FSR - Klausurensammlung

(21)

Prof. Dr.-Ing. J. Vollmer
Hochschule für
Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department für Informations- und Elektrotechnik

Name: Motzek
Vorname: Alexander
Matr.-Nr.: 1897403

Klausur: Grundlagen der Nachrichtentechnik (E4)

vom 27. Januar 2010

Lösungen ohne Herleitungen und die korrekte Angabe der Einheiten erhalten nur eine verringerte Punktzahl. Reine Ja/Nein Antworten erhalten Null Punkte.

	Punkte in Unteraufgaben	Erreichte Punkte	Maximal (+ ZP)
Aufgabe 1	3+8+3+3(+4)	3+8+3+3(+1)	17(+4)
Aufgabe 2	6+4+4(+4)	6+1+4(+2)	14(+4)
Aufgabe 3	6+3+9+3(+~~5~~)	6+3+9+3(+4)	21(+~~5~~)
Aufgabe 4	5+15(+2+4)	5+12(+1+4)	20(+6)
Aufgabe 5	2+6+6+4(+5)	2+5+6+2(+3)	18(+5)
Bewertung:	1,5 **Summe:**	96	**90(+~~23~~)** 24

Kleine Formelsammlung:

Schwach gedämpfte Leitung, Länge l

$$\gamma = \frac{R'}{2\sqrt{L'/C'}} + j\omega\sqrt{L'C'}$$

$$\beta = \frac{\Delta\phi}{l} = \frac{2\pi}{\lambda_L} = \omega\sqrt{L'C'}$$

$$v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \lambda_L \cdot f$$

$$k = v_{ph}/c_0$$

$$c_0 \approx 3 \cdot 10^8\ m/s$$

$$Z_E = Z_W \frac{Z_2 + Z_W \cdot \tanh(\gamma l)}{Z_2 \cdot \tanh(\gamma l) + Z_W}$$

$$Z_W \cong \sqrt{\frac{L'}{C'}} \cdot e^{-j\frac{R'}{\omega L' 2}}$$

Leitung, allgemeine Gleichungen

$$Z_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

Lösung DGL: $U(z) = U_{h0} \cdot e^{-\gamma z} + U_{r0} \cdot e^{\gamma z}$

Fourier-Transformation

$$x(t)e^{j2\pi f_0 t} \leftrightarrow X(f - f_0)$$

$$e^{j2\pi f_0 t} \leftrightarrow \delta(f - f_0)$$

$$x(t - t_0) \leftrightarrow X(f)e^{-j2\pi f t_0}$$

$$\delta(t - t_0) \leftrightarrow e^{-j2\pi f t_0}$$

Rauschen und Rauschzahl

Rauschzahl

$$F = \frac{SNR_{Eingang}}{SNR_{Ausgang}}$$

Rauschmaß

$$NF = 10\log_{10}(F)\,dB$$

Verfügbare Rauschleistung (thermisch)

$$P_N = k \cdot B \cdot T$$

Boltzmannkonstante k: = 1,38 10^{-23} Watt s / K
B: Bandbreite in Hertz, T: Temperatur in Kelvin

Informationstheorie, diskrete Nachrichtenquellen mit N verschiedenen Zeichen

Informationsgehalt eines Zeichen x

$$I_x = -ld(p_x)\ [Bit]$$

Entropie, mittlerer Informationsgehalt

$$H = -\sum_{n=1}^{N} p_n \cdot ld(p_n)\ [\text{Bit pro Zeichen}]$$

Mittlere Anzahl von Bits zur Codierung

$$\bar{N} = \sum_{n=1}^{N} p_n \cdot \text{Codelänge}(n)\ [\text{Bit pro Zeichen}]$$

Trigonometrie und Euler

$$\cos(x) \cdot \cos(y) = [\cos(x+y) + \cos(x-y)]/2$$

$$\cos(x) = (e^{jx} + e^{-jx})/2$$

Maximale Entropie

$$H_{max} = ld(N)$$

[Bit pro Zeichen]

Redundanz

$$R = H_{max} - H$$

[Bit pro Zeichen]

<u>Aufgabe 1</u> Huffman Codierung (17+4 Punkte)

Von einer Nachrichtenquelle ist der Zeichensatz und die Zeichenwahrscheinlichkeiten p_i bekannt.

Zeichen	B	D	E	R	T
p_i	0,20	0,10	0,45	0,15	0,10

Geben Sie im Folgenden immer die Einheiten mit an.

a) Berechnen Sie den mittleren Informationsgehalt H des Zeichensatzes. (3 Punkte)

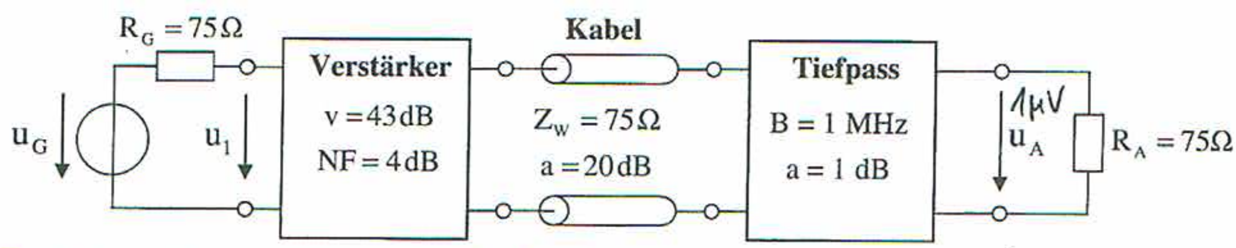
b) Bestimmen Sie einen Satz von Huffman Codes für den Zeichensatz. Zeichnen Sie einen Codebaum und geben Sie für alle Zeichen den Code explizit an. (8 Punkte)

c) Kodieren Sie das Wort „ERDBEERBEET" mit ihrem Code. Geben Sie die resultierende Bitfolge an. (3 Punkte)

d) Decodieren Sie die Bitfolge „01101001110110101" mit ihrem Code. <u>Achtung:</u> Je nach Code können am Ende noch Bits übrig sein. Ignorieren Sie diese Restbits. (3 Punkte)

e) **Zusatzaufgabe**: Betrachten Sie folgenden Code für den Zeichensatz $\{A, B, C, D\}$: $\{A \to 00, B \to 01, C \to 10, D \to 110\}$ (Schreibweise x → y bedeutet: y ist der Code für Symbol x). Kann der Code ein Huffmancode sein oder nicht? Begründen Sie ihre Antwort. (4 Punkte)

<u>Aufgabe 2</u> Übertragungssystem (14+4 Punkte)



Ein Tiefpass-Signal $u_G(t)$ von $1\,MHz$ Bandbreite wird über das obige System übertragen. Die Ein- und Ausgangsimpedanzen der Teilsysteme sind jeweils 75Ω. Die Temperatur des gesamten Systems beträgt $T = 290\,Kelvin$. Die effektive Signalspannung von $u_A(t)$ beträgt $1\mu V$ und $u_G(t)$ ist, bis auf das thermische Rauschen, fehlerfrei. Das Tiefpassfilter wird, bis auf die Dämpfung im Durchlassbereich von $1\,dB$ und der Grenzfrequenz $f_g = 1\,MHz$, als ideal betrachtet.

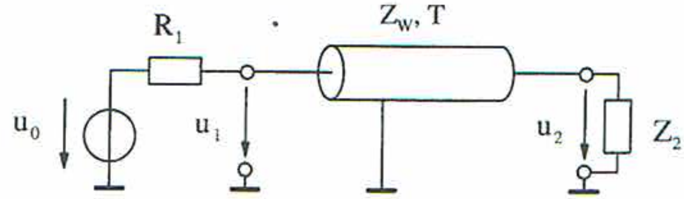
a) Berechnen Sie die Rauschzahl F_{1A} und den Verstärkungsfaktor v_{1A} des Systems mit Eingangsspannung $u_1(t)$ und der Ausgangsspannung $u_A(t)$. (6 Punkte)

b) Bestimmen Sie die Eingangsleistung des Verstärkers. (4 Punkte)

c) Wie groß ist das SNR des Signals $u_A(t)$ in dB? (4 Punkte)

d) **Zusatzaufgabe:** Welchen Grund kann es für das Filter geben, da doch $u_G(t)$ schon ein entsprechendes Tiefpass-Signal ist? Denken Sie dabei an reale Teilsysteme. (4 Punkte)
Diese Aufgabe ist unabhängig von den vorherigen Unterpunkten lösbar.

Aufgabe 3: Leitung (21+5 Punkte)



An eine schwach gedämpften Leitung ($R' \ll \omega L'$) der Länge $l = 30$ Meter wurde ein Sinussignal der Frequenz $f = 1\,\mathrm{MHz}$ angelegt. Für diese Frequenz ist der Abschlussimpedanz Z_2 gleich dem Wellenwiderstand Z_W. Die Messung ergibt für die Spitzenwerte der Spannungen $\hat{U}_1 = 1\,\mathrm{V}$ und $\hat{U}_2 = 0.96\,\mathrm{V}$. Die Phasenverschiebung zwischen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ beträgt 60 Grad. Der Betrag des Wellenwiderstandes ist $|Z_W| = 50\,\Omega$.

Geben Sie immer die Einheiten der Ergebnisse an.

a) Berechnen Sie den Dämpfungsbelag α und den Phasenbelag ist β. Achten Sie auf die Einheiten. (6 Punkte)

b) Bestimmen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_{ph}. (3 Punkte)

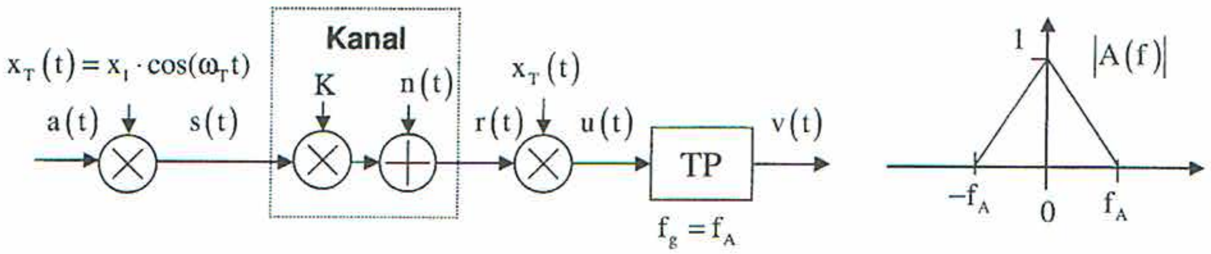
c) Bestimmen Sie die Leitungsbeläge R', L' und C'. Vernachlässigen Sie dabei die Phase von Z_W. (9 Punkte)

d) Berechnen Sie den Phasenwinkel φ_w des Wellenwiderstandes (3 Punkte)

Zusatzaufgabe, allgemeine Frage zu schwach gedämpften Leitungen:

e) Erklären Sie, wie man aus dem Amplituden- und/oder Phasengang einer schwach gedämpften Leitung die Verzögerungszeit bestimmen kann. Eine Skizze könnte hilfreich sein. (5 Punkte)

Aufgabe 4 Modulation (20+6 Punkte)



Betrachten Sie das Übertragungssystem. Das zu übertragene Tiefpasssignal $a(t)$ hat die Bandbreite $f_A \ll f_T$, die Trägerfrequenz ist $f_T = \omega_T/(2\pi) = 2\,\text{GHz}$ und $K = 10^{-4}$.

Der Mischer des Senders hat leider einen Fehler. Ideal wäre $s(t) = a(t) \cdot x_1 \cdot \cos(\omega_T t)$, real gilt $s(t) = a(t) \cdot [x_1 \cdot \cos(\omega_T t) + x_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega_T t)]$. Die Konstanten sind $x_1 = 1$ und $x_3 = 0.4$. Der Mischer des Empfängers ist fehlerfrei, d.h. es gilt $u(t) = r(t) \cdot x_1 \cdot \cos(\omega_T t)$.

Die Fouriertransformierten (Spektren) der Zeitsignale werden immer mit den zugehörigen Großbuchstaben bezeichnet. Zum Beispiel: $A(f) = F\{a(t)\}$.

Zur Vereinfachung darf im folgenden das Rauschen vernachlässigt werden. Beschreiben Sie die zu skizzierenden Spektren immer in Abhängigkeit des Spektrums $|A(f)|$.

Alle Achsen und Signale vollständig zu beschriften.

a) Skizzen Sie $|S(f)|$, beschriften Sie alle Teilspektren. (5 Punkte)

b) Skizzen Sie $|R(f)|$, $|U(f)|$ und $|V(f)|$, beschriften Sie alle Teilspektren. (15 Punkte)

Zusatzaufgaben:

c) Welche Auswirkungen hat der Mischerfehler auf andere Nutzer des Funkkanals? (2 Punkte)

d) Nennen Sie eine zusätzliches System, mit dem **nach** dem Mischer und **vor** dem Senden der Fehler behoben werden kann. Spezifizieren Sie das System. (4 Punkte)

Aufgabe 5 Transversalfilter als Entzerrer (18+5 Punkte)

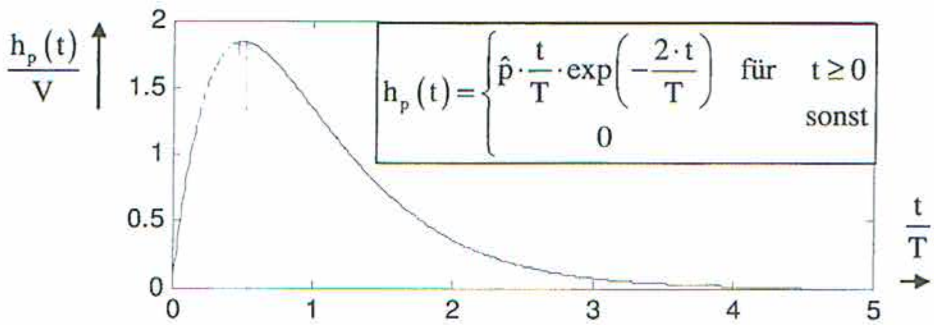
Ein Datensignal $u_x(t)$ soll über einen Kanal übertragen werden. Dadurch tritt Intersymbolinterferenz (ISI) auf. Diese soll durch einen Entzerrer (Transversalfilter) verringert werden.

$$\xrightarrow{u_x(t)} \boxed{\text{Kanal}} \xrightarrow{u_y(t)} \boxed{\text{Entzerrer}} \xrightarrow{u_z(t)}$$

Das Datensignal $u_x(t)$ ist eine Summe aus zeitlich verschobenen Rechteckpulsen $p(t)$, die mit den Datensymbolen d_k gewichteten sind:

$u_x(t) = \sum_k d_k \cdot p(t - kT)$ mit $p(t) = \hat{p} \cdot \mathrm{rect}([t - 0{,}5T]/T)$, wobei $T = 1\mu s$ und $\hat{p} = 10\,V$ ist.

Die Systemantwort des Kanals auf den Spannungspuls $p(t)$ ist $h_p(t)$:



Das Transversalfilter wird beschrieben durch $u_z(t) = \sum_{m=0}^{M} c_m \cdot u_y(t - mT)$.

Die Abtastzeitpunkte nach dem Transversalfilter sind durch $t = t_m = m \cdot T + t_0$ definiert.

a) Wählen Sie den Zeitnullpunkt t_0 so, dass im Augendiagramm von $u_z(t)$ eine maximale Augenhöhe auftritt. (2 Punkte)

b) Bestimmen Sie $h_p(t_m)$ für $m = 1,2,3$. (6 Punkte)

c) Bestimmen Sie die Koeffizienten c_k für $k = 1,2$. Es gilt $c_0 = 1$. (6 Punkte)

Verwenden Sie: $c_k = -\left[\sum_{i=0}^{k-1} c_i \cdot h_p\left(t_{k-i+1}\right)\right] \Big/ h_p(t_1)$

d) Erklären Sie, wie man aus dem Signal $u_z(t)$ ein Augendiagramm erzeugt. Es geht um das Prinzip und **nicht** darum, wie man ein Oszilloskop einstellt. (4 Punkte)

e) **Zusatzaufgabe:** Schätzen Sie die Größenordnung der Amplitude der Intersymbolinterferenz ab, wenn die Koeffizienten c_0 bis c_3 optimal eingestellt sind. (5 Punkte)

(Hinweis: Dieser Punkt kann unabhängig von der restlichen Aufgabe gelöst werden.)

SS / WS	Semester	Fach	Dozent

FSR - Klausurensammlung

Klausur: GN WS09/10 Datum: 27.01.10

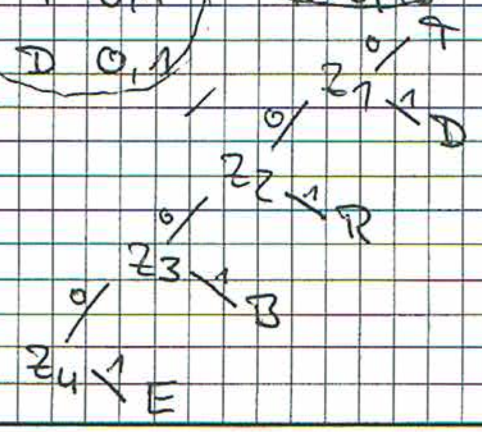
Name: Motzek Vorname: Alexander Matr.-Nr. 1897403

Aufgabe: 1

3/3 a) $H = -\sum_{k=1}^{N} ld(p_k) \cdot p_k = 2{,}06$ Bit/Zeichen

8/8 b)

E 0,45	E 0,45	E 0,45	Z_3 0,55	Z_4 1
B 0,2	B 0,2	Z_2 0,35	E 0,45	
R 0,15	Z_1 0,2	B 0,2		
T 0,1	R 0,15			
D 0,1				



E	1
B	01
R	001
D	0001
T	0000

Aufgabe: 1

3/3 c) 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 0
E R D B E E R B E E T

3/3 d) 0 1 | 1 0 1 | 0 0 1 | 1 | 1 | 0 1 | 1 | 0 1 | 0 1
B E B R E E B E B B

noch 1/4 e)

Ja, es lässt sich dieser Codebaum aufstellen. Nach einem Buchstaben tritt keine Verzweigung auf. Die Buchstaben sind eineindeutig zugeordnet!

Aber nicht so kurz wie möglich
⇒ Leere Stelle am Baum

SS / WS	Semester	Fach	Dozent

FSR - Klausurensammlung

Aufgabe: 2

$B = 1\,MHz \quad T = 290\,K$

6/6

a) $F_{1,A} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{V_1} + \frac{F_3 - 1}{V_1 V_2}$

$= 10^{0,4} + \frac{10^{2} - 1}{10^{4,3}} + \frac{10^{0,1} - 1}{10^{4,3} \cdot 10^{-2}}$

$= 2,52 \;\hat{=}\; 4,01\,dB$

$V_{1,A\,dB} = 43\,dB - 20\,dB - 1\,dB = 22\,dB \;\hat{=}\; 158,5$

1/4

b) ~~$SNR_{aus} = \frac{U_A^2 / R_A}{k \cdot B \cdot T}$~~

V ist als Leistungsverstärkung definiert

$V_{1,A} = \frac{U_a}{U_1} \Rightarrow U_1 = \frac{U_a}{V_{1,A}} = 6,31\,nV$

$P_{EIN} = U_1^2 / R = 5,31 \cdot 10^{-19}\,W$

Aufgabe: 2

4/4

c) $SNR_{Ein} = \frac{P_{Ein}}{k \cdot B \cdot T}$

$SNR_{AUS} = \frac{SNR_{Ein}}{F_{1,A}} = 5,26 \cdot 10^{-5} \;\hat{=}\; -42,8\,dB$

2/4

d) Das Kabel könnte u.U. ein Frequenzverschiebung hervorrufen oder das Kabel ist nicht ausreichend isoliert und „fängt" weitere Frequenzen aus der Umgebung ein.

+ Verstärker [redacted] „etwas" nichtlinear → ...

Aufgabe: 3

$l = 30\,m$ $\quad f = 1{,}1\,Hz$ $\quad Z_2 = Z_W$

$\hat{u}_1 = \cancel{\ldots} V$ $\quad \hat{u}_2 = 0{,}96\,V$ $\quad \Delta\varphi = 60°$

$|Z_W| = 50\,\Omega$

6/6

a) $\beta = \frac{\Delta\varphi}{l} = 0{,}035\,\frac{rad}{m}$

$\Delta\varphi = 60° \hat{=} \frac{1}{3}\pi$

Für $Z_2 = Z_W$ ist $r_2 = 0 \Rightarrow$ keine Reflexion

Dämpfung $a = 0{,}96$

$e^{-\alpha \cdot l} = a \Rightarrow \alpha = -\frac{\ln(a)}{l} = 1{,}36 \cdot 10^{-3}\,\frac{1}{m}$

3/3

b) $v_{ph} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta} = 179{,}52\,\frac{m}{s}$

Aufgabe: 3

8/9

c) $\underline{\alpha} = \frac{R'}{2|Z_W|} \Rightarrow \underline{R'} = \alpha \cdot 2|Z_W| = 0{,}136\,\frac{\Omega}{m}$

Aus $|Z_W| = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$ und $v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$

folgt $\underline{C'} = \frac{1}{|Z_W| \cdot v_{ph}} = 111{,}4\,pF/m$

$L' = |Z_W|^2 \cdot C' = 278{,}52\,n\frac{H}{m}$

Aufgabe: 3

3/3

d) $Z_W = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \cdot e^{-j\frac{R'}{\omega L' \cdot 2}}$

$\varphi_W \approx -\frac{R'}{\omega L' 2}$ ~~$= -0{,}0777 \mathrel{\hat{=}} -43{,}95^\circ$~~

arctan $= -0{,}04 \mathrel{\hat{=}} -2{,}23^\circ$

noch 4/5

e) Eine Leitung zeigt Tiefpaßcharakter im Frequenzbereich. Anhand der 3dB-Grenzfrequenz müsste sich so die Laufzeit bestimmen lassen (Unsinn!?)

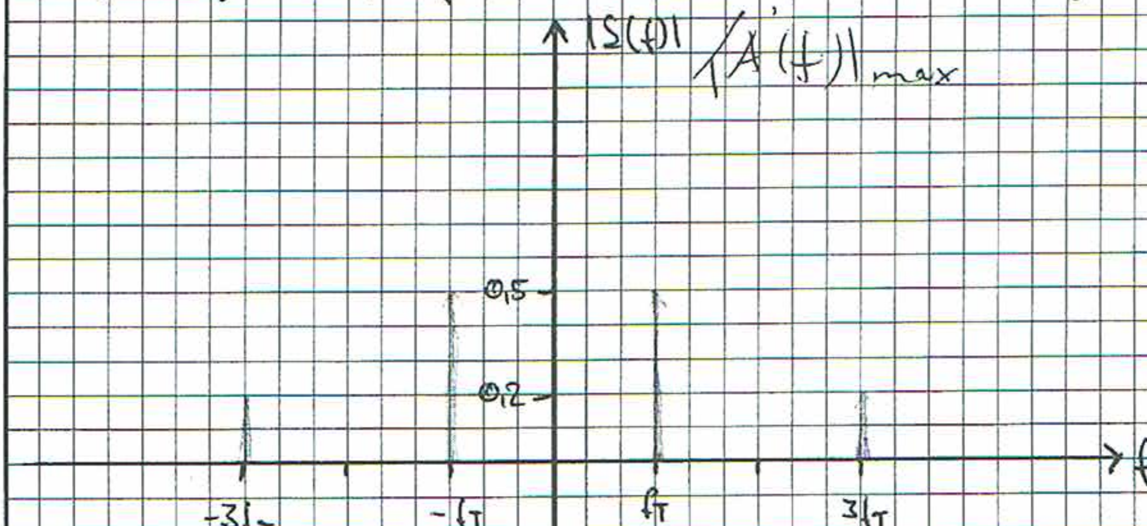
Alternativ ist der Phasengang ~~(linear, gerade)~~ eine Gerade mit einer Steigung direkt proportional zur Laufzeit! Wie genau?

Aufgabe: 4

$f_T = 2\,\text{GHz}$ $\quad K = 10^{-4}$

5/5

a) $s(t) = a(t) \cdot (1 \cdot \cos(\omega_T t) + 0{,}4 \cdot \cos(3\omega_T t))$



Die Teilspektren sind so schmal, dass sie in diesem Maßstab auf einen Strich zusammenfallen.
Es sind sehr, sehr schmale Dreiecke eigentlich.
und liegen im Bereich $\pm(f_T + f_A)$ bzw. $\pm(3f_T + f_A)$

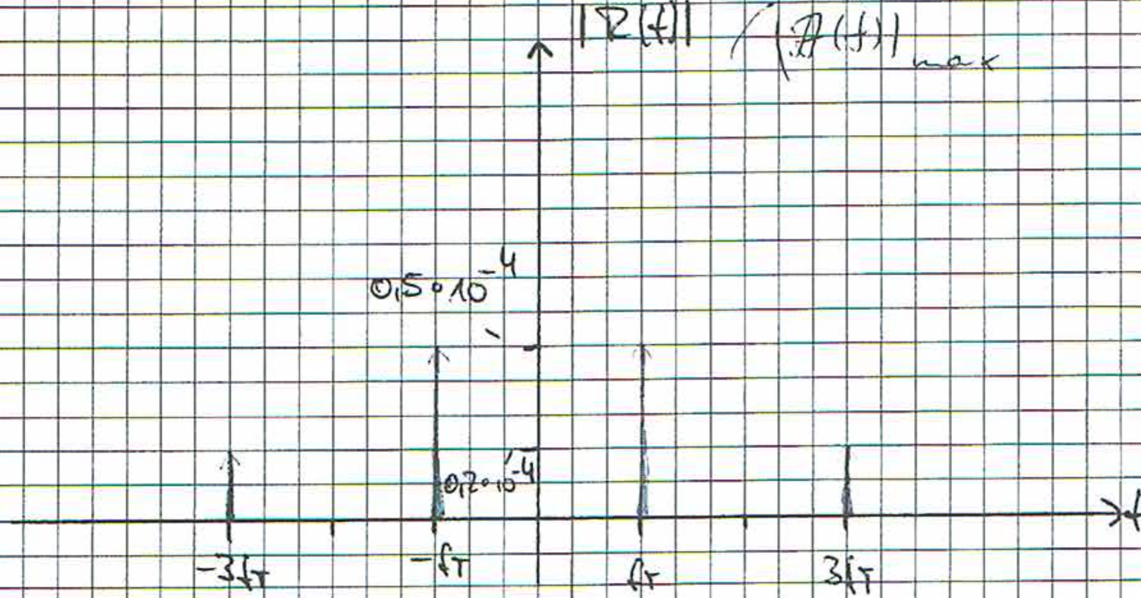
SS / WS	Semester	Fach	Dozent

FSR - Klausurensammlung

b)

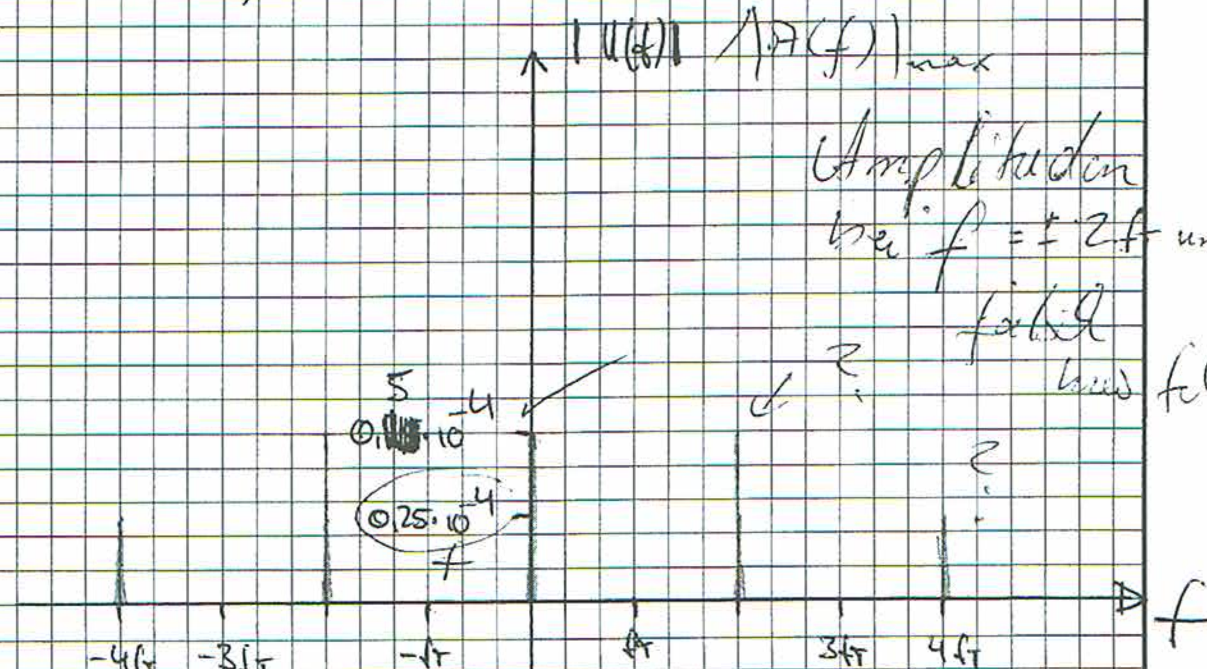
12/15

Aufgabe: 4 b)



f_A ist zu klein für diesen Maßstab ✓

Aufgabe: 4 b)

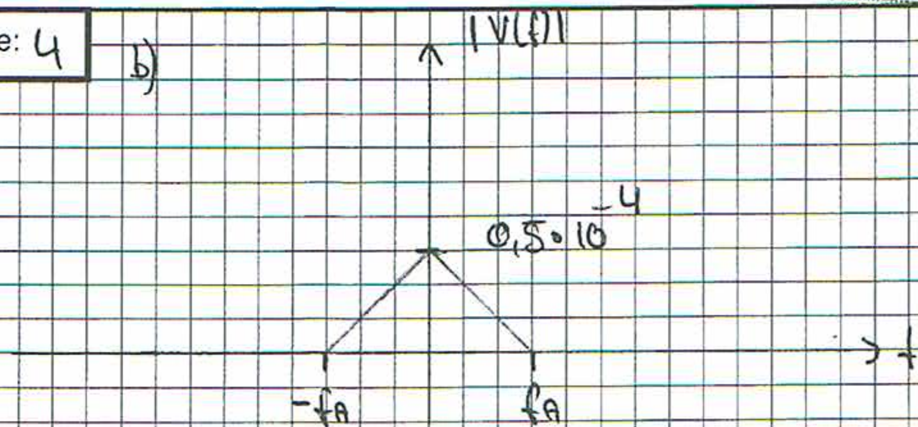


Amplituden bei $f = \pm 2f$ und $\pm 4f_T$ ~~fehlt~~ bzw fehlen

f_A ist zu klein für diesen Maßstab, deshalb etwas dickere Striche statt Dreiecken! ✓

Aufgabe: 4

b)



c) 1/2

1/2 c) Durch den Mischfehler ist nicht nur die Frequenz f_T belegt, sondern auch ~~$2 \cdot f_T = 4\,GHz$ und $4 \cdot f_T = 8\,GHz$,~~ ← Sind nicht im Kanal ~~sowie~~ $3 \cdot f_T = 6\,GHz$ (jeweils $\pm f_A$!)

$\Rightarrow$?

noch 4/4

d) Ein Tiefpaß vor dem Kanal mit $f_g = f_T + f_A$!

(BP wäre besser realisierbar)

Aufgabe: 5

a) $\hat{p} \cdot m \cdot \exp(-2m)$

2/2

Es sollte im Maximum abgetastet werden.

$\Rightarrow t_0 = -0{,}5 \cdot T$

AC !

5/6

b) $h_P(t_m) = \hat{p} \cdot (m - 0{,}5) \cdot \exp(-2(m - 0{,}5))$

$m=1$: $h_P =$ ~~[illegible]~~ $= h_P(t_1) = 1{,}84$ ✓

$m=2$: $h_P =$ ~~[illegible]~~ $= h_P(t_2) = 0{,}75$ ✓

$m=3$: $h_P =$ ~~[illegible]~~ $= h_P(t_3) = 0{,}17$ ✓

SS / WS | Semester | Fach | Dozent

FSR - Klausurensammlung

Aufgabe: 5

$c_0 = 1$

6/6

c) $c_k = -\left[\sum_{i=0}^{k-1} c_i \, h_P(t_{k-i+1})\right] / h_P(t_1)$

k=1: $c_1 = -c_0 \, h_P(t_2) / h_P(t_1)$

$c_1 =$ [illegible] $-0{,}41$

k=2 $c_2 = -\left(c_0 \cdot h_P(t_3) + c_1 \cdot h_P(t_2)\right) / h_P(t_1)$

$=$ [illegible] $0{,}075$ ← Hier sollte man genauer rechnen

noch 2/4

d) $u_z(t)$ wird immer im Abtastzeitpunkt überlagert dargestellt. (zu allgemein, wie? + Intervall)

Aufgabe: 5

noch 3/5

e) Durch den Transversalfilter sollte die ISI ausgeglichen werden und auf ein Minimum reduziert worden sein. Es dürfte im Bereich von ca 0,1 liegen. warum?

Zur Abschätzung wäre Berechnung von c_3 oder/und von $h_P(t_4)$ nötig

①

Prof. Dr.-Ing. J. Vollmer
Hochschule für
Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department für Informations- und Elektrotechnik

Name: Aldag

Vorname: Mario

Matr.-Nr.:

Anzahl der abgegebenen Blätter:

SS / WS	Semester	Fach	Dozent
09	E 4	GN	VLM

FSR - Klausurensammlung 1/16

Klausur: Grundlagen der Nachrichtentechnik (E4)

vom 13. Juli 2009

Lösungen ohne Herleitungen und die korrekte Angabe der Einheiten erhalten nur eine verringerte Punktzahl. Reine Ja/Nein Antworten erhalten Null Punkte.

	Punkte in Unteraufgaben		Erreichte Punkte	Maximal (+ ZP)
Aufgabe 1	2+4+6+3+3 (+4)		2+4+6+2+3 (+1)	18 (+4)
Aufgabe 2	6+4+4 (+4)		3+4+0(+4)	14 (+4)
Aufgabe 3	6+6+4+8 (+6)		4+6+4+6 (+2)	24 (+4)
Aufgabe 4	12+6 (+6)		9+5 (+5)	18 (+6)
Aufgabe 5	4+2+6+4 (+8)		4+2+6+4 (+3+2)	16 (+8)
Bewertung:	15	**Summe:**	94	**90 (+26)**

Kleine Formelsammlung:

Schwxi gedanft

Verlustfreie Leitung, Länge l		**Trigonometrie und Euler**	
$\alpha' = \frac{R'}{2\sqrt{L'/C'}}$	$v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$	$\cos(x)\cdot\cos(y) = [\cos(x+y)+\cos(x-y)]/2$ $\cos(x) = (e^{jx}+e^{-jx})/2$	
$c_0 \approx 3\cdot 10^8$ m/s	$k = v_{ph}/c_0$	**Fourier-Transformation**	
$Z_E = Z_W \frac{Z_2 + Z_W\cdot\tanh(\gamma l)}{Z_2\cdot\tanh(\gamma l)+Z_W}$	$\lvert Z_W\rvert = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$	$x(t)e^{j2\pi f_0 t} \leftrightarrow X(f-f_0)$	$e^{j2\pi f_0 t} \leftrightarrow \delta(f-f_0)$

Rauschen und Rauschzahl	**Informationstheorie, diskrete Nachrichtenquellen mit N verschiedenen Zeichen**	
Rauschzahl $F = \frac{SNR_{Eingang}}{SNR_{Ausgang}}$	**Informationsgehalt eines Zeichen x** $I_x = -ld(p_x)$ Bit pro Zeichen **Entropie, mittlerer Informationsgehalt** $H = -\sum_{n=1}^{N} p_n \cdot ld(p_n)$ Bit pro Zeichen	
Verfügbare Rauschleistung (thermisch) $P = k\cdot B\cdot T$ Boltzmannkonstante k: = 1,38 10^{-23} Watt·s / K B: Bandbreite in Hertz, T: Temperatur in Kelvin	**Mittlere Anzahl von Bits zur Codierung** $\overline{N} = \sum_{n=1}^{N} p_n \cdot \text{Codelänge}(n)$ Bit pro Zeichen	
Gesamtrauschzahl bei Reihenschaltung $F_{Gesamt} = F_1 + \frac{F_2-1}{v_1} + \frac{F_3-1}{v_1\cdot v_2} + \ldots$	**Maximale Entropie** $H_{max} = ld(N)$ Bit pro Zeichen	**Redundanz** $R = H_{max} - H$ Bit pro Zeichen