

---

# Analytische Modellierung der Kreuzphasenmodulation und Folgerungen für robuste PSK-Modulationsformate

Jochen Leibrich, Christoph Wree

Universität Kiel, Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik  
Kaiserstr. 2, 24143 Kiel.  
Email: [jol@tf.uni-kiel.de](mailto:jol@tf.uni-kiel.de)

# Übersicht und Motivation

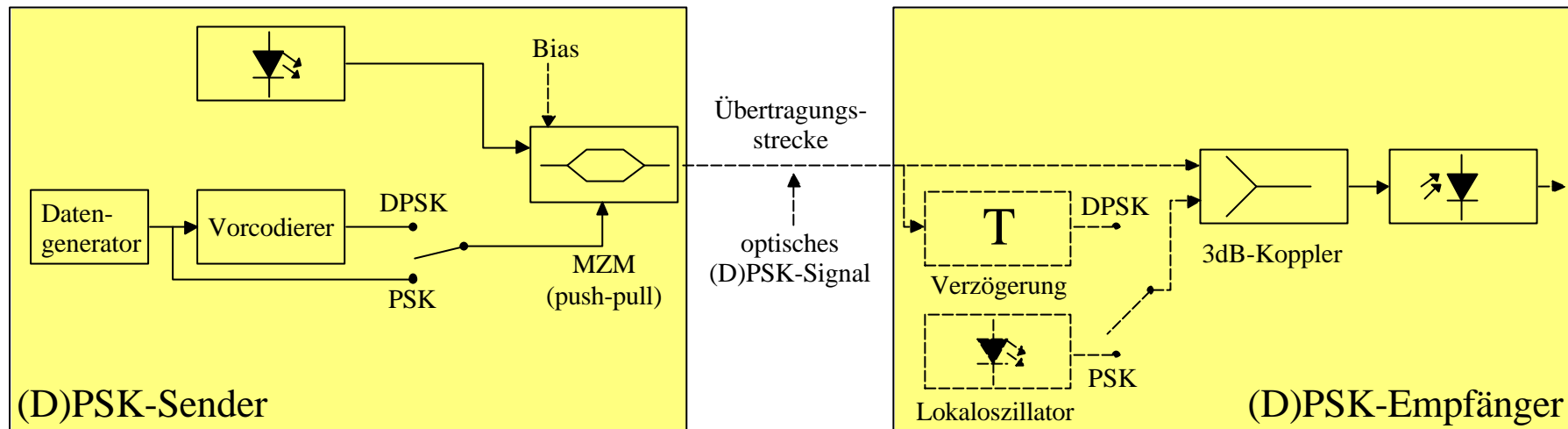
- Untersuchung bandbreiteneffizienter Übertragungsverfahren
- Variante: PSK-Verfahren  
(z.B. BPSK, DBPSK, QPSK, DQPSK)
- im Folgenden: Betrachtung von BPSK und DBPSK  
(oder kurz: PSK und DPSK) mit Datensymbolen  $d_k \in [-1;1]$
- Bei PSK-Verfahren ist die Information in der Trägerphase enthalten,  
deswegen hohe Empfindlichkeit bei Phasenstörung verursacht durch Kerr-  
Effekt (SPM,XPM,FWM)
- Dominierender Effekt in WDM bei 10Gb/s und Kanalabstand  $\geq 50\text{GHz}$ : XPM

---

# Inhalt

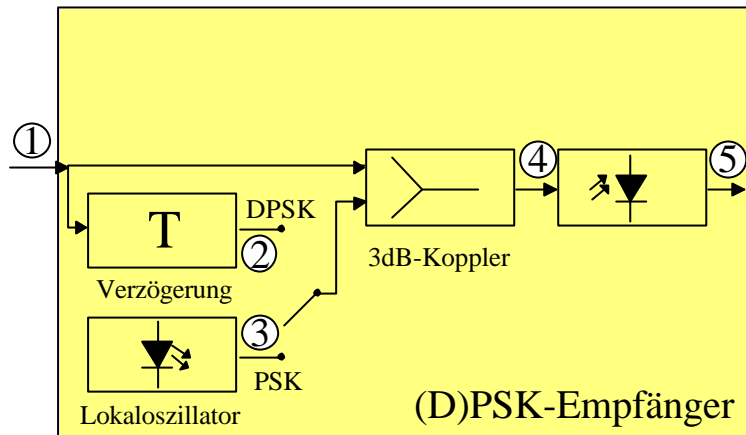
- PSK / DPSK
  - Eigenschaften und Unterschiede
  - mögliche Phasenstörungen durch Kerr-Effekt (SPM,XPM,FWM)
- Analytische Modellierung der XPM: Beschreibung durch ein lineares System
- Auswirkungen der XPM auf PSK / DPSK
- Simulationsergebnisse
- Zusammenfassung

# PSK / DPSK : Eigenschaften und Unterschiede



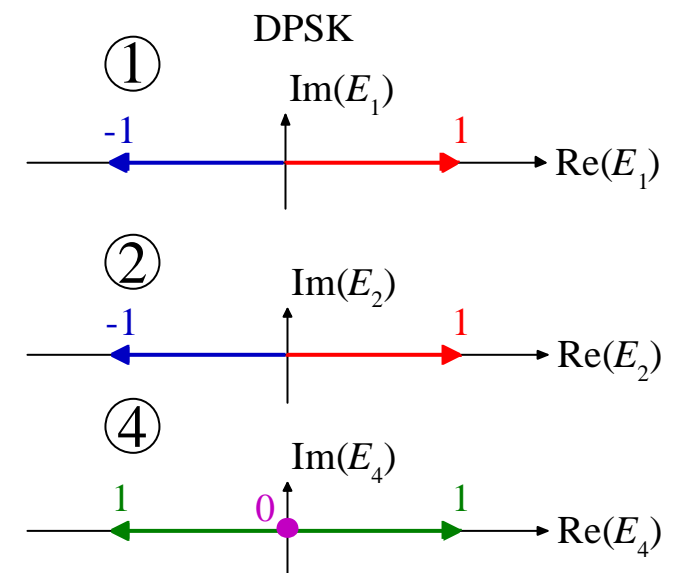
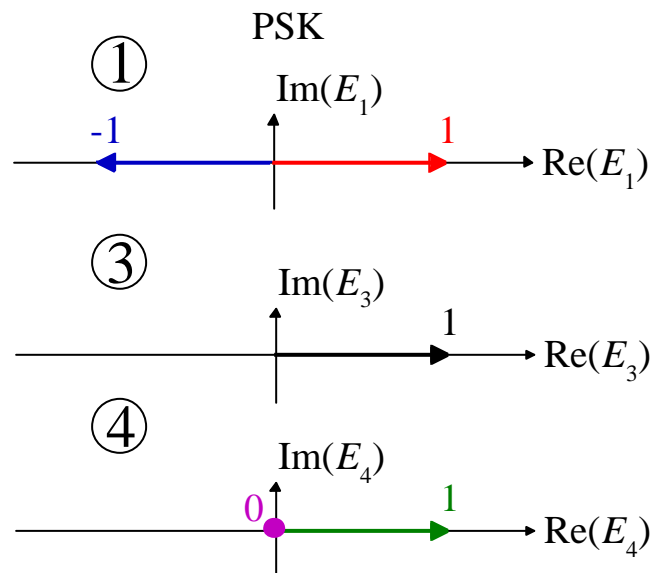
- Abbildung der zu übertragenden Daten  $[0;1]$  auf die Symbole  $[-1;1]$ :
  - PSK:  $1 \rightarrow 1$  ( $f=0$ );  $0 \rightarrow -1$  ( $f=p$ )
  - DPSK:  $1 \rightarrow$  kein Symbolwechsel ( $Df=0$ );  $0 \rightarrow$  Symbolwechsel ( $Df=\pm p$ )
- Vorteile PSK:
  - kein Vorcodierer erforderlich
  - geringere Störanfälligkeit im Vergleich zu DPSK bei Annahme von WGN-Rauschen
- Vorteile DPSK:
  - kein Lokaloszillator erforderlich

# Darstellung in der komplexen Zahlenebene



Back-to-Back-Betrachtung:

- $E_1 \dots E_4$  seien die normierten komplexen Hüllkurven bei 1...4 mit
  - DPSK:  $E_4 = 1/2(E_1 + E_2)$
  - PSK:  $E_4 = 1/2(E_1 + E_3)$
- Außerdem:  $I_5 \sim |E_4|^2$  (Zeigerlänge)



---

## PSK / DPSK : mögliche Phasenstörungen durch Kerr-Effekt (SPM,XPM,FWM)

Kerr-Effekt: Intensitätsabhängige Phasenmodulation (kritisch bei PSK!)

- SPM: Vernachlässigbarer Einfluß bei 10Gb/s  
(siehe z.B. Norimatsu und Iwashita, PTL, Dezember 1991)
- FWM: Wegen Phasenfehlانpassung vernachlässigbar bei 10Gb/s und Kanalabstand  $\geq 50\text{GHz}$
- XPM: Signifikanter Störeinfluß, wie im folgenden gezeigt wird

# Analytische Modellierung der XPM

- Ausgangspunkt: gekoppelte nichtlineare Schrödinger-Gleichung:
  - 2-Kanal System (Ergebnisse sind erweiterbar auf  $N$  Kanäle)
  - Vernachlässigung der Signalverzerrung durch Dispersion ( $\beta_2=\beta_3=0$ )

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_1 = -j\gamma_1 \left( |A_1|^2 + 2|A_2|^2 \right) A_1$$
$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_2 - d_{12} \frac{\partial A_2}{\partial t} = -j\gamma_2 \left( |A_2|^2 + 2|A_1|^2 \right) A_2$$

mit:

$A_1, A_2$ : komplexe Hüllkurven der Kanäle 1 bzw. 2

$\alpha$ : Dämpfungskoeffizient

$\gamma_1, \gamma_2$ : Nichtlinearitätskoeffizient der Kanäle 1 bzw. 2

$d_{12}=D \cdot \Delta\lambda$ : walk-off zwischen Kanal 1 und 2

(durch Dispersion verursachte Gruppengeschwindigkeitsdifferenz)

$D, \Delta\lambda$ : Dispersionskoeffizient und Kanalabstand

- Lösung für Kanal 1 (Faser der Länge  $L$ ):

$$A_1(L, t) = A_1(0, t) e^{-\frac{\alpha}{2}L} e^{-j\mathbf{f}_{1SPM}(L, t)} e^{-j\mathbf{f}_{1XPM}(L, t)}$$

## Analytische Modellierung der XPM (2)

- Darstellung der XPM-induzierten PM im Zeit- bzw. Frequenzbereich

$$\mathbf{f}_{1XPM}(L, t) = 2\mathbf{g}_1 \int_0^L |A_2(0, t + d_{12}z)|^2 e^{-az} dz$$

$$\mathbf{f}_{1XPM}(L, f) = H_{12}(f) P_2(0, f)$$

mit:

$P_2(0, f)$ : Spektrum der optischen Leistung im störenden Kanal 2 am Fasereingang

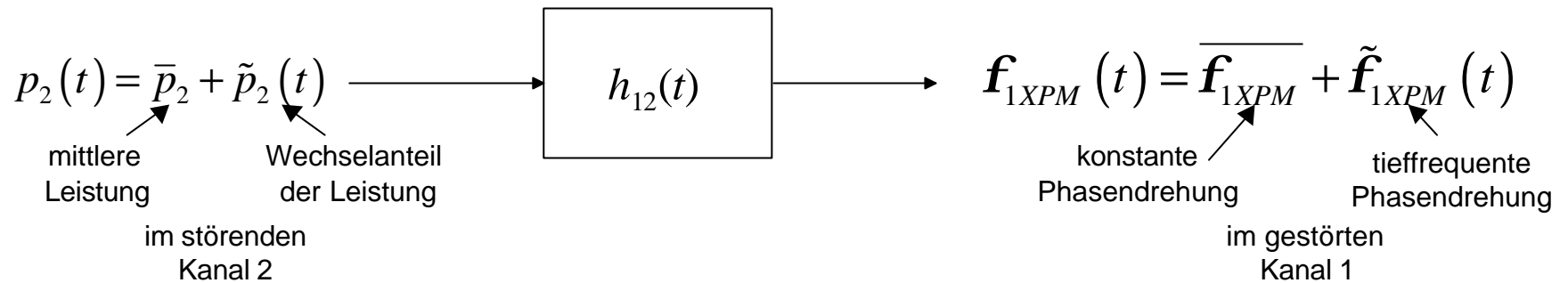
und:

$$H_{12}(f) = 2\mathbf{g}_1 \int_0^L e^{-(a - j2pfd_{12})z} dz \underset{e^{-aL} \ll 1}{\approx} \frac{2\mathbf{g}_1}{a - j2pfd_{12}}$$

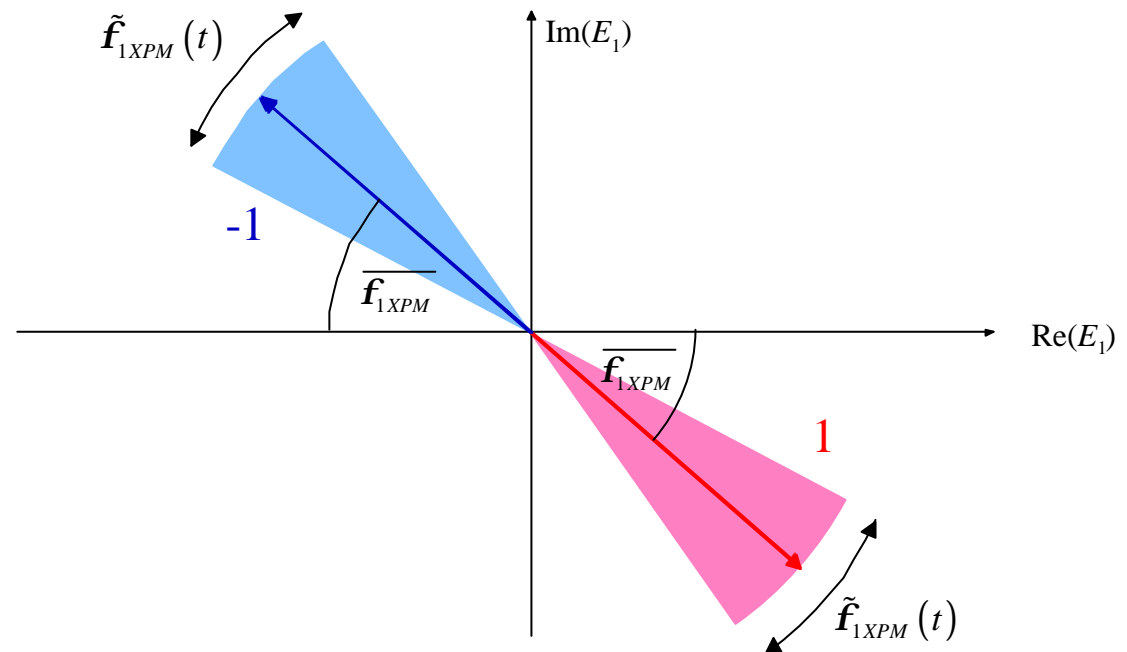
- ⇒ Zusammenhang zwischen optischer Leistung in störendem Kanal und induzierter PM im gestörten Kanal ist durch ein Tiefpaßfilter 1.Ordnung mit  $f_c = \alpha / (2\pi d_{12}) = \alpha / (2\pi DDI) =$  darstellbar
- ⇒ Je größer der Abstand zwischen Kanal 1 und Kanal 2, desto niedriger die Grenzfrequenz.
- Beispiel:  $\Delta f = 100\text{GHz}$ ,  $\alpha_{\text{dB}} = 0.2\text{dB/km}$ ,  $D = 17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 
  - ⇒  $f_c \approx 540\text{MHz}$
  - ⇒ Entstehende Phasenmodulation deutlich tieffrequenter als Datensignal



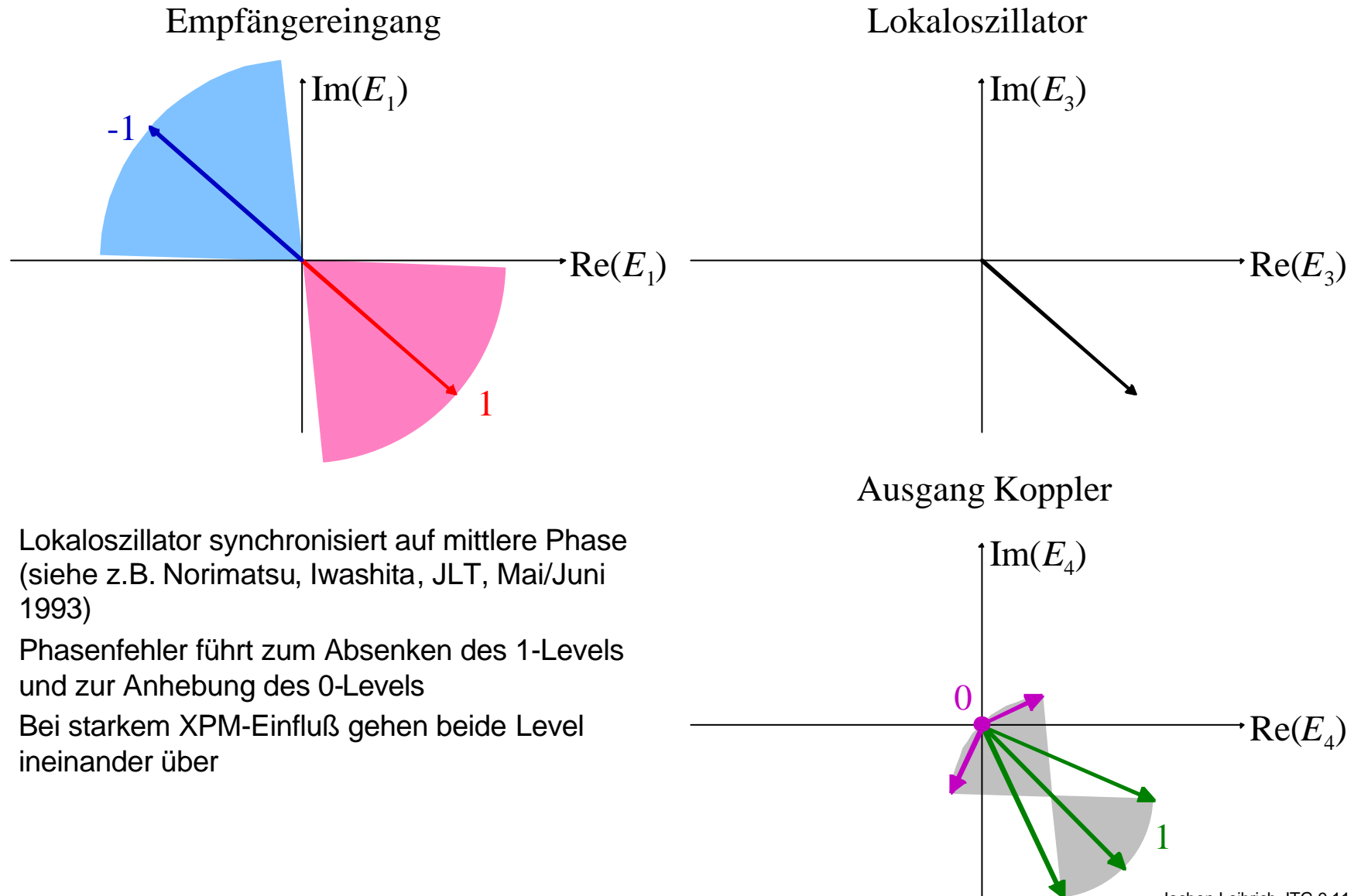
# Auswirkungen der XPM auf PSK/DPSK



- konstante Phasendrehung, verursacht durch mittlere Leistung in Kanal 2
- zufällige, tieffrequente Phasendrehung, verursacht durch Wechselanteil der Leistung in Kanal 2, gefiltert mit  $h_{12}(t)$



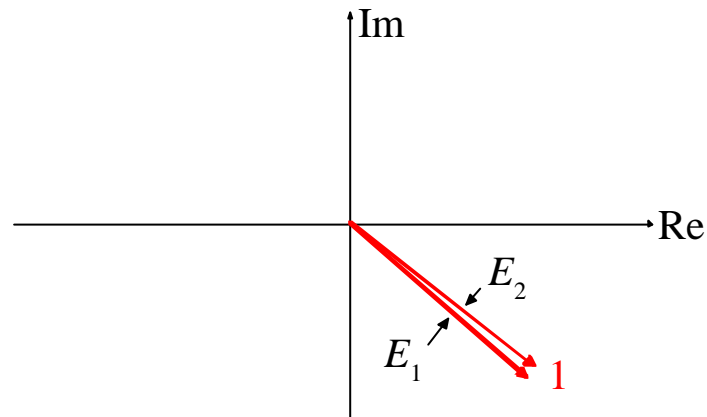
# Auswirkungen der XPM auf PSK



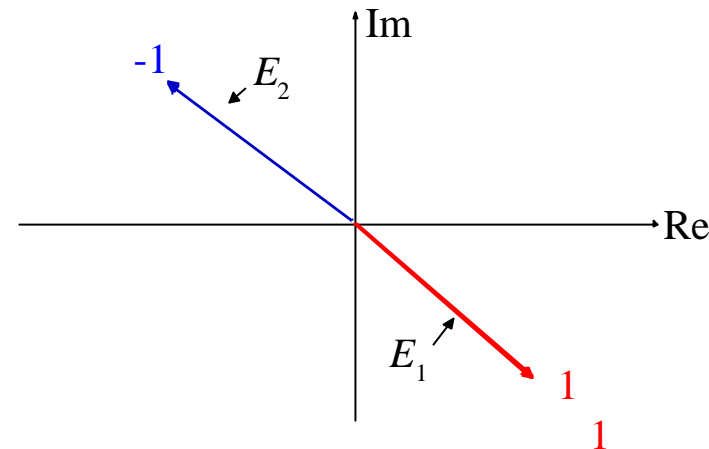
- Lokaloszillator synchronisiert auf mittlere Phase (siehe z.B. Norimatsu, Iwashita, JLT, Mai/Juni 1993)
- Phasenfehler führt zum Absenken des 1-Levels und zur Anhebung des 0-Levels
- Bei starkem XPM-Einfluß gehen beide Level ineinander über

# Auswirkungen der XPM auf DPSK

Vor Koppler: gleiche  
aufeinanderfolgende Symbole (z.B. [1;1])



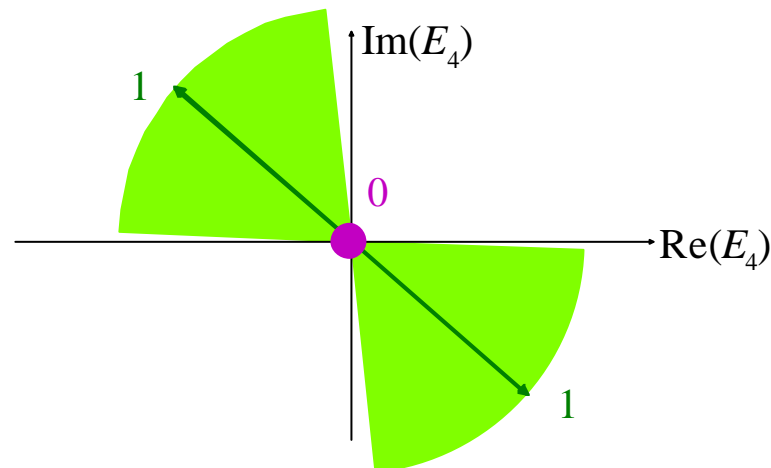
Vor Koppler: ungleiche  
aufeinanderfolgende Symbole



wegen  $f(t)$  langsam veränderlich gegenüber  
Datenrate

- (fast) parallele Zeiger bei gleichen  
aufeinanderfolgenden Symbolen
- (fast) antiparallele Zeiger bei ungleichen  
aufeinanderfolgenden Symbolen
- (fast) keine Degradation der 0- und  
1-Level

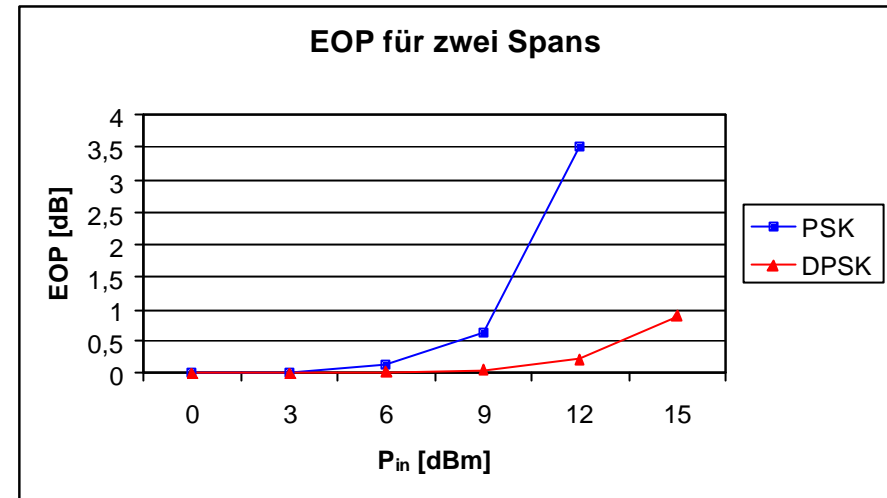
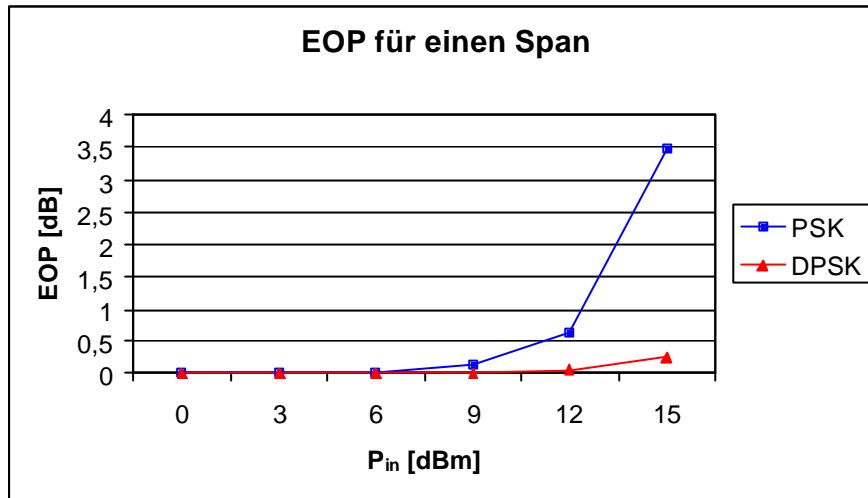
Ausgang Koppler



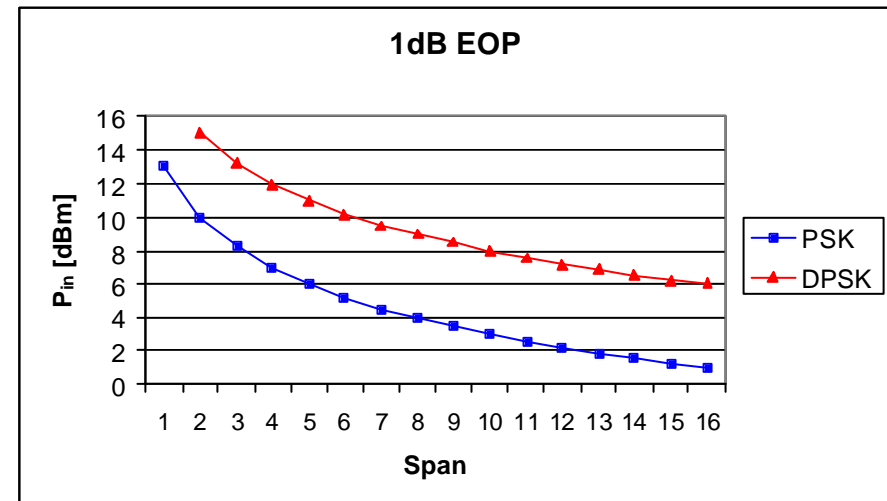
## Betrachtetes Übertragungssystem

- 16x10Gb/s PSK/DPSK (193.1THz ... 194.6THz)
- Kanalabstand 100GHz
- Eigenschaften eines Spans:
  - 100km Standardfaser
  - 100% Postkompensation
  - optischer Verstärker zum Dämpfungsausgleich
- Untersuchter Kanal:
  - Kanal 8 (193.8THz)
  - Fasereingangsleistung: 0dBm um SPM zu vermeiden
- Störende Kanäle: Variation der Leistung im Bereich 0...15dBm
- Datensignal mit  $2^{10}-1$  PRBS

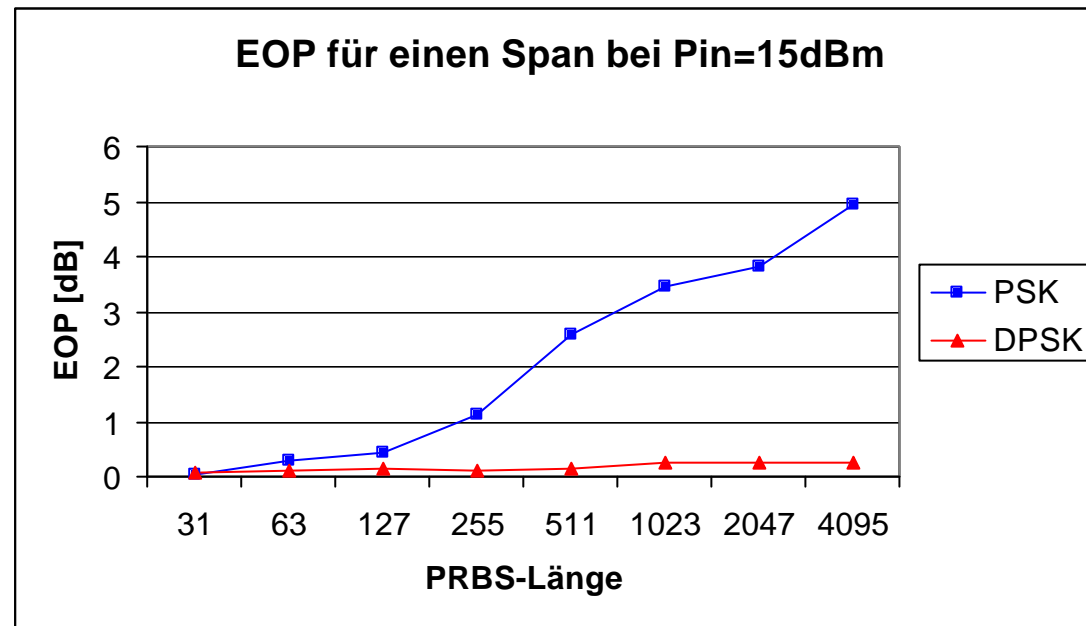
# Simulationsergebnisse



- Bei kleinen Leistungen kein Penalty
- Bei größeren Leistungen sprunghafter Anstieg
- Phasendrehung  $f_{XPM} \sim (N \times P_{in})$  ( $N$ =Anzahl Spans)  
 $\Rightarrow$  Ergebnis für zwei Spans entspricht Ergebnis für einen Span bei 3dB höherer Leistung
- Kurve mit konstantem Penalty (extrapoliert):  
 DPSK erlaubt 5dB höhere Leistung

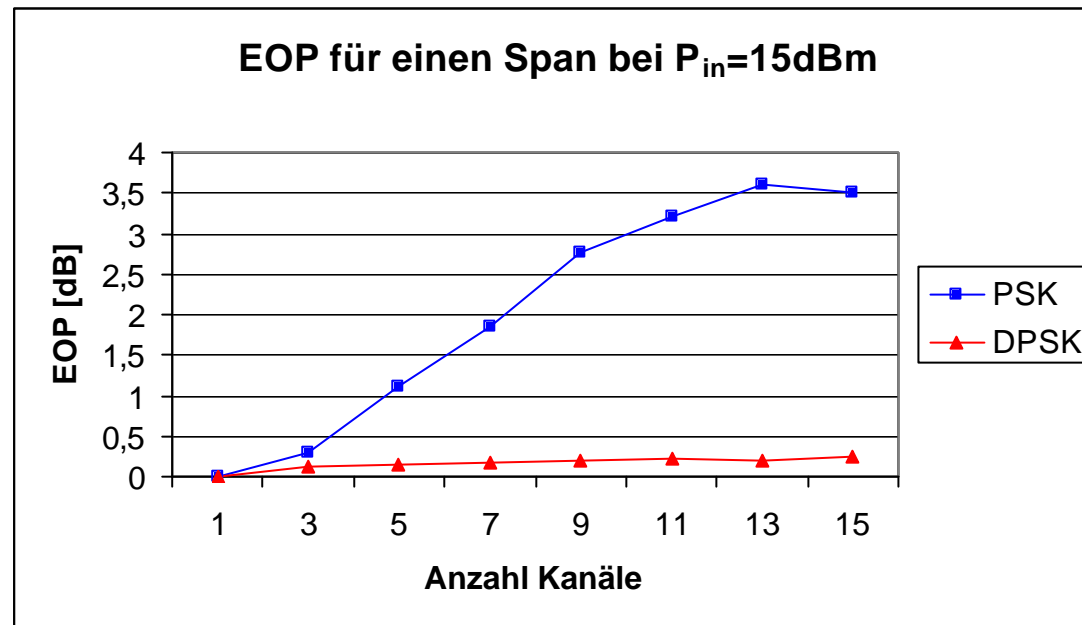


# Simulationsergebnisse: Abhängigkeit von der PRBS-Länge



- Tiefe Frequenzanteile im Datensignal sind Hauptverursacher der Phasendrehung
  - ⇒ Tiefe Frequenzanteile müssen im Datensignal enthalten sein
  - ⇒ erforderliche PRBS-Länge steigt
- Vorgestellte Ergebnisse bei einer PRBS-Länge von 1023 sind
  - zu optimistisch für PSK
  - realistisch für DPSK

# Simulationsergebnisse: Abhängigkeit von der Kanalzahl



- Je größer der Abstand zwischen störendem und gestörtem Kanal, desto geringer die Grenzfrequenz des Modell-Tiefpasses:
  - ⇒ Entfernte Kanäle stören DPSK-Übertragung nicht
  - ⇒ Auch entfernte Kanäle stören PSK-Übertragung, Sättigung wird verursacht durch zu kurze PRBS-Länge

---

## Zusammenfassung

- Analytische Modellierung der XPM-induzierten Phasenmodulation mit Hilfe eines Tiefpasses erster Ordnung
- Veranschaulichung der Auswirkungen bei PSK- und DPSK-Modulation in der komplexen Zahlenebene
- Simulative Bestätigung, daß
  - PSK störanfällig,
  - DPSK robustgegenüber XPM, wobei eine ausreichende PRBS-Länge beachtet werden muß