

# VO Datenkommunikation 389.153

**Norbert Görtz**, Alois Goiser, Franz Hlawatsch, Christoph Mecklenbräuer, Gerald Matz, Markus Rupp, Tanja Zseby, Philipp Svoboda



März 2017

# Inhalt

## Ziele der Lehrveranstaltung

## Organisation

- Vorlesungen

- Unterlagen

- Prüfungen

## Inhalt der Vorlesung

## Institut

## Einführung

- Digitale Signale

- Digitale Modulation

- Übertragung

- Empfang

- Verbesserungen

- Methoden

## Ziele der Lehrveranstaltung

- ▶ Vermittlung grundlegender Konzepte der digitalen Nachrichtentechnik und der Digitalen Signalverarbeitung
- ▶ Basis für weiterführende LVAs in Signalverarbeitung, Telekommunikation und Informationstheorie
- ▶ Darstellung orientiert sich an Anwendungen aus der Praxis
- ▶ Schwerpunkt liegt auf der Vermittlung spezieller mathematischer Methoden am Anwendungsbeispiel
- ▶ Grundlagen für moderne Forschung z.B. in den Bereichen "Mobilkommunikation", "Internet of Things", "Big Data", "Data Science", "Digitale Signalverarbeitung", "Network Security", "Cyber-Physical Systems", "Industrie 4.0"

# Vorlesungen

- ▶ Vorlesung: immer Dienstags in Raum E17
- ▶ Vortragende sind die Professorin und die Professoren des Institutes für Telekommunikation E389
- ▶ Jede(r) Vortragende behandelt eines der Themen inkl. der erforderlichen mathematischen Methoden
- ▶ Keine eigenen Übungen, aber Übungsanteile sind Bestandteil der Vorlesungen
- ▶ Für die Organisation der Vorlesungen und Prüfungen ist Dr. Svoboda zuständig:

`philipp.svoboda@tuwien.ac.at`

## Unterlagen

- ▶ Vorlesungstext ist das Buch von M. Bossert und S. Bossert: Mathematik der digitalen Medien, VDE-Verlag, 2010, ISBN: 978-3-8007-3137-4; Preis: 29 Euro
- ▶ Buch kann auch in der TU Bibliothek ausgeliehen werden
- ▶ Einige alte Klausuren werden auf der Web-Seite der Vorlesung veröffentlicht (auch in TISS verlinkt):  
<https://www.nt.tuwien.ac.at/teaching/summer-term/389-153/>
- ▶ Prüfungsrelevant ist der komplette Stoff, der in den Vorlesungen vorgetragen wurde; dieser Stoff kann über den Inhalt des Buches hinausgehen
- ▶ Je nach DozentIn werden auch Folien zugänglich gemacht; bei anderen ist eine Mitschrift der Vorlesung erforderlich.
- ▶ **Besuch der Vorlesung ist dringend empfohlen!**

## Prüfungen

- ▶ Prüfungsmodus: *Eine* schriftliche Prüfung über den gesamten Stoff
- ▶ 6 Prüfungen pro Jahr
- ▶ Kommunikation von Details zur Vorlesung sowie zu Prüfungen (Sitzplatzverteilung etc.) erfolgt über TISS-EMail: bitte LVA 389.153 unbedingt abonnieren!
- ▶ Zur Teilnahme an Prüfungen ist Anmeldung über TISS zwingend erforderlich – Information zur Anmeldung per TISS-EMail
- ▶ Prüfungstermine, siehe TISS-Eintrag für diese Vorlesung
- ▶ Für diesen Jahrgang angeratener Termin: 30.6.2017

## Inhalt der Vorlesung

### Termine im SS2017 und Themen (= Kapitel im Buch):

7.3.	9:15	Einführung	N. Görtz
14.3. / 21.3.	9:15	Navigationssystem	A. Goiser
28.3. / 4.4.	9:30	Handy	C. Mecklenbräuker
11.4. / 18.4.	–	–	(Osterferien)
25.4. / 2.5. / 9.5.	9:30	CD-Player	F. Hlawatsch
16.5. / 23.5.	9:30	MP3-Player	N. Görtz
6.6.	–	–	(Pfingsten)
30.5. / 13.6.	9:30	Internet	T. Zseby
20.6. / 27.6.	9:30	DVD	G. Matz

Vorlesung: immer Dienstags in Raum E17

Angeratener Prüfungstermin: 30.6.2017

# Institut für Telekommunikation E389



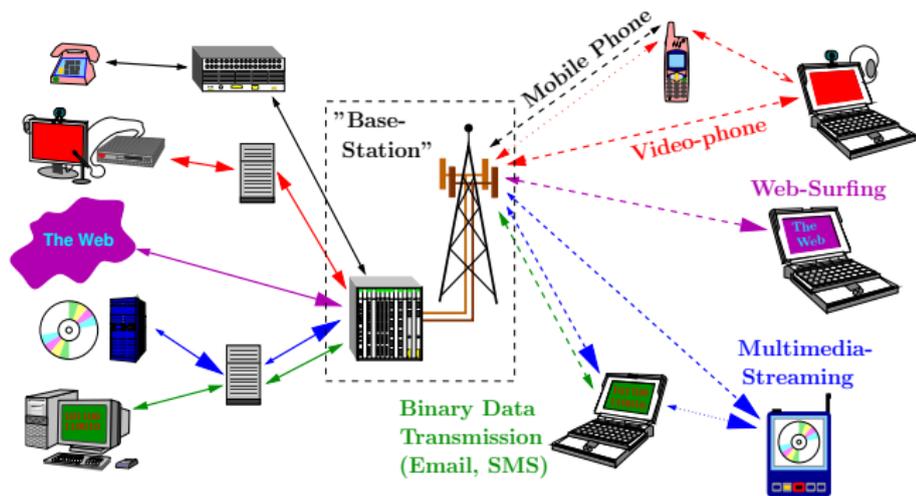
<https://www.nt.tuwien.ac.at>

# Einführung

- ▶ Typische Problemstellungen der Datenkommunikation anhand des Beispiels “Sprachübertragung im Mobilfunk”
- ▶ Grundlagen zur Digitalisierung, Quellencodierung, Modulation und Übertragung
- ▶ Ziel ist
  - ▶ die Diskussion allgemeiner Methoden am Beispiel
  - ▶ nicht die Vermittlung bestmöglicher konkreter Verfahren für die gestörte Übertragung von Sprachsignalen

# Einführung

## Mobilfunk



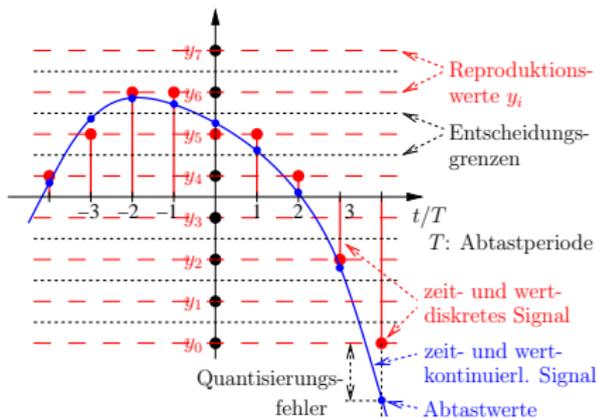
- ▶ Viele Benutzer, verschiedene Anwendungen & Qualitätskriterien
- ▶ Sehr wichtig (immer noch): mobiles Telefonieren

## Digitale Signale: Beispiel Sprache

- ▶ Mikrophon am Mobiltelefon: nimmt Schallwellen auf und setzt sie um in eine elektrische Spannung
- ▶ Umwandlung in **digitales Signal**:
  - ▶ **zeitdiskret**: Mikrophon-Signal wird in regelmäßigen zeitlichen Abständen abgetastet
  - ▶ **wertdiskret**: jeder Abtastwert wird durch *eine* von endlich vielen Stufen aus einer Tabelle dargestellt: "Quantisierung"
  - ▶ Originalsignal kann später aus quantisierten Abtastwerten (fast) wiederhergestellt werden.
- ▶ Weshalb Umwandlung in ein digitales Signal?
  - ▶ digitales Signal: Folge von Zahlen, d.h. leicht speicherbar!
  - ▶ Mit Zahlen kann man rechnen, z.B. "Algorithmen" für Quellencodierung, Fehlerkorrektur, Entstörung
  - ▶ Realisierung: z.B. jedes "Handy" enthält einen sehr leistungsfähigen hochspezialisierten Computer!

# Digitale Signale: Wert- und Zeitdiskretisierung

- ▶ Quantisierungsfehler
- ▶ Viele Stufen: kleiner Fehler aber hohe Bitrate  $R$
- ▶ 3 Bits  $\Rightarrow 2^3 = 8$  Stufen,  $y_i$
- ▶ Gespeichert oder zum Empfänger übertragen wird die Bit-Codierung der Stufennummer  $i$



Reproduktionswerte	$y_0$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$
Bit-Codierung	000	001	010	011	100	101	110	111

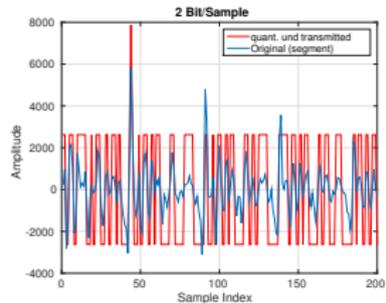
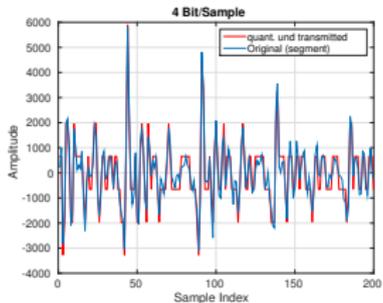
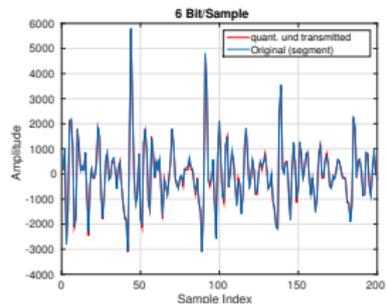
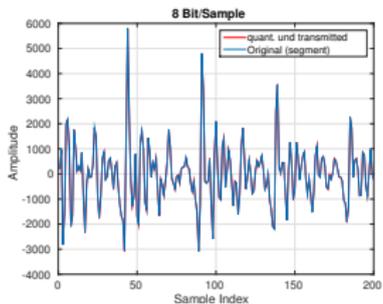
## Quellencodierung – siehe auch DVD-Teil der Vorlesung:

- ▶ Wie kann man Reproduktionswerte  $y_i$  so wählen, dass bei geringer Stufenzahl (and damit kleiner Bitrate) die Qualität hoch ist?
- ▶ Gleiche Anzahl von Bits für jeden Reproduktionswert?
- ▶ Wie muss die Bit-Codierung gewählt werden? Wieviele gibt es?

# Beispiel eines digitalisierten Sprachsignals

## Audio-Demo 1

Quantisierung mit 8, 6, 4, 2 Bit pro Abtastwert



# Beispiel eines digitalisierten Sprachsignals

## ... Audio-Demo 1

### Quantisierung mit 8, 6, 4, 2 Bit pro Abtastwert

- ▶ Ab etwa 8 Bit pro Abtastwert ist die Qualität "ganz ok"
  - ▶  $T_A = 125\mu s$ , d.h. die Bitrate  $R = \frac{8 \text{ Bit}}{125\mu s} = 64 \text{ kBit/s}$
  - ▶ Mobilfunk: Bitrate etwa 1..2 Bits pro Abtastwert, d.h. 8...16 kBit/s
  - ▶ Praxis: kompliziertere Codierverfahren, welche die Signaleigenschaften ausnutzen und gleichzeitig viele Werte gemeinsam codieren.
- ⇒ Auch bei kleiner Bitrate von z.B. 12 kBit/s: sehr gute Qualität, wie wir sie alle vom "Handy" kennen.



# Digitale Modulation

Reproduktionswerte	$y_0$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$
Bit-Codierung	000	001	010	011	100	101	110	111

Beispiel: wenn der Wert  $y_5$  übertragen werden soll, dann schicken wir die Bitfolge "101" in den Modulator und von dort in den "Übertragungskanal".

## Was macht der Modulator?

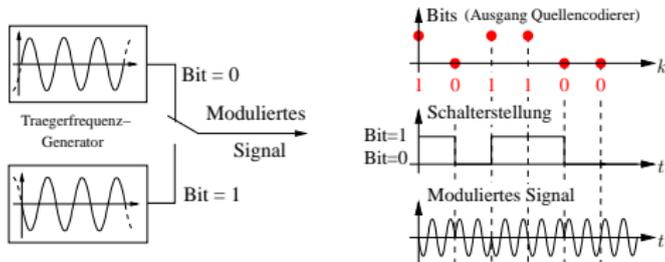
- ▶ Bit-Werte "0" und "1" müssen zwei verschiedenen physikalisch existierenden Signalen zugeordnet werden
- ▶ Signale brauchen Energie, damit sie sich im Raum ausbreiten können.
- ▶ Trägerfrequenz wählen, die an das Ausbreitungsmedium angepasst ist:
  - ▶ Luft, Vakuum: 100 kHz...60 GHz (Radiowellen); Licht: THz
  - ▶ Wasser: bis zu ca. 50 kHz (Schallwellen), je nach Distanz
- ▶ Radiowellen: in Wasser (Salzwasser!) innerhalb weniger Zentimeter stark gedämpft  $\Rightarrow$  Datenübertragung über lange Strecken unmöglich
- ▶ Niederfrequente Schallwellen (bei 2kHz: Dämpfung 0.2dB/km) reichen unter Wasser einige 100km weit (Kommunikation von Walen)
- ▶ In der Luft reichen Schallwellen nur einige 100m weit – Radiowellen u.U. tausende von Kilometern

# Digitale Modulation

Modulator verändert (hochfrequente) **Trägerschwingung**, abhängig von den Bits, die das niederfrequente Nutzsignal beschreiben (z.B. Sprache):

- ▶ verschiedene Frequenzen des Trägers (Frequenzmodulation)
- ▶ verschiedene "Phasenlagen" des Trägers (Phasenmodulation)
- ▶ verschiedene Amplituden des Trägers (Amplitudenmodulation)
- ▶ Kombinationen der drei Möglichkeiten

Beispiel "Binäre Phasenumtastung": je nach Bit-Wert wird hin und hergeschaltet zwischen zwei  $180^\circ$ -phasenverschobenen Sinus-Trägern.



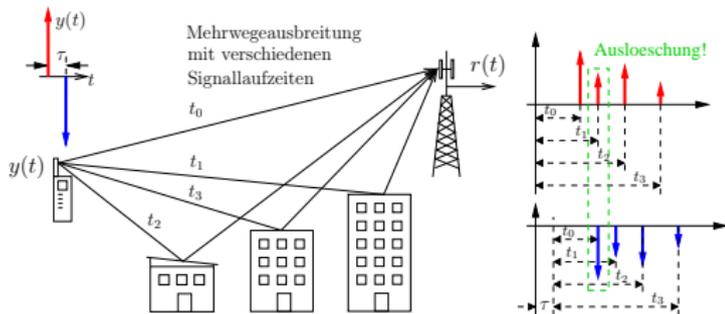
## Empfänger:

⇒ Referenzträger

⇒ Ähnlichkeit mit einem der beiden Träger bestimmt Bit-Entscheidung

# Übertragung

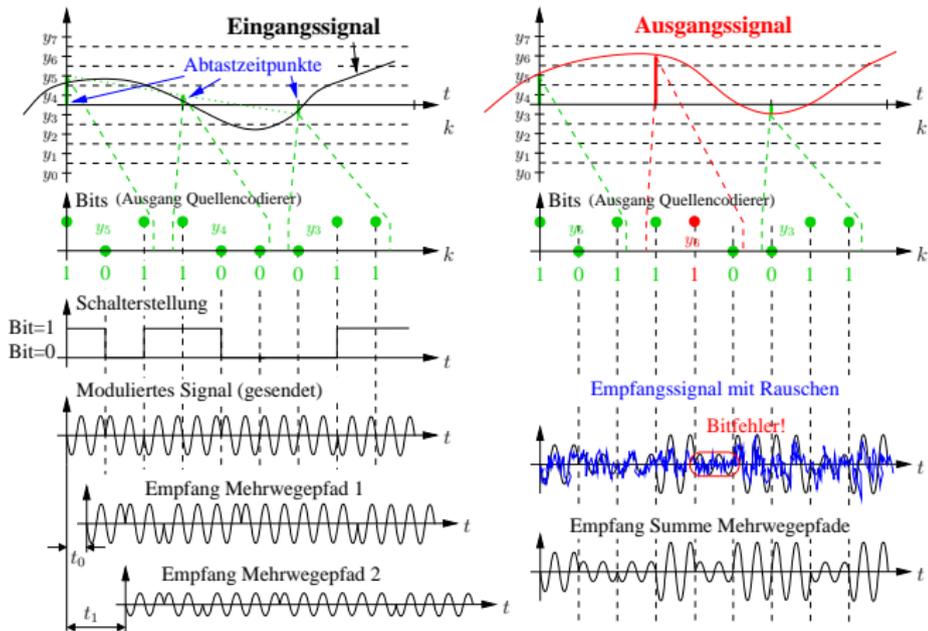
- ▶ Sendesignal-Leistung wird bei der Ausbreitung im Raum gedämpft
- ▶ Störungen wirken auf das Signal ein:
  - ▶ Signale **anderer Benutzer**, aber auch Störungen durch Geräte wie Bohrmaschinen, Staubsauger
  - ▶ **Rauschen** am Empfänger (Antenne, elektrische Schaltungen)
  - ▶ **Eigene Signale**: durch **Mehrwegeausbreitung** mehrfach zeitversetzt empfangen  $\Rightarrow$  Signalauslöschung / "Fading"



Fading: häufig im Mobilfunk

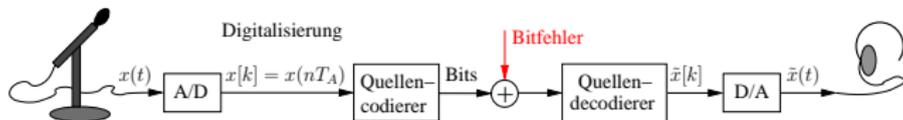
Vorteil: Telefonieren auch ohne Sichtverbindung zur Basisstation

# Digitalisierung, Übertragung und Empfang



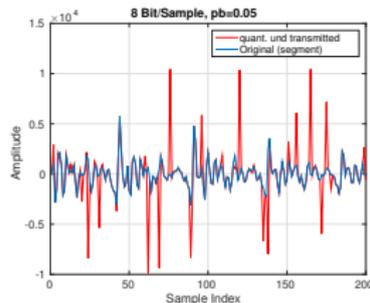
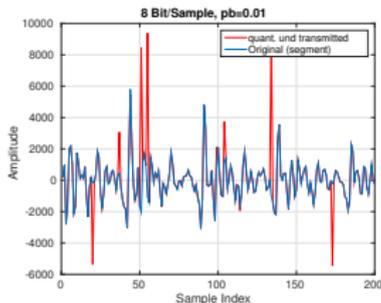
# Digitalisierung, Übertragung und Empfang

## Sprachübertragung auf gestörten Kanälen



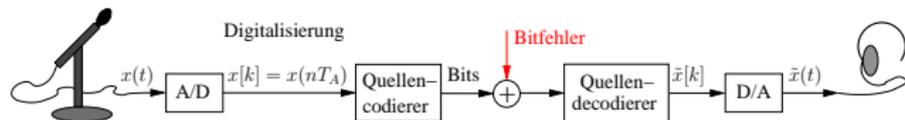
## Audio-Demo 2: Quantisierung mit 8 Bit pro Wert

Bitfehlerwahrscheinlichkeiten:  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{-2}$ ,  $10^{-1}$



# Digitalisierung, Übertragung und Empfang

## Sprachübertragung auf gestörten Kanälen



### ... Audio-Demo 2

Quantisierung mit 8 Bit pro Wert

Bitfehlerwahrscheinlichkeiten:  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{-2}$ ,  $10^{-1}$

#### Ergebnis:

- ▶ Qualität unter 8 Bit pro Abtastwert nicht gut genug
- ▶ Bei mehr als ca. 1% Bitfehlerwahrscheinlichkeit ist die Sprachqualität nicht mehr akzeptabel

**Probleme:** Bitrate um Faktor 8...10 zu hoch und Fehlerwahrscheinlichkeit bis zu 10% auf normalen Mobilfunkkanälen

# Verbesserungen

- ▶ **Quellencodierung** zur Verringerung der Bitrate
- ▶ **Kanalcodierung** (mit Hilfe zusätzlicher Bits) zur Korrektur von Bitfehlern
- ▶ **Signalverarbeitung zur Qualitätsverbesserung:**  
z.B. Reduzierung von Störsignalen
- ▶ Systeme mit **mehreren Empfangs- und Sendeantennen**
- ▶ **Kooperation** von Benutzern im System
- ▶ **Ausnutzung der Kanaleigenschaften:** man sendet dann Daten zu einem Benutzer, wenn der Kanal zufällig gerade "gut" ist.
- ▶ Design effizienter **Antennen und Schaltungen** für die Hochfrequenzseite der Sender und Empfänger
- ▶ Übertragung im Internet:
  - ▶ Finden geeigneter Übertragungswege: "**Routing**"
  - ▶ **Sicherung** gegen Bitfehler, Paketverluste, Abhören

# Methoden der Nachrichtentechnik

Grundlagen der Nachrichtentechnik / Telekommunikation:

- ▶ **Informationstheorie (IT)**
- ▶ Digitale Signal-Verarbeitung (DSV) / Digital Signal Processing

**IT** und **DSV** benötigen angewandte Mathematik: Algebra, Analysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung & Statistik, Optimierungsverfahren, ...

**DSV** ist ein extrem breites Gebiet, angewandt in vielen technischen Wissenschaften; es geht um konkrete Verfahren / Algorithmen:

- ▶ Bakk-Grundlagenvorlesung "Signale und Systeme 2" im 4. Semester sowie zwei Pflichtfächer im Masterstudium "Telecommunications"; mehrere Spezialvorlesungen im Vertiefungspflicht- und Wahlbereich im Masterstudium

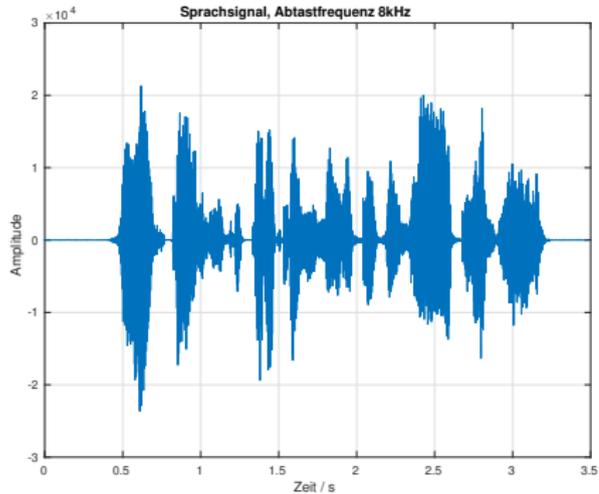
**Informationstheorie:** Grenzen der Leistungsfähigkeit von Quellencodierung und Fehlerkorrektur, unabhängig von konkreten Verfahren:

- ▶ Bestandteil der Bakk-Grundlagenvorlesung "Telekommunikation" im 6. Semester; im Masterstudium "Telecommunications" gibt es eine eigene Informationstheorie-Vorlesung und mehrere angewandte Spezialvorlesungen (Kanalcodierung, Quellencodierung)

# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung: Details in DVD-Vorlesung

- ▶ Beispiel: Quantisierung des Quellensignals "Sprache"

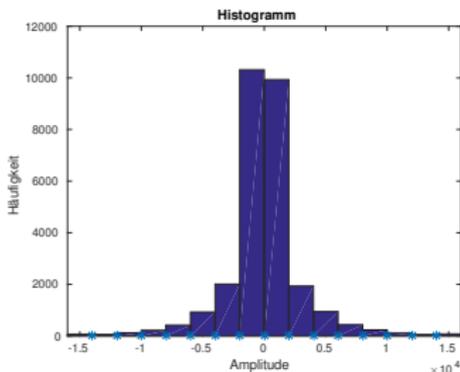


# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung / Quantisierung eines Sprachsignals

- ▶ Bekannt: Sprachsignal liegt vor als Folge von "signed" 16-Bit Abtastwerten im Bereich  $-32768 \dots 32767$ ; Abtastfrequenz 8kHz.
- ▶ Bestimmung eines Histogramms (Amplitudenverteilung): **Statistik!**  
⇒ Festlegung von Intervallen und Zählen wieviele Abtastwerte in die einzelnen Intervalle fallen. Hier: Wahl von 16 Intervallen:

-32768 ... -14000 ... -12000 ... -10000 ... -8000 ... -6000 ... -4000 ... -2000 ...  
... 0 ... 2000 ... 4000 ... 6000 ... 8000 ... 10000 ... 12000 ... 14000 ... 32767

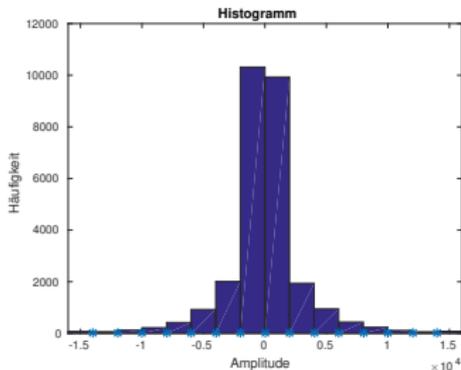
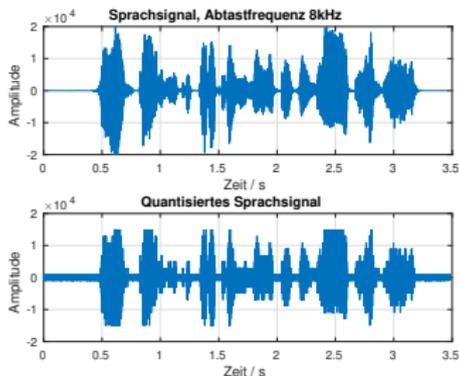


- ▶ Für die Quantisierung: Mitten der Intervalle (außer an den Rändern).
- ▶  $N = 16$  Reproduktionswerte  $y_i, i = 1, \dots, N$  – Übertragung mit 4 Bits, denn  $2^4 = 16$ :

-15000, -13000, -11000, -9000, -7000,  
-5000, -3000, -1000, 1000, 3000, 5000,  
7000, 9000, 11000, 13000, 15000

# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung / Quantisierung eines Sprachsignals



### Audio-Demo 3

- ▶ Rauschen im quantisierten Signal: Ursache?
- ▶ Bitrate ist 4 Bit pro Abtastwert. Jeder Abtastwert im Abstand von  $125\mu\text{s}$  (8kHz) genommen: Bitrate  $4\text{Bit}/125\mu\text{s} = 32\text{kBit/s}$
- ▶ Mit Quellencodierung kann man die Bitrate weiter reduzieren

# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung: Ausnutzung ungleicher Index-Wahrscheinlichkeiten

- ▶ Im Histogramm erkennt man unmittelbar, dass nicht alle der 16 Reproduktionswerte gleich oft benutzt werden.
- ▶ Dies kann man durch die **Auftrittswahrscheinlichkeiten** der 4-Bit-Indizes ausdrücken, die jedes Interval beschreiben.
- ▶ Die Wahrscheinlichkeit eines Reproduktionswertes kann man experimentell ermitteln (eigentlich annähern), indem man die Häufigkeit des Auftretens (aus dem Histogramm) durch die Gesamtzahl der Abtastwerte dividiert.
- ▶ Die Wahrscheinlichkeiten lauten in diesem Fall:

Index $i$	1	2	3	4	5	6	7	8
Repro-wert $y_i$	-15000	-13000	-11000	-9000	-7000	-5000	-3000	-1000
W'keit $p_i$	.0026	.0022	.0044	.0078	.0151	.0333	.0721	.3691

Index	9	10	11	12	13	14	15	16
Repro-wert $y_i$	1000	3000	5000	7000	9000	11000	13000	15000
W'keit $p_i$	.3573	.0694	.0339	.0157	.0084	.0040	.0020	.0028

- ▶ Indizes 8,9 sind um mehr als Faktor 100 häufiger als Indizes 1,16!

# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung: Ausnutzung ungleicher Index-Wahrscheinlichkeiten

- ▶ Ausnutzung unterschiedlicher Index-Wahrscheinlichkeiten: verschieden lange Bit-Sequenzen zur Übertragung verwenden: häufige Indizes bekommen kurze, seltene Indizes lange Bitmuster (ähnlich dem Morse-Alphabet).
- ▶ Was kann man maximal gewinnen? ⇒ **Informationstheorie!**
- ▶ **Entropie** der Indizes gibt den Informationsgehalt der Index-Quelle an.
- ▶ Definition der Entropie (für diskrete Quellen):

$$H(I) = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log_2(p_i) \stackrel{\text{hier}}{=} 2.378 \frac{\text{bit}}{\text{Abtastwert}}$$

- ▶ Wenn man die  $N = 16$  Indizes  $i = 1, 2, \dots, 16$  jeweils durch 4 Bits darstellt, dann braucht man also

$$\Delta R = \log_2(N) - H(I) = 4 - 2.378 = 1.622 \frac{\text{bit}}{\text{Abtastwert}}$$

“zuviel” im Vergleich zur theoretischen Grenze der Entropy.

# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung: ungleiche Index-W'keiten

- ▶ Informationstheorie
  - ▶ garantiert, dass es ein Codiervfahren gibt, mit dem man diese 1.622 bit pro Abtastwert sparen kann ...
  - ▶ ... sagt aber nicht mit welchem Verfahren das möglich ist!
- ▶ Ein konkretes Verfahren: Huffman-Coding (Details: DVD-Vorlesung).
- ▶ Huffman-Code für die Quelle mit Entropie  $H(I) = 2.378$  bit/Wert:

Repro-wert $y_j$	W'keit $p_j$	Index $i$	Feste Rate 4 Bit/Wert	Huffman-Code mittl. Länge: 2.437 Bit/Wert	Codelänge $\ell_j$ in Bit
-15000	0.0026	1	'0 0 0 0'	'0 1 1 0 0 0 0 0 1'	9
-13000	0.0022	2	'0 0 0 1'	'0 1 1 0 0 1 0 0 0'	9
-11000	0.0044	3	'0 0 1 0'	'0 1 1 0 0 0 0 1'	8
-9000	0.0078	4	'0 0 1 1'	'0 1 1 0 0 1 1'	7
-7000	0.0151	5	'0 1 0 0'	'0 1 1 1 1 1'	6
-5000	0.0333	6	'0 1 0 1'	'0 1 1 1 0'	5
-3000	0.0721	7	'0 1 1 0'	'0 1 0 0'	4
-1000	0.3691	8	'0 1 1 1'	'1'	1
1000	0.3573	9	'1 0 0 0'	'0 0'	2
3000	0.0694	10	'1 0 0 1'	'0 1 0 1'	4
5000	0.0339	11	'1 0 1 0'	'0 1 1 0 1'	5
7000	0.0157	12	'1 0 1 1'	'0 1 1 1 1 0'	6
9000	0.0084	13	'1 1 0 0'	'0 1 1 0 0 0 1'	7
11000	0.0040	14	'1 1 0 1'	'0 1 1 0 0 1 0 1'	8
13000	0.0020	15	'1 1 1 0'	'0 1 1 0 0 1 0 0 1'	9
15000	0.0028	16	'1 1 1 1'	'0 1 1 0 0 0 0 0 0'	9

# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung: ungleiche Index-W'keiten

- ▶ Beispiel: Codierung einer Sequenz von 5 Abtastwerten:

Reproduktionswerte	$y_8$	$y_9$	$y_4$	$y_8$	$y_5$
Codierung: feste Rate:	'0 1 1 1'	'1 0 0 0'	'0 0 1 1'	'0 1 1 1'	'0 1 0 0'
Huffman Code	'1'	'0 0'	'0 1 1 0 0 1 1'	'1'	'0 1 1 1 1 1 1'

- ▶ Annahme: *Ein* Bitfehler tritt auf bei der Übertragung (rot markiert).
- ▶ Bei fester Rate pro Abtastwert:

Codierung feste Rate:	'0 1 1 1'	'1 0 0 1'	'0 0 1 1'	'0 1 1 1'	'0 1 0 0'
Decodiert:	$y_8$	$y_{10}$	$y_4$	$y_8$	$y_5$

Es wird durch *einen* Bit-Fehler der Index exakt *eines* Abtastwertes gestört und inkorrekt decodiert.

- ▶ Huffman-Codierung: Decodierung erfolgt "kommafrei" durch lesen des Bitstroms von links nach rechts; wenn Symbol-Ende in Huffman-Tabelle erreicht, start mit neuem Symbol.

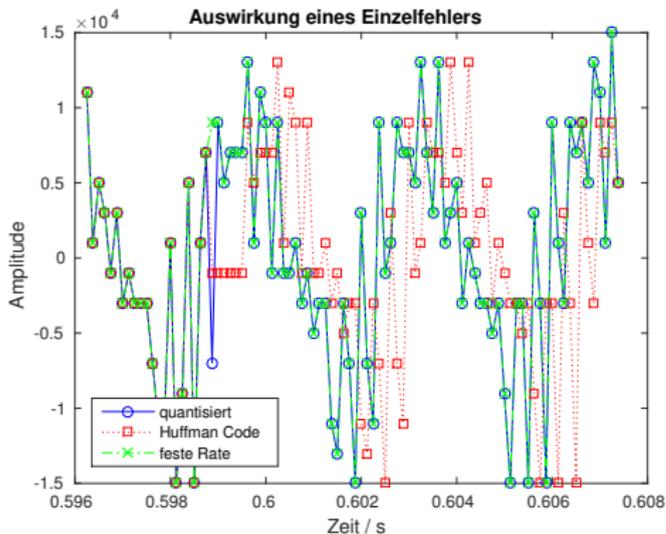
Huffman Code	'1'	'0 1 0 1'	'1'	'0 0'	'1'	'1'	'1'	'0 1 1 1 1 1'
Decodiert:	$y_8$	$y_{10}$	$y_8$	$y_9$	$y_8$	$y_8$	$y_8$	$y_5$

⇒ falsche und (hier) zusätzliche oder zu wenige Ausgangs-Symbole; "irgendwann" Resynchronisierung (siehe letztes Symbol  $y_5$ ).

# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung: ungleiche Index-W'keiten

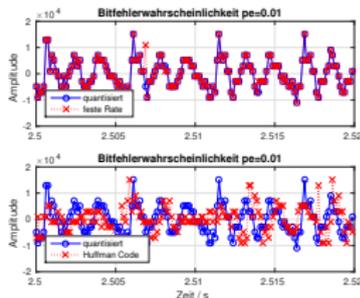
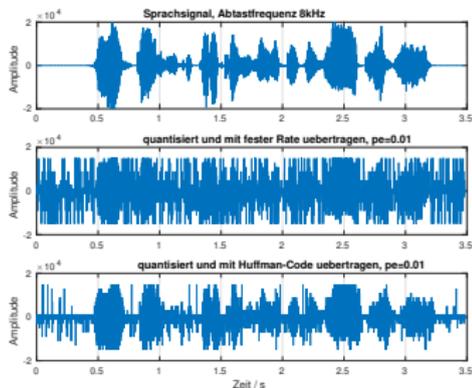
Auswirkung eines einzelnen Bit-Fehlers bei der Übertragung:



# Methoden der Nachrichtentechnik

## Quellencodierung: ungleiche Index-W'keiten

- ▶ Übertragung der Bits bei fester Rate (4Bit/Wert) und mit dem Huffman-Code (mittlere Codelänge 2.437 Bit/Wert)
- ▶ Bitfehlerwahrscheinlichkeit  $p_e = 0.01$
- ▶ Darstellung der decodierten Signale: **Audio-Demo 4**



- ▶ 28000 Abtastwerte; Pixelanzahl für Bild horizontal ca. 600, d.h. ca. 50 Abtastwerte durch *eine* Pixelbreite dargestellt: visuelle Darstellung u.U. täuschend bei der Beurteilung der Signalqualität.
- ▶ zufällige Phasenverschiebungen und kleine Störungen bei Huffman Coding "sieht" man nicht

# Zusammenfassung

## Themenliste der Vorlesung Datenkommunikation:

- ▶ Quellencodierung und Informationstheorie:  
Details in der Vorlesung "DVD"
- ▶ Digitale Signalverarbeitung:  
Details in der Vorlesung "MP3-Player"
- ▶ Fehlerkorrektur / Kanalcodierung:  
Details in den Vorlesungen "Handy" und "CD-Player"
- ▶ Wahrscheinlichkeitsrechnung, Statistik:  
Details in der Vorlesung "Navigationssystem"
- ▶ Internet, Mehrfachzugriff, Routing, Kryptographie, Verschlüsselung:  
Details in der Vorlesung "Internet"