

# Nachrichtenübertragung

(Vorlesung I + II und Rechenübung I + II)

- Prof. Dr.-Ing. Thomas Sikora -

Name: .....

Vorname: .....

Matr.Nr: .....

- Diplom       E-Technik       HF  
 Bach./Master       Techn. Inf.       SF  
 Magister       KW       VF  
 Erasmus       EF

Teilnahme am Bonusprogramm (MC-Test)?

Ja

Nein

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	8	BP	$\Sigma$
Max. Punktezahl	10	10	10	10	10	10	10	10	X	80
Erreichte Punktezahl										

## Hinweise:

1. Die Fragen zur Rechenübung sind fettgedruckt und mit einem Stern (\*) gekennzeichnet!
2. Schreiben Sie die Lösungen jeweils direkt auf den freien Platz unterhalb der Aufgabenstellung.
3. Die Rückseiten können bei Bedarf zusätzlich beschrieben werden. Nummerierungen in diesem Fall nicht vergessen.
4. Sollte auch der Platz auf der Rückseite nicht ausreichen, bitte **kein eigenes Papier verwenden**. Die Klausuraufsicht teilt auf Anfrage **zusätzlich leere Blätter** aus.
5. Taschenrechner sind als Hilfsmittel **n i c h t** erlaubt!
6. Es sind **keine Unterlagen** zur Lösung dieser Klausur zugelassen!
7. Bearbeitungszeit: **150 min**.
8. Bitte **keinen Bleistift** verwenden!

Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 1
--	---	----------

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Nachrichtenkanäle</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Störungen und Störreduktion</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Analoge Modulation und PAM</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Pulscodemodulation</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Amplitudenmodulation</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Binäre Basisbandübertragung</b>	<b>18</b>
<b>7</b>	<b>Mehrwertige Modulation</b>	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>Digitale Modulation</b>	<b>24</b>

# 1 Nachrichtenkanäle

**10 Punkte**

Bandpasssysteme - Äquivalente Tiefpasssysteme

1.1 Ein idealisierter Bandpasskanal habe die Übertragungsfunktion  $H_{BP}$ . 2 Pa) Geben Sie formell an, wie sich  $H_{BP}(j\omega)$  aus der Übertragungsfunktion des äquivalenten Tiefpasssystems  $H_{TP}(j\omega)$  ergibt. 1 P

Skizzieren Sie Amplituden- und Phasengang eines solchen Bandpasses!

*s. Skript*b) Leiten Sie mittels inverser Fouriertransformation die Impulsantwort des Bandpasses  $h_{BP}(t)$  in Abhängigkeit von der Impulsantwort des Tiefpasses  $h_{TP}(t)$  her! 1 P*s. Skript*

Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005	Blatt: 3
--	--	----------

1.2 Das äquivalente Tiefpasssystem sei ein idealer TP mit  $H_{\text{TP}}(j\omega) = 0,5$  für  $-f_g \leq f \leq f_g$ , einer Laufzeit  $t_0$  und der Bandbreite  $f_g = B_{\text{TP}} = \frac{1}{2t_0}$ . 4,5 P

a) Wie groß ist die Bandbreite  $B_{\text{BP}}$  des Bandpasssystems? 1 P

$$B_{\text{BP}} = 2B_{\text{TP}} = \frac{1}{t_0}$$

b) Berechnen Sie die Impulsantwort  $h_{\text{BP}}(t)$  des Bandpasssystems, wobei die Mittenfrequenz bei  $f_m = 2B_{\text{TP}}$  liegt. 2 P

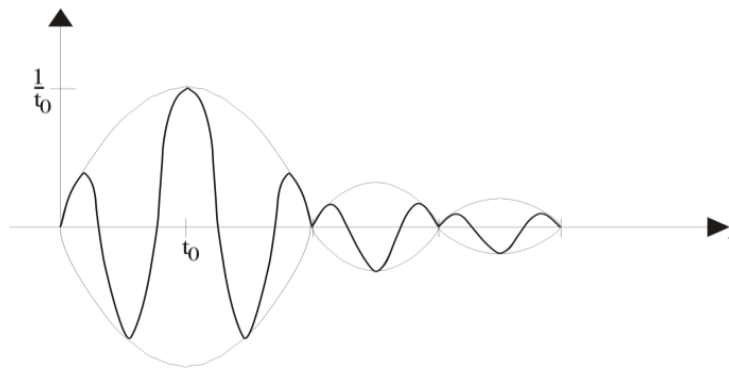
Hinweis:  $\frac{\omega_T}{2\pi} \text{si}\left(\frac{\omega_T}{2} t\right) \longleftrightarrow \bullet \Pi_{\omega_T}(\omega)$

$$H_{\text{TP}} = \frac{1}{2} \Pi_{\frac{2\pi}{t_0}}(\omega) e^{-j\omega t_0}$$

$$h_{\text{BP}} = 2h_{\text{TP}} \cos(2\pi f_m t)$$

$$h_{\text{BP}} = \frac{1}{t_0} \text{si}\left(\frac{\pi}{t_0}(t - t_0)\right) \cos\left(\frac{2\pi}{t_0} t\right)$$

c) Skizzieren Sie die die Impulsantwort  $h_{\text{BP}}(t)$  im Bereich  $0 \leq t \leq 4t_0$ ! 1,5 P



<p>Technische Universität Berlin          Fachgebiet Nachrichtenübertragung          Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet  <b>Nachrichtenübertragung</b>          am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 4</p>
---	--	-----------------

## Mobilfunkkanäle

1.3 Gegeben sei die Übertragungsfunktion  $H(j\omega) = a + be^{-j\omega\Delta t}$  eines Zweiwege- modells. 3,5 P

a) Zeigen Sie, dass  $|H(j\omega)|^2 = a^2 + b^2 + 2ab \cdot \cos(\omega\Delta t)$  ist. 2 P  
Hinweis:  $e^{\pm j\omega\Delta t} = \cos(\omega\Delta t) \pm j \cdot \sin(\omega\Delta t)$

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= a + be^{-j\omega\Delta t} \\ &= a + b \cdot [\cos(\omega\Delta t) - j \cdot \sin(\omega\Delta t)] \\ &= a + b \cdot \cos(\omega\Delta t) - j \cdot b \cdot \sin(\omega\Delta t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |H(j\omega)|^2 &= a^2 + 2ab \cdot \cos(\omega\Delta t) + b^2 \cdot \cos^2(\omega\Delta t) + b^2 \cdot \sin^2(\omega\Delta t) \\ &= a^2 + 2ab \cdot \cos(\omega\Delta t) + b^2 \cdot [\cos^2(\omega\Delta t) + \sin^2(\omega\Delta t)] \\ &= a^2 + b^2 + 2ab \cdot \cos(\omega\Delta t) \end{aligned}$$

b) Für welche Werte von  $\omega\Delta t$  entstehen Minima im Amplitudengang? 0,5 P

$$\omega\Delta t = k \cdot \pi \text{ mit } k = 1, 3, 5, \dots$$

c) Geben Sie die Impulsantwort  $h(t)$  an! 1 P

$$h(t) = a \cdot \delta(t) + b \cdot \delta(t - \Delta t)$$

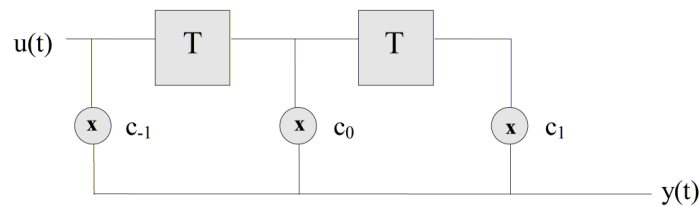
<b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 5
---	---	----------

## 2 Störungen und Störreduktion

10 Punkte

### Analoge Entzerrung

- 2.1 Ein nichtidealer Übertragungskanal habe eine Welligkeit im Amplitudengang und einen linearen Phasengang mit  $H(j\omega) = [1 + a \cos(\alpha\omega)] e^{-j\omega t_0}$ , wobei  $a \ll 1$  ist. 4,5 P
- a) Zeichnen Sie die Filterstruktur eines nicht rekursiven analogen Filters, das diese Welligkeit entzerren kann! 2 P



- b) Um eine cosinusförmige Welligkeit zu kompensieren, müssen die Filterkoeffizienten symmetrisch sein ( $c_{-n} = c_n$ ). Bestimmen Sie die Filterkoeffizienten und Laufzeiten der Verzögerungsglieder so, dass die Welligkeit entzerrt wird! 2,5 P  
Hinweis: Bestimmen sie aus der Impulsantwort das Spektrum des Filters und setzen Sie den Amplitudengang des Gesamtsystems zu 1!

$$(1 + x) \cdot (1 - x) \approx 1 \text{ für } x \ll 1$$

$$\begin{aligned} h_E(t) &= c_{-1} \delta(t) + c_0 \delta(t - T) + c_1 \delta(t - 2T) \\ &= c_{-1} \delta(t + T - T) + c_0 \delta(t - T) + c_1 \delta(t - T - T) \\ H_E(j\omega) &= (c_{-1} e^{j\omega T} + c_0 e^{-j\omega T} + c_1 e^{-j\omega T}) e^{-j\omega T} \\ &= 2c_1 \cos(\omega T) + c_0 \end{aligned}$$

$$\text{Es soll gelten: } [1 + a \cos(\alpha\omega)] * [c_0 + 2c_1 \cos(\omega T)] = 1$$

$$\text{daraus folgt: } c_0 = 1, c_1 = -a/2 \text{ und } T = \alpha$$

<b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 6
---	---	----------

Klirrfaktor

2.2 Bei Audiosystemkomponenten sind heute Klirrfaktoren  $< 0,1\%$  üblich. 2 P

a) Erklären Sie in eigenen Worten, wie der Klirrfaktor  $k$  definiert ist! 1 P

*Der Klirrfaktor  $k$  ist definiert als Quotient der Effektivwerte von Oberwellenspannung und Gesamtspannung.*

b) Wie groß ist der SNR in dB am Ausgang eines nichtlinearen Systems, wenn der Klirrfaktor genau  $0,1\%$  entspricht? Wie errechnet sich dieser Wert? 1 P

$$\text{SNR} = 20\log(1/k) \text{ dB} = 20 * 3 \text{ dB} = 60\text{dB}$$

Psychoakustische Maskierung

2.3 Welche Varianten der psychoakustischen Maskierung gibt es? 1 P

*Maskierung im Frequenzbereich*

*Maskierung im Zeitbereich*

2.4 Erläutern Sie in eigenen Worten, was die psychoakustische Maskierung ist und welche Effekte dabei eine Rolle spielen! 1,5 P

*siehe Skript*

2.5 Bei welcher praktischen Anwendung findet die Maskierung Verwendung und welchen Vorteil bietet sie dabei? 1 P

*Audiocodierung - MPEG 1 Layer 3 (mp3)*

*Maskierte Töne/bzw. Samples müssen nicht übertragen werden - Einsparung an Bandbreite!*

<p>Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 7</p>
---	---	-----------------

### 3 Analoge Modulation und PAM

10 Punkte

#### Frequenzmodulation

3.1 Nennen Sie jeweils zwei Vor- und Nachteile der FM gegenüber der AM! 2 P

*Nachteile:*

- *Erhöhter Bandbreitebedarf*
- *Frequenzabhängigkeit des SNR*
- *geringere Reichweite*

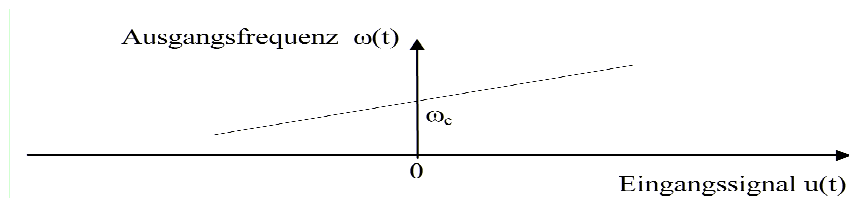
*Vorteile:*

- *Bei Störungen in sehr schmalen Frequenzbändern ist die FM durch die Aufteilung des Signals auf einen sehr breiten Frequenzbereich relativ robust.*
- *Durch die konstante Sendeleistung wird die Sendeenergie besser ausgenutzt, d.h. der Sender kann mit einer geringeren Sendeleistung betrieben werden. (AM: 500 W - 2 MW, FM: 50 W - 50 kW)*
- *FM-Sender stören sich weniger gegenseitig als AM-Sender, weil Nutz- und Störsender ständig ihre Frequenz ändern. Diese können bei FM mit einem Amplitudenbegrenzer ausgeglichen werden.*
- *Die meisten Störungen (im stationären Empfängerbetrieb) beeinflussen die Amplitude des Signals.*

3.2 Stellen Sie die ideale FM-Modulationskennlinie grafisch dar. 1 P

<p>Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 8</p>
---	---	-----------------





- 3.3 Im UKW-Bereich des Rundfunks wird mit FM gearbeitet. Der Frequenzhub  $\Delta f$  beträgt 75 kHz. Die höchste Nachrichtensignalfrequenz ist auf 15 kHz begrenzt. Welcher Modulationsindex  $\beta$  liegt vor und wie groß ist die Bandbreite des FM-Signals? 2 P

$$\text{Modulationsindex: } \beta = \frac{\Delta f_{\max}}{B_Q} = \frac{75 \text{ kHz}}{15 \text{ kHz}} = 5$$

$$\text{Bandbreite aus der Carson-Regel: } B_{K_m} \approx 2 \cdot (\beta + 1) \cdot B_Q = 12 \cdot 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$$

- 3.4 Um wie viel größer ist der Bandbreitebedarf gegenüber einer Amplitudenmodulation **mit** Träger? 1 P

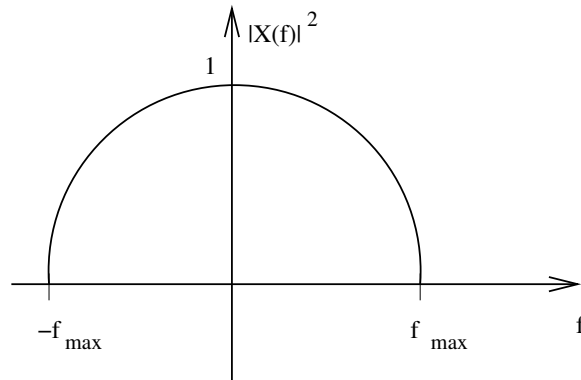
$$B_{K_m, AM \text{ mit Träger}} = 2 \cdot B_Q$$

*Daraus folgt, dass der Bandbreitebedarf gegenüber der AM mit Träger um den Faktor 6 größer ist.*

<p>Technische Universität Berlin          Fachgebiet Nachrichtenübertragung          Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet  <b>Nachrichtenübertragung</b>          am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 9</p>
---	--	-----------------

## Pulsamplitudenmodulation (PAM)

- 3.5 Ein analoges Audiosignal  $x(t)$ , dessen Spektrum bis  $f_{\max} = 20$  kHz reicht (siehe Abbildung), soll mit Hilfe einer PAM übertragen werden. Vor der Abtastung soll das Audiosignal  $x(t)$  durch einen idealen Tiefpass mit der Grenzfrequenz  $f_g = 15$  kHz gefiltert werden. Das gefilterte Ausgangssignal soll hier mit  $y(t)$  bezeichnet werden. 2 P



- a) Skizzieren Sie das Betragsquadratspektrum  $|Y(f)|^2$  des Signals am Ausgang des idealen Filters. 1 P
- b) Welche Abtastfrequenz  $f_a$  sollte mindestens gewählt werden, damit das gefilterte Audiosignal im Empfänger vollständig rekonstruiert werden kann? 1 P
- $f_a = 2f_g = 30$  kHz

Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005	Blatt: 10
--	--	-----------

3.6 Aus dem abgetasteten Signal  $y_a(t)$  entsteht durch eine weitere Filterung mit einem idealen Tiefpass der Grenzfrequenz  $f_g$  das Sendesignal  $s(t)$ . 2 P

a) Zeigen Sie anschaulich oder mathematisch, dass die Hintereinanderschaltung von idealem Tiefpass, Abtastung und zweitem idealen Tiefpass äquivalent mit einer einzigen idealen Tiefpassfilterung des Audiosignals ist, wenn die gleiche Grenzfrequenz verwendet wird. 2 P

*Zweite Filterung des periodisch fortgesetzten Spektrums ergibt wieder  $|Y(f)|^2$ .*

<b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 11
---	---	-----------

## 4 Pulscodemodulation

10 Punkte

Pulscodemodulation (PCM) und Quantisierung

- 4.1 Wie groß ist der Bandbreitebedarf  $B_K$  eines PCM-Kanals, wenn die Übertragung eines digitalisierten Basisbandsignals mit der ursprünglichen Bandbreite  $B_Q = 4$  kHz binär mit  $M = 256$  Amplitudenstufen vorgenommen werden soll? Spiegelungsfehler sind zu vermeiden! Für den Flankenfaktor der Signalformung soll ein Raised-Cosine mit dem Wert 1 angenommen werden. 2 P

$$\begin{aligned} m &= \log_2 M = \log_2 256 = 8 \\ B_K &= \frac{R}{2}(1 + \rho) = \frac{f_T m}{2}(1 + \rho) = \frac{2B_Q m}{2}(1 + \rho) \\ &= mB_Q(1 + \rho) = 8 \cdot 4 \text{ kHz} \cdot (1 + 1) = 64 \text{ kHz} \end{aligned}$$

- 4.2 Für den bei der linearen Quantisierung entstehenden Fehler wird oft die Annahme getroffen, dass er gleichverteilt in einem Quantisierungsintervall auftritt. Welche beiden vorausgesetzten Annahmen werden dazu für den Quantisierer getroffen? 1 P

- *Rekonstruktionswerte in der Mitte des Entscheidungsintervalls*
- *Stufenzahl  $M$  ausreichend groß / ohne Überlastung*

Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005	Blatt: 12
--	--	-----------

4.3 Es ist bekannt, dass in der Bildverarbeitung der Quantisierungs - SNR mit

3 P

$$\text{SNR} = 6,02 \cdot m \text{ dB}$$

für eine Auflösung von  $m$  Bit bestimmt werden kann. Zeigen Sie ausgehend von den Verteilungsdichten, dass diese Gleichung für den SNR in Abhängigkeit von der Codewortlänge  $m$  stimmt. Gehen Sie hierzu von einem Bildsignal mit Werten im Intervall  $[0, 2A]$  aus. Das Bild wird vor der linearen Quantisierung von seinem Mittelwert befreit. Das Bildsignal weist ungefähr gleichverteilte Amplituden auf. Der Midriser-Quantisierer ist voll ausgesteuert und nicht überlastet.

Hinweis:  $\log_{10}(2) \approx 0,301$ ;  $P_x = \sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p_x(x) dx$  für  $\mu_x = 0$

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (u - \mu_u)^2 p_u(u) du = \int_{-\infty}^{\infty} u^2 p_u(u) du = \frac{1}{2A} \int_{-A}^A u^2 du \\ &= \frac{1}{2A} \left[ \frac{1}{3} u^3 \right]_{-A}^A = \frac{A^2}{3} = \frac{u_{max}^2}{3} \quad \text{mit } p_u(u) = \frac{1}{2A} \Pi_{2A}(u) \\ \sigma_q^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (q - \mu_q)^2 p_q(q) dq = \int_{-\infty}^{\infty} q^2 p_q(q) dq = \frac{1}{\Delta} \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} q^2 dq \\ &= \frac{1}{\Delta} \left[ \frac{1}{3} q^3 \right]_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} = \frac{\Delta^2}{12} \quad \text{mit } p_q(q) = \frac{1}{\Delta} \Pi_{\Delta}(q) \\ u_{max} &= A = \frac{M}{2} \Delta = \frac{2^m}{2} \Delta \\ \sigma_u^2 &= \frac{\frac{2^{2m}}{4} \Delta^2}{3} = \frac{2^{2m} \Delta^2}{12} \\ \text{SNR}_v &= \frac{\sigma_u^2}{\sigma_q^2} = \frac{\frac{u_{max}^2}{3}}{\frac{\Delta^2}{12}} = \frac{\frac{2^{2m} \Delta^2}{12}}{\frac{\Delta^2}{12}} = 2^{2m} \\ \text{SNR} &= 10 \cdot \log_{10} \left( 2^{2m} \right) = m \cdot 20 \cdot \log_{10} 2 \approx 6 \cdot m \end{aligned}$$

<p><b>Technische Universität Berlin</b>          Fachgebiet Nachrichtenübertragung          Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet  <b>Nachrichtenübertragung</b>          am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 13</p>
--	--	------------------

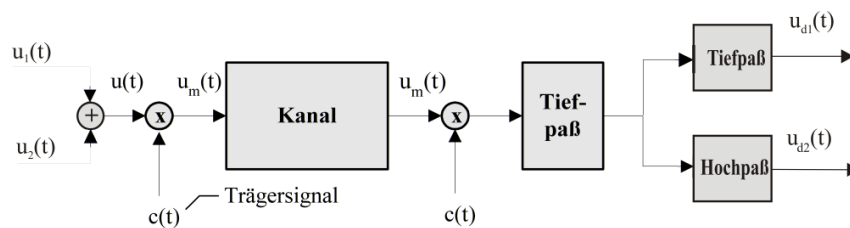
- 4.4 Mittels ungleichförmiger Quantisierung kann der SNR im Vergleich zur linearen Quantisierung verbessert werden. 2,5 P
- a) Erklären Sie kurz, wie es dazu prinzipiell kommt und welche Größen von dem zu quantisierenden Signal dazu bekannt sein müssen. 1 P
- Entscheidungsintervalle haben dort eine kleine Intervallbreite, wo die Amplitudendichte des zu quantisierenden Signals groß ist. So kann die Quantisierungsfehlervarianz verringert werden. Die Amplitudendichte (ADV, VDF) vom Signal muss bekannt sein.*
- b) Wie kann trotz Einsatz eines linearen Quantisierers eine ungleichförmige Quantisierung realisiert werden? Skizzieren Sie das Blockschaltbild einer solchen Nachrichtenstrecke für die Quantisierung und die zugehörige inverse Quantisierung mit den dazu benötigten Blöcken. Benennen Sie die Blöcke! 1,5 P
- Durch Einsatz der Kompondierung.*  
*Blockschaltbild: Kompander -> lin. Quantisierer -> Kanal -> inv. lin. Quantisierer -> Expander*
- 4.5 Welche beiden Prinzipien der adaptiven Quantisierung gibt es? 1 P
- Vorwärtsgesteuerte Quantisierung (PCM-AQF)*  
*Rückwärtsgesteuerte Quantisierung (PCM-AQB)*
- 4.6 Welche Größe wird dabei adaptiert? 0,5 P
- Skalierungs-/Verstärkungsfaktor. Skalierung des Signals senderseitig vor der Quantisierung und inverse Skalierung nach der inversen Quantisierung am Empfänger an die Kurzzeitvarianz angepasst, sodass der SNR näherungsweise konstant gehalten wird.*

<p>Technische Universität Berlin          Fachgebiet Nachrichtenübertragung          Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet  <b>Nachrichtenübertragung</b>          am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 14</p>
---	--	------------------

**\*5 Amplitudenmodulation****10 Punkte**

Zweiseitenbandmodulation (ZSB)

Zwei **nicht** überlappende Bandpasssignale sollen mittels Zweiseitenbandmodulation ohne Träger übertragen werden. Dazu werden die Signale addiert und auf der Empfängerseite aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften durch ideale Filter getrennt.

**\*5.1 Zeichnen Sie die vollständige Übertragungsstrecke!****1,5 P**

**\*5.2 Die beiden Signale seien:  $u_1(t) = \cos(2\pi ft)$  und  $u_2(t) = 2 \cdot \cos(2\pi \frac{3}{2} ft)$  mit  $f = 1000$  Hz. Die Trägerfrequenz der Übertragung betrage  $f_c = 5000$  Hz.**

**3,5 P**

a) Geben Sie Art und Grenzfrequenzen der Filter im Empfänger an, damit die beiden Signale bei idealer Übertragung getrennt empfangen werden können!

**0,5 P**

1. Tiefpass,  $f_g = 1000$  Hz ... 1500 Hz
2. Hochpaß,  $f_g = 1000$  Hz ... 1500 Hz

b) **Berechnen** Sie das Signal  $u_m(t)$  nach der Modulation!

**1,5 P**

Hinweis:  $\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta)$

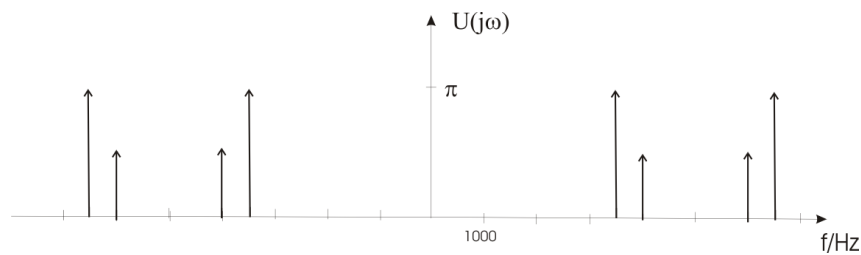
$$u_m(t) = \frac{1}{2} (\cos(2\pi 4000 \text{ Hz} \cdot t) + (\cos(2\pi 6000 \text{ Hz} \cdot t)) \\ + (\cos(2\pi 3500 \text{ Hz} \cdot t) + (\cos(2\pi 6500 \text{ Hz} \cdot t)))$$

$$U_m(j\omega) = \frac{\pi}{2} (\delta(\omega - 2\pi 4000 \text{ Hz}) + \delta(\omega + 2\pi 4000 \text{ Hz})) \\ + \frac{\pi}{2} (\delta(\omega - 2\pi 6000 \text{ Hz}) + \delta(\omega + 2\pi 6000 \text{ Hz})) \\ + \pi (\delta(\omega - 2\pi 3500 \text{ Hz}) + \delta(\omega + 2\pi 3500 \text{ Hz})) \\ + \pi (\delta(\omega - 2\pi 6500 \text{ Hz}) + \delta(\omega + 2\pi 6500 \text{ Hz}))$$

<p>Technische Universität Berlin          Fachgebiet Nachrichtenübertragung          Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet          Nachrichtenübertragung          am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 15</p>
---	---	------------------

c) Zeichnen Sie das Betragsspektrum von  $u_m(t)$  vollständig!

1,5 P



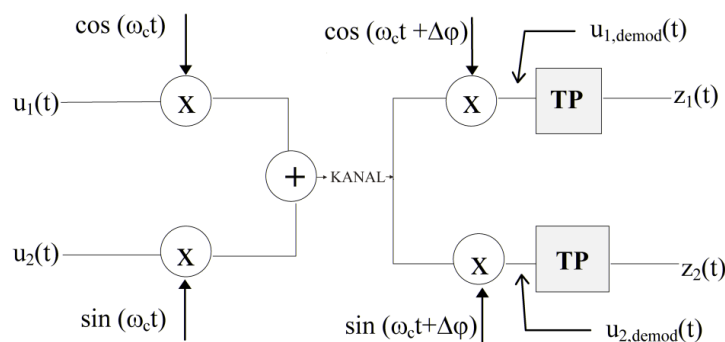
\*5.3 Bei der Demodulation tritt ein Phasenversatz von  $\Delta\phi$  auf. Berechnen Sie das Signal  $u_{d,1}(t)$  am Ausgang der Filter zur Signaltrennung! 1,5 P

$$\begin{aligned}
 u_d(t) &= u_m(t) \cdot \cos(2\pi 5000 \text{ Hz} \cdot t + \Delta\phi) \\
 &= \frac{1}{4} (\cos(2\pi 9000 \text{ Hz} \cdot t + \Delta\phi) + \cos(-2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\
 &\quad + \frac{1}{4} (\cos(2\pi 11000 \text{ Hz} \cdot t + \Delta\phi) + \cos(2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\
 &\quad + \frac{1}{2} (\cos(2\pi 8500 \text{ Hz} \cdot t + \Delta\phi) + \cos(-2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\
 &\quad + \frac{1}{2} (\cos(2\pi 11500 \text{ Hz} \cdot t + \Delta\phi) + \cos(2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\
 u_{d,TP}(t) &= \frac{1}{4} (\cos(-2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi) + \cos(2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\
 &\quad + \frac{1}{2} (\cos(-2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi) + \cos(2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\
 u_{d1}(t) &= \frac{1}{2} \cos(2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t) \cos(\Delta\phi) \\
 u_{d2}(t) &= \cos(2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t) \cos(\Delta\phi)
 \end{aligned}$$

\*5.4 Die beiden Signale werden nun mittels Quadraturamplitudenmodulation (QAM) übertragen, wobei die Trägerfrequenz die gleiche bleibt. 2,5 P

a) Zeichnen Sie die Übertragungstrecke für die analoge QAM!

1 P



<p>Technische Universität Berlin          Fachgebiet Nachrichtenübertragung          Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet          Nachrichtenübertragung          am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 16</p>
---	---	------------------



b) Das QAM-modulierte Signal beträgt

1,5 P

$$u_{m,QAM}(t) = \frac{1}{2} [\cos(2\pi 4000 \text{ Hz} \cdot t) + \cos(2\pi 6000 \text{ Hz} \cdot t)] \\ + \sin(2\pi 3500 \text{ Hz} \cdot t) + \sin(2\pi 6500 \text{ Hz} \cdot t)$$

Berechnen Sie das demodulierte Signale  $u_{d,1,QAM}(t)$  nach der TP-Filterung, wenn auch hier der Phasenversatz  $\Delta\phi$  beträgt!

Hinweis:  $\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta)$

$$u_{d1,TP}(t) = u_{m,QAM} \cdot \cos(2\pi 5000 \text{ Hz} \cdot t + \Delta\phi) \\ = \frac{1}{4} (\cos(-2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi) + (\cos(2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\ + \frac{1}{2} (\sin(-2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi) + (\sin(2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t - \Delta\phi)) \\ = \frac{1}{2} \cos(2\pi 1000 \text{ Hz} \cdot t) \cos(\Delta\phi) - \cos(2\pi 1500 \text{ Hz} \cdot t) \sin(\Delta\phi)$$

**\*5.5 Welches der beiden Übertragungsverfahren ist bezüglich des Phasenversatzes  $\Delta\phi$  für die hier gegebenen Signale vorzuziehen und warum?**

1 P

*Das erste Verfahren ist vorzuziehen, da hier der Frequenzversatz nur eine Dämpfung der Signale verursacht. Bei der QAM tritt zusätzlich auch noch Nebensprechen durch das jeweils andere Signal auf.*

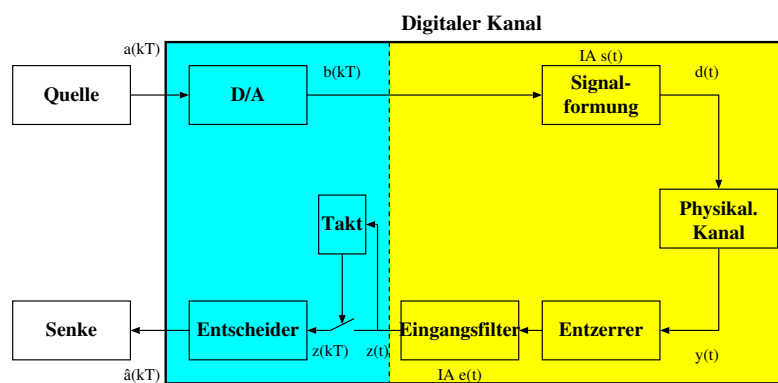
<p>Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 17</p>
---	---	------------------

## 6 Binäre Basisbandübertragung

10 Punkte

Optimale Empfängerstrukturen

- 6.1 Zeichnen Sie das Blockschaltbild einer binären Basisbandübertragungsstrecke 2 P  
und benennen Sie die einzelnen Blöcke!



<p style="text-align: center;">Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p style="text-align: center;">Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005</p>	<p style="text-align: center;">Blatt: 18</p>
---	---	--

- 6.2 Welche Übertragungsfunktion muss ein optimales Empfangsfilter (SAF) haben, wenn sich im Sender ein Sendefilter mit der Impulsantwort  $s(t)$  befindet? Geben sie diese sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich an! 1 P

$$e(t) = s(t_{\text{opt}} - t)$$
$$E(j\omega) = S^*(j\omega) \cdot e^{-j\omega t_{\text{opt}}}$$

- 6.3 Zu welchem Zeitpunkt  $t_{\text{opt}}$  sollte das Signal aus dem SAF abgetastet werden, damit der Kanalrauscheinfluss minimal ist und welchen Wert hat das abgetastete Signal  $f(t_{\text{opt}})$ , wenn keine Kanalstörung auftritt? 1 P

$$t_{\text{opt}} = T_{\text{Bit}}, f(T_{\text{Bit}}) = E_b$$

<b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 19
---	---	-----------

6.4 Welche messbare Größe am Entscheider wird durch die Ergebnisse aus 6.2 und 6.3 eigentlich maximiert? 0,5 P

*Entscheider - SNR*

6.5 Erklären Sie in eigenen Worten, warum eine Empfängerstruktur mit SAF und optimaler Nachabtastung besser ist als eine simple Nachabtastung des gestörten Signals! Gehen Sie dabei von einer um den Nullpunkt symmetrischen Verteilungsdichtefunktion der additiven Rauschstörung im Kanal aus! 2 P

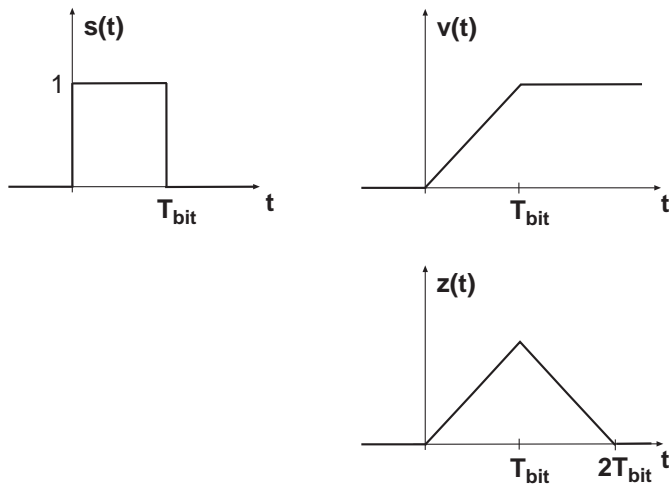
*Stichworte: adaptive Rauschstörung, Integration, mittelwertfreies Rauschen ...*

6.6 Mit welcher alternativen Empfangsstruktur kann das Ergebnis eines SAF noch erzeugt werden? Zeichnen Sie auch hier das Blockschaltbild des gesamten Empfängers! 1,5 P

*Korrelationsempfänger*

<b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 20
---	---	-----------

- 6.7 Ein Sendeformfilter habe eine Impulsantwort  $s(t)$  in Form eines Rechtecksignals. Zeichnen sie das Empfängersignal **vor** der Nachabtastung sowohl für einen Empfänger mit SAF als auch für den Empfänger aus der vorigen Teilaufgabe! Es liege keine Kanalstörung vor. Tragen Sie jeweils auch den optimalen Abtastzeitpunkt ein! 2 P



Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet Nachrichtenübertragung am 25.10.2005	Blatt: 21
--	--	-----------

**7 Mehrwertige Modulation****10 Punkte**

## M-wertige PSK

- 7.1 Zeichnen Sie qualitativ den Phasenstern einer 8-wertigen PSK und tragen Sie die Entscheidungsebenen ein. 1,5 P

*s.Skript (ähnlich dem Bild 14.12 nur mit 8 Phasen)*

- 7.2 Um welchen Betrag darf die empfangene Phase vom wahren Wert maximal abweichen, damit gerade noch eine korrekte Entscheidung über ein gesendetes Symbol vorgenommen werden kann. 1 P

$$\pm\pi/M$$

- 7.3 Begründen Sie, warum die M-wertige PSK mit Zunahme von M ineffizient wird. 1 P

*Bei gleichbleibender Bitfehlerwahrscheinlichkeit müsste der Kanal-SNR exponentiell mit m vergrößert werden.*

## M-wertige FSK

- 7.4 Nennen Sie sowohl einen Vor- als auch einen Nachteil der M-wertigen FSK gegenüber der M-wertigen PSK bzw. M-wertigen ASK! 1 P

*Höherer Bandbreitebedarf, geringere Sendeleistung bei gleichem Kanal-SNR*

- 7.5 Nennen Sie eine Nachrichtenverbindung, in der die M-wertige FSK u.a. eingesetzt wird. 0,5 P

*Satellitenverbindungen*

<p><b>Technische Universität Berlin</b>          Fachgebiet Nachrichtenübertragung          Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet  <b>Nachrichtenübertragung</b>          am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 22</p>
--	--	------------------

- 7.6 Zeigen Sie, dass für  $M \rightarrow \infty$  prinzipiell fehlerfrei übertragen werden kann. 2 P  
Geben Sie zusätzlich an, was dabei für  $E_b/N_0$  gelten muss.

Hinweis:  $p_{\text{Symbol}} < \frac{M}{2} e^{-E_s/2N_0}$  mit  $E_s = mE_b$  und  $M = 2^m$

$$\begin{aligned} p_{\text{Symbol}} < \frac{M}{2} e^{-E_s/2N_0} &= \frac{2^m}{2} e^{-mE_b/2N_0} \\ &= \frac{e^{\ln(2^m)}}{2} e^{-mE_b/2N_0} \\ &= \frac{e^{m \cdot \ln(2)}}{2} e^{-mE_b/2N_0} \\ &= \frac{1}{2} e^{-m(E_b/2N_0 - \ln 2)} \end{aligned}$$

$E_b/N_0$  muss größer sein als  $2 \ln 2$ !

#### OFDM-Technik

- 7.7 Um die Herausforderungen durch die Mehrwegeausbreitung zu reduzieren, kann alternativ auch die sogenannte OFDM-Technik verwendet werden. Wofür steht die Abkürzung OFDM? 0,5 P

*orthogonal frequency division multiplex oder orthogonales Frequenzmultiplex*

- 7.8 Beschreiben Sie das Grundprinzip der OFDM-Technik und begründen Sie, ob dieses ein geeignetes Konzept ist, mit dem Sie der Mehrwegeausbreitung entgegenzutreten können. 2,5 P

s. Skript

<p><b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora</p>	<p>Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005</p>	<p>Blatt: 23</p>
--	--	------------------

**\*8 Digitale Modulation****10 Punkte**

Frequenzumtastung (FSK)

**\*8.1 Ein Datensignal soll mit einer Bitrate  $R_{\text{Bit}} = 1000 \text{ bit/s}$  über einen Kanal übertragen werden. Zur Übertragung wird eine orthogonale FSK verwendet. Die Rauschleistungsdichte sei  $\frac{N_0}{2} = 6,25 \cdot 10^{-7} \text{ V}^2\text{s}$ . Die Amplitude des rechteckförmigen Sendeimpulses sei  $A = 100 \text{ mV}$ .** **5,5 P**

a) Berechnen Sie die Bitenergie des Sendeimpulses! **1 P**

$$E_b = A^2 T_{\text{Bit}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ V}^2\text{s}$$

b) Bestimmen Sie die Bitfehlerwahrscheinlichkeit. **1,5 P**

Hinweis:  $p_{\text{Bit}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}$  (verwenden Sie die beigegefügte Tabelle)!

$$2,34 \cdot 10^{-3}$$

c) Berechnen Sie den mittleren Fehlerabstand! **1,5 P**

Hinweis: Verwenden Sie für die Bitfehlerwahrscheinlichkeit den Wert  $p_{\text{Bit}} = 5 \cdot 10^{-4}$ !

$$\frac{1}{R_{\text{Bit}} \cdot p_{\text{Bit}}} = 2 \text{ s}$$

d) Auf welchen Wert verringert sich die Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei **1,5 P**

$R_{\text{Bit}} = 500 \text{ bit/s}$ ?

$$3,14 \cdot 10^{-5}$$

**\*8.2 Gegeben sei nun die Bitenergie  $E_b = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ V}^2\text{s}$ . Wie groß darf die Rauschleistungsdichte  $N_0/2$  für gaußverteiltes, weißes Rauschen maximal werden, wenn eine Bitfehlerrate von  $2,35 \cdot 10^{-3}$  für eine optimale FSK nicht überschritten werden soll?** **2,5 P**

Hinweis:  $p_{\text{Bit}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{2N_0} (1 - \rho_{01})}$  und  $\rho_{01} = -0,217$  (verwenden Sie die beigegefügte Tabelle)!

Technische Universität Berlin Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 24
--	---	-----------



$$\begin{aligned}
 p_{\text{Bit}} &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{2N_0} (1 - \rho_{01})} \leq 2,35 \cdot 10^{-3} \\
 \frac{1}{2} (1 - \operatorname{erf} \sqrt{\frac{E_b}{2N_0} \cdot 1,217}) &\leq 2,35 \cdot 10^{-3} \\
 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{E_b}{2N_0} \cdot 1,217} &\geq 1 - 4,7 \cdot 10^{-3} \\
 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{E_b}{2N_0} \cdot 1,217} &\geq 0,9953 \\
 \sqrt{\frac{E_b}{2N_0} \cdot 1,217} &\geq 2 \\
 \frac{E_b}{2N_0} \cdot 1,217 &\geq 4 \\
 \frac{N_0}{2} &\leq \frac{1,217 \cdot E_b}{16} \\
 \frac{N_0}{2} &\leq \frac{1,217 \cdot 16 \cdot 10^{-6}}{16} \\
 \frac{N_0}{2} &\leq 1,217 \cdot 10^{-6}
 \end{aligned}$$

Oktonäre Differenz-PSK

- \*8.3** Bei einer oktonären DPSK-Übertragung stehe eine Bandbreite des Telefonkanals mit 2400 Hz zur Verfügung. Als roll-off wird  $r = 0,5$  zugelassen. Geben Sie die maximal mögliche Symbol- und Bitrate für die Übertragung an! **2 P**

*1600 Bd bzw. 4800 bit/s*

<b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 25
---	---	-----------

x	erf(x)	x	erf(x)	x	erf(x)	x	erf(x)	x	erf(x)	x	erf(x)	x	erf(x)
0,00	0,00000000	0,61	0,6116812	1,22	0,9155336	1,83	0,9903468	2,44	0,9994408	3,05	0,9999839	3,66	0,9999997
0,01	0,0112834	0,62	0,6194114	1,23	0,9180500	1,84	0,9907359	2,45	0,9994694	3,06	0,9999849	3,67	0,9999997
0,02	0,02256645	0,63	0,6270464	1,24	0,9205051	1,85	0,9911110	2,46	0,9994966	3,07	0,9999858	3,68	0,9999998
0,03	0,0338412	0,64	0,6345858	1,25	0,9229001	1,86	0,9914724	2,47	0,9995225	3,08	0,9999867	3,69	0,9999998
0,04	0,0451111	0,65	0,6420293	1,26	0,9252359	1,87	0,9918207	2,48	0,9995472	3,09	0,9999875	3,70	0,9999998
0,05	0,0563719	0,66	0,6493766	1,27	0,9275136	1,88	0,9921562	2,49	0,9995707	3,10	0,9999883	3,71	0,9999998
0,06	0,0676215	0,67	0,6566277	1,28	0,9297341	1,89	0,9924793	2,50	0,9995930	3,11	0,9999890	3,72	0,9999998
0,07	0,0788577	0,68	0,6637821	1,29	0,9318986	1,90	0,9927904	2,51	0,9996142	3,12	0,9999897	3,73	0,9999998
0,08	0,0900781	0,69	0,6708400	1,30	0,9340079	1,91	0,9930899	2,52	0,9996345	3,13	0,9999904	3,74	0,9999998
0,09	0,1012805	0,70	0,6778011	1,31	0,9360631	1,92	0,9933782	2,53	0,9996537	3,14	0,9999910	3,75	0,9999998
0,10	0,1124629	0,71	0,6846652	1,32	0,9380651	1,93	0,9936556	2,54	0,9996719	3,15	0,9999916	3,76	0,9999998
0,11	0,1236229	0,72	0,6914328	1,33	0,9400150	1,94	0,9939225	2,55	0,9996893	3,16	0,9999921	3,77	0,9999999
0,12	0,1347583	0,73	0,6981037	1,34	0,9419137	1,95	0,9941793	2,56	0,9997058	3,17	0,9999926	3,78	0,9999999
0,13	0,1458671	0,74	0,7046778	1,35	0,9437621	1,96	0,9944262	2,57	0,9997215	3,18	0,9999931	3,79	0,9999999
0,14	0,1569470	0,75	0,7111554	1,36	0,9455614	1,97	0,9946637	2,58	0,9997364	3,19	0,9999935	3,80	0,9999999
0,15	0,1679959	0,76	0,7175365	1,37	0,9473123	1,98	0,9948920	2,59	0,9997505	3,20	0,9999939	3,81	0,9999999
0,16	0,1790118	0,77	0,7238214	1,38	0,9490160	1,99	0,9951114	2,60	0,9997639	3,21	0,9999943	3,82	0,9999999
0,17	0,1899924	0,78	0,7300102	1,39	0,9506732	2,00	0,9953222	2,61	0,9997767	3,22	0,9999947	3,83	0,9999999
0,18	0,2009358	0,79	0,7361032	1,40	0,9522851	2,01	0,9955248	2,62	0,9997888	3,23	0,9999950	3,84	0,9999999
0,19	0,2118398	0,80	0,7421007	1,41	0,9538524	2,02	0,9957194	2,63	0,9998002	3,24	0,9999954	3,85	0,9999999
0,20	0,2227025	0,81	0,7480031	1,42	0,9553761	2,03	0,9959063	2,64	0,9998111	3,25	0,9999957	3,86	0,9999999
0,21	0,2335219	0,82	0,7538105	1,43	0,9568572	2,04	0,9960858	2,65	0,9998215	3,26	0,9999959	3,87	0,9999999
0,22	0,2442959	0,83	0,7595236	1,44	0,9582965	2,05	0,9962581	2,66	0,9998313	3,27	0,9999962	3,88	0,9999999
0,23	0,2550226	0,84	0,7651425	1,45	0,9596950	2,06	0,9964234	2,67	0,9998406	3,28	0,9999964	3,89	0,9999999
0,24	0,2657000	0,85	0,7706679	1,46	0,9610535	2,07	0,9965821	2,68	0,9998494	3,29	0,9999967	3,90	0,9999999
0,25	0,2763263	0,86	0,7761001	1,47	0,9623728	2,08	0,9967344	2,69	0,9998577	3,30	0,9999969	3,91	0,9999999
0,26	0,2868997	0,87	0,7814397	1,48	0,9636540	2,09	0,9968804	2,70	0,9998656	3,31	0,9999971	3,92	0,9999999
0,27	0,2974182	0,88	0,7866872	1,49	0,9648978	2,10	0,9970205	2,71	0,9998731	3,32	0,9999973	3,93	0,9999999
0,28	0,3078800	0,89	0,7918431	1,50	0,9661051	2,11	0,9971548	2,72	0,9998802	3,33	0,9999975	3,94	0,9999999
0,29	0,3182835	0,90	0,7969081	1,51	0,9672767	2,12	0,9972836	2,73	0,9998869	3,34	0,9999976	3,95	0,9999999
0,30	0,3286267	0,91	0,8018827	1,52	0,9684134	2,13	0,9974070	2,74	0,9998933	3,35	0,9999978	3,96	0,9999999
0,31	0,3389081	0,92	0,8067676	1,53	0,9695162	2,14	0,9975252	2,75	0,9998993	3,36	0,9999979	3,97	0,9999999
0,32	0,3491259	0,93	0,8115634	1,54	0,9705856	2,15	0,9976386	2,76	0,9999050	3,37	0,9999981	3,98	0,9999999
0,33	0,3592786	0,94	0,8162709	1,55	0,9716227	2,16	0,9977475	2,77	0,9999104	3,38	0,9999982	3,99	0,9999999
0,34	0,3693645	0,95	0,8208907	1,56	0,9726281	2,17	0,9978511	2,78	0,9999155	3,39	0,9999983	4,00	0,9999999
0,35	0,3793820	0,96	0,8254235	1,57	0,9736026	2,18	0,9979506	2,79	0,9999204	3,40	0,9999984	4,01	0,9999999
0,36	0,3893297	0,97	0,8298702	1,58	0,9745470	2,19	0,9980459	2,80	0,9999249	3,41	0,9999985	4,02	0,9999999
0,37	0,3992059	0,98	0,8342314	1,59	0,9754620	2,20	0,9981371	2,81	0,9999293	3,42	0,9999986	4,03	0,9999999
0,38	0,4090094	0,99	0,8385080	1,60	0,9763483	2,21	0,9982244	2,82	0,9999333	3,43	0,9999987	4,04	0,9999999
0,39	0,4187387	1,00	0,8427007	1,61	0,9772068	2,22	0,9983079	2,83	0,9999372	3,44	0,9999988	4,05	0,9999999
0,40	0,4283923	1,01	0,8468104	1,62	0,9780380	2,23	0,9983878	2,84	0,9999409	3,45	0,9999989	4,06	0,9999999
0,41	0,4379690	1,02	0,8508379	1,63	0,9788428	2,24	0,9984642	2,85	0,9999443	3,46	0,9999990	4,07	0,9999999
0,42	0,4474676	1,03	0,8547841	1,64	0,9796217	2,25	0,9985372	2,86	0,9999476	3,47	0,9999990	4,08	0,9999999
0,43	0,4568866	1,04	0,8586499	1,65	0,9803755	2,26	0,9986071	2,87	0,9999506	3,48	0,9999991	4,09	0,9999999
0,44	0,4662251	1,05	0,8624360	1,66	0,9811049	2,27	0,9986738	2,88	0,9999535	3,49	0,9999992	4,10	0,9999999
0,45	0,4754817	1,06	0,8661435	1,67	0,9818104	2,28	0,9987376	2,89	0,9999563	3,50	0,9999992	4,11	0,9999999
0,46	0,4846553	1,07	0,8697732	1,68	0,9824927	2,29	0,9987986	2,90	0,9999589	3,51	0,9999993	4,12	0,9999999
0,47	0,4937450	1,08	0,8733261	1,69	0,9831525	2,30	0,9988568	2,91	0,9999613	3,52	0,9999993	4,13	0,9999999
0,48	0,5027496	1,09	0,8768030	1,70	0,9837904	2,31	0,9989124	2,92	0,9999636	3,53	0,9999994	4,14	1,0000000
0,49	0,5116682	1,10	0,8802050	1,71	0,9844070	2,32	0,9989655	2,93	0,9999658	3,54	0,9999994	4,15	1,0000000
0,50	0,5204998	1,11	0,8835329	1,72	0,9850028	2,33	0,9990161	2,94	0,9999678	3,55	0,9999994	4,16	1,0000000
0,51	0,5292436	1,12	0,8867878	1,73	0,9855785	2,34	0,9990645	2,95	0,9999698	3,56	0,9999995	4,17	1,0000000
0,52	0,5379896	1,13	0,8899706	1,74	0,9861345	2,35	0,9991107	2,96	0,9999716	3,57	0,9999995	4,18	1,0000000
0,53	0,5466460	1,14	0,8930823	1,75	0,9866716	2,36	0,9991547	2,97	0,9999733	3,58	0,9999995	4,19	1,0000000
0,54	0,5549392	1,15	0,8961238	1,76	0,9871902	2,37	0,9991967	2,98	0,9999749	3,59	0,9999996	4,20	1,0000000
0,55	0,5633233	1,16	0,8990961	1,77	0,9876909	2,38	0,9992368	2,99	0,9999764	3,60	0,9999996	4,21	1,0000000
0,56	0,5716157	1,17	0,9020003	1,78	0,9881741	2,39	0,9992750	3,00	0,9999779	3,61	0,9999996	4,22	1,0000000
0,57	0,5798158	1,18	0,9048374	1,79	0,9886405	2,40	0,9993114	3,01	0,9999792	3,62	0,9999996	4,23	1,0000000
0,58	0,5879229	1,19	0,9076082	1,80	0,9890905	2,41	0,9993462	3,02	0,9999805	3,63	0,9999997	4,24	1,0000000
0,59	0,5959365	1,20	0,9103139	1,81	0,9895245	2,42	0,9993792	3,03	0,9999817	3,64	0,9999997	4,25	1,0000000
0,60	0,6038560	1,21	0,9129554	1,82	0,9899431	2,43	0,9994108	3,04	0,9999828	3,65	0,9999997	4,26	1,0000000

<b>Technische Universität Berlin</b> Fachgebiet Nachrichtenübertragung Prof. Dr.-Ing. T. Sikora	Gesamtklausur im Lehrgebiet <b>Nachrichtenübertragung</b> am 25.10.2005	Blatt: 26
---	---	-----------