

# Glasfasern für große Entfernungen

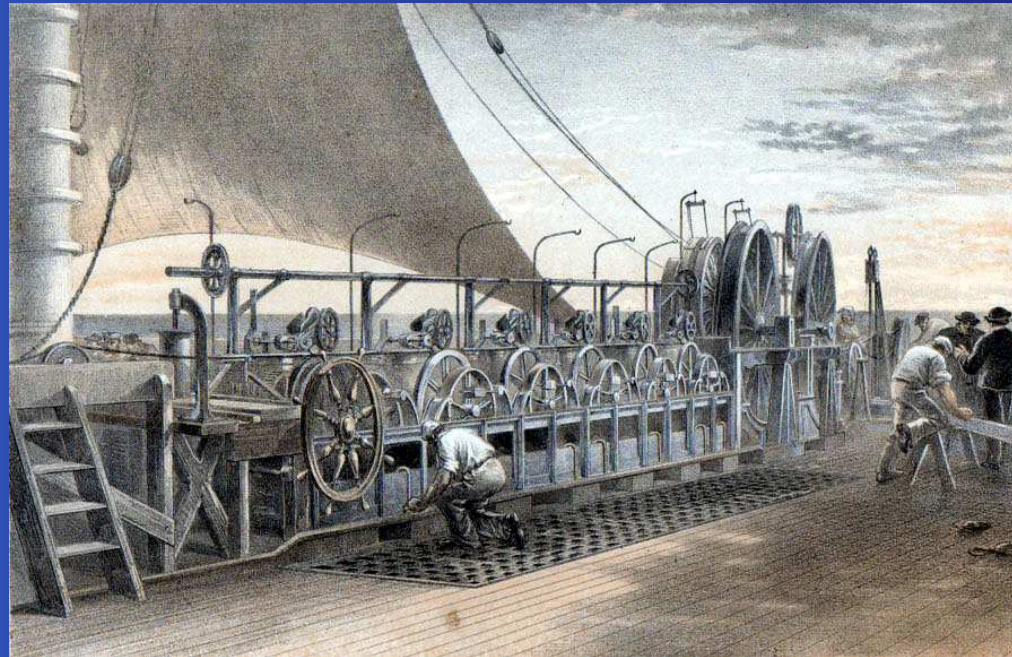
## *Dispersions- Management und optische Verstärker*

Marcus Tassler

# Einleitung

# Einleitung

## Entwicklung der Kommunikation über große Entfernungen am Beispiel der Transatlantik- verbindung



# Einleitung

## 1. Transatlantikkabel: 1858

### Technische Daten:

- Kapazität: 10 Wörter/Std
- Kosten: 350 000 Pfund

### Geschichte:

- 3 gescheiterte Versuche der Verlegung
- Ausfall nach 4 Wochen



# Einleitung

## 2. Transatlantikkabel: 1866

### Technische Daten:

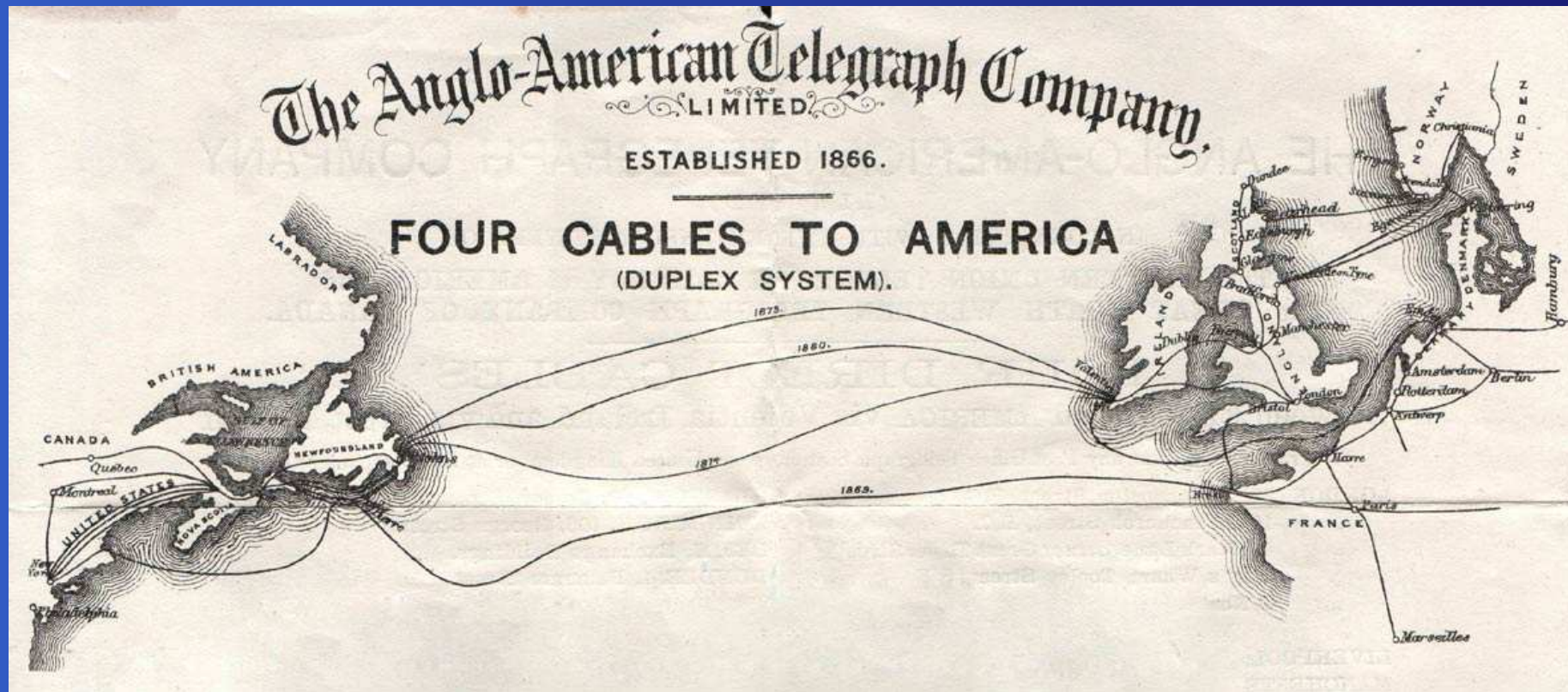
- Kapazität: 45 Wörter/Min
- Kosten eines Telegramms: 20 Pfund

(1. Versuch der Verlegung scheiterte)



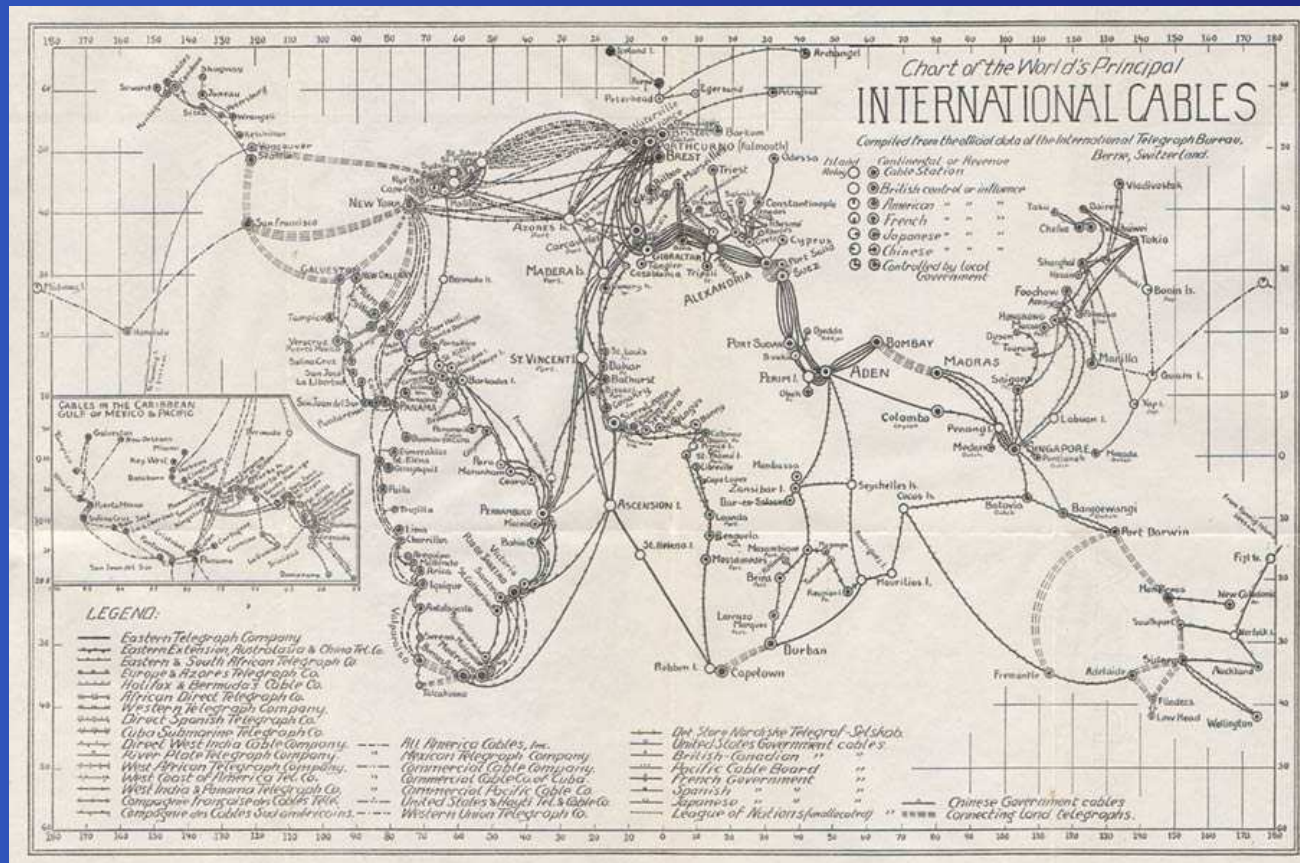
# Einleitung

## Transatlantikverbindungen 1880



# Einleitung

## Fernverbindungen 1924



## Entwicklung der Übertragungstechnik





# Einleitung

## Erstes Transatlantik- Telefonkabel: 1956

### Technische Daten:

- Kapazität: 500 kbit/s
- 36 Fernspreckkanäle
- 51 Verstärker im Abstand von je 70 km

(Abgeschaltet: 1978)



# Einleitung

## Erstes Transatlantik- Glasfaserkabel: 1988

### Technische Daten:

- Kapazität: 560 Mbit/s
- 37800 Verbindungen gleichzeitig
- Kosten: 350 Mio US\$  
(noch heute in Betrieb)



## Heutiger Stand

- 10 GBit/s pro Kanal
- 160 Kanäle pro Faser
- 72 Fasern pro Kabel

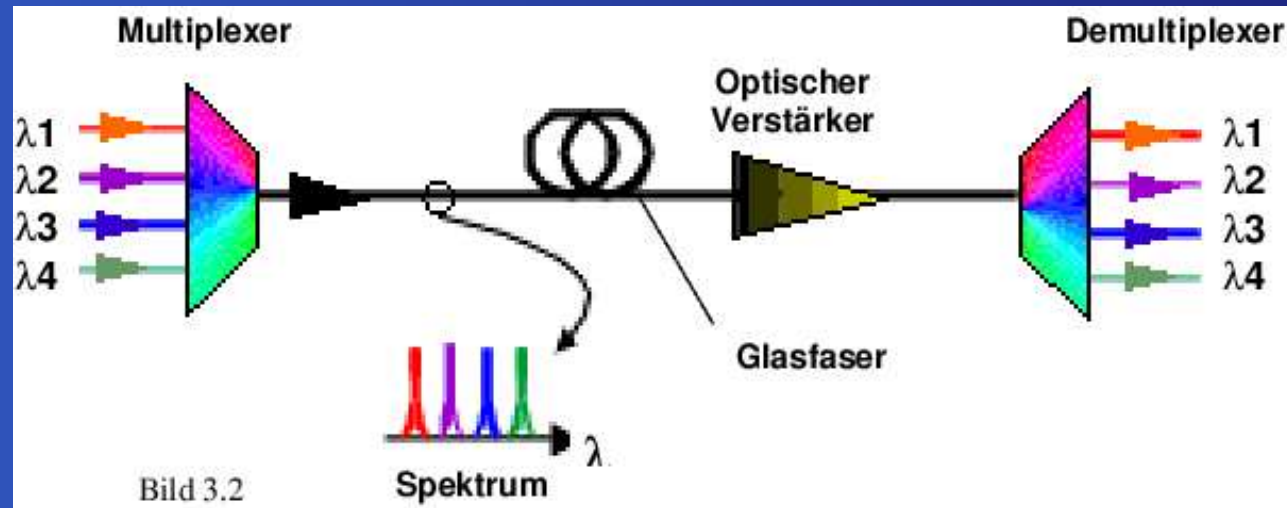
---

Insgesamt: 115,2 Tbit/s

**Angestrebt: 40 GBit/s**



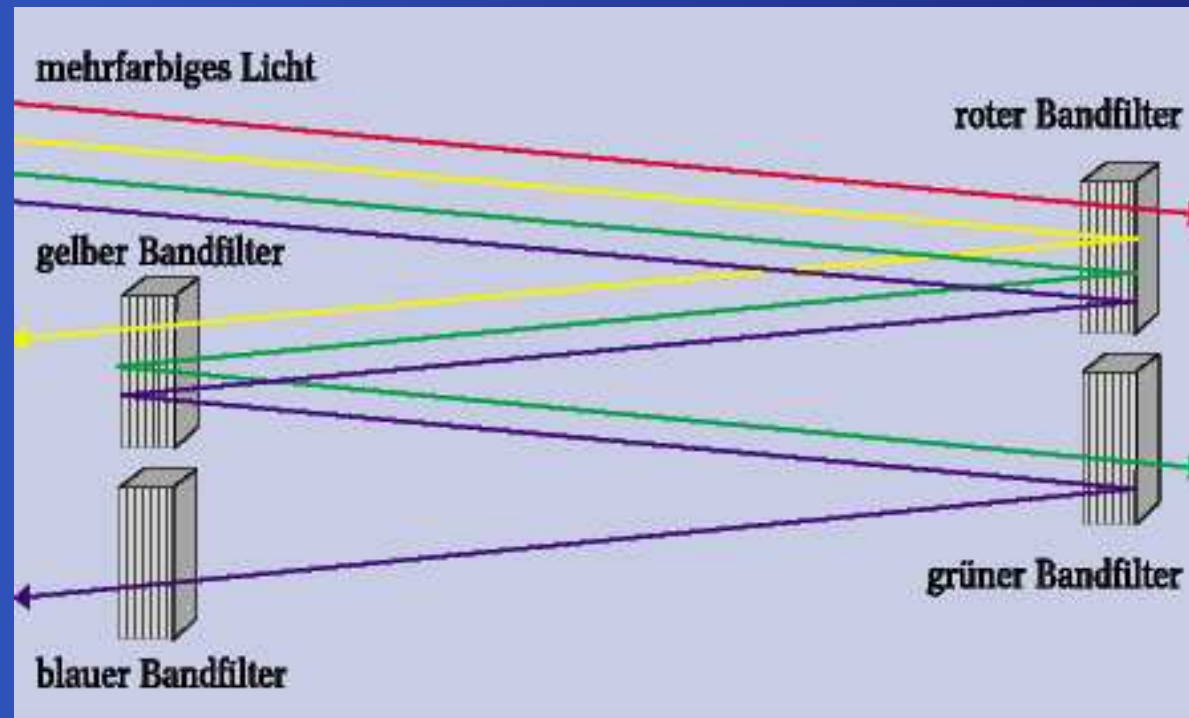
# Einleitung



Die Datenübertragung erfolgt heute mit **Single-Mode Glasfasern**, wobei im Rahmen der **WDM-Technik** verschiedene Wellenlängen zur Datenübertragung genutzt werden können.

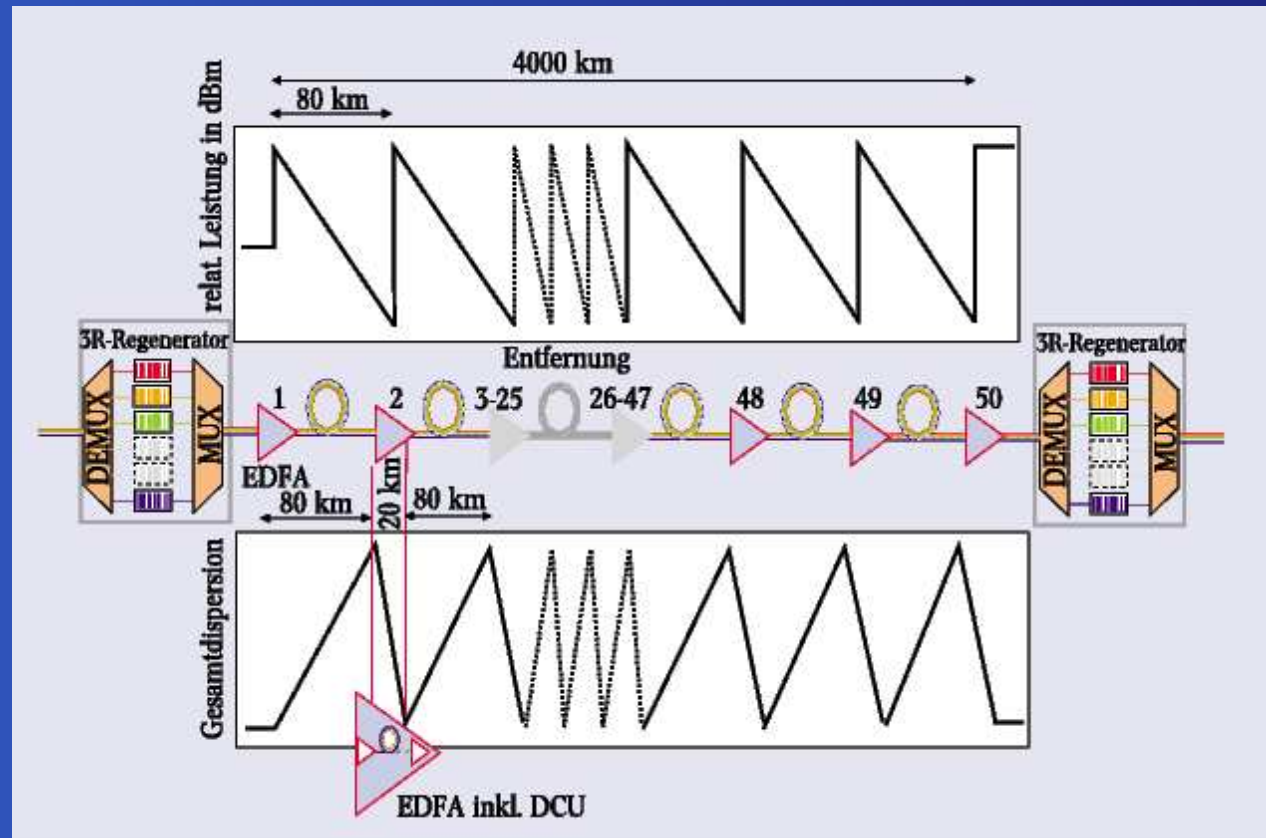
# Einleitung

## Mögliche Realisierung eines Multiplexers



# Einleitung

## Aufbau einer Übertragungsstrecke



# Dispersions- Management über große Distanzen

# Überblick



## Dispersionseffekte und -management



# Überblick

## Dispersionseffekte und -management

- Lineare Dispersionseffekte

# Überblick



## Dispersionseffekte und -management

- Lineare Dispersionseffekte
- Nichtlineare Dispersionseffekte

# Überblick

## Dispersionseffekte und -management

- Lineare Dispersionseffekte
- Nichtlineare Dispersionseffekte

## Solitonen in der Datenübertragung

# Überblick

## Dispersionseffekte und -management

- Lineare Dispersionseffekte
- Nichtlineare Dispersionseffekte

## Solitonen in der Datenübertragung

- Die nichtlineare Schrödinger- Gleichung für Glasfasern

# Überblick

## Dispersionseffekte und -management

- Lineare Dispersionseffekte
- Nichtlineare Dispersionseffekte

## Solitonen in der Datenübertragung

- Die nichtlineare Schrödinger- Gleichung für Glasfasern
- "Guiding- Centre" und Quasi-Solitonen

# Lineare Dispersion

## Chromatische Dispersion

- Chromatische Dispersion:  $D = \frac{1}{c} \frac{dn}{d\lambda}$
- Brechungsindex:  $n(\omega, k) = \frac{ck}{\omega}$

# Lineare Dispersion

## Chromatische Dispersion

- Chromatische Dispersion:  $D = \frac{1}{c} \frac{dn}{d\lambda}$
- Brechungsindex:  $n(\omega, k) = \frac{ck}{\omega}$

Zu unterscheiden sind folgende Effekte:

- **I. Wellenleiterdispersion**

**Ursache:** Unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen verschiedener

Frequenz nach  $\frac{\omega}{k} = \frac{c}{n(k, \omega)}$

# Lineare Dispersion

## Chromatische Dispersion

- Chromatische Dispersion:  $D = \frac{1}{c} \frac{dn}{d\lambda}$
- Brechungsindex:  $n(\omega, k) = \frac{ck}{\omega}$

Zu unterscheiden sind folgende Effekte:

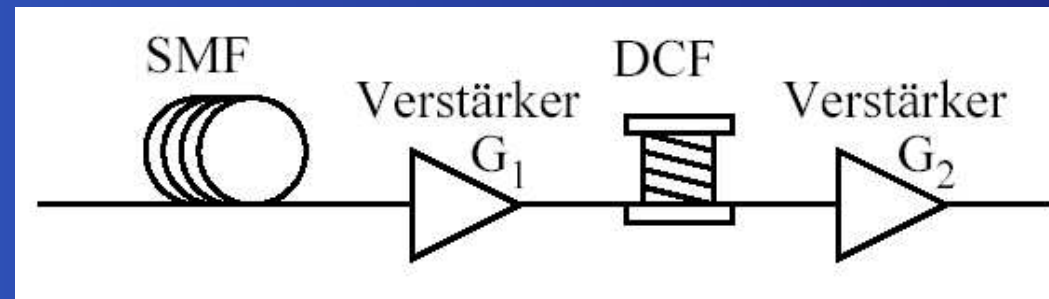
- **II. Materialdispersion**

Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl des Fasermaterials nach obiger Beziehung



# Lineare Dispersion

## Kompensation der chromatischen Dispersion

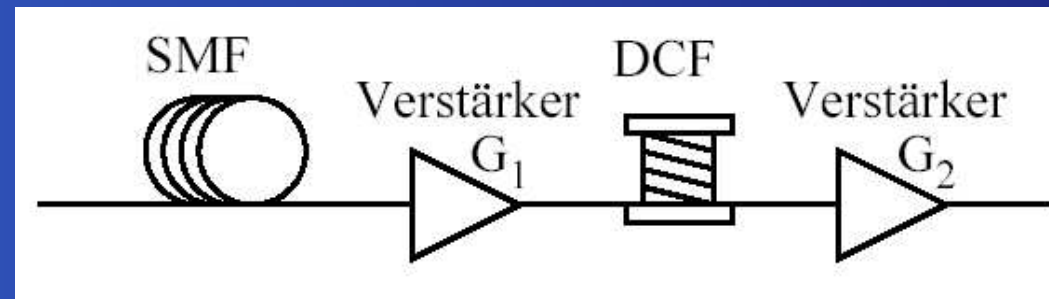


Die chromatische Dispersion kann durch die Hintereinanderschaltung von Lichtwellenleitern mit entgegengesetzter chromatischer Dispersion kompensiert werden.

**DCF: Dispersionskompensierende Faser**

# Lineare Dispersion

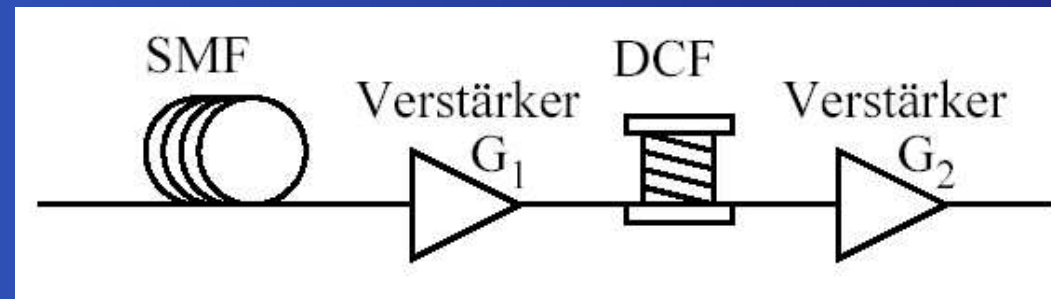
## Kompensation der chromatischen Dispersion



Bedingungen für vollständige Kompensation:

# Lineare Dispersion

## Kompensation der chromatischen Dispersion

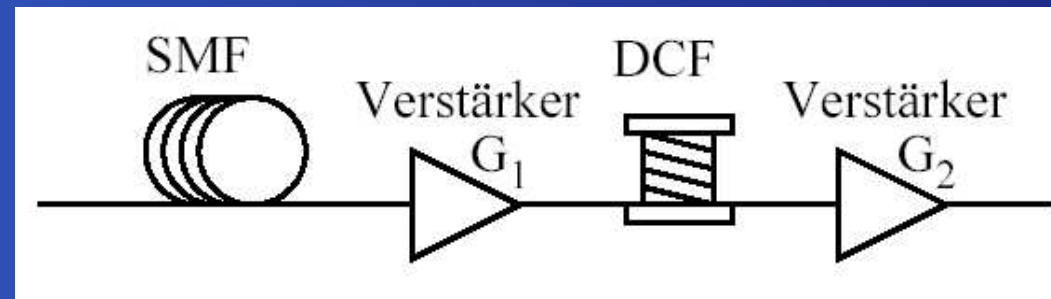


Bedingungen für vollständige Kompensation:

- $D_{SMF}L_{SMF} = D_{DCF}L_{DCF}$

# Lineare Dispersion

## Kompensation der chromatischen Dispersion



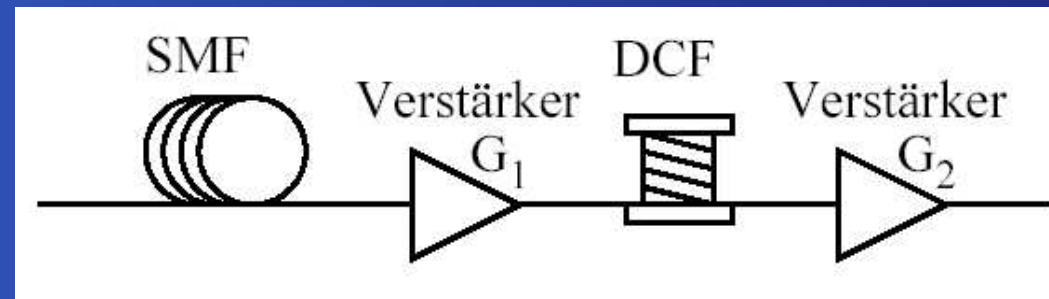
Bedingungen für vollständige Kompensation:

$$\bullet \quad D_{SMF} L_{SMF} = D_{DCF} L_{DCF}$$

**Dispersion:**  $D = \frac{1}{c} \frac{dn}{d\lambda}$

# Lineare Dispersion

## Kompensation der chromatischen Dispersion



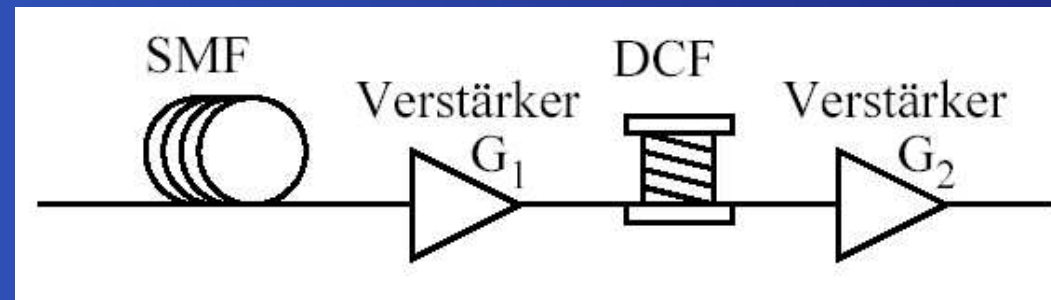
Bedingungen für vollständige Kompensation:

- $D_{SMF}L_{SMF} = D_{DCF}L_{DCF}$

Länge der Fasern

# Lineare Dispersion

## Kompensation der chromatischen Dispersion

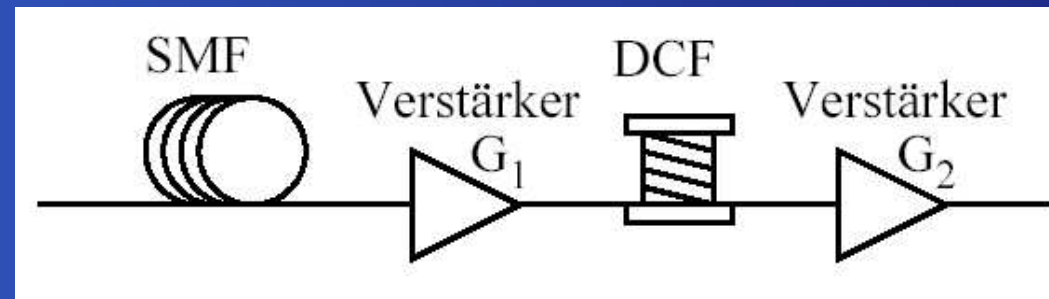


Bedingungen für vollständige Kompensation:

- $D_{SMF}L_{SMF} = D_{DCF}L_{DCF}$
- $S_{SMF}L_{SMF} = S_{DCF}L_{DCF}$

# Lineare Dispersion

## Kompensation der chromatischen Dispersion



Bedingungen für vollständige Kompensation:

- $D_{SMF}L_{SMF} = D_{DCF}L_{DCF}$

- $S_{SMF}L_{SMF} = S_{DCF}L_{DCF}$

Dispersionssteigung:  $S = \frac{dD}{d\lambda}$

# Nichtlineare Effekte

## Elastische Effekte

- Selbstphasenmodulation (SPM)
- Kreuzphasenmodulation (XPM)
- Vierwellenmischung (FWM)

## Inelastische Effekte

- Stimulierte Ramann- Streuung (SRS)
- Stimulierte Brillouin- Streuung (SBS)



# Nichtlineare Effekte

Die **elastischen Effekte** gehen auf den **Kerr-Effekt** zurück:

$$n(E) = n_0 + n_2 \cdot E^2$$

# Nichtlineare Effekte

Die **elastischen Effekte** gehen auf den **Kerr-Effekt** zurück:

$$n(E) = n_0 + n_2 \cdot E^2$$

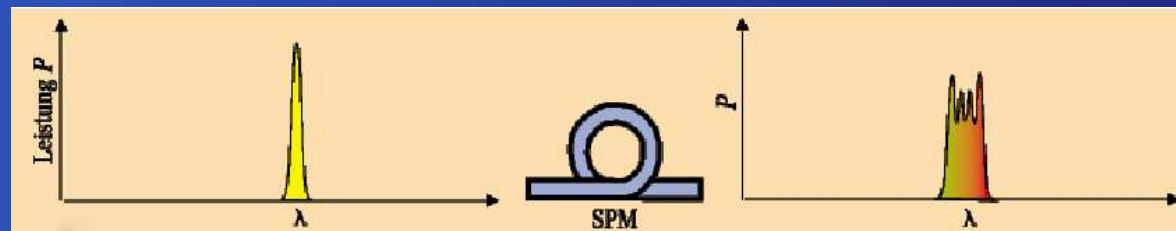
Über die elektrische Polarisierung  $\vec{P}$  im Lichtwellenleiter

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \underbrace{\epsilon_0 \chi_1 \vec{E}(\vec{r}, t)}_{\text{Lineare Polarisierung}} + \underbrace{\epsilon_0 \chi_3 \left| \vec{E}(\vec{r}, t) \right|^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}_{\text{Nichtlineare Polarisierung}}$$

folgt als Kerr-Koeffizient:  $n_2 = \frac{3}{4\epsilon_0 c n^2} \text{Re}(\chi_3)$

# Nichtlineare Effekte

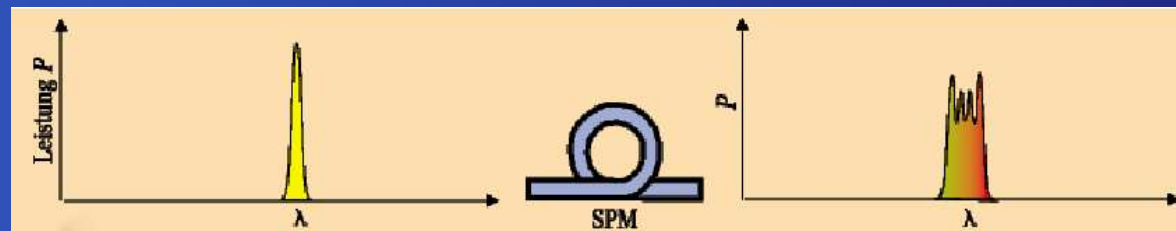
## Elastische Effekte: Selbstphasenmodulation



- Selbstphasenmodulation ist die Störung eines einzelnen WDM- Kanals über den Kerr-Effekt
- Im Bereich einer steigenden Pulsflanke wird die Frequenz eines Signals reduziert und im Bereich einer fallenden erhöht

# Nichtlineare Effekte

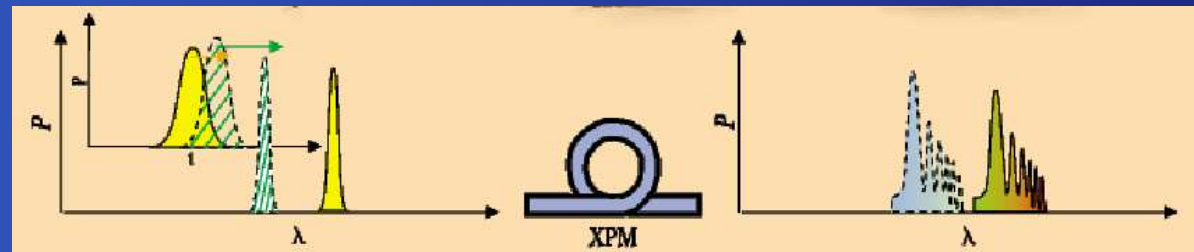
## Elastische Effekte: Selbstphasenmodulation



- Die Phasenmodulation eines Signals bewirkt bei normaler Dispersion eine symmetrische Verbreiterung des Spektrums
- Bei anormaler Dispersion tritt eine Kompression des Signals auf

# Nichtlineare Effekte

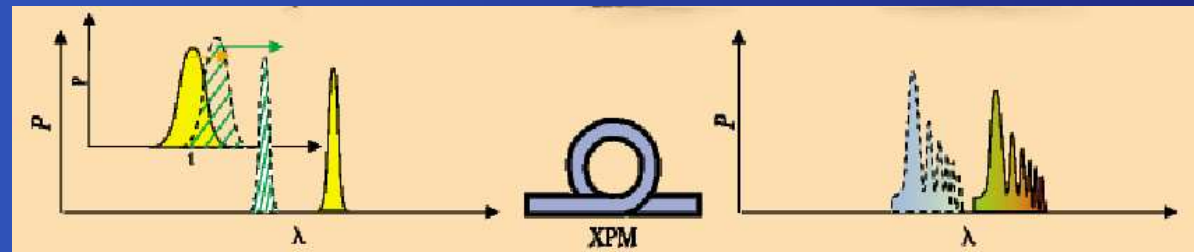
## Elastische Effekte: Kreuzphasenmodulation



- Bei Kreuzphasenmodulation wechselwirken zwei WDM Kanäle über den Kerr-Effekt
- Aufgrund von Dispersion überholen sich Signale zweier Kanäle und es kommt zur Wechselwirkung

# Nichtlineare Effekte

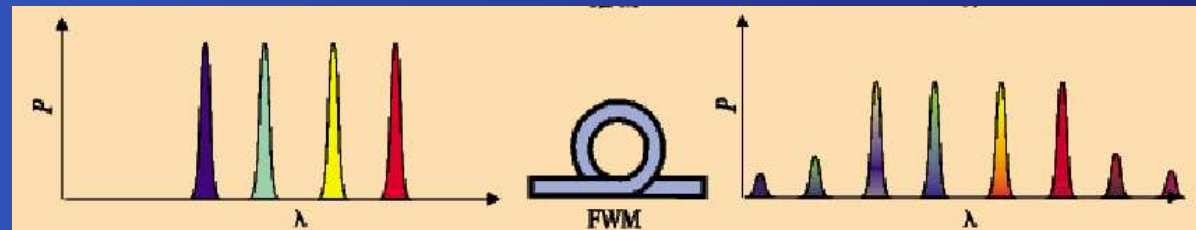
## Elastische Effekte: Kreuzphasenmodulation



- Je ähnlicher die Gruppengeschwindigkeit der Kanäle umso größer die Wechselwirkung

# Nichtlineare Effekte

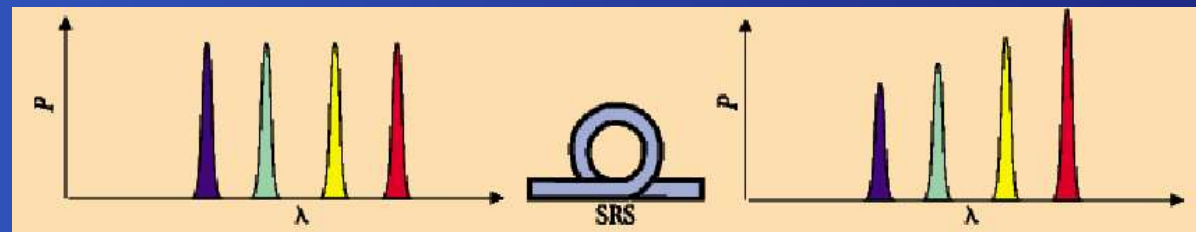
## Elastische Effekte: Vierwellenmischung



- Bei N Signalfrequenzen treten  $N^2(N - 1)/2$  Mischprodukte unterschiedlicher Intensität und Frequenz auf

# Nichtlineare Effekte

## Unelastische Effekte: Raman-Streuung

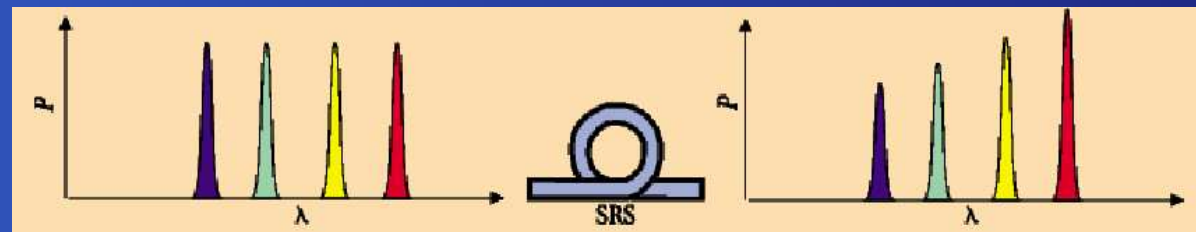


- Bei Anregung eines Atoms durch ein Photon kann ein Teil der Anregungsenergie als Phonon abgegeben werden. Die restliche Energie wird als Photon mit niedrigerer Frequenz abgegeben.



# Nichtlineare Effekte

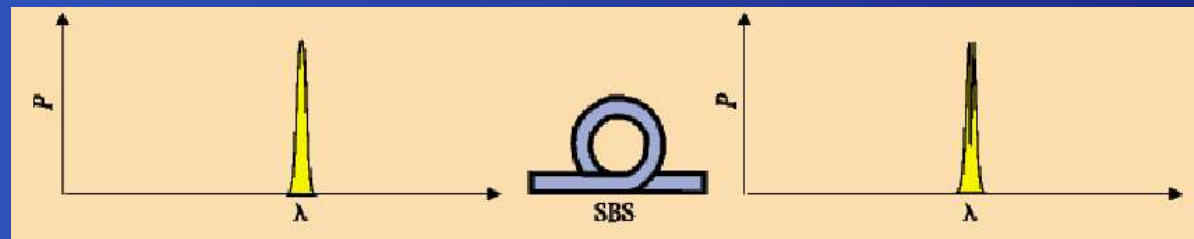
## Unelastische Effekte: Raman-Streuung



- Bei hohen Leistungen kommt es zur Besetzungsinversion und zu stimulierter Raman-Streuung

# Nichtlineare Effekte

## Unelastische Effekte: Brillouin- Streuung



- Tritt auf bei Streuung von Photonen an Phononen des verwendeten Mediums
- Das ausfallende Photon besitzt eine um die Frequenz des Phonons gegenüber dem einfallenden Photon erniedrigte Frequenz und wird in entgegengesetzte Richtung reflektiert

# NLSE



## Brechungsindex in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

# NLSE



**Brechungsindex** in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

**Kerr- Koeffizient**

# NLSE



## Brechungsindex in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

**Brechungsindex** in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

**Taylorentwicklung** der Wellenzahl  $k$ :

$$k - k_0 = k'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{k''(\omega_0)}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\partial l}{\partial |E|^2}|E|^2$$

# NLSE



**Brechungsindex** in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

**Taylorentwicklung** der Wellenzahl  $k$ :

$$k - k_0 = k'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{k''(\omega_0)}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\partial l}{\partial |E|^2}|E|^2$$

**Operatoren:**  $(k - k_0)E \rightarrow i\frac{\partial E}{\partial z}$ ,  $(\omega - \omega_0)E \rightarrow -i\frac{\partial E}{\partial t}$

# NLSE



**Brechungsindex** in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

**Taylorentwicklung** der Wellenzahl  $k$ :

$$k - k_0 = k'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{k''(\omega_0)}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\partial k}{\partial |E|^2}|E|^2$$

**Operatoren:**  $(k - k_0)E \rightarrow i\frac{\partial E}{\partial z}$ ,  $(\omega - \omega_0)E \rightarrow -i\frac{\partial E}{\partial t}$

$$\left[ i \left( \frac{\partial}{\partial z} + k' \frac{\partial}{\partial t} \right) - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial k}{\partial |E|^2} |E|^2 \right] E = 0$$



**Brechungsindex** in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

**Taylorentwicklung** der Wellenzahl  $k$ :

$$k - k_0 = k'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{k''(\omega_0)}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\partial k}{\partial |E|^2}|E|^2$$

**Operatoren:**  $(k - k_0)E \rightarrow i\frac{\partial E}{\partial z}$ ,  $(\omega - \omega_0)E \rightarrow -i\frac{\partial E}{\partial t}$

$$\left[ i \left( \frac{\partial}{\partial z} + k' \frac{\partial}{\partial t} \right) - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial k}{\partial |E|^2} |E|^2 \right] E = 0$$

**Einsetzen** von  $k' \approx \frac{n_0(\omega_0)}{c}$ ,  $k'' \approx \frac{2}{c} \frac{\partial n_0}{\partial \omega_0}$ ,  $\frac{\partial k}{\partial |E|^2} \approx \frac{\omega_0 n_2}{c}$

**Brechungsindex** in Glasfasern:

$$n = \frac{ck}{\omega} = n_0(\omega) + n_2|E|^2$$

**Taylorentwicklung** der Wellenzahl  $k$ :

$$k - k_0 = k'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{k''(\omega_0)}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\partial k}{\partial |E|^2}|E|^2$$

**Operatoren:**  $(k - k_0)E \rightarrow i\frac{\partial E}{\partial z}$ ,  $(\omega - \omega_0)E \rightarrow -i\frac{\partial E}{\partial t}$

$$\left[ i \left( \frac{\partial}{\partial z} + k' \frac{\partial}{\partial t} \right) - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial k}{\partial |E|^2} |E|^2 \right] E = 0$$

**Einsetzen** von  $k' \approx \frac{n_0(\omega_0)}{c}$ ,  $k'' \approx \frac{2}{c} \frac{\partial n_0}{\partial \omega_0}$ ,  $\frac{\partial k}{\partial |E|^2} \approx \frac{\omega_0 n_2}{c}$

$$\boxed{ i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + \frac{\omega_0 n_2}{c} |E|^2 E = 0 } \quad \text{mit } \tau = t - k'z$$

# NLSE



$$\text{NLSE: } i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + \frac{\omega_0 n_2}{c} |E|^2 E = 0$$

# NLSE



$$\text{NLSE: } i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + \frac{\omega_0 n_2}{c} |E|^2 E = 0$$

$$\text{Es gilt: } k'' = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$$

# NLSE

$$\text{NLSE: } i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + \frac{\omega_0 n_2}{c} |E|^2 E = 0$$

$$\text{Es gilt: } k'' = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$$

$$\text{Dispersionsdistanz: } z_0 = \frac{t_0}{|k''|}$$

# NLSE

$$\text{NLSE: } i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + \frac{\omega_0 n_2}{c} |E|^2 E = 0$$

$$\text{Es gilt: } k'' = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$$

$$\text{Dispersionsdistanz: } z_0 = \frac{t_0}{|k''|}$$

$$\text{Pulsdauer: } t_0$$

# NLSE



$$\text{NLSE: } i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + \frac{\omega_0 n_2}{c} |E|^2 E = 0$$

$$\text{Es gilt: } k'' = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$$

$$\text{Dispersionsdistanz: } z_0 = \frac{t_0}{|k''|}$$

$$\text{Pulsdauer: } t_0$$

$$\text{Mit } T = \frac{\tau}{t_0}, Z = \frac{z}{z_0} \text{ und } q = \sqrt{\frac{\omega_0 n_2 z_0}{c}} E \text{ folgt:}$$

$$\text{NLSE: } \boxed{i \frac{\partial q}{\partial Z} \pm \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = 0}$$

+:  $D > 0$  (Anormale Dispersion), -:  $D < 0$  (Normale Dispersion)

# NLSE



## Lösungen der NLSE

- $D > 0$ : Helles Soliton

$$\eta \operatorname{sech}[\eta(T + \kappa Z - T_0)] e^{-i(\kappa T + \frac{(\kappa^2 - \eta^2)Z}{2} + \sigma)}$$

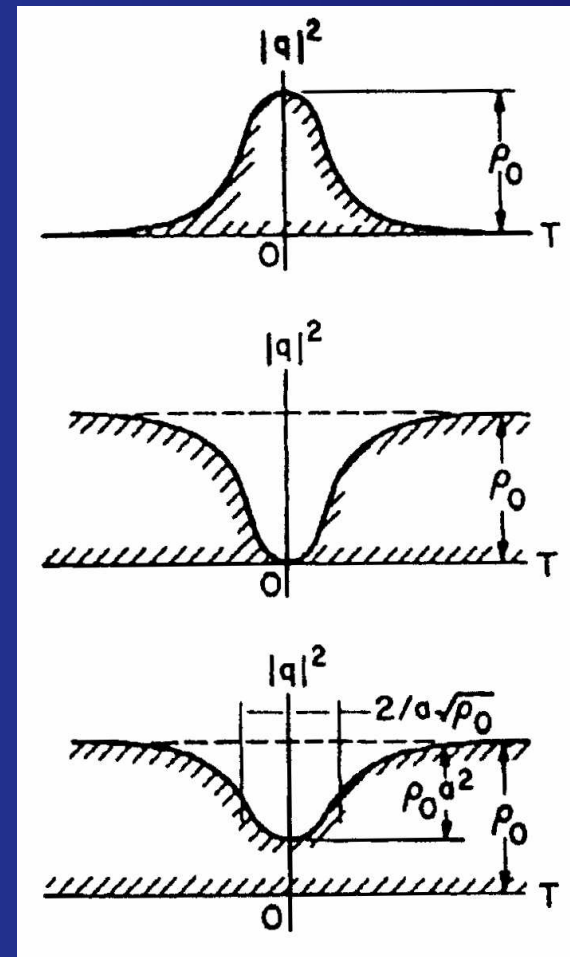
- $D < 0$ : Dunkles Soliton

$$\eta \operatorname{sech}[\eta(T + \kappa Z - T_0)] e^{-i(\kappa T + \frac{\kappa^2 Z}{2} - \sigma_0 - \sigma)}$$

**Beide:**  $\eta$ : Amplitude,  $\kappa$ : Frequenzverschiebung,  $\sigma$ : Phase

**Dunkles Soliton:**  $a$ : Tiefe des Solitons,

$$\sigma_0 = \eta T \sqrt{1 - a^2} + \tan^{-1} \left[ \frac{a \tanh(\eta a T)}{\sqrt{1 - a^2}} \right] - \frac{\eta^2 (3 - a^2) Z}{2}$$





# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

**d(Z): ortsabhängiger Dispersionsterm**

# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

**$\Gamma$ : Dämpfungsterm**

# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

**$Z_a$ : Verstärkerabstand**

# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

$\alpha$ : Verstärkung mit  $\alpha = e^{\Gamma Z_a} - 1$



# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

Mit  $a(Z) = \sqrt{\frac{2\Gamma Z_a}{1 - e^{-2\Gamma Z_a}}} e^{-\Gamma(Z - nZ_a)}$  und  $u = \frac{q}{a}$  folgt:

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = i \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + ia^2(Z) |u|^2 u$$

# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

Mit  $a(Z) = \sqrt{\frac{2\Gamma Z_a}{1 - e^{-2\Gamma Z_a}}} e^{-\Gamma(Z - nZ_a)}$  und  $u = \frac{q}{a}$  folgt:

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = i \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + ia^2(Z) |u|^2 u$$

$$u = e^{(\phi \cdot \nabla) \nu} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial \nu}{\partial Z} = \frac{i}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial T^2} + i |\nu|^2 \nu + O(Z_a^2)}$$

# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

Mit  $a(Z) = \sqrt{\frac{2\Gamma Z_a}{1 - e^{-2\Gamma Z_a}}} e^{-\Gamma(Z - nZ_a)}$  und  $u = \frac{q}{a}$  folgt:

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = i \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + ia^2(Z) |u|^2 u$$

$$u = e^{(\phi \cdot \nabla) \nu} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial \nu}{\partial Z} = \frac{i}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial T^2} + i |\nu|^2 \nu + O(Z_a^2)}$$

**Lie-Transformation**



# Guiding Centre Soliton

**Nichtlineare Schrödinger Gleichung für gedämpfte Fasern mit periodische Verstärkung**

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + i\alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(T, nZ_a)$$

Mit  $a(Z) = \sqrt{\frac{2\Gamma Z_a}{1 - e^{-2\Gamma Z_a}}} e^{-\Gamma(Z - nZ_a)}$  und  $u = \frac{q}{a}$  folgt:

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = i \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + ia^2(Z) |u|^2 u$$

$$u = e^{(\phi \cdot \nabla) \nu} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial \nu}{\partial Z} = \frac{i}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial T^2} + i |\nu|^2 \nu + O(Z_a^2)}$$

**Kleiner Parameter mit  $Z_a = z_a/z_0$**

# Quasi-Solitonen

**Ausgangspunkt:** 
$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + a^2(Z) |u|^2 u = 0$$



# Quasi-Solitonen

**Ausgangspunkt:**  $i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + a^2(Z) |u|^2 u = 0$

Mit  $Z' = \int_0^Z a^2(Z) dZ$  und  $d_e(Z') = \frac{d(Z)}{a^2(Z)}$  folgt:

$$i \frac{\partial u}{\partial Z'} + \frac{d_e(Z')}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + |u|^2 u = 0$$



# Quasi-Solitonen

**Ausgangspunkt:**  $i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + a^2(Z) |u|^2 u = 0$

Mit  $Z' = \int_0^Z a^2(Z) dZ$  und  $d_e(Z') = \frac{d(Z)}{a^2(Z)}$  folgt:

$$i \frac{\partial u}{\partial Z'} + \frac{d_e(Z')}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + |u|^2 u = 0$$

Über  $u = \sqrt{p(Z)} \nu(p(Z')T, Z') e^{i \frac{c(Z')}{2} T^2}$  folgt weiter:

$$i \frac{\partial \nu}{\partial Z'} + \frac{d_e p^2}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial \tau^2} + p |\nu|^2 \nu = \frac{K_1 \tau^2 p}{2} \nu$$

mit:  $\tau = pT \quad \frac{dp}{dZ} = -C p d_e \quad K_1 = \frac{dC/dZ + C^2 d_e}{p^3}$

# Quasi-Solitonen

**Ausgangspunkt:**  $i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + a^2(Z) |u|^2 u = 0$

Mit  $Z' = \int_0^Z a^2(Z) dZ$  und  $d_e(Z') = \frac{d(Z)}{a^2(Z)}$  folgt:

$$i \frac{\partial u}{\partial Z'} + \frac{d_e(Z')}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + |u|^2 u = 0$$

Über  $u = \sqrt{p(Z)} \nu(p(Z')T, Z') e^{i \frac{c(Z')}{2} T^2}$  folgt weiter:

$$i \frac{\partial \nu}{\partial Z'} + \frac{d_e p^2}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial \tau^2} + p |\nu|^2 \nu = \frac{K_1 \tau^2 p}{2} \nu$$

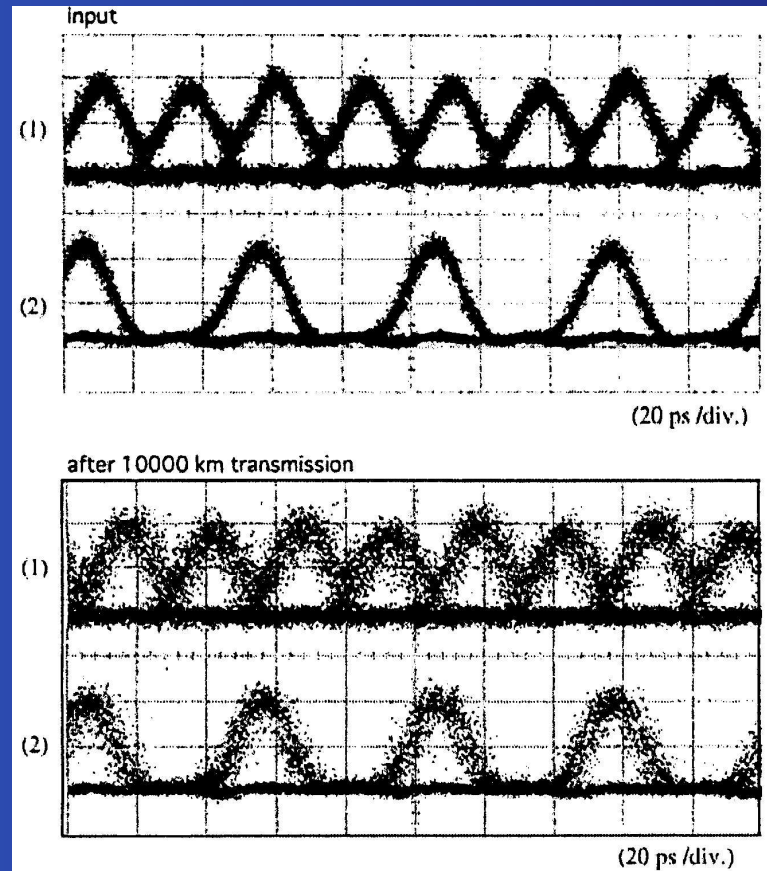
mit:  $\tau = pT \quad \frac{dp}{dZ} = -C p d_e \quad K_1 = \frac{dC/dZ + C^2 d_e}{p^3}$

Bei einem **Dispersionsprofil** mit  $K_1 = \text{const}$ ,  $d_e p = 1$  folgt:

$$i \frac{\partial \nu}{\partial Z''} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial \tau^2} + (|\nu|^2 - \frac{K_1 \tau^2}{2}) \nu = 0$$

# Quasi-Solitonen

## DMS- Übertragung mit 40 GB/s über 10 000 km



## Schwierigkeiten bei der Datenübertragung mit Solitonen

- Wechselwirkung der Solitonen
- Nutzung mehrerer Kanäle
- Propagation der Solitonen in Verstärkern
- Störung der Solitonen durch Rauschen

# Optische Verstärker in Glasfasernetzen



# Überblick

## Faserverstärker

# Überblick

## Faserverstärker

- Erbium dotierte Faserverstärker

## Faserverstärker

- Erbium dotierte Faserverstärker
- Verstärkung, Bandbreite und Rauschen

## Faserverstärker

- Erbium dotierte Faserverstärker
- Verstärkung, Bandbreite und Rauschen
- Verstärkersolitonen

# Überblick

## Faserverstärker

- Erbium dotierte Faserverstärker
- Verstärkung, Bandbreite und Rauschen
- Verstärkersolitonen

## Zukünftige optische Verstärker

# Überblick

## Faserverstärker

- Erbium dotierte Faserverstärker
- Verstärkung, Bandbreite und Rauschen
- Verstärkersolitonen

## Zukünftige optische Verstärker

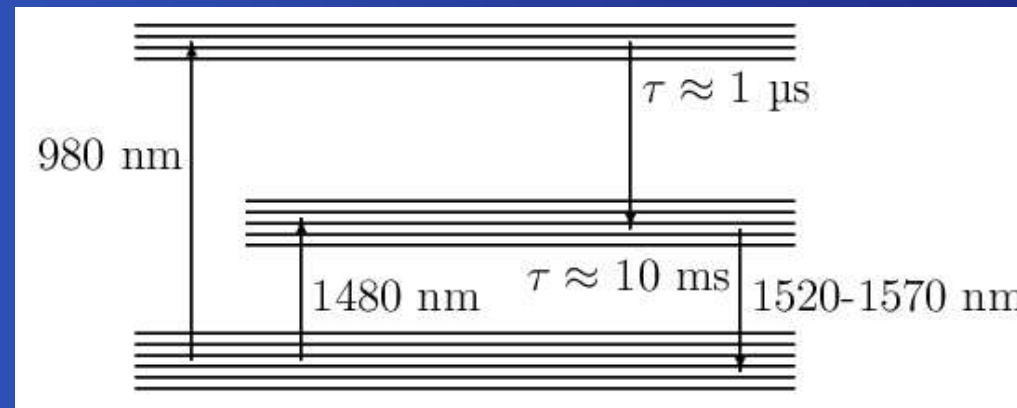
- Halbleiterverstärker (SOA)

# EDFA

## Erbium dotierte Faserverstärker (EDFA)



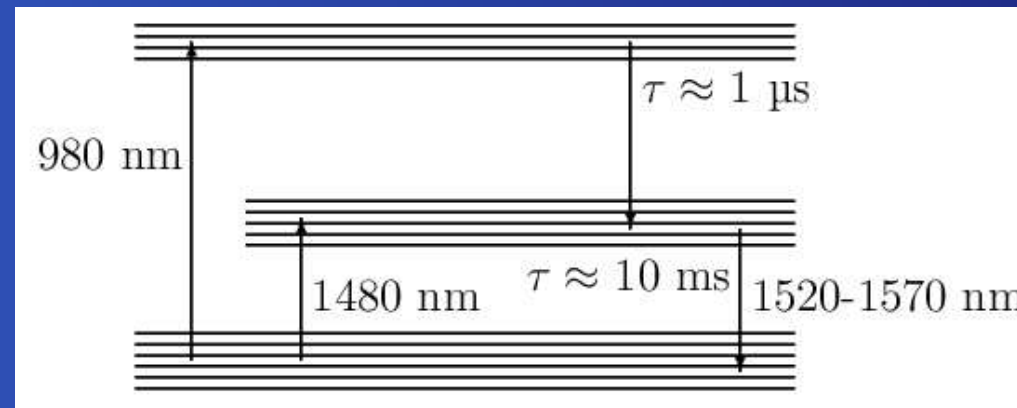
# EDFA: Verstärkung



- Ein Pumplaser mit  $\lambda = 980 nm$  hebt Elektronen aus dem Grundzustand in ein höheres Niveau.
- Die Elektronen fallen nach etwa  $1 \mu s$  auf ein Zwischenniveau.

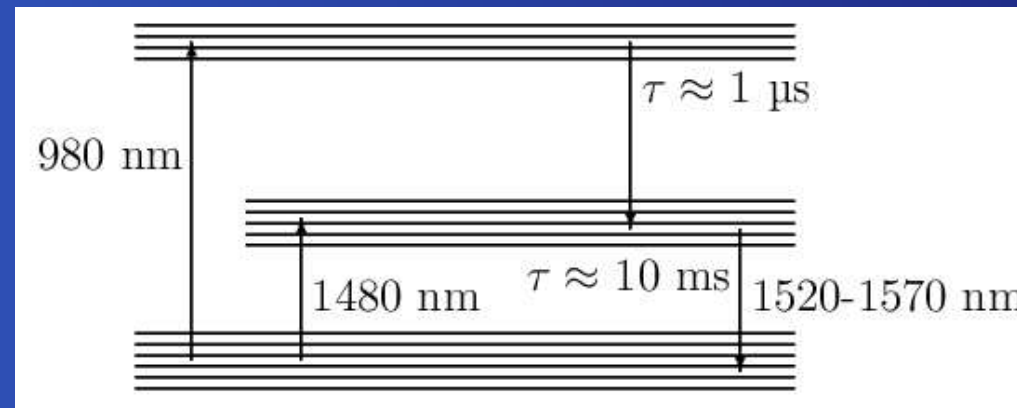


# EDFA: Verstärkung



- Zwischen dem Grundzustand und dem Zwischenzustand kommt es zur Besetzungsinversion.
- Ein eingespeistes Signal bewirkt stimulierte Emission und wird so verstärkt.

# EDFA: Verstärkung



- Der Zwischenzustand wird häufig auch über einen Pumplaser mit  $\lambda = 1480 \text{ nm}$  direkt besetzt.

# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserverstärker

- Verstärkungskoeffizient

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P/P_s}$$

# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserverstärker

- Verstärkungskoeffizient

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P/P_s}$$

**Verstärkungsmaximum**

# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserverstärker

- Verstärkungskoeffizient

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P/P_s}$$

Übergangsfrequenz

# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserverstärker

- Verstärkungskoeffizient

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P/P_s}$$

Dipolrelaxationszeit

# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserverstärker

- Verstärkungskoeffizient

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P/P_s}$$

Eingangsleistung

# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserverstärker

- Verstärkungskoeffizient

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P/P_s}$$

Sättigungsleistung



# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserverstärker

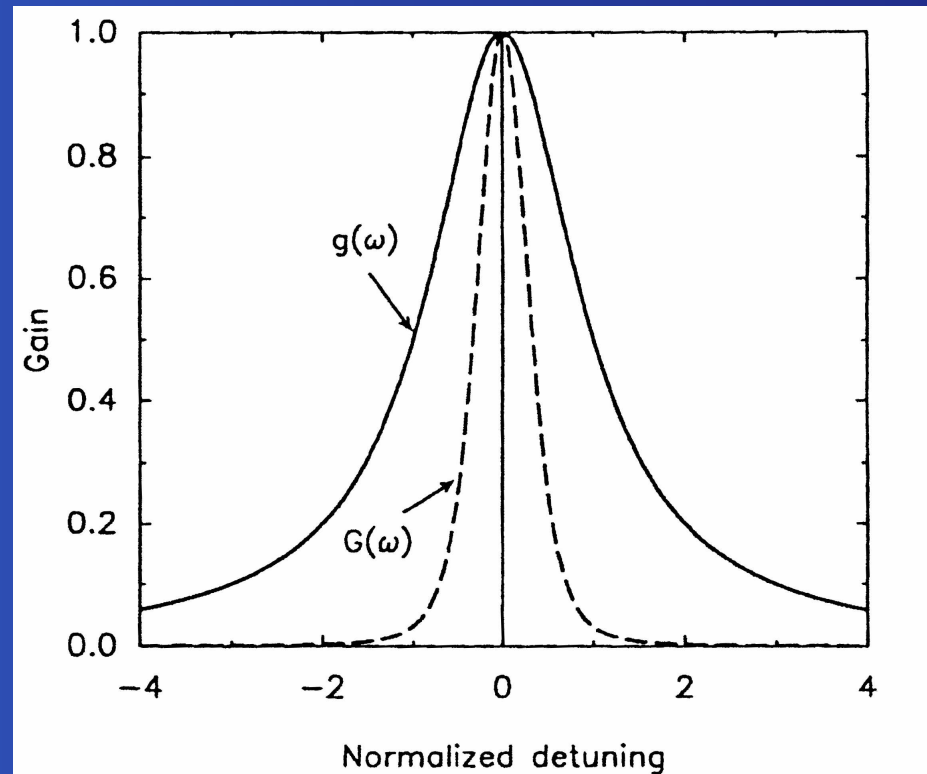
- Verstärkungskoeffizient

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P/P_s}$$

- Verstärkung  $G = e^{\int_0^L g(z) dz}$

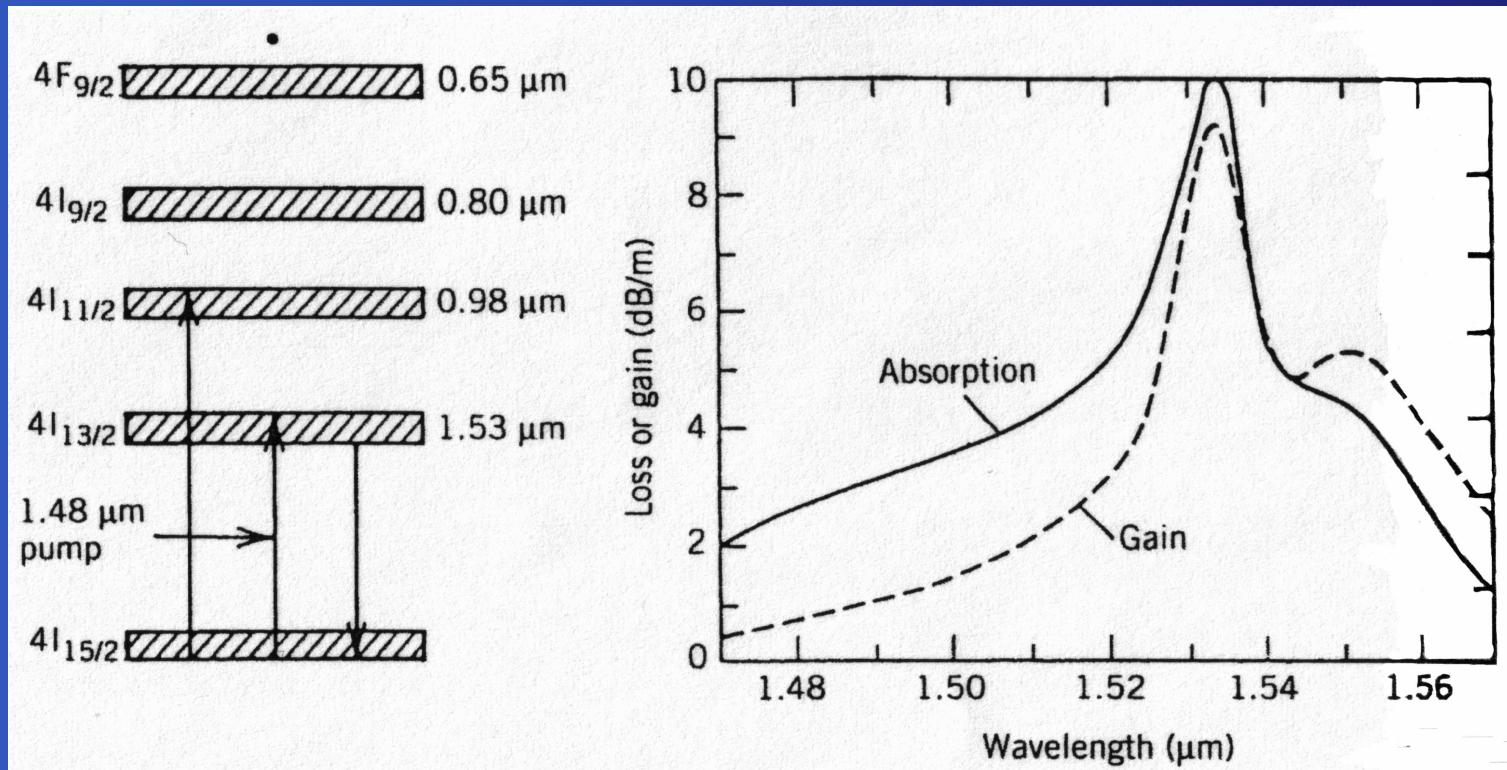
# EDFA: Verstärkung

## Verstärkung und Bandbreite bei einem 2 Niveau-Faserververstärker



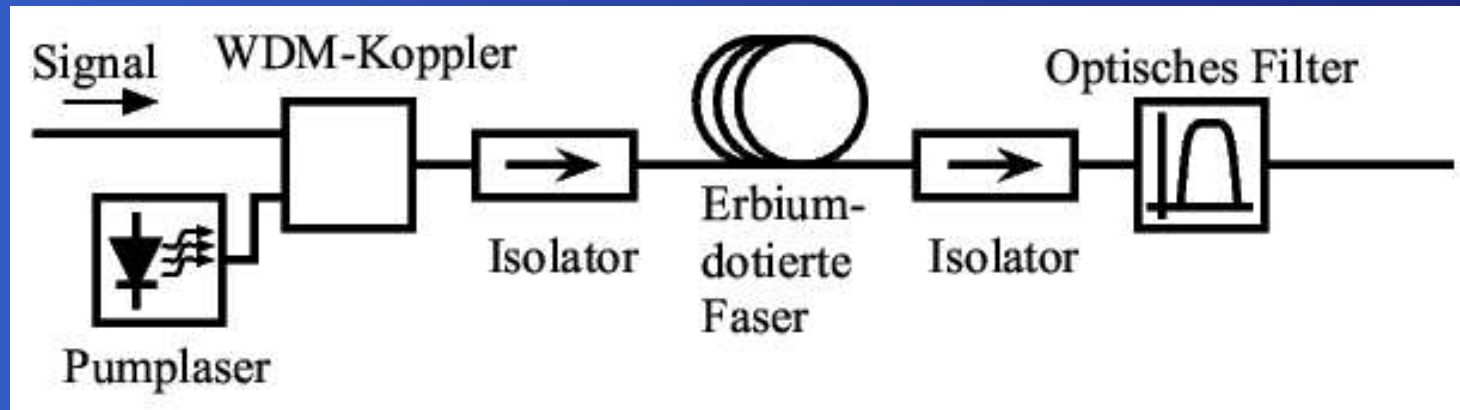
# EDFA: Verstärkung

## Tatsächliche Verstärkung und Bandbreite bei einem EDFA



# EDFA: Rauschen

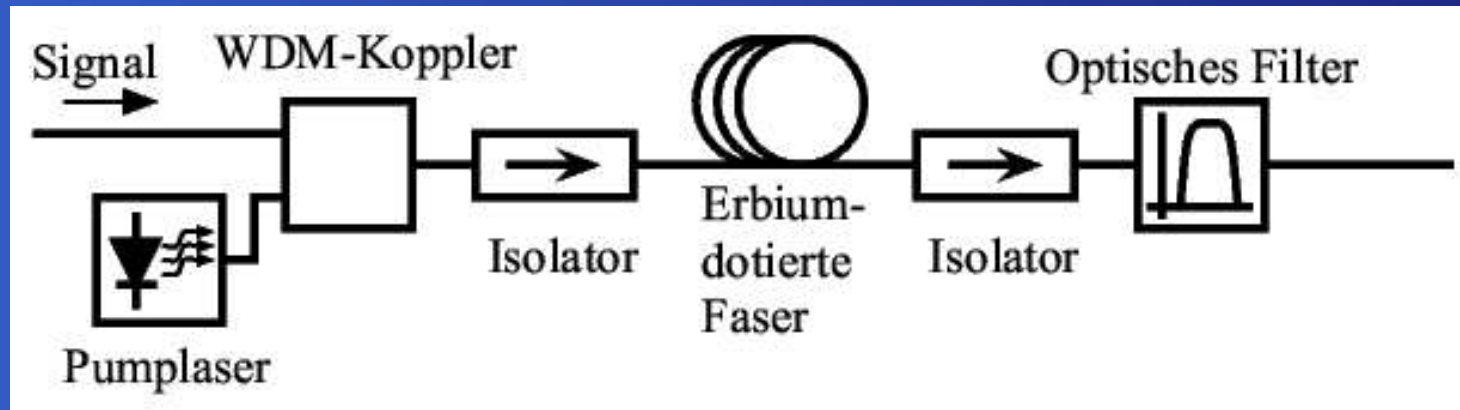
## Rauschen



Neben der stimulierten Emission kommt es zu spontaner Emission (ASE) von Photonen. Als Folge tritt ein gaußförmiges weißes Rauschen auf.

# EDFA: Rauschen

## Rauschen

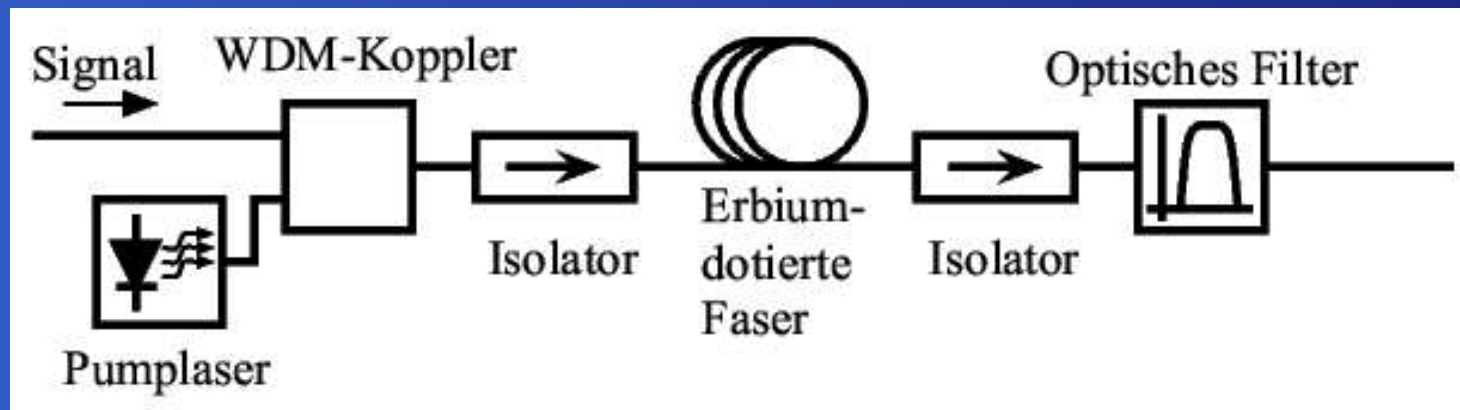


## Rauschzahl

$$F = \frac{OSNR|_{Eingang}}{OSNR|_{Ausgang}} = \frac{1}{G} (1 + 2n_{sp}(G - 1))$$

# EDFA: Rauschen

## Rauschen



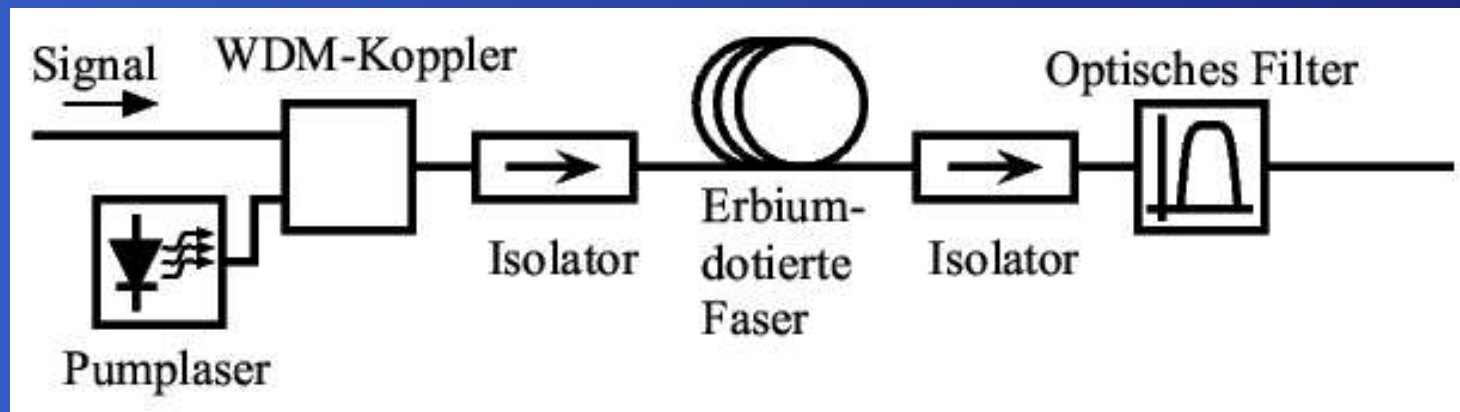
## Rauschzahl

$$F = \frac{OSNR|_{Eingang}}{OSNR|_{Ausgang}} = \frac{1}{G} (1 + 2n_{sp}(G - 1))$$

**OSNR: Optical Signal to Noise Ratio**

# EDFA: Rauschen

## Rauschen



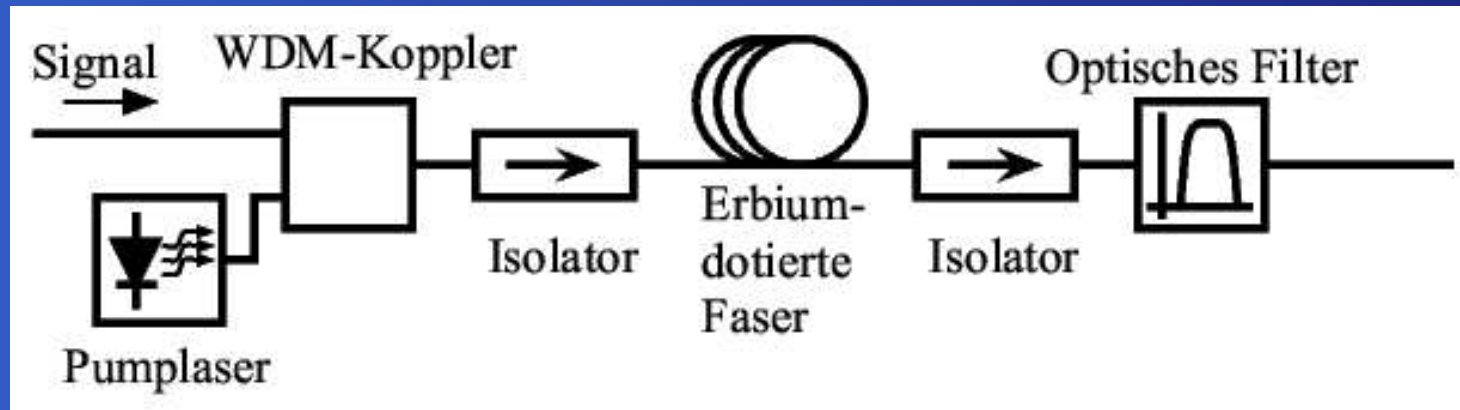
## Rauschzahl

$$F = \frac{OSNR|_{Eingang}}{OSNR|_{Ausgang}} = \frac{1}{G} (1 + 2n_{sp}(G - 1))$$

**Inversionskoeffizient** ( $n_{sp} \geq 1$ )

# EDFA: Rauschen

## Rauschen



## Rauschzahl

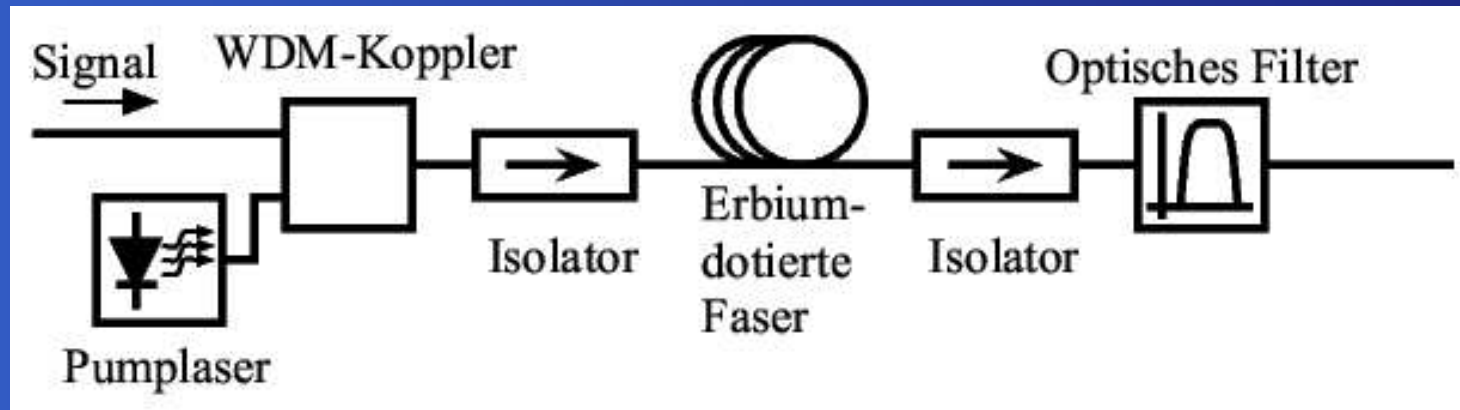
$$F = \frac{OSNR|_{Eingang}}{OSNR|_{Ausgang}} = \frac{1}{G} (1 + 2n_{sp}(G - 1))$$

$$G \gg 1 \Rightarrow F \approx 2n_{sp} \geq 3dB$$



# EDFA: Rauschen

## Rauschen

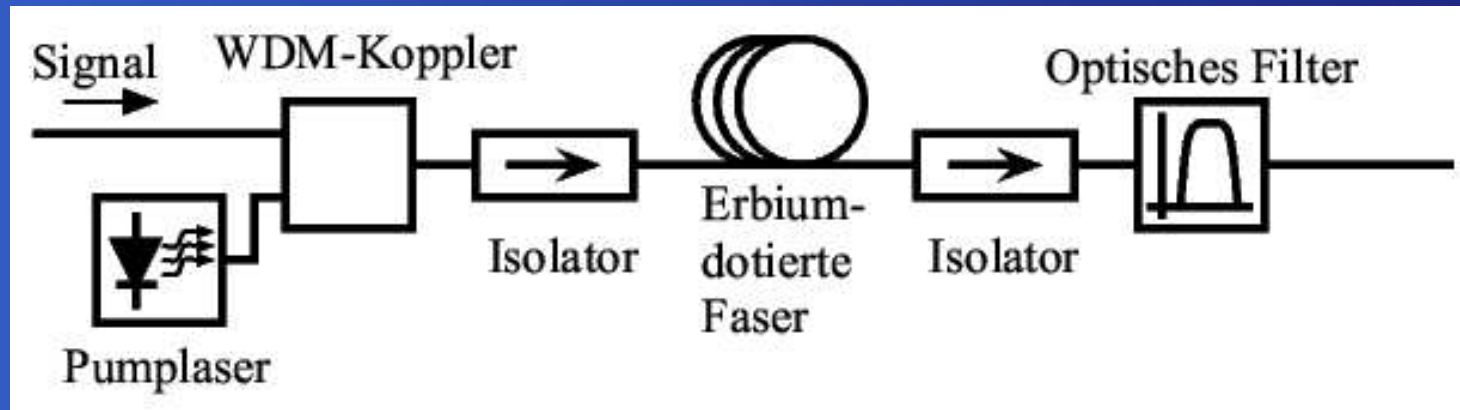


## Ausgangssignal

$$A_{aus}(t) = \sqrt{G}A_{ein}(t) + A_{ASE}(t)$$

# EDFA: Rauschen

## Rauschen



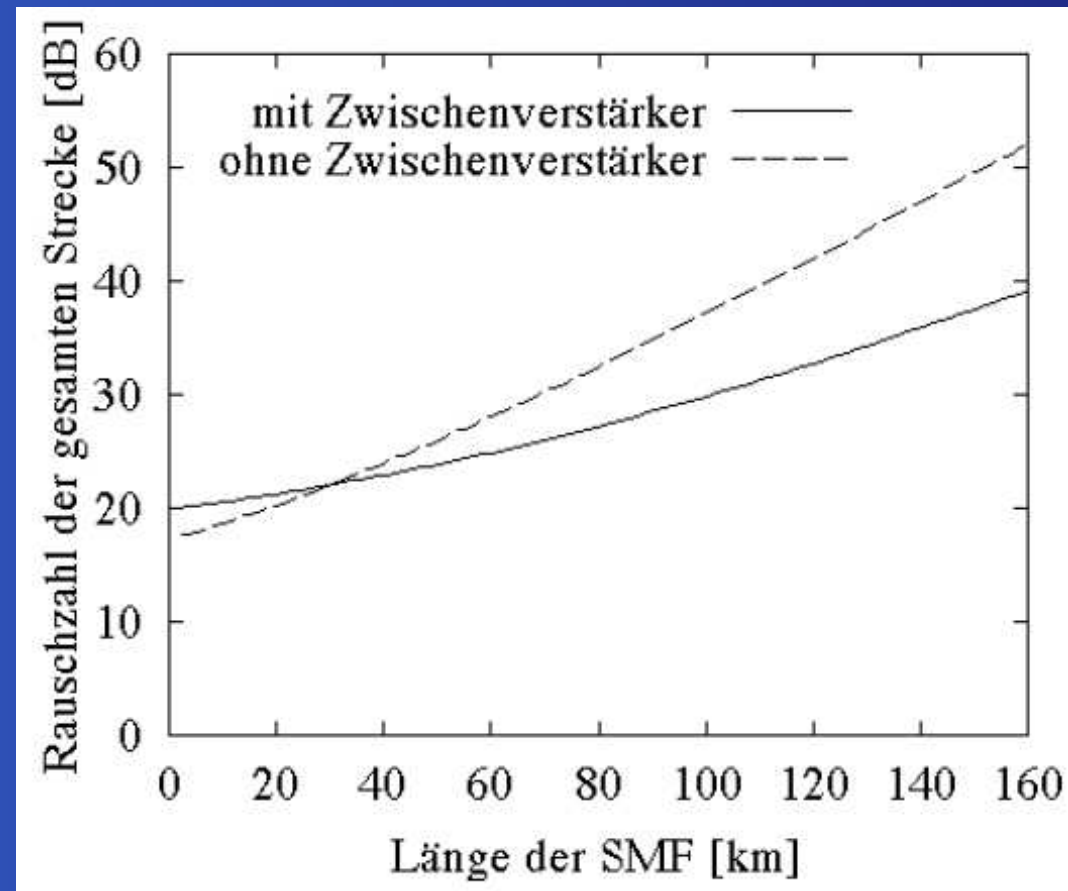
## Ausgangssignal

$$A_{aus}(t) = \sqrt{G}A_{ein}(t) + A_{ASE}(t)$$

## Rauschterm

# EDFA: Rauschen

## Entwicklung der Rauschzahl



# EDFA: Solitonen

## Verstärkersolitonen

Die Pulsausbreitung in einem EDFA wird über die **Ginzburg- Landau Gleichung** beschrieben:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2}(s + id) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + (1 + i \frac{\mu_2}{2}) |u|^2 u = \frac{i}{2} \mu u$$

# EDFA: Solitonen

## Verstärkersolitonen

Die Pulsausbreitung in einem EDFA wird über die **Ginzburg-Landau Gleichung** beschrieben:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} (s + id) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + (1 + i \frac{\mu_2}{2}) |u|^2 u = \frac{i}{2} \mu u$$

**+1: Normale GVD, -1: Anormale GVD**

# EDFA: Solitonen

## Verstärkersolitonen

Die Pulsausbreitung in einem EDFA wird über die **Ginzburg-Landau Gleichung** beschrieben:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} (s + id) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + (1 + i \frac{\mu_2}{2}) |u|^2 u = \frac{i}{2} \mu u$$

## EDFA- Parameter

(typisch:  $d \sim 1$ ,  $\mu \sim 1$ ,  $\mu_2 \sim 10^{-4}$ )

$d = \mu = \mu_2 = 0 \Rightarrow \text{NLSE}$

# EDFA: Solitonen

## Verstärkersolitonen

Die Pulsausbreitung in einem EDFA wird über die **Ginzburg- Landau Gleichung** beschrieben:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2}(s + id) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + (1 + i \frac{\mu_2}{2}) |u|^2 u = \frac{i}{2} \mu u$$

Die Gleichung erlaubt die Propagation von

**solitären Wellen:**  $u(\xi, \tau) = N_s [sech(p\tau)]^{1+iq} e^{iK_s \xi}$

# EDFA: Solitonen

## Verstärkersolitonen

Die Pulsausbreitung in einem EDFA wird über die **Ginzburg-Landau Gleichung** beschrieben:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2}(s + id) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + (1 + i \frac{\mu_2}{2}) |u|^2 u = \frac{i}{2} \mu u$$

Die Gleichung erlaubt die Propagation von

**solitären Wellen:**  $u(\xi, \tau) = N_s [sech(p\tau)]^{1+iq} e^{iK_s \xi}$

Zu bestimmende **Lösungsparameter:**

$$N_s(s, d, \mu, \mu_2), p(s, d, \mu, \mu_2),$$

$$q(s, d, \mu, \mu_2), K_s(s, d, \mu, \mu_2)$$



# EDFA: Solitonen

## Verstärkersolitonen

Die Pulsausbreitung in einem EDFA wird über die **Ginzburg-Landau Gleichung** beschrieben:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2}(s + id) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + (1 + i \frac{\mu_2}{2}) |u|^2 u = \frac{i}{2} \mu u$$

Die Gleichung erlaubt die Propagation von

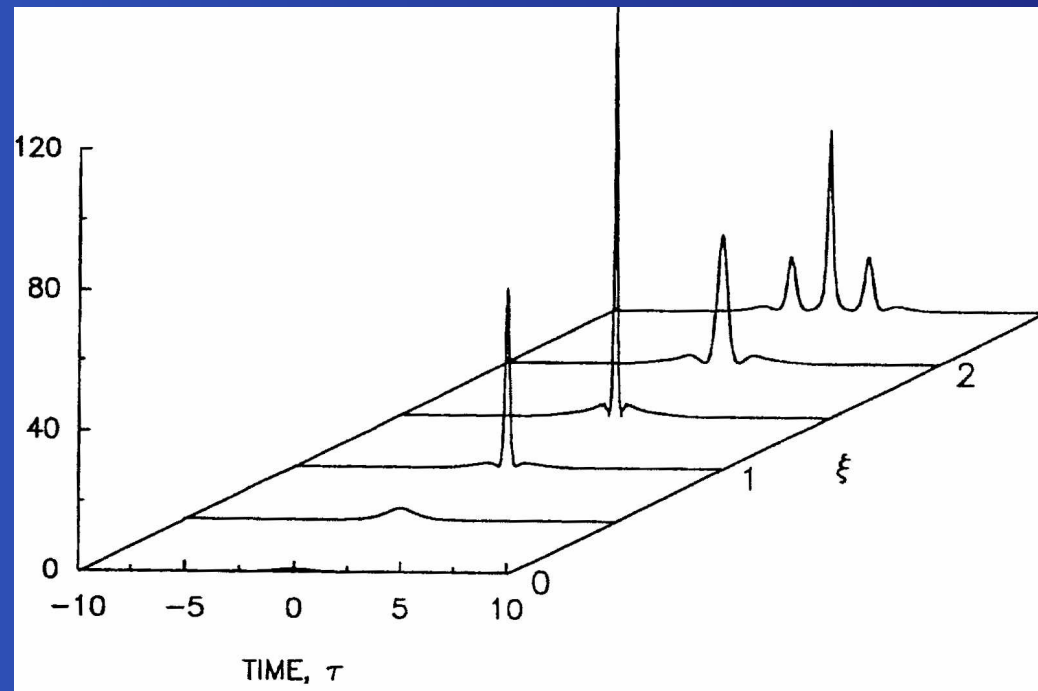
**solitären Wellen:**  $u(\xi, \tau) = N_s [sech(p\tau)]^{1+iq} e^{iK_s \xi}$

Eine **Solitonlösung** existiert nur für

$$d = \mu = \mu_2 = 0$$

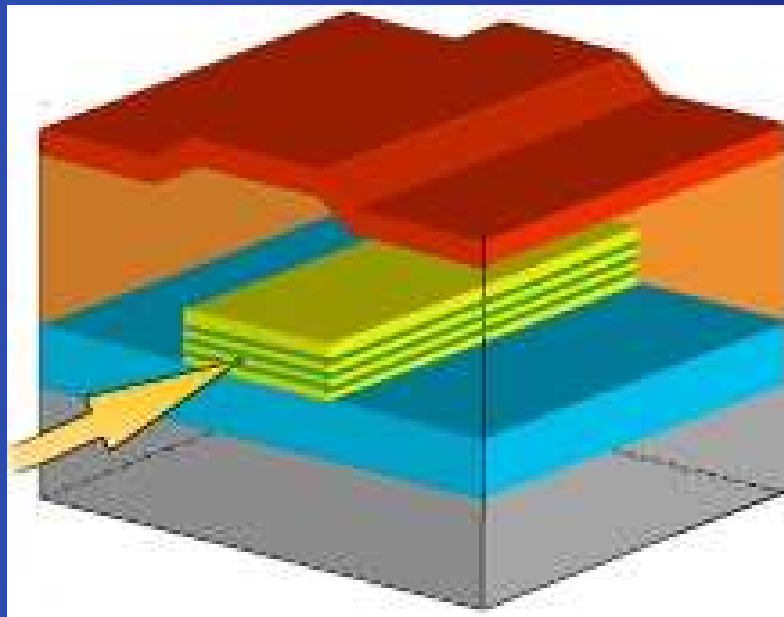
# EDFA: Solitonen

## Propagation eines Solitons in einem EDFA

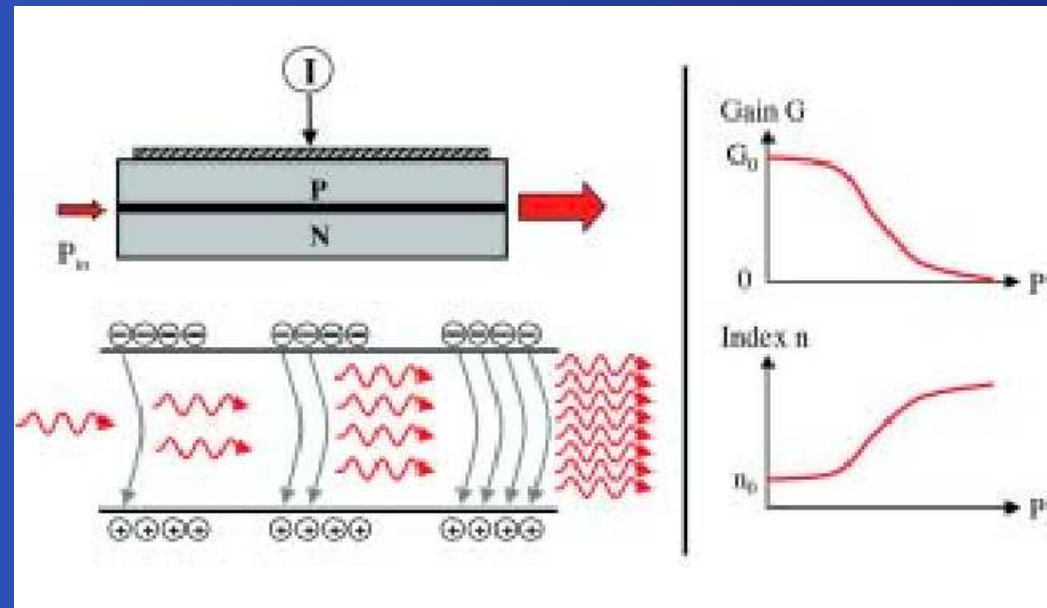


Es findet ein Übergang zur solitären Welle statt.

## Semiconductor Optical Amplifier

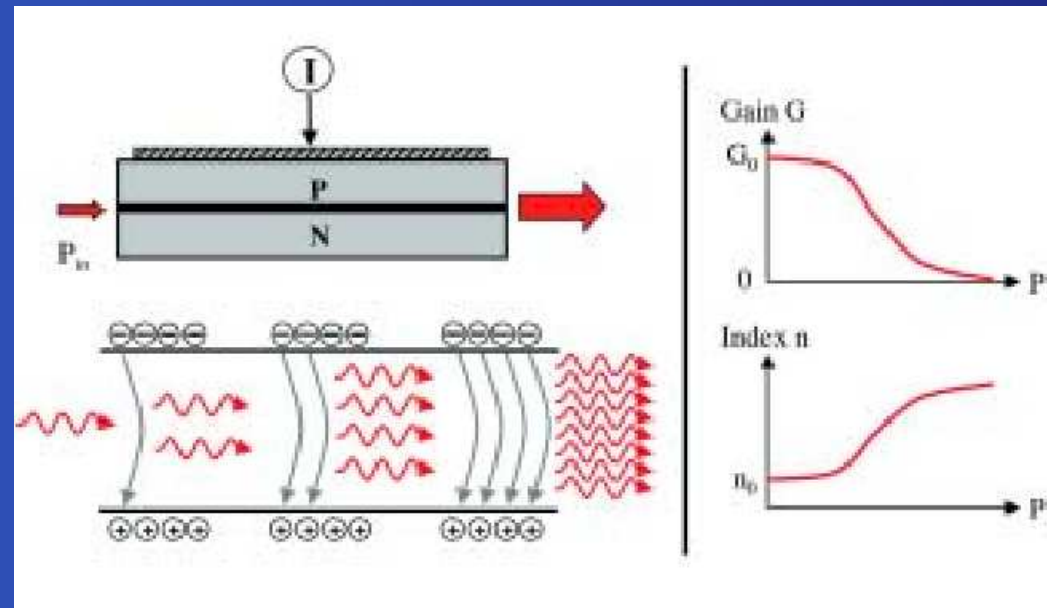


# SOA: Verstärkung



Die **Verstärkung** in einem Halbleiter erfolgt durch stimulierte Emission und beträgt:  $G_s = e^{g \cdot L}$

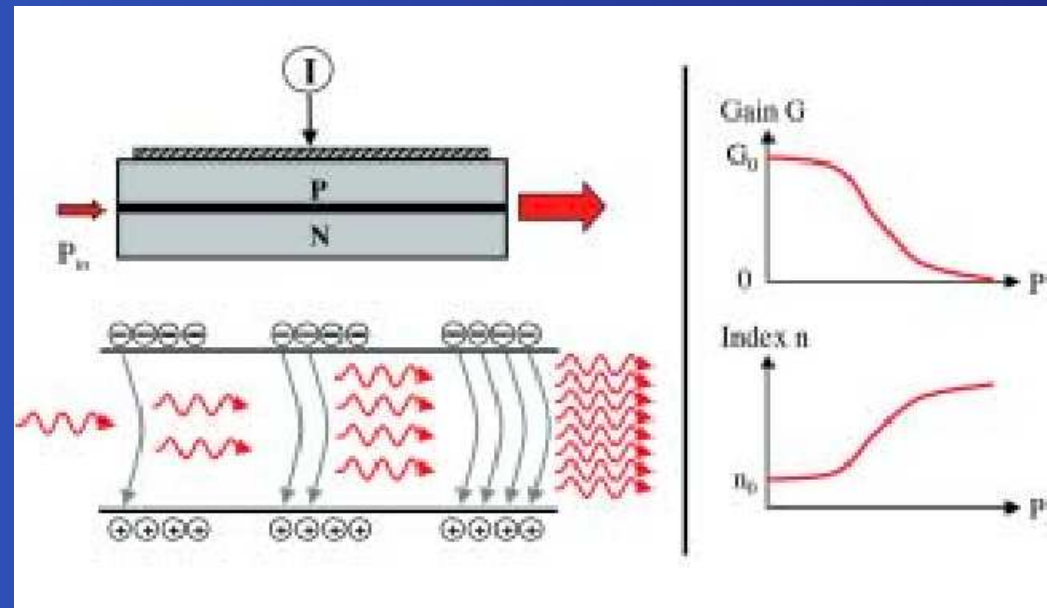
# SOA: Verstärkung



Die **Verstärkung** in einem Halbleiter erfolgt durch stimulierte Emission und beträgt:  $G_s = e^{g \cdot L}$

**Verstärkungs**koefizient

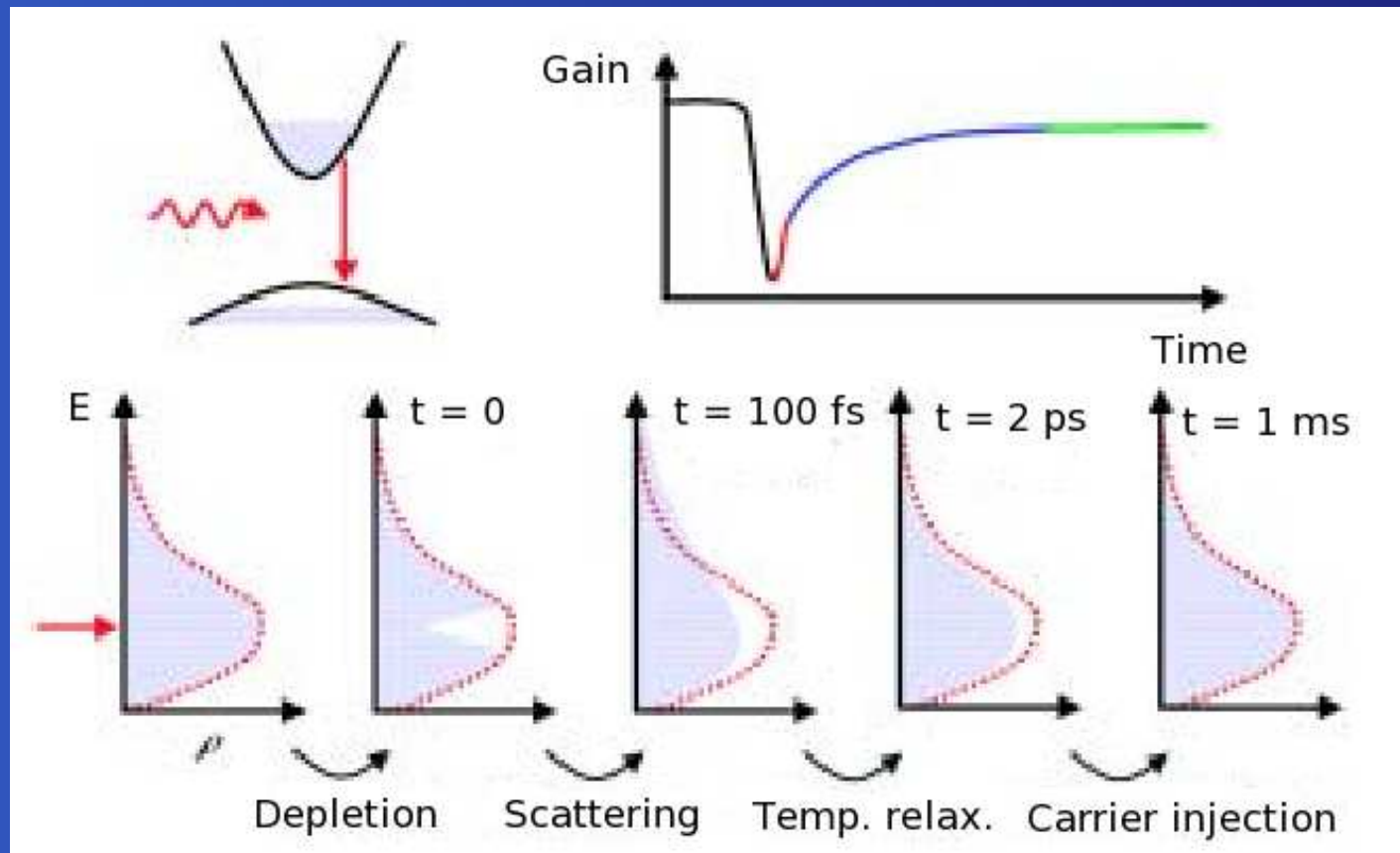
# SOA: Verstärkung



Die **Verstärkung** in einem Halbleiter erfolgt durch stimulierte Emission und beträgt:  $G_s = e^{g \cdot L}$

# SOA: Dynamik

## Ladungsträgerdynamik in einem SOA

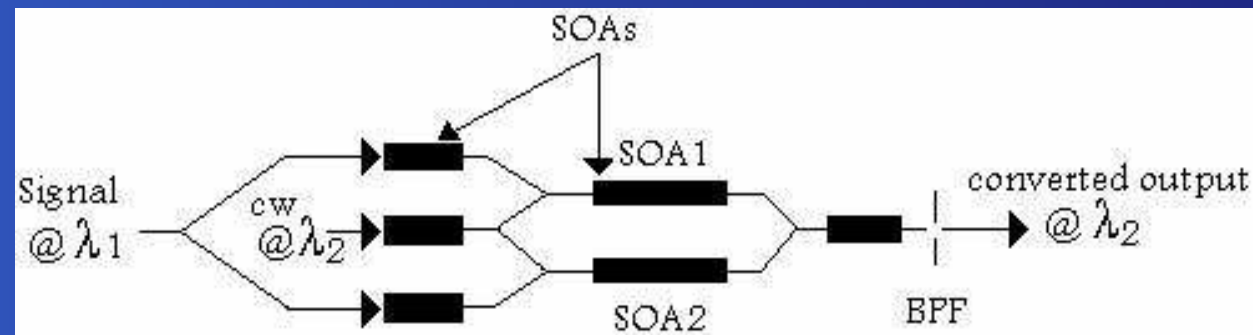


# SOA: Anwendungen

## Cross- Gain Modulation bei bis zu 100 GB/s



## Cross- Phase Modulation





## Vorteile

- Gute Verstärkung
- Kompaktes und günstiges Bauelement
- Eröffnet viele Möglichkeiten der optischen Signalverarbeitung

## Nachteile

- Variierende Verstärkung und Variation der Bit-Raten im GB/s Bereich aufgrund geringer Erholungszeit von einigen hundert ps

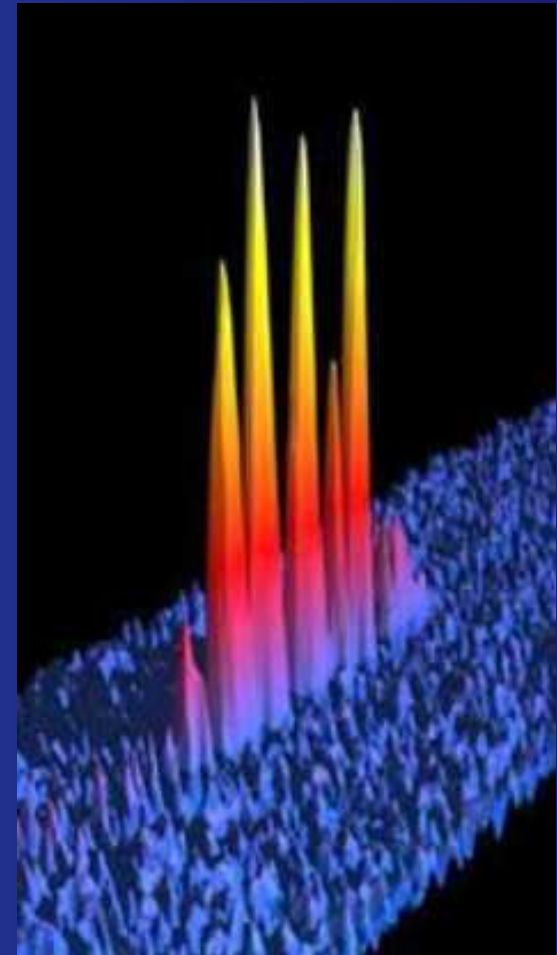
# Zusammenfassung

# Zusammenfassung



## Dispersionsmanagement

- Die **chromatische Dispersion** kann über DCF vollständig kompensiert werden.
- **Nichtlineare Effekte** führen hingegen zu Einschränkungen beim Entwurf einer Übertragungsstrecke.
- **Solitonen** weisen als Alternative aufgrund ihrer Interaktionen gravierende Nachteile auf.



# Zusammenfassung

## Optische Verstärker

- **EDFA's** bieten gute Verstärkung bei geringem Rauschen. Die Propagation **solitärer Wellen** in einem EDFA ist möglich.
- **Halbleiterverstärker** eröffnen viele Möglichkeiten der optischen Signalverarbeitung und stellen eine mögliche Alternative zum **EDFA** dar.

