

Effiziente und ergebnissichere Untersuchung praktisch relevanter WDM-Übertragungssysteme durch geeignete Kombination von Engineering Rules mit verbesserten numerischen Verfahren

Jochen Leibrich

Universität Kiel
Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik
Kaiserstr. 2, 24143 Kiel

Problemstellung: Design einer faseroptischen Übertragungsstrecke

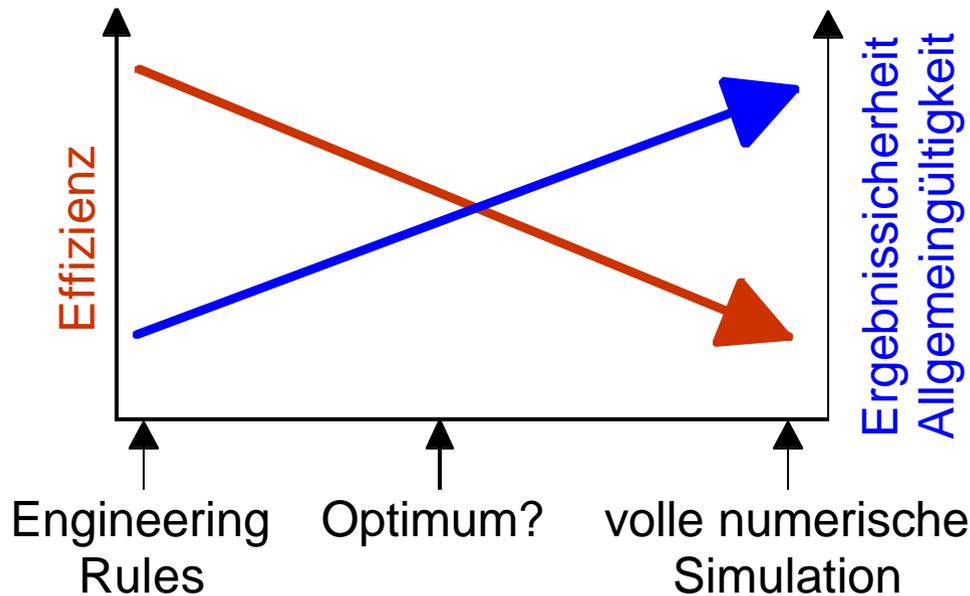
Optimierungsparameter (Auswahl):

- Dispersionsmanagement
- optische Leistung
- Anforderungen an Komponenten (z.B. Verstärkerrauschen)
- Kanalabstand
- Kanaldatenrate
- Fasertypen

Motivation: Analysemethoden

- relevante Effekte
 - Dispersion, PMD
 - SPM, XPM, FWM, SRS
 - Rauschen
- numerische Simulation
 - ⇒ hohe Ergebnissicherheit, allgemeingültig, aber extrem aufwändig
- „Engineering Rules“
(=Näherungsformeln bzgl. des Systemeinflusses relevanter Effekte)
 - ⇒ effizient, aber
 - nur begrenzt gültig (z.B. für verschiedene Modulationsformate)
 - Ergebnissicherheit erfordert Aufwand bei der Verifikation

Motivation: Optimierung der Analysemethode



- Optimierungsansatz:
 - Anwendung von Näherungslösungen auf weniger relevante Effekte
⇒ geringere Genauigkeitsanforderungen
 - volle numerische Simulation der verbleibenden relevanten Effekte mit verbesserten numerischen Verfahren

Inhalt

- Eckdaten der betrachteten Übertragungsstrecken
- Anwendung von Näherungslösungen auf weniger relevante Effekte (hier: Vernachlässigung nichtrelevanter Effekte)
- effiziente Simulation der verbleibenden Effekte durch verbesserte Split-step Methode (SSM)
 - Funktionsweise
 - Konvergenzeigenschaften
 - Geschwindigkeitsanalyse
- Zusammenfassung

Eckdaten der betrachteten Übertragungsstrecken

Kanaldatenrate	10Gb/s
Kanalzahl	≤ 16
Kanalabstand	100GHz
Modulationsformat	beliebig (OOK / DPSK / duobinär, RZ / NRZ)
Übertragungslänge	$\leq \approx 1000\text{km}$
Spanlänge	beliebig
Dispersionsmanagement	beliebig
Übertragungsfaser	SSMF

lineare Effekte	Dämpfung, Dispersion, (PMD)
nichtlineare Effekte	SPM, XPM, FWM, (SRS)
Rauschen	ASE, Schrot-, thermisches Rauschen

Vernachlässigung nichtrelevanter Effekte

- FWM: hohe Phasenfehlانpassung bei Nx10Gb/s mit $Df=100\text{GHz}$
 - ⇒ vernachlässigbar
 - ⇒ Anforderungen an Split-step-Schrittweite zur Simulation von FWM entfallen
 - ⇒ Simulationseffizienz steigt
- Rauschen wird analytisch betrachtet
 - ⇒ kein zusätzlicher numerischer Aufwand
- verbleibende Effekte: Dämpfung, Dispersion, SPM, XPM

Effiziente numerische Simulation der verbleibenden Effekte

- Vernachlässigung von FWM, Berücksichtigung von SPM und XPM: gekoppelte NL-Schrödinger-Gleichung (=separated channels approach (SCA))

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{\mathbf{a}}{2} A_1 + \mathbf{b}_{11} \frac{\partial A_1}{\partial t} - \frac{j}{2} \mathbf{b}_{21} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \mathbf{b}_{31} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} &= -j \mathbf{g}_1 \left(|A_1|^2 + 2 \sum_{\substack{k \\ k \neq 1}} |A_k|^2 \right) A_1 \\
 \frac{\partial A_2}{\partial z} + \underbrace{\frac{\mathbf{a}}{2} A_2}_{\text{Dämpfung}} + \underbrace{\mathbf{b}_{12} \frac{\partial A_2}{\partial t} - \frac{j}{2} \mathbf{b}_{22} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \mathbf{b}_{32} \frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3}}_{\text{Dispersion}} &= -j \mathbf{g}_2 \underbrace{\left(|A_2|^2 + 2 \sum_{\substack{k \\ k \neq 2}} |A_k|^2 \right)}_{\text{SPM und XPM}} A_2
 \end{aligned}$$

(=konstante, lineare und quadratische Gruppenlaufzeit)

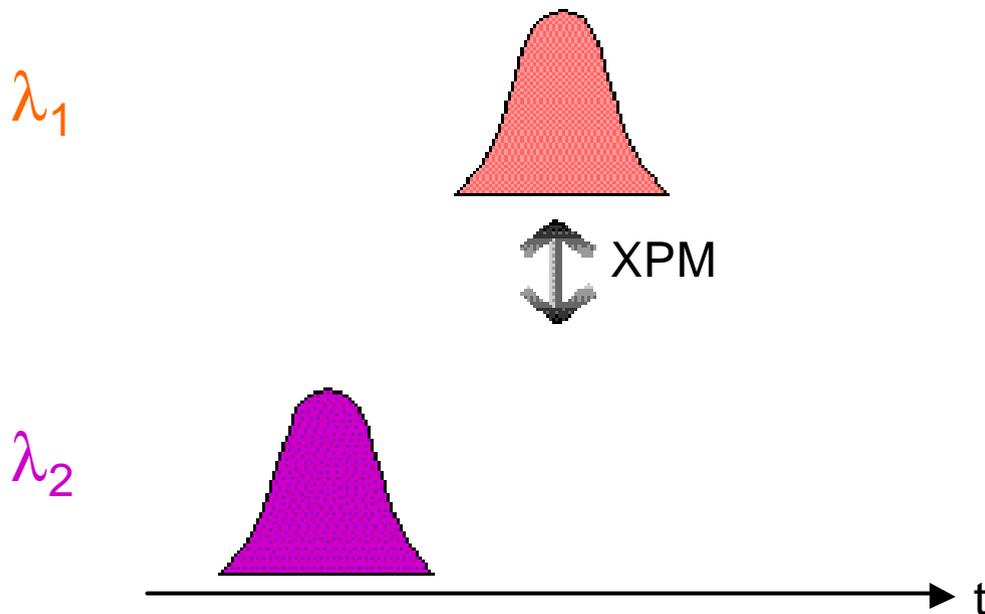
- Lösungsverfahren Split-step Methode:
 - räumliche Diskretisierung der Faser
 - getrennte Lösung von lin. und nichtlin. Anteil innerhalb eines Schrittes

Effiziente numerische Simulation der verbleibenden Effekte (2)

- Ziel: minimale Anzahl der Schritte bei vorgegebener Genauigkeit
- Einflussfaktoren auf die Genauigkeit:
 - Interaktion SPM \Leftrightarrow Dispersion
 - bei 10Gb/s relativ geringe Anforderungen an Schrittweite ($\gg 1000\text{m}$, je nach Signalleistung)
 - Einkanaleffekt, d.h. unabhängig von der Anzahl der Kanäle
 - Interaktion XPM \Leftrightarrow Dispersion
 - relative hohe Anforderung an Schrittweite
 \Rightarrow den Simulationsaufwand bestimmender Effekt
 - Zwischenkanaleffekt, d.h. Aufwand steigt mit der Kanalzahl
- im Folgenden: Analyse des die Effizienz begrenzenden Effektes und Vorstellung einer verbesserten Split-step Methode

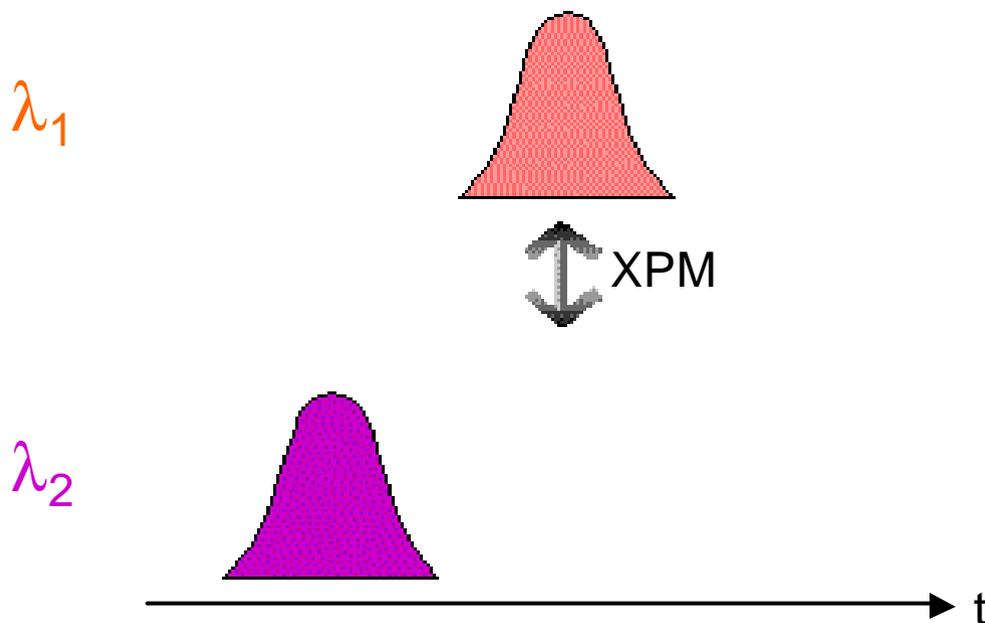
Verbesserte Split-step Methode: Funktionsweise

- physikalischer Vorgang auf der Faser:
durch Dispersion verursachte Gruppenlaufzeitdifferenz zweier WDM-Kanäle
- je nach räumlicher Koordinate z unterschiedliche relative Positionen
- kontinuierliche Interaktion durch XPM



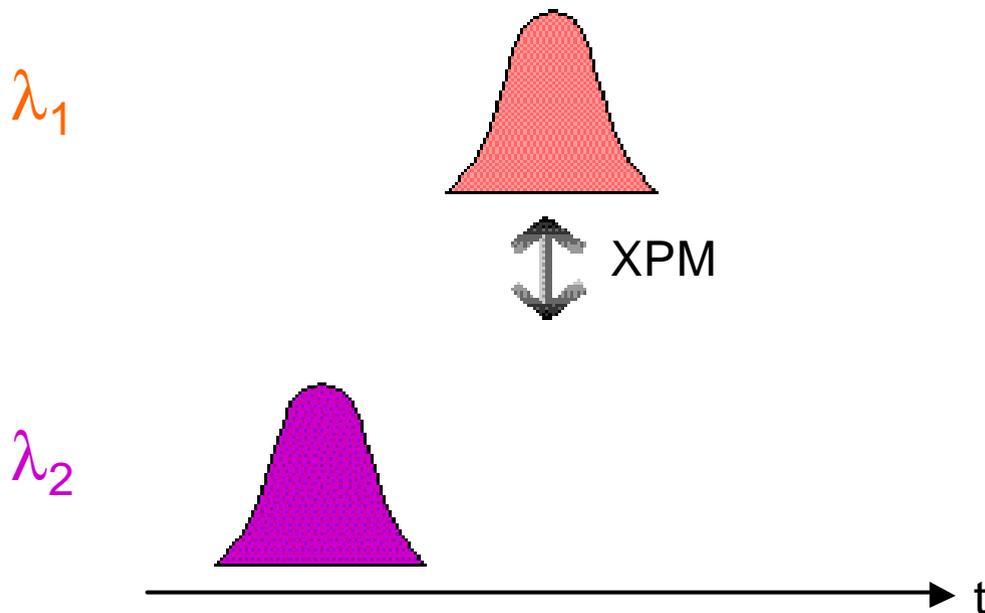
Verbesserte Split-step Methode: Funktionsweise (2)

- Split-step Methode:
durch räumliche Diskretisierung Betrachtung der relativen Position an wenigen Stützstellen
- viele Stützstellen (=gute Genauigkeit) erfordert kleine Schrittweite \Rightarrow Aufwand



Verbesserte Split-step Methode: Funktionsweise (3)

- je größer der Kanalabstand, desto größer die relative Gruppenlaufzeit
 - für dieselbe Genauigkeit kleinere Schrittweiten erforderlich



Verbesserte Split-step Methode: Funktionsweise (4)

- Ansatz:

Mittelung des Einflusses der XPM über allen relativen Positionen innerhalb eines Split-steps der Länge $Dz \Rightarrow$ realisierbar mit linearem Filter

- XPM-induzierte PM (Kanal k stört Kanal i)

$$\underbrace{\mathbf{f}_{ik,XPM}(f, z)}_{\text{induzierte PM}} = H_{ik}(f) \cdot \underbrace{F \left\{ \left| A_k \left(t, z + \frac{\Delta z}{2} \right) \right|^2 \right\}}_{\text{Spektrum der Leistung im störenden Kanal}}$$

J. Leibrich and W. Rosenkranz:
 “Efficient Numerical Simulation of Multi-Channel WDM Transmission Systems Limited by XPM”, PTL, März 2003.

$$\text{mit } H_{ik}(f) = 2g_i \frac{1 - e^{-(a - j2p fD(l_i - l_k))\Delta z}}{a - j2p fD(l_i - l_k)} \cdot e^{(a - j2p fD(l_i - l_k))\frac{\Delta z}{2}}$$

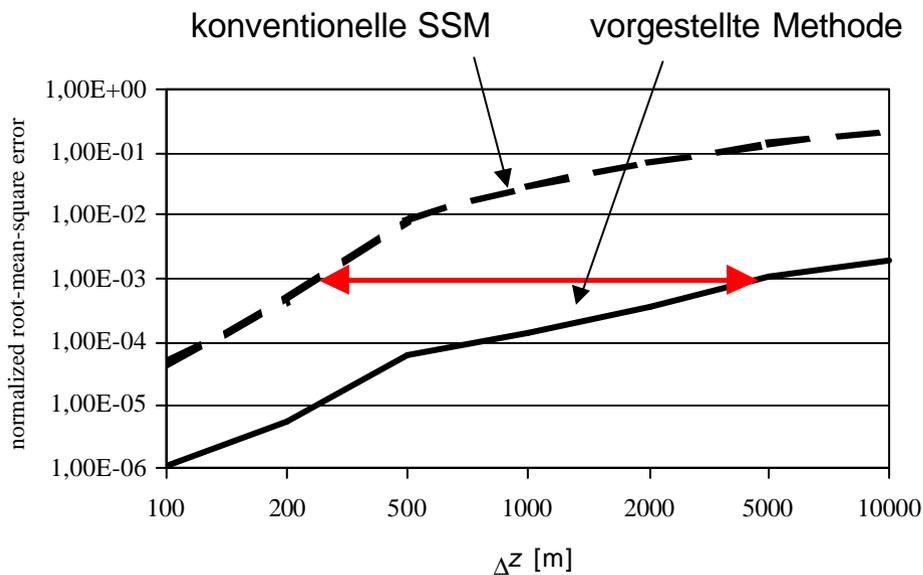
- Vergleich mit konventioneller SSM:

Ableitung des Einflusses der XPM **innerhalb** eines Split-steps aus einer relativen Position:

$$\underbrace{\mathbf{f}_{ik,XPM}(t, z)}_{\text{induzierte PM}} = \underbrace{2g_i \Delta z}_{\text{freq.unabh. Faktor}} \underbrace{\left| A_k \left(t, z + \frac{\Delta z}{2} \right) \right|^2}_{\text{Leistung des störenden Kanals}}$$

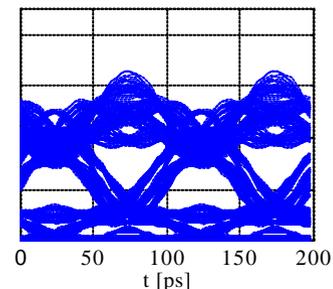
Verbesserte Split-step Methode: Konvergenzeigenschaften

- 16x10Gb/s NRZ-OOK, 100km, 3dBm/Kanal

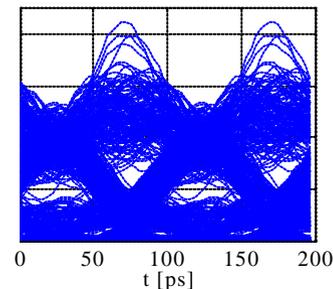


- bei $E_{MSE}=10^{-3}$ Reduktion der Anzahl Schritte um den Faktor 20 !

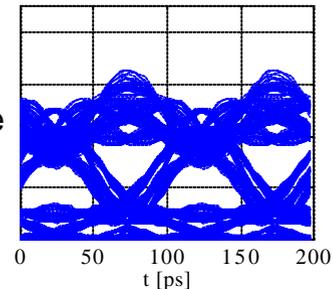
Referenzergebnis
(10m Schrittweite)



konventionelle SSM
(5000m Schrittweite)

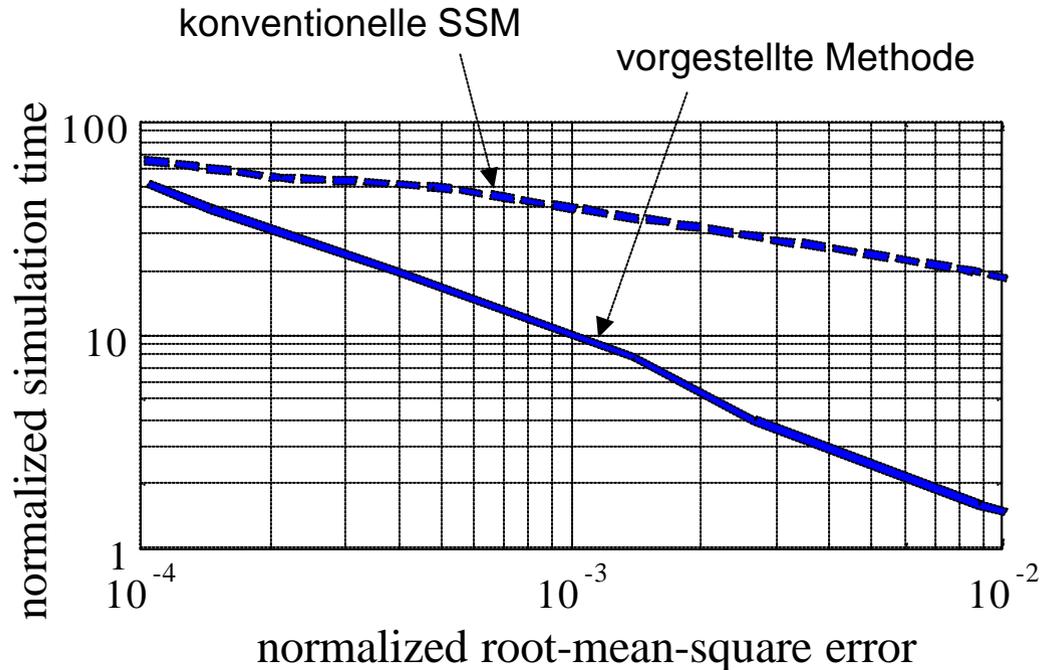


vorgestellte Methode
(5000m Schrittweite)



Verbesserte Split-step Methode: Geschwindigkeitsanalyse

- Rechendauer pro Split-step steigt gegenüber konventioneller Methode ca. um Faktor 3-5
 ⇒ durch Reduktion der Anzahl Split-steps (20x) weiterhin deutliche Geschwindigkeitsverbesserung



- Größenordnung der Simulationszeit: je nach Signallänge (Minimum 256 bit/Kanal)
 Simulationszeiten (PC) für 16-Kanal-System <1 min/span

Zusammenfassung

- prinzipieller Ansatz zur Untersuchung optischer Übertragungssysteme:
 - Berücksichtigung einflussarmer Effekte mit Näherungslösungen (geringe Genauigkeitsanforderungen)
 - Berücksichtigung einflussstarker Effekte durch numerische Simulation mit hoher Genauigkeit
 - ⇒ Erhöhung der Simulationseffizienz durch Beschränkung auf wenige Effekte
- verbesserte Split-step Methode
 - berücksichtigt Dämpfung, Dispersion, SPM, XPM
 - numerische Lösung der NL-Schrödinger-Gleichung
 - Reduktion der Schrittzahl ca. Faktor 20
 - Geschwindigkeitsverbesserung ca. Faktor 5
 - Simulationszeit/Span < 1 min für 16x10Gb/s