

# Test und Verlässlichkeit 3: Themenspezifische Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung

Prof. G. Kemnitz

6. Oktober 2025

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Wahrscheinlichkeit</b>	<b>1</b>	2.1	Nachweis & Zuverlässigkeit . . . . .	17
1.1	Definition, Abschätzung . . . . .	1	2.2	Service mit Gedächtnis . . . . .	19
1.2	Verkettete Ereignisse . . . . .	2	2.3	Fehler und Modellfehler . . . . .	21
1.3	CVA-Graph . . . . .	6	<b>3</b>	<b>Fehlerbeseitigung</b>	<b>26</b>
1.4	Fehlerbäume . . . . .	8	3.1	Ersatz . . . . .	27
1.5	Markov-Ketten . . . . .	10	3.2	Reparatur . . . . .	30
			3.3	Reifeprozesse . . . . .	33
<b>2</b>	<b>Fehlernachweis</b>	<b>17</b>	<b>4</b>	<b>Fehlerentstehung</b>	<b>41</b>

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.

## 1 Wahrscheinlichkeit

### 1.1 Definition, Abschätzung

#### 3.3 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  $\eta_{DS}$
- Fehlfunktionsrate  $\zeta$ ,
- Fehlerabdeckung  $FC$ , ...

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

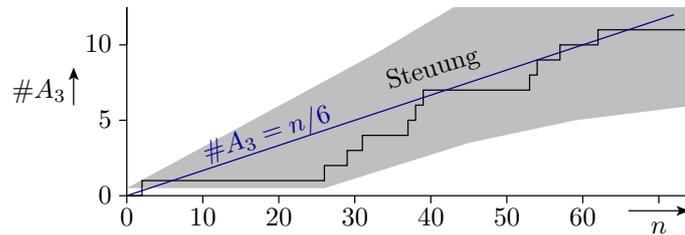
Anschließend speziell Wahrscheinlichkeiten für Fehlernachweis, Fehlerbeseitigung und Fehlerentstehung.

$\mathbb{P}[A]$       Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignis  $A$ .

$\#A$       Anzahl, wie oft Ereignis  $A$  eingetreten ist.

### 3.4 Beispiel: Würfeln 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.

## 1.2 Verkettete Ereignisse

### 3.5 Verkettete Ereignisse

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

### 3.6 Abschätzung der relativen Häufigkeiten

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

Von den 6 möglichen gleichwahrscheinlichen Würfeleregebnissen 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 den Anteil der günstigen Ereignisse erscheint im Beispiel deutlich einfacher.

Zählversuche mit nur 40 Wiederholung haben Schätzfehlerfehler von im Beispiel  $\approx 10\%$  des Wahrscheinlichkeitswerts (Abschn. 4.2.5).

### 3.7 Bedingte Wahrscheinlichkeiten

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	$\Sigma$	$\Sigma$
$C$	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  $C \wedge D = 1$ .

Zusatzbedingungen, die die Zählung beeinflussen, sind bei Abschätzungen von Wahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Dabei ist es unwichtig, ob nicht mitzuzählende Ereignisse eintreten können oder nicht.

### 3.8 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?

---


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

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 Fehlalarm.

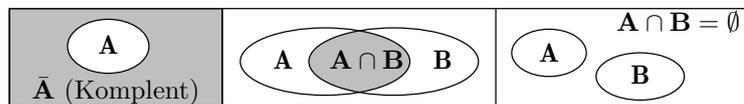
Kontrolle mit Beispielwerten:

	Test positiv	Test negativ	Summe
infizierte Personen	99% 9.900	100	10.000
nicht infiz. Pers.	$P(A B)$ $\approx 1$ Mio.	$\approx 99$ Mio.	99,99 Mio.
Summe	1 Mio.	99 Mio.	100 Mio.

$P(B|A) = 99\%$   
 $P(A) = 10^{-4}$   
 $P(B) = 1\%$

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

### 3.10 NOT / UND / ODER von Ereignissen



NOT (Nichteintrittswahrscheinlichkeit):

$$\mathbb{P}[\bar{A}] = 1 - \mathbb{P}[A] \tag{3.4}$$

UND (gleichzeitiges Eintreten der Ereignisse A und B)

- stochastische Unabhängigkeit:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[A|B] &= \mathbb{P}(A) = \frac{\mathbb{P}[A \cap B]}{\mathbb{P}[B]} \\ \mathbb{P}[A \cap B] &= \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B] \end{aligned} \tag{3.5}$$

- sich ausschließende Ereignisse:

$$\mathbb{P}[A \cap B] = 0 \tag{3.6}$$

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

ODER (alternatives Eintreten von A und B):

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

- stochastische Unabhängigkeit:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[A \cap B] &= \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B] \\ \mathbb{P}[A \vee B] &= \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B] - \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B] \end{aligned} \tag{3.7}$$

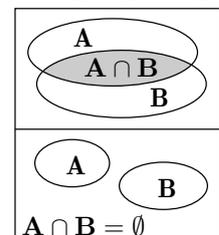
- sich ausschließende Ereignisse:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[A \cap B] &= 0 \\ \mathbb{P}[A \vee B] &= \mathbb{P}[A] + \mathbb{P}[B] \end{aligned} \tag{3.8}$$

Für mehr als zwei unabhängigen Ereignissen ist es einfacher, zuerst nach DeMorgan ODER auf UND zurückzuführen:

$$\begin{aligned} A \vee B \vee C &= \overline{\bar{A} \cap \bar{B} \cap \bar{C}} \\ \mathbb{P}[A \vee B \vee C] &= 1 - (1 - \mathbb{P}[A]) \cdot (1 - \mathbb{P}[B]) \cdot (1 - \mathbb{P}[C]) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Vereinigungsmenge



---

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

### 3.12 Abhängig, aber nicht ausschließend

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

Workaround:

- Umformung der logischen Ausdruck in UND, ODER, Nicht
- unabhängiger oder sich ausschließender Ereignisse, z.B.:

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

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).

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:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[F_i] &= p_i \\ A &= F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \\ \mathbb{P}[A] &= \mathbb{P}[F_1] \cdot \mathbb{P}[F_2] \cdot \mathbb{P}[F_3] \\ &= p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = 10\% \cdot 5\% \cdot 20\% = 0,1\% \end{aligned}$$

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 de-morganschen Regel in UND unabhängiger Ereignisse:

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

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

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

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

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-Verknüpfungen schließen sich gegenseitig aus:

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

---

$\mathbb{P}[F_i]$	Wahrscheinlichkeit, dass Fehler $i$ nachweisbar ist.
$\mathbb{P}[A]$	Wahrscheinlichkeit, dass alle Fehler nachgewiesen werden.
$\mathbb{P}[B]$	Wahrscheinlichkeit, dass kein Fehler nachgewiesen wird.
$\mathbb{P}[C]$	Wahrscheinlichkeit, dass mindestens ein Fehler nachgewiesen wird.
$\mathbb{P}[D]$	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?

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:

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

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:

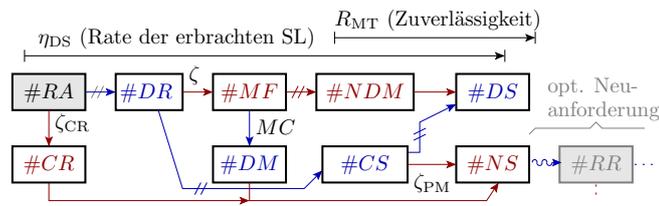
$$\mathbb{P}[E_0] + \mathbb{P}[E_1] + \mathbb{P}[E_2] = 90\% + 8\% + 2\% = 100\% \checkmark$$

---

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

## 1.3 CVA-Graph

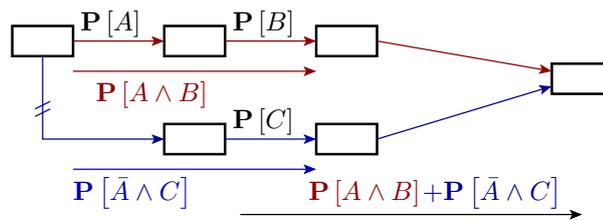
### 3.15 Beispiel eines Zählwertzuordnungsgraphen



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

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

### 3.16 Konstruktions- und Rechenregeln



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

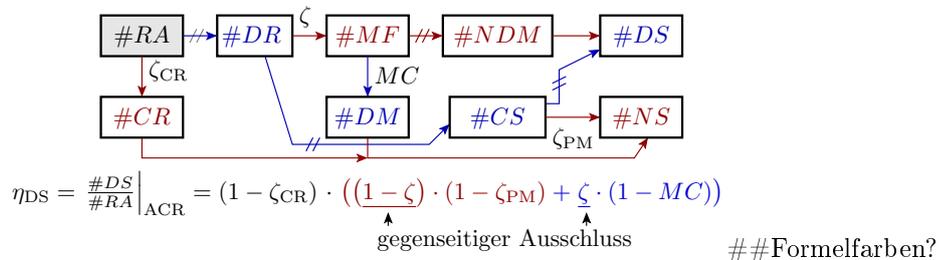
Der Übergang über mehrere Kanten beschreibt ein »UND« von Zuordnungsereignissen. Bei Unabhängigkeit Wahrscheinlichkeitsprodukt:

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

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

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

### 3.17 Für das Beispiel



Zuordnungsereignisse, für die Unabhängigkeit unterstellt wird:

- Absturz ( $\zeta_{CR}$ ), Fehlfunktionsentstehung ( $\zeta$ ),
- Fehlernachweis ( $MC$ ), Phantomfehler ( $\zeta_{Phan}$ ).

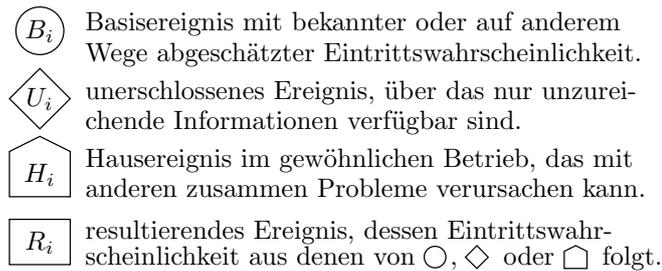
Zusammenführung mit gegenseitigem Ausschluss:

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

## 1.4 Fehlerbäume

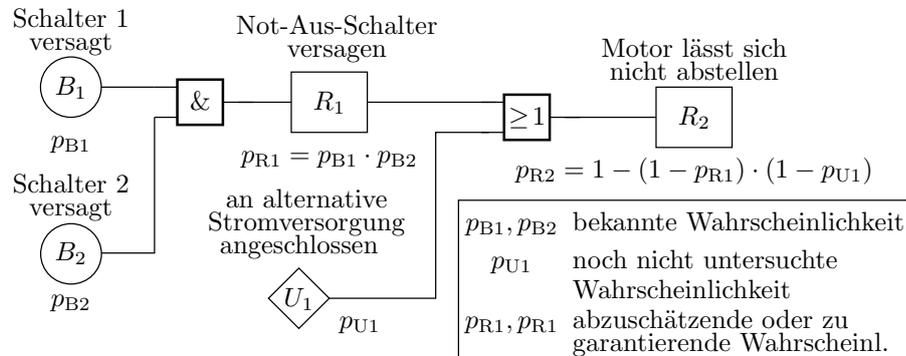
### 3.18 Fehlerbaumanalyse (FTA)

FTA (fault tree analysis) ist eine graphische Darstellung für logische Ereignisbeziehungen (UND, ODER, Nicht\*) zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Gefahrensituationen, Ausfälle, Fehlfunktionen, ... Unterschiedene Ereignistypen:



\* 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  $p_{B1} = p_{B2} = 10^{-3}$ ?

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

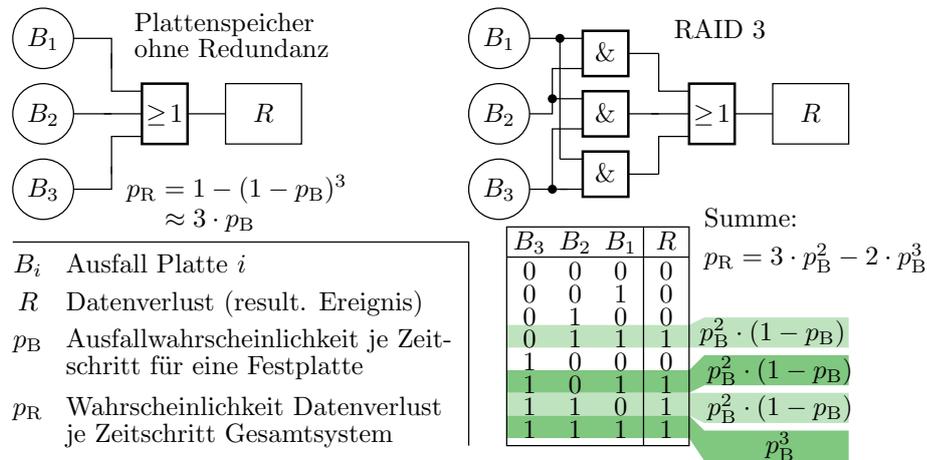
$$p_{R2} = 1 - (1 - p_{R1}) \cdot (1 - p_{U1}) \leq 10^{-6}$$

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

- |       |  |
|-------|--|
| $B_i$ | 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.             |

### 3.20 Datensicherheit RAID

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



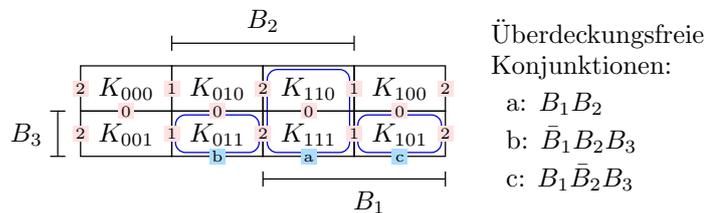
### 3.21 Rekonvergente Auffächerungen

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:



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

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

### 3.22 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, ...

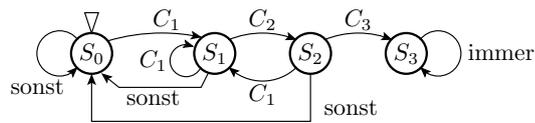
Schätzfehler: unberücksichtigte Schadensereignisse, Einflüsse, ... Für Interkontinentalraketen mit Atomsprenköpfen nicht sehr vertrauenswürdig. Fehlende bessere Alternative.

## 1.5 Markov-Ketten

### 3.23 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  $C_1C_2C_3$ :



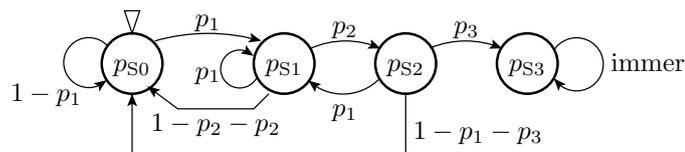
Start im Zustand  $S_0$  »keine richtige Eingabe« und Verbleib nach drei richtigen Eingaben im Zustand  $S_3$  »Fehler nachgewiesen«.

$S_i$  Zustand  $i$  der Markov-Kette (State  $i$  of Markov chain).

$C_j$  Übergangsbedingung  $j$  (Transitional condition  $j$ ).

\* Andrej Andreevič Markov, russischer Mathematiker, 1856-1922 (Andrej Andreevič Markov, Russian mathematician, 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  $ps_0 = 1$  und die anderen Zustände haben die Wahrscheinlichkeit  $ps_i |_{i \neq 0} = 0$ .

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

$ps_i$  Wahrscheinlichkeit, dass die Markov-Kette im Zustand  $S_i$  ist.

$p_j$  Wahrscheinlichkeit von Zustandsübergang  $C_j$ .

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.

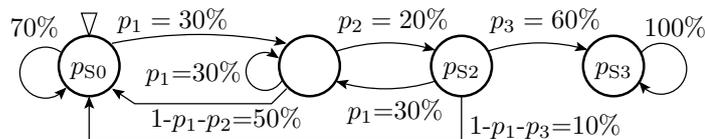
$(\dots)^T$  Transponierte Matrix (Tausch von Zeilen und Spalten).  
 $n$  Simulationsschrittnummer der Markov-Kette.

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;
```

### 3.27 Beispielsimulation

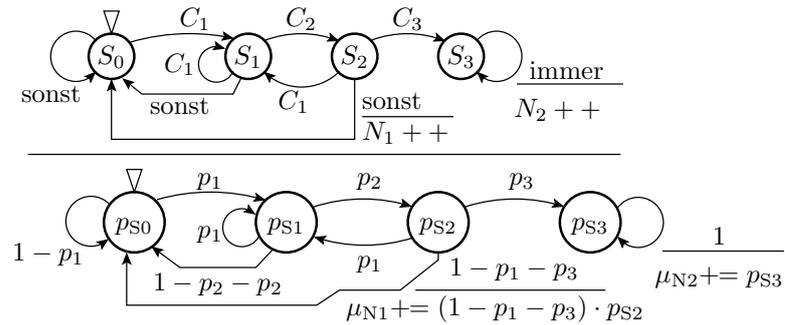
Übergangswahrscheinlichkeiten:  $p_1 = 30\%$ ,  $p_2 = 20\%$  und  $p_3 = 60\%$ :



Schritt	$p_{S0}$	$p_{S1}$	$p_{S2}$	$p_{S3}$	$\sum_{i=0}^3 p_{Si}$
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%

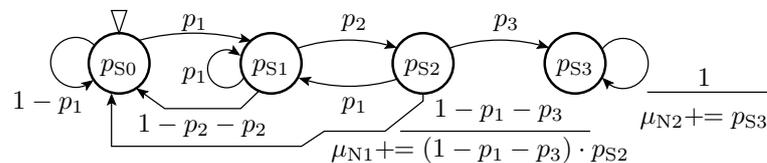
### 3.29 Kantenzähler

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



- $n$  Simulationsschrittnummer 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.
- $\mu_{Ni}$  Zu erwartende Kantenübergangsanzahl.
- $n - \mu_{N2}$  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:

```

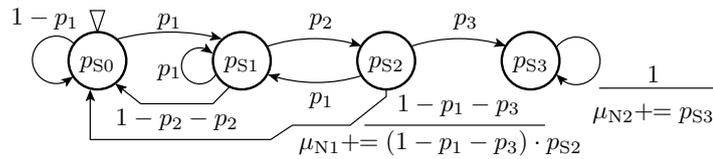
...
N1=0; N2=0;

for idx=1:100
    Z = M * Z;
    N1 = N1+Z(3)*(1-p1-p3);
    N2 = N2+Z(4);
    printf('%3i_%.2f%%_%.2f%%_%.2f%%_%.2f%%', idx, 100*Z);
    printf('%.2f_%.2f\n', N1, N2);
end;

```

### 3.31 Beispielsimulation

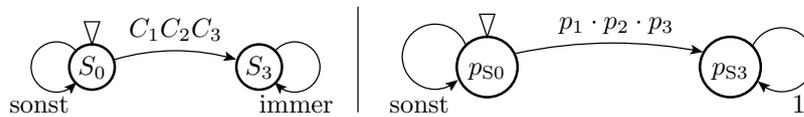
Übergangswahrscheinlichkeiten:  $p_1 = 30\%$ ,  $p_2 = 20\%$  und  $p_3 = 60\%$



Schritt	ps0	ps1	ps2	ps3	μN1	μN2
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:  $n - \mu_{N2} \approx 20$

### 3.32 Drei richtige Eingaben als Einzelereignis



Gleichungssystem der modifizierten Markov-Kette:

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

$$p_{S0}(n) = (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3) \cdot p_{S0}(n-1) = (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)^n$$

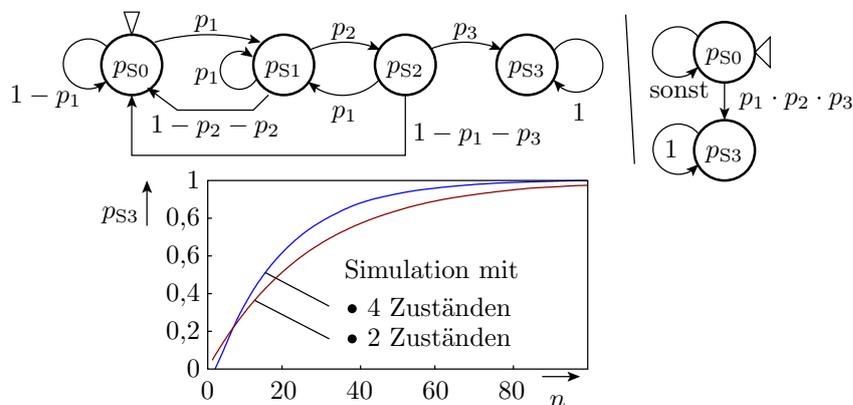
$$= e^{\ln(1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3) \cdot n} \approx e^{-p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot n} \text{ für } p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \ll 1^*$$

$$p_{S3}(n) = 1 - p_{S0}(n) = 1 - (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)^n = 1 - e^{\ln(1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3) \cdot n}$$

$$\approx 1 - e^{-p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot n} \text{ für } p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \ll 1^*$$

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

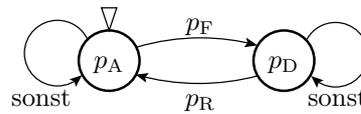
### 3.33 Unterschied zwischen den Markov-Ketten



Offenbar doch nicht ganz identisches Verhalten, aber sehr ähnliches.

### 3.34 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):

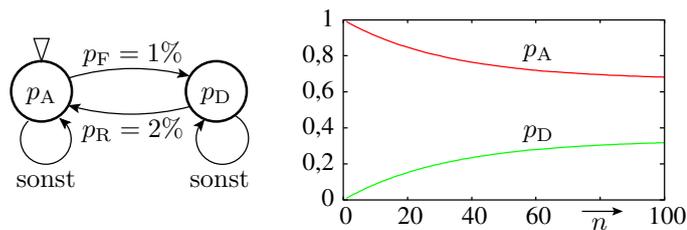


Modellierung als simulierbares Gleichungssystem:

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

- 
- $p_A$       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.
  - $n$         Simulationsschrittnummer der Markov-Kette.

### 3.35 Beispielsimulation



Stationärer Zustand:

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

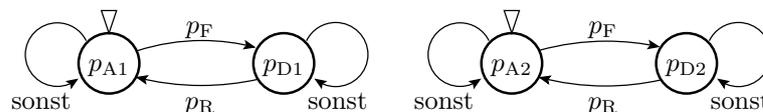
$$p_A = \frac{p_R}{p_R + p_F} = \frac{2\%}{1\% + 2\%} = 66,7\%$$

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

- 
- $p_A$       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.

### 3.36 Reparaturprozess für ein 1oo2 System

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



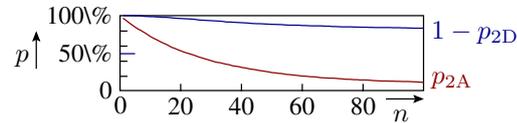
```
pF=0.01; pR=0.02;
M=[1-pF pR; pF 1-pR];
S=[1; 0];
for n=1:100
```

```

S = M * S;
p2A(n)=S(1)**2; % beide Einheiten ganz
p2D(n)=S(2)**2; % beide Einheiten defekt
end;
plot(1:100, p2A, 1:100, 1-p2D)

```

### 3.37 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	$1 - p_{2D}$	$\lim_{n \rightarrow \infty} (\dots) = 1 - (1/9)$

- 1oo2-Reserve nur bei hoher Verfügbarkeit je Systeme sinnvoll.
- Im Beispiel wäre ein  $p_R \gg p_F$  zielführender.

---

$n$	Simulationsschrittnummer 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

### 3.38 Wahrscheinlichkeit

Unter konstanten Versuchsbedingungen 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 UND, ODER und NOT unabhängiger und sich ausschließender Ereignisse. Für andere Abhängigkeiten müssen die logischen Beziehungen entsprechend umgestellt werden.

### 3.39 Verkettete 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)  $\mathbb{P}[A \wedge B] = \mathbb{P}[A] \cdot \mathbb{P}[B]$

UND sich ausschließender Ereignisse:

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

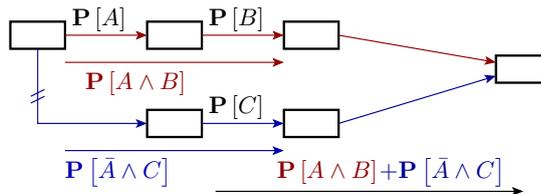
ODER unabhängiger Ereignisse:

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

Oder sich ausschließender Ereignisse:

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

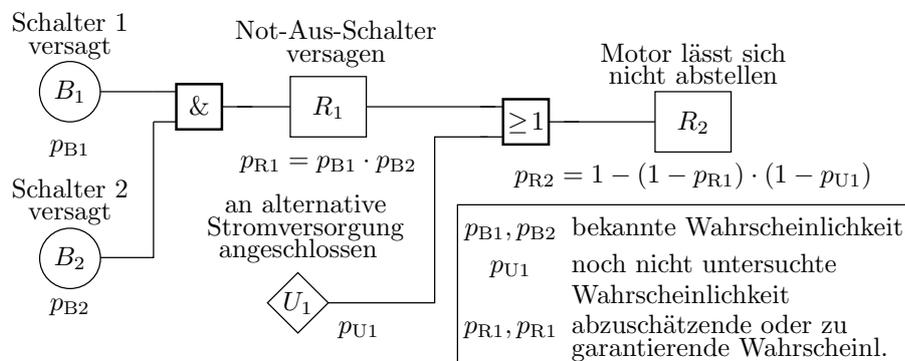
### 3.40 Zählwertzuordnungsgraph



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

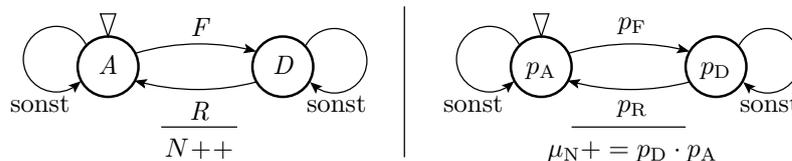
- eine Zuordnung über mehrere Kante UND unabhängiger Ereignisse und
- Zusammenführungen ODER sich ausschließender Ereignisse beschreiben.

### 3.41 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.

### 3.42 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 beschreiben lassen:

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

Kantenzähler für die zu erwartende Anzahl der Übergänge.

## 2 Fehlernachweis

### 2.1 Nachweis & Zuverlässigkeit

#### 3.43 Nachweiswahrscheinlichkeit



Ein Fehler verursacht mit einer Rate  $\zeta$  Fehlfunktionen, an denen er erkannt wird. Mindestens ein Nachweis bei  $N$  Tests:

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

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

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

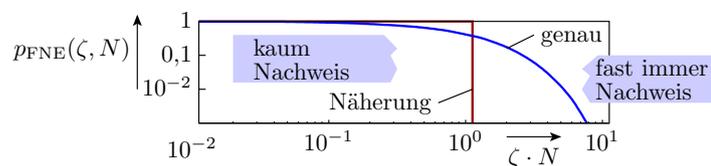
$$p_{FD}(\zeta, N) = 1 - e^{-\zeta \cdot N} \tag{3.10}$$

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

$\zeta$  Fehlfunktionsrate des Fehlers.

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

#### 3.44 Rückblick auf Abschn. 2.3.2



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

$$(2.17) \quad \mu_{FC} = 1 - \frac{\mu_F(N_2)}{\mu_F(N_1)} = 1 - \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-K} \text{ mit } 0 < K < 1$$

$$(2.14) \quad \mu_F(N) = \mu_F \cdot \int_0^1 p_{FNE}(\zeta, N) \cdot h(\zeta) \cdot d\zeta$$

$$(2.21) \quad h(\zeta) = K \cdot \zeta^{K-1} \text{ mit } 0 < K < 1 \text{ und } 0 < \zeta \leq 1$$

Gilt das auch mit der ablingenden Exponentialfunktion für die Fehlernachweiswahrscheinlichkeit nach Gl. 3.10?

### 3.45 Abnahme Fehleranzahl mit Testanzahl

$$(2.14) \quad \mu_F(N) = \mu_F \cdot \int_0^1 p_{FNE}(\zeta, N) \cdot h(\zeta) \cdot d\zeta$$

$$(2.21) \quad h(\zeta) = K \cdot \zeta^{K-1} \quad \text{mit } 0 < K < 1 \quad \text{und } 0 < \zeta \leq 1$$

Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit als Gegenwahrscheinlichkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit (Gl. 3.10):

$$p_{FNE}(\zeta, N) = 1 - p_{FD}(\zeta, N) = e^{-\zeta \cdot N} \quad (3.11)$$

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

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

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

$p_{FNE}(\zeta, N)$  Wahrscheinlichkeit, dass Fehler mit MF-Rate  $\zeta$  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  $\int_0^\infty \dots dz = \Gamma(K)$ .

### 3.46 Gammafunktion

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

$$\Gamma(K) = \int_0^\infty e^{-z} \cdot z^{K-1} \cdot dz \quad (3.12)$$

Für  $0 < K < 1$  gilt:

$$\Gamma(K) \approx \frac{1}{K} \quad (3.13)$$

$K$	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:

$$\Gamma(K + 1) = K \cdot \Gamma(K) \quad (3.14)$$

$\Gamma(\dots)$  Gamma-Funktion.

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

### 3.47 Verbleibende Fehleranzahl (Fortsetzung)

$$\mu_F(N) = \frac{\mu_F \cdot K \cdot \Gamma(K)}{N^K} \quad (3.15)$$

Mit nach Gl. 3.13  $\Gamma(K)$  für  $0 < K < 1$  in guter Näherung  $1/K$ :

$$\mu_F(N) = \mu_F \cdot N^K \quad (3.16)$$

Für die Abnahme der zu erwartenden Fehleranzahl mit der effektiven Testanzahl gelten auch mit der genauer abgeschätzten Nachweiswahrscheinlichkeit alle Beziehungen unverändert:

$$(2.19) \quad \frac{\mu_F(N_2)}{\mu_F(N_1)} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{-K}$$

$$(2.29) \quad \mu_F(N) = \mu_F(N_0) \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^{-K} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

$$(2.31) \quad \mu_{FC}(N) = 1 - \left(\frac{N}{N_0}\right)^{-K}$$

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

$\mu_F(N_0)$  Zu erwartende Anzahl der Fehler, die nach  $N_0$  Tests nicht erkannt und beseitigt sind.

$N, N_0$  Gesamttestanzahl, Testanzahl der dynamischen Vortests.

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

### 3.48 Dieselbe Kontrolle für die Fehlfunktionsrate

$$(2.15) \quad \zeta_F(N) \stackrel{(\leq 1)}{=} \mu_F \cdot \underbrace{\int_0^1 p_{FNE}(\zeta, N) \cdot h(\zeta) \cdot \zeta \cdot d\zeta}_{\text{mittlere Fehlfunktionsrate je Fehler}}$$

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

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

$$\zeta_F(N) \stackrel{(\leq 1)}{=} \mu_F \cdot \int_0^N \underbrace{e^{-z}}_{p_{FNE}(\zeta, N)} \cdot \underbrace{K \cdot \left(\frac{z}{N}\right)^{K-1}}_{h(\zeta)} \cdot \frac{z}{N} \cdot \frac{dz}{N} = \frac{\mu_F \cdot K}{N^{K+1}} \cdot \int_0^N e^{-z} \cdot z^K \cdot dz$$

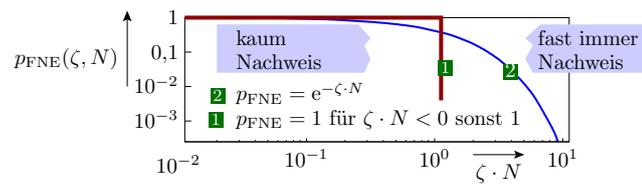
$$\zeta_F(N) \stackrel{(\leq 1)}{=} \frac{\mu_F \cdot K \cdot \Gamma(K+1)}{N^{K+1}} = \frac{\mu_F \cdot K^2 \cdot \Gamma(K)}{N^{K+1}} \quad (3.17)$$

Mit der Näherung  $\Gamma(K) = 1/K$  für  $0 < K < 1$  (Gl. 3.13):

$$\zeta_F(N) \stackrel{(\leq 1)}{=} K \cdot \frac{\mu_F}{N^{K+1}} \quad (3.18)$$

- $h(\zeta)$  Dichtefunktion der Fehlfunktionsrate vor der Fehlerbeseitigung.
- $\zeta_F(N)$  Fehlfunktionsrate durch Fehler in Abhängigkeit von der Testanzahl.
- $(\geq 1)$  Der errechnete Wert ist eine Obergrenze. Der tatsächliche Wert ist max. eins.

### 3.49 Vergleich mit bisherigem Modell



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

1. Mit Sprungfunktion für  $p_{FNE}(\zeta, N)$ :

$$(2.22) \quad \zeta_F(N) \stackrel{(\leq 1)}{=} \mu_F \cdot \frac{K}{K+1} \cdot N^{-(K+1)}$$

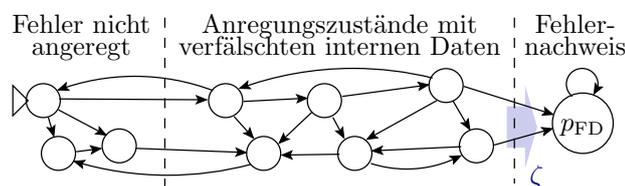
2. Mit  $p_{FNE}(\zeta, N) = e^{-\zeta \cdot N}$ :

$$(2.25) \quad \zeta_F(N) \stackrel{(\leq 1)}{=} K \cdot \frac{\mu_F(N)}{N}$$

Der Term  $K + 1$  unter dem Bruchstrich in (Gl. 2.22) wurde bereits in Abschnitt 2.3.2 unter Verweis auf diesen Abschnitt vernachlässigt.

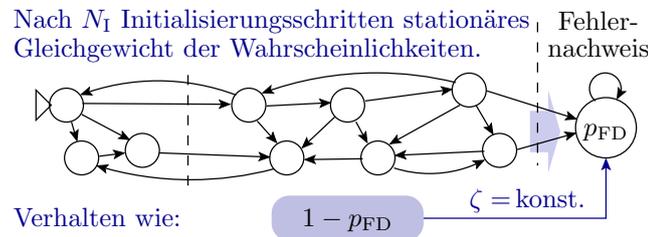
## 2.2 Service mit Gedächtnis

### 3.50 Service mit Gedächtnis



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

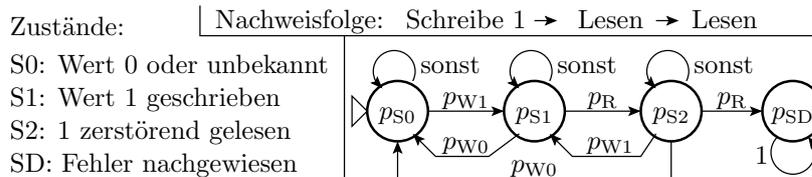
Eine genaue Modellierung des Zusammenhangs zwischen Nachweiswahrscheinlichkeit und Testanzahl verlangt für jeden Fehler einen individuellen Beobachterautomaten, aus dem sich eine fehlerspezifische Markov-Kette ableitet. Oft mehr als zwei Zustände, testschrittabhängige Fehlfunktionsrate  $\zeta$ .



An einem Beispielfehler wird gezeigt, dass solche Beobachterautomaten dazu tendieren, sich für lange Testsätze nahezu wie der Zweizustands-Beobachterautomat 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  $\zeta$  für den Abfluss von Wahrscheinlichkeit in den Zustand »Fehlernachweis« ein.

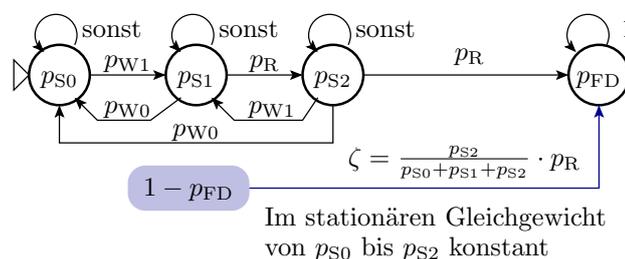
### 3.52 Beispiel: RAM-DR1-Fehler



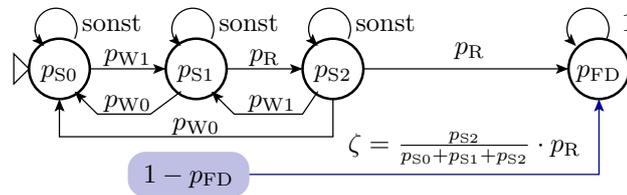
Im RAM wird beim Lesen der fehlerhaften Speicherzelle mit Adresse  $a$  eine gespeicherte 1 in eine 0 verfälscht. Der Nachweis erfordert:

- Schreibe 1 auf Adresse  $a$  (Übergang in Zustand  $S_1$ ),
- Lese Wert von Adresse  $a$  (Übergang in Anregungszustand  $S_2$ ),
- Lese von Adresse  $a$  ohne zwischenzeitlichen Schreibzugriff auf  $a$  (Übergang in den Nachweiszustand  $S_D$ ).

- $p_{W0}$  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.



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.



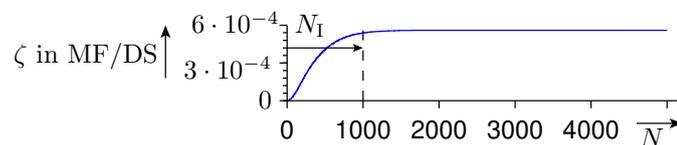
```

pS0=1; pS1=0; pS2=0; pSD(1)=0; N=5000;
NA=128; pR = 1/(2*NA); pW0 = pW1 = 1/(4*NA);
for n=1:N
    p0 = pS0 * (1-pW1) + pS1*pW0 + pS2*pW0;
    p1 = pS0 * pW1 + pS1*(1-pW0-pR) + pS2*pW1;
    p2 = pS1 * pR + pS2*(1-pW1+pW0-pR);
    pFD = pSD(n) + pS2 * pR;
    zeta = pS2*pR / (pS0+pS1+pS2); % MF rate
    pS0 = p0; pS1 = p1; pS2 = p2;
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.  
 $\zeta$          MF-Rate des DR1-Fehlers.  
 $N$          Anzahl der Tests.

### 3.55 Simulation



Die durch den Fehler verursachte MF-Rate  $\zeta$  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:

$$p_{FD}(\zeta, N) \geq 1 - e^{-\zeta \cdot (N - N_I)} \quad (3.19)$$

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

$$(3.10) \quad p_{FD}(\zeta, N) = 1 - e^{-\zeta \cdot N}$$

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

## 2.3 Fehler und Modellfehler

### 3.56 Fehler und Modellfehler (Abschn. 2.1.3)

Bekannt sind nur gefundene Fehler, nicht die zu suchenden.

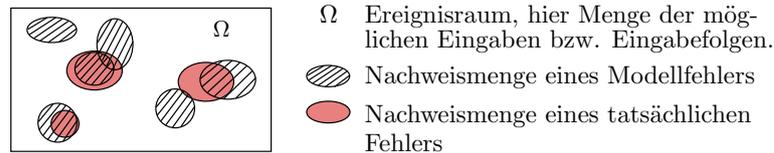
Testauswahl und Testbewertung verwenden Modellfehler (Mutationen).

Modellfehler : Fehlerannahmen, in der Regel eine kleine Änderung (Mutation) 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 von der Modellfehlerabdeckung oder anderen »messbaren« Kenngrößen eines Testsatzes auf die tatsächliche Fehlerabdeckung geschlossen werden?

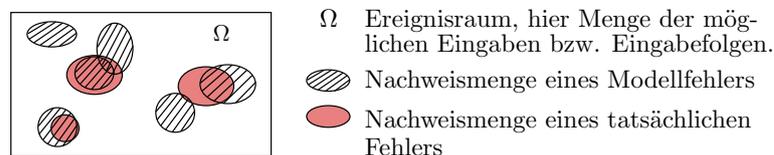
### 3.57 Nachweismengen, Nachweisbeziehungen



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

- Der Ereignisraum  $\Omega$  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.

### 3.58 Zufallstest



Zufallstests sind »Blindschüsse« in den Ereignisraum. Jede Nachweismenge hat eine Trefferwahrscheinlichkeit für die bisher auch immer unterstellte Dichte der Fehlfunktionsrate

$$(2.21) \quad h(\zeta) = K \cdot \zeta^{K-1} \quad \text{mit } 0 < K < 1 \quad \text{und } 0 < \zeta \leq 1$$

beträgt die Zunahme der Fehlerabdeckung:

$$(2.31) \quad \mu_{FC}(N) = 1 - \left(\frac{N}{N_0}\right)^{-K}$$

Das gilt gleich

- 
- $N, N_0$  Testanzahl, Bezugsanzahl.
  - $\mu_{FC}(N)$  Zu erwartende Fehlerabdeckung in Abhängigkeit von der Testanzahl  $N$ .
  - $K$  Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ( $0 < K < 1$ ).



$$(2.31) \quad \mu_{FC}(N) = 1 - \left(\frac{N}{N_0}\right)^{-K}$$

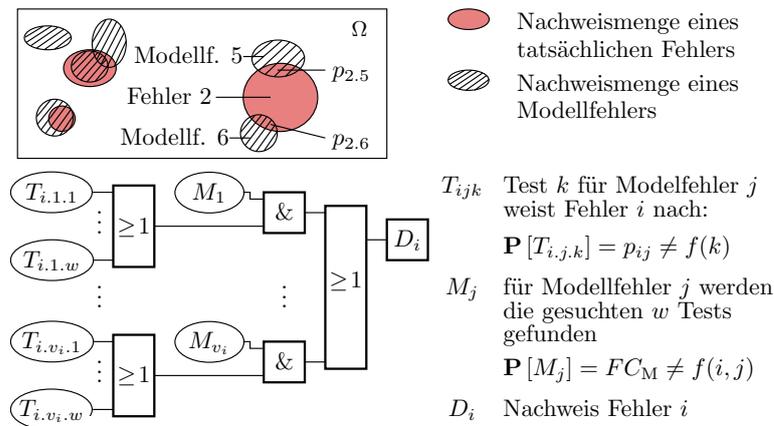
Unter Annahme **gleicher Formfaktor**  $K$  der Dichten der MF-Raten für Modellfehler und tatsächliche Fehler:

- sind die zu erwartenden Fehlerabdeckungen  $\mu_{FC}$  für dieselbe Testsatzverlängerung  $N/N_0$  gleich und
- der Formfaktor  $K$  ist aus der Abdeckungsverbesserung je Testverlängerung für Modellfehler abschätzbar.

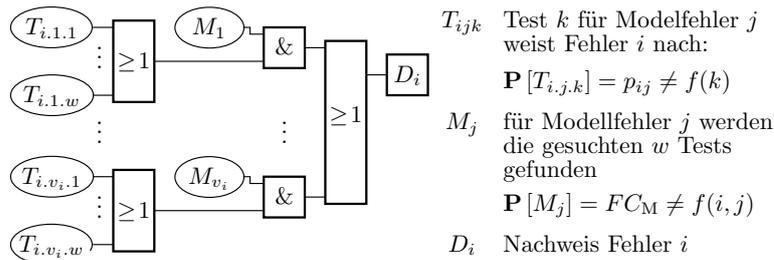
---

$N, N_0$	Testanzahl, Bezugsanzahl.
$\mu_{FC}(N)$	Zu erwartende Fehlerabdeckung in Abhängigkeit von der Testanzahl $N$ .
$K$	Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ( $0 < K < 1$ ).

### 3.60 Gezielte Testsuche



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  $\mathbb{P}[M] = FC_M$  gefunden werden.



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

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

---

$w$	Anzahl der zufällig ausgewählten Testeingaben je Modellfehlernachweismenge.
$v_i$	Anzahl der ähnlich nachweisbaren Modellfehler je Fehler $i$ .
$FC_M$	Modellfehlerabdeckung.

### 3.62 Nachweiswahrscheinlichkeit

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

$$p_i = \mathbb{P}(D_i) = 1 - \prod_{j=1}^{v_i} (1 - (FC_M \cdot (1 - (1 - p_{ij})^w))) \quad (3.20)$$

Beispielwerte:  $p_{ij} = 25\%$ ,  $v_i = 5$  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%

Wesentliche Kenngröße zur Charakterisierung der Nachweiswahrsch.  $p_i$  für  $FC_M$  nahe 1 ist offenbar nicht die  $FC_M$ , sondern die Anzahl der Tests  $w$ , die je Modellfehler (bei SW Abdeckungskriterium) gesucht werden.

---

$D_i, p_i$	Nachweisereignis Fehler $i$ , Nachweiswahrscheinlichkeit Fehler $i$ .
$w$	Anzahl der Tests je Modellfehler bzw. bei Software je Abdeckungskriterium.
$v_i$	Anzahl der ähnlich nachweisbaren Modellfehler je Fehler $i$ .
$FC_M$	Modellfehlerabdeckung.
$p_{ij}$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Test, der Modellfehler $j$ nachweist, auch Fehler $i$ findet.

### 3.63 Modellrechnung für Fehlerabdeckung eins

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

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

Mit  $\zeta_i = \sum_{j=1}^{v_i} p_{ij} v_i$  Zunahme der Nachweiswahrscheinlichkeit mit der Nachweisanzahl  $w$  wie Zufallstest mit  $w$  statt  $N$  Tests (Gl. 3.10):

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

Wird für die Fehlfunktionsrate auch der Verteilungstyp Gl. 2.21 wie für zufällige Testauswahl unterstellt (Fortsetzung nächste Folie)

$$h(\zeta) = K_K \cdot \zeta^{K_K - 1} \quad \text{mit } 0 < K_K < 1 \quad \text{und } 0 < \zeta \leq 1$$

---

$p_{FD}(\zeta, w)$	Fehlernachweiswahrscheinl. als Funktion der Fehlfunktionsrate $\zeta$ der gewählten Tests.
$w$	Anzahl der Tests je Modellfehler bzw. bei Software je Abdeckungskriterium.
$h(\zeta)$	Dichtefunktion der Fehlfunktionsrate.
$K_K$	Formfaktor der Menge der Abdeckungskriterien.

### 3.64 Software-Test mit Kriterienabdeckung $w \gg 1$

... Abnahme der zu erwartende Anzahl der nicht nachweisbaren Fehler:

$$\mu_F(w) = \mu_F(1) \cdot w^{-K_K} \quad \text{mit } 0 < K_K < 1$$

Erhöhung der Fehlerabdeckung durch Erhöhung der Abdeckungsanzahl von  $w = 1$  auf  $w \gg 1$ :

$$PR = 1 - \mu_{FC}(1) = \frac{\mu_F(1)}{\mu_F}$$

$$\mu_{FC}(w) = 1 - PR \cdot w^{-K_K} \quad (3.21)$$

Insbesondere interessant für Software, für die heute Code-Abdeckungen (Anweisungen, Zweige oder Bedingungen) mit Abdeckungsanzahl  $w = 1$  (W1-Tests) als ausreichend gelten (Abschn. 7.4.1). Die Durchlassrate  $PR$  ist die der heutige Testsätze, typ. wenige Prozent.

---

$\mu_F(w)$	Zu erwartende Fehleranzahl in Abhängigkeit von der Nachweisanzahl $w$ je Kriterium.
$\mu_{FC}(w)$	Erwartete Fehlerabdeckung in Abhängigkeit von der Nachweisanzahl $w$ je Kriterium.
$w$	Anzahl der Tests je Modellfehler bzw. bei Software je Abdeckungskriterium.
$PR, K_K$	Durchlassrate und Formfaktor der Menge der Modellfehler bzw. Abdeckungskriterien.

### 3.65 Erforderliche Abdeckungsanzahl

$$(3.21) \quad \mu_{\text{FC}}(w) = 1 - PR \cdot w^{-K_K}$$

Erforderlich Abdeckungsanzahl für ausreichende Fehlerabdeckung:

$$w \geq \left( \frac{PR}{1 - \mu_{\text{FC}}} \right)^{\frac{1}{K_K}} \quad (3.22)$$

Beispielabschätzungen für die erforderliche Kriterienabdeckung für  $PR = 10\%$  bis  $40\%$  und  $K_K = 0,5$ :

$K_K = 0,5$	$\mu_{\text{FC}} = 90\%$	$= 95\%$	$= 99\%$	$= 99,5\%$
$PR = 40\%$	$w = 16$	$w = 64$	$w = 256$	$w = 1024$
$PR = 10\%$	$w = 1$	$w = 4$	$w = 16$	$w = 64$

---

$\mu_{\text{FC}}(w)$	Erwartete Fehlerabdeckung in Abhängigkeit von der Nachweisanzahl $w$ je Kriterium.
$w$	Anzahl der Tests je Modellfehler bzw. bei Software je Abdeckungskriterium.
$PR, K_K$	Durchlassrate und Formfaktor der Menge der Modellfehler bzw. Abdeckungskriterien.

## Zusammenfassung

### 3.66 Nachweiswahrscheinlichkeit, R-Wachstum

Die Fehlernachweiswahrscheinlichkeit strebt mit der Testanzahl bei zufälliger Testauswahl mit einer abfallenden Exponentialfunktion gegen eins:

$$(3.10) \quad p_{\text{FD}}(\zeta, N) = 1 - e^{-\zeta \cdot N}$$

Exakt für geringe Fehlfunktionsrate und Systeme ohne Gedächtnis. Sonst brauchbare Näherung. Für Fehlerabdeckung, Fehlfunktionsrate und Zuverlässigkeit gelten (auch) mit dem genaueren Modell:

$$(2.17) \quad \mu_{\text{FC}} = 1 - \frac{\mu_{\text{F}}(N_2)}{\mu_{\text{F}}(N_1)} = 1 - \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^{-K} \quad \text{mit } 0 < K < 1$$

$$(2.25) \quad \zeta_{\text{F}}(N) \stackrel{(\leq 1)}{=} K \cdot \frac{\mu_{\text{F}}(N)}{N}$$

$$(2.32) \quad R_{\text{F}}(N) \stackrel{(\geq 1)}{=} \frac{1}{\zeta_{\text{F}}(N)} = R_{\text{F}}(N_0) \cdot \left( \frac{N}{N_0} \right)^{K+1}$$

Kernthese, 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, untermauert.

### 3.67 Fehler- und Modellfehlerabdeckung

Zufällige Testauswahl: Fehlerabdeckung für tatsächliche Fehler, Modellfehler und Abdeckungskriterien gleichermaßen:

$$(2.31) \quad \mu_{\text{FC}}(N) = 1 - \left( \frac{N}{N_0} \right)^{-K}$$

Modellfehler oder Abdeckungskriterien werden da eigentlich nur benötigt, um den Formfaktor  $K$  abzuschätzen.

Gezielte Testauswahl: Suche für  $v_i$  ähnlich nachweisbare Modellfehler (oder Abdeckungskriterien) je  $w$  Tests. Gefundene Tests implizieren mit Wahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  den tatsächlichen Fehlernachweis.

Eine Beispielrechnung hat gezeigt, dass bei diesem Versuchsschema nicht die Modellfehler- oder Kriterienabdeckung, sondern die Abdeckungsanzahl  $w$  die entscheidende Kenngröße für die tatsächliche Fehlerabdeckung ist.

### 3.68 Modellfehler- bzw. Kriterienabdeckung eins

Versuchsschema: Für jeden nachweisbare Modellfehler bzw. jedes abzudeckende Kriterium werden mindestens  $w$  gesucht und gefunden. Tatsächliche Fehlerabdeckung :

$$(3.21) \quad \mu_{FC}(w) = 1 - PR \cdot w^{-K_K}$$

Erforderlich Abdeckungsanzahl für ausreichende Fehlerabdeckung:

$$(3.22) \quad w \geq \left( \frac{PR}{1 - \mu_{FC}} \right)^{\frac{1}{K_K}}$$

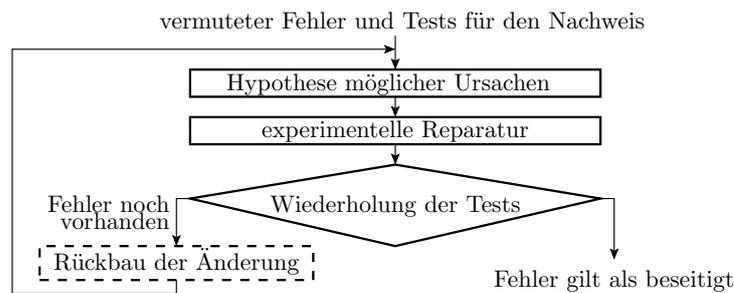
Für Software ist der aktuelle Stand der Technik W1-Abdeckung mit einer Durchlassrate  $PR$  von einigen Prozent. Ziel werden langfristig Fehlerabdeckungen von 99% und besser, d.h.  $w \gg 1$  sein. Mit dem dafür notwendigen Übergang von der weitgehend händischen zur automatisierten Testerzeugung befasst sich später Foliensatz 7.

---

$PR, K_K$  Durchlassrate für Abdeckungsanzahl  $w = 1$  und Formfaktor der Kriterienmenge.

## 3 Fehlerbeseitigung

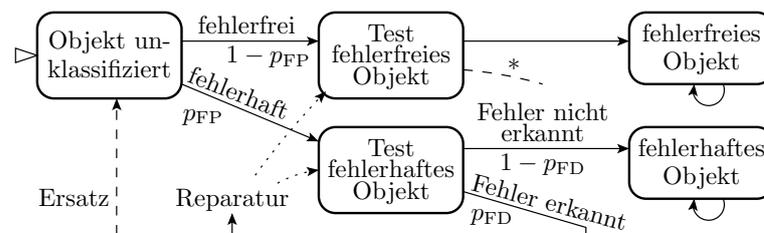
### 3.69 Experimentelle Reparatur nach Absch. 2.2.1



- 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 (Abschn. 2.4.2).

### 3.70 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.

### 3.71 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  $\mu_{\text{Repl}}$  mal ersetzt werden:

$$\mu_{\text{Repl}} = \frac{1}{Y} - 1 \quad (3.23)$$

- 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, ...

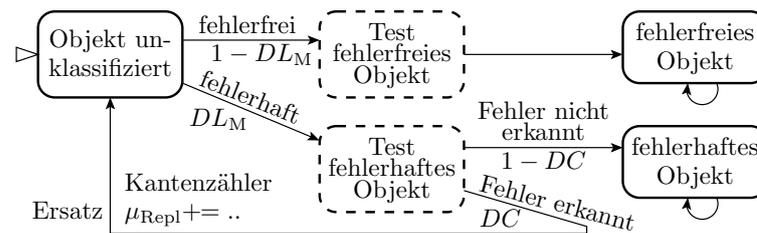
Ersatz ist kostengünstigster bei hoher und Reparatur bei geringer Ausbeute.

---

$\mu_{\text{Repl}}$	Zu erwartende Anzahl der Ersetzungen.
$Y$	Ausbeute (Yield).

## 3.1 Ersatz

### 3.72 Fehlerbeseitigung durch Ersatz



Original- und Ersatzobjekte sind mit Wahrscheinlichkeit  $DL_M$  defekt.

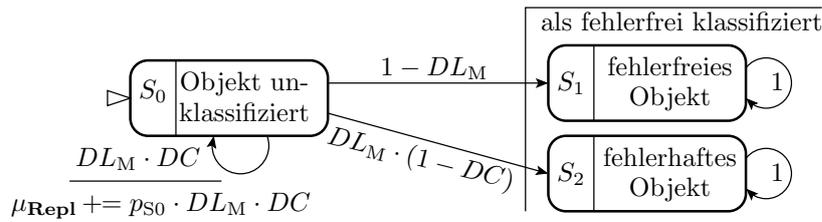
Je Schritt wird aus unklassifizierten Objekten mit Wahrscheinlichkeit

- $1 - DL_M$  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.
$\mu_{\text{Repl}}$	Kantenzähler für die zu erwartende Anzahl der Ersetzungen.

### 3.73 Vereinfachte Markov-Kette



Nach Ersatz aller erkennbar defekten Objekte:

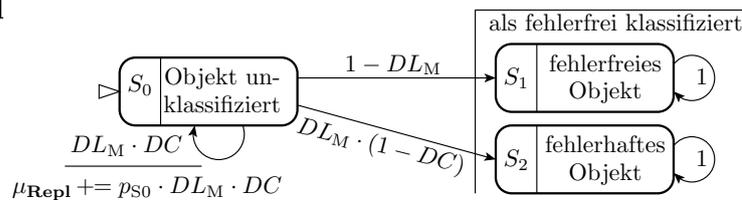
$$\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S0}) = \lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (DL_M \cdot DC)^{\#Repl} = 0$$

$$\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S1}) = (1 - DL_M) \cdot \sum_{\#Repl=0}^{\infty} (DL_M \cdot DC)^{\#Repl} \stackrel{(SGS)}{=} \frac{1 - DL_M}{1 - DL_M \cdot DC}$$

$$\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S2}) = DL = 1 - \lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S1}) = \frac{DL_M \cdot (1 - DC)}{1 - DL_M \cdot DC}$$

- $DC$  Defektdeckung (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:  $\sum_{n=0}^{\infty} a_0 \cdot q^n = \frac{a_0}{1-q}$ .

### 3.74 Defektanteil



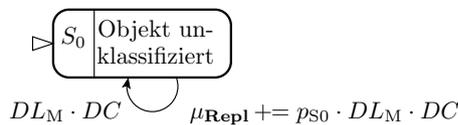
Der Defektanteil nach Aussortieren als Wahrscheinlichkeit, dass ein als fehlerfrei ausgewiesenes Objekt fehlerhaft ist  $\lim_{\#Repl \rightarrow \infty} (p_{S2})$  wurde in Abschn. 2.2.3 durch Subtraktion der Anzahl der erkannten defekten Produkte von der Anzahl der defekten und aller Produkte in Zähler und Nenner hergeleitet:

$$(2.8) \quad DL = \frac{DL_M \cdot (1 - DC)}{1 - DL_M \cdot DC}$$

Vorherige Abschätzung hier mit Markov-Kette bestätigt.

- $DC$  Defektdeckung (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.

### 3.75 Zu erwartende Anzahl der Ersetzungen



$$\mu_{Repl} = DL \cdot DC \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \underbrace{(DL \cdot DC)^n}_{p_{S0}(n)} = \frac{DL_M \cdot DC}{1 - DL_M \cdot DC} \tag{3.24}$$

( $n$ - Nummer der Ersetzung). Zur Kontrolle, es muss gelten:

$$(3.23) \quad \mu_{Repl} = \frac{1}{Y} - 1$$

$$(2.7) \quad Y = 1 - DL_M \cdot DC$$

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

Auch hier vorherige Abschätzung aus Abschn. 2.2.3 bestätigt.

**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?

$$(2.7) \quad Y = 1 - DL_M \cdot DC$$

Umstellung nach dem Defektanteil  $DL_M$  vor dem Aussortieren der als defekt erkannten Schaltkreise:

$DL_M = \frac{1-Y}{DC}$	$Y = 10\%$	...=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%

b) Wie groß ist der Defektanteil  $DL$  nach Aussortieren (Ersatz) der als defekt erkannten Schaltkreise in Abhängigkeit von der Ausbeute und der Defektdeckung?

$$(2.8) \quad DL = \frac{DL_M \cdot (1-DC)}{1-DL_M \cdot DC}$$

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

	$DC = 90\%$	$DC = 99\%$	$DC = 99,5\%$	$DC = 99,9\%$
$Y = 10\%$	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

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

$DC$	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.

---

$Y$	Ausbeute (Yield).
$DC$	Defektdeckung (defect coverage), Anteil der erkennbar defekten Produkte.
$\mu_{\text{Repl}}$	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.
100%	Für $Y = 1 - DC$ sind alle gefertigten Schaltkreise defekt.
dpm	Anzahl der defekten Produkte von einer Million (defecs per million).

### 3.2 Reparatur

#### 3.77 Fehlerbeseitigung durch Reparatur

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

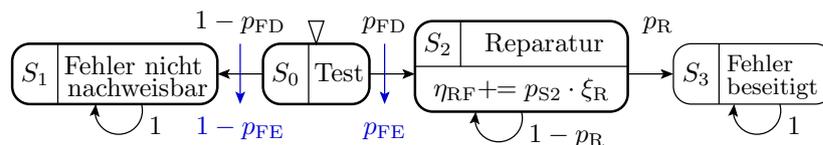
- sind billiger als zu ersetzende Gesamtsysteme und
- haben einen kleineren Defektanteil (weniger Mehrfachersetzungen durch defekte Ersatzteile).

Dafür verlangt Reparatur Zusatzaufwendungen:

- Vorhaltung von Organisationseinheiten + Personalkapazität für Wartung und Reparatur.
- Reparaturgerechter Entwurf (modulare Austauschbarkeit),
- aufwändigere Fehlerlokalisierung und mehr Reparaturversuche durch Fehldiagnose.

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

#### 3.78 Markov-Kette für einen vorhandenen Fehler



Jeder erkannte Fehler wird beseitigt:

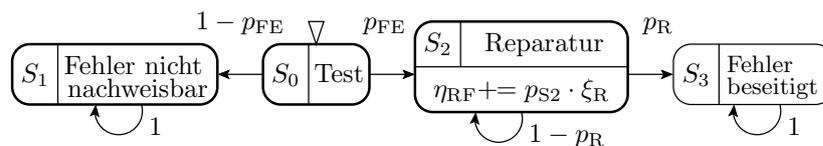
$$p_{FE} = p_{S3} = p_{FD} \cdot p_R + p_{FD} \cdot (1 - p_R) \cdot p_R + p_{FD} \cdot (1 - p_R)^2 \cdot p_R + \dots$$

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

Bei der Beseitigung können jedoch neue Fehler entstehen ...

---

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



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

$$\eta_{RF} = p_{FE} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \xi_R \cdot (1 - p_R)^n \stackrel{(SGS)}{=} p_{FE} \cdot \frac{\xi_R}{p_R} \tag{3.25}$$

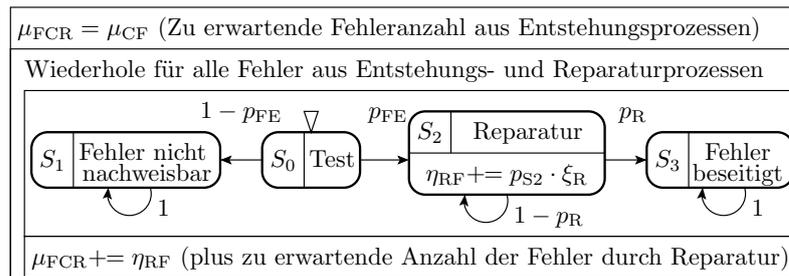
Die Entstehungsrate je beseitigter Fehler ist um den Kehrwert der Beseitigungswahrscheinlichkeit größer:

$$\eta_{RE} = \frac{\eta_{RF}}{p_{FE}} = \frac{\xi_R}{p_R} < 1 \tag{3.26}$$

---

$\eta_{RF}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.
$p_{FE}$	Fehlernachweis- und Beseitigungswahrscheinlichkeit.
$p_R$	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
$\xi_R$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
$\eta_{RE}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
SGS	Summe einer geometrischen Reihe: $\sum_{n=0}^{\infty} a_0 \cdot q^n = \frac{a_0}{1-q}$ .

### 3.80 Mehrere zu beseitigende Fehler



- Je zu beseitigender Fehler eine Markov-Kette.
- Jeder erkennbare Fehler wird beseitigt.

Beim Beseitigung eines Fehler entstehen im Mittel  $\eta_{RE}$  neue Fehler, bei deren Beseitigung wieder im Mittel  $\eta_{RE}$  neue Fehler entstehen, ... Entstehungsrate in »neue Fehler« je beseitigter ursprünglicher Fehler:

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

$$\eta_{RER} = \frac{1}{1 - \eta_{RE}} - 1 = \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \tag{3.27}$$

Neuentstehungsrate je vorhandener ursprünglicher Fehler:

$$\eta_{RFR} = p_{FE} \cdot \eta_{RER} = p_{FE} \cdot \left( \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \right) \text{ für } \eta_{RE} < 1 \tag{3.28}$$

Ersatz der Entstehungsrate je vorhandener Fehler in (Gl. 3.28) durch:

$$(3.26) \quad \eta_{RE} = \frac{\eta_{RF}}{p_{FE}} = \frac{\xi_R}{p_R} < 1$$

$$\eta_{RFR} = p_{FE} \cdot \left( \frac{\xi_R}{p_R - \xi_R} \right) \text{ für } p_R > \xi_R \tag{3.29}$$

Zu erwartende Anzahl der nicht beseitigten Fehler:

$$\mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FE}) \cdot (1 + \eta_{RFR}) \tag{3.30}$$

$$\mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FE}) \cdot \left( 1 + p_{FE} \cdot \left( \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \right) \right) \text{ für } \eta_{RE} < 1 \tag{3.31}$$

---

$\eta_{RFR}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener ursprünglicher Fehler.
$\eta_{RER}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.
$\eta_{RE}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
$p_R$	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
$\xi_R$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
$\mu_F$	Zu erwartende Fehleranzahl nach Test und Beseitigung aller erkennbaren Fehler.
$\mu_{CF}$	Zu erwartende Anzahl der Fehler aus den Entstehungsprozessen.

**3.82 Fallunterscheidung nach  $\eta_{RE}$  in (Gl. 3.31)**

$$(3.31) \quad \mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FE}) \cdot \left(1 + p_{FE} \cdot \left(\frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}}\right)\right) \text{ für } \eta_{RE} < 1$$

- Wenig neu entstehende Fehler: ( $1 - \eta_{RE} \rightarrow 1$ ):

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

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

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

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

Kontrolle:

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

---

$\eta_{RE}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
$\mu_F$	Zu erwartende Fehleranzahl nach Test und Beseitigung aller erkennbaren Fehler.
$p_{FE}$	Fehlernachweis- und Beseitigungswahrscheinlichkeit.

Aussprache:  $\xi$ : xi,  $\eta$ : eta,  $\mu$ : my.

- Erhöhung der zu erwartenden Fehleranzahl bei Beseitigung aller erkennbaren Fehler:  $\frac{1}{2 - p_{FE}} < \eta_{RE} < 1$
- 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 Fehlernachweis- und Beseitigungswahrscheinlichkeit  $p_{FE}$  und
- eine geringe Fehlerentstehungsrate  $\eta_{RE} < 0,1$  in neue je beseitigte Fehler

anstreben.

---

$\eta_{RE}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
$p_{FE}$	Fehlernachweis- und Beseitigungswahrscheinlichkeit.

**3.84 Gute studentische Programmierleistung**

- Fehlerarme Programmierung, z.B.  $\mu_{CF} = 5$  (ohne Syntaxfehler).
- Gründlicher Test, z.B.  $p_{FE} = 50\%$  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  $K = 0,4$ .

Gl. 3.29:	$\eta_{RFR} = \frac{p_{FE} \cdot \xi_R}{p_R - \xi_R}$	$= \frac{0,5 \cdot 0,1}{0,4 - 0,1}$	$= 0,167$
Gl. 3.30:	$\mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FE}) \cdot (1 + \eta_{RFR})$	$= 5 \cdot (1 - 50\%) \cdot 1,167$	$= 2,92$
Gl. 2.25:	$\zeta_F \stackrel{(\leq 1)}{=} \frac{K \cdot \mu_F(N)}{N}$	$= \frac{0,4 \cdot 2,92}{10}$	$= 0,11$

- 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 den Abnahmetest zu bestehen.

### 3.85 Schlechte Programmierleistung

- Mehr Entwurfsfehler:  $\mu_{CF} = 7$  Fehler (ohne Syntaxfehler).
- Weniger Tests:  $p_{FE} = 30\%$  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  $K = 0,4$ :

Gl. 3.29:	$\eta_{RFR} = \frac{p_{FE} \cdot \xi_R}{p_R - \xi_R}$	$= \frac{0,3 \cdot 0,2}{0,25 - 0,2}$	$= 1,2$
Gl. 3.30:	$\mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FE}) \cdot (1 + \eta_{RFR})$	$= 7 \cdot (1 - 30\%) \cdot 2,2$	$= 10,8$
Gl. 2.25:	$\zeta \stackrel{(\leq 1)}{=} \frac{K \cdot \mu_F(N)}{N}$	$= \frac{0,4 \cdot 10,8}{5}$	$\rightarrow 1$

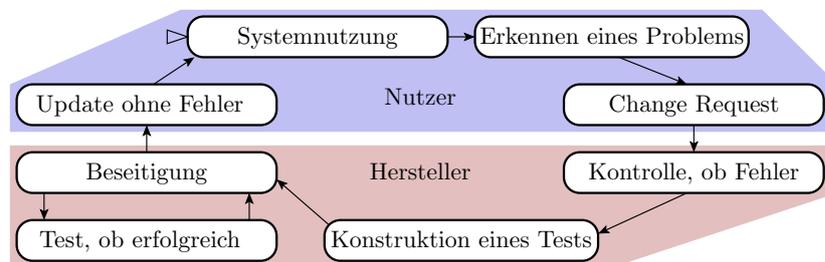
- Im Mittel 4,9 ursprüngliche plus 5,9 bei der Reparatur entstehende nicht erkennbare Fehler.
- Ein weiteres zufälliges Testbeispiel liefert garantiert MF.

Wie Prüfung bestehen? Mehr Testen und Rückbau!

$\mu_F, \zeta$	Zu erwartende Fehleranzahl, Fehlfunktionsrate.
$(\geq 1)$	Der errechnete Wert ist eine Obergrenze. Der tatsächliche Wert ist max. eins.
$p_{FE}$	Fehlernachweis- und Beseitigungswahrscheinlichkeit.
$N$	Anzahl der Tests.
$p_R$	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
$\xi_R$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
$K$	Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ( $0 < K < 1$ ).
$\eta_{RF}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.

## 3.3 Reifeprozesse

### 3.86 Reifen von Produkten (Abschn. 2.3.7)



- Bei einer vermuteten Fehlfunktion stellt der Nutzer eine Änderungsanforderung (Change Request). Alternativ sendet das System einen 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 Reparatur. Installation von Update's.

### 3.87 Effektive Testanzahl, Abnahme Fehleranzahl

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

$$(2.44) \quad N = \underbrace{p_{FE} \cdot \mu_{NU} \cdot \eta_{SU} \cdot t_{VR}}_{N_{MV}} \cdot (u + u_{V0}) \quad \text{mit} \quad u_{V0} = \frac{N_{V0}}{N_{VM}}$$

Abnahme der zu erwartenden Fehleranzahl ohne Fehlerneuentstehung, gleichlange Versionsintervalle, ...:

$$(2.46) \quad \mu_F(u) = \mu_F(v) \cdot \left( \frac{u+u_{V0}}{v+u_{V0}} \right)^{-K}$$

---

$N$	Effektive Testanzahl, für die alle erkannten Fehler beseitigt werden.
$p_{FE}$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler beseitigt wird, wenn er eine MF verursacht.
$\mu_{NU}$	Zu erwartende Nutzeranzahl (Expected number of user).
$\eta_{SU}$	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 ( $0 < K < 1$ ).

### 3.88 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:

$$(2.50) \quad R_{MT}(u) = R_{MT}(v) \cdot \left( \frac{u+u_{V0}}{v+u_{V0}} \right)^{K+1}$$

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

$$(2.52) \quad \frac{S(u)}{S(v)} = \frac{R_{MT}(u)}{R_{MT}(v)} = \left( \frac{u+u_{V0}}{v+u_{V0}} \right)^{K+1}$$

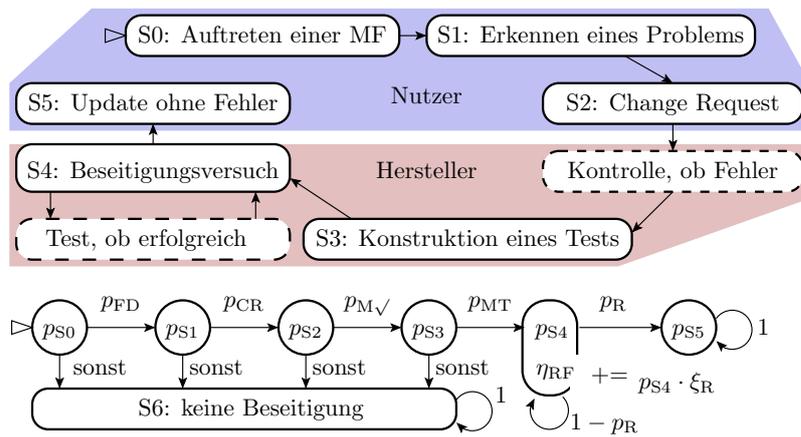
---

$R_{[MT]}$	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 ( $0 < K < 1$ ).

### 3.89 Fortsetzung / Modellerweiterung

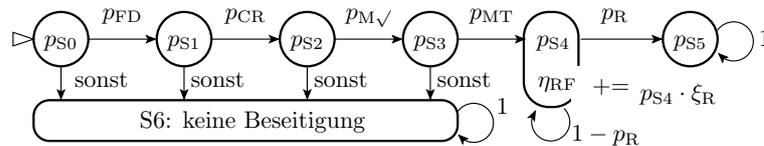
- Reifeprozess als Markov-Kette und
- Berücksichtigung neu entstehender Fehler bei der Fehlerbeseitigung.

### 3.90 Reifeprozess als Markov-Kette



- $ps_i$       Wahrscheinlichkeit, dass die Markov-Kette im Zustand  $S_i$  ist.
- $\eta_{RF}$       Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.
- $p_{FD}$       Fehlernachweiswahrscheinlichkeit (Probability of fault detection).
- $p_{CR}$       Wahrscheinlichkeit einer Änderungsanforderung (change request) bei beobachteter MF.
- $p_{M\checkmark}$       Wahrscheinlichkeit, dass der Hersteller (manufacturer) die MF rekonstruieren kann.
- $p_{MT}$       Wahrscheinlichkeit, dass ein Test für den Fehlernachweis gefunden wird.
- $\eta_{RF}$       Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.
- $p_R$       Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.

### 3.92 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:

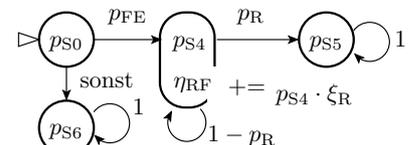
$$p_{FE} = \lim_{n \rightarrow \infty} ps_5(n) = p_{FD} \cdot p_{CR} \cdot p_{M\checkmark} \cdot p_{MT} \tag{3.32}$$

Bei jedem Reparaturversuch entsteht mit der Rate  $\xi_R$  ein neuer Fehler.

- $p_{FE}$       Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler beseitigt wird, wenn er eine MF verursacht.

### 3.93 Fehlerentstehungsrate

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



$$\eta_{RF} = p_{FE} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \xi_R \cdot (1 - p_R)^n \stackrel{(SGS)}{=} p_{FE} \cdot \frac{\xi_R}{p_R} \tag{3.25} \quad \text{Die}$$

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

$$\eta_{RE} = \frac{\eta_{RF}}{p_{FE}} = \frac{\xi_R}{p_R} < 1 \tag{3.26} \quad \text{Rekursiv}$$

unter Berücksichtigung »neuer Fehler durch neue Fehler«

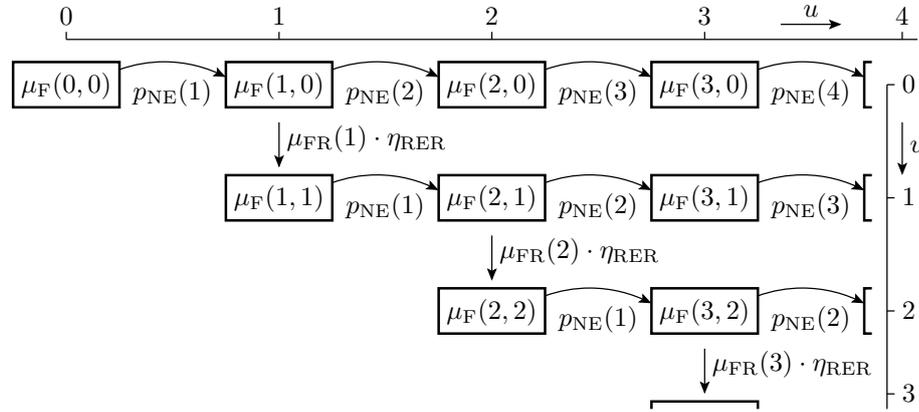
$$\eta_{RER} = \frac{1}{1 - \eta_{RE}} - 1 = \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \tag{3.27}$$

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

- $p_{FE}$       Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler beseitigt wird, wenn er eine MF verursacht.

$p_R$	Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur.
$\xi_R$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je Reparaturversuch.
$\eta_{RF}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je vorhandener Fehler.
$\eta_{RE}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.
$\eta_{RER}$	Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.

### 3.95 Reifeprozess mit Fehlerneuentstehung



- Version 0 enthält  $\mu_F(0, 0)$  Fehler. Diese Zahl reduziert sich mit jeder Folgeversionen  $u > 0$  um eine Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit  $p_{NE}(u)$  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  $\mu_F(u, v)$ .

### 3.96 Nichtbeseitigungswahrscheinlichkeit

Für gleichlange Update-Intervalle beträgt die effektive Testanzahl für Fehler in Version  $u$ , die in Version  $v$  entstanden sind, nach (Gl. 2.44):

$$N(u, v) = N_{VM} \cdot (u - v + u_{v0}) \tag{3.33}$$

Die zu erwartende Fehleranzahl aus jeder Version  $v$  nimmt mit Version  $u \geq v$  seit der Vorversion  $u - 1$  nach (Gl. 2.46) ab:

$$\mu_F(u, v) = \mu_F(u - 1, v) \cdot \left( \frac{u - v + u_{v0}}{u - 1 - v + u_{v0}} \right)^{-K} \tag{3.34}$$

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

$$p_{NE}(u - v) = \frac{\mu_F(u, v)}{\mu_F(u - 1, v)} = \left( \frac{u - v + u_{v0}}{u - v - 1 + u_{v0}} \right)^{-K} \tag{3.35}$$

---

$N(u, v)$	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 ( $0 < K < 1$ ).

### 3.97 Neu entstehende Fehler

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

$$\mu_{FR}(u) = \sum_{v=0}^{u-1} (\mu_F(u - 1, v) - \mu_F(u, v)) \tag{3.36}$$

Die Anzahl der neu entstehenden Fehler ist  $\eta_{\text{RER}}$  mal so groß:

$$\mu_{\text{F}}(u, u) = \eta_{\text{RER}} \cdot \mu_{\text{FR}}(u) \quad (3.37)$$

---

$\eta_{\text{RER}}$  Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.

### 3.98 Zu erwartende Fehleranzahlen insgesamt

$\mu_{\text{F}}(0, 0)$  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:

$$(3.34) \quad \mu_{\text{F}}(u, v) = \mu_{\text{F}}(u - 1, v) \cdot \left( \frac{u - v + u_{\text{V0}}}{u - 1 - v + u_{\text{V0}}} \right)^{-K}$$

- Erwartete Zahl der beseitigten und neu entstehenden Fehler:

$$(3.36) \quad \mu_{\text{FR}}(u) = \sum_{v=0}^{u-1} (\mu_{\text{F}}(u - 1, v) - \mu_{\text{F}}(u, v))$$

$$(3.37) \quad \mu_{\text{F}}(u, u) = \eta_{\text{RER}} \cdot \mu_{\text{FR}}(u)$$

- Alle Fehler:

$$\mu_{\text{F}}(u) = \sum_{v=0}^u \mu_{\text{F}}(u, v) \quad (3.38)$$

---

$\mu_{\text{F}}(u, v)$  Zu erwartende Fehleranzahl in Version  $u$ , die in Version  $v$  entstanden sind.

$u, v$  Versionsnummern und Bezugsversionsnummer des reifenden Objekts.

$u_{\text{V0}}$  Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.

$\mu_{\text{FR}}(u)$  Erwartete Anzahl der in Version  $u$  aus Version  $u - 1$  beseitigten Fehler.

$\eta_{\text{RER}}$  Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.

### 3.99 Fehlfunktionsrate durch Fehler

$$(3.33) \quad N(u, v) = N_{\text{VM}} \cdot (u - v + u_{\text{V0}})$$

Wiederhole für jede Versionsnummer ab  $u = 0$  (vergl. Gl. 2.25):

$$\zeta_{\text{F}}(u) = K \cdot \sum_{v=0}^u \frac{\mu_{\text{F}}(u, v)}{N(u, v)} \quad (3.39)$$

---

$\zeta_{\text{F}}(u)$  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

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

- a) Zu erwartende Fehleranzahlen  $\mu_{\text{F}}(u, v)$  für  $u = 0$  bis 5 gereifte Versionen je Entstehungsversion  $v$  und insgesamt?

(3.34) 
$$\mu_F(u, v) = \mu_F(u - 1, v) \cdot \left( \frac{u - v + u_{V0}}{u - 1 - v + u_{V0}} \right)^{-K}$$

(3.36) 
$$\mu_{FR}(u) = \sum_{v=0}^{u-1} (\mu_F(u - 1, v) - \mu_F(u, v))$$

(3.37) 
$$\mu_F(u, u) = \eta_{RER} \cdot \mu_{FR}(u)$$

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

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

(3.33) 
$$N(u, v) = N_{VM} \cdot (u - v + u_{V0})$$

(3.39) 
$$\zeta_F(u) = K \cdot \sum_{v=0}^u \frac{\mu_F(u, v)}{N(u, v)}$$

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	$9,48 \cdot 10^{-7}$
$\zeta_F(u)$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$2,83 \cdot 10^{-6}$

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  $\eta_{RER}$  in bei der Beseitigung neu entstehende Fehler je beseitigter Fehler.

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  $\eta_{RFR}/u_{v0}$ . 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 mindesten von  $N_{MV}$ .

- $\mu_F(0, 0)$  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.
- $\eta_{RER}$  Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.
- $K$  Formfaktor der Dichte der Fehlfunktionsrate ( $0 < K < 1$ ).
- $u, v$  Versionsnummern 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  $u$ .
  
- $\zeta_F(u, v)$  MF-Rate in Version  $u$  verursacht von Fehlern die in Version  $v$  entstanden sind.
- $\zeta_F(u)$  Gesamte Fehlfunktionsrate in Version  $u$ .
- $\mu_F(u, 0)$  Zu erwartende Fehleranzahl aus Version 0, die in Version  $u$  nicht beseitigt sind.
- $\zeta_F(u, 0)$  MF-Rate in Version  $u$  durch Fehlern aus Version 0 (erste freigegebene Version).

## Zusammenfassung

### 3.101 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 (Abschn. 2.2.3):

$$(2.8) \quad DL = \frac{DL_M \cdot (1 - DC)}{1 - DL_M \cdot DC}$$

$$(3.24) \quad \mu_{\text{Repl}} = DL \cdot DC \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \underbrace{(DL \cdot DC)^n}_{p_{\text{So}}(0)} = \frac{DL_M \cdot DC}{1 - DL_M \cdot DC}$$

$$(3.23) \quad \mu_{\text{Repl}} = \frac{1}{Y} - 1$$

### 3.102 Reparatur

Bei einer Reparaturiteration bis Erfolg werden auch alle nachweisbaren Fehler beseitigt, aber statt der Reduzierung der Objektanzahl im Nenner um die aussortierten Objekte entstehen neue Fehler.

- Fehlerentstehungsrate je vorhandener Fehler:

$$(3.25) \quad \eta_{RF} = p_{FE} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \xi_R \cdot (1 - p_R)^n \stackrel{\text{(SGS)}}{=} p_{FE} \cdot \frac{\xi_R}{p_R}$$

- Fehlerentstehungsrate je beseitigter Fehler:

$$(3.26) \quad \eta_{RE} = \frac{\eta_{RF}}{p_{FE}} = \frac{\xi_R}{p_R} < 1$$

- Fehlerentstehungsrate je beseitigter ursprünglicher Fehler:

$$(3.27) \quad \eta_{RER} = \frac{1}{1 - \eta_{RE}} - 1 = \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}}$$

- Fehlerentstehungsrate je vorhandener ursprünglicher Fehler:

$$(3.28) \quad \eta_{RFR} = p_{FE} \cdot \eta_{RER} = p_{FE} \cdot \left( \frac{\eta_{RE}}{1 - \eta_{RE}} \right) \text{ für } \eta_{RE} < 1$$

Zu erwartende Anzahl der nicht beseitigten Fehler:

$$(3.30) \quad \mu_F = \mu_{CF} \cdot (1 - p_{FD}) \cdot (1 + \eta_{RFR})$$

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

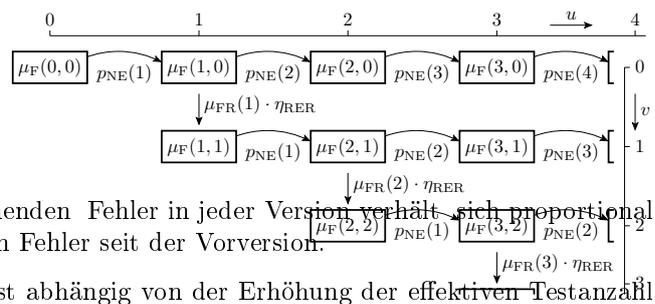
Bei kleiner Erkennungswahrscheinlichkeit  $p_{FD}$  und deutlich mehr als ein neu entstehender je 10 beseitigte Fehler kaum Verringung oder sogar Vergrößerung der Fehleranzahl durch die Reparaturiteration. Deshalb ist Rückbau nach erfolglosen Reperaturversuchen so wichtig.

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.

---

$\eta_{RE}$  Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter Fehler.

### 3.104 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 Fehlfunktionsrate 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.

### 3.105 Simulation mit Beispielwerten

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

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

Aufgrund der  $\leq u_{V0}$ -fachen Reifedauer gegenüber Fehlern früherer Versionen, haben die neuen Fehler die  $\geq 1/u_{V0}$ -fache Fehlfunktionsrate. Bei geringem relativen Testaufwand  $u_{V0}$  beobachtet der Nutzer in jeder Version hauptsächlich Fehlfunktionen durch neue Fehler.

Die Wahrnehmung neuer 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 angemessener Testaufwand  $u_{V0}$  vor jeder Versionsfreigabe.

---

$u_{V0}$  Verhältnis der Reifedauer vor Versionsfreigabe zur Reifedauererhöhung je Version.

$\eta_{RER}$  Fehlerentstehungsrate in neue Fehler je beseitigter ursprünglicher Fehler.

## 4 Fehlerentstehung

### 3.106 Erwartete Fehleranzahl (Abschn. 2.4.1)

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

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

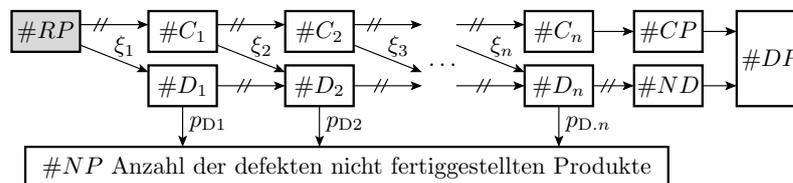
In (Abschn. 2.4.1) wurde angedeutet, dass Fehlerentstehung auch als System aus Entstehungsschritten und Beseitigungsiterationen modellierbar ist, was auch Ansatzpunkte für die Fehlervermeidung bietet. Hier folgen zwei Beispiele dazu:

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

---

$\mu_{CF}$	Zu erwartende Anzahl der Fehler aus den Entstehungsprozessen.
$\xi$	Fehlerentstehungsrate.
$M_C$	Metrik für den Entstehungsaufwand oder die Größe des Produkts.

### 3.107 Entstehungsprozesse mit Kontrollen



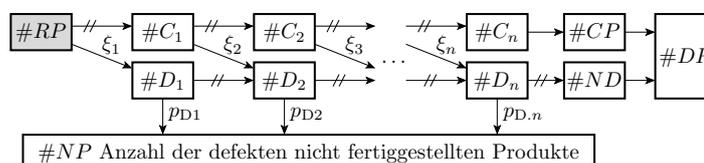
Lineare Folge von Entstehungsschritten. In jedem Schritt

- 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.

---

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

### 3.108 Prozesserbringungsrate



Der skizzierte Entstehungsprozess bricht bei erkanntem Fehler ab. Erbringungsrate für korrekte Produkte:

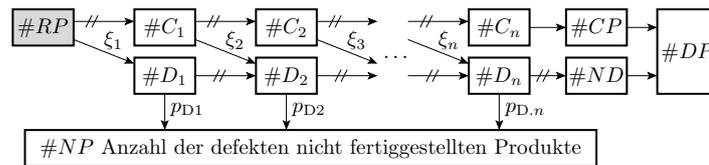
$$\eta_{CP} = \frac{\#M_{C,n}}{\#RP} \Big|_{ACR} = \prod_{i=1}^n (1 - \xi_i)$$

Erbringungsrate für Produkte mit nicht erkannten Fehlern:

$$\eta_{ND} = \xi_1 \cdot \prod_{i=1}^n (1 - p_{D,i}) + \sum_{i=1}^{n-1} \left( \prod_{j=1}^i (1 - \xi_j) \cdot \xi_{i+1} \cdot \prod_{j=i+1}^n (1 - p_{D,i}) \right) \quad (3.40)$$

$\eta_{CP}, \eta_{ND}$  Erbringungsrate von Produkten ohne und mit nicht erkannten Fehlern.  
 $\xi_i, p_{D,i}$  Fehlerentstehungsrate und Fehlernachweiswahrscheinlichkeit Schritt  $i$ .

### 3.109 Erbringungsrate komplett, Fehleranteil



Die Erbringungsrate des Entstehungsprozesses insgesamt:

$$\eta_{DP} = \frac{\#DP}{\#RP} \Big|_{ACR} = \eta_{CP} + \eta_{ND}$$

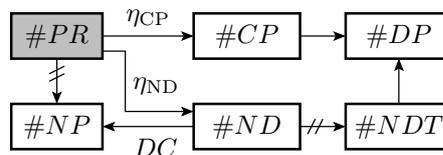
Fehleranteil der fertiggestellten Produkte:

$$DL_M = \frac{\#ND}{\#DP} \Big|_{ACR} = \frac{\eta_{ND}}{\eta_{CP} + \eta_{ND}}$$

Nach der Fertigung sortiert ein weiterer Test mit einer Defektabdeckung  $DC$  die erkennbar defekten Produkte aus. ...

$\eta_{DP}$  Erbringungsrate fertiger Produkte.  
 $\eta_{CP}, \eta_{ND}$  Erbringungsrate von Produkten ohne und mit nicht erkannten Fehlern.  
 $DL_M$  Defektanteil der Fertigung vor Aussortieren der erkannten defekten Produkte.

### 3.110 Ausbeute und Fehleranteil nach Endtest



Ausbeute bezogen auf Fertigungsaufträge:

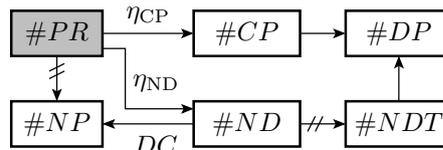
$$Y_{PR} = \frac{\#DP}{\#PR} \Big|_{ACR} = \eta_{CP} + (1 - DC) \cdot \eta_{ND}$$

Defektanteil der als gut befundenen Produkte nach dem Endtest:

$$DL = \frac{\#NDT}{\#DP} \Big|_{ACR} = \frac{(1 - DC) \cdot \eta_{ND}}{\eta_{CP} + (1 - DC) \cdot \eta_{ND}}$$

$RP, DP$  Fertigungsauftrag, gefertigtes Produkt als gut befundenen.  
 $CP, ND$  Fehlerfreies Produkt, Produkt mit nicht erkannten Fehlern.  
 $NDT$  Defektes Produkt, das auch vom Endtest als gut befunden wurde.  
 $\eta_{CP}, \eta_{ND}$  Erbringungsrate von Produkten ohne und mit nicht erkannten Fehlern.  
 $Y_{RP}, DC$  Ausbeute bezogen Fertigungsaufträge, Defektabdeckung.

### 3.111 Rentabilität



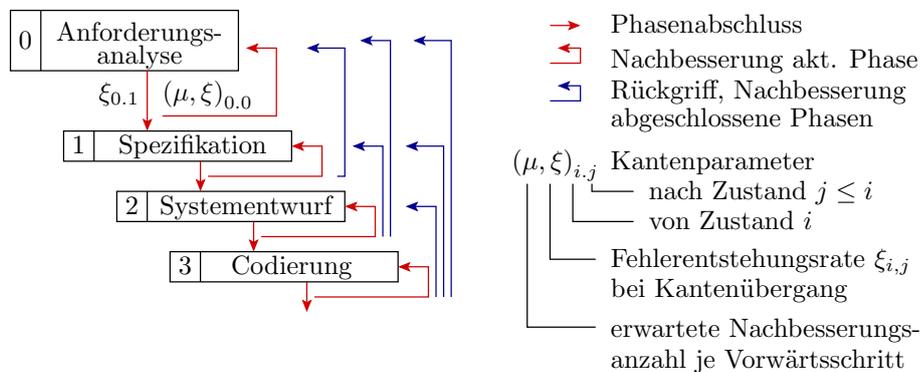
Zu erwartende Anzahl der Versuche je als gut befundenen Produkt.

$$\mu_{PR} = \frac{1}{Y_{PR}}$$

Bei zu geringer Ausbeute können auch schon in den Entstehungsprozess Reparaturiterationen eingebaut werden. Fehlerbeseitigungsiterationen lassen sich allerdings nicht mit Zählwertzuordnungsgraphen beschreiben.

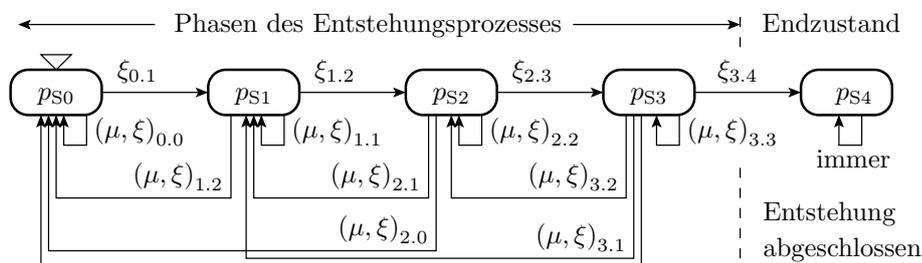
- $Y_{PR}$  Ausbeute in benutzbare Produkte je Fertigungsauftrag.
- $\mu_{PR}$  Zu erwartende Anzahl der Beauftragungen je verwendbares Produkt.

### 3.112 Entstehungsprozesse mit Rückgriffen



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

### 3.113 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 Nachbesserungsanzahl bzw. Rückgriffanzahl je Vorwärtsschritt.
- $\#PS$  Anzahl der abzuarbeitenden Prozessphasen.

- 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):

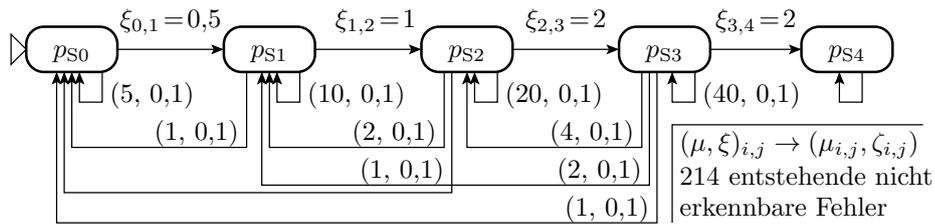
$$p_{i,i+1} = \frac{1}{1 + \sum_{j=0}^i \mu_{i,j}}$$

- Anzahl der in Simulationsschritt  $n$  entstehenden Fehler:

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

- 
- $p_{i,j}$  Übergangswahrscheinlichkeit von Phase  $i$  nach Phase  $j$ .
  - $\mu_{FS}$  Zu erwartende Anzahl aller im aktuellen Simulationsschritt entstehenden Fehler.
  - $\xi_{i,j}$  Erzeugungsrate nicht erkennbarer Fehler beim Kantenübergang  $i \rightarrow j$ .
  - $\#PS$  Anzahl der abzuarbeitenden Prozessphasen.

### 3.115 Beispiel



Übergangsmatrix der Markov-Kette und Zunahme der Fehleranzahl:

$$\begin{pmatrix} ps_0 \\ ps_1 \\ ps_2 \\ ps_3 \\ ps_4 \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} \frac{5}{6} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & \frac{1}{48} & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{12} & \frac{2}{24} & \frac{2}{48} & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} & \frac{2}{24} & \frac{4}{48} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{24} & \frac{1}{48} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{48} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ps_0 \\ ps_1 \\ ps_2 \\ ps_3 \\ ps_4 \end{pmatrix}_n$$

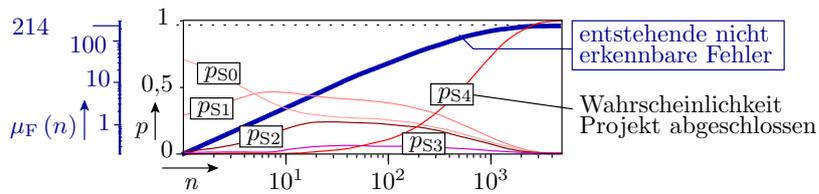
$$\mu_F(n) = \mu_F(n-1) + \mu_{FS}(n)$$

- 
- $p_{S,i}$  Wahrscheinlichkeit, dass Prozessphase  $i$  abgearbeitet wird.
  - $\mu_F(n)$  Akkumulierte Anzahl aller bis Simulationsschritt  $n$  entstehender Fehler.
  - $n$  Simulationsschrittnummer der Markov-Kette.

### 3.116 Ergebnis der Beispielsimulation

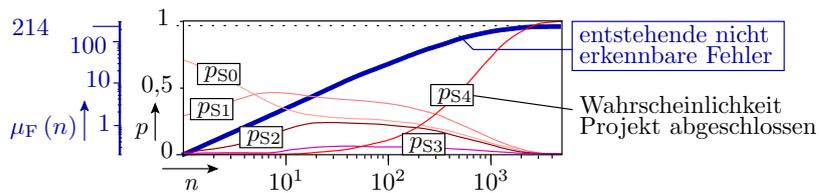
$$\begin{pmatrix} ps_0 \\ ps_1 \\ ps_2 \\ ps_3 \\ ps_4 \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} \frac{5}{6} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & \frac{1}{48} & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{12} & \frac{2}{24} & \frac{2}{48} & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} & \frac{2}{24} & \frac{4}{48} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{24} & \frac{1}{48} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{48} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ps_0 \\ ps_1 \\ ps_2 \\ ps_3 \\ ps_4 \end{pmatrix}_n$$

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



- $ps_i$       Wahrscheinlichkeit, dass sich der Entstehungsprozess in Phase  $i$  befindet.
- $\mu_F(n)$     Akkumulierte Anzahl aller bis Simulationsschritt  $n$  entstehender Fehler.
- $n$             Simulationsschrittnummer der Markov-Kette.

### 3.117 Ergebnis der Beispielsimulation

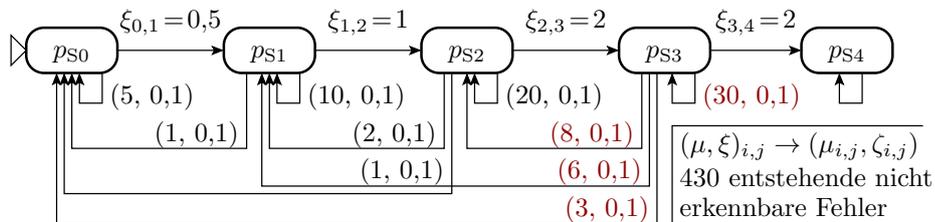


Der zu erwartende Phasenfortschritt und die stetige Zunahme der zu erwartenden Fehleranzahl sind gut zu erkennen.

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.

Zu erwartende Anzahl aller entstehenden Fehler: 214.

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



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.

### 3.119 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 parametrisierten 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.