



Test und Verlässlichkeit

Grosse Übung zu Foliensatz 2

Prof. G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (TV_GU2)

27. Juni 2022



Inhalt: Große Übungen zu Foliensatz 2

Wahrscheinlichkeit

- 1.2 Verkettete Ereignisse
- 1.3 Bedingte Wahrscheinl.
- 1.4 Fehlerbaumanalyse
- 1.5 Markov-Ketten

Fehlernachweisw.

- 2.1 Ohne Gedächtnis
- 2.2 Mit Gedächtnis

Fehlerbeseitigungsw.

- 3.3 Ersatziteration
- 3.4 Reparaturiteration



Wahrscheinlichkeit



Verkettete Ereignisse



Aufgabe 2.1: Würfelexperiment

X und Y seien die zufälligen Augenzahlen bei der Durchführung des Versuchs »würfeln mit zwei Würfeln«:

- a) $X + Y > 8$
- b) $X > Y$
- c) $(X = 5) \wedge (Y < 5)$
- d) $X \cdot Y$ ist durch drei teilbar

Bestimmen Sie jeweils

- die möglichen Ergebnisse und deren Anzahl,
- die günstigen Ergebnisse und deren Anzahl,
- die Wahrscheinlichkeit bei gleicher Auftrittshäufigkeit aller möglichen Ergebnisse.



X und Y seien die zufälligen Augenzahlen bei der Durchführung des Versuchs »würfeln mit zwei Würfeln«:

a) $X + Y > 8$

- Anzahl der Möglichkeiten:
- günstig:
- Anzahl günstig:
- Wahrscheinlichkeit:

b) $X > Y$

- Anzahl der Möglichkeiten:
- günstig:
- Anzahl günstig:
- Wahrscheinlichkeit:



X und Y seien die zufälligen Augenzahlen bei der Durchführung des Versuchs »würfeln mit zwei Würfeln«:

a) $X + Y > 8$

- Anzahl der Möglichkeiten: 36
- günstig: 3+6, 4+5, 4+6, 5+4, bis 5+6, 6+3 bis 6+6
- Anzahl günstig: $1+2+3+4=10$
- Wahrscheinlichkeit: $10/36$

b) $X > Y$

- Anzahl der Möglichkeiten: 36
- günstig: $2>1$, $3>1$, $3>2$, $4>1$ bis $4>3$, $5>1$ bis $5>4$, $6>1$ bis $6>5$
- Anzahl günstig: $1+2+3+4+5=15$
- Wahrscheinlichkeit: $15/36$



X und Y seien die zufälligen Augenzahlen bei der Durchführung des Versuchs »würfeln mit zwei Würfeln«:

c) $(X = 5) \wedge (Y < 5)$

- Anzahl der Möglichkeiten:
- günstig:
- Anzahl günstig:
- Wahrscheinlichkeit:

d) $X \cdot Y$ ist durch drei teilbar

- Anzahl der Möglichkeiten:
- günstig:
- Anzahl günstig:
- Wahrscheinlichkeit:



X und Y seien die zufälligen Augenzahlen bei der Durchführung des Versuchs »würfeln mit zwei Würfeln«:

c) $(X = 5) \wedge (Y < 5)$

- Anzahl der Möglichkeiten: 36
- günstig: (5,1) bis (5,4)
- Anzahl günstig: 4
- Wahrscheinlichkeit: $4/36$

d) $X \cdot Y$ ist durch drei teilbar

- Anzahl der Möglichkeiten: 36
- günstig: (3,1) bis (3,6), (1,3), (2,3), (4,3), (5,3), (6,1) bis (6,6), (1,6), (2,6), (4,6), (5,6)
- Anzahl günstig: 20
- Wahrscheinlichkeit: $20/36$



Aufgabe 2.2: Verkettete Würfelereignisse

- a) Welche möglichen Ergebnisse hat das Zufallsexperiment »auswürfeln einer Zahl, bei einer Sechs darf ein zweites Mal gewürfelt werden«?
- b) Mit welcher Wahrscheinlichkeit tritt jedes der möglichen Ergebnisse ein?



- a) Welche möglichen Ergebnisse hat das Zufallsexperiment »auswürfeln einer Zahl, bei einer Sechs darf ein zweites Mal gewürfelt werden«?
- b) Mit welcher Wahrscheinlichkeit tritt jedes der möglichen Ergebnisse ein?

mögliche Ergebnisse	Wahrscheinlichkeit
1 bis 5,	6^{-1}
6+1 bis 6+5	6^{-2}
6+6+1 bis 6+6+5	6^{-3}
...	...

Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Möglichkeiten:

$$\frac{5}{6} + \frac{5}{6^2} + \frac{5}{6^3} + \dots = 5 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} 6^{-i} = 5 \cdot \frac{\frac{1}{6}}{1 - \frac{1}{6}} = 1 \checkmark$$

Aufgabe 2.3: Fehlfunktionen durch Fehler

Ein System habe vier Fehler, die unabhängig von einander mit den Wahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 20\%$, $p_3 = 5\%$ und $p_4 = 1\%$ eine Fehlfunktion je Service-Leistung verursachen.

- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit p_{FFF} einer durch Fehler verursachten Fehlfunktion je SL?
- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass zehn Service-Leistungen korrekt ausgeführt werden?
- Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit für jeden der vier Fehler, dass er bei mindestens einer der zehn SL eine FF verursacht?



Ein System habe vier Fehler, die unabhängig von einander mit den Wahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 20\%$, $p_3 = 5\%$ und $p_4 = 1\%$ eine Fehlfunktion je Service-Leistung verursachen.

a) Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit p_{FFF} einer durch Fehler verursachten Fehlfunktion je SL?

- Basisereignisse A_i : Fehlfunktion bei einer SL verursacht durch Fehler i , $\mathbb{P}[A_i] = p_i$
- Ereignis A (Versagen durch einen von vier Fehlern):

$$\begin{aligned} A &= A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4 \\ A &= \overline{\bar{A}_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 \bar{A}_4} \end{aligned}$$

- Wahrscheinlichkeit von A :

$$\begin{aligned} p_{\text{FFF}} = \mathbb{P}(A) &= 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - p_i) \cdot \\ &= 1 - 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,95 \cdot 0,99 = 23,3\% \end{aligned}$$



Ein System habe vier Fehler, die unabhängig von einander mit den Wahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 20\%$, $p_3 = 5\%$ und $p_4 = 1\%$ eine Fehlfunktion je Service-Leistung verursachen.

b) Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass zehn Service-Leistungen korrekt ausgeführt werden?

- Basisereignisse A_i : Versagen bei SL i , $\mathbb{P}[A_i] = p_{\text{FFF}}$
- Ereignis B (Kein Versagen bei SL 1 bis 10):

$$B = \bar{A}_1 \wedge \bar{A}_2 \wedge \dots \wedge \bar{A}_{10}$$

- Wahrscheinlichkeit von B :

$$\begin{aligned}\mathbb{P}(B) &= \prod_{i=1}^{10} (1 - p_{\text{FFF}}) \\ &= (1 - 23,3\%)^{10} = 2\%\end{aligned}$$



Ein System habe vier Fehler, die unabhängig von einander mit den Wahrscheinlichkeiten $p_1 = 10\%$, $p_2 = 20\%$, $p_3 = 5\%$ und $p_4 = 1\%$ eine Fehlfunktion je Service-Leistung verursachen.

c) Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit für jeden der vier Fehler, dass er bei mindestens einer der zehn SL eine FF verursacht?

- Basisereignisse A_{ij} : FF durch Fehler i in SL j , $\mathbb{P}[A_{ij}] = p_i$
- Ereignis C_i (FF durch Fehler i bei mindestens eine der 10 SL):

$$\begin{aligned}C_i &= A_{i,1} \vee A_{i,2} \vee \dots \vee A_{i,10} \\ &= \overline{A_{i,1}} \overline{A_{i,2}} \dots \overline{A_{i,10}} \\ \mathbb{P}(C_i) &= 1 - \prod_{i=1}^{10} (1 - p_i) = 1 - (1 - p_i)^{10}\end{aligned}$$

p_i	10%	20%	5%	1%
$\mathbb{P}(C_i)$	65,1%	89,3%	40,1%	9,6%



Bedingte Wahrscheinl.



Aufgabe 2.4: Gewichteter Zufallstest

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein 8-Bit-Vektor für eine Service-Anfrage an eine Schaltung mit dem Wert $x = "11111110"$ angefordert wird, wenn

- unabhängig voneinander für jedes Bit mit einer Wahrscheinlichkeit von $g = 50\%$ zufällig eine Eins und sonst eine Null gewählt wird?
- unabhängig voneinander für jedes Bit mit einer Wahrscheinlichkeit von $g = 60\%$ zufällig eine Eins und sonst eine Null gewählt wird?
- Dasselbe wie in den Aufgabenteilen zuvor, nur dass für die höchstwertigen vier Bits immer derselben Zufallswert ausgewählt wird.

Die Wahrscheinlichkeit g wird auch als Wichtung der Bitstelle bezeichnet. Bitweise Wichtung wird beim Test digitaler Schaltungen eingesetzt, um die Nachweiswahrscheinlichkeiten sehr schlecht nachweisbarer Fehler zu erhöhen.



Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein 8-Bit-Vektor für eine Service-Anfrage an eine Schaltung mit dem Wert $\mathbf{x} = "11111110"$ angefordert wird, wenn

- unabhängig voneinander für jedes Bit mit einer Wahrscheinlichkeit von $g = 50\%$ zufällig eine Eins und sonst eine Null gewählt wird?
- unabhängig voneinander für jedes Bit mit einer Wahrscheinlichkeit von $g = 60\%$ zufällig eine Eins und sonst eine Null gewählt wird?

Definieren von Ereignissen G_i , dass für Bit i eine Eins ausgewählt wird. Für die beiden ersten Aufgabenteile gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = "11111110" &= G_7 \wedge G_6 \wedge G_5 \wedge G_4 \wedge G_3 \wedge G_2 \wedge G_1 \wedge \bar{G}_0 \\ P(\mathbf{x} = "11111110") &= g^7 \cdot (1 - g) \end{aligned}$$

g	50%	60%
G_4 bis G_7 unabhängig	$2^{-8} \approx 0,4\%$	$0,6^7 \cdot 0,4 = 1\%$



Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein 8-Bit-Vektor für eine Service-Anfrage an eine Schaltung mit dem Wert $x = "11111110"$ angefordert wird, wenn

c) Dasselbe wie in den Aufgabenteilen zuvor, nur dass für die höchstwertigen vier Bits immer derselben Zufallswert ausgewählt wird.

Für $G_7 = G_6 = G_5 = G_4$ gilt:

$$\begin{aligned} x = "11111110" &= G_4 \wedge G_3 \wedge G_2 \wedge G_1 \wedge \bar{G}_0 \\ P(x = "11111110") &= g^4 \cdot (1 - g) \end{aligned}$$

g	50%	60%
G_4 bis G_7 unabhängig	$2^{-8} \approx 0,4\%$	$0,6^7 \cdot 0,4 = 1\%$
$G_7 = G_6 = G_5 = G_4$	$2^{-5} \approx 3\%$	$0,6^4 \cdot 0,4 = 5\%$



Fehlerbaumanalyse



Aufgabe 2.5: Fehlerbaumanalyse

Ereignis F_1 tritt ein, wenn entweder B_1 und nicht B_2 oder nicht B_1 und B_2 eintritt. Das Ereignis F_2 tritt nur ein, wenn F_1 und B_3 eintreten.

Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse B_1 bis B_3 : $p_{B_1} = 2\%$, $p_{B_2} = 10\%$ und $p_{B_3} = 5\%$.

- a) Beschreibung als Fehlerbaum?
- b) Wahrscheinlichkeit für F_1 und F_2 ?



$$p_{B_1} = 2\%$$



$$p_{B_2} = 10\%$$



$$p_{B_3} = 5\%$$

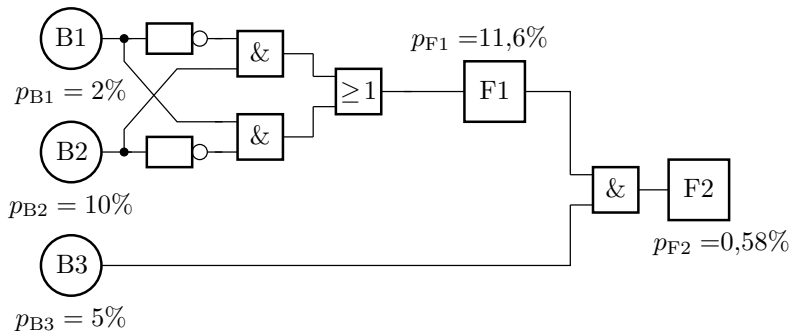
$$p_{F_1} =$$



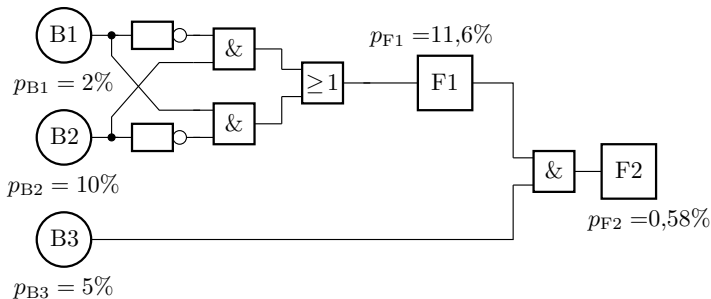
$$p_{F_2} =$$

Ereignis F_1 tritt ein, wenn entweder B_1 und nicht B_2 oder nicht B_1 und B_2 eintritt. Das Ereignis F_2 tritt nur ein, wenn F_1 und B_3 eintreten.
 Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse B_1 bis B_3 : $p_{B_1} = 2\%$,
 $p_{B_2} = 10\%$ und $p_{B_3} = 5\%$.

a) Beschreibung als Fehlerbaum?



b) Wahrscheinlichkeit für F_1 und F_2 ?



$$P(B1 \wedge \overline{B2}) = p_{B1} \cdot (1 - p_{B2}) = 2\% \cdot 90\% = 1,8\%$$

$$P(B2 \wedge \overline{B1}) = p_{B2} \cdot (1 - p_{B1}) = 10\% \cdot 98\% = 9,8\%$$

$$p_{F1} = P(B1 \wedge \overline{B2}) + P(B2 \wedge \overline{B1})^* = 1,8\% + 9,8\% = 11,6\%$$

$$p_{F2} = P(F1 \wedge B3) = 11,6\% \cdot 5\% = 0,58\%$$

(* Die Bedingungen $B1 \wedge \overline{B2}$ und $B2 \wedge \overline{B1}$ schließen sich gegenseitig aus.)

Aufgabe 2.6: Auswertung Fehlerbaum

Pump-Bypass ausgefallen



Boiler-Bypass ausgefallen



Pumpenfehler



Elektronikfehler



Ventil defekt



Durchfluss zu gering



Regelung fehlerhaft



Boiler überhitzt



Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse B_1 bis B_5
 $p_{B.i} = 10^{-3}$ für eine FF pro Tag

Wahrscheinlichkeiten p_{F_i} der Fehlerereignisse F_1 bis F_3 pro Tag?



Pump-Bypass ausgefallen



Boiler-Bypass ausgefallen



Pumpenfehler



Elektronikfehler



Ventil defekt



Durchfluss zu gering



Regelung fehlerhaft



Boiler überhitzt



Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse B_1 bis B_5
 $p_{B.i} = 10^{-3}$ für eine FF pro Tag

Wahrscheinlichkeiten p_{F_i} der Fehlerereignisse F_1 bis F_3 pro Tag?

$$\begin{aligned} p_{F1} &= 1 - (1 - \mathbb{P}[B_1]) \cdot (1 - \mathbb{P}[B_2]) \cdot (1 - \mathbb{P}[B_3]) \\ &\approx \mathbb{P}(B_1) + \mathbb{P}[B_2] + \mathbb{P}[B_3] = 0,3 \frac{\%}{\text{Tag}} \end{aligned}$$



Pump-Bypass ausgefallen



Boiler-Bypass ausgefallen



Pumpenfehler



Elektronikfehler



Ventil defekt



Boiler überhitzt



Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse B_1 bis B_5
 $p_{B.i} = 10^{-3}$ für eine FF pro Tag

Wahrscheinlichkeiten p_{F_i} der Fehlerereignisse F_1 bis F_3 pro Tag?

$$p_{F2} = 1 - (1 - \mathbb{P}[B_4]) \cdot (1 - \mathbb{P}[B_5]) \approx 0,2 \frac{\%}{\text{Tag}}$$

$$p_{F3} = p_{F1} \cdot p_{F2} \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ Tag}^{-1}$$



Markov-Ketten



Aufgabe 2.7: Wettervorhersage mit Markov-Kette

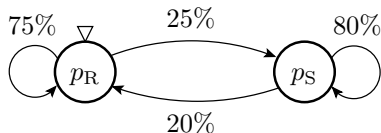
Die Wettervorhersage für die Folgetage soll durch eine Markov-Kette mit den zwei Zuständen R – »Regen« und S – »Sonnenschein« beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Regentag wieder ein Regentag folgt, sei 75% und die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Sonnentag wieder ein Sonnentag folgt, sei 80%.

- Beschreibung als Markov-Kette mit Startzustand »Regentag«?
- Aufstellen der Übergangsfunktion?
- Wenn es am Tag $i = 0$ regnet, wie groß ist für die Tage $i = 1$ bis 4 die Wahrscheinlichkeit, dass die Sonne scheint?



Die Wettervorhersage für die Folgetage soll durch eine Markov-Kette mit den zwei Zuständen R – »Regen« und S – »Sonnenschein« beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Regentag wieder ein Regentag folgt, sei 75% und die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Sonnentag wieder ein Sonnentag folgt, sei 80%.

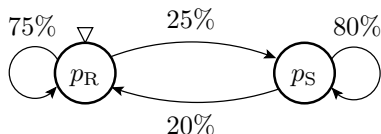
- Beschreibung als Markov-Kette mit Startzustand »Regentag«?
- Aufstellen der Übergangsfunktion?



$$\begin{pmatrix} p_R \\ p_S \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} \dots\dots & \dots\dots \\ \dots\dots & \dots\dots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_R \\ p_S \end{pmatrix}_n$$

Die Wettervorhersage für die Folgetage soll durch eine Markov-Kette mit den zwei Zuständen R – »Regen« und S – »Sonnenschein« beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Regentag wieder ein Regentag folgt, sei 75% und die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Sonnentag wieder ein Sonnentag folgt, sei 80%.

b) Aufstellen der Übergangsfunktion?



$$\begin{pmatrix} p_R \\ p_S \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} 0,75 & 0,2 \\ 0,25 & 0,8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_R \\ p_S \end{pmatrix}_n$$

Die Wettervorhersage für die Folgetage soll durch eine Markov-Kette mit den zwei Zuständen R – »Regen« und S – »Sonnenschein« beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Regentag wieder ein Regentag folgt, sei 75% und die Wahrscheinlichkeit, dass auf einen Sonnentag wieder ein Sonnentag folgt, sei 80%.

c) Wenn es am Tag $i = 0$ regnet, wie groß ist für die Tage $i = 1$ bis 4 die Wahrscheinlichkeit, dass die Sonne scheint?

$$\begin{pmatrix} p_R \\ p_S \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} 0,75 & 0,2 \\ 0,25 & 0,8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_R \\ p_S \end{pmatrix}_n$$

Tag	0	1	2	3	4
p_R	1	0,75	0,6125	0,53687	0,49528
p_S	0	0,25	0,3875	0,46313	0,50472



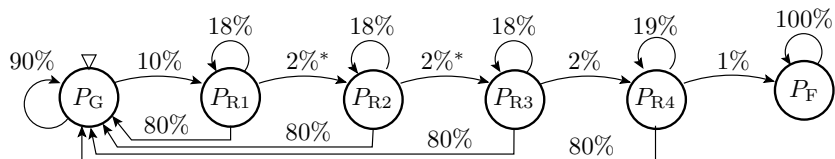
Aufgabe 2.8: Risikoanalyse

Eine schwerwiegende Fehlfunktion bei einer Maschine kann nur auftreten, wenn sie vom Grundzustand G nacheinander in höhere Riskozustände R_1 bis R_4 übergeht. Das Bedienpersonal erkennt erhöhte Riskozustände mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% und initialisiert das System dann neu (Rückkehr in den Grundzustand G). Die Wahrscheinlichkeit für den Übergang von einem in den nächsten Riskozustand betrage in jedem Zeitschritt, wenn nicht neuinitialisiert wird, 10%. In Riskozustand R_4 tritt ohne rechtzeitige Neuinitialisierung mit 5% die schwerwiegende Fehlersituation F ein.

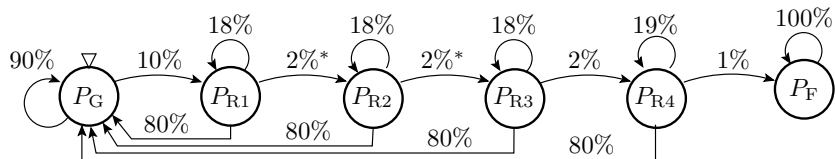
- Beschreibung als Markov-Kette?
- Programm zur Simulation der Markov-Kette?
- Wahrscheinlichkeit, dass die schwerwiegende Fehlersituation mindestens einmal eingetreten ist, für $n = 1$ bis 7 und $n = 10^6$?

Eine schwerwiegende Fehlfunktion bei einer Maschine kann nur auftreten, wenn sie vom Grundzustand G nacheinander in höhere Riskozustände R_1 bis R_4 übergeht. Das Bedienpersonal erkennt erhöhte Riskozustände mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% und initialisiert das System dann neu (Rückkehr in den Grundzustand G). Die Wahrscheinlichkeit für den Übergang von einem in den nächsten Riskozustand betrage in jedem Zeitschritt, wenn nicht neuinitialisiert wird, 10%. In Riskozustand R_4 tritt ohne rechtzeitige Neuinitialisierung mit 5% die schwerwiegende Fehlersituation F ein.

a) Beschreibung als Markov-Kette?



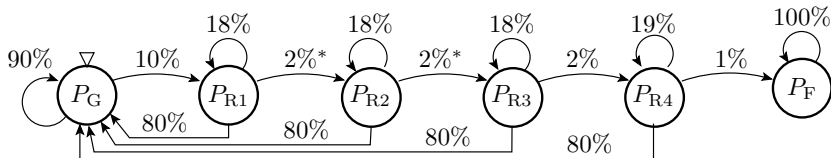
b) Programm zur Simulation der Markov-Kette?



```

PG = 100; PR1 = 0; PR2=0; PR3=0; PR4=0; PF=0;
print(' n|   P_G|   PR1|   PR2|   PR3|   PR4 |   PF');
for n in range(1,8):
    PG_n = PG*0.9 + PR1*0.8 + PR2*0.8 + PR3*0.8 + PR4*0.8;
    PR1_n = PG*0.10 + PR1*0.18;
    PR2_n = PR1*0.02 + PR2*0.18;
    PR3_n = PR2*0.02 + PR3*0.18;
    PR4_n = PR3*0.02 + PR4*0.19;
    PF = PR4*0.01 + PF;
    PG=PG_n; PR1=PR1_n; PR2=PR2_n; PR3=PR3_n; PR4=PR4_n;
    print('%3i|%6.3f| %6.3f|%6.3f|%6.3f|%8.6f|%8.6f'% (n,
        PG, PR1, PR2, PR3, PR4, PF))
  
```

c) Wahrscheinlichkeit, dass die schwerwiegende Fehlersituation mindestens einmal eingetreten ist, für $n = 1$ bis 7 und $n = 10^6$?



n	P_G	PR1	PR2	PR3	PR4	PF
1	90.000	10.000	0.000	0.000	0.000000	0.000000
2	89.000	10.800	0.200	0.000	0.000000	0.000000
3	88.900	10.844	0.252	0.004	0.000000	0.000000
4	88.890	10.842	0.262	0.006	0.000080	0.000000
5	88.889	10.841	0.264	0.006	0.000130	0.000001
6	88.889	10.840	0.264	0.006	0.000150	0.000002
7	88.889	10.840	0.264	0.006	0.000157	0.000004

10^6	87.485	10.669	0.260	0.006	0.000157	1.579632



Fehlernachweisw.



Ohne Gedächtnis



Aufgabe 2.9: Nachweiswahrscheinlichkeit

Ein System hat im Mittel bei jeder 10^4 -ten Service-Leistung eine Fehlfunktion. 70% der FF werden einem ersten, 20% einem zweiten und die restlichen 10% nicht lokalisierbaren Fehlern zugeordnet.

- Welche Nachweiswahrscheinlichkeiten p_1 und p_2 haben die beiden zugeordneten Fehler?
- Wie lang muss ein Zufallstest mindestens sein, damit der schlechter nachweisbare zugeordnete Fehler mindestens mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% nachgewiesen wird?
- Welche Zuverlässigkeit hat das System, wenn die beiden zugeordneten Fehler beseitigt sind?



Ein System hat im Mittel bei jeder 10^4 -ten Service-Leistung eine Fehlfunktion. 70% der FF werden einem ersten, 20% einem zweiten und die restlichen 10% nicht lokalisierbaren Fehlern zugeordnet.

- Welche Nachweiswahrscheinlichkeiten p_1 und p_2 haben die beiden zugeordneten Fehler?
- Wie lang muss ein Zufallstest mindestens sein, damit der schlechter nachweisbare zugeordnete Fehler mindestens mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% nachgewiesen wird?

- a) Nachweiswahrscheinlichkeiten der beiden zugeordneten Fehler:

$$p_1 = 0,7 \cdot 10^{-4}; \quad p_2 = 0,2 \cdot 10^{-4}$$

- b) Testsatzlänge für den Nachweis von Fehler 2:

$$\begin{aligned} p_2(n) &= 1 - e^{-n \cdot p_2} \geq 99\% \\ n &\geq -\frac{\ln(1 - 99\%)}{p_2} = 2,3 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



Ein System hat im Mittel bei jeder 10^4 -ten Service-Leistung eine Fehlfunktion. 70% der FF werden einem ersten, 20% einem zweiten und die restlichen 10% nicht lokalisierbaren Fehlern zugeordnet.

c) Welche Zuverlässigkeit hat das System, wenn die beiden zugeordneten Fehler beseitigt sind?

Nach Beseitigung der zugeordneten Fehler ist eine Verringerung der Häufigkeit der FF auf 10% und damit eine Verzehnfachung der Zuverlässigkeit zu erwarten:

$$Z = 10^5 \frac{SL}{FF}$$



Aufgabe 2.10: Testsatzlänge RAM-Test

Für einen Speicher mit 2^{32} Speicherplätzen sei angenommen, dass kein Fehler seltener als im Mittel aller 50 Zugriffe auf einen der 2^{32} Speicherplätze eine FF verursacht.

- Ab welcher Testsatzlänge n in Speicherzugriffen erkennt ein Zufallstest jeden Fehler mindestens mit 99% Wahrscheinlichkeit?
- Wie viele Stunden dauert ein Test mit der Mindesttestsatzlänge aus Aufgabenteil a) bei 10^8 Speicherzugriffen pro Sekunde?

Für einen Speicher mit 2^{32} Speicherplätzen sei angenommen, dass kein Fehler seltener als im Mittel aller 50 Zugriffe auf einen der 2^{32} Speicherplätze eine FF verursacht.

a) Ab welcher Testsatzlänge n in Speicherzugriffen erkennt ein Zufallstest jeden Fehler mindestens mit 99% Wahrscheinlichkeit?

Mindestnachweiswahrscheinlichkeit je Speicherzugriff:

$$\zeta_{\min} = (50 \cdot 2^{32})^{-1}$$

Mindestnachweiswahrscheinlichkeit bei n Speicherzugriffen:

$$p_{\min}(n) = 1 - e^{-n \cdot \zeta_{\min}} \geq 99\%$$

Gesuchte Testsatzlänge:

$$n \geq -\ln(1 - 99\%) \cdot \frac{1}{p_{\min}} = -\ln(1\%) \cdot 50 \cdot 2^{32} \approx 10^{12}$$



Für einen Speicher mit 2^{32} Speicherplätzen sei angenommen, dass kein Fehler seltener als im Mittel aller 50 Zugriffe auf einen der 2^{32} Speicherplätze eine FF verursacht.

b) Wie viele Stunden dauert ein Test mit der Mindesttestsatzlänge aus Aufgabenteil a) bei 10^8 Speicherzugriffen pro Sekunde?

Mindesttestdauer:

$$\begin{aligned}t &= n \cdot 10^{-8} \text{ s} \\ &= 10^{12} \cdot 10^{-8} \text{ s} = 2,75 \text{ h}\end{aligned}$$



Mit Gedächtnis



Aufgabe 2.11: RAM-Kopplungsfehler

Schreiben einer 1 in Zelle i verändert Zelle j von 0 nach 1, nachweisbar durch die Testfolge:

- Schreibe 0 in Zelle j , Wahrscheinlichkeit $p_{W0} = \frac{1}{4 \cdot \#A}$
- Schreibe 1 in Zelle i , Wahrscheinlichkeit $p_{W1} = \frac{1}{4 \cdot \#A}$
- Lese Zelle j ohne zwischenzeitlichen Schreibzugriff auf Zelle j , Wahrscheinlichkeit $p_R = \frac{1}{2 \cdot \#A}$.

a) Beschreibung des Fehlernachweises durch eine Markov-Kette?

b) Simulation der Markov-Kette mit $\#A = 128$?

c) Darstellung der FF-Rate als bedingten Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler in Schritt n nachgewiesen wird, wenn er in Schritt $n - 1$ noch nicht nachgewiesen war

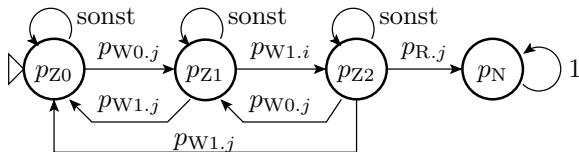
$$\zeta(n) = \frac{p_N(n+1) - p_N(n)}{1 - p_N(n)}$$

für $n = 1$ bis 5000?

Schreiben einer 1 in Zelle i verändert Zelle j von 0 nach 1, nachweisbar durch die Testfolge:

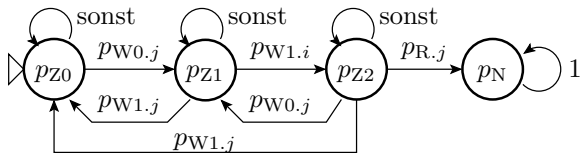
- Schreibe 0 in Zelle j , Wahrscheinlichkeit $p_{W0} = \frac{1}{4 \cdot \#A}$
- Schreibe 1 in Zelle i , Wahrscheinlichkeit $p_{W1} = \frac{1}{4 \cdot \#A}$
- Lese Zelle j ohne zwischenzeitlichen Schreibzugriff auf Zelle j , Wahrscheinlichkeit $p_R = \frac{1}{2 \cdot \#A}$.

a) Beschreibung des Fehlernachweises durch eine Markov-Kette?



Z0 – Fehleranregung nicht vorbereitet; Z1 – Fehleranregung vorbereitet; Z2 – Fehler angeregt; N – Fehler nachgewiesen.

b) Simulation der Markov-Kette mit $\#A = 128$?



$pZ0=1$; $pZ1=0$; $pZ2=0$; $pN(1)=0$; $N=5000$;

$A=128$; $pR = 1/(2*A)$; $pW = 1/(4*A)$;

for $n = 1:N$

$pZ0_n = pZ0 * (1-pW) + pZ1*pW + pZ2*pW$;

$pZ1_n = pZ0 * pW + pZ1*(1-pW-pR) + pZ2*pW$;

$pZ2_n = pZ1 * pR + pZ2*(1-2*pW-pR)$;

$pN = pN(n) + pZ2 * pR$;

$zeta(n) = pZ2*pR / (pZ0+pZ1+pZ2)$;

$pZ0=pZ0_n$; $pZ1=pZ1_n$; $pZ2=pZ2_n$;

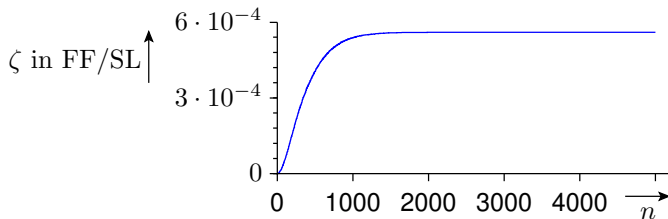
end;

plot(1:N, p);

- c) Darstellung der FF-Rate als bedingten Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler in Schritt n nachgewiesen wird, wenn er in Schritt $n - 1$ noch nicht nachgewiesen war

$$\zeta(n) = \frac{p_N(n+1) - p_N(n)}{1 - p_N(n)}$$

für $n = 1$ bis 5000?



Ab $n \geq 2000$ bleibt der relative Wahrscheinlichkeitszuwachs konstant $\zeta(n) \approx 5,7 \cdot 10^{-6}$. Zunahme der Nachweiswahrscheinlichkeit wie »ohne Gedächtnis«:

$$p(n) \approx 1 - e^{-n \cdot \zeta}$$



Fehlerbeseitigungsw.



Ersatziteration



Aufgabe 2.12: Fehleranteil nach Ersatz

Für ein gefertigtes Gerät ist die zu erwartende Ausbeute $Y = 60\%$ und der Test erkennt $FC_{Obj} = 90\%$ der fehlerhaften Geräte. Erkannte fehlerhafte Geräte werden ersetzt.

- Wie groß ist der Fehleranteil der Geräte nach der Fertigung?
- Wie hoch ist der zu erwartende Fehleranteil DL_T nach Ersatz der erkennbar defekten Geräte?



Für ein gefertigtes Gerät ist die zu erwartende Ausbeute $Y = 60\%$ und der Test erkennt $FC_{Obj} = 90\%$ der fehlerhaften Geräte. Erkannte fehlerhafte Geräte werden ersetzt.

a) Wie groß ist der Fehleranteil der Geräte nach der Fertigung?

Die Ausbeute ist abgeschätzungsweise die Wahrscheinlichkeit eines nicht erkennbaren Fehler:

$$Y \approx p_{FNE} = 1 - p_F \cdot p_E$$

Die Fehlererkennungswahrscheinlichkeit p_E ist abgeschätzungsweise FC_{Obj} . Der Fehleranteil nach der Fertigung ist abgeschätzungsweise die Wahrscheinlichkeit, dass ein gefertigtes Gerät fehlerhaft ist:

$$DL \approx p_F = \frac{1 - p_{FNE}}{p_E} \approx \frac{1 - 60\%}{90\%} = 44,4\% = 0,444 \text{ dpu}$$

(dpu – Defects per Unit).



Für ein gefertigtes Gerät ist die zu erwartende Ausbeute $Y = 60\%$ und der Test erkennt $FC_{Obj} = 90\%$ der fehlerhaften Geräte. Erkannte fehlerhafte Geräte werden ersetzt.

b) Wie hoch ist der zu erwartende Fehleranteil DL_T nach Ersatz der erkennbar defekten Geräte?

Fehleranteil nach Ersatz der erkennbar defekten Geräte fehlerhaft ist abschätzungsweise die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein nicht aussortiertes Gerät fehlerhaft ist:

$$\begin{aligned} DL_{Ers} &\approx p_{FT} = \frac{p_F \cdot (1 - p_E)}{1 - p_F \cdot p_E} = \frac{44,4\% \cdot (1 - 90\%)}{1 - 44,4\% \cdot 90\%} = 7,4\% \\ &= 0,074 \text{ dpu} = 74.000 \text{ dpm} \end{aligned}$$

(dpm – Defects per Million). Etwa noch jedes 14. Gerät ist fehlerhaft.



Aufgabe 2.13: Fehlerüberdeckung Schaltkreistest

Die zu erwartende Ausbeute einer Schaltkreisfertigung sei $Y = 80\%$ und der Fehleranteil der vom Test als gut befundenen Schaltkreise sei $DL_T = 1000$ dpm.

- Auf welche Fehlerüberdeckung $FC \approx p_E$ der Tests lässt das schließen?
- Wie wirkt sich ein Ausbeuteeinbruch auf $Y = 30\%$ durch eine technologische Umstellung auf den Fehleranteil der gefertigten Schaltkreise aus?



Die zu erwartende Ausbeute einer Schaltkreisfertigung sei $Y = 80\%$ und der Fehleranteil der vom Test als gut befundenen Schaltkreise sei $DL_T = 1000$ dpm.

a) Auf welche Fehlerüberdeckung $FC \approx p_E$ der Tests lässt das schließen?

Die Ausbeute ist abgeschätzungsweise die Wahrscheinlichkeit eines nicht erkennbaren Fehler:

$$Y \approx p_{FNE} = 1 - p_F \cdot p_E$$

Der Fehleranteil nach Fehlerbeseitigung strebt gegen die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein nicht aussortiertes Gerät fehlerhaft ist:

$$DL_T \approx p_{FT} = \frac{p_F \cdot (1 - p_E)}{1 - p_F \cdot p_E} = \frac{(1 - p_{FNE}) \cdot (1 - p_E)}{p_E \cdot p_{FNE}}$$

Die gesuchte Fehlerüberdeckung ist abgeschätzungsweise die Erkennungswahrscheinlichkeit:

$$FC \approx p_E = \frac{1 - p_{FNE}}{p_{FT} \cdot p_{FNE} + 1 - p_{FNE}} = \frac{1 - 80\%}{10^{-3} \cdot 80\% + 1 - 80\%} = 99,6\%$$



Die zu erwartende Ausbeute einer Schaltkreisfertigung sei $Y = 80\%$ und der Fehleranteil der vom Test als gut befundenen Schaltkreise sei $DL_T = 1000$ dpm.

b) Wie wirkt sich ein Ausbeuteeinbruch auf $Y = 30\%$ durch eine technologische Umstellung auf den Fehleranteil der gefertigten Schaltkreise aus?

$$\begin{aligned} DL_T \approx p_{FT} &= \frac{(1 - p_{FNE}) \cdot (1 - p_E)}{p_E \cdot p_{FNE}} \\ &= \frac{(1 - 30\%) \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{30\% \cdot 99,6\%} = 9,4 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Ein Ausbeuteeinbruch von 80% auf 30% bewirkt, dass sich der Fehleranteil der eingesetzten Schaltkreise fast verzehnfacht.



Reparaturiteration



Aufgabe 2.14: Fehlerbeseitigung durch Reparatur (1)

Ein Programm von 1.000 NLOC habe abschätzungsweise nach dem Syntaxtest und der erfolgreichen Abarbeitung der ersten Testbeispiele noch 20 Fehler. Der nachfolgende Test habe einer Erkennungswahrscheinlichkeit von $p_E = 60\%$.

- Wie groß darf die Anzahl der neu entstehenden Fehler je vorhandener Fehler μ_{Rep} maximal sein, damit sich die Anzahl der nicht beseitigten Fehler halbiert?
- Wie groß darf die Fehlerentstehungsrate η_{Rep} (neu entstehende Fehlern je Reparaturversuch) maximal sein, wenn die Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur $p_R = 30\%$ beträgt?

Ein Programm von 1.000 NLOC habe abschätzungsweise nach dem Syntaxtest und der erfolgreichen Abarbeitung der ersten Testbeispiele noch 20 Fehler. Der nachfolgende Test habe einer Erkennungswahrscheinlichkeit von $p_E = 60\%$.

a) Wie groß darf die Anzahl der neu entstehenden Fehler je vorhandener Fehler μ_{Rep} maximal sein, damit sich die Anzahl der nicht beseitigten Fehler halbiert?

Anteil der nicht beseitigt Fehler:

$$\frac{\#F_{\text{TB}}}{\#F} = \frac{(1 - p_E)}{1 - \mu_{\text{Rep}}} \leq 0,5$$

aufgelöst nach der Anzahl der neu entstehenden Fehler je vorhandener Fehler:

$$\mu_{\text{Rep}} \leq 1 - \frac{(1 - p_E)}{0,5} = 1 - \frac{(1 - 0,6)}{0,5} = 0,2$$



Ein Programm von 1.000 NLOC habe abschätzungsweise nach dem Syntaxtest und der erfolgreichen Abarbeitung der ersten Testbeispiele noch 20 Fehler. Der nachfolgende Test habe einer Erkennungswahrscheinlichkeit von $p_E = 60\%$.

b) Wie groß darf die Fehlerentstehungsrate η_{Rep} (neu entstehende Fehlern je Reparaturversuch) maximal sein, wenn die Erfolgswahrscheinlichkeit der Reparatur $p_R = 30\%$ beträgt?

Anzahl der neu entstehenden Fehler je vorhandener Fehler:

$$\mu_{\text{Rep}} = \frac{p_E \cdot \eta_{\text{FR}}}{p_R} = 0,2$$

aufgelöst nach der Fehlerentstehungsrate

$$\eta_{\text{Rep}} = \frac{p_R \cdot \mu_{\text{Rep}}}{p_E} = \frac{30\% \cdot 0,2}{60\%} = 0,1$$

neu entstehende Fehlern je Reparaturversuch.



Aufgabe 2.15: Fehlerbeseitigung durch Reparatur (2)

Der Test eines Programms erkennt 95% der $\#F = 100$ entstandenen Fehler. Die Beseitigung eines erkannten Fehler erfordert im Mittel 5 Reparaturversuche ($p_R = 1/5$) und bei 10 Reparaturversuchen entsteht im Mittel 1 neuer Fehler ($\eta_{FR} = 0,1$).

- Wie groß ist die zu erwartende Fehleranzahl $\#F_{TB}$ im Einsatz?
- Zu erwartende Fehleranzahl $\#F_{TB}$ im Einsatz, wenn schlechte Fehlerlokalisierung und Verzicht auf Rückbau die Anzahl der Reparaturversuche je erkannter Fehler um ein Drittel und die Fehlerentstehungsrate je Reparaturversuch η_{FR} um 50% erhöhen?



Der Test eines Programms erkennt 95% der $\#F = 100$ entstandenen Fehler. Die Beseitigung eines erkannten Fehler erfordert im Mittel 5 Reparaturversuche ($p_R = 1/5$) und bei 10 Reparaturversuchen entsteht im Mittel 1 neuer Fehler ($\eta_{FR} = 0,1$).

a) Wie groß ist die zu erwartende Fehleranzahl $\#F_{TB}$ im Einsatz?

Fehleranzahl nach der Beseitigungsiteration

$$\#F_{TB} = \frac{\#F \cdot (1 - p_E)}{1 - \frac{p_E \cdot \eta_{FR}}{p_R}}$$

mit $p_E = 95\%$, $p_R = 1/5$ und $\eta_{FR} = 0,1$:

$$\#F_{TB} = \frac{100 \cdot (1 - 95\%)}{1 - \frac{95\% \cdot 0,1}{0,2}} = 9,5$$

Davon sind abschätzungsweise 5 nicht erkannte Fehler aus dem Entstehungsprozess und 4,5 bei Reparaturversuchen entstandene Fehler. Gebrochene Werte für die Fehleranzahl sind hier ok, weil in Wirklichkeit Erwartungswerte geschätzt werden (siehe später Foliensatz F3).



Der Test eines Programms erkennt 95% der $\#F = 100$ entstandenen Fehler. Die Beseitigung eines erkannten Fehler erfordert im Mittel 5 Reparaturversuche ($p_R = 1/5$) und bei 10 Reparaturversuchen entsteht im Mittel 1 neuer Fehler ($\eta_{FR} = 0,1$).

b) Zu erwartende Fehleranzahl $\#F_{TB}$ im Einsatz, wenn schlechte Fehlerlokalisierung und Verzicht auf Rückbau die Anzahl der Reparaturversuche je erkannter Fehler um ein Drittel und die Fehlerentstehungsrate je Reparaturversuch η_{FR} um 50% erhöhen?

6,66 statt 5 Reparaturversuche je Fehler $\Rightarrow p_R = 0,15$ und $\eta_{FR} = 0,1 \cdot 1,5 = 0,15$, d.h. Sonderfall $p_R = \eta_{FR}$:

$$\#F_{TB} = \frac{\#F \cdot (1 - p_E)}{1 - \frac{p_E \cdot \eta_{FR}}{p_R}} = \#F = 100$$

Es werden 95% der ursprünglichen und neu entstehenden Fehler beseitigt. Somit sind laut Rechnung 95 nicht erkennbare neue und $\frac{95}{1-0,95} = 1900$ neue Fehler insgesamt entstanden. Das System wird dennoch recht zuverlässig sein, weil die vom Test nicht nachweisbaren Fehler vermutlich jeder nur eine geringe FF-Raten haben.