

Kommunikationstechnik B Teil 1 – Einführung

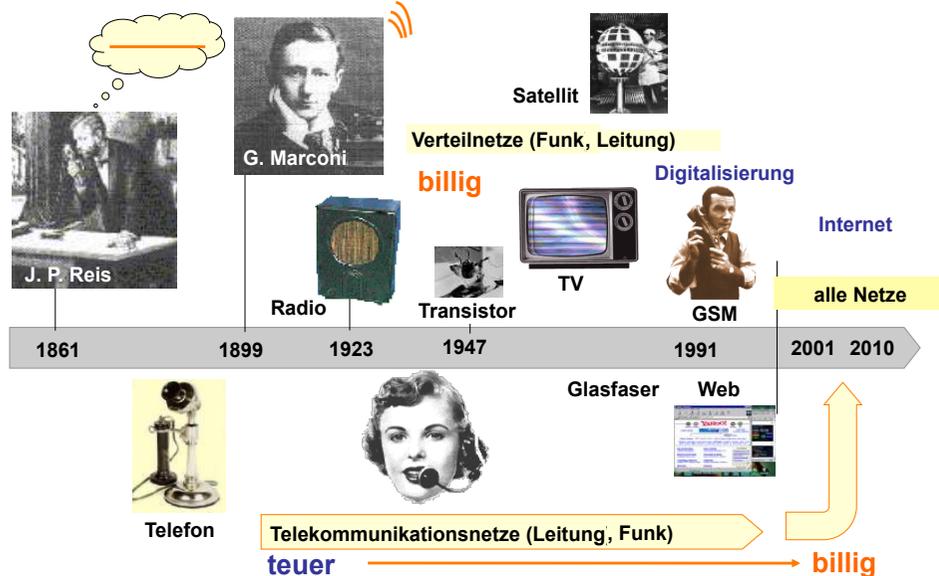
Stephan Rupp
Nachrichtentechnik

www.dhbw-stuttgart.de

Modulationsverfahren

- Einführung
- Amplitudenmodulation
- Frequenzmodulation

Ein Blick zurück



Wie funktioniert das?



Wellenlängen	Schall (Luft)	Licht (Freiraum)
Frequenz	300 m/s	$300 \cdot 10^6$ m/s
1 kHz	300 mm	300 km
10 kHz	30 mm	30 km
1 MHz	300 μ m	300 m
1 GHz	300 nm	300 mm

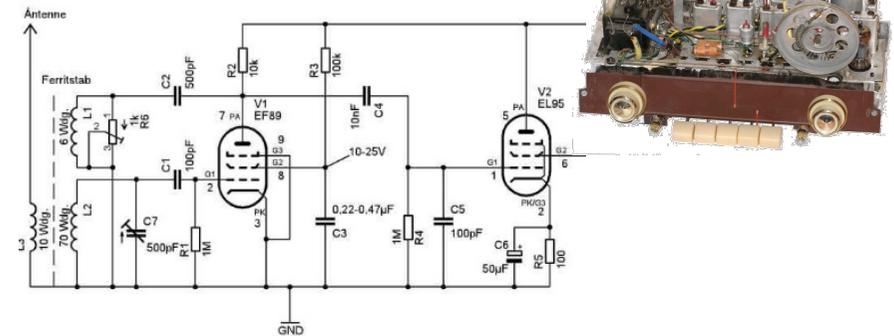
Audio (green oval around 1 kHz - 10 kHz)

Ultraschall (cyan oval around 1 MHz - 1 GHz)

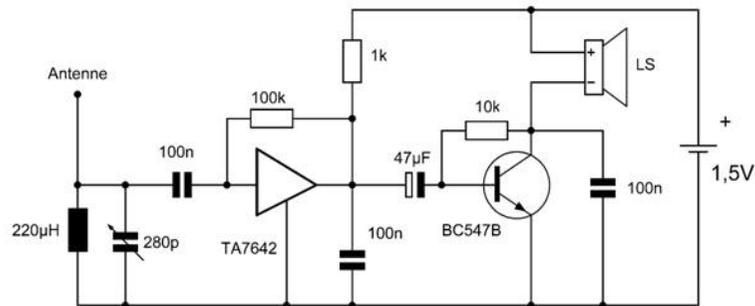
Hochfrequenz (yellow oval around 1 MHz - 1 GHz)

Mittelwelle?
 Kurzwelle?
 Ultra-Kurzwelle?
 Mobilfunk?

Mittelwellenempfänger (AM)

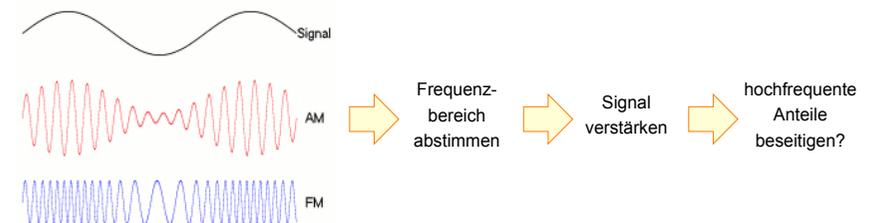


Etwas moderner: Transistorradio (AM)



Quelle: <http://www.elektronik-labor.de/Lernpakete/SteckRadio.htm>

Funktionsprinzip: AM-Empfänger



Quelle: WikiCommons

Wie erzeugt man ein AM-moduliertes Signal (Modulation, Sender)?

Wie empfängt man Radio (Demodulation)?

Modulationsverfahren

- Einführung
- **Amplitudenmodulation**
- Frequenzmodulation

Prinzip: Amplitude des Trägers folgt dem Nutzsignal

$$u(t) = U_T (1 + m \cos \omega t) \cos \Omega t$$

UT: Amplitude des Trägers
m: Modulationsgrad

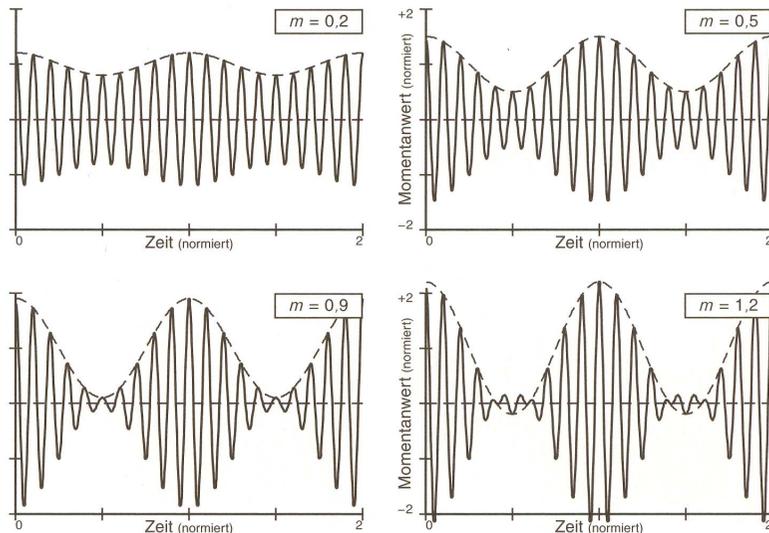
$$m \leq 1$$

$$\Omega > \omega$$



Ü1.1

Amplitudenmodulation



Amplitudenmodulation

Berechnung im Zeitbereich

$$u(t) = U_T (1 + m \cos \omega t) \cos \Omega t$$

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

$$u(t) = U_T \cos \Omega t + m \cdot U_T \cos \Omega t \cdot \cos \omega t$$

$$u(t) = U_T \cos \Omega t + \frac{1}{2} m \cdot U_T (\cos(\Omega - \omega)t + \cos(\Omega + \omega)t)$$

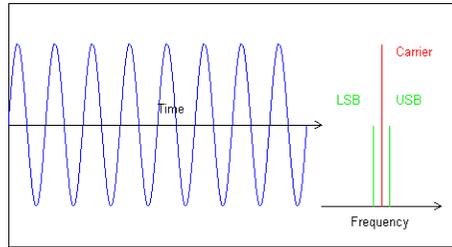
$$P = P_T + P_T \cdot \frac{m^2}{4} + P_T \cdot \frac{m^2}{4} \quad P_T: \text{Trägerleistung}$$



Ü1.2

Spektrum (qualitativ)

- Transformation in den Frequenzbereich liefert Spektrallinien bei den Frequenzen der cos-Terme



Quelle: WikiCommons

Berechnung im Frequenzbereich (1)

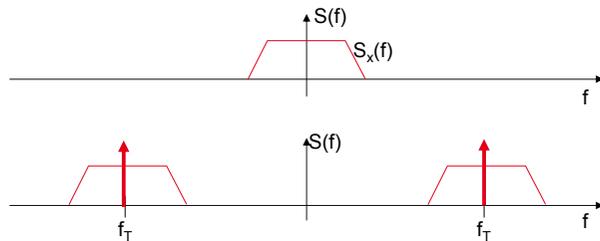
$$u(t) = U_T(1 + m \cdot x(t))\cos 2\pi f_T t$$

$$S(f) = \mathfrak{F}\{u(t)\}$$

$$= U_T \frac{1}{2} [\delta(f + f_T) + \delta(f - f_T)] + m \cdot U_T S_x(f) * \frac{1}{2} [\delta(f + f_T) + \delta(f - f_T)]$$

$$= U_T \frac{1}{2} [\delta(f + f_T) + \delta(f - f_T)] + \frac{1}{2} m \cdot U_T [S_x(f + f_T) + S_x(f - f_T)]$$

Berechnung im Frequenzbereich (2)

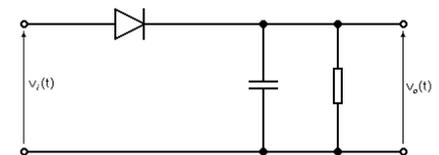


Das Spektrum $S_x(f)$ des Signals $x(t)$ wird um die Trägerfrequenz verschoben.



Hüllkurvendetektor

- Gleichrichten
- Glätten



Quelle: WikiCommons

Synchrone Demodulation

- Multiplikation mit einem Träger
- Beseitigung der hochfrequenten Anteile



Synchrone Demodulation

$$\begin{aligned}
 u_{dem}(t) &= u_{mod}(t) \cdot \cos \Omega t \\
 &= \left(U_T \cos \Omega t + \frac{1}{2} m \cdot U_T (\cos(\Omega - \omega)t + \cos(\Omega + \omega)t) \right) \cdot \cos \Omega t \\
 &= U_T \cos^2 \Omega t + \frac{1}{2} m \cdot U_T (\cos(\Omega - \omega)t \cdot \cos \Omega t + \cos(\Omega + \omega)t \cdot \cos \Omega t) \\
 &= \frac{1}{2} U_T \left(1 + \cos 2\Omega t + \frac{m}{2} \cos(-\omega)t + \frac{m}{2} \cos(2\Omega - \omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega)t + \frac{m}{2} \cos(2\Omega + \omega)t \right) \\
 &= \frac{1}{2} U_T \left(m \cos(\omega)t + \left(1 + \cos 2\Omega t + \frac{m}{2} \cos(2\Omega - \omega)t + \frac{m}{2} \cos(2\Omega + \omega)t \right) \right)
 \end{aligned}$$

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

Bandbreite

- u_{NF} : Audio-Signal mit 5 kHz Bandbreite
- Bandbreite des modulierten Signals?

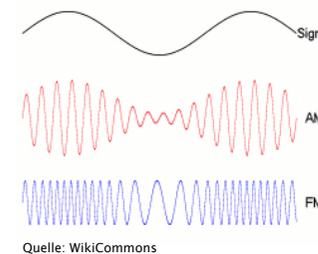
Effizienz

- Wirkungsgrad = Verhältnis Signalleistung zur gesamten Leistung (inkl. Träger)
- Einschätzung?

Modulationsverfahren

- Einführung
- Amplitudenmodulation
- **Frequenzmodulation**

Funktionsprinzip: FM-Empfänger



Trägerfrequenz f

$$u(t) = a \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi)$$

Änderungen:

- a: Amplitudenmodulation
- f: Frequenzmodulation
- Φ : Phasenmodulation

Prinzip: Trägerfrequenz folgt dem Nutzsignal

$$u(t) = U_T \cos \varphi(t) \quad \text{Träger}$$

$$\Omega(t) = \Omega + \alpha_f \cdot u_{NF}(t) \quad \text{Trägerfrequenz}$$

$$\varphi(t) = \int \Omega(t) dt \quad \text{Trägerphase}$$

Mit harmonischem Nutzsignal: $u_{NF}(t) = a \cdot \cos(\omega t)$

$$\Omega(t) = \Omega + \alpha_f a \cos(\omega t)$$

Modulationsindex

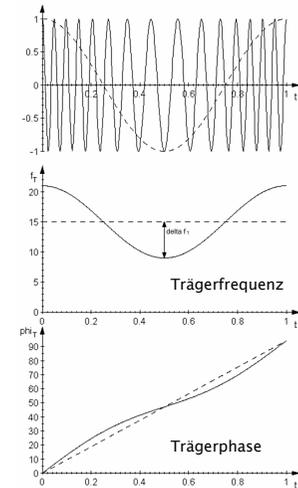
$$\eta = \frac{\Delta f_T}{f_S} \quad \begin{array}{l} \text{Frequenzhub des Trägers} \\ \text{Grenzfrequenz des Signals} \end{array}$$

Beispiel: UKW-Hörfunk

- $\Delta f_T = 75 \text{ kHz}$

- $f_S = 15 \text{ kHz}$

$$\Rightarrow \eta = 5$$



Quelle: WikiCommons

Bandbreite des modulierten Signals

- $B_{10\%} = 2(\Delta f_T + f_S) = 2 f_S (\eta + 1)$ alle Spektrallinien >10% des Trägers
- $B_{1\%} = 2(\Delta f_T + f_S) = 2 f_S (\eta + 2)$ alle Spektrallinien >1% des Trägers
- Beispiel UKW-Hörfunk: $B_{10\%} = 180 \text{ kHz}$ für Mono Signal (400 kHz für Stereo inkl. 60 Hz RDS)

Analytische Berechnung des Spektrums:

- Näherungsweise für $\eta \ll 1$
- Beliebige η : Tabellen

Modulation mit harmonischem Nutzsignal

$$\begin{aligned} s(t) &= s_{PM}(t) = s_{FM}(t) = A \cos\left(\Omega t + \int \alpha_f a \cos \omega t dt\right) \\ &= A \cos\left(\Omega t + \frac{\alpha_f a}{\omega} \sin \omega t\right) \\ &= A \cos\left(\Omega t + \frac{\Delta \Omega}{\omega} \sin \omega t\right) = A \cos(\Omega t + \eta \sin \omega t) \end{aligned}$$

$$s(t) = A \cos \Omega t \cos(\eta \sin \omega t) - A \sin \Omega t \sin(\eta \sin \omega t)$$



Modulation mit kleinen Modulationsindizes ($\eta \ll 1$)

$$s(t) = A \cos \Omega t \cos(\eta \sin \omega t) - A \sin \Omega t \sin(\eta \sin \omega t)$$

$$\eta \ll 1 \Rightarrow \eta \sin \omega t \rightarrow 0$$

$$\cos(\eta \sin \omega t) \approx 1$$

$$\sin(\eta \sin \omega t) \approx \eta \sin \omega t$$

$$s(t) = A \cos \Omega t - A \sin \Omega t \eta \sin \omega t$$

$$= A \cos \Omega t - A \frac{\eta}{2} \cos(\Omega - \omega)t + A \frac{\eta}{2} \cos(\Omega + \omega)t$$

Wo werden analoge Modulationsverfahren heute eingesetzt:

- Mittelwellen-Radio?
- UKW-Radio?
- DAB (Digital Audio Broadcast)?
- Terrestrisches Fernsehen (TV)?
- Sat-TV?
- Kabel-TV?
- Mobilfunk?
- GPS?
- ...

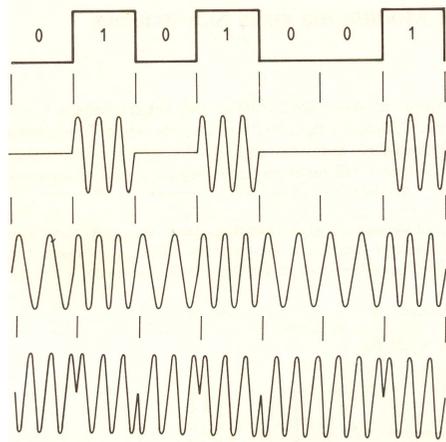
ENDE Teil 1

Kommunikationstechnik B Teil 2 – Digitale Modulationsverfahren

Stephan Rupp
Nachrichtentechnik

www.dhbw-stuttgart.de

Übersicht



Signal

Amplitudenumtastung
Amplitude Shift Keying (ASK)

Frequenzumtastung
Frequency Shift Keying (FSK)

Phasenumtastung
Phase Shift Keying (PSK)

Digitale Modulationsverfahren

- Amplitudenumtastung (ASK)
- Frequenzumtastung (FSK)
- Phasenumtastung (PSK)
- Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM)

Amplitudenumtastung

Digitale Form der Amplitudenmodulation

- moduliertes Signal

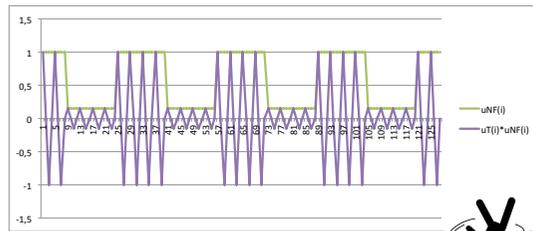
$$u_{ASK}(t) = u_{NF}(t) \cdot \cos(\omega_T t + \phi)$$

- mit der Amplitude

$$u_{NF}(t) = A_m \cdot g(t)$$

wobei $m = 1, \dots, M$; $0 \leq t \leq T$

- Einfachste Form von $g(t)$:
Rechteckpuls der Dauer T



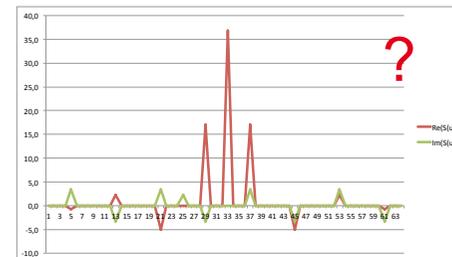
Ü2.1.1

- Einfachste Variante der ASK: On-Off-Keying (OOK) mit $A_0=0$ und $A_1=1$

Amplitudenumtastung

Spektrum

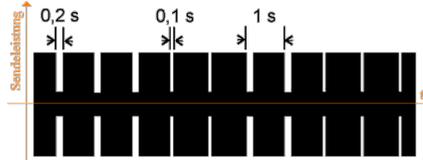
- Modulation mit Träger f_T : Verschiebung um $\pm f_T$ (und Spiegelung am Träger)
- Spektrum $S(f)$ des digitalen Signals (Rechteck)?



Ü2.1.2

Beispiel: DCF77 (Uhrzeit per Langwelle)

- Signal:
 - Träger 77,5 kHz, jede Sekunde einmal abgesenkt auf 15% für
 - „0“: 100 ms
 - „1“: 200 ms
 - außer zur 59. Sekunde (hiermit Synchronisation der Uhren zur folgenden 0-ten Sekunde)
 - Somit 59 Bits pro Minute für Zeitinformation



Ü2.2

Digitale Modulationsverfahren

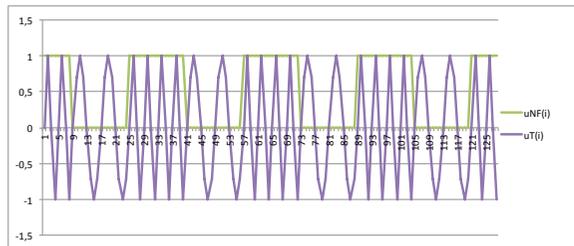
- Amplitudenumtastung (ASK)
- **Frequenzumtastung (FSK)**
- Phasenumtastung (PSK)
- Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM)

Digitale Form der Frequenzmodulation

- moduliertes Signal

$$u_{FSK}(t) = U_T \sin(\omega_{Tm}t + \phi)$$

mit $m = 1, \dots, M$ und $0 \leq t \leq T$



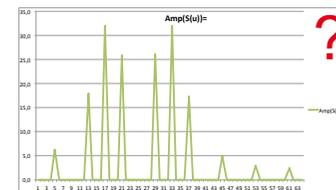
Ü2.3.1

Beispiel: $f_{T2} = 2 f_{T1}$

- Diskrete Frequenzen f_{Tm}

Spektrum

- Frequenzhub: Abstand zwischen den diskreten Frequenzen
- Hub bestimmt Bandbreite
- Modulationsindex: Hub/Bitrate
- Bedeutung des kontinuierlichen Übergangs zwischen den Frequenzen (ohne Phasensprünge)?



Ü2.3.2

Minimum Shift Keying (MSK)

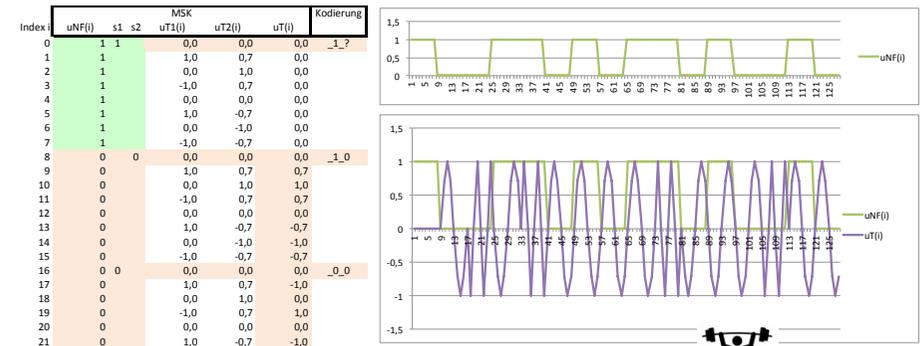
- kontinuierliche Phasenübergänge (Übergabe am Nulldurchgang)
- $f_{T1} = 2 f_{T2}$
- Auswahl zwischen f_{T1} und f_{T2} durch Nutzsignal:
 - 4 mögliche Zustände ($+f_{T1}, -f_{T1}, +f_{T2}, -f_{T2}$)
- Abwechselnd Aufteilung des Signals $s(i)$ auf Kanäle $s_1(i)$ und $s_2(i)$ (mit Verdopplung der Bitdauer):

Kodierung	$f_T(m)$
_0_0	-fT1
_0_1	-fT2
_1_0	+fT2
_1_1	+fT1

m	s(m)	s1(m)	s2(m)	$f_T(m)$	Kodierung
0	0	0	0	-fT2	_0_?
1	1	0	1	-fT1	_0_1
2	1	1	0	+fT1	_1_1
3	0	0	0	-fT2	_1_0
4	0	0	0	-fT1	_0_0
5	1	0	1	-fT2	_0_1
6	0	0	0	-fT2	_0_1

- Modulationsindex = 0,5 (Hub entspricht halber Signalbandbreite)

Beispiel:

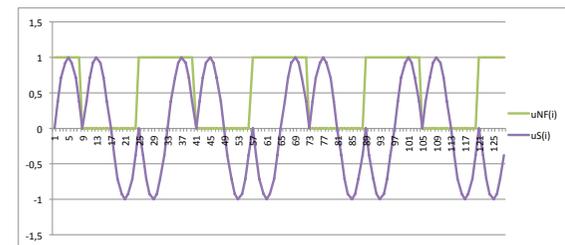


Digitale Modulationsverfahren

- Amplitudenumtastung (ASK)
- Frequenzumtastung (FSK)
- Phasenumtastung (PSK)
- Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM)

Digitale Form der Phasenmodulation

- moduliertes Signal
- $$u_{PSK}(t) = U_T \sin(\omega_T t + \phi_m)$$
- mit $m = 1, \dots, M$ und $0 \leq t \leq T$



Beispiel:
 $\Phi_1 = 0$
 $\Phi_2 = \pi$

Allgemein:

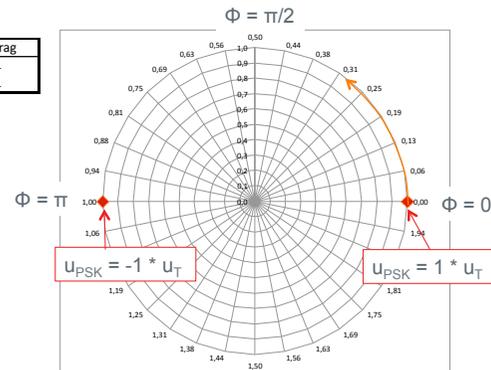
$$\phi_m = \frac{2\pi \cdot m}{M}$$

- Diskrete Phasen ϕ_m

Darstellung im Kreisdiagramm

- Kodierung der Signale:

PSK	index m	phi m/2Pi	Betrag
	0	0	1
	1	1	1



Vier diskrete Phasen (Quadraturphasenumtastung)

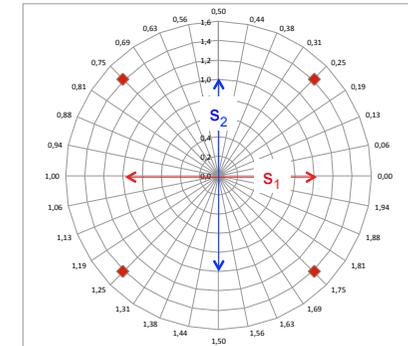
- Quadratur: Zuordnung zu zwei orthogonalen Signalen s_1 und s_2 (die jeweils um 0 bzw. π getastet werden)

- Kodierung:

index m	s1[Re]	s2[m]	phi m/2Pi	Betrag
0	1	1	0,25	1,41
1	-1	1	0,75	1,41
2	-1	-1	1,25	1,41
3	1	-1	1,75	1,41

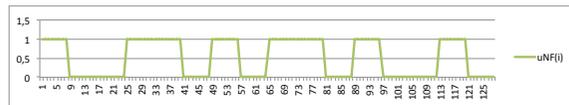
- Orthogonal:

- $s_1(t) = \cos(\omega_T t)$
- $s_2(t) = \sin(\omega_T t)$



Beispiel: QPSK

Nutzsignal:



Kodierung:

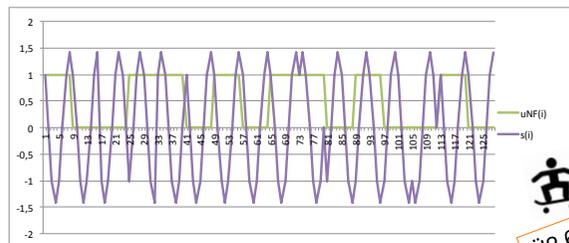
Kodierung	s(m)
0	s1+s2
1	-s1+s2
2	-s1-s2
3	s1-s2

$$s_1(t) = \cos(\omega_T t)$$

$$s_2(t) = \sin(\omega_T t)$$

Moduliertes Signal:

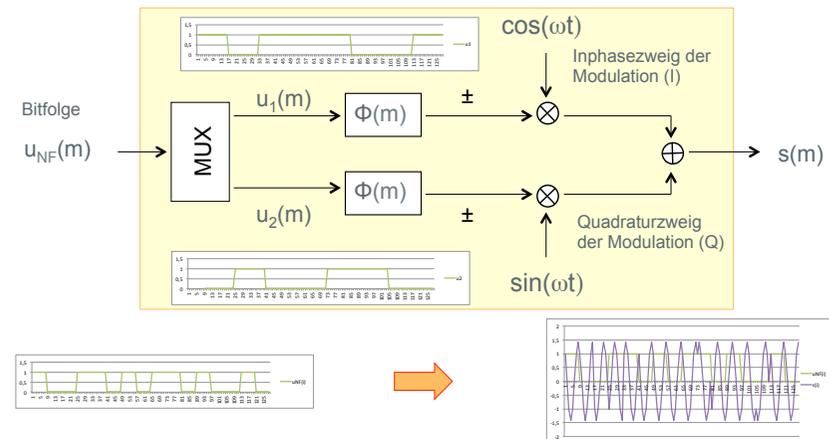
uNF(m)	u1(m)	u2(m)	s(m)
0	0		0
1	1		-s1+s2
1	1	1	s1+s2
0		0	s1-s2
0	0		-s1-s2
1	1	1	-s1+s2
0	0		-s1+s2



Ü2.6

QPSK Sender

Erzeugung des modulierten Signals



Aufgabe:

- Wie ist ein QPSK Empfänger aufgebaut?
- Könnte man auf die Multiplexer verzichten und stattdessen zwei unabhängige Signale u_1 und u_2 senden bzw. empfangen?
- Wieso kommen sich diese Signale u_1 und u_2 bei der Modulation bzw. Demodulation nicht in die Quere?
- Was bedeutet orthogonal? Was sind orthogonale Funktionen bzw. Signale?

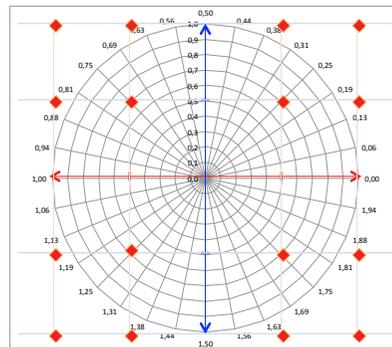
Digitale Modulationsverfahren

- Amplitudenumtastung (ASK)
- Frequenzumtastung (FSK)
- Phasenumtastung (PSK)
- **Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM)**

Quadraturamplitudenmodulation (QAM)

Kombination aus ASK und PSK

- Zuordnung der Bits zu
 - Verschiedenen Amplituden (ASK)
 - Verschiedenen Phasen (PSK)
- Quadratur:
Verwendung orthogonaler Träger
- Beispiel: $m = 2 \Rightarrow 2^m = 4$
Signalwerte der Eingangssignale
 - $u_1(m)$: -1; -0,5; 0,5; 1
 - $u_2(m)$: -1; -0,5; 0,5; 1



Kommunikationstechnik B

ENDE Teil 2

Kommunikationstechnik B Teil 3 – Signalverarbeitung

Stephan Rupp
Nachrichtentechnik

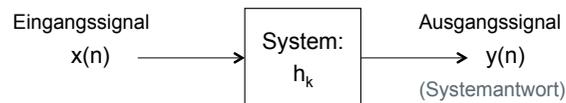
www.dhbw-stuttgart.de

Signalverarbeitung

- Faltung
- FIR-Filter
- IIR-Filter
- Übertragungsfunktion

Faltung

Systembeschreibung



Ausgangssignal = Eingangssignal gefaltet mit Systemkoeffizienten h_k

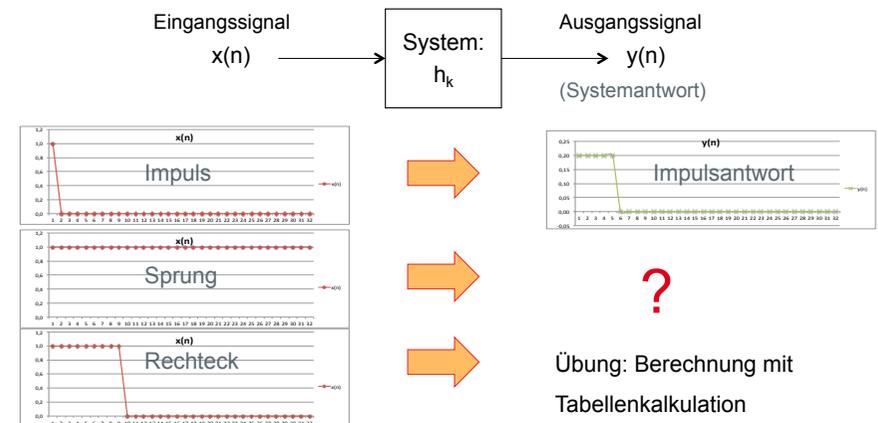
$$y[n] = \sum h_k \cdot x[n-k] \quad \text{mit } k = 0, 1, \dots, N$$

Für $N = 4$:

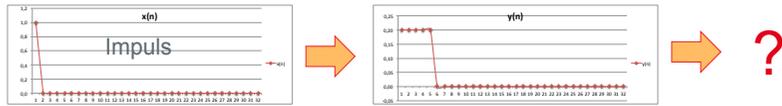
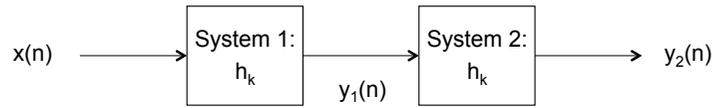
- $y[n] = h_0 \cdot x[n] + h_1 \cdot x[n-1] + h_2 \cdot x[n-2] + h_3 \cdot x[n-3] + h_4 \cdot x[n-4]$
- Beispiel: $h_k = 0,2$ (gleiche Koeffizienten) => Impulsantwort? Sprungantwort?

Faltung

Beispiel: $N=4$, $h_k = 0,2$ (gleiche Koeffizienten)



Kaskadierte Systeme



- Sprung?
- Rechteck?
- $\sin(2\pi f t + \varphi)$?

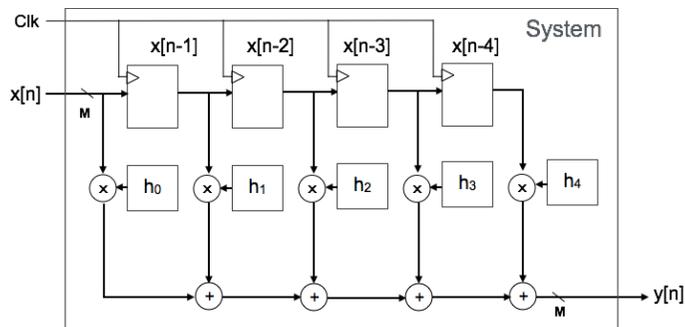
Übung: Berechnung mit Tabellenkalkulation.
Skalierung? Interpretation?

Signalverarbeitung

- Faltung
- **FIR-Filter**
- IIR-Filter
- Übertragungsfunktion

FIR-Filter: Endliche Impulsantwort,

- da realisiert durch N Systemkoeffizienten. Beispiel:



- Algorithmus?

Signalverarbeitung

- Faltung
- FIR-Filter
- **IIR-Filter**
- Übertragungsfunktion

Infinite Impulse Response (IIR)

IIR-Filter: nicht begrenzte Impulsantwort,

- da rückgekoppelte Struktur.

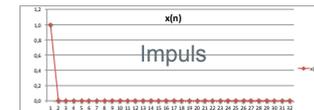
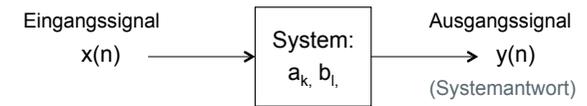
Systembeschreibung: $y[n] = \sum a_k \cdot x[n-k] - \sum b_l \cdot y[n-l]$

Beispiel: $y[n] = a_0 \cdot x[n] - b_1 \cdot y[n-1]$

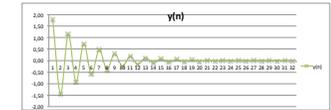
- Blockschaltbild?
- Struktur (Bedeutung der Koeffizienten)?
- Einfluss der Rückkopplung?

Infinite Impulse Response (IIR)

IIR-Filter:



$a_0=1,8$
 $b_1=0,8$



Beispiel: $y[n] = a_0 \cdot x[n] - b_1 \cdot y[n-1]$

- Wahl der Koeffizienten?
- Systemverhalten? Stabilität?

?



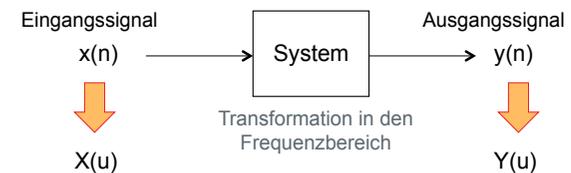
Inhalt

Signalverarbeitung

- Faltung
- FIR-Filter
- IIR-Filter
- Übertragungsfunktion

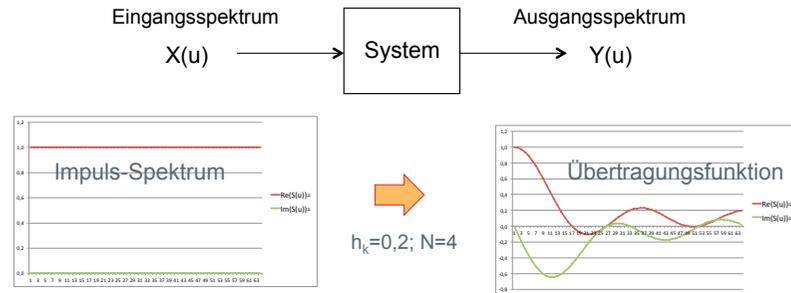
Übertragungsfunktion

Definition

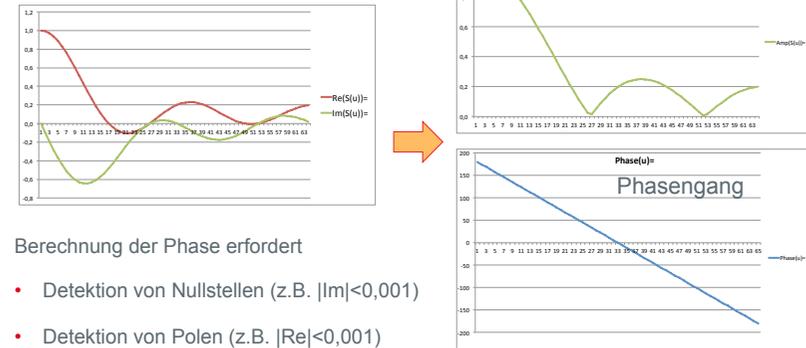


- Übertragungsfunktion: $H(u) = Y(u) / X(u)$
- Wahl des Eingangssignals:
 - Impuls: $X(u)$, $Y(u)$, $H(u)$?
 - Signal mit variabler Frequenz f ?

Beispiel: $x(n) = \delta(0)$ (Impuls)



Betrag und Phase

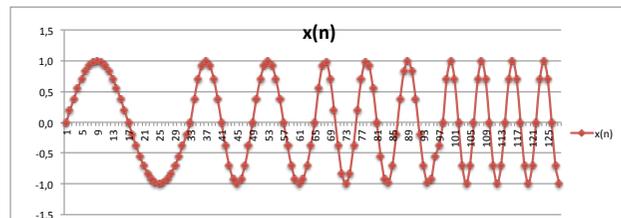


Berechnung der Phase erfordert

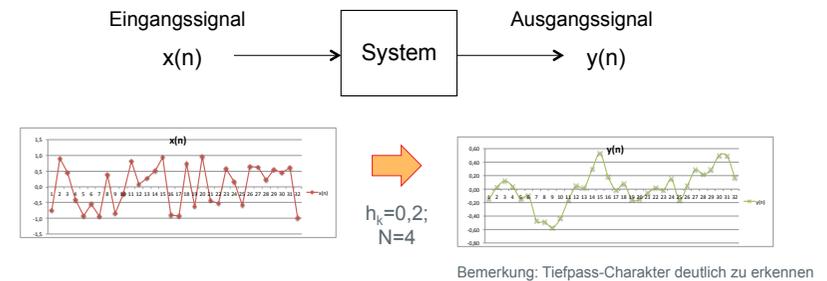
- Detektion von Nullstellen (z.B. $|Im| < 0,001$)
- Detektion von Polen (z.B. $|Re| < 0,001$)
- Detektion von Sprüngen ($\arctan \phi$)

Beispiel: $x(n) = \sin(2\pi f t + \phi_0)$ mit steigender Frequenz

- Ausmessen des Frequenzgangs mit diskreten Messpunkten $f_i \Rightarrow S(f_i)$, (am einfachsten nach Betrag und Phase abzulesen)
- Bzw. automatisiertes Testsignal (Sinus-Sweep, mit gleicher Dauer pro Frequenz zur korrekten Skalierung der Amplitude)

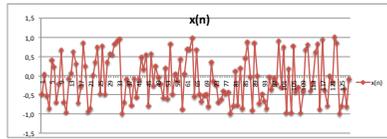


Beispiel: $x(n) =$ Rauschen (Zufallszahlen) – Zeitbereich

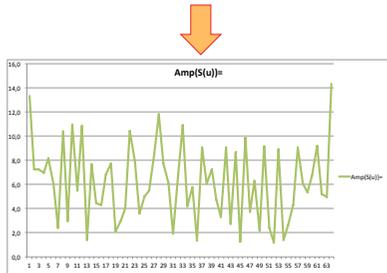


Bemerkung: Tiefpass-Charakter deutlich zu erkennen

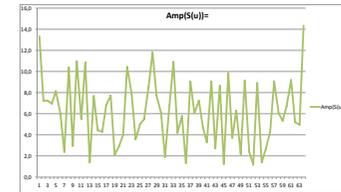
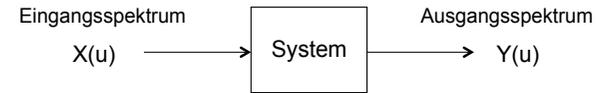
Beispiel: $x(n)$ = Rauschen – Spektrum des Eingangssignals



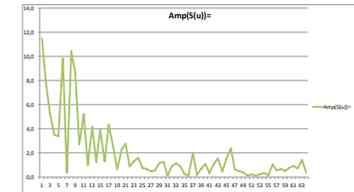
- Breitbandiges Spektrum
- Repräsentiert Leistung des Eingangssignals
- Zur Messung des Amplitudengangs geeignet (durch Mittelung mehrerer Messungen)



Beispiel: $x(n)$ = Rauschen – Frequenzbereich



$h_k = 0,2;$
 $N = 4$



Bemerkung: einzelne Messung (Berechnung)



Ü3.4

ENDE Teil 3

Kommunikationstechnik B Teil 4 – Informationstheorie

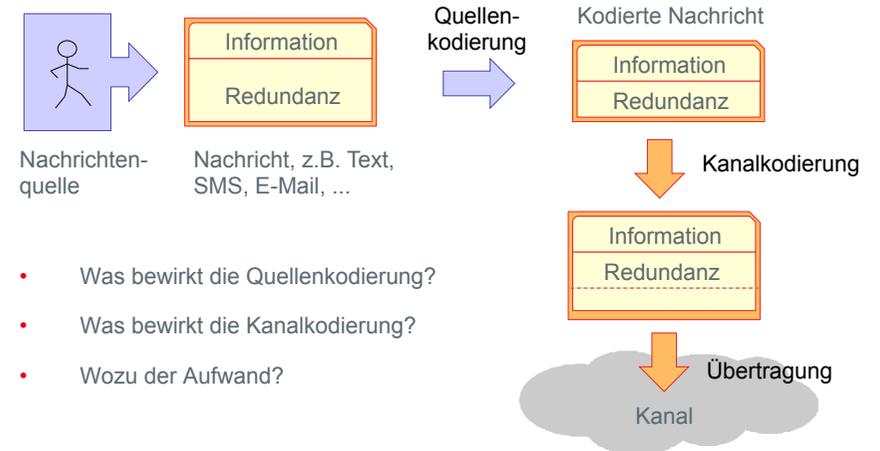
Stephan Rupp
Nachrichtentechnik

www.dhbw-stuttgart.de

Informationstheorie

- Einführung
- Information und Wahrscheinlichkeit
- Entropie
- Entscheidungsgehalt
- Redundanz

Quellenkodierung und Kanalkodierung



- Was bewirkt die Quellenkodierung?
- Was bewirkt die Kanalkodierung?
- Wozu der Aufwand?

Informationstheorie

- Einführung
- Information und Wahrscheinlichkeit
- Entropie
- Entscheidungsgehalt
- Redundanz

Würfelexperiment



- Beispiel:
- fairer Würfel $p_{x_i} = 1/6$,
 - 2 Würfe: $p_{x_i, x_j} = p_i * p_j = 1/36$
 - allgemein: $p_{x_i, x_j} = p_{x_i} * p_{x_j}$

Ideen:

(1) Zufallsexperiment löst Ungewissheit auf, liefert also Information, d.h. $I_{x_i} \sim 1/p_{x_i}$

(2) Information bei 2 Würfeln: $I_{x_1, x_2} = I_{x_1} + I_{x_2}$

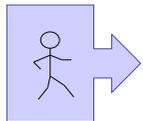
Information eines Zeichens

- Definition: $I_{x_i} = \text{Id}(1/p_{x_i}) = -\text{Id}(p_{x_i})$
- Masseinheit: bit
- Beispiele:
 - binäres Zeichen $X=\{0, 1\}$: $p_{x_i} = 2^{-1} \Rightarrow \text{Information} = 1 \text{ bit}$
 - hexadezimaler Zeichen: ?
 - dezimaler Zeichen?
 - Würfel?
 - Zeichen im BDC-Format?

Informationstheorie

- Einführung
- Information und Wahrscheinlichkeit
- **Entropie**
- Entscheidungsgehalt
- Redundanz

Informationsgehalt einer Zeichenquelle



Zeichenquelle

Beispiel:

Zeichenvorrat: $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$

Wahrscheinlichkeiten: $p_{x_1}, p_{x_2}, p_{x_3}, p_{x_4}, p_{x_5}, p_{x_6}$

Definition: Entropie $H(X) = \sum p_i I_i = -\sum p_i \text{Id}(p_i)$

- Informationsgehalt der Quelle =
- Information aller Zeichen
- gewichtet mit deren Wahrscheinlichkeit

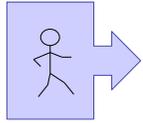


Ü4.6 -.12

Informationstheorie

- Einführung
- Information und Wahrscheinlichkeit
- Entropie
- **Entscheidungsgehalt**
- Redundanz

Wann ist die Entropie einer Quelle maximal?



Zeichenquelle

Beispiel:

Zeichenvorrat: $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$

Wahrscheinlichkeiten: $p_{x1}, p_{x2}, p_{x3}, p_{x4}, p_{x5}, p_{x6}$

Definition: Entscheidungsgehalt $H_0 =$ maximale Entropie

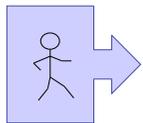
Beispiele:

- fairer Würfel $p_{xi} = 1/6$: $H_0 = ?$
- Quelle mit 10 Zeichen?

Informationstheorie

- Einführung
- Information und Wahrscheinlichkeit
- Entropie
- Entscheidungsgehalt
- **Redundanz**

Die Differenz zwischen Entscheidungsgehalt und Entropie



Nachrichtenquelle



Nachricht, z.B. Text, SMS, E-Mail, ...

Definition: Redundanz = $H_0 - H(X)$



Ü4.15 -.18

ENDE Teil 4