



Test und Verlässlichkeit

Grosse Übung zu Foliensatz 3

Prof. G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (TV_GUeF3)
27. Juni 2017



Inhalt: Große Übungen zu Foliensatz 3

Informationsredundanz

- 1.1 Fehlererkennende Codes
- 1.2 Prüfkennzeichen
- 1.3 Fehlerkorr. Codes
- 1.4 Hamming-Codes

Formatkontrolle

- 2.1 Syntaxtest
- 2.2 Typ und Wertebereich

Wertekontrollen

- 3.1 Mehrfachber. & Vergleich
- 3.2 Diversität
- 3.3 Loop-Back-Test



Informationsredundanz



Fehlererkennende Codes



Aufgabe 3.1: Arithmetischer Code

- 1 Bilden Sie für den Bitvektor

110010001000011101

das fehlererkennende Codewort durch Multiplikation seines Wertes als vorzeichenfreie ganze Binärzahl mit der Primzahl 10313 (Bestimmung des Dezimalwerts, Multiplikation und Konvertierung des Produkts in einen Binärvektor).

- 2 Mit welcher Wahrscheinlichkeit werden mit dem gewählten fehlererkennenden Code Datenverfälschungen erkannt?
- 3 Werden mit dem gewählten Code Verfälschung erkannt, die die Bitstellen 3 und 14 invertieren?

Hinweis: Die Division ist linear. Laut Überlagerungssatz weicht der Divisionsrest genau dann vom Sollwert ab, wenn die Soll- / Ist-Differenz der Code-Worte einen Divisionsrest ungleich null hat.



Zur Kontrolle

1 Codewort berechnen:

- Eingabewert hexadezimal: 11.0010.0010.0001.1101 = 0x3221D
- Mit Octave (Matlab) Produkt als hexadezimal:

```
>> printf( 'CW=0x%x \n' ,0x3221D*10313)
CW=0x7e394245
```

binär: 0b111.1110.0011.1001.0100.0010.0100.0101

2 Erkennungswahrscheinlichkeit:

$$p_E \approx 1 - \frac{1}{10313} = 99,990\%$$

3 Keine Maskierung, wenn Bit 3 und 14 invertiert ist:

$$\text{Rest}\left(\frac{0b100.0000.0000.1000}{10313}\right) \neq 0\checkmark$$

Für Differenzen ungleich null, die kleiner als der Quotient sind, immer erfüllt.



Prüfkennzeichen



Aufgabe 3.2: Prüfsummen

Bilden Sie für die Bytefolge

0x13, 0xF2, 0x33, 0xE6

die Prüfsumme:

- 1 durch byteweises Aufsummieren unter Vernachlässigung der Überträge und
- 2 durch bitweise EXOR-Verknüpfung der Bytes.

Welche der beiden Prüfsummen erkennt, dass die nachfolgenden Datenfolgen verfälscht sind?

F1: 0x13, 0x33, 0xF2, 0xE6

F2: 0x13, 0xF2, 0x37, 0xE6

F3: 0x13, 0xF1, 0x90, 0x56



Wert unverf.	(Teil-) Prüfsum.	binär	Wert F1	(Teil-) Prüfsum.	binär
0x13			0x13		
0xF2			0x33		
0x33			0xF2		
0xE6			0xE6		
	EXOR:			EXOR:	

Wert F2	(Teil-) Prüfsum.	binär	Wert F3	(Teil-) Prüfsum.	binär
0x13			0x13		
0xF2			0xF1		
0x37			0x90		
0xE6			0x56		
	EXOR:			EXOR:	

	erkennbar an Prüfsumme	erkennbar an EXOR-Summe
F1		
F2		
F3		



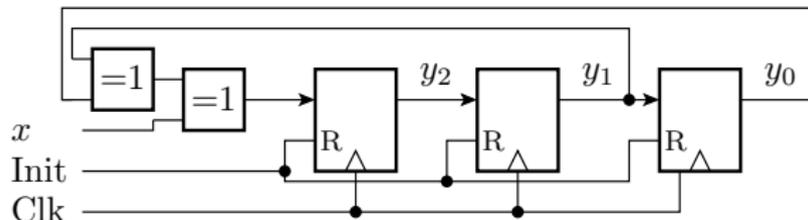
Zur Kontrolle

Wert	(Teil-) Prüfsum.	binär	Wert	(Teil-) Prüfsum.	binär
0x13	0x13	0001 0011	0x13	0x13	0001 0011
0xF2	0x05	1111 0010	0x33	0x46	0011 0011
0x33	0x38	0011 0011	0xF2	0x38	1111 0010
0xE6	0x1E	1110 0110	0xE6	0x1E	1110 0110
	EXOR:	0011 0100		EXOR:	0011 0100

Wert	(Teil-) Prüfsum.	binär	Wert	(Teil-) Prüfsum.	binär
0x13	0x13	0001 0011	0x13	0x13	0001 0011
0xF2	0x05	1111 0010	0xF1	0x04	1111 0001
0x37	0x3C	0011 0111	0x90	0x94	1001 0000
0xE6	0x22	1110 0110	0x46	0xDA	0100 0110
	EXOR:	0011 0000		EXOR:	0011 0100

Aufgabe 3.3: Prüfkennzeichen mit LFSR

Gegeben ist folgendes linear rückgekoppelte Schieberegister:



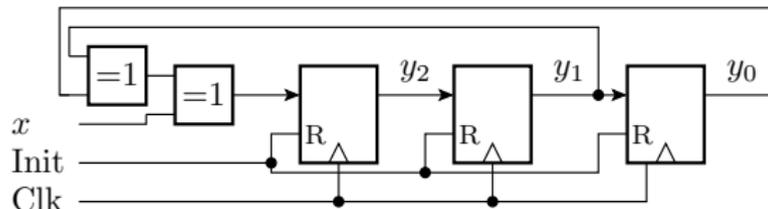
	x	y_2	y_1	y_0
0	1	0	0	0
1	0			
2	1			
3	1			
4	0			
5	0			
6	1			
7	1			
8	0			
9	1			
10	0			
11	0			
12	1			
13	0			
14	1			
15	0			
PKZ:				

- 1 Auf welches Prüfkennzeichen $\mathbf{y} = y_2y_1y_0$ wird die Datenfolge 1011 0011 0100 1010 beginnend mit dem linken Bit und Startwert 000 abgebildet? Füllen Sie dazu die Tabelle in der Abbildung aus.
- 2 Wie hoch ist Fehlererkennungswahrscheinlichkeit?



Zur Kontrolle

- 1 Prüfkennzeichen der Datenfolge 1011 0011 0100 1010:



	x	y_2	y_1	y_0
0	1	0	0	0
1	0	1	0	0
2	1	0	1	0
3	1	0	0	1
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	1	0	0	0
7	1	1	0	0
8	0	1	1	0
9	1	1	1	1
10	0	1	1	1
11	0	0	1	1
12	1	0	0	1
13	0	0	0	0
14	1	0	0	0
15	0	1	0	0
PKZ:		0	1	0

- 1 Fehlererkennungswahrscheinlichkeit:

$$\begin{aligned}
 p_E &\approx 1 - 2^{-3} \\
 &= 87,5\%
 \end{aligned}$$



Fehlerkorr. Codes



Aufgabe 3.4: Berechnung der Kreuzparität

1011001001101000	<input type="checkbox"/>	Längsparität
1100001110010011	<input type="checkbox"/>	
0110010010101101	<input type="checkbox"/>	
1000100001100101	<input type="checkbox"/>	
1101001011010011	<input type="checkbox"/>	
1101000010011110	<input type="checkbox"/>	
1010011000010101	<input type="checkbox"/>	
1011010010100110	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>		

Querparität

- 1 Ergänzen Sie die Bitwerte für die Längs- und Querparität so, dass die Anzahl der Einsen in jeder Zeile und Spalte incl. Paritätsbit gerade ist.
- 2 Woran ist eine Invertierung des rot unterlegten Bits zu erkennen?



Zur Kontrolle

- 1 Ergänzte Bitwerte für die Längs- und Querparität:

1011001001101000	1	Längsparität
1100001110010011	0	
0110010010101101	0	
1000100001100101	0	
1101001011010011	1	
1101000010011110	0	
1010011000010101	1	
1011010010100110	0	
1000110111001111	0	Querparität

- 2 Die Invertierung des rot unterlegten Bits ist an einem Paritätsfehler in Zeile 6 und in Spalte 7 zu erkennen.



Hamming-Codes



Aufgabe 3.5: (8,12)-Hamming-Code

b_{12}	b_{11}	b_{10}	b_9	b_8	b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1
x_7	x_6	x_5	x_4	q_3	x_3	x_2	x_1	q_2	x_0	q_1	q_0

$$q_0 = x_0 \oplus x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus x_6$$

$$q_1 = x_0 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_5 \oplus x_6$$

$$q_2 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_7$$

$$q_3 = x_4 \oplus x_5 \oplus x_6 \oplus x_7$$

- 1 Bilden Sie die Codeworte für die darzustellenden Werte:
 $w_1 = 0x73$, $w_2 = 0x1D$ und $w_3 = 0xD6$.
- 2 Bestimmen Sie für die Codeworten $c_4 = 0xA24$, $c_5 = 0x5D6$
und $c_6 = 0x141$, ob zulässig oder korrigierbar und wenn zulässig
oder korrigierbar, den Wert.



- 1 Codeworte für die darzustellenden Werte: 0x73, 0x1D und 0xD6.
- 2 Wert von 0xA24, 0x5D6 und 0x141

Bitnummer	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Zuordnung	x_7	x_6	x_5	x_4	q_3	x_3	x_2	x_1	q_2	x_0	q_1	q_0
Kontrollbits	<u>—</u>											
$w_1 = 0x73$												
$w_2 = 0x1D$												
$w_3 = 0xD6$												
$c_4 = 0xA24$												
$c_5 = 0x5D6$												
$c_6 = 0x141$												



Zur Kontrolle

Bitnummer	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
Zuordnung	x_7	x_6	x_5	x_4	q_3	x_3	x_2	x_1	q_2	x_0	q_1	q_0	
Kontrollbits	<u>—</u>												
$w_1 = 0x73$	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	$c_1 = 0x79E$
$w_2 = 0x1D$	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	$c_2 = 0x1E7$
$w_3 = 0xD6$	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	$c_3 = 0xDB9$
$c_4 = 0xA24$	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	$dq_4 = 3$
$c_5 = 0x5D6$	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	$dq_5 = 9$
$c_6 = 0x141$	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	$dq_6 = 15$

w_4 : Wert 0xA5 mit verfälschtem $x_0 \Rightarrow w_4 = 0xA4$

w_5 : Wert 0x5B mit verfälschtem $x_4 \Rightarrow w_5 = 0x4B$

w_6 : Wert 0x18 mit verfälschtem »Bit 15«, nicht korrigierbar.



Formatkontrolle



Syntaxtest



Aufgabe 3.6: Entwurf Kontrollautomat

Ein (vereinfachter) Rechnerbefehlssatz besteht aus vier verschiedenen Befehlstypen

```
add□rr,rr;  
addi□rr,imm8;  
sub□rr,rr;  
subi□rr,imm8;
```

□ – Leerzeichen; »rr« Bezeichner eines der 32 Register ("r0", "r1", ... "r31"); »imm8« für die Wert einer 8-Bit Hexzahl ("0x00", "0x01", ..., "0xFF"; "0x" gefolgt von zwei Hex.-Ziffern mit den Zifferenwerten 'A' bis 'F').

- 1 Beschreiben Sie das Befehlsformat in der EBNF mit den Ersetzungsregeln für Sequenz, Option, Wiederholung etc.
- 2 Entwerfen Sie einen Kontrollautomaten auf Syntaxfehler als Graph für einen Moore-Automaten.



Zur Kontrolle

```
add□rr,rr; addi□rr,imm8;
sub□rr,rr; subi□rr,imm8;
```

- rr: für die Bezeichner eines der 32 Register "r0", "r1", ... "r31"
- imm8: 8-Bit Hexzahl in der Form "0x00", "0x01", ..., "0xFF"
- □: Leerzeichen.

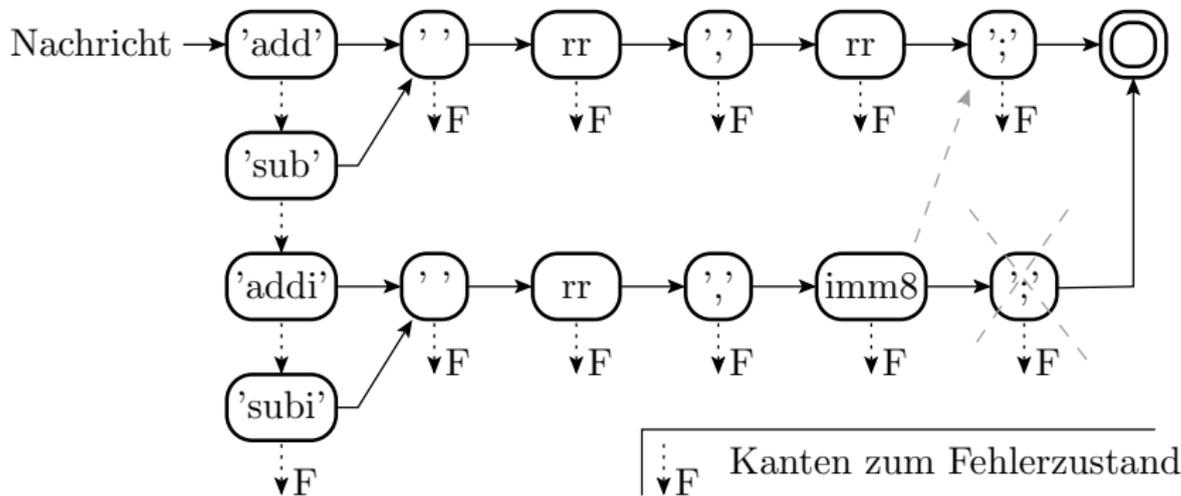
1 EBNF-Beschreiben:

```
Befehl = ('add' | 'sub', '□', rr, ',', rr, ';' ) |
        ('addi' | 'subi', '□', rr, ',', imm8, ';');
rr      = 'r', (z | (('1' | '2'), z) | ('3', ('0' | '1'))
imm8    = '0x', h, h;
z       = '0' | '1' | ... | '9';
h       = z | 'A' | 'B' | ... | 'F'
```



Befehl = ('add' | 'sub', '□', rr, ',,' , rr, ';') |
 ('addi' | 'subi', '□', rr, ',,' , imm8, ';') | ;

2 Moore-Automat für den Test auf Syntaxfehler:



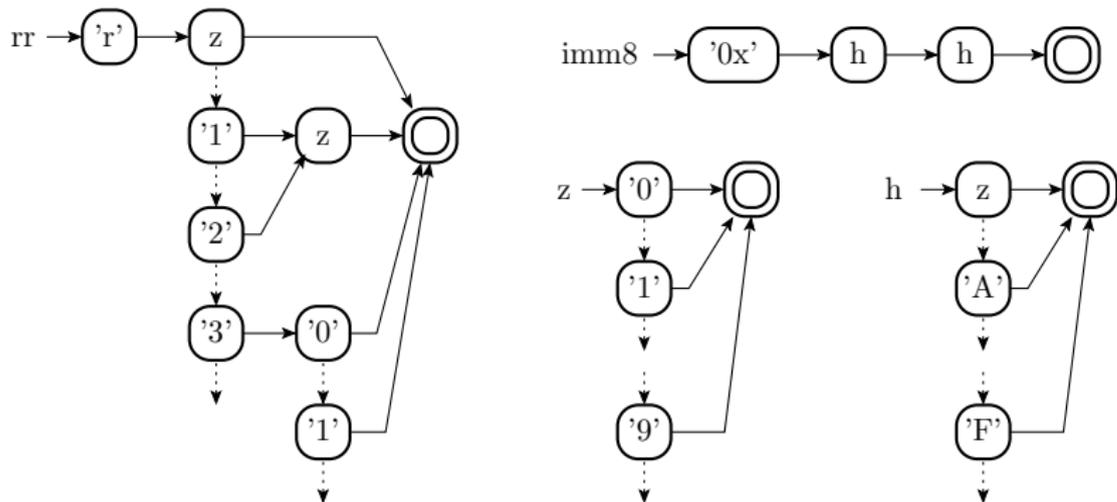


```

rr      = 'r', (z | (('1' | '2'), z) | ('3', ('0' | '1')));
imm8    = '0x', h, h;
z       = '0' | '1' | ... | '9';
h       = z | 'A' | 'B' | ... | 'F'

```

Automat für den Test der Befehlsbestandteile auf Syntaxfehler:





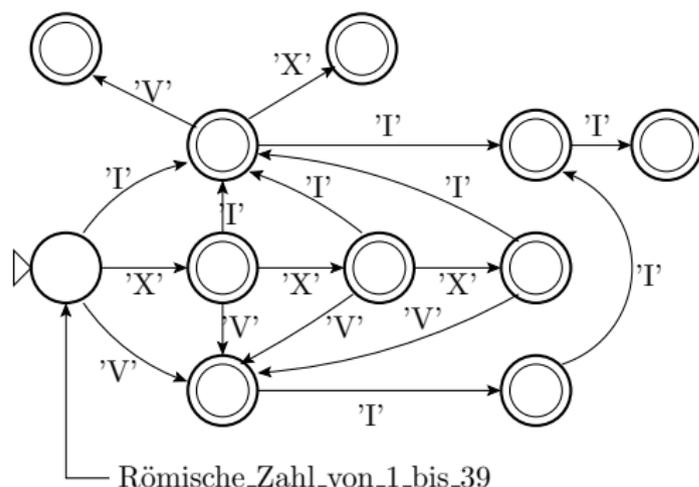
Aufgabe 3.7: Syntaxtest für römische Zahlen

Entwerfen Sie einen Mealy-Kontrollautomaten¹ für einen Syntaxtest für römische Zahlen mit einem Wert von 1 bis 39.

Wert		Wert		Wert		Wert	
1	I	11	XI	21	XXI	31	XXXI
2	II	12	XII	22	XXII	32	XXXII
3	III	13	XIII	23	XXIII	33	XXXIII
4	IV	14	XIV	24	XXIV	34	XXXIV
5	V	15	XV	25	XXV	35	XXXV
6	VI	16	XVI	26	XXVI	36	XXXVI
7	VII	17	XVII	27	XXVII	37	XXXVII
8	VIII	18	XVIII	28	XXVIII	38	XXXVIII
9	IX	19	XIX	29	XXIX	39	XXXIX
10	X	20	XX	30	XXX		

¹Ein Mealy-Automat, der die Zeichen an den Kanten abbräumt.

Zur Kontrolle



I	XI	XXI	XXXI
II	XII	XXII	XXXII
III	XIII	XXIII	XXXIII
IV	XIV	XXIV	XXXIV
V	XV	XXV	XXXV
VI	XVI	XXVI	XXXVI
VII	XVII	XXVII	XXXVII
VIII	XVIII	XXVIII	XXXVIII
IX	XIX	XXIX	XXXIX
X	XX	XX	

(potentieller) Endzustand

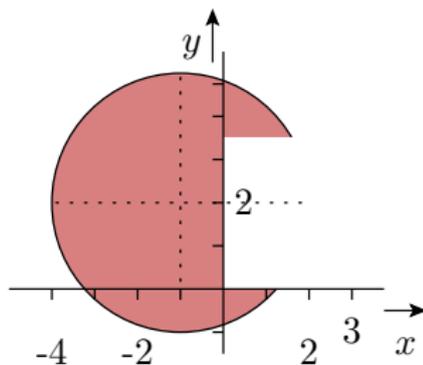
Bei allen Eingaben, für die keine Kante gezeichnet ist, Übergang in den Fehlerzustand.



Typ und Wertebereich

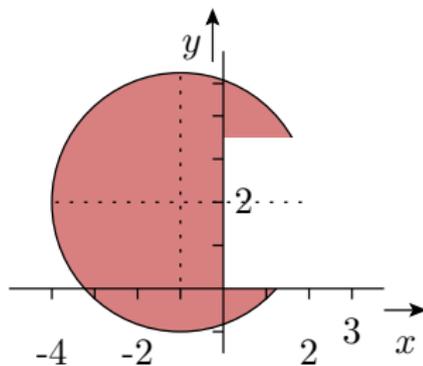
Aufgabe 3.8: Kontrollausdruck

Die Wertpaare (x, y) sollen Punkte der im nachfolgenden Bild eingezeichneten Kreisfläche mit dem Mittelpunkt $(-1, 2)$ und dem Radius 3 mit dem ausgeschnittenen rechteckigen Bereich sein.



Entwickeln Sie einen Kontrollausdruck für die Wertebereichskontrolle, der genau dann wahr ist, wenn ein Punkt (x, y) im zulässigen Bereich liegt.

Zur Kontrolle



Kontrollausdruck für die Wertebereichskontrolle:

$$((x < 0) \vee (y < 0) \vee (y > 3,5)) \wedge ((x + 1)^2 + (y - 2)^2 < 3^2)$$



Aufgabe 3.9: Kontrollgüte

Ein System von Wertebereichskontrollen hat von $N_{FF} = 2000$ Fehlfunktionen $N_{FF.Erk.ist} = 800$ erkannt. Die Anzahl der erkannten FF sei normalverteilt. Abhängigkeiten zwischen dem Auftreten der Fehlerfunktionen seien vernachlässigbar ($\kappa = 1$).

- 1 Wie groß ist die Fehlererkennungswahrscheinlichkeit mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% mindestens?
- 2 Wie groß ist die Fehlererkennungswahrscheinlichkeit mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% maximal?

Lösungshinweise:

- Abschätzung des Erwartungswertbereiches der Anzahl der nicht erkannten FF aus einem experimentell bestimmten Ist-Wert.
- Division durch die Anzahl aller Fehlfunktionen.



... $N_{\text{FF}} = 2000$ Fehlfunktionen $N_{\text{FF.Erk.ist}} = 800$ erkannt, $\kappa = 1$,
Irrtumswahrscheinlichkeiten $\alpha_1 = \alpha_2 = 1\%$.

Bereich des Erwartungswerts mit $X = N_{\text{FF.Erk}}$:

$$\begin{aligned} E(X)_{\min / \max} &= X_{\text{ist}} \mp \sqrt{\kappa \cdot X_{\text{ist}} \cdot \left(1 - \frac{X_{\text{ist}}}{N_{\text{FF}}}\right) \cdot \Phi^{-1}(1 - \alpha)} \\ &= 800 \mp \sqrt{800 \cdot \left(1 - \frac{800}{2000}\right) \cdot 2,33} = [749, 851] \end{aligned}$$

α	4,54%	0,26%	0	2%	1%	0,5%	0,2%	0,1%
$\Phi^{-1}(1 - \alpha)$	2	3	4	2,05	2,33	2,57	2,88	3,10

Bereich der Erkennungswahrscheinlichkeit:

$$\begin{aligned} p_{\text{E.min}} &= \frac{E(X)_{\min}}{N_{\text{FF}}} = 37,4\% \\ p_{\text{E.max}} &= \frac{E(X)_{\max}}{N_{\text{FF}}} = 42,5\% \end{aligned}$$



Wertekontrollen



Mehrfachber. & Vergleich

Aufgabe 3.10: Vergleichsfenster

Zwei zu vergleichende voneinander unabhängige normalverteilte Zufallsgrößen X_1 und X_2 haben denselben Erwartungswert und die Standardabweichungen $\sqrt{D^2(X_1)} = 3$ und $\sqrt{D^2(X_2)} = 4$. Wie groß ist für eine Kontrolle

`if (abs(X1 - X2) > eps) {<Fehlerbehandlung>};`

der Radius ε des Vergleichsfenster mindestens zu wählen, damit die Wahrscheinlichkeit für Vergleichs-Phantom-FF $p_{\text{Phan}} \leq 0,1\%$ ist?

$$E(X_1 - X_2) = \varepsilon =$$

$$\sqrt{D^2(X_1 - X_2)} =$$

z	...,0	...,1	...,2	...,3	...,4	...,5	...,6	...,7	...,8	...,9
0,...	0,5000	0,5398	0,5793	0,6179	0,6554	0,6915	0,7257	0,7580	0,7881	0,8159
1,...	0,8413	0,8643	0,8849	0,9032	0,9192	0,9332	0,9452	0,9554	0,9641	0,9713
2,...	0,9772	0,9821	0,9861	0,9893	0,9918	0,9938	0,9953	0,9965	0,9974	0,9981
3,...	0,9987	0,9990	0,9993	0,9995	0,9997	0,9998	0,9998	0,9999	0,9999	1,0000



Zur Kontrolle

- Der Erwartungswert der Differenz unabhängiger Zufallsgrößen ist die Differenz der Erwartungswerte:

$$E(X_1 - X_2) = 0$$

- Die Varianz der Differenzen ist die Summe der Varianzen:

$$\sqrt{D^2(X_1 - X_2)} = \sqrt{D^2(X_1) + D^2(X_2)} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

- Standardisierter Normalverteilungswert für beiderseitig $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,05\%$ ist etwa 3,3.

z	...,0	...,1	...,2	...,3	...,4	...,5	...,6	...,7	...,8	...,9
0,...	0,5000	0,5398	0,5793	0,6179	0,6554	0,6915	0,7257	0,7580	0,7881	0,8159
1,...	0,8413	0,8643	0,8849	0,9032	0,9192	0,9332	0,9452	0,9554	0,9641	0,9713
2,...	0,9772	0,9821	0,9861	0,9893	0,9918	0,9938	0,9953	0,9965	0,9974	0,9981
3,...	0,9987	0,9990	0,9993	0,9995	0,9997	0,9998	0,9998	0,9999	0,9999	1,0000

- Mindestintervallradius für das Vergleichsfenster:

$$\varepsilon \approx 3,3 \cdot 5 = 16,5$$



Aufgabe 3.11: Quantisierungsfehler

1 Runden Sie die nachfolgenden Werte

$$a = 123,6793; \quad b = 16,7345;$$

$$c = 5,9463; \quad d = 24,7832;$$

auf 4 Nachkommabits.

2 Führen Sie mit den Originalwerten und mit den gerundeten Werten² folgende Operationen durch:

$$e = a - 7*b;$$

$$f = 5*c - d;$$

$$g = e*f;$$

Hinweis: Ergänzen Sie in der nachfolgenden Tabelle die gerundeten Werte, ihre Hex-Darstellung und den Rundungsfehler.

²Nach jeder Operation ist auf 4 Nachkommabits zu runden.



	w (Wert)	$w_{4\text{NKB}}$	$\text{hex}(w_{4\text{NKB}})$	$w - w_{4\text{NKB}}$
a	123,6793			
b	16,7345			
c	5,9463			
d	24,7832			
$e=a-7*b$				
$f=5*c-d$				
$g=e*f$				

$w_{4\text{NKB}}$ Wert gerundet auf 4 Nachkommabits.



Zur Kontrolle

	w (Wert)	$w_{4\text{NKB}}$	$\text{hex}(w_{4\text{NKB}})$	$w - w_{4\text{NKB}}$
a	123,6793	123,6875	0x7B,B	0,0082
b	16,7345	16,7500	0x10,C	0,0155
c	5,9463	5,9375	0x05,F	0,0088
d	24,7832	24,8125	0x18,D	0,0293
$e=a-7*b$	6,5378	6,4375	0x6,7	0,1003
$f=5*c-d$	4,9483	4,8750	0x4,E	0,0733
$g=e*f$	32,3510	31,3750	0x1f,6	0,9706

Zum Vergleich, der Quantisierungsfehler von $\pm 0,5$ LSB beträgt $\pm 0,03125$.



Diversität

Aufgabe 3.12: Diversitätsabschätzung

Bei einer Kontrolle durch Verdopplung und Vergleich wurden von $N_{FF} = 300$ Fehlfunktionen $N_{FF.NErk} = 5$ nicht erkannt.

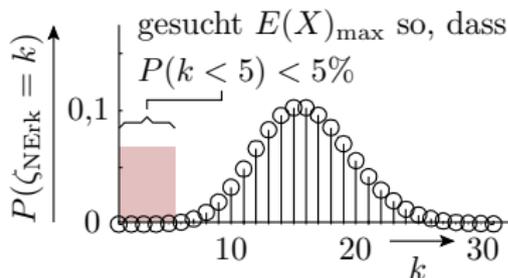
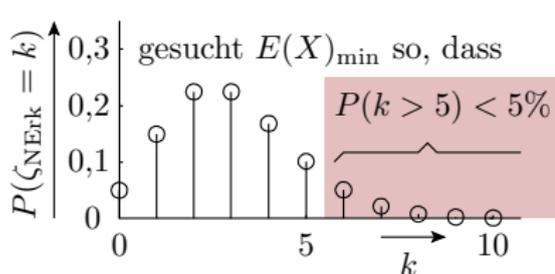
- 1 Auf welchen Bereich der zu erwartenden Anzahl der nicht erkannten Fehlfunktionen lässt das Experiment schließen? Zulässige Irrtumswahrscheinlichkeiten, dass im Experiment ein Werte oberhalb oder unterhalb des Bereichs hätte auftreten können, $\alpha_1 = \alpha_2 = 5\%$.
- 2 Auf welchen Bereich der Diversität lässt das Experiment schließen?

	$\alpha_1 = \alpha_2 = 5\%$		$\alpha_1 = \alpha_2 = 10\%$		$\alpha_1 = \alpha_2 = 20\%$	
x_{ist}	$E(X)_{min}$	$E(X)_{max}$	$E(X)_{min}$	$E(X)_{max}$	$E(X)_{min}$	$E(X)_{max}$
5	2,613	9,154	3,152	7,993	3,903	6,722
6	3,285	10,513	3,894	9,275	4,733	7,906

Zur Kontrolle

Von $N_{FF} = 300$ Fehlfunktionen wurden $x_{ist} = N_{FF} \cdot N_{Erk} = 5$ nicht erkannt. Zulässige Irrtumswahrscheinlichkeiten: $\alpha_1 = \alpha_2 = 5\%$.

Garantierbare Unter- und Obergrenze des Erwartungswerts:



	$\alpha_1 = \alpha_2 = 5\%$		$\alpha_1 = \alpha_2 = 10\%$		$\alpha_1 = \alpha_2 = 20\%$	
x_{ist}	$E(X)_{\min}$	$E(X)_{\max}$	$E(X)_{\min}$	$E(X)_{\max}$	$E(X)_{\min}$	$E(X)_{\max}$
5	2,613	9,154	3,152	7,993	3,903	6,722
6	3,285	10,513	3,894	9,275	4,733	7,906



	$\alpha_1 = \alpha_2 = 5\%$		$\alpha_1 = \alpha_2 = 10\%$		$\alpha_1 = \alpha_2 = 20\%$	
x_{ist}	$E(X)_{\min}$	$E(X)_{\max}$	$E(X)_{\min}$	$E(X)_{\max}$	$E(X)_{\min}$	$E(X)_{\max}$
5	2,613	9,154	3,152	7,993	3,903	6,722
6	3,285	10,513	3,894	9,275	4,733	7,906

Bereich der Diversität mit $X = N_{\text{FF.NErk}}$:

	Grenze 1	Grenze 2
Anzahl FF	$E(X)_{\text{UG}} \approx 2,613$	$E(X)_{\text{OG}} \approx 9,154$
$E(DV) = \frac{300}{E(X)_{\dots}}$	≈ 114	≈ 33



Loop-Back-Test



Aufgabe 3.13: Zur Lösung am Rechner

Schreiben Sie einen Testrahmen, den das nachfolgende fehlerhafte C-Programm für die Wurzelberechnung

```
uint8_t wurzel(uint16_t x){
    uint8_t w=0;
    uint16_t sum=0;
    while (sum<x){sum += (w<<1)+1;
    w++;}
    return w;
}
```

mit 1000 zufälligen Werten getestet. Ergebniskontrolle mit der inversen Funktion und Fenstervergleich

$$y^2 \leq x < (y + 1)^2$$

Protokollierung aller x und y , die die Ergebniskontrolle nicht bestehen.