Entwurf der Übertragungsstrecke

In diesem Kapitel sollen die Einflüsse der Übertragungsstrecke auf das Signal beschrieben und vorgestellt werden, wie man durch geschicktes Systemdesign diese Auswirkungen möglichst klein hält. Dazu wird zuerst die nichtlineare Schrödinger-Gleichung vorgestellt, die die Entwicklung eines optischen Signals entlang der Übertragungsstrecke beschreibt. Darauf aufbauend soll auf die linearen und nichtlinearen Effekte in der Faser eingegangen werden: Die Dispersion als linearer Effekt wird erläutert, Methoden vorgestellt, wie die Dispersion in einem Übertragungssystem gehandhabt werden kann, Kompensationsmöglichkeiten beschrieben und Verfahren gezeigt, wie man die Einflüsse von Restdispersion gering halten kann. Anschließend sollen die nichtlinearen Effekte vorgestellt werden. Es sollen die Regime aufgezeigt werden, in die man verschiedene Übertragungssysteme einordnen kann und die besagen, welcher spezielle Effekt dominiert. Anschließend sollen die Intrakanal-Nichtlinearitäten genauer beschrieben und Maßnahmen gezeigt werden, die Übertragungssysteme toleranter dagegen machen.

1 Nichtlineare Schrödinger-Gleichung

Die Ausbreitung von optischen Signalen entlang einer Einmoden-(Glas-)Faser kann dadurch beschreiben, dass man das Signal als sich langsam ändernde Einhüllende $\underline{A}(z, t')$ annimmt, wobei t' die Zeit bezogen auf den Puls darstellt: $t' = t - \tau \cdot z$ mit τ als Gruppenlaufzeit des Pulses. Somit stellt der Zeitpunkt $t' = 0$ immer den zeitlichen Mittelpunkt des Pulses dar. Die Annahme einer langsam veränderlichen Einhüllenden behält seine Gültigkeit bis zu Pulsbreiten von ca. $10\, fs$ [**?**, **?**]. Mit diesen Annahmen kann man die Ausbreitung des optischen Signals mit der sog. *nichtlinearen Schrödinger-Gleichung* beschreiben [**?**]:

$$\frac{\partial \underline{A}(z,t')}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}\underline{A}(z,t') + j\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 \underline{A}(z,t')}{\partial t'^2} + \frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 \underline{A}(z,t')}{\partial t'^3} - j\bar{\gamma}|\underline{A}(z,t')|^2\underline{A}(z,t') \qquad (1)$$

Hierbei beschreiben α und $\bar{\gamma}$ den Dämpfungsbelag und den Nichtlinearitätskoeffizienten der Faser, β_2 bzw. β_3 stellen die quadratischen bzw. kubischen Terme der Taylor-Reihenentwicklung der Ausbreitungskonstante β nach der Kreisfrequenz ω dar. Die nichtlineare Schrödinger-Gleichung beschreibt die Veränderung der Einhüllenden $\underline{A}(z, t')$ durch die Ausbreitung in z-Richtung. Diese nichtlineare partielle Differentialgleichung lässt sich i. A. nicht analytisch lösen. Man benötigt numerische Lösungsverfahren. Meist benutzt man dafür das *Split-Step-Fourier-Verfahren* [**?**].
Wenn man die Terme auf der rechten Seite der Gleichung 1 untersucht, kann man drei Effekte unterscheiden: Der erste Term beschreibt die Dämpfung der optischen Welle entlang der Faser. Die beiden darauf folgenden stellen den Einfluss der Dispersion (der Dispersion und der Steigung der Dispersion (*Slope*) dar. Der letzte Term beschreibt schließlich die nichtlinearen Prozesse, die durch den *Kerr-Effekt* hervorgerufen werden. Im Folgenden wollen wir die Dispersion und die Nichtlinearitäten genauer betrachten.

2 Dispersion

Der Effekt, dass verschiedene Frequenzanteile des optischen Signals sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten, nennt man (chromatische) Dispersion. Der Faserparameter $D = d\tau/d\lambda$ beschreibt die Veränderung der Gruppenlaufzeit $\tau = d\beta/d\omega = \beta_1$ mit der Wellenlänge λ. Wenn also z. B. die Gruppenlaufzeit unabhängig von der Wellenlänge ist, erhält man Dispersion $D = 0$. Die Steigung der Dispersion nennt man *Slope* $S = dD/d\lambda$. Die Steigung der Dispersion spielt in den Fällen eine Rolle, wenn der Wert der Dispersion betragsmäßig klein ist ($D \approx 0$).
Dispersion ist ein linearer Effekt, den man rückgängig machen kann, indem man das Signal durch ein Medium mit Dispersion entgegengesetzten Vorzeichens ausbreiten lässt. Die Dispersion beschreibt die Laufzeitdifferenz pro Wellenlänge pro Ausbreitungsweg z. Nach der Ausbreitung entlang einer Strecke L akkumuliert sich die Dispersion auf:

$$D_{acc}(L) = \int_0^L D(z)\,\mathrm{d}z \qquad (2)$$

2.1 Dispersionskompensation

Um die Dispersion am Ende der Übertragungsstrecke vollständig zu kompensieren, muss man gewährleisten, dass $D_{acc}(L) = 0$. Wenn also eine Übertragungsfaser die Länger L_1 und die Dispersion D_1 hat, kann man die Dispersion mit einer zweiten Faser mit Dispersion D_2 und einer Länge L_2 kompensieren, wenn gilt:

$$\int_0^{L_2} D_2\,\mathrm{d}z = -\int_0^{L_1} D_1\,\mathrm{d}z \qquad (3)$$

Fasern, die so etwas leisten, nennt man *dispersionkompensierende Fasern, DCF*. Während normale Einmodenfasern (S-SMF, *Standard Signle-Mode Fibre*) eine Dispersion von ca. $16\,\frac{ps}{nm\cdot km}$ aufweisen, können DCF Dispersionen im Bereich von $-100\,\frac{ps}{nm\cdot km}$ besitzen.

2.2 Dispersionstoleranz

Mit steigenden Kanaldatenraten nehmen die Einflüsse durch Dispersion stark zu. Man kann die Laufzeitunterschiede $\Delta t'$ innerhalb des Signals grob über die spektrale Breite $\Delta\lambda$ und die akkumulierte Dispersion D_{acc} abschätzen:

$$\Delta t' = D \cdot L \cdot \Delta\lambda = D_{acc} \cdot \Delta\lambda = D_{acc} \cdot \Delta\nu \cdot \frac{\lambda^2}{c_0} \qquad (4)$$

Hier steht c_0 für die Lichtgeschwindigkeit. Wenn man nun annimmt, dass die Laufzeitunterschiede höchstens ungefähr 25 % der Bitdauer T_B betragen sollte ergibt sich:

$$D_{acc} \cdot B \cdot \frac{\lambda^2}{c_0} \quad < \quad 0,25 \cdot T_B = \frac{1}{4 \cdot B} \qquad (5)$$

$$D_{acc} \cdot B^2 \quad < \quad \frac{c_0}{4 \cdot \lambda^2} \qquad (6)$$

An Gleichung 6 erkennt man, dass die Anforderungen an die maximal zulässige akkumulierte Dispersion quadratisch mit der Datenrate steigen. Wenn sich die Datenrate verdoppelt, kann man nur noch ein

Viertel der maximalen akkumulierten Dispersion zulassen. Aus diesem Grund muss die Dispersion in Systemen mit hoher Kanaldatenrate sehr genau angepasst werden. Mit *Dispersionstoleranz* bezeichnet man die maximal zulässige akkumulierte Dispersion, die man am Empfänger tolerieren kann. Man kann die Dispersionstoleranz von Übertragungssystemen jedoch durch einige Maßnahmen steigern.

2.2.1 Signalspektrum

Da die Dispersion zu Laufzeitunterschieden führt, die proportional zur spektralen Breite der Signale sind, kann man durch Wahl eines spektral schmalen Modulationsformat die Dispersionstoleranz erhöhen. Z. B. sind NRZ-Formate und insbesondere Duobinär (DB) spektral schmaler als vergleichbare RZ-Formate. Aus Gründen der Dispersionstoleranz werden auch sog. *Single-Side-Band-Formate* (*SSB*) und *Vestigial Single-Side-Band-Formate* (*V-SSB*) verwendet, bei denen nur eine Seite des optischen Spektrums übertragen wird. Da das optische Spektrum symmetrisch zur Trägerwellenlänge ist, muss man nur eine Hälfte des Spektrums übertragen, die immer noch die gesamte Information enthält. Allerdings lassen sich diese Modulationsformate nicht sehr einfach herstellen [**?**].

2.2.2 Phasenlage

Andere Modulationsformate nutzen die Phasenlage benachbarter Bits zur robusten Übertragung sogar bei starker Pulsverbreiterung durch Dispersion. Bei AMI (*Alternate Mark Inversion*) werden alle auftretenden Einsen (*Marks*) mit jeweils entgegen gesetztem Vorzeichen moduliert, so dass bei Pulsüberlappung sich diese Pulse auslöschen. Doubinär verhält sich ähnlich, wobei das Vorzeichen der Einsen von der Anzahl der vorangehenden Nullen bestimmt ist.

2.2.3 Kanaldatenrate

Eine andere Möglichkeit zur Erhöhung der Dispersionstoleranz ist die Verringerung der Kanaldatenrate durch Einführung höherwertiger Modulation. Hierbei werden statt binärer Signale zusätzliche Signalzustände (Signalpegel oder Phasenlagen) genutzt. Damit lassen sich pro Symbol mehr als ein Bit übertragen. Für die gleiche Datenrate benötigt man also eine geringere Kanalsymbolrate, die die spektrale Breite und de maximal zulässigen Laufzeitunterschiede vorgibt. Wie oben gezeigt, kann man durch Halbierung der Symbolrate die Dispersionstoleranz vervierfachen. Jedoch hat das Signal eine größere Anzahl an Signalzuständen, die dadurch dichter zusammen liegen und erhöhte Anforderungen an das Signal-zu-Rausch-Verhältnis stellen.

3 Nichtlineariäten

Der Brechungsindex in Glasfasern ist zu einem kleinen Anteil abhängig von der elektrischen Feldstärke. Über den Kerr-Effekt beeinflusst die optische Welle innerhalb der Faser den Brechungsindex. Dieser Effekt wirkt sich in unterschiedlichen Systemen und Konfigurationen unterschiedlich aus und führt zu Interkanal- sowie Intrakanal-Nichtlinearitäten. Dieses Verhalten wird durch den *Kerr-Effekt* ausgelöst, der den Zusammenhang zwischen dem zusätzlichen Anstieg der Brechzahl und der optischen Leistung beschreibt:

$$n' = n + \bar{n}_2 \frac{P}{A_{eff}}, \tag{7}$$

wobei n' den veränderten Brechungsindex beschreibt, $\bar{n}_2$ den nichtlinearen Brechzahlkoeffizienten (typ. $\bar{n}_2 \approx 3 \times 10^{-20}\, m^2/W$ in SiO_2-Gläsern), P die optische Leistung und A_{eff} die effektive Fläche. Das Verhältnis aus Leistung und effektiver Fläche beschreibt eine Art nichtlineare Leistungsdichte, je größer die effektive Fläche einer Faser ist, desto geringer sind ihre nichtlinearen Eigenschaften. Eine Änderung des Brechungsindex hat eine Variation der Ausbreitungskonstante β zur Folge, weshalb mittelbar die Phase des Signals variiert, die proportional zu $\phi \propto \beta L$ ansteigt. Daher beschreibt man die Brechzahländerung auch häufig über den Nichtlinearitätskoeffizienten $\bar{\gamma} = k_0 \bar{n}_2 / A_{eff}$:

$$\beta' = \beta + \bar{\gamma} P \tag{8}$$

Ein typischer Wert ist $\bar{\gamma} \approx 2\, W^{-1} km^{-1}$. Durch die optische Leistung erhöht sich somit die Ausbreitungskonstante und somit die Phase der Welle proportional zur Leistung und $\bar{\gamma}$. Wie oben gezeigt, ist die zusätzliche nichtlineare Phasenverschiebung folgendermaßen zu beschreiben:

$$\phi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta)\, dz = \int_0^L \bar{\gamma} P(z)\, dz = \bar{\gamma} P_{in} L_{eff} \tag{9}$$

Hier entspricht L_{eff} der effektiven Länge der Faser. Sie beschreibt die Länge, die eine Faser ohne Dämpfung haben muss, um die gleiche nichtlineare Phasenverschiebung zu verursachen:

$$L_{eff} = \int_0^L e^{-\alpha z}\, dz = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \approx \frac{1}{\alpha} \tag{10}$$

Man kann sich grob vorstellen, dass die Nichtilnearitäten in erster Linie in dieser Länge L_{eff} auftreten, danach ist die Leistung so stark abgeklungen, dass sich die Faser linear verhält. Eine weiter charakteristische Länge ist die sog. *nichtlineare Länge* $L_{NL} = 1/(P_{in}\bar{\gamma})$. Diese Länge besagt, wie weit die Welle sich ausbreiten muss, um eine nichtlineare Phasenverschiebung von $1\, rad$ zu erhalten. Das Verhältnis aus effektiver und nichtlinearer Länge L_{eff}/L_{NL} beschreibt die Stärke der Nichtlinearitäten in einer Faser:

$$\phi_{NL} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \approx \frac{\bar{\gamma} P_{in}}{\alpha} \tag{11}$$

Da nach jedem Verstärker der Signalpegel wieder angehoben ist, ergeben sich pro Verstärkersektion jeweils zusätzliche nichtlineare Phasendrehungen. Aus diesem Grund ist gerade bei langen Systemen und bei hohen Leistungen die Einfluss von Nichtlinearitäten am größten.
Erst das Zusammenspiel zwischen Dispersion und Nichtlinearität führt zu nennswerten Beeinträchtigungen der Übertragung. Die Auswirkungen hängen von der Bitrate, Dispersion, Kanalabstand etc. ab und können nicht pauschal beschrieben werden. Daher unterscheidet man verschiedene Übertragungsregimes, in denen jeweils unterschiedliche Effekte dominieren.

3.1 Interkanal-Effekte

Nichtlineare Effekte können sich zum Einen innerhalb eines Wellenlängenkanals auswirken, dann spricht man von Intrakanal-Effekten. Wenn nichtlineare Prozesse dazu führen, dass Wellenlängenkanäle sich

gegenseitig beeinflussen, spricht man von Interkanal-Effekten. Man unterscheidet zwischen Selbst-Phasen-modulation (SPM), Kreuz-Phasenmodulation (XPM) und Vierwellenmischung (FWM).
Bei *SPM* moduliert die Intensität der optischen Welle seine eigene Phase durch Variation des Brechungsindex. Dieser Effekt tritt vorrangig innerhalb der effektiven Länge L_{eff} auf, in der die Signalleistung noch genügend hoch ist.
Bei *XPM* wird die Phase des Signals durch die zusätzliche Intensität der optischen Welle in den benachbarten Kanälen moduliert. Wenn in benachbarten Kanälen sich jeweils Bits ausbreiten, beeinflussen sie sich gegenseitig. Bei Fasern mit Dispersion $D \neq 0$ breiten sich die Signale mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Je weiter die Kanäle von einander entfernt sind, desto größer ist der Unterschied der Geschwindigkeiten. Da sich vornehmlich innerhalb der effektiven Länge die Nichtlinearitäten auswirken, findet auch die Beeinflussung der Wellenlängenkanäle unter einander innerhalb dieser Länge statt. Bei großen Wellenlängenabständen laufen die Bits schneller an einander vorbei, und der Effekt der Beeinflussung mittelt sich über eine gewisse Anzahl von Bits. Bei hohen Kanaldatenraten sind die Kanalabstände, die i. A. proportional zur Datenrate sind (wegen der breiteren Spektren), größer. Es erfolgt eine stärkere Mittelung. Der Effekt ist sogar noch verstärkt, weil die Bitdauer antiproportional zur Kanaldatenrate ist. Durch diese Mittelung über sehr viele Bits ist der XPM-Effekt in Systemen mit hoher Kanaldatenrate ($\geq 40\,Gb/s$) vernachlässigbar.
Vierwellenmischung erzeugt neue Frequenzkomponenten, die durch die phasenrichtige Überlagerung der optischen Wellen im nichtlinearen Medium entstehen. Bei FWM ist die Phasenlage der Wellenlängenkanäle zu einander wichtig. Die Effizienz von Vierwellenmischung nimmt mit zunehmenden Kanalabständen auch ab. Bei genügend hoher Dispersion ist dieser Effekt in Systemen mit hoher Bitrate vernachlässigbar.

3.2 Intrakanal-Effekte

Intrakanal-Effekte entstehen auch durch den Kerr-Effekt. Jedoch handelt es sich hier um eine Beeinflussung benachbarter Pulse im Zeitbereich. Benachbarte Bits innerhalb eines Wellenlängenkanals können sich gegenseitig beeinflussen, indem sie sich durch Dispersion verbreitern und dadurch gegenseitig überlagern. Zum gleichen Zeitpunkt am gleichen Ort addieren sich die optischen Wellen und führen zu zusätzlichen nichtlinearen Phasendrehungen. Der Effekt, dass ein Puls seine eigene Phase moduliert, nennt man Intrakanal- oder *Intrapuls-SPM* (I-SPM). Die Beeinflussung benachbarter Bits durch Überlagerung der optischen Intensitäten und zusätzliche Phasendrehung durch den jeweils benachbarten Puls nennt man *Intrakanal-XPM* (I-XPM). Bei der Überlagerung benachbarter Bits kann die Phase der Bits so moduliert werden, dass nach der Dispersionskompensation Geisterpulse dort entstehen, wo ursprünglich kein Puls war. Das passiert vor allem bei einzelnen Nullen, die von mehreren Einsen umrahmt sind. Geisterpulse werden durch *Intrakanal-FWM* verursacht, der auf phasenrichtiger Überlagerung benachbarter Pulse beruht.

3.3 Regimes und Kenngrößen

Optische Übertragungssysteme kann man in verschiedene Regimes unterteilen. Die Systeme verhalten sich unterschiedlich und werden von verschiedenen Effekten dominiert, je nach Verhältnis zwischen

Dispersion und Nichtlinearitäten. Um das Verhalten optischer Übertragungssysteme einfacher beschreiben zu können, hat man einige charakteristische Größen eingeführt.
Die *effektive Länge* einer Faser beschreibt die Länge einer verlustlosen Faser, die dieselben Nichtlinearitäten verursachen würde. Man nimmt daher vereinfacht an, dass die nichtlinearen Effekte des Übertragungssys-tems nahezu ausschließlich innerhalb der effektiven Länge stattfinden. Die effektive Länge einer 80 km-langen Standard-Einmodenfaser mit $\alpha = 0,2\,dB/km$ entspricht ca. 20 km.

$$L_{eff} = \int_0^L e^{-\alpha z}\,\mathrm{d}z = \frac{1 - e^{-\alpha \cdot L}}{\alpha} \approx \frac{1}{\alpha} \tag{12}$$

Die *Dispersionslänge* beschreibt die Länge L_D, nach der ein chirpfreier Gauß-Puls sich um den Faktor $\sqrt{2}$ verbreitert hat. Hohe Dispersion äußert sich also in einer kurzen Dispersionslänge:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \tag{13}$$

Hier beschreibt T_0 die ursprüngliche Breite des Gauß-Pulses. Da die Pulsdauer in einem festen Verhältnis zur Bitrate steht ($T_0 \propto 1/B$) und $D \propto \beta_2$, kann kann den Ausdruck auch umformen:

$$L_D \propto \frac{1}{B^2 \cdot |D|} \tag{14}$$

Das Verhältnis aus Dispersionslänge und effektiver Länge beschreibt die relative Stärke zwischen dispersiven und nichtlinearen Effekten:

$$\frac{L_{eff}}{L_D} = \frac{|\beta_2|(1 - e^{-\alpha \cdot L})}{T_0^2 \alpha} \propto \frac{|\beta_2| \cdot B^2}{\alpha} \propto \frac{B^2}{\Delta f_d^2} \tag{15}$$

Hierbei ist $\Delta f_d = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi|\beta_2|}}$ die nichtlineare Diffusionsbandbreite, die beschreibt, wie stark Nichtlinearitäten innerhalb eines Systems mit einander wechselwirken [**?**]. Man kann zeigen, dass sich Systeme mit gleichem $B/\Delta f_d$ auch sehr ähnlich verhalten. Systeme mit gleicher Dämpfung und gleichem $D \cdot B^2$ verhalten sich prinzipiell auch ähnlich. Das gilt insbesondere für große Werte für $D \cdot B^2$ bzw. $B/\Delta f_d$, in denen die Dispersion so stark ist, dass vornehmlich Effekte innerhalb jedes einzelnen Wellenlängenkanals dominieren.
Schließlich beschreibt die *nichtlineare Länge* L_{NL} die Länge der Faser, die ein Puls sich ausbreiten muss, um eine maximale nichtlineare Phasenverschiebung von 1 rad zu erleiden. Auch hier entspricht eine kurze nichtlineare Länge einem starken Effekt. Je kürzer L_{NL}, desto nichtlinearer ist die Übertragung.

$$L_{NL} = \frac{1}{\bar{\gamma} P_0} \tag{16}$$

Mit Hilfe dieser Längen kann Systemen verschiedene grundlegende Eigenschaften zuordnen. Ein Vergleich der charakteristischen Längen ergibt folgende Regimes:

- $L \ll L_{NL}$: Die Faserlänge L ist deutlich kürzer als die nichtlineare Länge, so dass kaum Nichtlinearitäten auftreten können. Ist die Faserlänge außerdem noch deutlich kürzer als die Dispersionslänge ($L \ll L_D$), treten auch keine Pulsverbreiterungen auf. Ist die Dispersionslänge hingegen kurz verglichen mit der Faserlänge ($L \gg L_D$), so ist die Übertragung von Dispersion dominiert.

- $L \gg L_{NL}$: In diesem Falle treten nichtlineare Effekte auf. Ist die Faserlänge kürzer als die Dispersionslänge ($L \ll L_D$), sind Nichtlinearitäten dominierend. Im Falle einer kurzen Dispersionslänge ($L \gg L_D$) wird die Übertragung durch das Zusammenspiel von Nichtlinearitäten und Dispersion beeinflusst.

Anhand dieser Überlegungen kann man für die Übertragung drei Regime charakterisieren:

- *Solitonen-Regime*: In diesem Regime überwiegen die Nichtlinearitäten. Der Effekt der Dispersion ist klein im Verhältnis zu den Nichtlinearitäten. In diesem Regime dominieren Interkanal-Effekte und I-SPM ($B/\Delta f_d \ll 1$)

- *Pseudo-Lineare Übertragung*: In diesem Regime ist die Dispersion dominierend. Pulse verbreitern sich sehr schnell und überlagern sich mit sehr vielen benachbarten Bits ($B/\Delta f_d \ll 1$). Hier verhalten sich die Kanäle selbst bei WDM-Übertragung wie im Einkanalfall. Die Nichtlinearitäten wirken sich nur innerhalb des Kanals als Intrakanal-Effekt aus. In Pseudo-Linearen-Systemen sind I-XPM, bei sehr großer Pulsverbreiterung sogar fast ausschließlich I-FWM, dominierend. Hochbitratige Systeme verhalten sich tendenziell pseudo-nichtlinear, so dass Interkanal-Effekte nur eine geringe Rolle spielen.

- *Zwischenregime*: Im Bereich zwischen beiden oben genannten Regimen treten alle nichtlinearen Effekte in Kombination auf. Hochbitratige Systeme mit sehr niedriger Dispersion können in dieses Regime fallen, das i. A. nicht sehr vorteilhaft ist.

3.4 Dispersionsmanagement

Eine Übertragungsstrecke setzt sich i. A. aus mehreren Streckensegmenten (*Spans*) zusammen, die grundsätzlich aus Ver-stärker, der Übertragungsfaser und einem Dispersionskompensations-Modul bestehen. Der Verstärker soll die Verluste ausgleichen, die entlang der Übertragungsfaser und innerhalb der DCF entstehen. Die DCF soll die aufakkumulierte Dispersion entlang der Übertragungsfaser (teilweise) kompensieren (s. auch Abb. **??**). Teilweise werden auch zwei Verstärker genutzt, um die Verluste in der Übertragungsfaser und der DCF getrennt auszugleichen. Damit lassen sich die maximalen Leistungspegel am Anfang des Spans verringern.
Wie man die Dispersion entlang der Stecke kompensiert, hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Da akkumulierte Dispersion u. a. die Pulse breiter und somit die Maximalleistung kleiner werden lässt, ist ein gewisser Anteil an akkumulierter Dispersion entlang der Strecke oft wünschenswert in Hinsicht auf nichtlineare Effekte. Wieviel und wo die Dispersion kompensiert wird, beschreibt das *Dispersionsmanagement*. Man unterscheidet zwischen *Vorkompensation*, *Nachkompensation* und *Hybridkompensation*. Wie sich die Dispersion entlang der Strecke entwickelt, spiegelt sich durch das Dispersionsprofil der Strecke wider.

3.4.1 Vorkompensation

Bei der Vorkompensation wird die entlang der Übertragungsfaser sich aufakkumulierende Dispersion in jeder Sektion vorkompensiert. Im Span durchläuft das Signal also zuerst die DCF und danach die Übertragungsfaser. Dadurch dass die Dispersion der Übertragungsfaser vorkompensiert ist, hat das Signal eine gewisse akkumulierte Dispersion am Anfang der Strecke, die sich entlang der Faser wieder zu Null aufaddiert. Am Ende jeder Sektion und auch am Ende der gesamten Übertragungsstrecke akkumuliert sich die Dispersion zu Null, $D_{acc}(L) = 0$. Diese Kompensationsstrategie hat den Vorteil, dass innerhalb der effektiven Länge (am Anfang der Übetragungsstrecke) das Signal Dispersion akkumuliert hat:

$$D_{acc}(z) = -D_{vor} + \int_0^z D\,\mathrm{d}z' = -D_{vor} + D \cdot z \tag{17}$$

3.4.2 Nachkompensation

Bei der Nachkompensation wird am Ende einer jeden Sektion die akkumulierte Dispersion auf Null kompensiert. Das Signal geht ohne akkumulierte Dispersion in die Übertragungsfaser und durchläuft somit die effektive Länge der Faser nahezu unverzerrt.

$$D_{acc}(z) = \int_0^z D\,\mathrm{d}z' = D \cdot z \tag{18}$$

3.4.3 Hybridkompensation

Hybrid kompensierte Systeme bestehen aus Sektionen mit Vor- und Nachkompensation. Ein Teil r der Dispersion wird am Anfang der Sektion vorkompensiert, so dass das Signal die effektive Länge der Übertragungsfaser mit einer gewissen akkumulierten Dispersion durchläuft. Jedoch kann man durch die zusätzliche Nachkompensation sicher stellen, dass die maximale akkumulierte Dispersion innerhalb der effektiven Länge begrenzt wird.

$$D_{acc}(z) = -r \cdot D_{vor} + \int_0^z D\,\mathrm{d}z' = -r \cdot D_{vor} + D \cdot z \tag{19}$$

3.4.4 Residualdispersion

Zusätzlich zur Art der Kompensation pro Streckensegment kann man pro Sektion eine gewisse residuale Dispersion D_{res} zulassen, so dass die akkumulierte Dispersion am Anfang einer jeden Sektion variiert. Man kann zeigen, dass dadurch nichtlineare Effekte verringert werden können.

$$D_{acc,n}(z) = n \cdot D_{res} - r \cdot D_{vor} + \int_0^z D\,\mathrm{d}z' = n \cdot D_{res} - r \cdot D_{vor} + D \cdot z \tag{20}$$

Hier steht n für die n-te Sektion, wobei die Sektionen mit $n = 0$ beginnen.

3.4.5 Restdispersion

Es lässt sich zeigen, dass in Übertragungsstrecken, in denen nichtlineare Effekte auftreten, eine gewisse, akkumulierte Dispersion $D_{acc}(L) > 0$ am Ende der Strecke die Übertragungsqualität erhöht. Da Nichtlinearitäten ähnlich wie Chirp auf das Signal wirkt, der auch eine Phasenmodulation des Signals bewirkt, wird ein Teil der Dispersion durch die nichtlinearen Effekte kompensiert. Üblicherweise kompensiert man am Ende der Strecke nur ca. 99 % der akkumulierten Dispersion.

3.4.6 Optimales Dispersionmanagement

Man kann den Einfluss nichtlinearer Effekte in erster Näherung mit einem Störungsansatz beschreiben. Dabei wird das Signal am Ende der Übertragungsstrecke beschrieben durch das Signal am Anfang, da die linearen Effekte ja wieder vollkommen kompensiert werden, überlagert mit einem kleinen Anteil $\delta_{NL}(\omega, L)$, der entlang der Strecke entstanden ist.

$$\underline{\tilde{A}}(\omega, L) = C_1 \cdot \underline{\tilde{A}}(\omega, 0) + \delta_{NL}(\omega, L) \tag{21}$$

Hierbei beschreibt $\underline{\tilde{A}}(\omega, z)$ das optische Signal im Frequenzbereich am Ort z, $\delta_{NL}(\omega, z)$ steht für die zusätzlichen nichtlinearen Anteile im Frequenzbereich am Ort z. Der Vorfaktor $C_1 \approx 1$ beschreibt eine kleine Dämpfung, um die Energieerhaltung zu gewährleisten. Nun kann man annehmen, dass in jeder Fasersektion sich nichtlineare Anteil δ_{NL} auf das Signal aufaddieren. Es hat sich gezeigt, dass bei vollständiger Dispersionskompensation innerhalb der Fasersektion, das Signal in die effektive Länge der Faser mit derselben akkumulierten Dispersion geht. Die nichtlinearen Anteile sind somit immer gleich und addieren sich. Wenn man eine residuale Dispersion pro Streckenabschnitt zulässt, tritt das Signal in den einzelnen Spans mit unterschiedlicher akkumulierter Dispersion ein, so dass sich die Nichtlinearitäten unterscheiden und auch teilweise gegenseitig auslöschen können. Durch geschickte Wahl von Vorkompensation und residualer Dispersion pro Span kann man die Übertragungsqualität der Strecke verbessern. Ein Ansatz sieht vor, dass sowohl Leistungs- als auch Dispersionsprofil im Falle von Verstärkern am Anfang des Streckensegements so gestaltet werden, dass

$$\int_0^{z'} P_{in} \cdot e^{-\alpha z} \, \mathrm{d}z = \int_{z'}^{L} P_{in} \cdot e^{-\alpha z} \, \mathrm{d}z, \tag{22}$$

wobei $D_{vor} = -D \cdot z'$. Damit entstehen alle nichtlinearen Phasendrehungen einmal bei $D_{acc}(z)$ und bei $-D_{acc}(z)$, so dass sich eine Symmetrie ergibt, die sich positiv auswirkt, weil die nichtlinearen Anteile sich teilweise wieder auslöschen. Daraus ergibt sich für die Vorkompensation am Anfang der Übertragungsstrecke:

$$D_{vor} = -\frac{D}{\alpha} \ln\left(\frac{2}{1 + e^{-\alpha z}}\right) - \frac{N \cdot D_{res}}{2} \tag{23}$$

Weitere Verbesserung ergibt sich, wenn man am Ende der Strecke die akkumulierte Dispersion nicht vollständig zu Null kompensiert, sondern eine gewisse Restdispersion behält.

3.5 Toleranz gegenüber Nichtlinearitäten

Man kann die Toleranz gegenüber nichtlinearen Effekten durch geschicktes Systemdesign erhöhen. Indem man das Zusammenspiel zwischen Dispersion und Nichtlinearitäten geschickt wählt, lassen sich Systeme sehr robust gestalten und tolerant gegenüber hohen Leistungspegeln machen. Man kann die Leistungsdichte der Signale durch Wahl eines geeigneten Modulationsformats verringern. Bei Anwendung neuartiger Verstärkerkonzepte lässt sich der Leistungspegel entlang der Strecke besser regulieren, so dass man mit weniger durchschnittlicher Leistung auskommt und somit nichtlineare Effekte nur noch vermindert auftreten.

3.5.1 Modulationsformate

Es gibt Modulationsformate, die besonders tolerant gegenüber Nichtlinearitäten sind. Dazu gehören alle Modulationsformate, die die Leistung über einen gewissen Wellenlängenbereich verteilen und so die Leistungsdichte niedrig halten.
Ein anderes Konzept ist die Verwendung von *bitweise alternierender* Polarisation. Hierbei weisen jeweils zwei auf einander folgende Bits orthogonale Polarisation zu einander auf. Da die Effizienz nichtlinearer Effekte zweier optischer Wellen mit orthogonaler Polarisation nur 2/3 derer parallel polarisierter Wellen ist, lässt sich so ihr Einfluss verringern.
Differentiell phasenmodulierte RZ-Formate sind sogar in zweierlei Hinsicht tolerant gegen nichtlineare Effekte. Da I-SPM und I-XPM von der Intensität der Pulse bestimmt werden und die Intensität und Form der Pulse in RZ-DP(Q)SK-Formaten immer gleich sind, da die Information in der Phase kodiert ist, erleiden alle Bits dieselbe nichtlineare Phasenverschiebung ϕ_{NL}. Die Information ist jedoch in der differentiellen Phase, so dass eine für alle Bits konstante Phasenverschiebung nicht detektiert wird. RZ-DPSK wird daher in erster Linie durch I-FWM beeinträchtigt, dass auch von der Phasenlage der Bits zu einander abhängt. Zusätzlich dazu wird durch die balancierte Detektion am Empfänger weniger Leistung für die Übertragung benötigt, so dass weniger Nichtlinearitäten generiert werden bei gleicher Zuverlässigkeit.