrscheinlichkeit, dass das System im Zeitschritt ausfällt.
p_R	Wahrscheinlichkeit, dass das System im Zeitschritt repariert wird.

Reparaturprozess für ein 1oo2 System

System aus zwei gleichartigen Teilsystemen, das solange funktioniert, wie 1 von (out of) 2 Teilsystemen funktioniert:



$$pF=0.01; \quad pR=0.02;$$

$$M=[1-pF \quad pR; \quad pF \quad 1-pR];$$

$$S=[1; \quad 0];$$

for n=1:100

$$S = M * S;$$

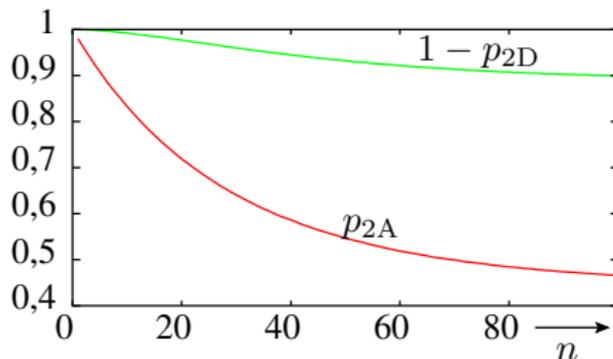
$$p2A(n)=S(1)**2; \quad \% \text{ beide Einheiten ganz}$$

$$p2D(n)=S(2)**2; \quad \% \text{ beide Einheiten defekt}$$

end;

plot(1:100, p2A, 1:100, 1-p2D)

Beispielsimulation mit $p_F = 1\%$ und $p_R = 2\%$



beide Systeme verfügbar	$p_{2D} = p_D^2$	$\lim_{n \rightarrow \infty} (p_{2D}) = (1/3)^2$
kein System verfügbar	$p_{2A} = p_A^2$	$\lim_{n \rightarrow \infty} (p_{2A}) = (2/3)^2$
mindestens ein System verfügbar	$1 - p_{2D}$	$\lim_{n \rightarrow \infty} (\dots) = 1 - (1/9)$

- n Schrittnummer der Simulation der Markov-Kette.
- p_F Wahrscheinlichkeit, dass das System im Zeitschritt ausfällt.
- p_R Wahrscheinlichkeit, dass das System im Zeitschritt repariert wird.
- $1 - p_{2D}$ Wahrscheinlichkeit, daß mindestens ein System verfügbar ist.
- p_{2A} Wahrscheinlichkeit, daß beide Systeme verfügbar sind.



Zusammenfassung



Wahrscheinlichkeit

Unter konstanten Versuchbedingungen strebt die Eintrittshäufigkeit von Zählversuchen gegen die Eintrittswahrscheinlichkeit:

$$(3.1) \quad \mathbb{P}[A] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\#A}{n}$$

Die Wahrscheinlichkeit ist die beste Vorhersage der zu erwartenden relativen Häufigkeit künftiger Versuche.

Bei gleichhäufigen möglichen Ereignissen ist die Wahrscheinlichkeit der Anteil der günstigen Ereignisse.

Komplexe Ereignisse lassen sich oft durch logische Verknüpfungen einfacher zu untersuchender Ereignisse beschreiben.

Zusatzbedingungen mit Einfluss auf die Eintrittshäufigkeit sind zu berücksichtigen.

Für logische Ereignisverknüpfungen bietet die Mathematik nur Lösungen für Unabhängigkeit und gegenseitigen Ausschluss. Für andere Abhängigkeiten müssen die logischen Beziehungen entsprechend umgestellt werden.

Verketteter Ereignisse

Bedingte Wahrscheinlichkeit:

$$(3.2) \quad \mathbb{P}[A|B] = \frac{\mathbb{P}[A \wedge B]}{\mathbb{P}[B]}$$

Satz von Bayes:

$$(3.3) \quad \mathbb{P}[B|A] = \mathbb{P}[A|B] \cdot \frac{\mathbb{P}[B]}{\mathbb{P}[A]}$$

Gegenwahrscheinlichkeit:

$$(3.4) \quad \mathbb{P}[\bar{A}] = 1 - \mathbb{P}[A]$$

UND unabhängiger Ereignisse:

$$(3.5) \quad \mathbb{P}[A \wedge B] = \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B]$$

UND sich ausschließender Ereignisse:

$$(3.6) \quad \mathbb{P}[A \wedge B] = 0$$

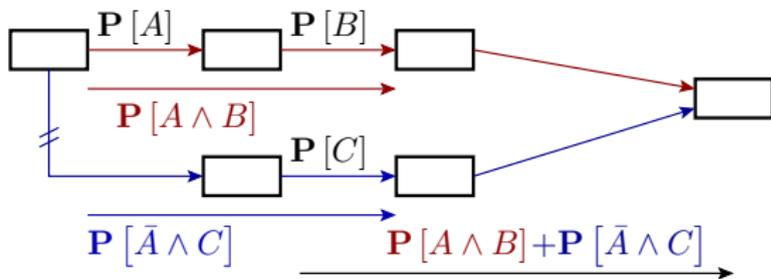
ODER unabhängiger Ereignisse:

$$(3.7) \quad \mathbb{P}(A \vee B) = \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B] - \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B]$$

Oder sich ausschließender Ereignisse:

$$(3.8) \quad \mathbb{P}[A \vee B] = \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B]$$

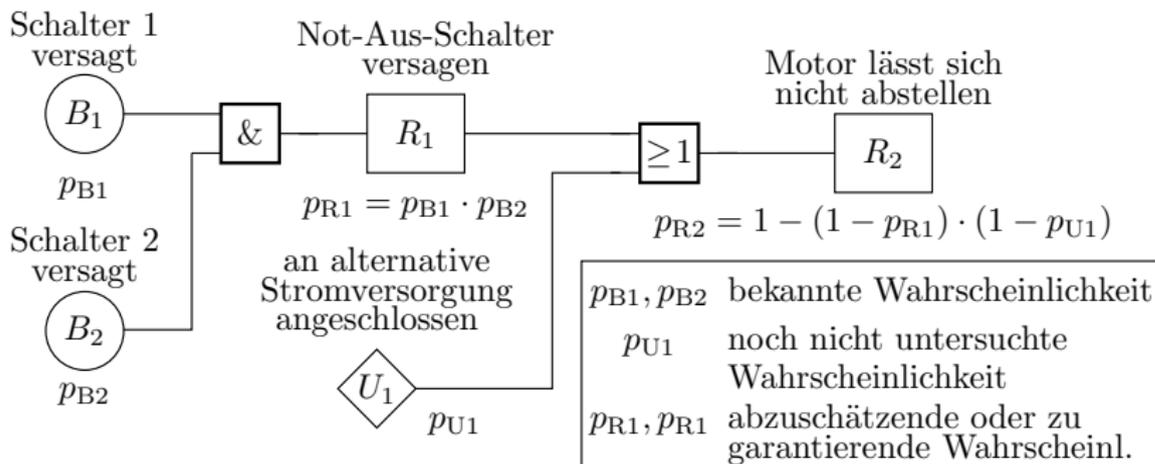
Zählwertzuordnungsgraph



Zuordnungsgraph zur Definition unserer Kenngrößen zur Beschreibung der Verlässlichkeit: Verfügbarkeit, Fehlfunktionsrate, ... Zuordnung von Zählwerte über Zufallsereignisse zu Teilaspekten so, dass

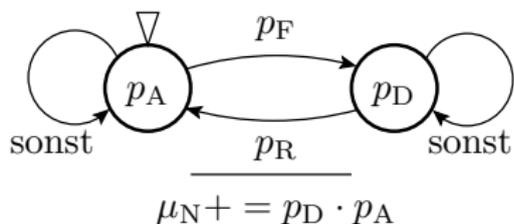
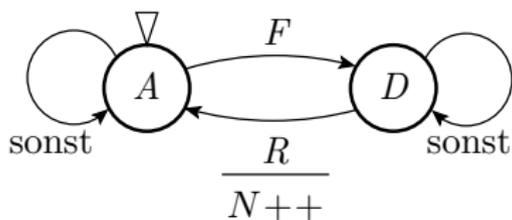
- eine Zuordnung über mehrere Kante eine »UND« unabhängiger Ereignisse und
- Zusammenführungen ein »ODER« sich ausschließender Ereignisse beschreiben.

Fehlerbäume



- Graphische Darstellung logisch verketteter Ereignisse zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Gefahrensituationen, Ausfällen, Fehlfunktionen,
- Zulässige Ereignisverknüpfungen: NOT, UND und ODER.
- Wenn »Abhängigkeit, aber nicht Ausschluss« Gleichungsumstellung.

Markov-Ketten



$$\begin{pmatrix} p_A \\ p_D \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} 1 - p_F & p_R \\ p_F & 1 - p_R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_A \\ p_D \end{pmatrix}_n \text{ mit } \begin{pmatrix} p_A \\ p_D \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mu_N = \mu_{N+} + p_D \cdot p_A$$

Berechnung von Zustandswahrscheinlichkeit für stochastische Prozesse, die sich durch endliche Automaten beschrieben lassen:

- Fehlernachweis,
- Fehlerentstehung,
- Verfügbarkeit, ...

Kantenzähler für die zu erwartende Anzahl der Übergänge.

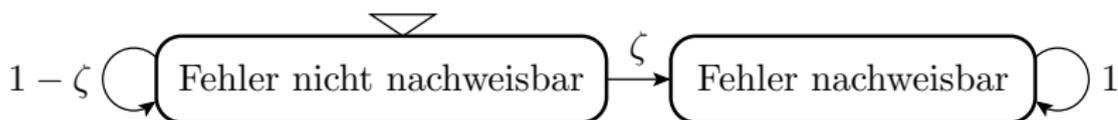


Fehlernachweis



Nachweis & Zuverlässigkeit

Nachweiswahrscheinlichkeit



Ein Fehler verursacht mit einer Rate ζ Fehlfunktionen, an denen er erkannt wird:

$$p_{\text{FD}}(\zeta, N) = 1 - (1 - \zeta)^N = 1 - e^{\ln(1-\zeta) \cdot N}$$

$$\approx^* 1 - e^{-\zeta \cdot n} \quad \text{für } \zeta \ll 1$$

Für den Zusammenhang zwischen Test und Verlässlichkeit interessieren nur Fehler mit $\zeta \ll 1$, weil nur diese nach der Iteration aus Test und Fehlerbeseitigung möglicherweise noch im System sind:

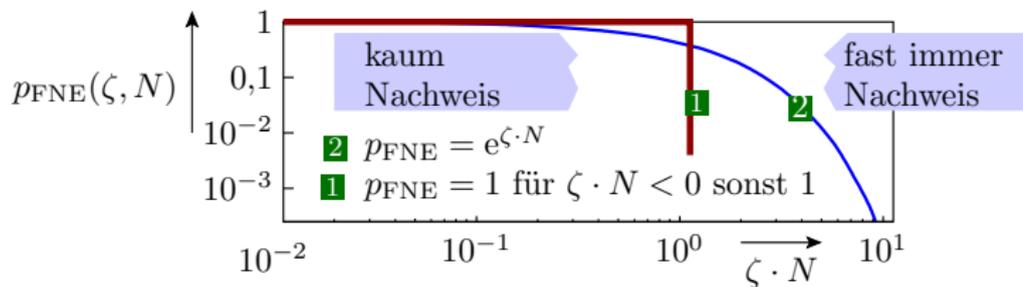
$$p_{\text{FD}}(\zeta, N) = 1 - e^{-\zeta \cdot N} \quad (3.9)$$

$p_{\text{FD}}(\zeta, N)$ Nachweiswahrscheinlichkeit des Fehlers mit N Tests.

ζ Fehlfunktionsrate des Fehlers.

* Annäherung durch erste Glied aylor-Reihe: $\ln(1 - x) = - \left(x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots \right)$.

Rückblick (siehe Abschn. 2.2.2)



Für die Abnahme der Fehleranzahl mit der Testanzahl bei Beseitigung aller e:rkantten Fehler hatten wir unter der Vereinfachung, dass Fehler ab $\zeta \cdot N \geq 1$ beseitigt werden und sonst nicht, abgeschätzt

$$(2.16) \quad \mu_F(N_2) = \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-K} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

$$(2.13) \quad \mu_F(N) = \mu_F \cdot \int_0^1 p_{FNE}(\zeta, N) \cdot h(\zeta) \cdot d\zeta$$

$$(2.18) \quad h(\zeta) = K \cdot \zeta^{K-1} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

Gilt das auch mit der ablingenden Exponentialfunktion?

Abnahme der Fehleranzahl mit der Testanzahl

$$(2.13) \quad \mu_F(N) = \mu_F \cdot \int_0^1 p_{FNE}(\zeta, N) \cdot h(\zeta) \cdot d\zeta$$

$$(2.18) \quad h(\zeta) = K \cdot \zeta^{K-1} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit als Gegenwahrscheinlichkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit (Gl. 3.9):

$$p_{FNE}(\zeta, N) = 1 - p_{FD}(\zeta, N) = e^{-\zeta \cdot N}$$

Alles eingesetzt:

$$\mu_F(N) = \mu_F \cdot \int_0^1 e^{-\zeta \cdot N} \cdot K \cdot \zeta^{K-1} \cdot d\zeta$$

Substitution: $\zeta = \frac{z}{N}$, $d\zeta = \frac{dz}{N}$:

$$\mu_F(N) = \mu_F \cdot K \cdot \int_0^N e^{-z} \cdot \left(\frac{z}{N}\right)^{K-1} \cdot \frac{dz}{N} = \frac{\mu_F \cdot K}{N^K} \cdot \underbrace{\int_0^N e^{-z} \cdot z^{K-1} \cdot dz}_*$$

$\mu_F(N)$ Zu erwartende Anzahl der Fehler, die nach N Tests nicht erkannt und beseitigt sind.

$p_{FNE}(\zeta, N)$ Wahrscheinlichkeit, dass Fehler mit MF-Rate ζ nach N Tests nicht beseitigt sind.

$h(\zeta)$ Dichtefunktion der Fehlfunktionsrate vor der Fehlerbeseitigung.

K Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ($0 < K < 1$).

* Anteil für $z \gg 1$ vernachlässigbar, also fast bestimmtes Integral $\int_0^\infty \dots dz$.



Gammafunktion

Das verbleibende bestimmte Integral ist für $N \gg 1$ mit guter Näherung die Gamma-Funktion $\Gamma(K)$. Für $0 < K \leq 1$ beträgt diese:

$$\Gamma(K) = \int_0^{\infty} e^{-z} \cdot z^{K-1} \cdot dz \approx \frac{1}{K}$$

K	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\Gamma(K)$	9,51	4,59	2,99	2,22	1,77	1,49	1,30	1,16	1,07

Für $K > 1$ gilt:

$$\Gamma(K + 1) = K \cdot \Gamma(K) \quad (3.10)$$

$\Gamma(\dots)$

Gamma-Funktion.

K

Parameter der Gamma-Funktion und Formfaktor der Verteilung der Fehlfunktionsrate.

Verbleibende Fehleranzahl (Fortsetzung)

$$\mu_F(N) = \frac{\mu_F \cdot K \cdot \Gamma(K)}{N^K}$$

Für die Abnahme der zu erwartenden Fehleranzahl mit der effektiven Testanzahl gilt auch mit der genauer beschriebenen Nachweiswahrscheinlichkeit (Gl. 3.9) das Potenzgesetz

$$(2.16) \quad \mu_F(N_2) = \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-K} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

Zu erwartende Fehlerabdeckung als die mittlere Fehlernachweiswahrscheinlichkeit für eine Testsatzverlängerung von N_1 auf $N_2 < N_1$ Tests:

$$\mu_{FC} = 1 - \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-K} \quad (3.11)$$

Dieselbe Kontrolle für die Fehlfunktionsrate

$$(2.14) \quad \zeta_F(N) = \mu_F \cdot \underbrace{\int_0^1 p_{\text{FNE}}(\zeta, N) \cdot h(\zeta) \cdot \zeta \cdot d\zeta}_{\text{mittlere Fehlfunktionsrate je Fehler}}$$

$$\zeta_F(N) = \mu_F \cdot \int_0^1 e^{-\zeta \cdot N} \cdot \zeta \cdot K \cdot \zeta^{K-1} \cdot d\zeta$$

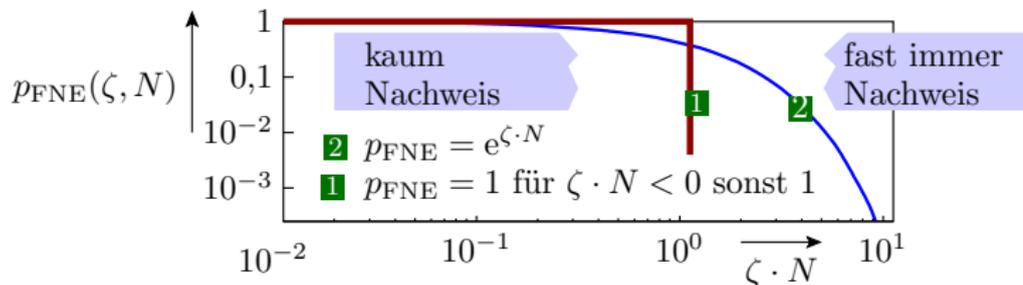
Substitution $\zeta = \frac{z}{N}$, $d\zeta = \frac{dz}{N}$:

$$\begin{aligned} \zeta_F(N) &= \mu_F \cdot K \cdot \int_0^N e^{-z} \cdot \left(\frac{z}{N}\right)^{K-1} \cdot \frac{z}{N} \cdot \frac{dz}{N} = \frac{K}{N^{K+1}} \cdot \int_0^N e^{-z} \cdot z^K \cdot dz \\ &= \frac{\mu_F \cdot K \cdot \Gamma(K+1)}{N^{K+1}} = \frac{\mu_F \cdot K^2 \cdot \Gamma(K)}{N^{K+1}} \end{aligned}$$

Für die Abnahme der MF-Rate mit der effektiven Testanzahl gilt auch mit Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Gl. 3.9) das Potenzgesetz

$$(2.19) \quad \zeta_F(N_2) = \zeta_F(N_1) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-(K+1)}$$

Vergleich mit bisherigem Modell



Alles gleich, außer geringfügige Abweichung im Verhältnis zwischen Fehlfunktionsrate und zu erwartenden Fehleranzahl:

1 Sprungfunktion:

$$(2.20) \quad \zeta_F(N) = \frac{\mu_F(N) \cdot K}{(K+1) \cdot N}$$

2 Exponentialfunktion:

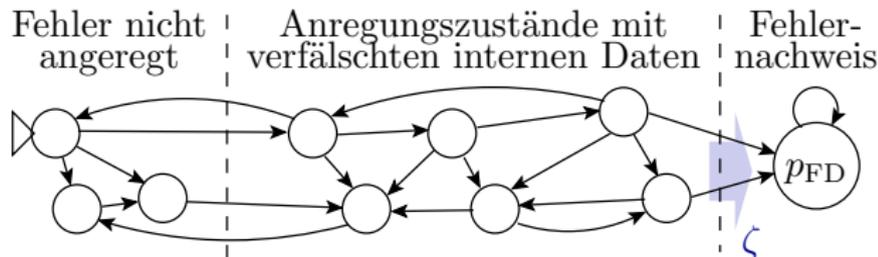
$$(2.21) \quad \zeta_F(N) = \frac{\mu_F(N) \cdot K}{N}$$

Der Term $K + 1$ unter dem Bruchstrich, der in Abschnitt 2.2.2 unter Verweis auf diesen Abschnitt bereits vernachlässigt wurde.



Service mit Gedächtnis

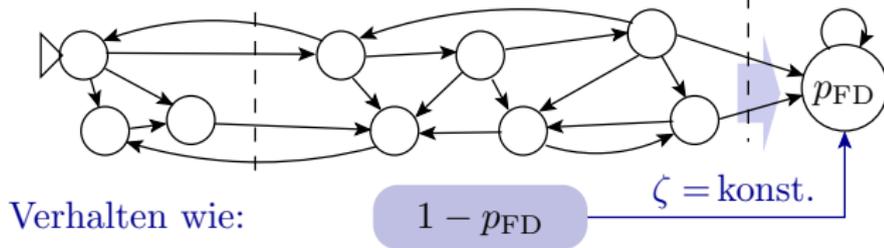
Service mit Gedächtnis



In Systemen mit internen Speicherzuständen (Gedächtnis) verlangt der Fehlernachweis zum Teil mehrere Zustandsübergänge über Anregungszustände mit verfälschten internen Daten bis zum Nachweis.

Eine genaue Modellierung des Zusammenhangs zwischen Nachweiswahrscheinlichkeit und Testanzahl verlangt für jeden Fehler einen individuellen Beobachterautomaten, aus dem sich eine fehlerspezifische Markov-Kette ableitet. Oft mehr als zwei Zuständen und testschrittabhängige Fehlfunktionsrate ζ .

Nach N_I Initialisierungsschritten stationäres Gleichgewicht der Wahrscheinlichkeiten. Fehler-nachweis

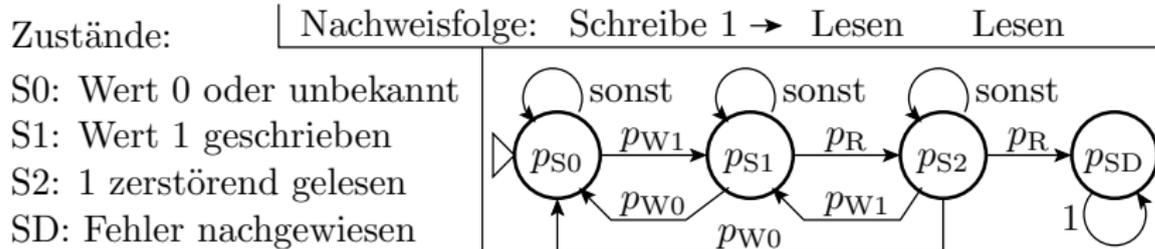


An einem Beispielfehler wird gezeigt, dass solche Beobachteraautomaten dazu tendieren, sich für lange Testsätze nahezu wie der Zweizustands-Beobachteraautomat mit der abklingenden Exponentialfunktion als Nachweiswahrscheinlichkeit zu verhalten.

Und zwar stellt sich nach N_I Initialisierungsschritten ein stationäres Gleichgewicht zwischen den Zustandswahrscheinlichkeiten der linken Zustände und darüber eine konstante Fehlfunktionsrate ζ für den Abfluss von Wahrscheinlichkeit in den Zustand »Fehlernachweis« ein.



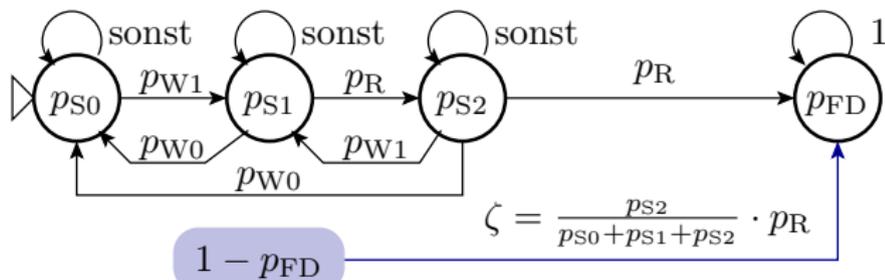
Beispiel: RAM-Fehler »DR1«



Im RAM wird beim Lesen der fehlerhaften Speicherzelle mit Adresse a eine gespeicherte 1 in eine 0 verfälscht. Der Nachweis erfordert:

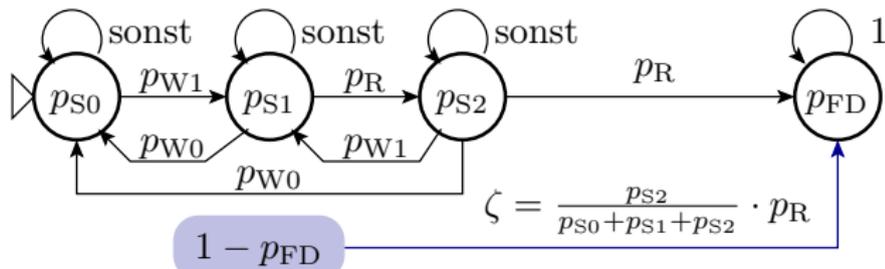
- Schreibe 1 auf Adresse a (Übergang in Zustand S1),
- Lese Wert von Adresse a (Übergang in Anregungszustand S2),
- Lese von Adresse a ohne zwischenzeitlichen Schreibzugriff auf a (Übergang in den Nachweiszustand SD).

p_{W0}	Wahrscheinlichkeit, dass eine 0 in die Speicherzelle geschrieben wird.
p_{W1}	Wahrscheinlichkeit, dass eine 1 in die Speicherzelle geschrieben wird.
p_R	Wahrscheinlichkeit, dass die Speicherzelle gelesen wird.
p_{FD}	Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Probability of fault detection).
DR1	Zerstörendes Lesen einer eins (Destructive reading of one).



Im stationären Gleichgewicht
von p_{S0} bis p_{S2} konstant

Die äquivalente Fehlfunktionsrate für die Zweizustands-Markov-Kette ist hier die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass der Beobachterautomat im Zustand S2 ist, wenn er nicht im Zustand FD, also in einem der Zustände S1, S2 oder S3 ist, und die defekte Speicherzelle gelesen wird.



$p_{S0}=1$; $p_{S1}=0$; $p_{S2}=0$; $p_{SD}(1)=0$; $N=5000$;
 $NA=128$; $p_R = 1/(2 \cdot NA)$; $p_{W0} = p_{W1} = 1/(4 \cdot NA)$;

for n=1:N

$p_0 = p_{S0} \cdot (1 - p_{W1}) + p_{S1} \cdot p_{W0} + p_{S2} \cdot p_{W0}$;

$p_1 = p_{S0} \cdot p_{W1} + p_{S1} \cdot (1 - p_{W0} - p_R) + p_{S2} \cdot p_{W1}$;

$p_2 = p_{S1} \cdot p_R + p_{S2} \cdot (1 - p_{W1} + p_{W0} - p_R)$;

$p_{FD} = p_{SD}(n) + p_{S2} \cdot p_R$;

$zeta = p_{S2} \cdot p_R / (p_{S0} + p_{S1} + p_{S2})$; % MF rate

$p_{S0} = p_0$; $p_{S1} = p_1$; $p_{S2} = p_2$;

end

plot(1:N,
zeta);

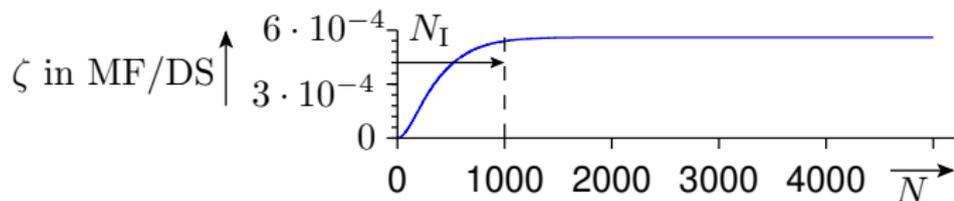
p_{S_i} Wahrscheinlichkeit, dass die Markov-Kette im Zustand S_i ist.

p_R Wahrscheinlichkeit, dass die Speicherzelle gelesen wird.

ζ MF-Rate des DR1-Fehlers.

N Anzahl der Tests.

Simulation



Die durch den Fehler verursachte MF-Rate ζ nimmt anfangs mit der Testanzahl N zu und bleibt ab $N_I \approx 1000$ konstant $\zeta \approx 5,7 \cdot 10^{-4}$. Ab $N > N_I$ beträgt die Nachweiswahrscheinlichkeit mindestens:

$$p_{\text{FD}}(\zeta, N) \geq 1 - e^{-\zeta \cdot (N - N_I)} \quad (3.12)$$

und für lange Zufallstests $N \gg N_I$ gilt wie für Systeme ohne Gedächtnis:

$$(3.9) \quad p_{\text{FD}}(\zeta, N) = 1 - e^{-\zeta \cdot N}$$

$p_{\text{FD}}(N)$	Nachweiswahrscheinlichkeit des DR1-Fehlers als Funktion der Anzahl der Tests.
ζ	MF-Rate des DR1-Fehlers.
N_I	Anzahl der Initialisierungsschritte.
N	Testanzahl, für Worst-Case-Abschätzungen ohne die N_I Initialisierungsschritte.



Fehler und Modellfehler



Fehler und Modellfehler (vergl. Abschn. 2.1.5)

Man kennt nie die Fehler, die man sucht, sondern nur die, die man gefunden hat.

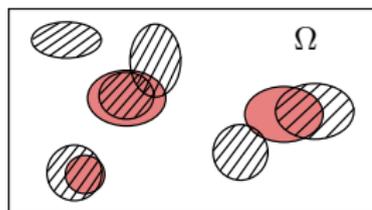
Testauswahl und Testbewertung verwenden Modellfehler.

Modellfehler: Angenommener Fehler, in der Regel eine kleine Änderungen der Testobjektbeschreibung, z.B. Haftfehler
»Gateranschluss ständig null oder ständig eins«.

Fehlermodell: Algorithmus zur Erzeugung einer Modellfehlermenge aus einer Testobjektbeschreibung.

Wie und wie gut kann man von der Modellfehlerabdeckung oder anderen »messbaren« Kenngrößen für einen Testsatz auf die tatsächliche Fehlerabdeckung schließen?

Nachweismengen, Nachweisbeziehungen

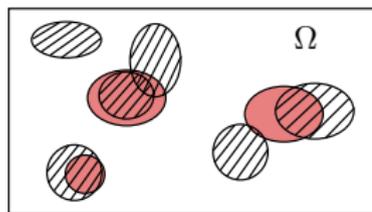


- Ω Ereignisraum, hier Menge der möglichen Eingaben bzw. Eingabefolgen.
-  Nachweismenge eines Modellfehlers
-  Nachweismenge eines tatsächlichen Fehlers

Die Nachweisbeziehungen zwischen Fehlern und Modellfehlern lassen sich über die Mengenbeziehungen veranschaulichen:

- Der Ereignisraum Ω umfasst alle Möglichkeiten der Eingaben bzw. der Eingabefolgen.
- Günstig sind die, die einen betrachteten Fehler bzw. Modellfehler nachweisen.
- Idealerweise generiert ein Fehlermodell für alle tatsächlichen Fehler mehrere Modellfehler mit ähnlichen Anregungs- und Beobachtungsbedingungen.
- Gemeinsame Nachweisbedingungen bilden sich auf mehr oder weniger große Schnittmengen der Nachweismengen ab.

Zufallstest



- Ω Ereignisraum, hier Menge der möglichen Eingaben bzw. Eingabefolgen.
 Nachweismenge eines Modellfehlers
 Nachweismenge eines tatsächlichen Fehlers

Zufallstests sind »Blindschüsse« in den Ereignisraum. Jede Nachweismenge hat eine »Trefferwahrscheinlichkeit« die komplett unabhängig von Treffern für anderen Nachweismengen sind. Relative Zunahme der Fehlerabdeckung unter Annahme »gleicher Formfaktor K der Dichten der MF-Rate« für Modellfehler und tatsächliche Fehler gleich:

$$(3.11) \quad \mu_{FC} = 1 - \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{-K}$$

Für einen Zufallstest lassen sich unter den getroffenen Annahmen

- die Testverlängerung N_2/N_1 für eine Fehlerabdeckung,
- die Fehlerabdeckung für eine Testverlängerung N_2/N_1 und
- der Formfaktor K

mit Modellfehlern bestimmen und auf tatsächliche Fehler anwendbar.

Zufallstest, absolute Testanzahl

Die Unterschiede der Nachweiseigenschaften zwischen tatsächlichen und Modellfehlermengen spielen erst bei absoluten Testsatzlängen eine Rolle. Die Modellfehlerabdeckung tendiert hier gegen die Fehlerabdeckung der c -fachen Testanzahl (siehe Abschn. 2.2.4):

$$(2.34) \quad N = c \cdot N_{MF} \quad \text{für } \mu_{FC}(N) = \mu_{FCM}(N_{MF})$$

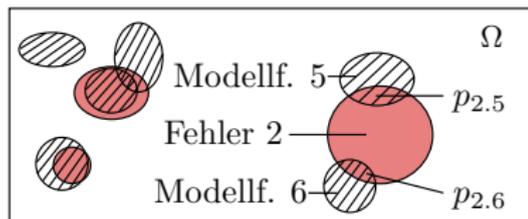
- $c < 1$: Modellfehler tendentiell strengere Nachweisbedingungen,
- $c > 1$: Modellfehler tendentiell einfachere Nachweisbedingungen

Für Abschätzungen Fehlerabdeckung bzw. erforderlichen Testanzahl für tatsächliche Fehler mit Modellfehlern gut handhabbar, insbesondere für Fehlermodelle, für die sich c auf Werte nahe eins beschränken lässt, d.h. wenn die Modellfehler ähnlich gut zu befriedigene Nachweisbedingungen wie die zu erwartenden Fehler haben.

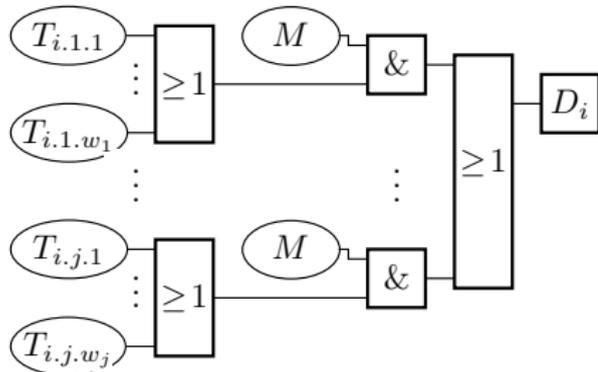
Ähnlich gut zu befriedigene Nachweisbedingungen ist umgekehrt die Anforderung des Zufallstests an ein Fehlermodell.

N, c	Effektive Testanzahl, Testskalierung.
N_{MF}	Testanzahl, mit der die Modellfehlerüberdeckung bestimmt wird.
μ_{FCM}, μ_{FC}	Zu erwartende Modellfehlerabdeckung und tatsächliche Fehlerabdeckung.

Gezielte Testsuche



- Nachweismenge eines tatsächlichen Fehlers
- Nachweismenge eines Modellfehlers



T_{ijk} Test k für Modellfehler j weist Fehler i nach:

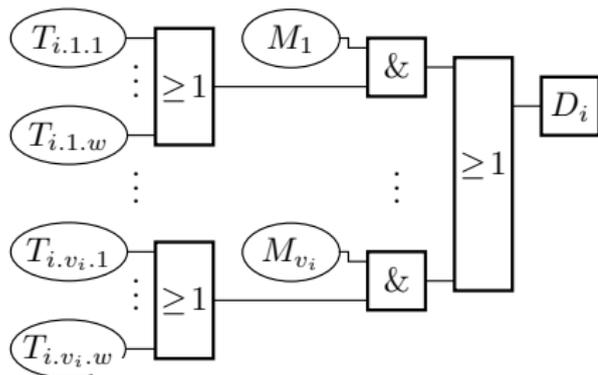
$$\mathbf{P}[T_{i.j.k}] = p_{ij} \neq f(k)$$

M für Modellfehler j werden die gesuchten w_j Tests gefunden

$$\mathbf{P}[M] = FC_M \neq f(i, j)$$

D_i Nachweis Fehler i

Für jeden Fehler i enthält die Modellfehlermenge $j = 1$ bis v_i ähnlich nachweisbare Modellfehler, für die jeweils $w \geq 1$ Tests gesucht und mit Wahrscheinlichkeit $\mathbf{P}[M] = FC_M$ gefunden werden.



T_{ijk} Test k für Modellfehler j weist Fehler i nach:

$$\mathbf{P}[T_{i,j,k}] = p_{ij} \neq f(k)$$

M_j für Modellfehler j werden die gesuchten w Tests gefunden

$$\mathbf{P}[M_j] = FC_M \neq f(i, j)$$

D_i Nachweis Fehler i

Testsuche ist schwierig und nur für FC_M Modellfehler erfolgreich (siehe Abschn. 6.2). Wenn sich ein Test finden lässt, werden in der Regel auch $w \geq 1$ »zufällige« Tests aus der Nachweismengen gefunden:

$$D_i = \bigvee_{j=1}^{v_i} \left(\left(\bigvee_{k=1}^w T_{ijk} \right) \wedge M_j \right) = \bigwedge_{j=1}^{v_i} \left(\left(\bigwedge_{k=1}^w \bar{T}_{ijk} \right) \wedge M_j \right)$$

$$p_{\text{FD},i} = \mathbb{P}(D_i) = 1 - \prod_{j=1}^{v_i} (1 - (FC_M \cdot (1 - (1 - p_{ij})^w))) \quad (3.13)$$



Zahlenbeispiel

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^{v_i} (1 - (FC_M \cdot (1 - (1 - p_{ij})^w)))$$

Beispielwerte Modellparameter: $p_{ij} = 25\%$, $v_i = 5$ und $w = 1 \dots 5$:

$p_i(w, FC_M)$	$w = 1$	$w = 2$	$w = 3$	$w = 4$	$w = 5$
$FC_M = 90\%$	72,0%	91,8%	97,5%	99,15%	99,70%
$FC_M = 95\%$	74,2%	93,2%	98,1%	99,47%	99,84%

Auch wenn die Modellannahmen anzweifelbar sind, z.B. Gleichbehandlung aller Fehler und aller Modellfehler statt Pareto-Prinzip, erlaubt die Modellrechnung Schlussfolgerungen, die zu Praxiserfahrungen passen:

- Zunahme Fehlerabdeckung mit Modellfehlerabdeckung.
- Es ist nützlich, für jeden Modellfehler mehrere Tests zu suchen.
- Schlecht: Testlängenminimierung für Modellfehlerabdeckung.

p_i Nachweiswahrscheinlichkeit Fehler i .

v_i Anzahl der ähnlich nachweisbaren Modellfehler für Fehler i .

FC_M Modellfehlerabdeckung.

w Anzahl der je Modellfehler gesuchten Tests. Gefunden werden alle oder keiner.

p_{ij} Wahrscheinlichkeit, dass ein Test, der Modellfehler j nachweist, auch Fehler i findet.



Belastbare Aussagen mit Praxiswert

$p_i(w, FC_M)$	$w = 1$	$w = 2$	$w = 3$	$w = 4$	$w = 5$
$FC_M = 90\%$	72,0%	91,8%	97,5%	99,15%	99,70%
$FC_M = 95\%$	74,2%	93,2%	98,1%	99,47%	99,84%

Folgerung 2 (Gezielte Testauswahl)

- 1 Das Fehlermodell muss für jeden zu erwartenden Fehler (mehrere) ähnlich nachweisbare Modellfehler generieren,
- 2 Die Anzahl der zu suchenden Tests je Modellfehler sollte mindestens die Größenordnung des Kehrwerts der kleinsten p_{ij} haben. Viel mehr ist auch gut, weniger ist schlecht.
- 3 Die Auswahl der Tests je Modellfehler muss unbedingt Zufallscharakter haben.

Man braucht Fehlermodelle und Auswahltechniken, die das leistet. Erst dann lohnen sich Modellnachscharfungen.



Operationsprofil



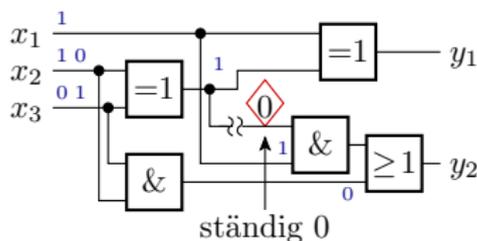
Operationsprofil, Test und Zuverlässigkeit

Das Operationsprofil beschreibt die Art der Systemnutzung, genauer die relative Nutzungshäufigkeit unterschiedener Service-Leistungen und Systembestandteile. Erheblicher Einfluss auf die Nachweiswahrscheinlichkeiten und Fehlfunktionsraten der individuellen Fehler (tatsächliche oder Modell-Fehler).

- Im Einsatz lernen die Nutzer intuitiv, erkannte Probleme zu umgehen, so dass die wahrgenommene Verlässlichkeit mit der Nutzungsdauer zunimmt. Ein Wechsel des Operationsprofils bewirkt, dass plötzlich andere Probleme dominieren und der Lernprozess für die Problemumgehung erneut anläuft.
- In einer Iteration aus Test und Beseitigung aller erkennbaren Fehler bewirkt einen Wechsel des Operationsprofils ein sprunghaften Anstieg der Anzahl der erkennbaren Fehler, die beseitigt werden.

Tests mit unterschiedlichen Operationsprofilen sind wichtig.

Nutzung und Nachweiswahrscheinlichkeit



■ Eingaben die den Fehler nachweisen

Eingabe			Ausgabe		Nutzungshäufigkeit der Eingabewerte		
x_3	x_2	x_1	y_2	y_1			
0	0	0	0	0	0,125	0,1	0,1
0	0	1	0	1	0,125	0,05	0,1
0	1	0	0	1	0,125	0,15	0,2
0	1	1	1	0	0,125	0,2	0,05
1	0	0	0	1	0,125	0,05	0,2
1	0	1	1	0	0,125	0,2	0,05
1	1	0	1	0	0,125	0,05	0,2
1	1	1	1	1	0,125	0,2	0,1

Nachweiswahrscheinlichkeit: 0,25 0,4 0,1

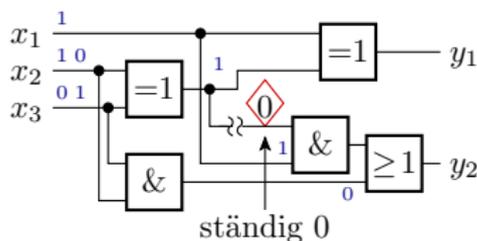
Fehler haben eine Nachweismenge von Eingaben. Die

- Nachweiswahrscheinlichkeit während des Tests und
- die Fehlfunktionsraten im Einsatz

hängen von den Nutzungshäufigkeiten dieser Eingaben ab.

Der eingezeichnete Haftfehler ist mit zwei der acht möglichen Eingaben nachweisbar.

Operationsprofil und Nachweiswahrsch.



■ Eingaben die den Fehler nachweisen

Eingabe			Ausgabe		Nutzungshäufigkeit der Eingabewerte		
x_3	x_2	x_1	y_2	y_1			
0	0	0	0	0	0,125	0,1	0,1
0	0	1	0	1	0,125	0,05	0,1
0	1	0	0	1	0,125	0,15	0,2
0	1	1	1	0	0,125	0,2	0,05
1	0	0	0	1	0,125	0,05	0,2
1	0	1	1	0	0,125	0,2	0,05
1	1	0	1	0	0,125	0,05	0,2
1	1	1	1	1	0,125	0,2	0,1

Nachweiswahrscheinlichkeit: 0,25 0,4 0,1

Das Operationsprofil legt die Auftretishäufigkeiten der Eingaben fest. Bei Bevorzugung der Eingaben der Nachweismenge verbessert bei Benachteiligung verringert sich die Nachweiswahrscheinlichkeit.

Ein Wechsel des Operationsprofils kann vorher gut in danach schlecht nachweisbare Fehler und umgekehrt umwandeln.

Test mit unterschiedlichen Operationsprofilen

$$(2.16) \quad \mu_F(N_2) = \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-K} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

$$(2.25) \quad R_F(N) = \frac{N}{K \cdot \mu_F(N)}$$

Nach einem Vortest mit N_1 dynamischen Tests bewirkt eine Testverlängerung auf $N \gg N_1$ Tests mit dem Operationsprofil der Anwendung eine Abnahme der zu erwartenden Fehleranzahl und eine Zunahme der fehlerbezogenen Teilzuverlässigkeit auf:

$$\begin{aligned} \mu_{F.1}(N) &= \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-K} \\ R_{F.1}(N) &= \frac{N}{K \cdot \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-K}} \sim N^{1+K} \end{aligned}$$

Bei einer Fortsetzung mit weiteren $N - N_1$ Tests mit einem zweiten Operationsprofil werden andere Fehler gut nachweisbar.

- N Anzahl der Tests je Operationsprofil, die N_1 Vortests mitgezählt.
 K Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ($0 < K < 1$).



Die Abnahme der zu erwartenden Fehleranzahl bewirkt die Vergrößerung gegenüber den Vortests $N/N_1 \gg 2$ statt gegenüber allen bisherigen Tests $(N - N_1 + N) / N \approx 2$:

$$\mu_{F.2}(N) = \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-K} \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-K}$$

$$R_{F.2}(N) = \frac{N}{K \cdot \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-K} \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-K}} \sim N^{1+2K}$$

Für $\#OP$ Operationsprofile mit je Testanzahl N nimmt unter der gleichbleibenden Annahme, dass

- für jedes neue Operationsprofil andere Fehler in den Bereich der mit N Tests nachweisbaren Fehler rücken,
- die Tests für das neue Operationsprofil dadurch den Anteil der nicht beseitigten Fehler immer um $(N/N_1)^K$ verringern,
- die zusätzlichen Tests im ungünstigsten Fall nicht zur effektivere Testanzahl anderer Operationsprofile beitragen ...

$\mu_{F.i}(N)$	Anzahl nicht nachweisbarer Fehler nach Test mit i Operationsprofilen, je Länge N .
$R_{F.i}(N)$	Fehlerbezogene Teilzuverlässigkeit nach Test mit i Operationsprofilen, je Länge N .
N	Anzahl der Tests je Operationsprofil, die N_1 Vortests mitgezählt.



... die Fehleranzahl mit der $\#OP \cdot K$ -ten Potenz ab und die Zuverlässigkeit mit der $1 + \#OP \cdot K$ -ten Potenz zu:

$$\mu_{F.\#OP}(N) = \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-\#OP \cdot K} \quad (3.14)$$

$$R_{F.\#OP}(N) = R_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{1+\#OP \cdot K} \quad (3.15)$$

Modellannahmen und Ergebnis sind Spekulationen. Gesichert gilt:

- Ausreichend viele Tests mit allen für die Anwendung zu erwartenden Operationsprofile zwingend (Mindestzuverlässigkeit).
- Zusätzlichen Tests mit anderen Operationsprofilen finden mehr Fehler, als weitere Tests mit demselben Operationsprofil.
- Das auswürfeln der Tests für ein Operationsprofil muss Zufallscharakter haben, ...

Operationsprofil-basierten Testauswahl ist auf jeden Fall für die Praxis interessant. Wie weit das hier skizziert Potential praktisch nutzbar ist, wird künftige Forschung zeigen.

Fehlerorientierte Operationsprofilauswahl

Nutzung von Modellfehlermengen zur Operationsprofilauswahl (statt zur Testauswahl). Erlaubt sehr lange Tests je Modellfehler und kommt mit einem Fehlermodell »mit sehr kleinen p_{ij} 's« aus:

Pragmatischer Ansatz für die praktische Testauswahl:

- Aufstellung einer Menge simulierbarer Modellfehler. Entfernen erkennbar identisch nachweisbarer und redundanter Fehler.
- Fehlersimulation mit z.B. $N = 10^4$ Tests mit Standardoperationsprofil. Entfernen aller nachweisbaren Modellfehler.
- Wiederhole, bis alle Modellfehler nachweisbar:
 - Errate günstiges Operationsprofil für den Rest der Modellfehler.
 - Fehlersimulation wieder mit N Tests, aber dem neuen Operationsprofil. Entfernen aller nachweisbaren Modellfehler.

Für digitaler Schaltungen kann man sog. Wichtungen als Operationsprofil so berechnen und für Selbsttests nutzen (siehe Abschn. 6.3.4 *Fehlerorientierte Wichtung*).



Nutzungsfälle, symbolische Tests, Fuzzifizierung

Software wird in der Regel mit unterschiedlichen Operationsprofilen genutzt. Ausreichender Zuverlässigkeit verlangt Tests mit allen einzuplanenden Operationsprofilen, sicherheitskritischen Betriebsfällen, ...

Im modernen Softwareentwurf werden die Anforderungen in Form typischen Nutzungsfällen (Use cases), Grenzfälle, symbolischen Tests*, ... skizziert. Jede Anforderung ist zu testen. (siehe Abschn. 7.2.3 *Testbare Anforderungen*). Naheliegender Ansatz ist die Konfiguration eines Zufallszahlengenerators mit einem passendem Operationsprofil für die jeweilige Testabsicht und automatisches Auswürfeln von Beispielwerten.

Bei Software wird die Auswahl vieler Zufallsbeispiele für eine Testabsicht als Fuzzifizierung bezeichnet, blinde Auswahl mit einem normalen Zufallszahlengenerator als »dump fuzzing« und eine gezielt gesteuerte Zufallsauswahl als »smart fuzzing« (siehe Abschn. 7.3 *Testauswahl*).

* Symbolische Tests beschreiben, was, wie, warum und wie gründlich zu überprüfen ist.



Zusammenfassung

Nachweiswahrscheinlichkeit und R-Wachstum

In der Regel strebt die Nachweiswahrscheinlichkeit mit der Testanzahl mit einer ablingenden Exponentialfunktion gegen eins:

$$(3.9) \quad p_{\text{FD}}(\zeta, N) = 1 - e^{-\zeta \cdot N}$$

Genaugenommen gilt das nur für Systeme und Fehler ohne Gedächtnis, ist aber für sehr lange Zufallstests auch sonst brauchbar.

Mit dieser erst hier hergeleitete Beziehung gelten weiterhin die zuvor mit einfacheren Modellannahmen hergeleiteten Beziehungen zwischen Fehlfunktionsrate, Fehleranzahl, Zuverlässigkeit und Testanzahl:

$$(2.16) \quad \mu_{\text{F}}(N_2) = \mu_{\text{F}}(N_1) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-K} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

$$(2.21) \quad \zeta_{\text{F}}(N) = \frac{\mu_{\text{F}}(N) \cdot K}{N}$$

$$(2.26) \quad R_{\text{F}}(N_2) = R_{\text{F}}(N_1) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{K+1}$$

Die Kernthese der Vorlesung, dass in Iterationen aus Zufallstests und Beseitigung aller nachweisbaren Fehler die Fehleranzahl mit Exponent $0 < K < 1$ ab- und die Zuverlässigkeit mit Exponent $K + 1$ zunehmen, stehen damit auf einem festeren Fundament.

Fehler- und Modellfehlerabdeckung

Fehlernachweis ist Zufall. Für die Bewertung und gezielte Auswahl dienen Fehlerannahmen (Modellfehler).

Gut beschreibbar ist die Beziehung zwischen Fehler- und Modellfehler nachweis für Zufallstest. Die Fehlerabdeckung in Abhängigkeit von der relativen Testsatzverlängerung ist unter sehr allgemeinen Bedingungen für Modellfehler und tatsächliche Fehler gleich:

$$(3.11) \quad \mu_{\text{FC}} = 1 - \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{-K}$$

Bei der absoluten Testsatzlänge tendiert die Modellfehlerabdeckung gegen die der tatsächlichen Fehlerabdeckung für die c -fache Testanzahl.

$$(2.34) \quad N = c \cdot N_{\text{MF}} \quad \text{für } \mu_{\text{FC}}(N) = \mu_{\text{FCM}}(N_{\text{MF}})$$

Die Testlängenskalierung c hängt vom Fehlermodell ab. Am vertrauenswürdigsten erscheinen Abschätzungen, für die sich c auf Werte nahe eins beschränken lässt, d.h. für Fehlermodelle, die Modellfehler generieren, die sich ähnlich gut wie die tatsächlich zu erwartenden Fehler nachweisen lassen.



Geziele Testauswahl

Das Versuchsschema ist anders als beim Zufallstest. Statt blinder Auswahl werden für v_i ähnlich nachweisbare Modellfehler je w Tests gesucht, die mit Wahrscheinlichkeiten p_{ij} auch den tatsächlichen Fehler nachweisen.

Man braucht ein Fehlermodell, das für jeden zu erwartenden Fehler ähnlich nachweisbare Modellfehler generiert. Das ist viel schwerer zuzusichern als die für den Zufallstest geforderten »ähnlich *gut* nachweisbaren« Modellfehler.

Damit von den w Tests mit hinreichender Wahrscheinlichkeit mindestens einer zufällig den Fehler nachweist, muss w mindestens die Größenordnung des Kehrwerts der schlechtesten p_{ij} haben.

Eine Beispielrechnung hat gezeigt, dass die Modellfehlerabdeckung bei gezielter Testauswahl offenbar kein allzu nützliches Mass für die Abschätzung der tatsächlichen Fehlerabdeckung ist. Das aufgestellte Modell liefert jedoch belastbare Kriterien für die Konstruktion und Bewertung von Fehlermodellen für eine gezielte Testauswahl.

Operationsprofil

Ein Operationsprofil beschreibt die Nutzungshäufigkeiten der einzelnen Eingaben und hat erheblichen Einfluss auf die Nachweiswahrscheinlichkeiten der Fehler. Für jedes neue Operationsprofil rücken andere Fehler in den Bereich der zufällig nachweisbaren Fehler.

Im günstigsten Fall nimmt die Fehleranzahl mit der $\#OP \cdot K$ -ten Potenz ab und die Zuverlässigkeit mit der $1 + \#OP \cdot K$ -ten Potenz zu:

$$(3.14) \quad \mu_{F.\#OP}(N) = \mu_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{-\#OP \cdot K}$$

$$(3.15) \quad R_{F.\#OP}(N) = R_F(N_1) \cdot \left(\frac{N}{N_1}\right)^{1+\#OP \cdot K}$$

Wie weit dieses Potential nutzbar ist, wird die zukünftige Forschung zeigen.

Testauswahl, Fuzzifizierung

Systeme, die mit unterschiedlichen Operationsprofilen genutzt werden können, sind mit allen wichtigen Operationsprofilen zu testen.

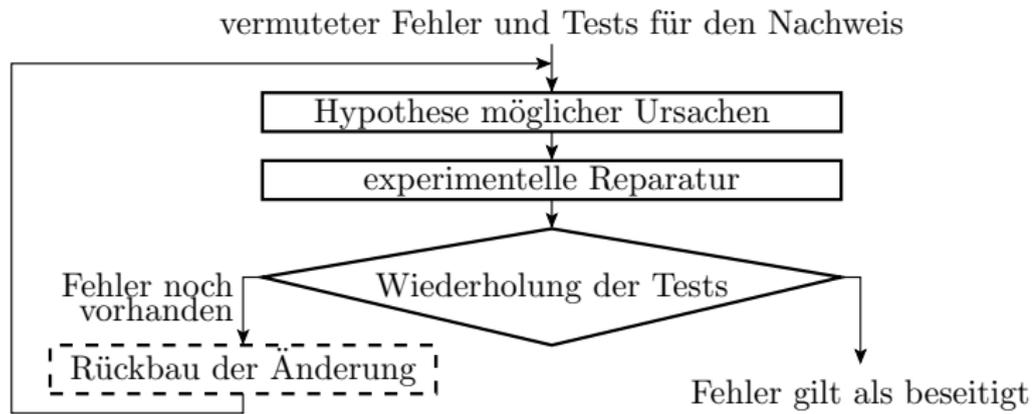
Im modernen Softwareentwurf werden entwurfsbegleitend typische Nutzungsfälle, Grenzfälle, sicherheitskritische Betriebsfälle, ... als symbolische Test gesammelt. Der folgerichtige Weg für die Testauswahl ist die Konfiguration von Zufallszahlgeneratoren mit geeigneten Operationsprofilen, die für die gesammelten »Testabsichten«, mit denen dann größere Mengen geeigneter Testeingaben generiert werden.

Für Software wird die Auswahl von Zufallsbeispielen für eine Testabsicht als Fuzzing bezeichnet.



Fehlerbeseitigung

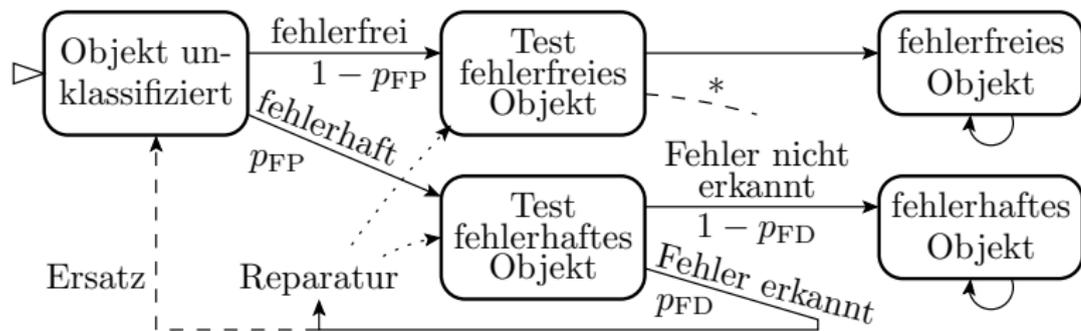
Experimentelle Reparatur nach Abschn. 2.1.1



- Iteration aus Beseitigungsversuchen für hypothetische Fehler und Erfolgskontrolle durch Testwiederholung.
- Beseitigt alle vom Test nachweisbaren Fehler.
- Zur Vermeidung neu entstehender Fehler bei der Reparatur, Rückbau nach erfolglosen Reparaturversuchen.

Voraussetzung: deterministische Fehlerwirkung (siehe Abschn. 2.3.2).

Beseitigung eines Fehlers als Markov-Kette



Ein Fehler i

- ist mit einer Wahrscheinlichkeit p_{FP} vorhanden und
- wird mit einer Wahrscheinlichkeit p_{FD} erkannt.

Für die Fehlerbeseitigung sind zwei Ansätze zu unterscheiden:

- Ersatz Gesamtsystem,
- Reparatur z.B. durch Ersatz fehlerhafter Teilsysteme.

p_{FP}	Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler vorhanden (present) ist.
p_{FD}	Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Probability of fault detection).
*	Zusatzkante für Phantomfehler zur Vereinfachung vernachlässigt.



Ersatz oder Reparatur

Beim Ersatz erkannter defekter Systeme vor dem Einsatz aus demselben Fertigungsprozess

- haben Original- und Ersatzteile dieselbe Ausbeute Y und
- muss das Originalteil im Mittel μ_{Repl} mal ersetzt werden:

$$\mu_{\text{Repl}} = \frac{1}{Y} - 1 \quad (3.16)$$

- Fertigungskosten pro verkauftes System $\approx \frac{1}{Y}$ mal so hoch wie die Kosten für die Fertigung eines einzelnen Systems.

Reparatur: Tausch kleinerer Bausteine, die mit geringerem Risiko defekt sind. Dafür Zusatzaufwand für Lokalisierung, Reparatur, Ersatzteile, ...

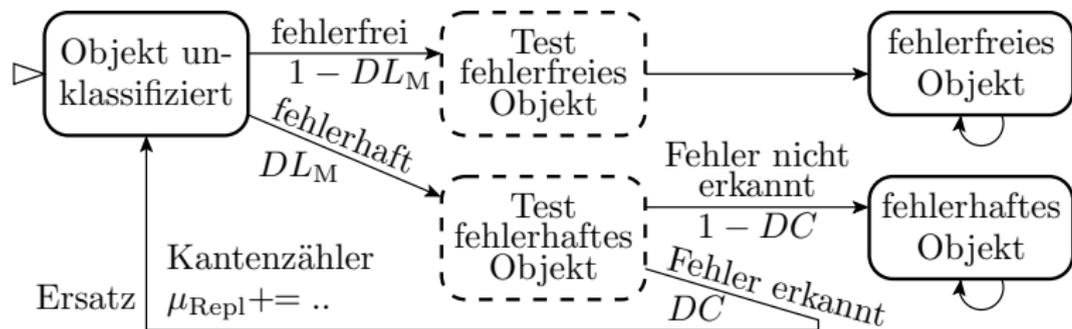
Ersatz ist kostengünstigster bei hoher und Reparatur bei geringer Ausbeute.

μ_{Repl} Zu erwartende Anzahl der Ersetzungen.
 Y Ausbeute (Yield).



Ersatz

Fehlerbeseitigung durch Ersatz

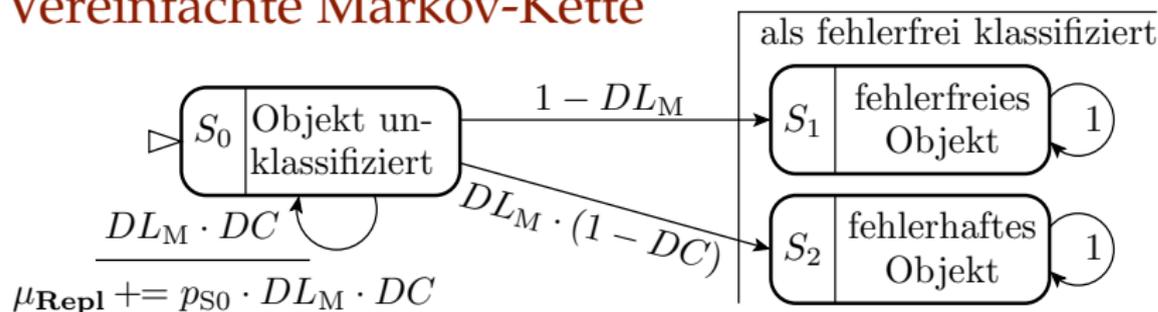


Original- und Ersatzobjekte sind mit Wahrscheinlichkeit DL_M defekt. Je Schritt wird aus unklassifizierten Objekten mit Wahrscheinlichkeit

- $1 - DL_M$ ein fehlerfreies Objekt oder
- $DL_M \cdot (1 - DC)$ ein nicht erkanntes defektes Objekt,
- sonst wird es ersetzt und ist damit wieder unklassifiziert.

DL_M	Defektanteil der Fertigung vor Aussortieren der erkannten defekten Produkte.
DC	Defektdeckung (defect coverage), Anteil der erkennbar defekten Produkte.
μ_{Repl}	Kantenzähler für die zu erwartende Anzahl der Ersetzungen.

Vereinfachte Markov-Kette



Nach Ersatz aller erkennbar defekten Objekte:

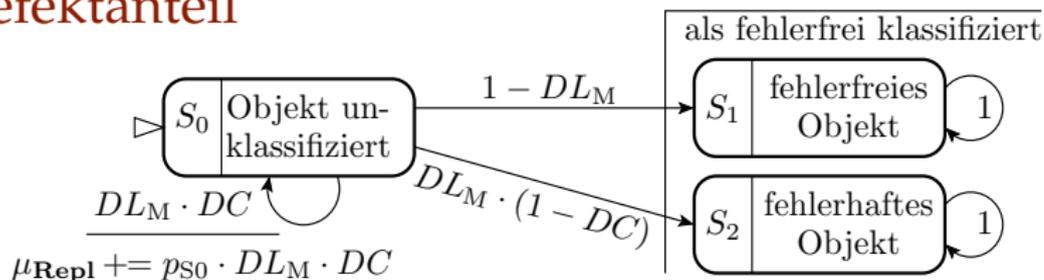
$$\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S_0}) = \lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (DL_M \cdot DC)^{\#Repl} = 0$$

$$\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S_1}) = (1 - DL_M) \cdot \sum_{\#Repl=0}^{\infty} (DL_M \cdot DC)^{\#Repl} \stackrel{\text{SGS}}{=} \frac{1 - DL_M}{1 - DL_M \cdot DC}$$

$$\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S_2}) = DL = 1 - \lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S_1}) = \frac{DL_M \cdot (1 - DC)}{1 - DL_M \cdot DC}$$

DC	Defektabdeckung (defect coverage), Anteil der erkennbar defekten Produkte.
DL_M	Defektanteil der Fertigung vor Aussortieren der erkannten defekten Produkte.
$\#Repl$	Anzahl der Ersetzungen.
SGS	Summe einer geometrischen Reihe: $\sum_{n=0}^{\infty} a_0 \cdot q^n = \frac{a_0}{1-q}$.

Defektanteil



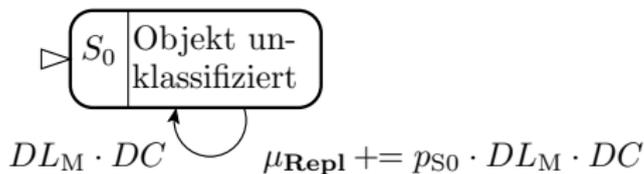
Der Defektanteil nach Aussortieren als Wahrscheinlichkeit, dass ein als fehlerfrei ausgewiesenes Objekt fehlerhaft ist $\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S_2})$ wurde in Abschn. 2.1.6 durch Subtraktion der Anzahl der erkannten defekten Produkte von der Anzahl der defekten und aller Produkte in Zähler und Nenner hergeleitet:

$$(2.7) \quad DL = \frac{DL_M \cdot (1 - DC)}{1 - DL_M \cdot DC}$$

und

DC	Defektabdeckung (defect coverage), Anteil der erkennbar defekten Produkte.
DL_M	Defektanteil der Fertigung vor Aussortieren der erkannten defekten Produkte.
DL	Defektanteil nach Aussortieren oder Ersatz erkannter defekter Produkte.

Zu erwartende Anzahl der Ersetzungen



$$\mu_{\text{Repl}} = \sum_{\#Repl=1}^{\infty} (DL \cdot DC)^{\#Repl} = \frac{DL_M \cdot DC}{1 - DL_M \cdot DC} \quad (3.17)$$

Zur Kontrolle, es muss gelten:

$$(3.16) \quad \mu_{\text{Repl}} = \frac{1}{Y} - 1$$

$$(2.6) \quad Y = 1 - DL_M \cdot DC$$

$$Y = \frac{1}{\mu_{\text{Repl}} + 1} = \frac{1}{\frac{DL_M \cdot DC}{1 - DL_M \cdot DC} + 1} = 1 - DL \cdot DC \checkmark$$

Über Markov-Ketten ergeben sich dieselben Beziehungen wie über die einfachen Verhältnisabschätzungen zuvor (siehe Abschn. 2.1.6).



Beispiel 3.5: Ausbeute und Defektanteil nach Ersatz

Schaltkreisausbeuten Y : 10%, 30%, 50%, 80% und 90%, Defektdeckung DC : 90%, 99%, 99,5% und 99,9%.

- a) *Wie groß ist der Defektanteil DL_M der Schaltkreise nach der Fertigung vor dem Aussortieren?*
- b) *Wie groß ist der Defektanteil DL nach Aussortieren (Ersatz) der erkannten fehlerhaften Schaltkreise in Abhängigkeit von der Ausbeute und der Defektdeckung?*

Y	Ausbeute (Yield).
DC	Defektdeckung (defect coverage), Anteil der erkennbar defekten Produkte.
μ_{Repl}	Zu erwartende Anzahl der Ersetzungen.
DL_M	Defektanteil der Fertigung vor Aussortieren der erkannten defekten Produkte.
DL	Defektanteil nach Aussortieren oder Ersatz erkannter defekter Produkte.



Schaltkreisausbeuten Y : 10%, 30%, 50%, 80% und 90%, Defektabdeckung DC : 90%, 99%, 99,5% und 99,9%.

a) *Wie groß ist der Defektanteil DL_M der Schaltkreise nach der Fertigung vor dem Aussortieren?*

$$(2.6) \quad Y = 1 - DL_M \cdot DC$$

Umstellung nach dem Defektanteil DL_M vor Ersatz erkannter defekter Teile:

$DL_M = \frac{1-Y}{DC}$	$Y = 10\%$...=30%	...=50%	...=80%	...=90%
$DC = 90,0\%$	100,0%	77,8%	55,6%	22,2%	11,1%
$DC = 99,0\%$	90,9%	70,7%	50,50%	20,2%	10,1%
$DC = 99,9\%$	90,1%	70,1%	50,1%	20,0%	10,0%

100% Für $Y = 1 - DC$ sind alle gefertigten Schaltkreise defekt.



Schaltkreisausbeuten Y : 10%, 30%, 50%, 80% und 90%, Defektabdeckung DC : 90%, 99%, 99,5% und 99,9%.

b) *Wie groß ist der Defektanteil DL nach Aussortieren (Ersatz) der erkannten fehlerhaften Schaltkreise in Abhängigkeit von der Ausbeute und der Defektabdeckung?*

$$(2.7) \quad DL = \frac{DL_M \cdot (1 - DC)}{1 - DL_M \cdot DC}$$

$$DL_M = \frac{1 - Y}{DC}; \quad DL = \frac{\frac{1 - Y}{DC} \cdot (1 - DC)}{1 - \frac{1 - Y}{DC} \cdot DC} = \frac{(1 - Y) \cdot (1 - DC)}{Y \cdot DC}$$

	$DC = 90\%$	$DC = 99\%$	$DC = 99,5\%$	$DC = 99,9\%$
$Y = 10\%$	100%	9,09%	4,52%	9.009 dpm
$Y = 30\%$	25,9%	2,36%	1,17%	2.336 dpm
$Y = 50\%$	11,1%	1,01%	5.025 dpm	1.001 dpm
$Y = 80\%$	2,78%	2.525 dpm	1.256 dpm	250 dpm
$Y = 90\%$	1,23%	1.122 dpm	558 dpm	111 dpm

100%
dpm

Für $Y = 1 - DC$ sind alle gefertigten Schaltkreise defekt.
Anzahl der defekten Produkte von einer Million (defecs per million).



Schaltkreisausbeuten Y : 10%, 30%, 50%, 80% und 90%, Defektdeckung DC : 90%, 99%, 99,5% und 99,9%.

$$DL_M = \frac{1-Y}{DC}; \quad DL = \frac{\frac{1-Y}{DC} \cdot (1-DC)}{1 - \frac{1-Y}{DC} \cdot DC} = \frac{(1-Y) \cdot (1-DC)}{Y \cdot DC}$$

DC	90%	99%	99,5%	99,9%
$Y = 30\%$	25,9%	2,36%	1,17%	2.336 dpm
$Y = 50\%$	11,1%	1,01%	5.025 dpm	1.001 dpm
$Y = 80\%$	2,78%	2.525 dpm	1.256 dpm	250 dpm
$Y = 90\%$	1,23%	1.122 dpm	558 dpm	111 dpm

Für den Defektanteil getesteter Schaltkreise DL findet man in der Literatur die Größenordnung 100 ... 1000 dpm. Für $Y = 30\%..80\%$ folgen daraus Defektdeckungen von $DC \gtrsim 99,9\%$.

- Sind die Defektdeckungen wirklich so hoch oder
- sind die Literaturangaben zum Defektanteil zu niedrig?

Diese Frage wird uns weiter begleiten.



Reparatur

Fehlerbeseitigung durch Reparatur

Bei einer Reparatur werden nur die als defekt diagnostizierten Teile getauscht oder modifiziert. Zu ersetzende Teilsysteme:

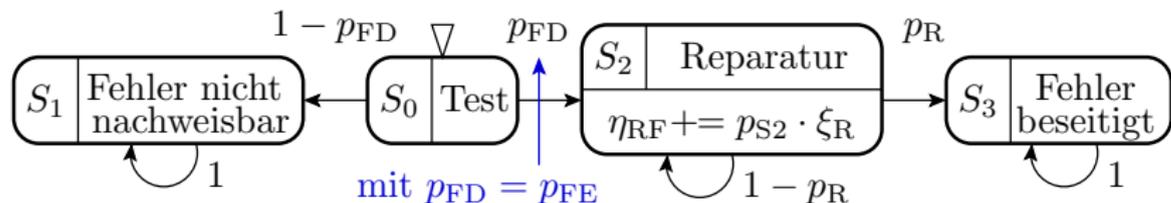
- sind billiger als zu ersetzende Gesamtsysteme und
- haben einen kleineren Defektanteil (weniger Mehrfachersetzungen).

Dafür verlangt Reparatur Zusatzaufwendungen:

- Reparaturgerechter Entwurf (modulare Austauschbarkeit),
- Fehlerlokalisierung und
- Vorhaltung von Organisationseinheiten + Personalkapazität für Reparatur (bei Software für Wartung).

Bei hoher Ausbeute $Y \gg 50\%$ unrentabel.

Markov-Kette für einen vorhandenenen Fehler



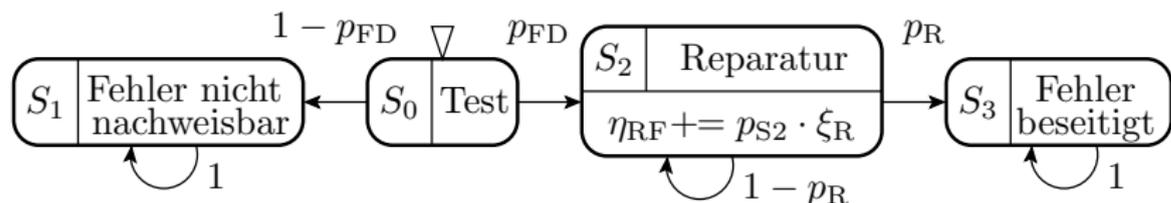
Jeder erkannte Fehler wird beseitigt:

$$p_{FE} = p_{S3} = p_{FD} \cdot p_R + p_{FD} \cdot (1 - p_R) \cdot p_R + p_{FD} \cdot (1 - p_R) \cdot p_R + \dots$$

$$p_{FE} = p_{FD} \cdot p_R \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p_R)^n \stackrel{\text{SGS}}{=} p_{FD}$$

Bei der Beseitigung können jedoch neue Fehler entstehen ...

p_{FD}	Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Probability of fault detection).
p_R	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
p_{S_i}	Wahrscheinlichkeit, dass die Markov-Kette im Zustand S_i ist.
η_{RF}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.
ξ_R	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
$p_{FD} = p_{FE}$	Fehlerbeseitigungswahrscheinlichkeit hier gleich Fehlernachweiswahrscheinlichkeit.
SGS	Summe einer geometrischen Reihe: $\sum_{n=0}^{\infty} a_0 \cdot q^n = \frac{a_0}{1-q}$.



Im Zustand S_2 werden die Wahrscheinlichkeiten für die Entstehung neuer Fehler für alle Reparaturversuche eines zu beseitigenden Fehlers aufsummiert:

$$\eta_{RF} = p_{FD} \cdot \xi_R \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p_R)^n \stackrel{(SGS)}{=} p_{FD} \cdot \frac{\xi_R}{p_R} \quad (3.18)$$

Die Entstehungsrate je beseitigter Fehler ist um den Kehrwert der Beseitigungswahrscheinlichkeit größer:

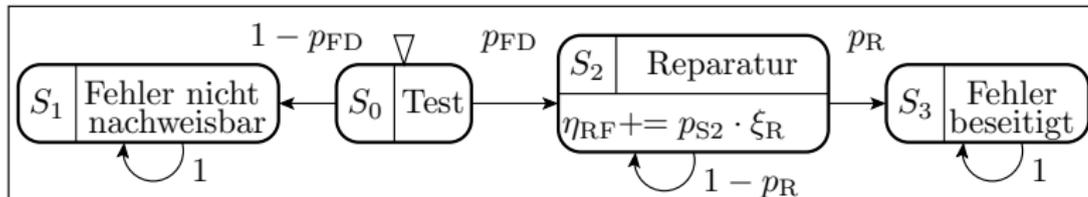
$$\eta_{RE} = \frac{\eta_{RF}}{p_{FD}} = \frac{\xi_R}{p_R} < 1 \quad (3.19)$$

η_{RF}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.
η_{RE}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
p_{FD}	Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Probability of fault detection).
p_R	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
ξ_R	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
SGS	Summe einer geometrischen Reihe: $\sum_{n=0}^{\infty} a_0 \cdot q^n = \frac{a_0}{1-q}$.

Mehrere Fehler aus den Entstehungsprozessen

$$\mu_{FCR} = \mu_{CF} \text{ (Anzahl der Fehler aus Entstehungsprozess)}$$

Wiederhole für alle Fehler aus Entstehung und Reparatur



$$\mu_{FCR} += \eta_{RF} \text{ (+ erwartete Anzahl bei Reparaturen entstehender Fehler)}$$

- Je eine Markov-Kette für jeden zu beseitigenden Fehler.
- Jeder erkennbare Fehler wird beseitigt.

Beim Beseitigung von jedem Fehler entstehen wiederum im Mittel η_{RE} neue Fehler, bei deren Beseitigung wieder je Fehler η_{RE} neue Fehler entstehen, ... Entstehungsrate in »neue Fehler« je beseitigter ursprünglicher Fehler:

$$\eta_{RER} = \eta_{RE} \cdot (1 + \eta_{RE} \cdot (1 + \dots)) = \sum_{i=1}^{\infty} (\eta_{RE})^i \stackrel{(SGS)}{=} \frac{1}{1 - \eta_{RE}} - 1$$



$$\eta_{\text{RER}} = \frac{1}{1-\eta_{\text{RE}}} - 1 = \frac{\eta_{\text{RE}}}{1-\eta_{\text{RE}}} \quad (3.20)$$

Neuentstehungsrate je vorhandener ursprünglicher Fehler:

$$\eta_{\text{RFR}} = p_{\text{FD}} \cdot \eta_{\text{RER}} = p_{\text{FD}} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{RE}}}{1-\eta_{\text{RE}}} \right) \text{ für } \eta_{\text{RE}} < 1 \quad (3.21)$$

Ersatz der Entstehungsrate je vorhandener Fehler durch:

$$(3.19) \quad \eta_{\text{RE}} = \frac{\eta_{\text{RF}}}{p_{\text{FD}}} = \frac{\xi_{\text{R}}}{p_{\text{R}}} < 1$$

$$\eta_{\text{RFR}} = p_{\text{FD}} \cdot \left(\frac{\xi_{\text{R}}}{p_{\text{R}} - \xi_{\text{R}}} \right) \text{ für } p_{\text{R}} > \xi_{\text{R}} \quad (3.22)$$

Zu erwartende Anzahl der nicht beseitigten Fehler:

$$\mu_{\text{F}} = \mu_{\text{CF}} \cdot (1 - p_{\text{FD}}) \cdot (1 + \eta_{\text{RFR}}) \quad (3.23)$$

$$\mu_{\text{F}} = \mu_{\text{CF}} \cdot (1 - p_{\text{FD}}) \cdot \left(1 + p_{\text{FD}} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{RE}}}{1-\eta_{\text{RE}}} \right) \right) \text{ für } \eta_{\text{RE}} < 1 \quad (3.24)$$

η_{RFR}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener ursprünglicher Fehler.
η_{RER}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.
η_{RE}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
p_{R}	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
ξ_{R}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
μ_{F}	Zu erwartende Fehleranzahl nach Test und Beseitigung aller erkennbaren Fehler.
μ_{CF}	Zu erwartende Anzahl der Fehler aus den Entstehungsprozessen.

Fallunterscheidung nach η_{RE} in (Gl. 3.24)

$$(3.24) \quad \mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FD}) \cdot \left(1 + p_{FD} \cdot \left(\frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \right) \right) \text{ für } \eta_{RE} < 1$$

- Viel weniger neu entstehende als beseitigte Fehler ($\eta_{RE} < 0,1$):

$$\mu_F \approx (1 - p_{FD}) \cdot \mu_{CF} \cdot (1 + p_{FD} \cdot \eta_{RE})$$

Die Fehleranzahl μ_F nach der Beseitigungsiteration erhöht sich nur prozentual um $p_{FD} \cdot \eta_{RE}$.

- Beseitigung aller erkennbaren Fehler, ohne dass sich die zu erwartende Fehleranzahl verringert:

$$(1 - p_{FD}) \cdot \left(1 + p_{FD} \cdot \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \right) = 1 \Rightarrow \eta_{RE} = \frac{1}{2 - p_{FD}}$$

Kontrolle:

$$(1 - p) \cdot \left(1 - p \cdot \frac{\frac{1}{2-p}}{\frac{2-p-1}{2-p}} \right) = (1 - p) \cdot \left(1 - \frac{p}{2-p-1} \right) = (1 - p) \cdot \frac{1-p-p}{1-p} = 1$$

η_{RE}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
μ_F	Zu erwartende Fehleranzahl nach Test und Beseitigung aller erkennbaren Fehler.
$p_{FD} = p_{FE}$	Fehlerbeseitigungswahrscheinlichkeit hier gleich Fehlernachweiswahrscheinlichkeit.
Aussprache: ξ : xi, η : eta, μ : my.	



- Erhöhung der zu erwartenden Fehleranzahl bei Beseitigung aller erkennbaren Fehler: $\frac{1}{2-p_{FD}} < \eta_{RE} < 1$
- Mehr neu entstehende als beseitigte Fehler ($\eta_{RE} \geq 1$): Das Reparaturziel, die Beseitigung aller erkennbaren Fehler, ist nicht erreichbar.

Einen vernünftiger Reparaturprozess sollte

- alle erkennbaren Fehler beseitigen,
- eine hohe Fehlernachweiswahrscheinlichkeit p_{FD} und
- eine geringe Fehlerentstehungsrate $\eta_{RE} < 0,1$ in neue je beseitigte Fehler

anstreben.

η_{RE}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
p_{FD}	Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Probability of fault detection).



Gute studentische Programmierleistung

- Fehlerarme Programmierung, z.B. $\mu_{CF} = 5$ (ohne Syntaxfehler).
- Gründlicher Test, z.B. $p_{FD} = 50\%$ mit $N = 10$ Tests.
- Brauchbare Fehlerbeseitigung: etwa 2,5 Reparaturversuche je Fehler ($p_R = 40\%$), ein neuer Fehler je 10 Reparaturversuche ($\zeta_R = 0,1$).
- Formfaktor der Verteilung der MF-Rate $K = 0,4$.

$$\text{Gl. 3.22: } \eta_{RFR} = \frac{p_{FD} \cdot \zeta_R}{p_R - \zeta_R} = \frac{0,5 \cdot 0,1}{0,4 - 0,1} = 0,167$$

$$\text{Gl. 3.23: } \mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FD}) \cdot (1 + \eta_{RFR}) = (1 - 50\%) \cdot 5 \cdot 1,167 = 2,92$$

$$\text{Gl. 2.21: } \zeta_F \approx \frac{K \cdot \mu_F(N)}{N} = \frac{0,4 \cdot 2,92}{10} = 0,11$$

- Im Mittel 2,5 ursprüngliche plus 0,42 bei der Reparatur entstehende nicht erkennbare Fehler.
- Ein weiteres zufälliges Testbeispiel wird mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - \zeta = 89\%$ korrekt abgearbeitet.

Gut genug, um die meisten Prüfungen zu bestehen.



Schlechte Programmierleistung

- Mehr Entwurfsfehler: $\mu_{CF} = 7$ Fehler (ohne Syntaxfehler).
- Weniger Tests: $p_{FD} = 30\%$ mit $N = 5$ Tests.
- Etwa 4 Reparaturversuche je Fehler ($p_R = 25\%$), ein neuer Fehler je 5 Reparaturversuche $\xi_R = 0,2$.
- Formfaktor der Verteilung der MF-Rate $K = 0,4$:

$$\begin{array}{llll}
 \text{Gl. 3.22:} & \eta_{RFR} & = \frac{p_{FD} \cdot \xi_R}{p_R - \xi_R} & = \frac{0,3 \cdot 0,2}{0,25 - 0,2} & = 1,2 \\
 \text{Gl. 3.23:} & \mu_F & = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FD}) \cdot (1 + \eta_{RFR}) & = (1 - 0,3) \cdot 7 \cdot 2,2 & = 10,8 \\
 \text{Gl. 2.21:} & \zeta & \approx \frac{K \cdot \mu_F(N)}{N} & = \frac{0,4 \cdot 10,8}{5} & \rightarrow 1^*
 \end{array}$$

- Im Mittel 4,9 ursprüngliche plus 5,9 bei der Reparatur entstehende nicht erkennbare Fehler.
- Ein weiteres zufälliges Testbeispiel liefert garantiert MF.

Wie Prüfung bestehen? Mehr Testen und Rückbau!

μ_F, ζ

Zu erwartende Fehleranzahl, Fehlfunktionsrate.

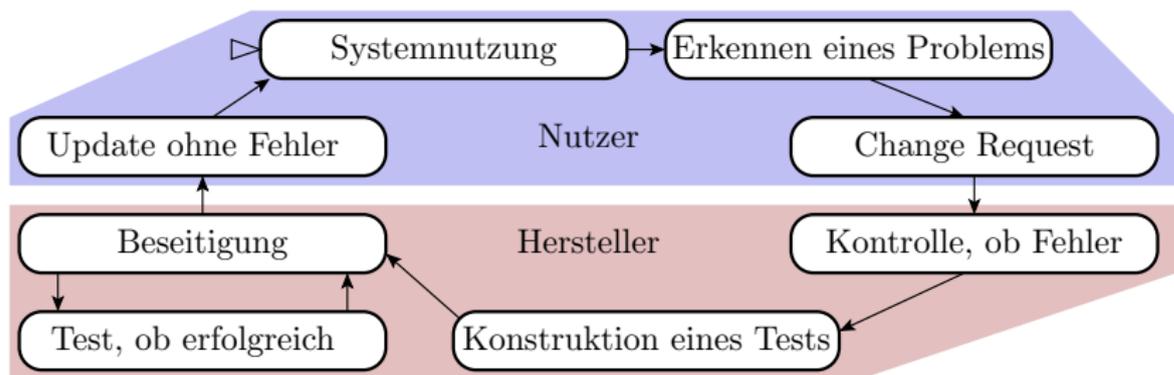
*

Gl. 2.21 wurde für $\zeta \ll 1$ hergeleitet und es gilt immer $\zeta \leq 1$.



Reifeprozesse

Reifen von Produkten (siehe Abschn. 2.2.7)



- Bei einer vermuteten Fehlfunktion stellt der Nutzer eine Änderungsanforderung (Change Request). Alternativ sendet das System einer MF-Report. Vermutete Fehler werden in Schubladen vermuteter gleicher Ursache gesammelt.
- Der Hersteller bevorzugt bei der Beseitigung Schubladen, die Fehler mit häufigen schwerwiegenden MF vermuten lassen.
- Suche von Tests, die den Fehler reproduzierbar nachweisen.
- Experimentelle Reperatur. Installation von Update's.



Effektive Testanzahl, Abnahme Fehleranzahl

Bei Beobachtung einer MF werden die verursachenden Fehler nur mit einer Wahrscheinlichkeit $p_{FE} \ll 1$ beseitigt. Effektive Testanzahl:

$$(2.36) \quad N = \underbrace{p_{FE} \cdot \mu_{NU} \cdot \eta_{SU} \cdot t_{VR}}_{N_{MV}} \cdot (u + u_{V0}) \quad \text{mit } u_{V0} = \frac{N_{V0}}{N_{VM}}$$

Abnahme der zu erwartenden Fehleranzahl, wenn bei der Beseitigung keine neuen Fehler entstehen:

$$(2.38) \quad \mu_F(u) = \mu_F(v) \cdot \left(\frac{u+u_{V0}}{v+u_{V0}} \right)^{-K}$$

N	Effektive Testanzahl, für die alle erkannten Fehler beseitigt werden.
p_{FE}	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler beseitigt wird, wenn er eine MF verursacht.
μ_{NU}	Zu erwartende Nutzeranzahl (Expected number of user).
η_{SU}	Mittlere Anzahl der Service-Leistungen pro Nutzer (user) und Nutzungszeit.
t_{VR}	Versionsintervall, Zeit zwischen der Freigabe aufeinanderfolgender Version.
N_{MV}	Erhöhung der effektive Testanzahl mit jeder Version.
N_{V0}	Effektive Testanzahl von Version 0, d.h. der Fehlerbeseitigungsiteration vor dem Einsatz.
u, v	Versionnummern und Bezugsversionsnummer des reifenden Objekts.
u_{V0}	Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.
$\mu_F(u)$	Zu erwartende Fehleranzahl in Version u .
K	Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ($0 < K < 1$).

Zuverlässigkeit und Sicherheit

Durch digitale Verarbeitung, elektromagnetische Verträglichkeit, Datenübertragung und Speicherung mit Prüfkennzeichen, ... sind Fehlfunktionen durch Störungen oft vernachlässigbar. Wenn das der Fall, ist die Zuverlässigkeit der Kehrwert der Fehlfunktionsrate durch Fehler:

$$(2.42) \quad R_{[\text{MT}]}(u) = R_{[\text{MT}]}(v) \cdot \left(\frac{u+u_{V0}}{v+u_{V0}} \right)^{K+1}$$

Wird bei allen erkannten Problemen ein sicherer Zustand hergestellt wird, nimmt auch die Sicherheit mit Exponent $K + 1$ zu:

$$(2.44) \quad S(u) = S(v) \cdot \left(\frac{u+u_{V0}}{v+u_{V0}} \right)^{K+1}$$

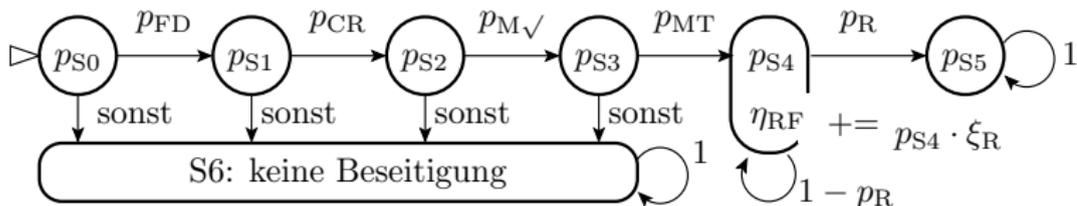
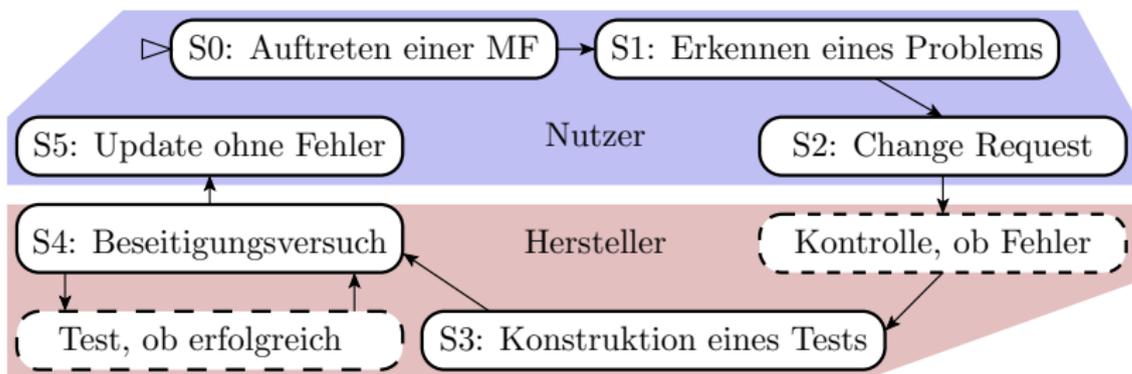
$R_{[\text{MT}]}$	Zuverlässigkeit mit bzw. ohne Fehlfunktionsbehandlung.
u, v	Versionnummern und Bezugsversionsnummer des reifenden Objekts.
u_{V0}	Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.
S_{NDM}	Teilsicherheit bezüglich der nicht erkannten Fehlfunktionen.
K	Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ($0 < K < 1$).



Fortsetzung / Modellerweiterung

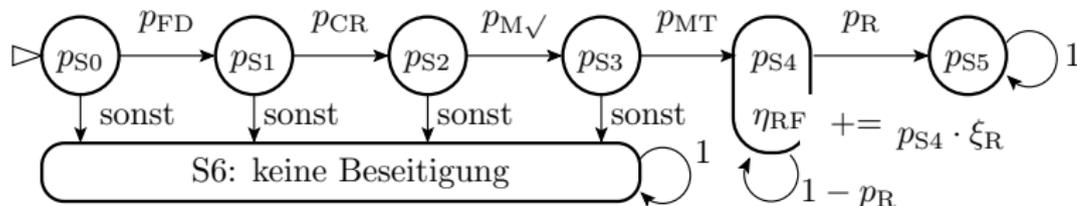
- Reifeprozess als Markov-Kette und
- Berücksichtigung neu entstehender Fehler bei der Fehlerbeseitigung.

Reifeprozess als Markov-Kette



ps_i Wahrscheinlichkeit, dass die Markov-Kette im Zustand S_i ist.
 η_{RF} Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.

Fehlerbeseitigungswahrscheinlichkeit



Unter der Annahme, dass so lange repariert wird, bis der Fehler beseitigt ist, beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler, wenn er eine Fehlfunktion verursacht, beseitigt wird:

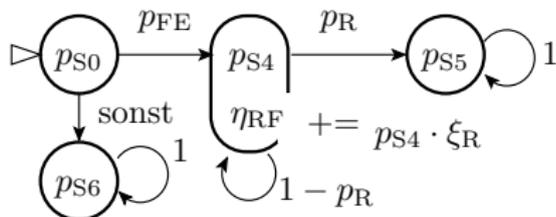
$$p_{FE} = \lim_{n \rightarrow \infty} p_{S5}(n) = p_{S4}(4) = p_{FD} \cdot p_{CR} \cdot p_{M\sqrt{}} \cdot p_{MT} \quad (3.25)$$

Bei jedem Reparaturversuch entsteht mit der Rate ξ_R ein neuer Fehler.

p_{FE}	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler beseitigt wird, wenn er eine MF verursacht.
p_{FD}	Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Probability of fault detection).
p_{CR}	Wahrscheinlichkeit einer Änderungsanforderung (change request) bei beobachteter MF.
$p_{M\sqrt{}}$	Wahrscheinlichkeit, dass der Hersteller (manufacturer) die MF rekonstruieren kann.
p_{MT}	Wahrscheinlichkeit, dass ein Test für den Fehlernachweis gefunden wird.
p_R	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
ξ_R	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.

Fehlerentstehungsrate

Dieselbe Markov-Kette wie für die Fehlerbeseitigung durch Reparatur in Abschn. 3.3.2. Neue je vorhandener und je beseitigter Fehler:



$$(3.18) \quad \eta_{RF} = p_{FD} \cdot \xi_R \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p_R)^n \stackrel{(SGS)}{=} p_{FD} \cdot \frac{\xi_R}{p_R}$$

Die Entstehungsrate je beseitigter Fehler ist um den Kehrwert der Beseitigungswahrscheinlichkeit größer:

$$(3.19) \quad \eta_{RE} = \frac{\eta_{RF}}{p_{FD}} = \frac{\xi_R}{p_R} < 1$$

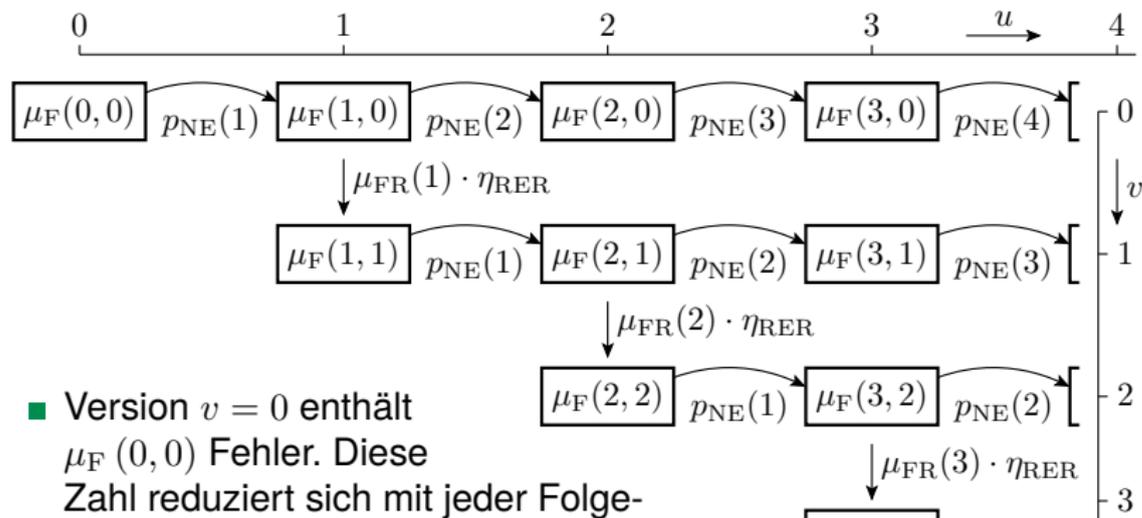
Rekursiv unter Berücksichtigung »neuer Fehler durch neue Fehler«

$$(3.20) \quad \eta_{RER} = \frac{1}{1 - \eta_{RE}} - 1 = \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}}$$

in neue Fehler je beseitigter Fehler. Anzahl der beseitigten Fehler ...

η_{RF}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.
η_{RE}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
η_{RER}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.
p_{FE}	Fehlerbeseitigungswahrscheinlichkeit.
ξ_R	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
p_R	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.

Reifeprozess mit Fehlerneuentstehung



- Version $v = 0$ enthält $\mu_F(0, 0)$ Fehler. Diese Zahl reduziert sich mit jeder Folgeversionen $u > 0$ um eine Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit $p_{NE}(u - v)$ auf $\mu_F(u, 0)$.
- In jeder Version $u > 0$ entstehen neue Fehler. Deren zu erwartende Anzahl nimmt mit jeder Folgeversionen $u > v$ um eine Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit $p_{NE}(u - v)$ ab auf $\mu_F(u, v)$.



Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit

Für gleichlange Update-Intervalle beträgt die effektive Testanzahl für Fehler in Version u , die in Version v entstanden sind, nach (Gl. 2.36):

$$N(u, v) = N_{VM} \cdot (u - v + u_{v0}) \quad (3.26)$$

Die zu erwartende Fehleranzahl aus jeder Version v nimmt mit Version $u \geq v$ seit der Vorversion $u - 1$ nach (Gl. 2.38) ab:

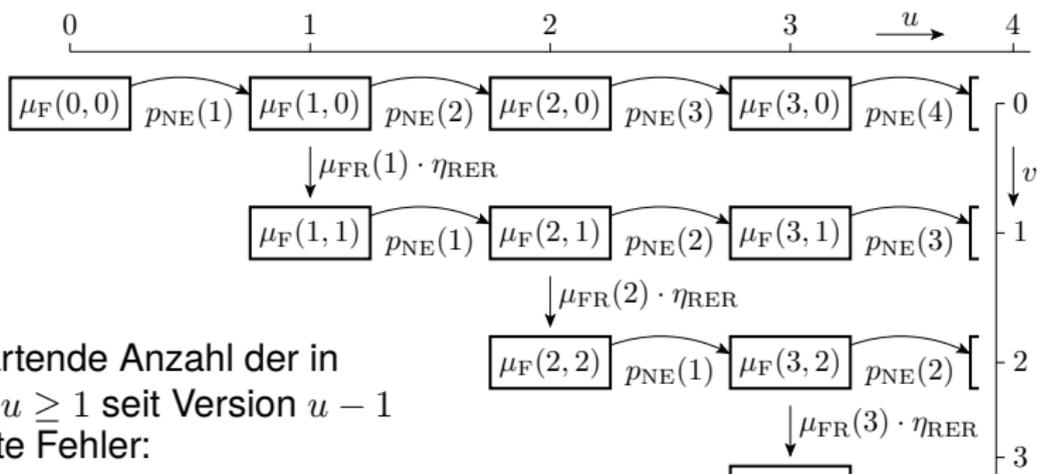
$$\mu_F(u, v) = \mu_F(u - 1, v) \cdot \left(\frac{u - v + u_{v0}}{u - 1 - v + u_{v0}} \right)^{-K} \quad (3.27)$$

Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit $p_{NE}(u - v)$ als relative Verringerung der zu erwartenden Fehleranzahl:

$$p_{NE}(u - v) = \frac{\mu_F(u, v)}{\mu_F(u - 1, v)} = \left(\frac{u - v + u_{v0}}{u - v - 1 + u_{v0}} \right)^{-K} \quad (3.28)$$

$N(u, v)$	Effektiven Testanzahl in Version u für Fehler aus Version v .
N_{MV}	Erhöhung der effektive Testanzahl mit jeder Version.
u, v	Versionnummern und Bezugsversionsnummer des reifenden Objekts.
u_{v0}	Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.
$p_{NE}(u - v)$	Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit für Fehler aus Version v in der Folgeversion von u .
K	Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ($0 < K < 1$).

Neu entstehende Fehler



Zu erwartende Anzahl der in Version $u \geq 1$ seit Version $u - 1$ beseitigte Fehler:

$$\mu_{FR}(u) = \sum_{v=0}^{u-1} (\mu_F(u-1, v) - \mu_F(u, v)) \quad (3.29)$$

Die Anzahl der neu entstehenden Fehler ist η_{RER} mal so groß:

$$\mu_F(u, u) = \eta_{RER} \cdot \mu_{FR}(u) \quad (3.30)$$

Zu erwartende Fehleranzahlen insgesamt

$\mu_F(0, 0)$ gleich erwarteter Fehleranzahl in Version 0

Wiederhole für jede Versionsnummer ab $u = 1$

- Wiederhole für Fehlerentstehungsversion $v = 0$ bis $u - 1$
 - Zu erwartende Anzahl der nicht beseitigten Fehler:

$$(3.27) \quad \mu_F(u, v) = \mu_F(u - 1, v) \cdot \left(\frac{u - v + u_{V0}}{u - 1 - v + u_{V0}} \right)^{-K}$$

- Erwartete Zahl der beseitigten und neu entstehenden Fehler:

$$(3.29) \quad \mu_{FR}(u) = \sum_{v=0}^{u-1} (\mu_F(u - 1, v) - \mu_F(u, v))$$

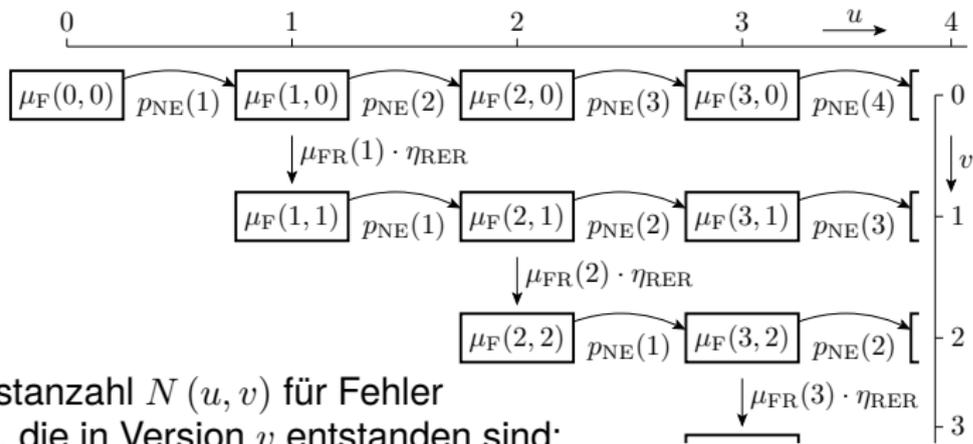
$$(3.30) \quad \mu_F(u, u) = \eta_{RER} \cdot \mu_{FR}(u)$$

- Alle Fehler:

$$\mu_F(u) = \sum_{v=0}^u \mu_F(u, v) \tag{3.31}$$

$\mu_F(u, v)$	Zu erwartende Fehleranzahl in Version u , die in Version v entstanden sind.
u, v	Versionnummern und Bezugsversionsnummer des reifenden Objekts.
u_{V0}	Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.
$\mu_{FE}(u)$	Erwartete Anzahl der in Version u aus Version $u - 1$ beseitigten Fehler.
η_{RER}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.

Fehlfunktionsrate durch Fehler



Effektive Testanzahl $N(u, v)$ für Fehler
in Version u , die in Version v entstanden sind:

$$(3.26) \quad N(u, v) = N_{VM} \cdot (u - v + u_{v0})$$

Wiederhole für jede Versionsnummer ab $u = 0$ (vergl. Gl. 2.21):

$$\zeta_F(u) = K \cdot \sum_{v=0}^u \frac{\mu_F(u, v)}{N(u, v)} \quad (3.32)$$

$\zeta_F(u)$ Gesamte Fehlfunktionsrate durch alle Fehler in Version u .
 K Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ($0 < K < 1$).



Beispiel 3.6: Reifeprozess mit neu entstehenden Fehlern

$\mu_F(0, 0) = 100$, $N_{MV} = 10^6$, $u_{V0} = 0,1$, $\eta_{RER} = 0,1$, $K = 0,4$.

- Zu erwartende Fehleranzahlen $\mu_F(u, v)$ für $u = 0$ bis 5 gereifte Versionen je Entstehungsversion v und insgesamt?*
- MF-Raten $\zeta_F(u, v)$ einzeln und Summe $\zeta_F(u)$?*
- Relative Erhöhung der zu erwartenden Fehleranzahl durch die bei der Beseitigung neu entstehenden Fehler?*
- Relative Erhöhung der MF-Rate durch die neuen Fehler?*

$\mu_F(0, 0)$	Erwartete Anzahl Fehler in Version 0 (erste freigegebene Version).
N_{MV}	Erhöhung der effektive Testanzahl mit jeder Version.
u_{V0}	Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.
η_{RER}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.
K	Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ($0 < K < 1$).
u, v	Versionnummern und Bezugsversionsnummer des reifenden Objekts.
$\mu_F(u, v)$	Zu erwartende Fehleranzahl in Version u , die in Version v entstanden sind.
$\mu_F(u)$	Gesamte zu erwartende Fehleranzahl in Version u .



$\mu_F(0,0) = 100$, $N_{MV} = 10^6$, $u_{V0} = 0,1$, $\eta_{RER} = 0,1$, $K = 0,4$.

a) Zu erwartende Fehleranzahlen $\mu_F(u, v)$ für $u = 0$ bis 5 gereifte Versionen je Entstehungsversion v und insgesamt?

$$(3.27) \quad \mu_F(u, v) = \mu_F(u-1, v) \cdot \left(\frac{u-v+u_{V0}}{u-1-v+u_{V0}} \right)^{-K}$$

$$(3.29) \quad \mu_{FR}(u) = \sum_{v=0}^{u-1} (\mu_F(u-1, v) - \mu_F(u, v))$$

$$(3.30) \quad \mu_F(u, u) = \eta_{RER} \cdot \mu_{FR}(u)$$

Tabelle $\mu_F(u, v)$:

u	0	1	2	3	4	5
$v = 0$	100	38,32	29,59	25,32	22,64	20,75
$v = 1$	0	6,17	2,36	1,82	1,56	1,40
$v = 2$	0	0	1,25	$4,80 \cdot 10^{-1}$	$3,71 \cdot 10^{-1}$	$3,17 \cdot 10^{-1}$
$v = 3$	0	0	0	$5,58 \cdot 10^{-1}$	$2,14 \cdot 10^{-1}$	$1,65 \cdot 10^{-1}$
$v = 4$	0	0	0	0	$3,40 \cdot 10^{-1}$	$1,30 \cdot 10^{-1}$
$v = 5$	0	0	0	0	0	$2,37 \cdot 10^{-1}$
$\mu_F(u)$	100	44,49	33,21	28,18	25,13	22,99



$$\mu_F(0,0) = 100, N_{MV} = 10^6, u_{V0} = 0,1, \eta_{RER} = 0,1, K = 0,4.$$

b) MF-Raten $\zeta_F(u, v)$ *einzeln und Summe* $\zeta_F(u)$?

$$(3.26) \quad N(u, v) = N_{VM} \cdot (u - v + u_{V0})$$

$$(3.32) \quad \zeta_F(u) = K \cdot \sum_{v=0}^u \frac{\mu_F(u, v)}{N(u, v)}$$

Tabelle $\zeta_F(u, v) = \frac{\mu_F(u, v)}{N(u, v)}$:

u	0	1	2	3	4	5
$v = 0$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$5,64 \cdot 10^{-6}$	$3,27 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$
$v = 1$	0	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$8,59 \cdot 10^{-7}$	$3,48 \cdot 10^{-7}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$
$v = 2$	0	0	$5,02 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$7,07 \cdot 10^{-8}$	$4,10 \cdot 10^{-8}$
$v = 3$	0	0	0	$2,23 \cdot 10^{-6}$	$7,78 \cdot 10^{-8}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$
$v = 4$	0	0	0	0	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$4,73 \cdot 10^{-8}$
$v = 5$	0	0	0	0	0	$9,48 \cdot 10^{-7}$
$\zeta_F(u)$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$2,83 \cdot 10^{-6}$

$\zeta_F(u, v)$ MF-Rate in Version u verursacht von Fehlern die in Version v entstanden sind.

$\zeta_F(u)$ Gesamte Fehlfunktionsrate in Version u .



$$\mu_F(0,0) = 100, N_{MV} = 10^6, u_{V0} = 0,1, \eta_{RER} = 0,1, K = 0,4.$$

c) *Relative Erhöhung der zu erwartenden Fehleranzahl durch die bei der Beseitigung neu entstehenden Fehler?*

u	0	1	2	3	4	5
$v = 0$	100	38,32	29,59	25,32	22,64	20,75
$v = 1$	0	6,17	2,36	1,82	1,56	1,40
$v = 2$	0	0	1,25	$4,80 \cdot 10^{-1}$	$3,71 \cdot 10^{-1}$	$3,17 \cdot 10^{-1}$
$v = 3$	0	0	0	$5,58 \cdot 10^{-1}$	$2,14 \cdot 10^{-1}$	$1,65 \cdot 10^{-1}$
$v = 4$	0	0	0	0	$3,40 \cdot 10^{-1}$	$1,30 \cdot 10^{-1}$
$v = 5$	0	0	0	0	0	$2,37 \cdot 10^{-1}$
$\mu_F(u)$	100	44,49	33,21	28,18	25,13	22,99
$\frac{\mu_F(u)}{\mu_F(u,0)}$		1,161	1,122	1,113	1,110	1,108

Erhöhung etwa um die zu erwartende Fehlerentstehungsrate η_{RER} in bei der Beseitigung neu entstehende Fehler je beseitigter Fehler.

$\mu_F(u,0)$ Zu erwartende Fehleranzahl aus Version 0, die in Version u nicht beseitigt sind.



$$\mu_F(0,0) = 100, N_{MV} = 10^6, u_{V0} = 0,1, \eta_{RER} = 0,1, K = 0,4.$$

d) *Relative Erhöhung der MF-Rate durch die neuen Fehler?*

u	0	1	2	3	4	5
$v = 0$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$5,64 \cdot 10^{-6}$	$3,27 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$
$v = 1$	0	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$8,59 \cdot 10^{-7}$	$3,48 \cdot 10^{-7}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$
$v = 2$	0	0	$5,02 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$7,07 \cdot 10^{-8}$	$4,10 \cdot 10^{-8}$
$v = 3$	0	0	0	$2,23 \cdot 10^{-6}$	$7,78 \cdot 10^{-8}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$
$v = 4$	0	0	0	0	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$4,73 \cdot 10^{-8}$
$v = 5$	0	0	0	0	0	$9,48 \cdot 10^{-7}$
$\zeta_F(u)$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$2,83 \cdot 10^{-6}$
$\frac{\zeta_F(u)}{\zeta_F(u,0)}$		2,78	2,04	1,84	1,77	1,74

Erhöhung um Größenordnung η_{RFR}/u_{V0} . Es sind zwar insgesamt nur grob geschätzt $\eta_{RFR} = 10\%$ mehr Fehler. Aber die jüngsten Fehler davon haben nur eine effektive Testanzahl $N(u, u) = 0,1 \cdot N_{MV}$ und alle anderen Fehler von mindestens von N_{MV} .

$\zeta_F(u, 0)$ MF-Rate in Version u durch Fehlern aus Version 0 (erste freigegebene Version).



Zusammenfassung

Fehlerbeseitigung, Ersatz

Fehlerbeseitigung mit Erfolgskontrolle beseitigt alle erkennbaren Fehler. Bei hoher Ausbeute ist Ersatz und bei geringer Ausbeute Reparatur günstiger.

Für Ersatz ergeben sich über Markov-Ketten dieselben Beziehungen wie über einfache Verhältnisabschätzungen (siehe Abschn. 2.1.6):

$$(2.7) \quad DL = \frac{DL_M \cdot (1 - DC)}{1 - DL_M \cdot DC}$$

$$(3.17) \quad \mu_{\text{Repl}} = \sum_{\# \text{Repl}=1}^{\infty} (DL \cdot DC)^{\# \text{Repl}} = \frac{DL_M \cdot DC}{1 - DL_M \cdot DC}$$

$$(3.16) \quad \mu_{\text{Repl}} = \frac{1}{Y} - 1$$

Reparatur

Bei einer Reparaturiteration bis Erfolg werden auch alle nachweisbaren Fehler beseitigt, aber es entstehen neue Fehler.

- Fehlerentstehungsrate je vorhandener Fehler:

$$(3.18) \quad \eta_{RF} = p_{FD} \cdot \xi_R \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p_R)^n \stackrel{(SGS)}{=} p_{FD} \cdot \frac{\xi_R}{p_R}$$

- Fehlerentstehungsrate je beseitigter Fehler:

$$(3.19) \quad \eta_{RE} = \frac{\eta_{RF}}{p_{FD}} = \frac{\xi_R}{p_R} < 1$$

- Fehlerentstehungsrate je beseitigter ursprünglicher Fehler:

$$(3.20) \quad \eta_{RER} = \frac{1}{1 - \eta_{RE}} - 1 = \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}}$$

- Fehlerentstehungsrate je vorhandener ursprünglicher Fehler:

$$(3.21) \quad \eta_{RFR} = p_{FD} \cdot \eta_{RER} = p_{FD} \cdot \left(\frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \right) \text{ für } \eta_{RE} < 1$$

Zu erwartende Anzahl der nicht beseitigten Fehler:

$$(3.23) \quad \mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FD}) \cdot (1 + \eta_{RFR})$$



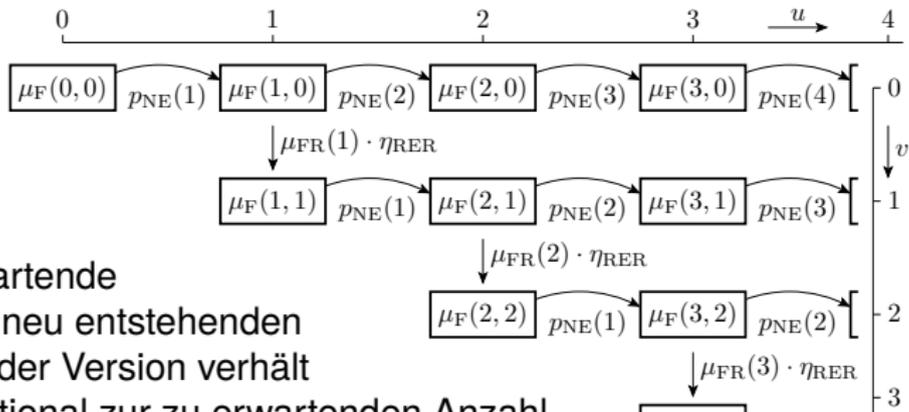
Bei geringer Fehlerentstehungsrate $\eta_{RE} \lesssim 0,1$ neuer je beseitigter Fehler und hohe Fehlererkennungswahrscheinlichkeit p_{FD} erhöht »Reparatur« die Fehleranzahl gegenüber der Anzahl der ursprünglichen nicht erkennbaren Fehler nur prozentual um $p_{FD} \cdot \eta_{RE}$.

Bei kleiner Erkennungswahrscheinlichkeit p_{FD} und deutlich mehr als ein neu entstehender je 10 beseitigte Fehler kaum Verringerung oder sogar Vergrößerung der Fehleranzahl durch die Reparaturiteration. Deshalb ist Rückbau nach erfolglosen Reparaturversuchen so wichtig.

Wenn die Testanzahl nicht deutlich größer als die zu erwartenden Fehleranzahl nach der Beseitigungsiteration ist, wird oft nicht einmal ein neues zufällig gewähltes Testbeispiel richtig abgearbeitet.

u_{V0} Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.
 η_{RE} Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.

Reifeprozess mit Fehlerentstehung



- Die zu erwartende Anzahl der neu entstehenden Fehler in jeder Version verhält sich proportional zur zu erwartenden Anzahl der beseitigten Fehler seit der Vorversion.
- Die Fehlerbeseitigungswahrscheinlichkeit ist abhängig von der Erhöhung der effektiven Testanzahl seit der Entstehungsversion.
- Die Fehlfunktionrate je noch vorhandener Fehler ist proportional zum Kehrwert der effektiven Testanzahl seit Fehlerentstehung.

Die Modellierung verlangt, dass Fehlerentstehung und Beseitigung für jede Entstehungsversion getrennt berechnet werden.

Die einzelnen Berechnungsbausteine

Die Beseitigungswahrscheinlichkeit für Fehler in Version u , die in Version v entstanden sind:

$$(3.26) \quad N(u, v) = N_{VM} \cdot (u - v + u_{V0})$$

$$(3.27) \quad \mu_F(u, v) = \mu_F(u - 1, v) \cdot \left(\frac{u - v + u_{V0}}{u - 1 - v + u_{V0}} \right)^{-K}$$

$$(3.28) \quad p_{NE}(u - v) = \frac{\mu_F(u, v)}{\mu_F(u - 1, v)} = \left(\frac{u - v + u_{V0}}{u - v - 1 + u_{V0}} \right)^{-K}$$

Fehlerentstehungsrate je beseitigter Fehler, die rekursive Beseitigung eingeschlossen:

$$(3.20) \quad \eta_{RER} = \frac{1}{1 - \eta_{RE}} - 1 = \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}}$$

Fehlfunktionsrate durch die nicht beseitigten Fehler:

$$(3.32) \quad \zeta_F(u) = K \cdot \sum_{v=0}^u \frac{\mu_F(u, v)}{N(u, v)}$$

Simulation mit Beispielwerten

Die Berücksichtigung, dass bei jeder Beseitigung einer Fehlers von einer zur nächsten Version im Mittel $\eta_{\text{RER}} < 1$ neue Fehler entstehen erhöht grob überschlagen

- die Fehleranzahl anteilmäßig um η_{RER} und
- die Fehlerfunktionsrate um $\approx \eta_{\text{RFR}}/u_{\text{V0}}$.

Aufgrund der $\leq u_{\text{V0}}$ -fachen Reifedauer gegenüber Fehlern früherer Versionen, haben die neuen Fehler die $\geq u_{\text{V0}}$ -fache Fehlfunktionsrate. Bei geringem relativen Testaufwand u_{V0} beobachtet der Nutzer in jeder Version hauptsächlich Fehlfunktionen durch neue Fehler.

Die Wahrnehmung neuen Fehler wird durch die Nutzerlernprozesse verstärkt. Nutzer müssen für die schlimmsten neuen Fehler jeder Version Workarounds suchen, die in der Folgeversion wieder überflüssig sind.

Gute Nutzerakzeptanz von Reifeprozessen verlangt einen angemessenen Testaufwand u_{V0} vor jeder Versionsfreigabe.

u_{V0}	Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.
η_{RER}	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.



Fehlerentstehung



Abschätzung der zu erwartenden Fehleranzahl

Wir hatten bisher die zu erwartende Anzahl der Fehler über Metriken aus Systemgröße oder Entstehungsaufwand abgeschätzt.

- Programmgröße: $C = 800 \text{ NLOC}$
- Fehlerentstehungsrate: $\xi = 20 \dots 80 \frac{F}{1.000 \text{ NLOC}}$
- zu erwartende Anzahl der entstehenden Fehler: 16 bis 64

In Abschn. 2.3.1 wurde angedeutet, dass Fehlerentstehung auch als System aus Entstehungsschritten und Beseitigungsiterationen modellierbar ist, was viel mehr Ansatzpunkte für die Fehlervermeidung bietet. Hierzu folgen jetzt zwei Beispiele:

- Modellierung einer linearen Folge von Entstehungsschritten mit einem Zählwertzuordnungsgraphen.
- Modellierung von Phasenmodellen durch Markov-Ketten mit Kantenzählern für die Fehlerentstehung.

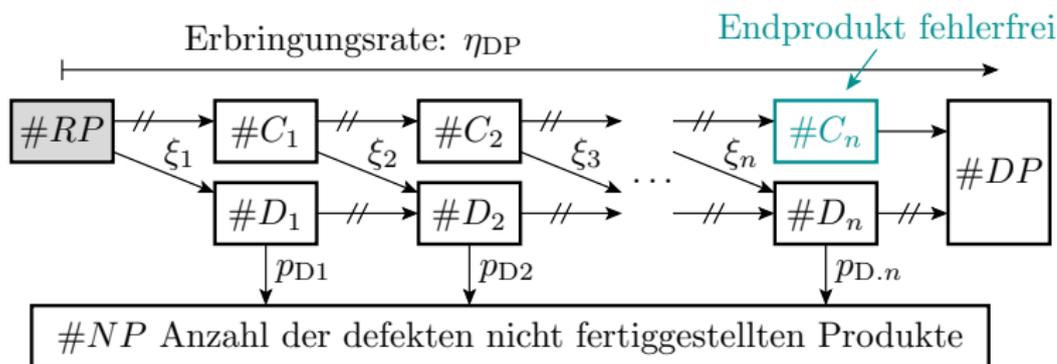
μ_{CF}	Zu erwartende Anzahl der Fehler aus den Entstehungsprozessen.
ξ	Fehlerentstehungsrate.
C	Metrik für den Entstehungsaufwand oder die Größe des Produkts.



Entstehungsprozesse mit Kontrollen

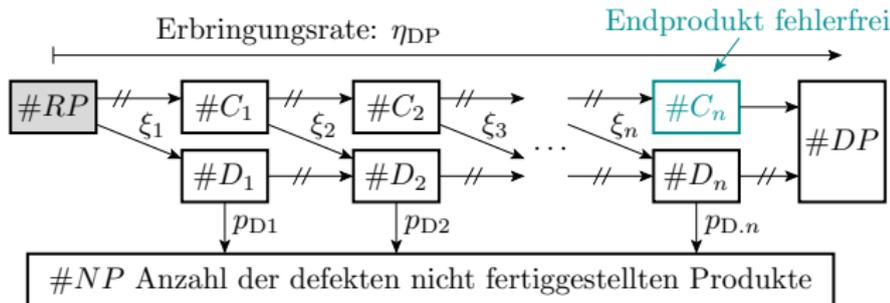
Lineare Folge von Entstehungsschritten. In jedem Schritt

- werden Entstehungsleistungen erbracht, und bei denen mit einer kleinen Rate $\xi_i \ll 1$ Fehler entstehen.
- Entstandene Fehler werden mit Wahrscheinlichkeit $p_{D,i}$ erkannt.



#...	Anzahl (Zählwert) der Ereignisse ...
RP	Beauftragung, ein Produkt herzustellen.
C_i, D_i	Schritt 1 bis i korrekt ausgeführt, Produkt nach Schritt i fehlerhaft.
PD, NP	Produkt erzeugt, kein Produkt erzeugt.
$\xi_i, p_{D,i}$	Fehlerentstehungsrate und Fehlernachweiswahrscheinlichkeit Schritt i .

Erbringungsrate des Entstehungsprozesses



Der skizzierte Entstehungsprozess bricht für ein Teil der Aufträge nach einem der Schritte mit einem erkannten Fehler ab. Erbringungsrate fertiger Produkt je Fertigungsauftrag:

$$\eta_{DP} = \frac{\#DP}{\#RP} \Big|_{ACR} = \prod_{i=1}^n (1 - \xi_i) \quad \leftarrow \text{korrekt gefertigt} \quad \downarrow \text{nicht erkannte Fehler}$$

$$+ \xi_1 \cdot \prod_{i=1}^n (1 - p_{D.i}) + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{j=1}^i (1 - \xi_j) \cdot \xi_{i+1} \cdot \prod_{j=i+1}^n (1 - p_{D.i}) \right) \quad (3.33)$$

η_{DP} Erbringungsrate fertiger Produkte.
 $\xi_i, p_{D.i}$ Fehlerentstehungsrate und Fehlernachweiswahrscheinlichkeit Schritt i .

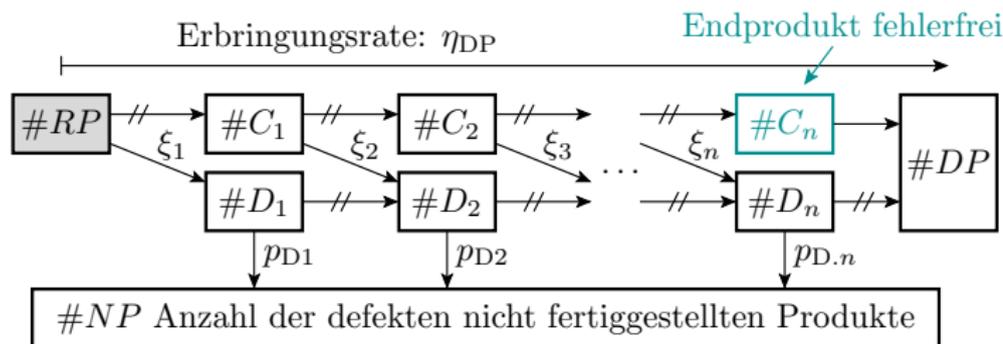


4. Fehlerentstehung

Die Erbringungsrate des Entstehungsprozesses ist sicher eine wichtige Kenngröße für die Rentabilität des Prozesses und hängt vor allem von den Fehlerentstehungsraten der Prozessschritte ab, aber auch von den Erkennungswahrscheinlichkeiten der Kontrollen während und nach den Prozessschritten.

Bei zu geringer Erbringungsrate sind Reparaturiterationen zu ergänzen. Die lassen sich allerdings nicht mit Zählwertzuordnungsgraphen beschreiben.

Fehleranteil

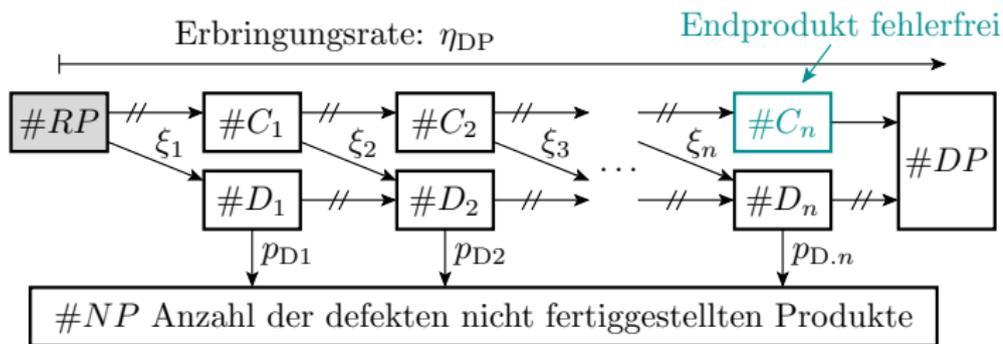


Von den $\#DP$ fertig gestellten Produkten sind $\#C_n$ Produkte fehlerfrei. Fehleranteil als Anteil der fertiggestellten Produkte mit Fehlern (Gl. 2.4):

$$DL_M = 1 - \frac{\#C_n}{\#DP} \Big|_{ACR} = \frac{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \xi_i)}{\eta_{DP}} \quad (3.34)$$

DL_M Defektanteil der Fertigung vor Aussortieren der erkannten defekten Produkte.
 $\xi_i, p_{D.i}$ Fehlerentstehungsrate und Fehlernachweiswahrscheinlichkeit Schritt i .

4. Fehlerentstehung

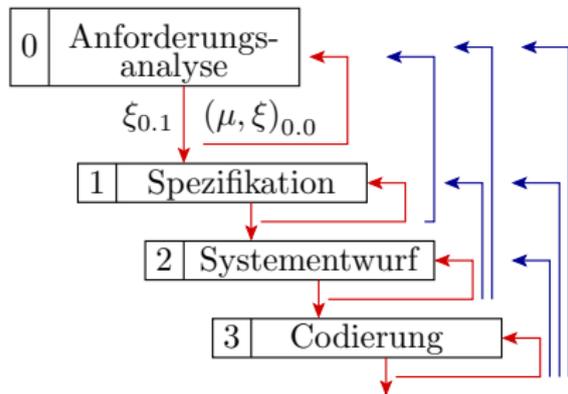


Für einen geringen Fehleranteil sind vor allem gute Kontrollen wichtig. Das schägt die Brücke, dass Systeme dem Entstehungsfluss folgend vielen Kontrollen zu unterziehen sind (siehe Abschn. 2.1.4 *Vielfalt der Tests*).

RP	Beauftragung, ein Produkt herzustellen.
C_i, D_i	Schritt 1 bis i korrekt ausgeführt, Produkt nach Schritt i fehlerhaft.
PD, NP	Produkt erzeugt, kein Produkt erzeugt.



Entstehungsprozesse mit Rückgriffen



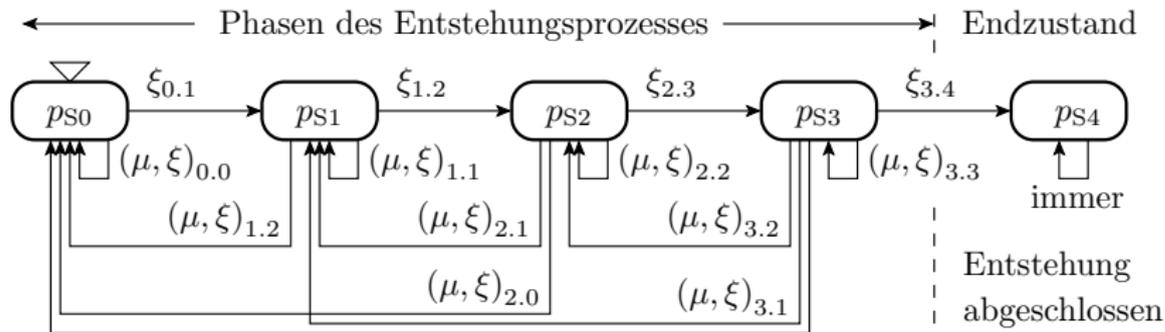
- Phasenabschluss
- ↪ Nachbesserung akt. Phase
- ↪ Rückgriff, Nachbesserung abgeschlossene Phasen

$(\mu, \xi)_{i,j}$ Kantenparameter

- nach Zustand $j \leq i$
- von Zustand i
- Fehlerentstehungsrate $\xi_{i,j}$ bei Kantenübergang
- erwartete Nachbesserungsanzahl je Vorwärtsschritt

- Entstehungsablauf als Folge von Entstehungsphasen.
- In jeder Phase gibt es Nachbesserungen, in Ausnahmen auch Nachbesserungsrückgriffe auf bereits abgeschlossene Phasen.
- Dem Phasenübergängen, Nachbesserungen und Rückgriffen sind Fehlerentstehungsraten $\xi_{i,j}$ zugeordnet.

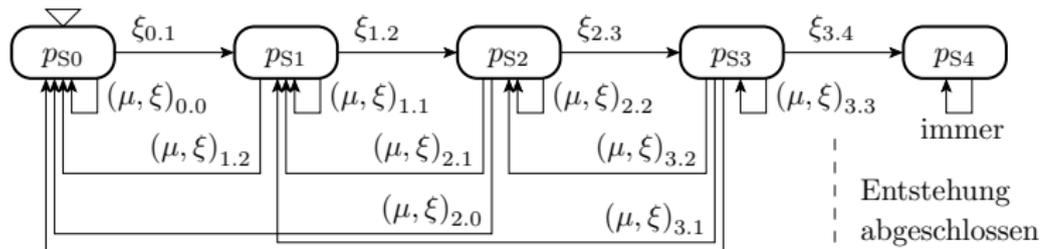
Modellierung als Markov-Kette



Die Anzahl der erwarteter Rückgriff $\mu_{i,j}$ zur Nachbesserung und Fehlerbeseitigung je Übergang zur nächsten Entwurfsphase ist anschaulicher als die dafür einzusetzenden Übergangswahrscheinlichkeiten.

ps_i	Wahrscheinlichkeit, dass Prozessphase i abgearbeitet wird.
$(\mu, \xi)_{i,j}$	Erwarteter Übergangszahl $\mu_{i,j}$ und Fehlerentstehungsrate $\xi_{i,j}$.
$\xi_{i,j}$	Erzeugungsrate nicht erkennbarer Fehler beim Kantenübergang $i \rightarrow j$.
$\mu_{i,j}$	Erwartete Nachbesserungszahl bzw. Rückgriffanzahl je Vorwärtsschritt.
$\#Phs$	Anzahl der abzuarbeitenden Prozessphasen.

4. Fehlerentstehung



- Übergangswahrscheinlichkeit Nachbesserungen und Rückgriffe:

$$p_{i,j} = \frac{\mu_{i,j}}{1 + \sum_{j=0}^i \mu_{i,j}} \text{ mit } j \leq i$$

- Übergangswahrscheinlichkeit Phasenabschluss (Vorwärtsschritt):

$$p_{i,i+1} = \frac{1}{1 + \sum_{j=0}^i \mu_{i,j}}$$

- Anzahl der in Simulationsschritt n entstehenden Fehler:

$$\mu_{FS} = \sum_{i=0}^{\#Phs-1} p_{PS.i}(n) \cdot \left(\xi_{i,i+1} \cdot p_{i,j+1}(n) + \sum_{j=0}^i \xi_{i,j} \cdot p_{i,j}(n) \right)$$

$p_{i,j}$

Übergangswahrscheinlichkeit von Phase i nach Phase j .

μ_{FS}

Zu erwartende Anzahl aller im aktuellen Simulationsschritt entstehenden Fehler.

$\xi_{i,j}$

Erzeugungsrates nicht erkennbarer Fehler beim Kantenübergang $i \rightarrow j$.

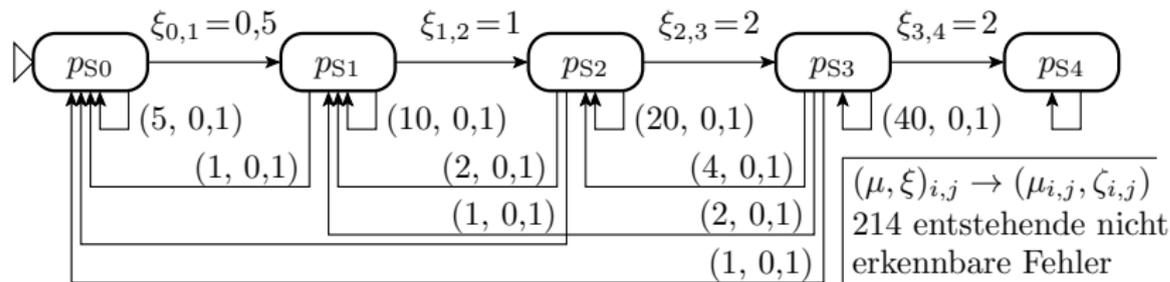
$\#Phs$

Anzahl der abzuarbeitenden Prozessphasen.



4. Fehlerentstehung

Beispiel



Übergangsmatrix der Markov-Kette und Zunahme der Fehleranzahl:

$$\begin{pmatrix} ps_0 \\ ps_1 \\ ps_2 \\ ps_3 \\ ps_4 \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} \frac{5}{6} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & \frac{1}{48} & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{12}{12} & \frac{24}{24} & \frac{48}{48} & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} & \frac{24}{24} & \frac{48}{4} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{24} & \frac{40}{48} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{48}{48} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ps_0 \\ ps_1 \\ ps_2 \\ ps_3 \\ ps_4 \end{pmatrix}_n$$

$$\mu_F(n) = \mu_F(n-1) + \mu_{FS}$$

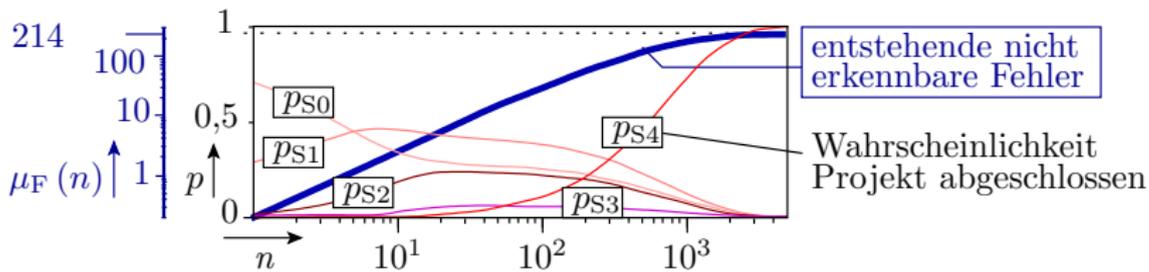
- ps_i Wahrscheinlichkeit, dass Prozessphase i abgearbeitet wird.
- $\mu_F(n)$ Akkumulierte Anzahl aller bis Simulationsschritt n entstehender Fehler.
- n Schrittnummer der Simulation der Markov-Kette.



Ergebnis der Beispielsimulation

$$\begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S1} \\ p_{S2} \\ p_{S3} \\ p_{S4} \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} \frac{5}{6} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & \frac{1}{48} & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{10}{12} & \frac{2}{24} & \frac{2}{48} & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} & \frac{20}{24} & \frac{4}{48} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{24} & \frac{48}{40} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{48} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{S0} \\ p_{S1} \\ p_{S2} \\ p_{S3} \\ p_{S4} \end{pmatrix}_n$$

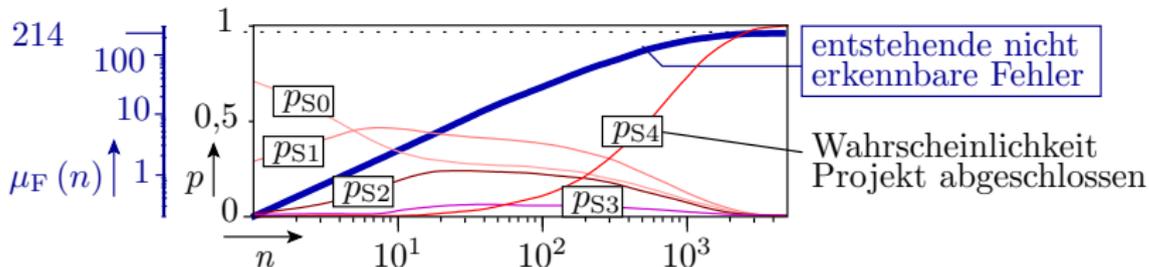
$$\mu_F(n) = \mu_F(n-1) + \mu_{FS}(n)$$



- p_{Si} Wahrscheinlichkeit, dass sich der Entstehungsprozess in Phase i befindet.
- $\mu_F(n)$ Akkumulierte Anzahl aller bis Simulationsschritt n entstehender Fehler.
- n Schrittnummer der Simulation der Markov-Kette.



Ergebnis der Beispielsimulation



Der zu erwartende Phasenfortschritt und die stetige Zunahme der zu erwartenden Fehleranzahl sind gut zu erkennen.

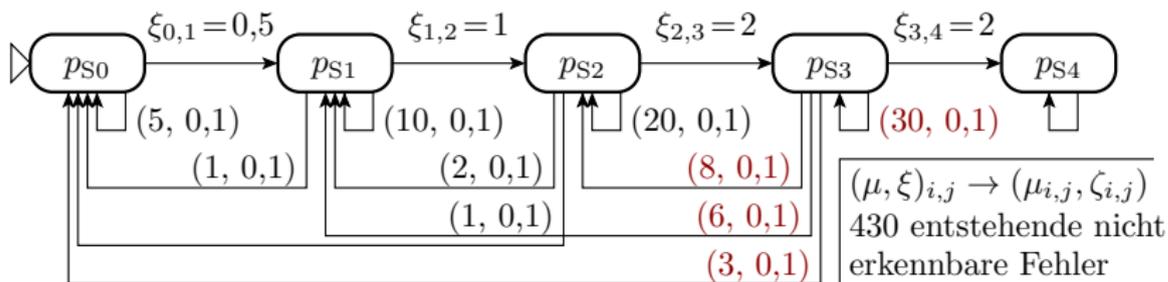
Die Wahrscheinlichkeitsverhältnisse, wie viel Arbeit auf jede Phase entfällt, sind noch nicht typisch, aber man hat die Möglichkeit durch Variation von Modellstruktur und Modellparametern Anpassungen vorzunehmen.

Die Fehlerentstehungsrate als bedingte Wahrscheinlichkeit für den Übergang in S_4 wenn noch nicht in S_4 scheint recht konstant zu sein und am Ende sind 214 Fehler zu erwarten.

Bei einer Erhöhung der modellierten Rückgriffhäufigkeit und -tiefe müssten deutlich mehr Fehler entstehen.



4. Fehlerentstehung



Erhöhung der Rückgriffwahrscheinlichkeiten aus Stufe S_3 :

$$\begin{array}{lcl}
 p_{3.3} : & \frac{40}{48} & \rightarrow \frac{30}{48} \\
 p_{3.2} : & \frac{4}{48} & \rightarrow \frac{8}{48} \quad (\text{verdoppelt}) \\
 p_{3.1} : & \frac{2}{48} & \rightarrow \frac{6}{48} \quad (\text{verdreifacht}) \\
 p_{3.0} : & \frac{1}{48} & \rightarrow \frac{3}{48} \quad (\text{verdreifacht}) \\
 \mu_{CF} : & 214 & \rightarrow 450 \quad (\text{mehr als verdoppelt})
 \end{array}$$

Mehr als Verdopplung von Fehleranzahl und Entstehungsaufwand.

Stufenmodelle sollten Rückgriffe über mehrere Stufen beschränken. Nicht verbieten, sondern z.B. Genehmigungsverfahren, die mit der Rückgrifftiefe »undurchlässiger« werden.



Zusammenfassung

An zwei Beispielen wurde gezeigt, wie sich Wissen über den Entstehungsfluss für eine genauere Modellierung der Fehlerentstehung und letztendlich auch der Fehlervermeidung nutzen lässt.

Für lineare Entstehungsabläufe aus Schritten und Kontrollen eignen sich Zählwertzuordnungsgraphen, aus denen sich die Produkterbringungsrate und der Fehleranteil der entstehenden Produkt ablesen lassen.

Prozesse mit Nachbesserungsiterationen lassen sich durch Markov-Ketten mit Kantenzählern beschreiben. Am Beispiel eines parametrieren Stufenmodells wurde gezeigt, wie sich die Zustandswahrscheinlichkeiten zu immer fortgeschritteneren Phasen verschieben und die zu erwartende Anzahl der entstehenden Fehler zunimmt.

Häufige Rückgriffe über viele Stufen erhöhen den Entstehungsaufwand und die zu erwartende Fehleranzahl erheblich. Deshalb sollten konkrete Stufenmodelle für Rückgriffe über viele Stufen hemmende Maßnahmen vorsehen.