

ITG-Workshop 5.3.1  
„Optische Kommunikationssysteme – offline to realtime“

# Kompensation der nichtlinearen Kennlinie des externen Modulators für optische OFDM-Echtzeit-Systeme

David Rörich<sup>1</sup>, Michael Bernhard<sup>1</sup>, Markus Grözing<sup>2</sup>, Thomas Veigel<sup>2</sup>,  
Joachim Speidel<sup>1</sup>

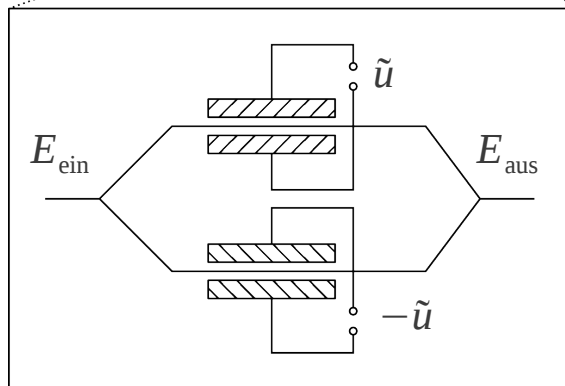
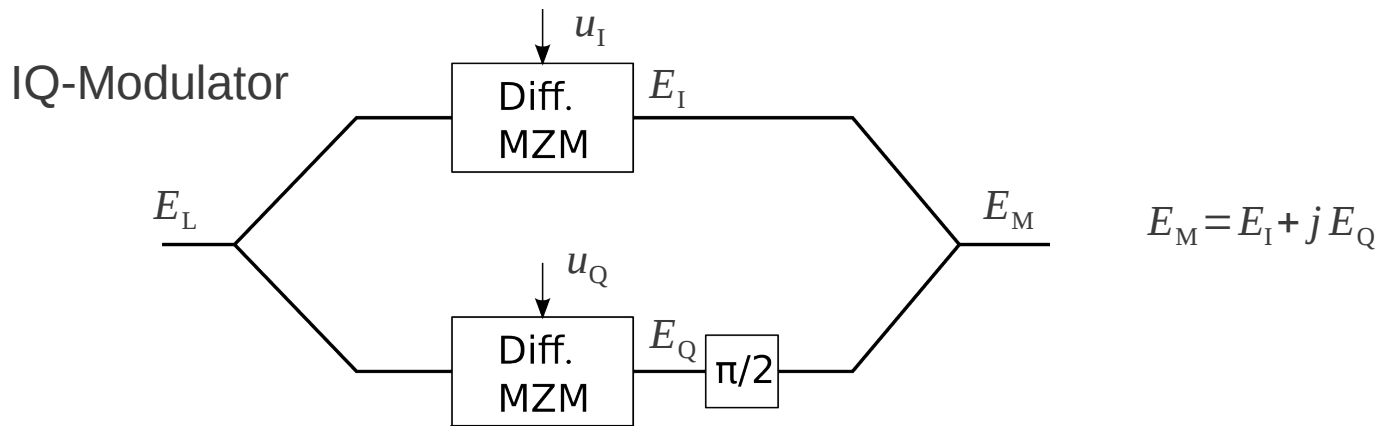
15.02.2013

## Übersicht

- **Modulatorkennlinie**
- Systemmodell
- Einfluss der nicht-linearen Modulatorkennlinie
- Kompensation durch Vorverzerrung
  - ♦ Theoretisch erreichbarer Gewinn
  - ♦ Umsetzung mit Taylor-Reihe
  - ♦ Einfluss von Quantisierungseffekten bei Festkommaberechnung

# Modulatorkennlinie

Verschachtelte Mach-Zehnder-Modulatoren (MZM) als IQ-Modulator



$$E_{\text{aus}} = \frac{1}{2} \left( \exp(j \frac{\pi \tilde{u}}{U_\pi}) + \exp(-j \frac{\pi \tilde{u}}{U_\pi}) \right) E_{\text{ein}}$$

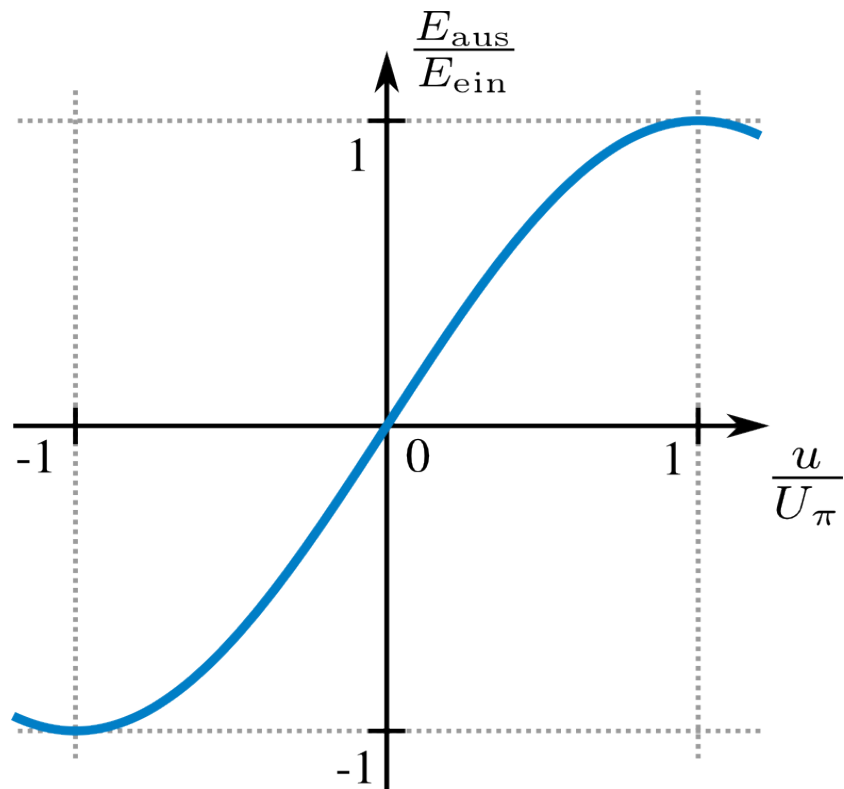
$$E_{\text{aus}} = \cos\left(\frac{\pi \tilde{u}}{U_\pi}\right) E_{\text{ein}} \quad \text{mit} \quad \tilde{u} = \frac{u}{2} - \frac{U_\pi}{2}$$

$$\frac{E_{\text{aus}}}{E_{\text{ein}}} = \sin\left(\frac{u}{U_\pi} \frac{\pi}{2}\right)$$

OFDM-Datensignal

# Modulatorkennlinie

Modulationsindex und Modulationsverlust



Definition Modulationsindex:

$$m = \pi \frac{u_{eff}}{U_{\pi}}$$

$u_{eff}$  ... Effektivwert des OFDM-Signals (Real-/Imaginärteil)

Definition Modulationsverlust:

$$a_M = P_{aus,0} - P_{aus}$$

$P_{aus,0}$  optische Ausgangsleistung bei Vollaussteuerung in dB

$P_{aus}$  mittl. opt. Ausgangsleistung bei Modulation mit OFDM-Signal in dB

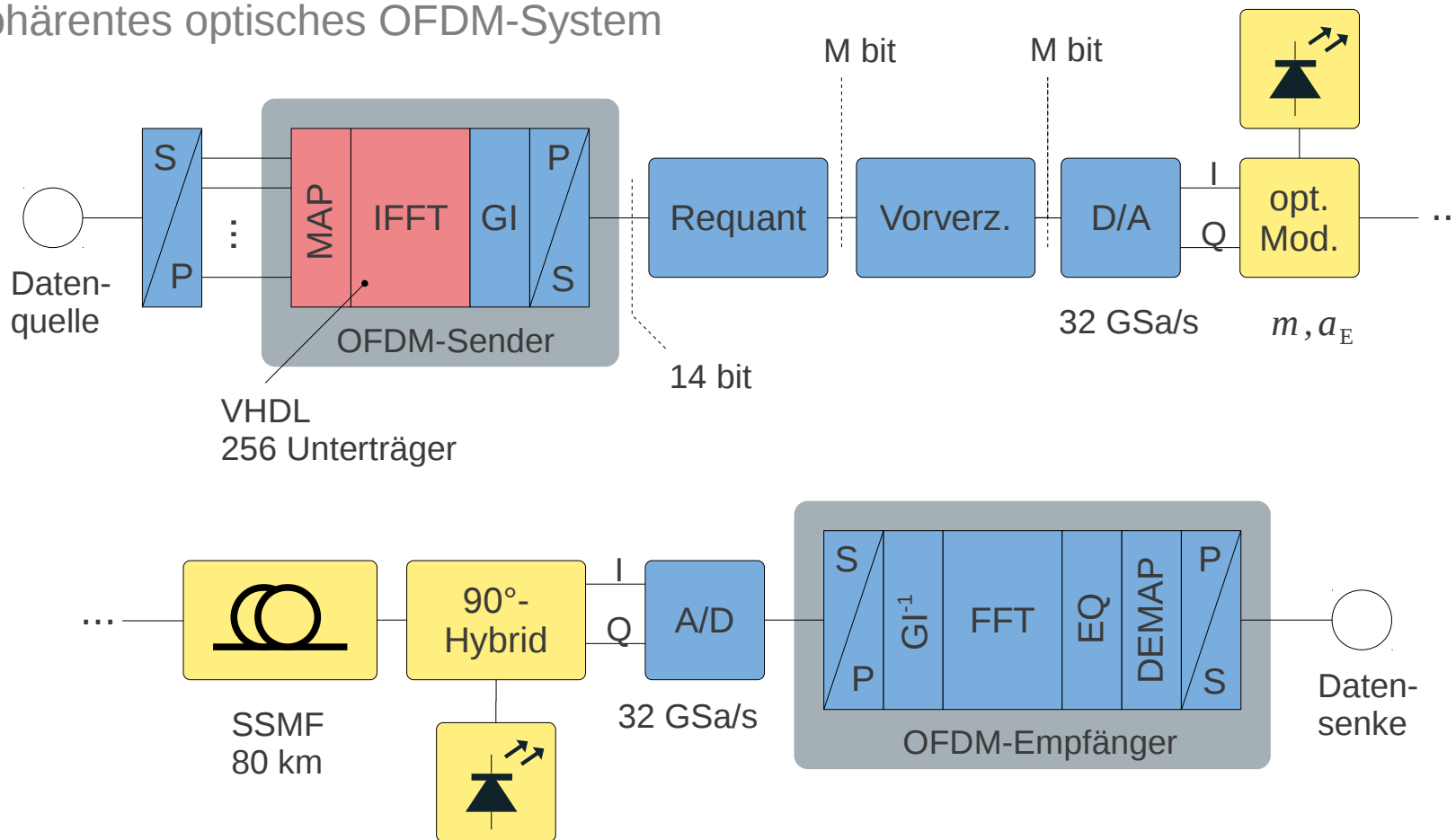
OFDM ist empfindlich gegenüber Nichtlinearitäten

## Übersicht

- Modulator Kennlinie
- **Systemmodell**
- Einfluss der nicht-linearen Modulator Kennlinie
- Kompensation durch Vorverzerrung
  - Theoretisch erreichbarer Gewinn
  - Umsetzung mit Taylor-Reihe
  - Einfluss von Quantisierungseffekten bei Festkommaberechnung

# Systemmodell

Kohärentes optisches OFDM-System

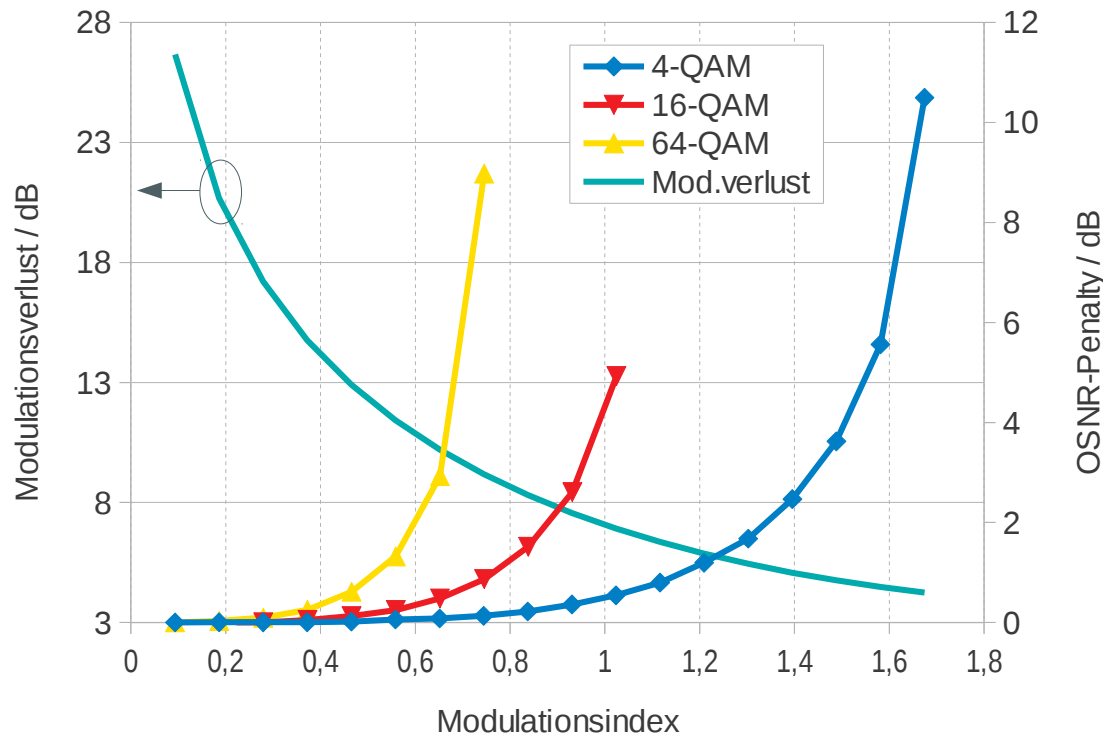


## Übersicht

- Modulator Kennlinie
- Systemmodell
- Einfluss der nicht-linearen Modulator Kennlinie
- Kompensation durch Vorverzerrung
  - Theoretisch erreichbarer Gewinn
  - Umsetzung mit Taylor-Reihe
  - Einfluss von Quantisierungseffekten bei Festkommaberechnung

# Modulatorkennlinie

Auswirkung der Nichtlinearität auf die Systemleistung



Hier noch ohne Quantisierungseffekte

kleiner Modulationsindex:  
 ⇒ geringe Verzerrung  
 ⇒ hoher Modulationsverlust

großer Modulationsindex:  
 ⇒ starke Verzerrung  
 ⇒ geringer Modulationsverlust

Penalty: zusätzliches OSNR, das gegenüber einem System ohne Nichtlinearitäten für BER = 1e-3 benötigt wird

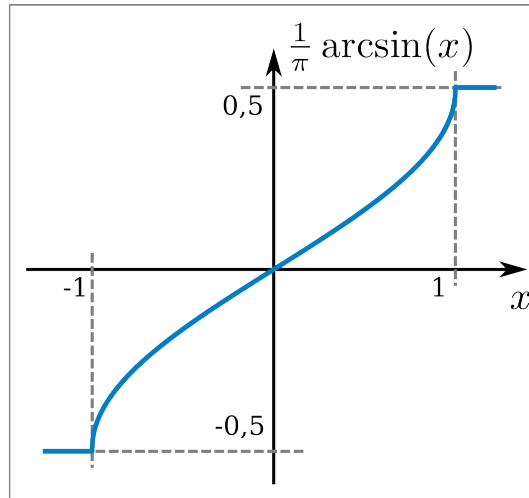


## Übersicht

- Modulator Kennlinie
- Systemmodell
- Einfluss der nicht-linearen Modulator Kennlinie
- **Kompensation durch Vorverzerrung**
  - Theoretisch erreichbarer Gewinn
  - Umsetzung mit Taylor-Reihe
  - Einfluss von Quantisierungseffekten bei Festkommaberechnung

# Vorverzerrung

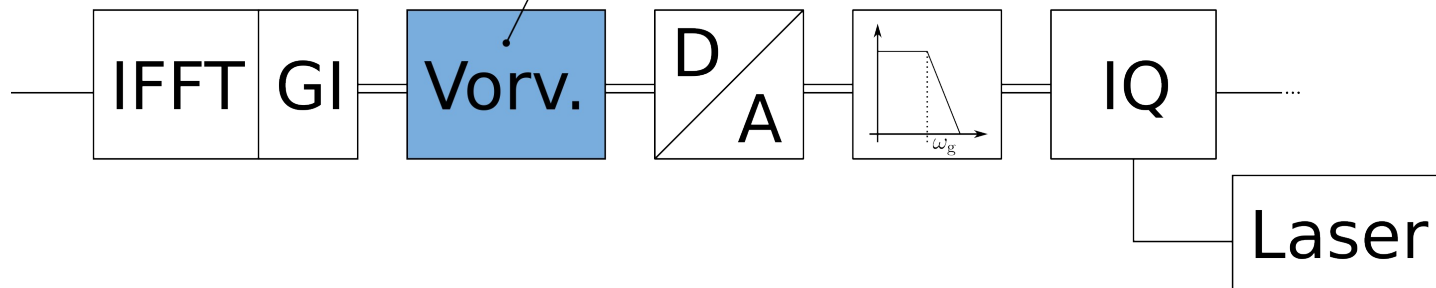
Prinzip der digitalen Vorverzerrung



Inverse Kennlinie zur Kompensation der Modulator Kennlinie

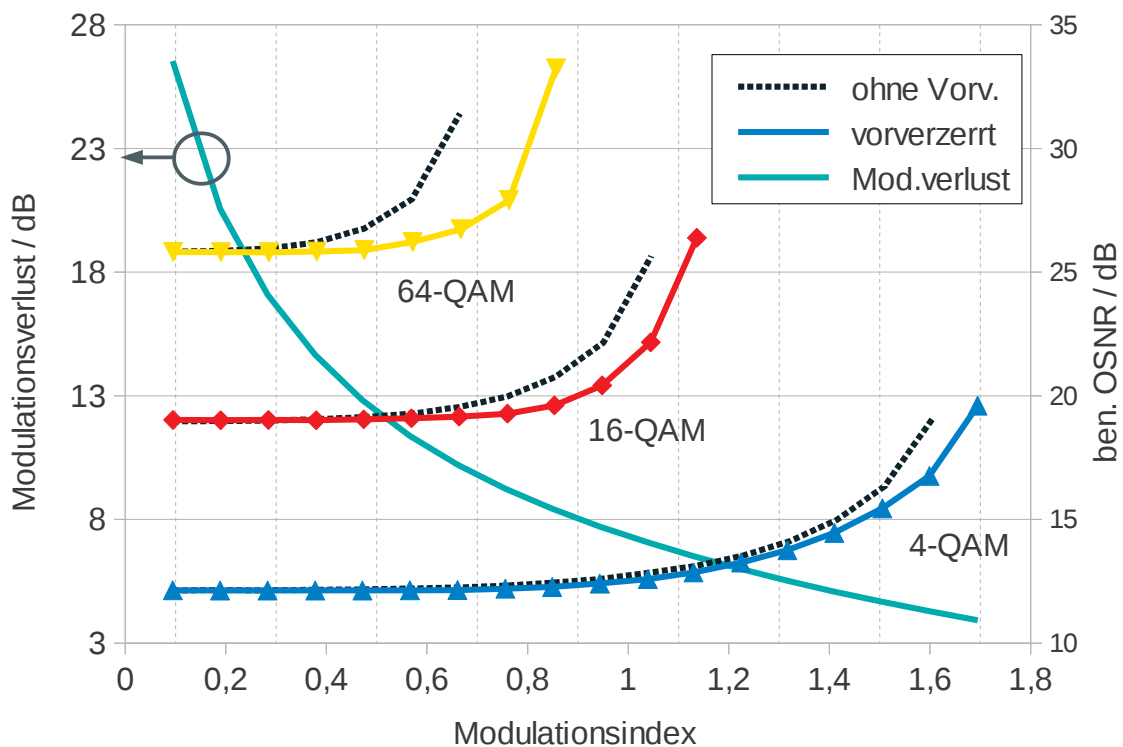
Eingangswerte mit Betrag >1 können nicht sinnvoll vorverzerrt werden

⇒ Verzerrungen können nach wie vor auftreten



# Vorverzerrung

Verringerung des benötigten OSNRs durch Vorverzerrung

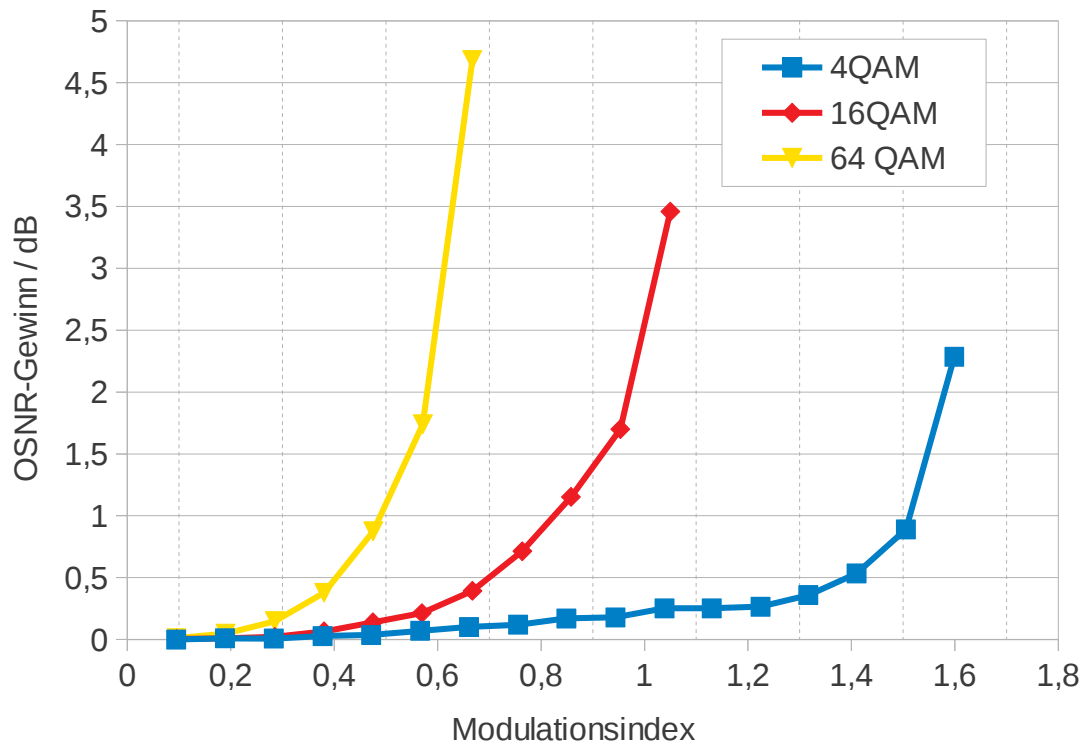


M = 8 bit

benötigtes OSNR für eine Bitfehlerrate (BER) von 1e-3

# Vorverzerrung

Theoretisch erreichbarer Gewinn durch Vorverzerrung



M = 8 bit

Gewinn bezieht sich auf das ben. OSNR für BER = 1e-3 gegenüber dem System ohne Vorverzerrung

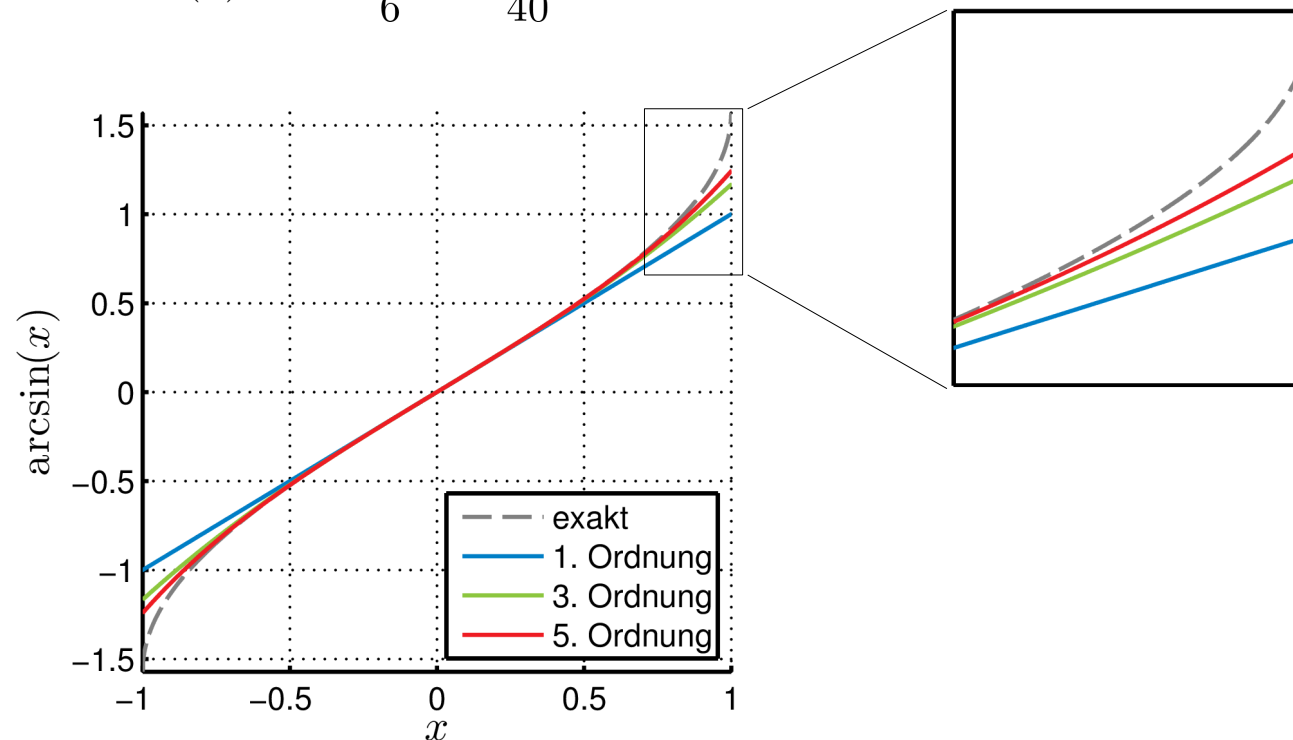
Für höhere Modulationsstufen höherer Gewinn (4,7 dB bei 64-QAM)

Vorverzerrer hier mit Fließkommagenauigkeit - **Wie in HW umsetzen?**

## Taylor-Näherung

Approximation der Kennlinie des Vorverzerrers durch eine Taylor-Reihe

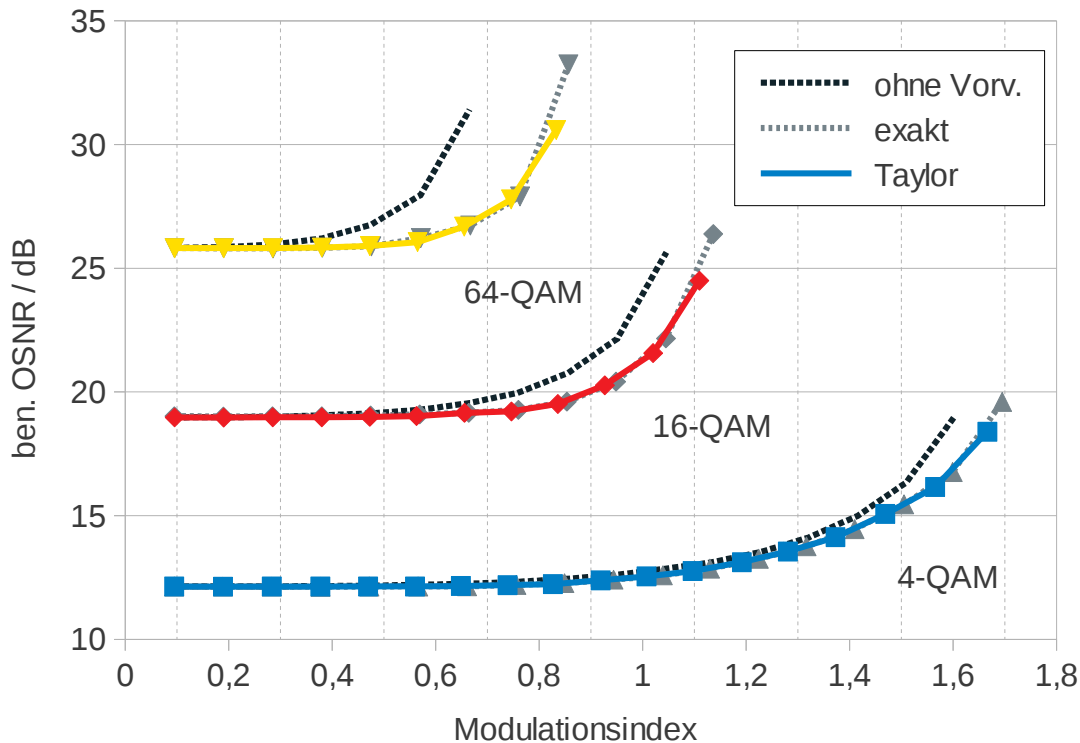
$$\arcsin(x) = x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{3}{40}x^5 + \dots$$



# Vorverzerrung

Vergleich von exakter Vorverzerrung und Taylor-Näherung (1)

M = 8 bit



## Taylor-Näherung 3. Ordnung

Eingang des Vorverzerrers ist quantisiert

Berechnung der Taylor-Näherung mit Fließkommagenauigkeit (double)

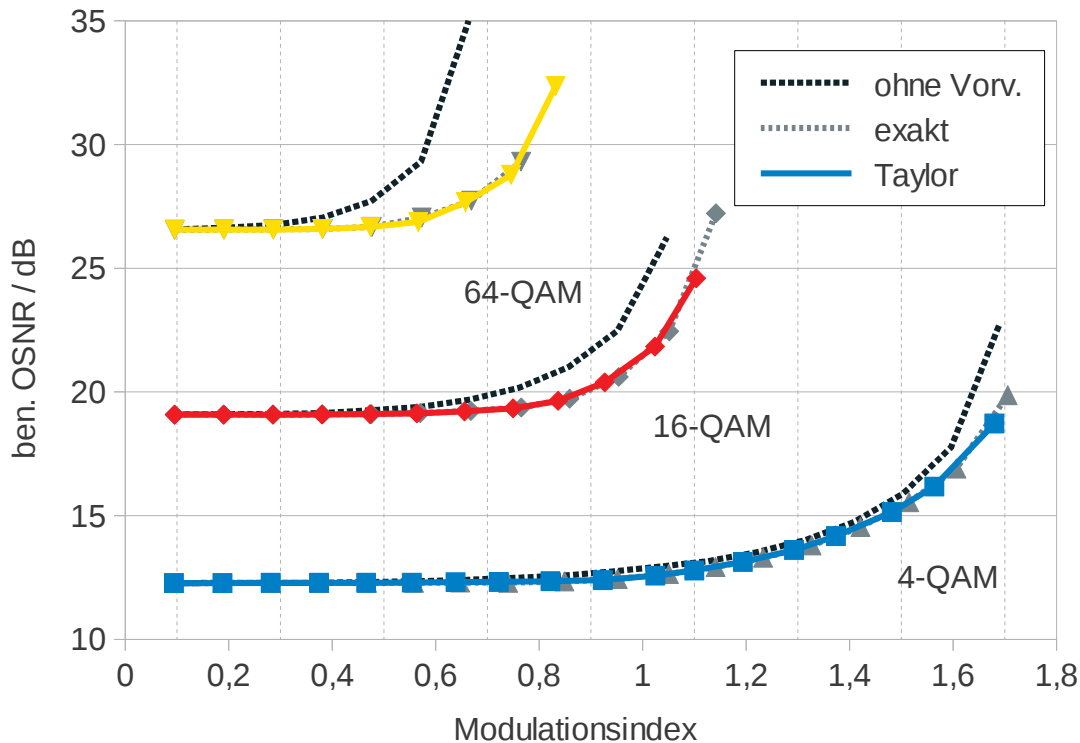
Vorverzerrung mit Taylor-Näherung erzielt gleiche Systemleistung wie exakte Vorverzerrung

Eine höhere Ordnung des Taylor-Polynoms erscheint nicht notwendig

# Vorverzerrung

Vergleich von exakter Vorverzerrung und Taylor-Näherung (2)

M = 6 bit



Taylor-Näherung 3. Ordnung

Eingang des Vorverzerrers ist quantisiert

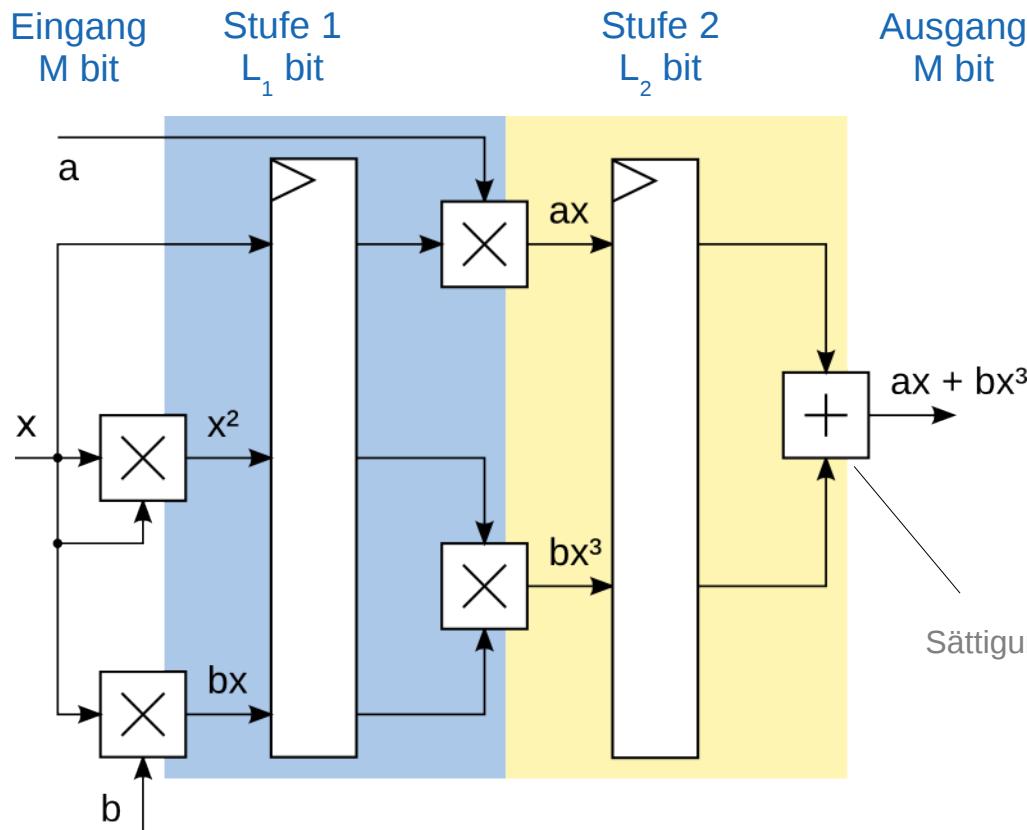
Berechnung der Taylor-Näherung mit Fließkommagenauigkeit (double)

Vorverzerrung mit Taylor-Näherung erzielt gleiche Systemleistung wie exakte Vorverzerrung

Umsetzung der Taylor-Näherung in Hardware?

# Vorverzerrung

## Vorverzerrer-Schaltung mit Festkomma-Berechnung



Taylor-Näherung 3. Ordnung:

$$y = ax + bx^3$$

Koeffizienten  $a$  und  $b$  frei wählbar zur Einstellung des Ausschnitts der Kennlinie

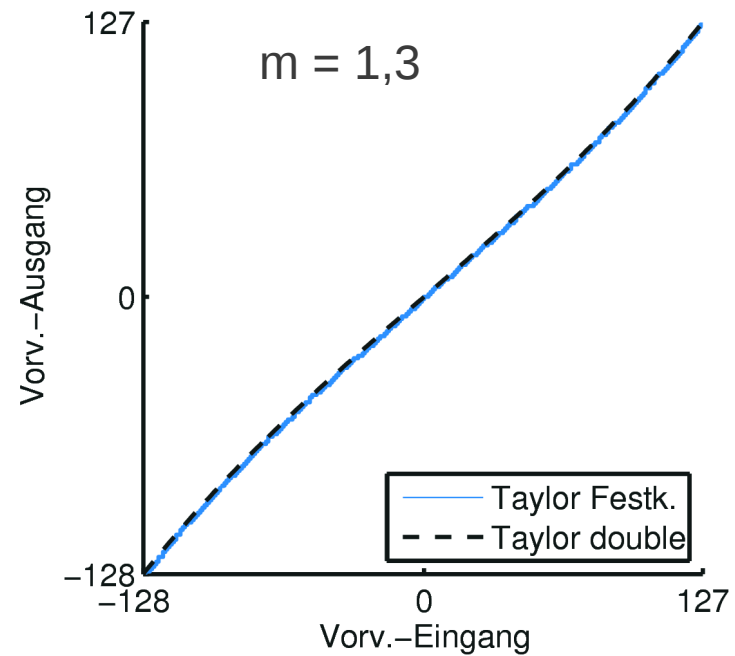
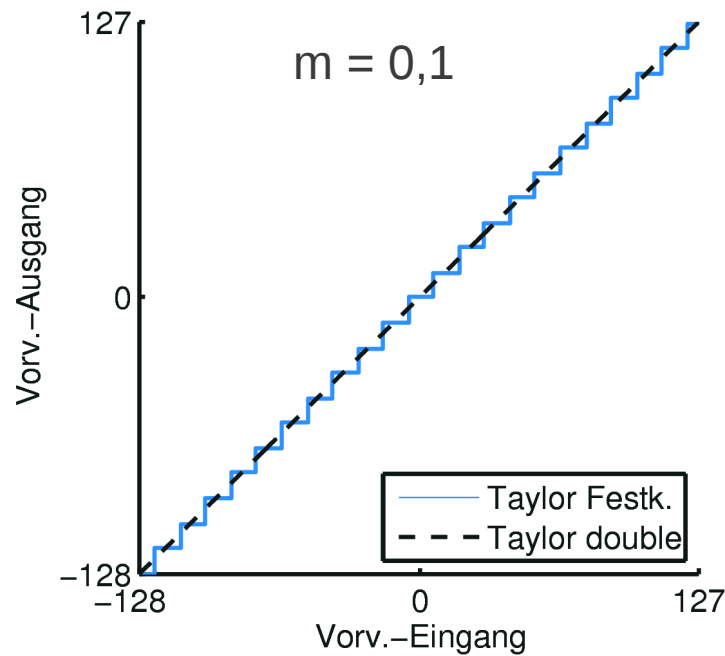
Sättigung bei Überlauf



# Vorverzerrung

Kennlinie des Festkomma-Vorverzerrers

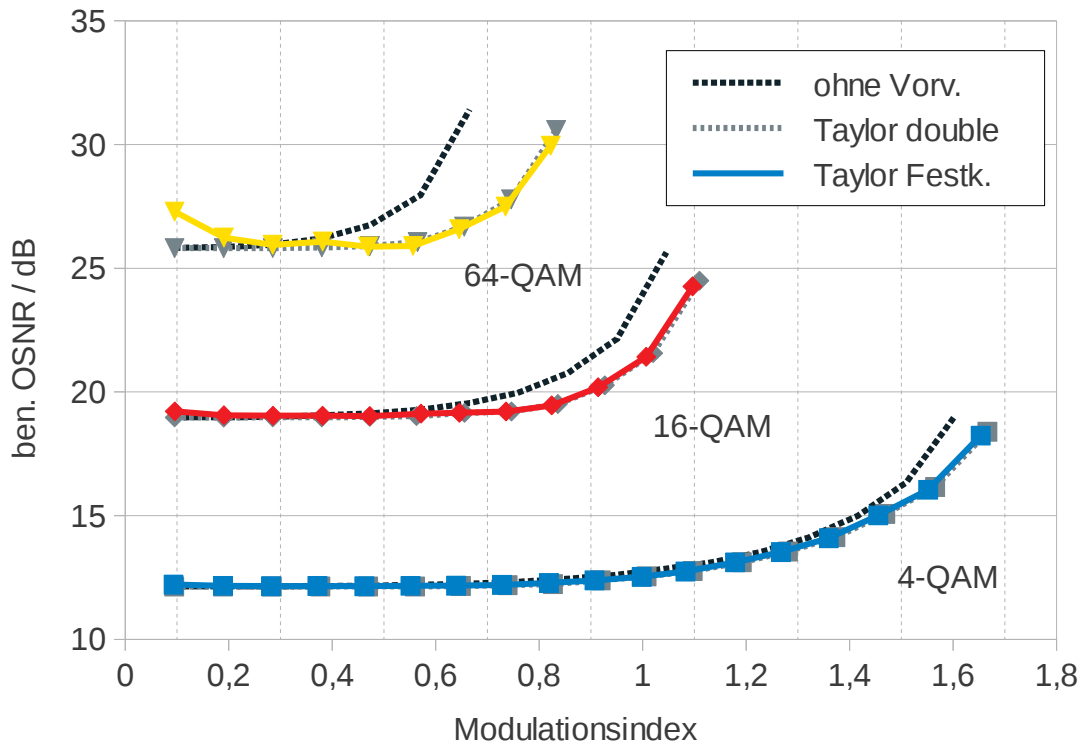
$M = 8$  bit,  $L_1 = 10$  bit,  $L_2 = 12$  bit



# Vorverzerrung

## Festkomma-Berechnung der Taylor-Vorverzerrung (1)

M = 8 bit



Taylor-Näherung 3. Ordnung  
 $L_1 = 10$  bit,  $L_2 = 12$  bit  
 Ausgang: 8 bit

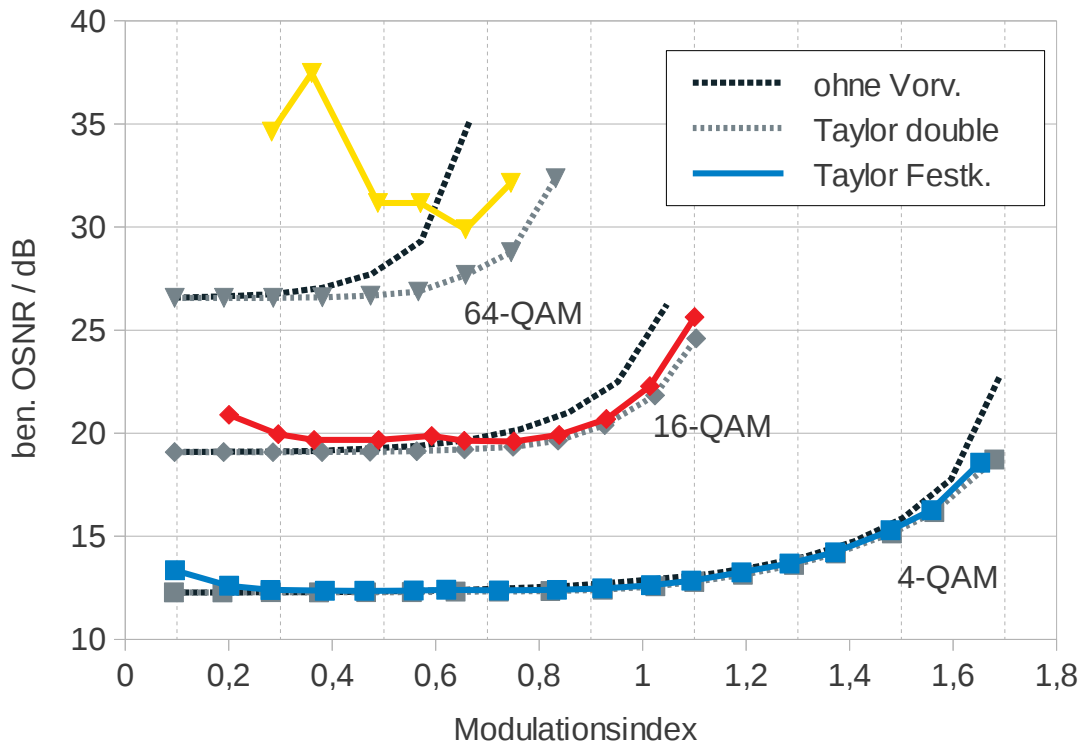
Sehr gute Übereinstimmung mit Fließkommaberechnung für hohe Modulationsindizes

Einfluss von Quantisierungsfehlern für niedrige Modulationsindizes höher

# Vorverzerrung

## Festkomma-Berechnung der Taylor-Vorverzerrung (2)

M = 6 bit



Taylor-Näherung 3. Ordnung  
 $L_1 = 10$  bit,  $L_2 = 12$  bit  
 Ausgang: 6 bit

Ausreichende Genauigkeit  
 bei 4- und 16-QAM

Starke Beeinträchtigung der  
 Systemleistung durch  
 Quantisierungsfehler bei  
 64-QAM und M = 6 bit

## Zusammenfassung

- Gewinn von bis zu 5 dB (bei 64-QAM) durch Vorverzerrung möglich
- Verringerung des Modulationsverlustes durch Vorverzerrung
- Effiziente Hardware-Umsetzung durch Taylor-Näherung
- Bei 8 bit keine nennenswerte Beeinträchtigung durch Quantisierungsfehler
- Bei 6 bit können 4- und 16-QAM noch sinnvoll vorverzerrt werden; bei 64-QAM treten starke Beeinträchtigungen der Systemleistung auf

## Ausblick

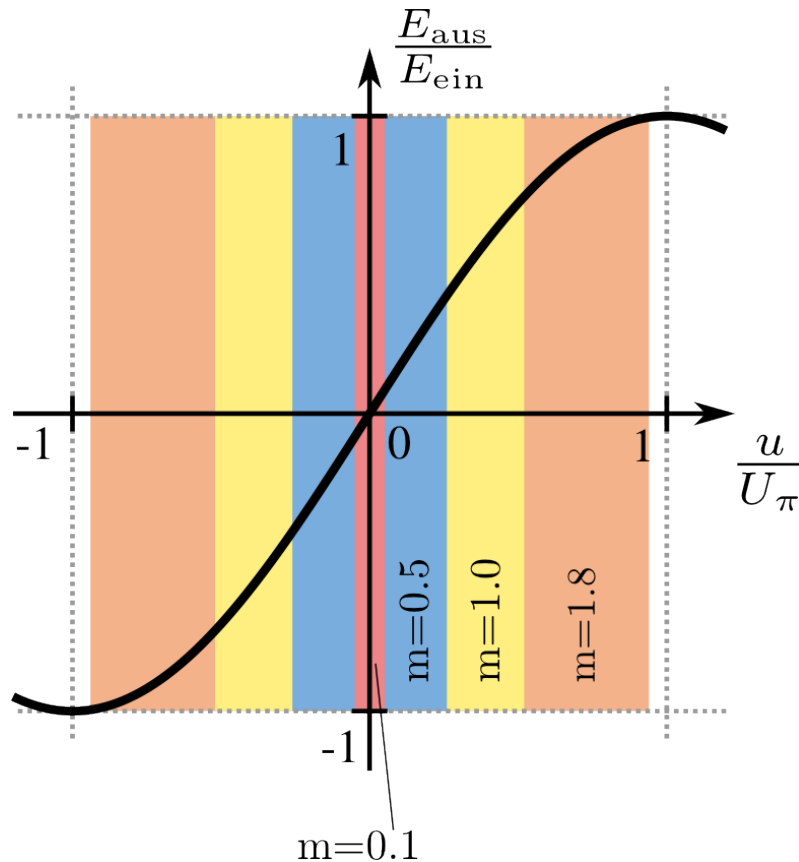
- Implementierungsvarianten, z. B. Look-up-Table (LUT)
- Untersuchung des Hardwareaufwands

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

# Modulatorkennlinie

Modulationsindex (Zusatzfolie)



Definition Modulationsindex:

$$m = \pi \frac{u_{eff}}{U_\pi}$$

$u_{eff}$  ... Effektivwert des OFDM-Signals (Real-/Imaginärteil)

OFDM-Signal ist annähernd gaußverteilt  
 → Aussteuerbereich lässt sich nur in W'keiten angeben

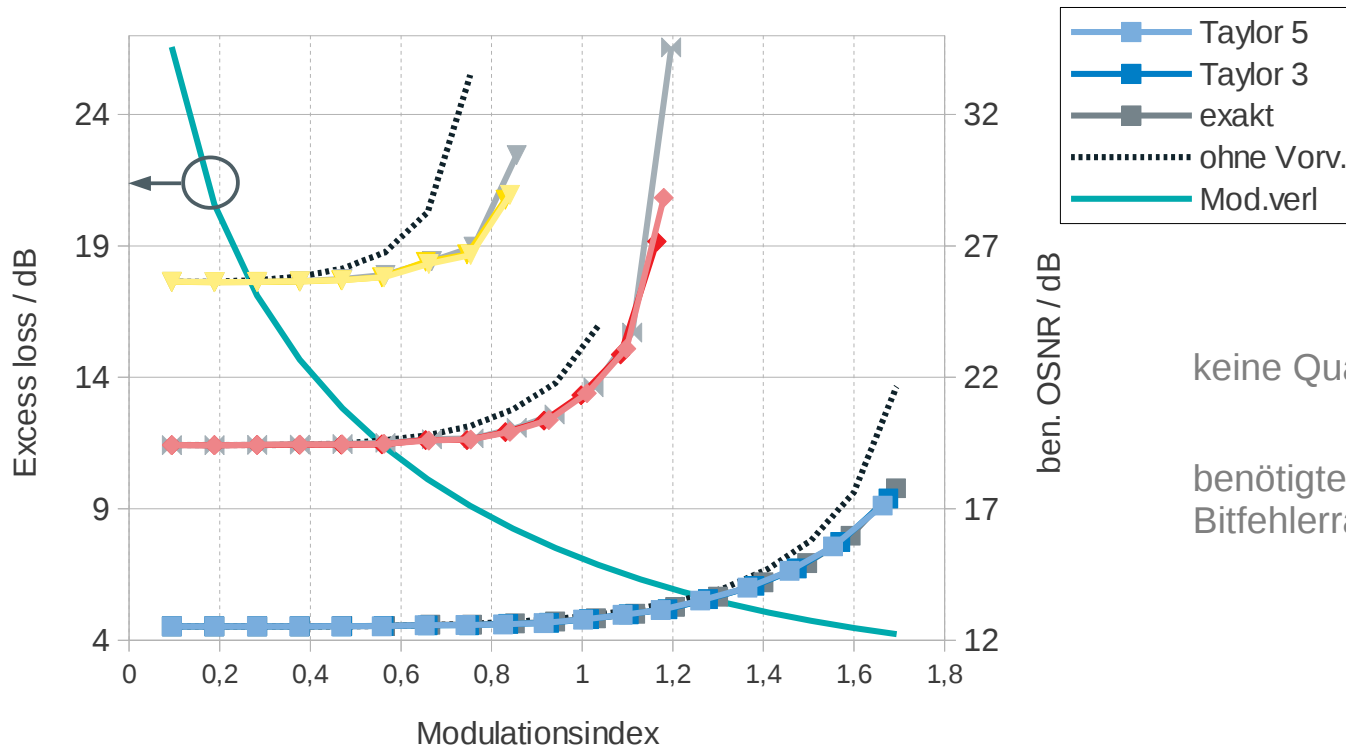
Beispiel: für  $m = 1,0$  liegen 90% der Signalpegel  $u$  im Bereich

$$[-0,52U_\pi; 0,52U_\pi]$$

Bild links: 90%-Aussteuerbereich für verschiedene Modulationsindizes

# Vorverzerrung

Taylor-Näherung 5. Ordnung (Zusatzfolie)



keine Quantisierungseffekte

benötigtes OSNR für eine Bitfehlerrate (BER) von 1e-3