

5-PAM

Inhalt der Nachrichtentechnik

Teil 2: Digitale Basisband-Signalverarbeitung

5 Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.1 Ideale Signalabtastung und Pulsamplitudenmodulation

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals und Zeitmultiplex

5.3 Pulsdauer- und Pulswinkelmodulation

5.3.1 Pulsdauermodulation

5.3.2 Pulswinkelmodulation

6 Pulsmodulation (A/D-Wandlung)

6.1 Erzeugung der Pulsmodulation

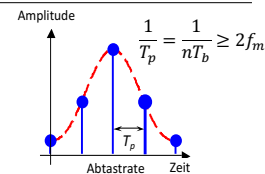
6.2 Analog/Digital-Wandlung mit linearer Quantisierung

6.2.1 Erforderliche Bandbreite zur Übertragung

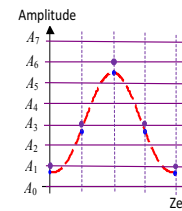
6.2.2 Quantisierungsparameter

6.2.4 Verfahren zur Analog/Digital-Wandlung

6.3 Nichtlineare Quantisierung



PAM-Signal: Amplitudenwert kontinuierlich, aber Zeit diskret



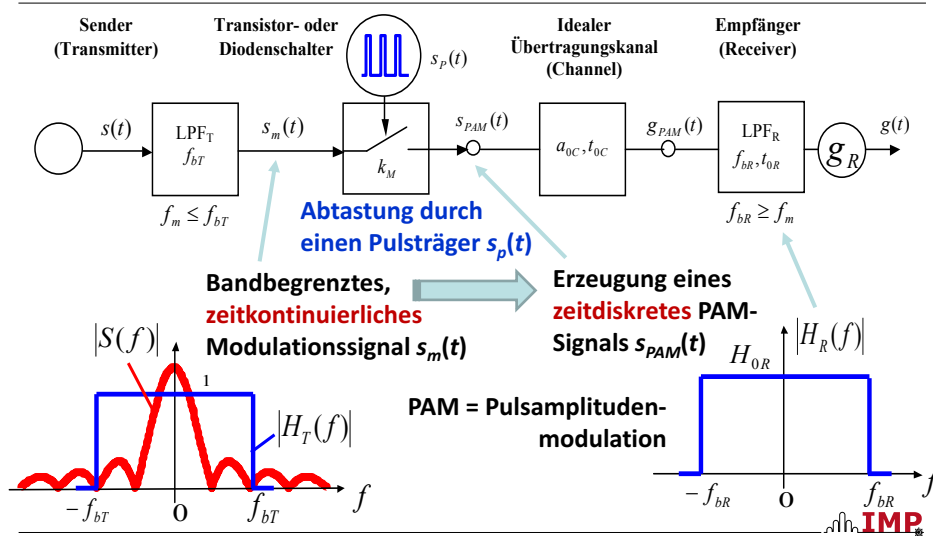
Werte- & Zeit-diskretes Signal
 $N = 2^n$ Quantisierungsstufen

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

1

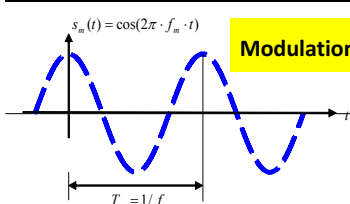
5 Abtastung eines bandbegrenzten Signals

Erzeugung & Übertragung zeitdiskreter Signale



11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

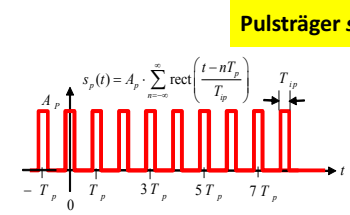
2



Modulationssignals $s_m(t)$

$s_m(t) = \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)$

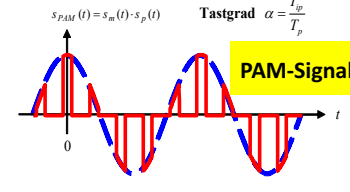
$T_m = 1/f_m$



Pulsträger $s_p(t)$

$s_p(t) = A_p \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t - nT_p}{T_p}\right)$

T_p



PAM-Signal $s_{PAM}(t)$

$s_{PAM}(t) = s_m(t) \cdot s_p(t)$


Tastgrad $\alpha = \frac{T_p}{T_m}$

Beispiel: Abtastung eines kosinusförmigen Modulationssignal $s_m(t)$

$T_{ip} \neq 0$ Reale Signalabtastung

1. Verlaufsabtastung
2. Momentanwertabtastung

→ Kurze Erklärung an 2 Folien




3

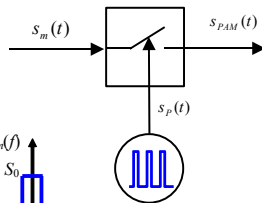
11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

Reale Pulsamplitudenmodulation

1. Verlaufsabtastung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

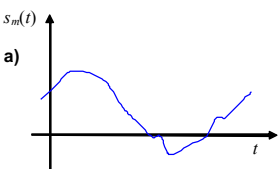


$s_{PAM}(t) = s_m(t) \cdot s_p(t)$

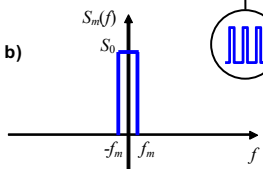
FT

$S_{PAM}(f) = S_m(f) * S_p(f)$

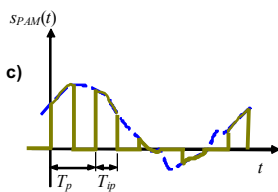
a)



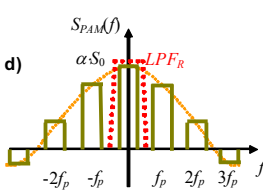
b)




c)



d)



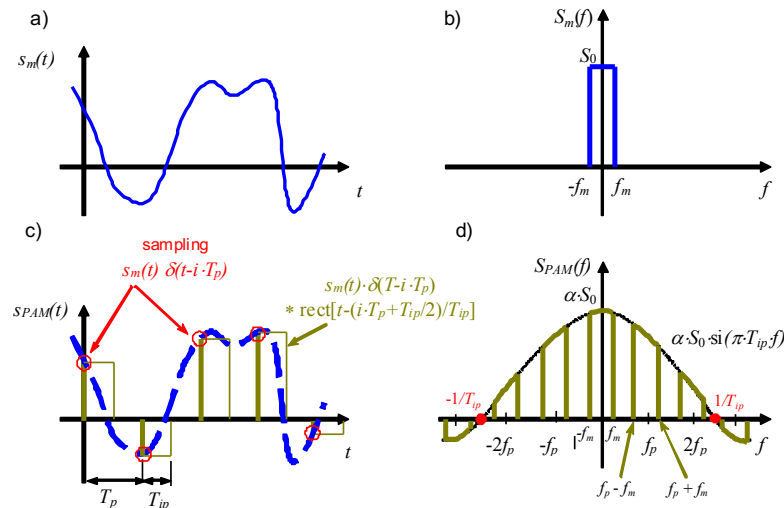


4

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

Reale Pulsamplitudenmodulation

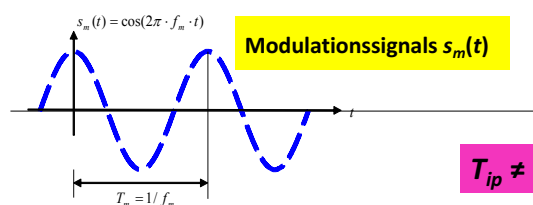
2. Momentanwertabtastung (sample & hold)



11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakoby



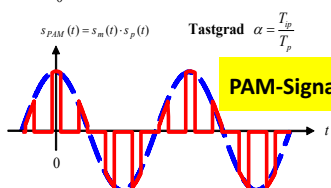
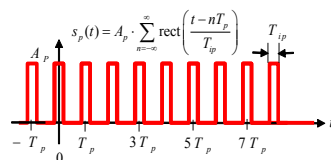
5



Modulationssignals $s_m(t)$

**Beispiel: Abtastung eines
kosinusförmigen
Modulationssignals $s_m(t)$**

Pulsträger $s_p(t)$



PAM-Signal $s_{PAM}(t)$

Tastgrad $\alpha = \frac{T_p}{T_{ip}}$

$T_{ip} \neq 0$ Reale Signalabtastung

1. Verlaufsabtastung
2. Momentanwertabtastung

→ Kurze Erklärung an 2 Folien

→ **Mathematik siehe Anhang**

Mathematisch recht aufwendig!

**Bringt keinen Mehrwert für das
physikalische Verständnis!**



11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakoby

6

Inhalt der Nachrichtentechnik

Teil 2: Digitale Basisband-Signalverarbeitung

5 Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.1 Ideale Signalabtastung und Pulsamplitudenmodulation

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals

5.3 Pulsdauer- und Pulswinkelmodulation

5.3.1 Pulsdauermodulation

5.3.2 Pulswinkelmodulation

6 Pulscodemodulation (A/D-Wandlung)

6.1 Erzeugung der Pulscodemodulation

6.2 Analog/Digital-Wandlung mit linearer Quantisierung

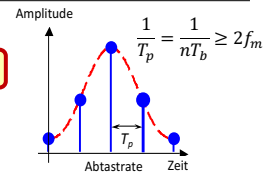
6.2.1 Erforderliche Bandbreite zur Übertragung

6.2.2 Quantisierungsparameter

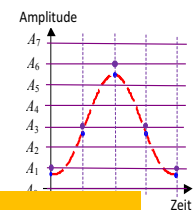
Motivation:

- Einführung in die Signalabtastung → zeitdiskrete PAM-Signale
- Vertiefung und Erweiterung in weiterführenden Lehrveranstaltungen

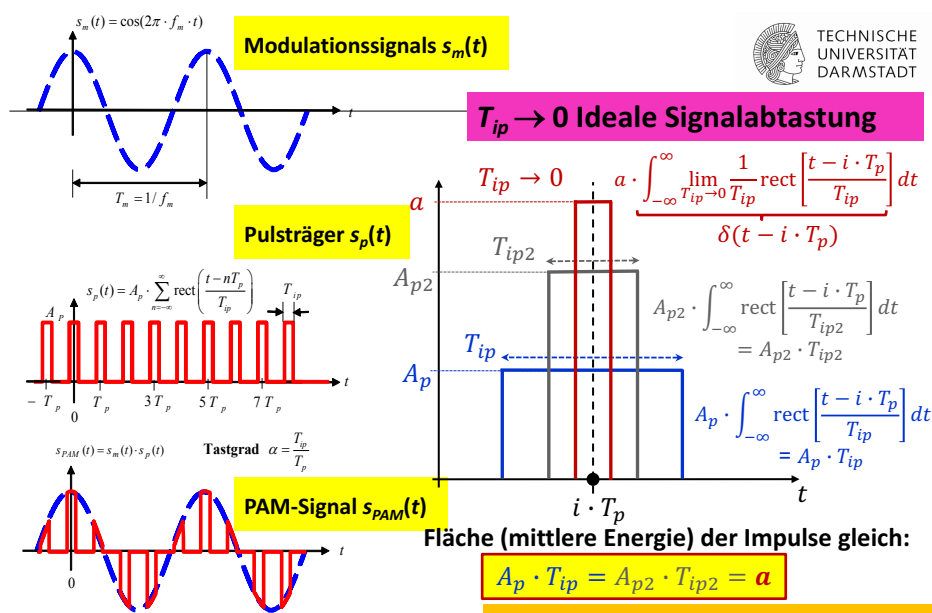
11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob



PAM-Signal: Amplitudenwert kontinuierlich, aber Zeit diskret



es Signal
gsstufen
IMP



11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik

Ausblendeigenschaft des Dirac-Impulses
→ einfache mathematische Behandlung

5.1 Ideale Signalabtastung

$T_i \rightarrow 0$

Dirac-Impulsfolge
Dirac-Kamm

Idealer (unendlich schneller)
Transistor- oder Diodenschalter

Ausblendeigenschaft des Dirac-Impulses
→ einfache mathematische Behandlung

$s_m(t)$

$s_{PAM}(t)$

Proben aus $s_m(t)$
zu äquidistanten
Zeitpunkten

Dirac-Impulsfolge

$\delta_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i \cdot T_p)$

$s_{PAM}(t) = s_m(t) \cdot \delta_k(t)$

$$s_{PAM}(t) = \frac{1}{k_M} s_m(t) \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i \cdot T_p)$$

$$= \frac{A_p \cdot T_{ip}}{k_M} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} s_m(i \cdot T_p) \cdot \delta(t - i \cdot T_p)$$

$\delta_k(t) = \text{Dirac-Stoßfolge}$
 $\text{oder Dirac-Kamm [Lücke]}$

IMP

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

5.1 Ideale Signalabtastung

$T_i \rightarrow 0$

Spektrum des Dirac-Kamm (Abtaster)

Fourier-Transformierten der periodischen Zeitfunktion (Fourier-Reihenentwicklung) des Abtasters $s_p(t)$ unter Berücksichtigung von $f_p = 1/T_p$.

Zeitbereich

Frequenzbereich

$$s_p(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i \cdot T_p)$$

Dirac-Kamm im Zeitbereich

$$S_P(f) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i \cdot \delta(f - i \cdot f_p)$$

Dirac-Kamm im Frequenzbereich

mit $c_i = \frac{1}{T_p} \cdot \int_{-T_p/2}^{T_p/2} s_p(t) e^{-j \cdot 2\pi f_p t} dt = \frac{1}{T_p} \cdot \int_{-T_p/2}^{T_p/2} \delta(t) e^{-j \cdot 2\pi f_p t} dt = \frac{1}{T_p}$

Fourier-Transformation

$$S_P(f) = \frac{1}{T_p} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{i}{T_p}\right)$$

IMP

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

5.1 Ideale Signalabtastung

Spektrum des PAM-Signals (nach Abtaster)

$T_i \rightarrow 0$

$$s_{PAM}(t) = \frac{1}{k_M} s_m(t) \cdot A_p \cdot T_{ip} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i \cdot T_p)$$

Zeitbereich

$$= \underbrace{\frac{A_p \cdot T_{ip}}{k_M}}_{k_p} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} s_m(i \cdot T_p) \cdot \delta(t - i \cdot T_p) \quad \text{PAM-Signals}$$

Frequenzbereich

$$S_{PAM}(f) = \underbrace{\frac{A_p \cdot T_{ip}}{k_M}}_{k_p} \cdot S_m(f) * \frac{1}{T_p} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{i}{T_p}\right) = \underbrace{\frac{A_p \cdot T_{ip}}{k_M \cdot T_p}}_{k_p/T_p} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} S_m\left(f - \frac{i}{T_p}\right)$$

Was bedeutet dieses Ergebnis?

Die Fouriertransformierte $S_{PAM}(f)$ des abgetasteten Signals ist das **Faltungsprodukt** des Signalspektrums $S_m(f)$ mit der Dirac-Stoßfolge im Frequenzbereich

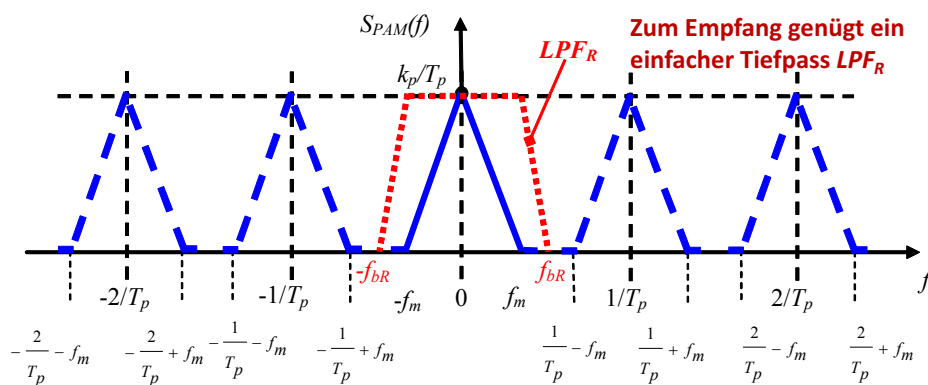
⇒ **Signalspektrum $S_m(f)$ wird periodisch mit $f_p = 1/T_p$ wiederholt.**

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

11

Abtasttheorem

$$S_{PAM}(f) = \frac{k_p}{T_p} \sum_{i=-\infty}^{\infty} S_m\left(f - \frac{i}{T_p}\right)$$



Um Überlappung der wiederholenden Signalspektren (Aliasing, Signalverzerrungen) zu vermeiden

$$\frac{1}{T_p} \geq 2 \cdot f_m$$

Abtasttheorem

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

12

5-PAM

Inhalt der Nachrichtentechnik

Teil 2: Digitale Basisband-Signalverarbeitung

5 Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.1 Ideale Signalabtastung und Pulsamplitudenmodulation

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals und Zeitmultiplex

5.3 Pulsdauer- und Pulswinkelmodulation

5.3.1 Pulsdauermodulation

5.3.2 Pulswinkelmodulation

6 Pulscodemodulation (A/D-Wandlung)

6.1 Erzeugung der Pulscodemodulation

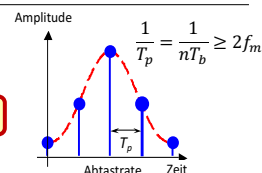
6.2 Analog/Digital-Wandlung mit linearer Quantisierung

6.2.1 Erforderliche Bandbreite zur Übertragung

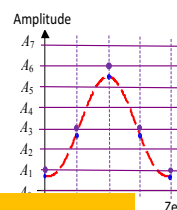
6.2.2 Quantisierungsparameter

Motivation:

- Einführung in die Signalabtastung → zeitdiskrete PAM-Signale
- Vertiefung und Erweiterung in weiterführenden Lehrveranstaltungen



PAM-Signal: Amplitudenwert kontinuierlich, aber Zeit diskret



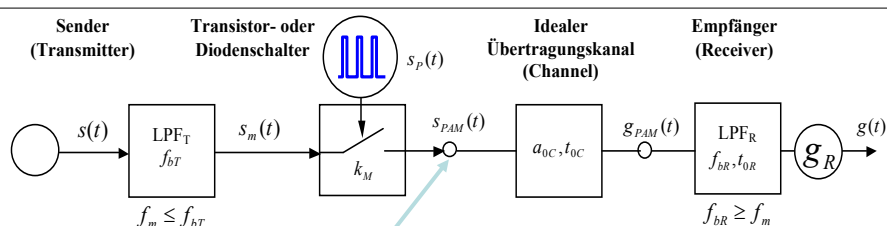
IMP

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

13

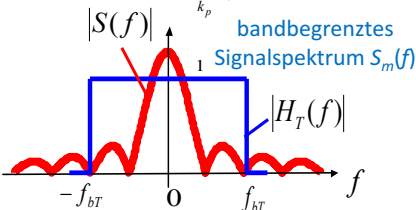
Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals



$$s_{PAM}(t) = \frac{A_p T_p}{k_M} \sum_{i=-\infty}^{\infty} s_m(iT_p) \cdot \delta(t - iT_p)$$

PAM-Signal (nach Abtaster)
vor der Kanalübertragung



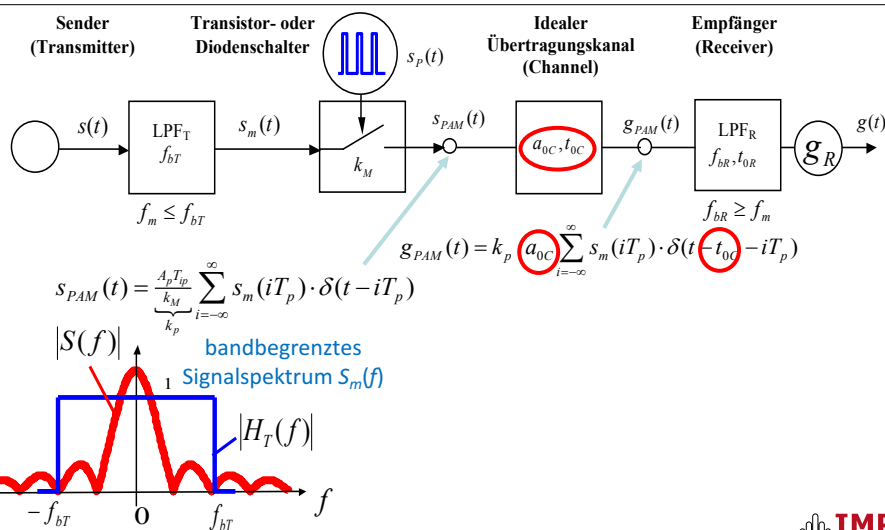
IMP

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

14

Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals

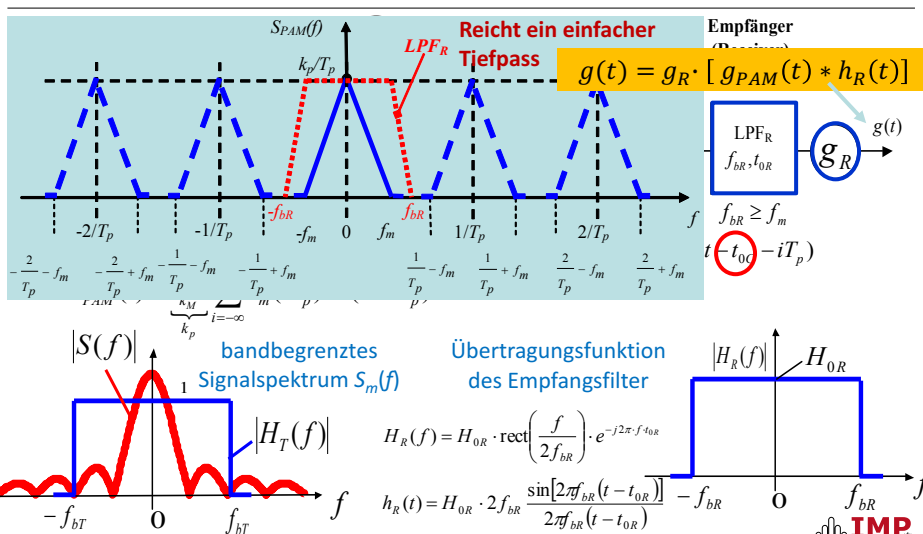


11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

15

Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals

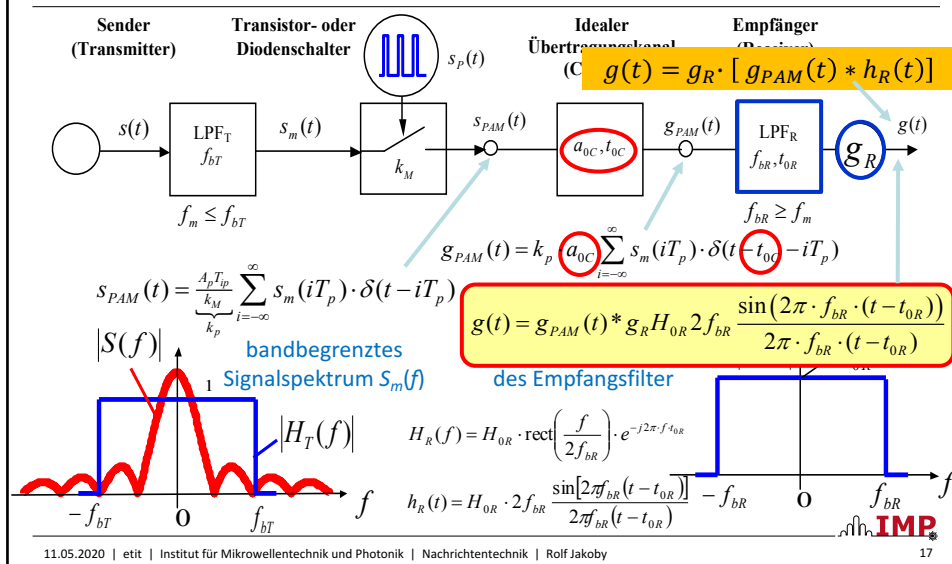


11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakob

16

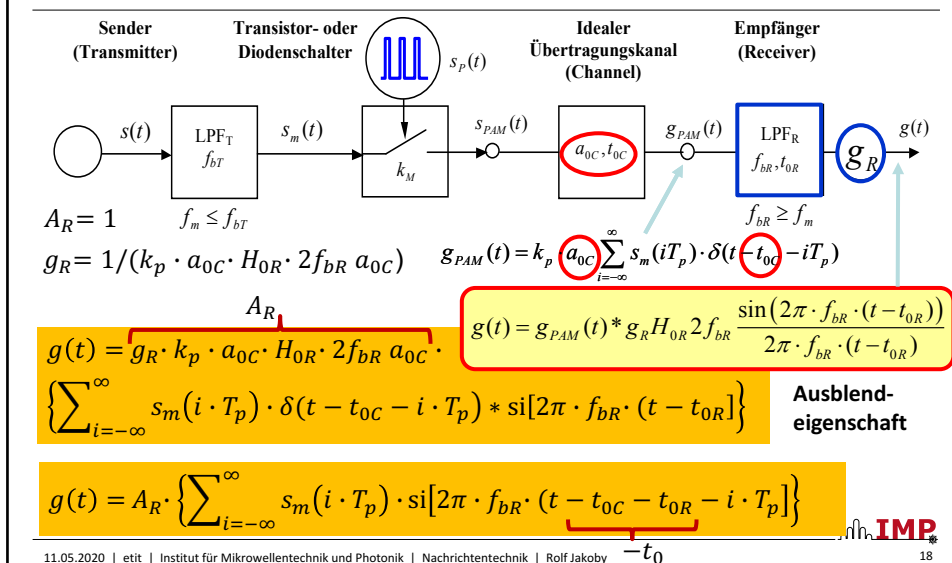
Abtastung eines bandbegrenzten Signals

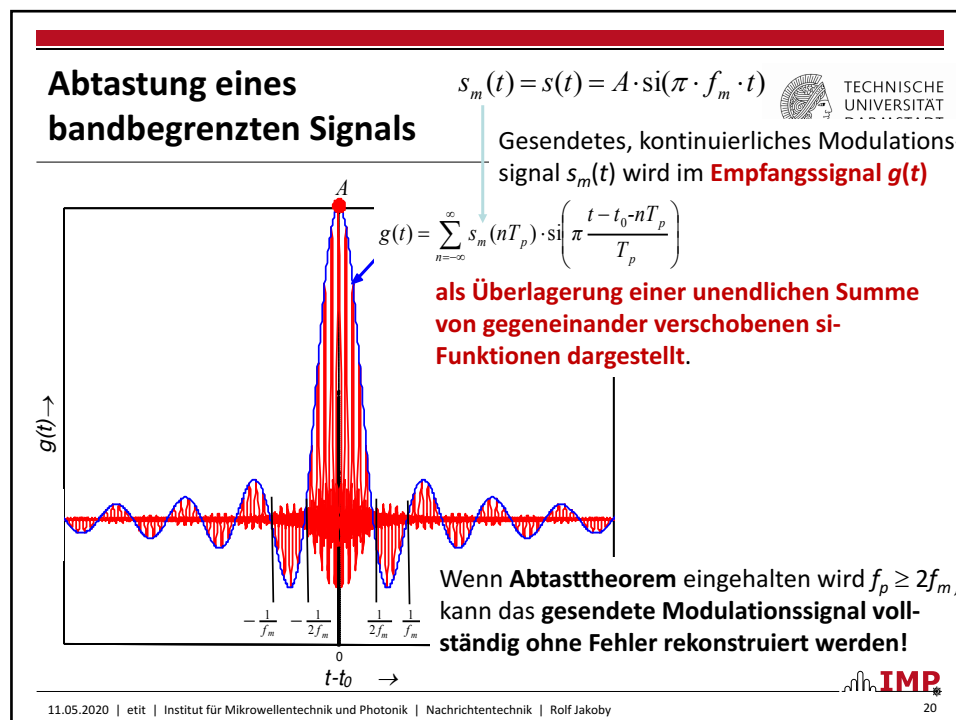
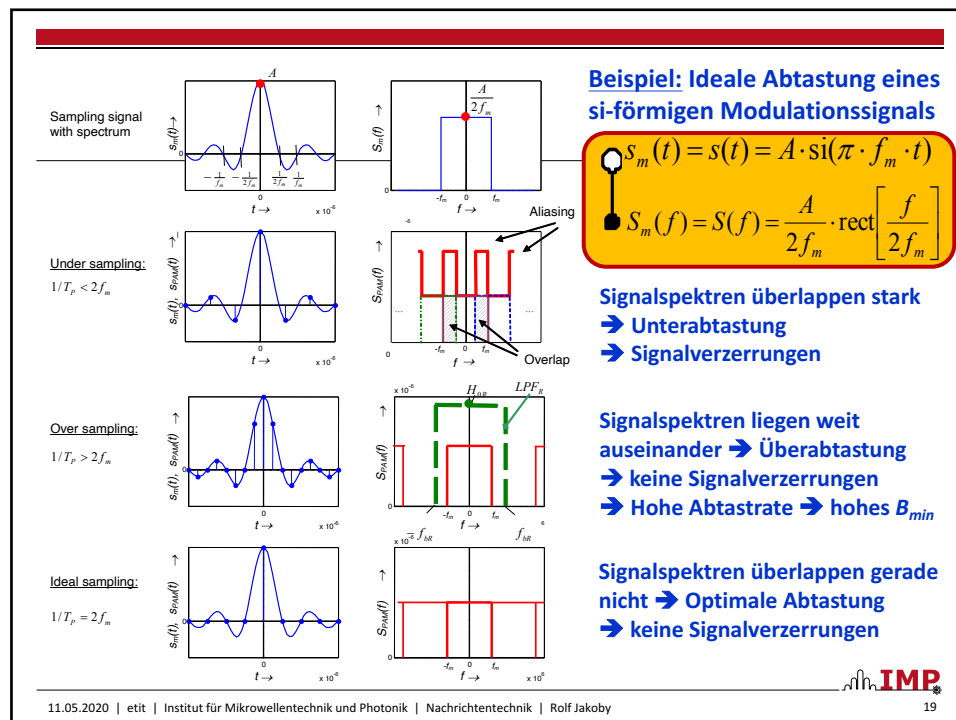
5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals



Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals





5-PAM

Inhalt der Nachrichtentechnik

Teil 2: Digitale Basisband-Signalverarbeitung



5 Abtastung eines bandbegrenzten Signals

5.1 Ideale Signalabtastung und Pulsamplitudenmodulation

5.2 Rückgewinnung des abgetasteten Signals und Zeitmultiplex

5.3 Pulsdauer- und Pulswinkelmodulation

5.3.1 Pulsdauermodulation

5.3.2 Pulswinkelmodulation

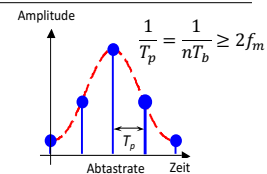
6 Pulsmodulation (A/D-Wandlung)

6.1 Erzeugung der Pulsmodulation

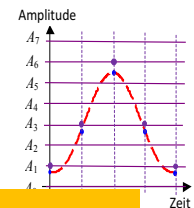
6.2 Analog/Digital-Wandlung mit linearer Quantisierung

6.2.1 Erforderliche Bandbreite zur Übertragung

6.2.2 Quantisierungsparameter



PAM-Signal: Amplitudenwert kontinuierlich, aber Zeit diskret



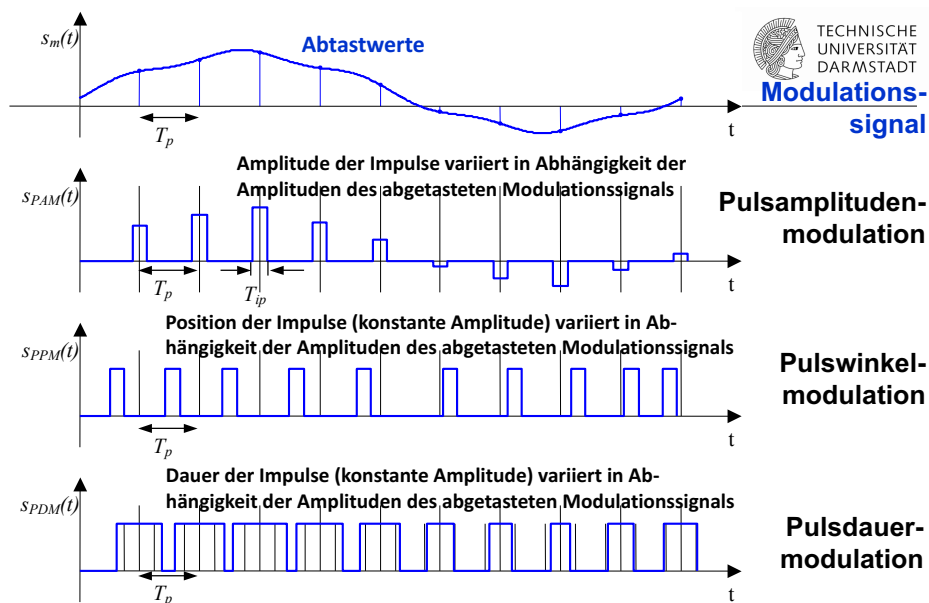
es Signal
sstufen
IMP

Motivation:

- Einführung in die Signalabtastung → zeitdiskrete PAM-Signale
- Vertiefung und Erweiterung in weiterführenden Lehrveranstaltungen

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakoby

21

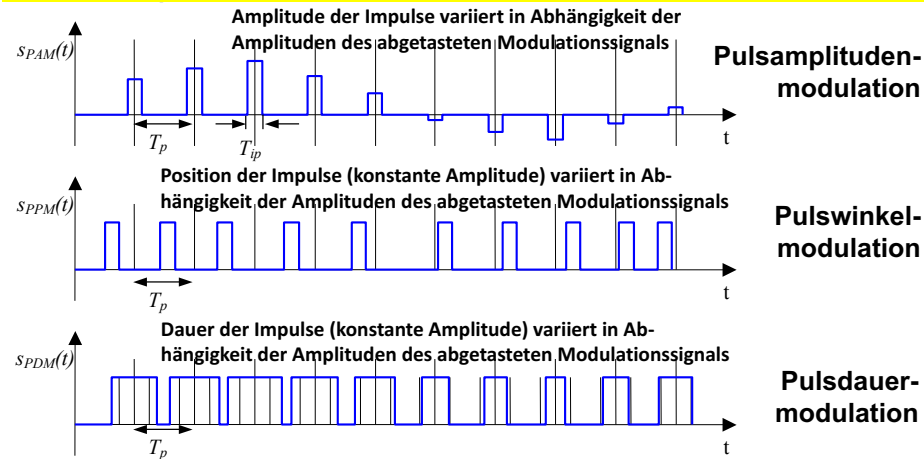


11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakoby

22

Amplitudenmodulation allgemein, damit auch PAM, störanfälliger als PPM & PDM

- **PAM in der Kommunikationstechnik nur Vorstufe für PCM**
- **Einsatz von PPM & PDM in der Automatisierungs- & Energietechnik (Leistungselektronik)**



11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakoby

IMP

23

Danke für die Aufmerksamkeit

Technische Universität Darmstadt (TUD)

Mikrowellentechnik (MWT) • Microwave Engineering Lab

Institut für Mikrowellentechnik und Photonik (IMP)

Merckstrasse 25, 64283 Darmstadt, Tel.: +49 6151-16-28460, E-Mail: jakoby@imp.tu-darmstadt.de



IMP

11.05.2020 | etit | Institut für Mikrowellentechnik und Photonik | Nachrichtentechnik | Rolf Jakoby

24