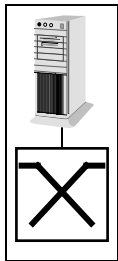


# Netze und Protokolle für das Internet



## 2. Optische Datenübertragung

# Inhalt

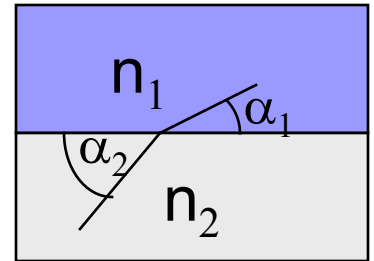
- Vorteile optischer Übertragungstechnik
- Brechung und Reflexion in Lichtwellenleitern
- Dämpfung und Dispersion in Lichtwellenleitern
- Bandbreiten-Längen-Produkt
- Verbindungstechniken
- Beugung am Spalt/Gitter
- Bragg Grating
- Einstellbare akustische Filter
- Thin Film Filter
- Dispersions-Kompensation
- Light Emitting Diod
- Laserdioden
- Photodetektoren
- Koppler
- Mach-Zehnder Interferometer
- Arrayed Waveguide Grating
- Optische Verstärker
  - Erbium-Doped Fiber Amplifiers
  - Semiconductor Optical Amplifiers
- Mikroelektromechanische Systeme

# Vorteile optischer Übertragungstechnik

- sichtbares Licht (380 nm (violett) - 780 nm (rot))
- meist: Infrarot
- sehr grosse Übertragungskapazität (bis zu mehreren Hundert Tbit/s)
- Unempfindlichkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Störungen
- keine Potentialprobleme zwischen Sender und Empfänger
- kein Nebensprechen
- schwierigere Abhörbarkeit
- vergleichsweise geringe Dämpfung
- kleine Durchmesser und geringes Gewicht der Leiter
- unbegrenztes Materialvorkommen (Silizium)

# Brechungsgesetz

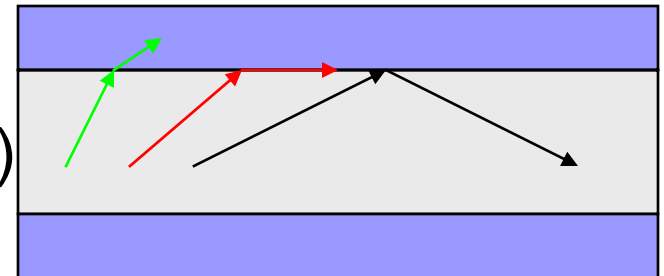
- Brechen der Lichtwellen hängt vom Brechungsindex ( $n = c / v$ ) der beteiligten Medien ab.
- Brechungsgesetz:  $n_1 \cdot \cos \alpha_1 = n_2 \cdot \cos \alpha_2$
- Grenzwinkel  $\alpha_g$  mit  $\cos \alpha_g = n_1/n_2$
- Totalreflexion für  $\alpha < \alpha_g$



optisch dünneres Medium ( $n_m$ )

optisch dickeres Medium ( $n_k > n_m$ )

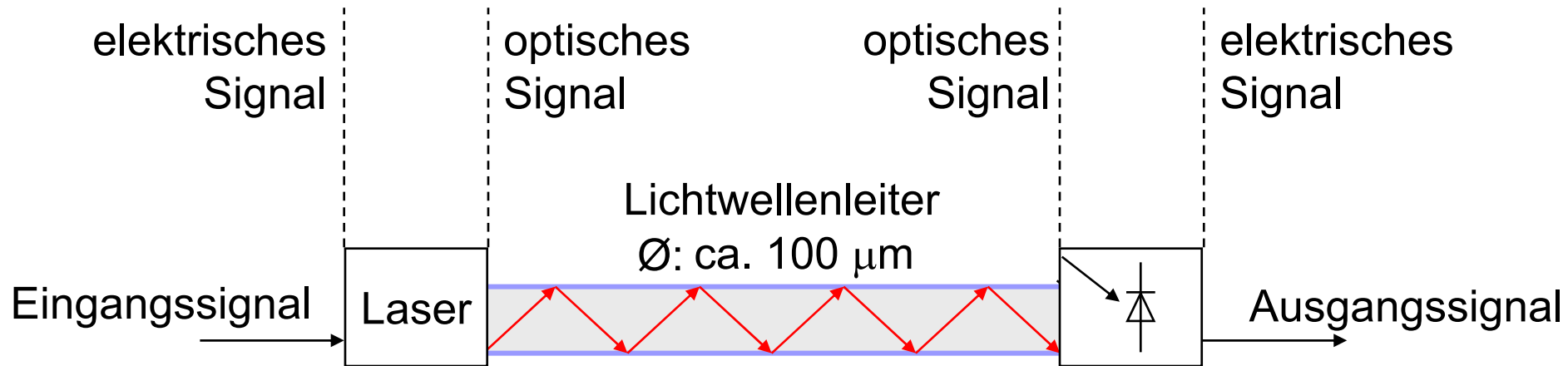
**Grenzwinkel**



Kernummantelung (Glas)



# Reflexion in Lichtwellenleitern



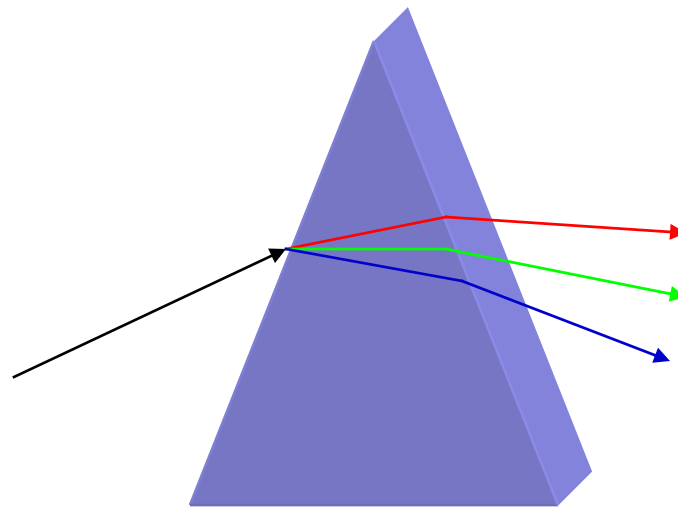
## ■ Multimode-Fasern

- Wellen mit verschiedenen Reflexionswinkeln haben unterschiedliche Ausbreitungszeit
- „Verschmieren“ des Ausgangssignals

## ■ Monomode-Fasern

- auf wenige Wellenlängen reduzierter Kern (z.B. 3-15 µm)
- Licht kann sich nur in gerader Richtung ausbreiten
- längere Distanzen möglich (ohne Repeater bis 100 km)
- teurer als Multimode

# Prismen



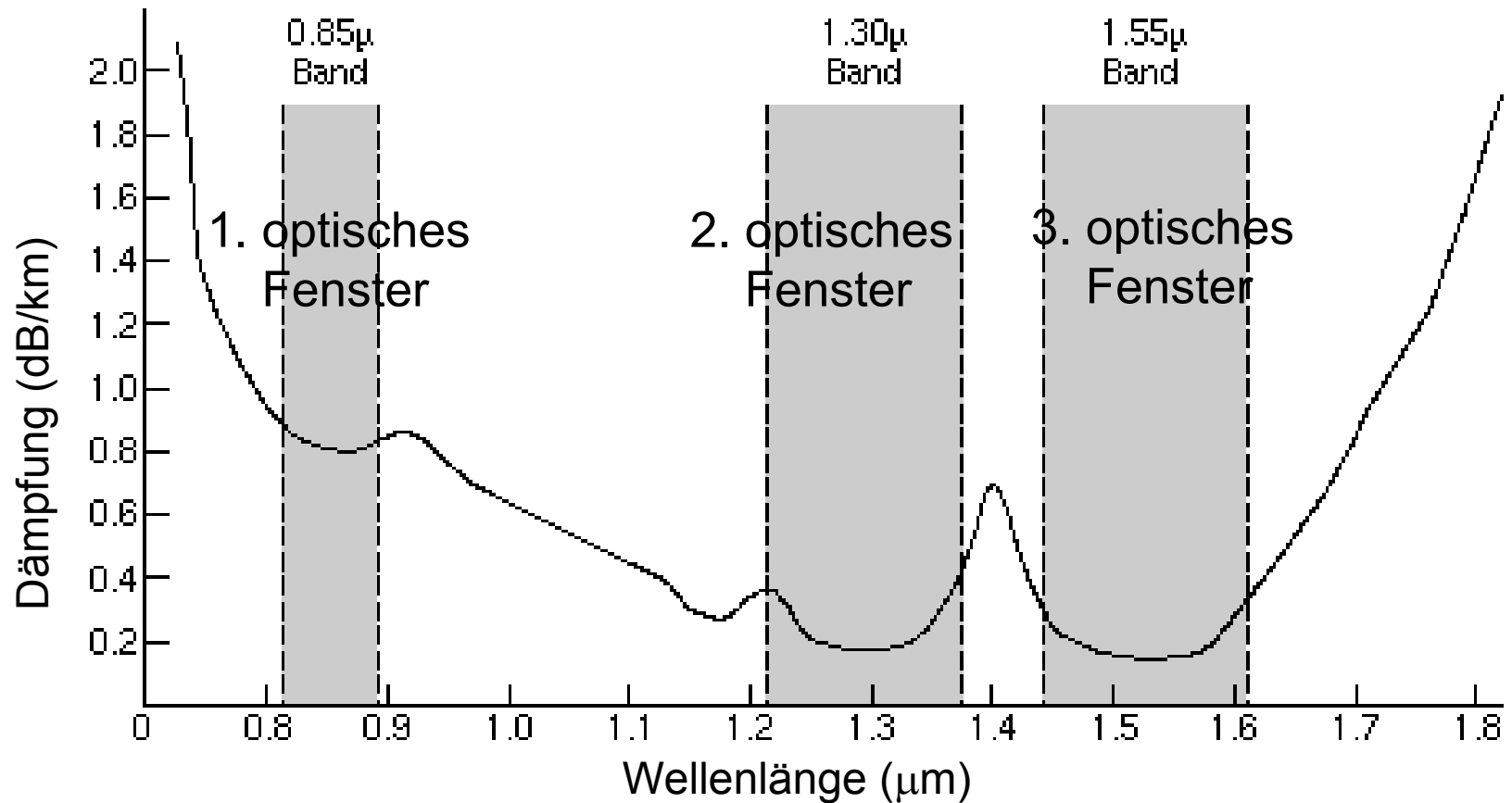
# Dämpfung

$$A = 10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right)$$

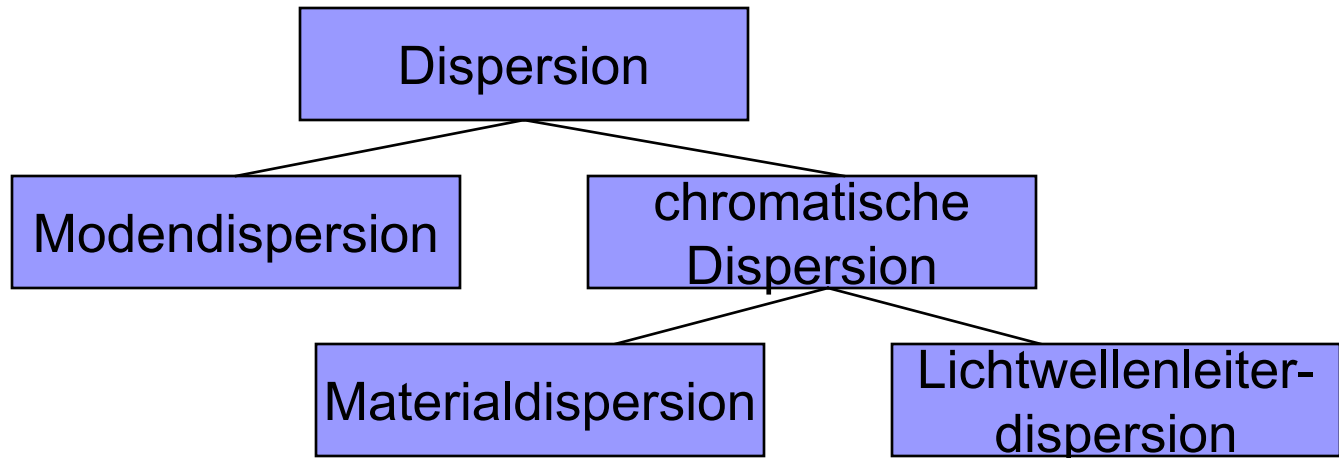
$$a(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^4} + C_2 + A(\lambda)$$

- Gründe für Dämpfung (Attenuation)
  - Materialabsorption
  - Materialfehler (Schmutzpartikel, Gasblasen, Strukturfehler)
  - Rayleigh-Streuung aufgrund von mikroskopische Materialinhomogenitäten
  - Zentrierungsprobleme von Glasfasern wegen Querschnittstoleranzen
  - Mikrobiegung (mikroskopische Krümmung aufgrund von Materialfehlern)
  - Makrobiegung (Kerbung aufgrund mechanischer Beanspruchung)
  - Luftblasen und Verengung beim Spleissen
  - Kratzer
- $C_1$ : Rayleigh-Streuungskonstante
- $C_2$ : Konstante aufgrund von nicht perfekten Glasfasern
- $A(\lambda)$ : beschreibt Längenwellen-abhängige Absorption durch Unreinheiten

# Dämpfung in Lichtwellenleitern

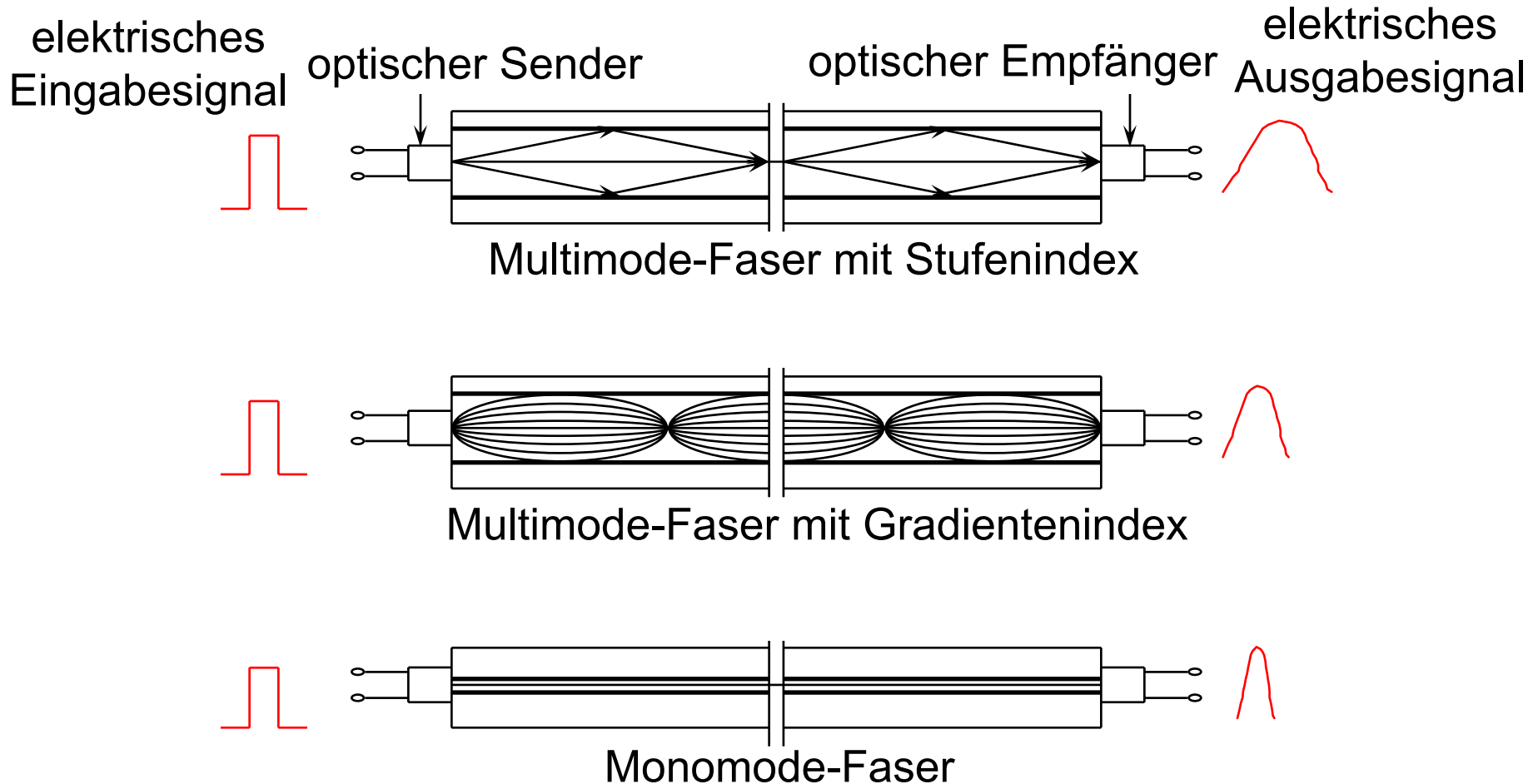


# Dispersion



- Modendispersion
  - Moden mit unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen legen unterschiedliche Distanzen zurück
- Materialdispersion
  - Brechungsindex hängt von  $\lambda$  ab. Dispersion bei breitem Spektrum
- Lichtwellenleiterdispersion
  - Verteilung der Modenenergie hängt von  $\lambda$  ab.
  - Je grösser die Wellenlänge desto mehr Energie wird im Mantel übertragen. Im Mantel übertragene Anteile sind schneller.
- 1. opt. Fenster: Materialdispersion  $> 10 \cdot$  Lichtwellenleiterdispersion
- 2. opt. Fenster: Materialdispersion  $\approx$  Lichtwellenleiterdispersion

# Dispersion in Lichtwellenleitern



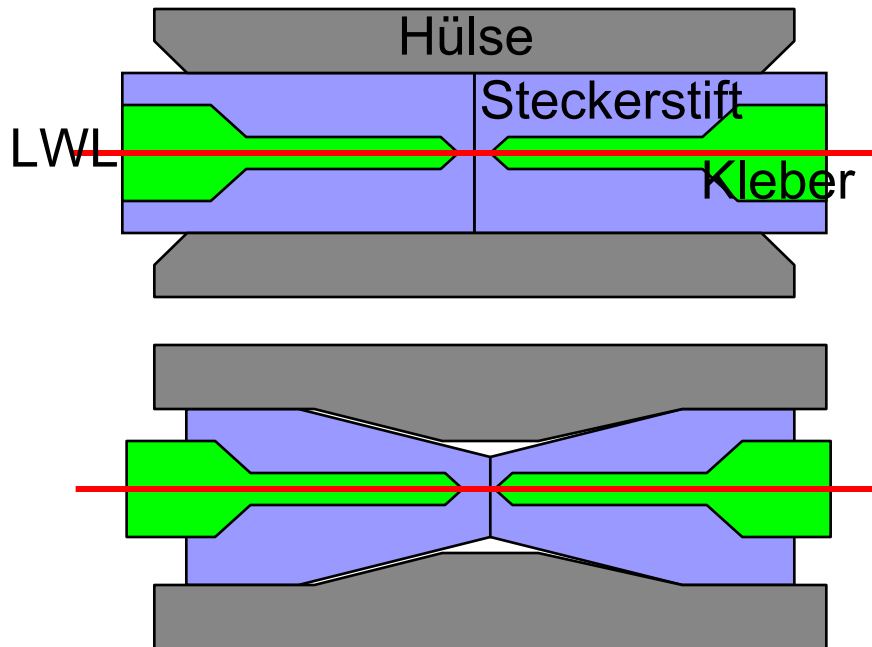
# Bandbreiten-Längen-Produkt

- Kapazität einer Glasfaser wird oft in einem Bandbreiten-Längen-Produkt gemessen.
- Dieses ist im allgemeinen konstant.
- Multimode-Faser hat deutlich geringere Kapazität als Monomode-Faser [Wrobel, 1998]
  - Multimode:  $BL > 100 \text{ MHz} \cdot \text{Km}$
  - Monomode:  $BL > 10 \text{ GHz} \cdot \text{Km}$
- SWITCHlambda (2001)
  - 2.5 Gbit/s-Kanäle ohne Verstärkung über 100 km

# Verbindungstechniken

## ▪ Lösbare Verbindungen

- Steckverbinder



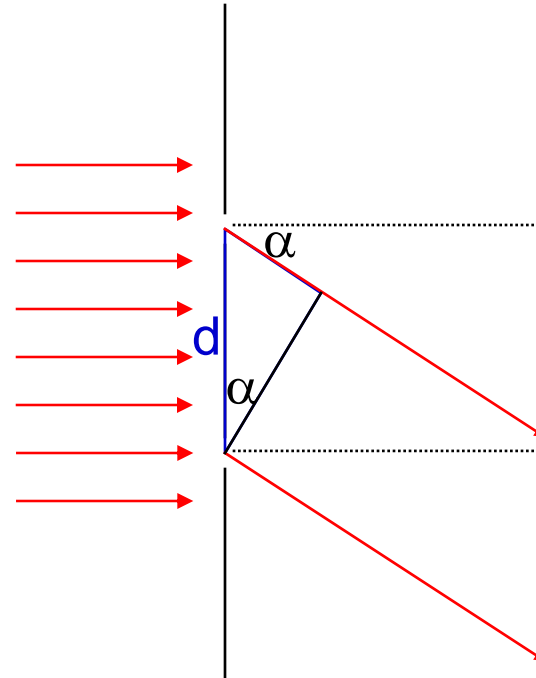
bikonische Führung

## ▪ Nicht lösbare Verbindungen: Spleissen

- Klebespleissen
  - Nach Ausrichten und Zentrieren wird Anordnung mit Kleber (Anpassung an Brechungsindex !) fixiert.
- Schmelzpleissen
  - Verschweissen der Faserenden bei  $2000^{\circ}\text{C}$
  - Wärmeerzeugung durch elektrischen Lichtbogen
  - gute Stabilität
  - Dämpfung : ca. 0,1 dB

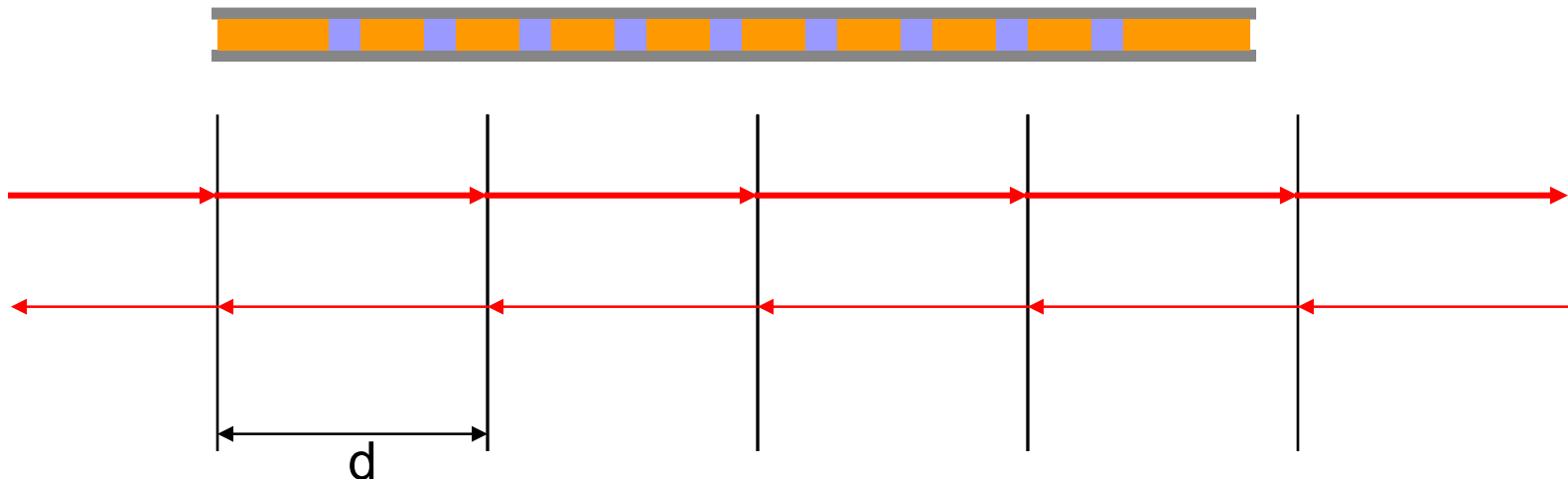
# Beugung am Spalt/Gitter

- Minimum
  - Lichtwellen haben Gangunterschied von  $\lambda/2$
  - $\sin \alpha = (2m+1)(\lambda/2)/d$
- Maximum
  - Lichtwellen haben Gangunterschied von  $\lambda$
  - $\sin \alpha = m\lambda/d$



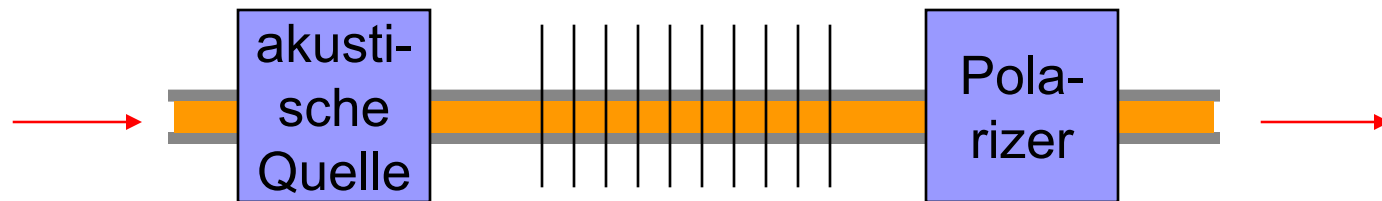
# Bragg Grating

- Anordnung paralleler semi-reflektierender Komponenten
- maximale Reflexion:  $\lambda_B = 2d/n$
- Fiber Bragg Gratings
  - Lichtwellenleiter mit unterschiedlichem Brechungsindex
  - Behandeln der LWL durch UV-Strahlung → strukturelle Defekte
  - Einsatz
    - Filter
    - Dispersions-Kompensation

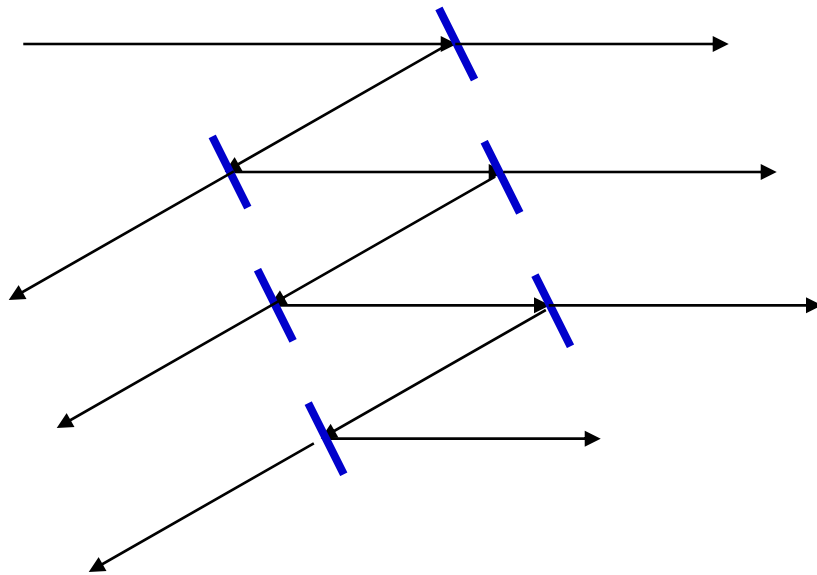
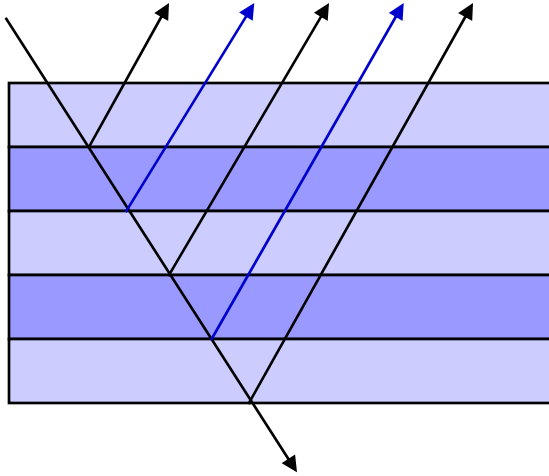


# Einstellbare akustische Filter

- Akustische Welle agiert als Bragg Grating Fiber.
- einstellbare akustische Frequenz
- mehrere akustische Frequenzen gleichzeitig möglich



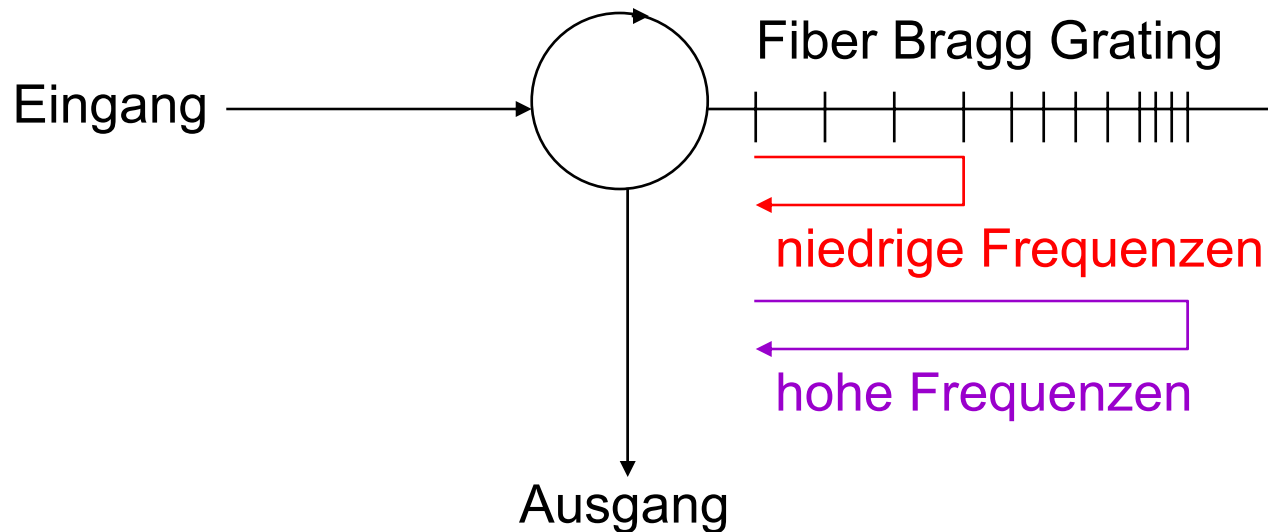
# Thin Film Filter



- Schichten mit Dicke =  $\frac{1}{4} \lambda$
- Phasenverschiebung um  $180^\circ$  bei reflektiertem Licht in Medium mit niedrigem  $n$
- Kaskadieren von Filtern
  - Filter lässt je eine Wellenlänge passieren und reflektiert die anderen.

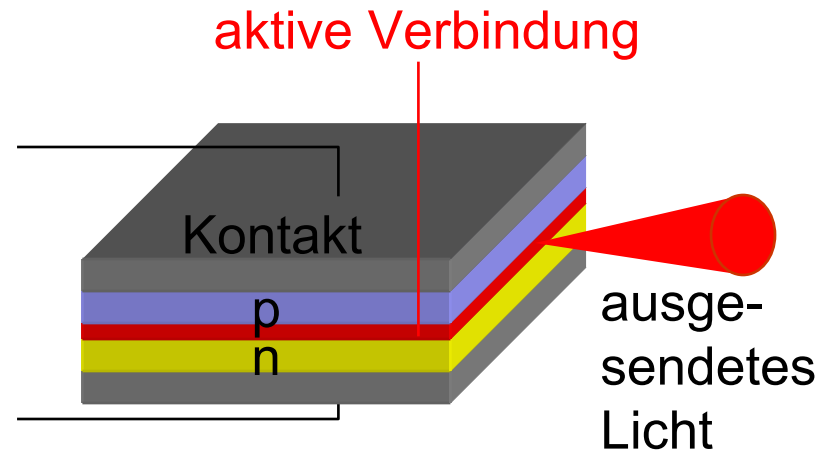
# Dispersions-Kompensation

- Chromatische Dispersion: grössere Verzögerung für Wellen mit niedrigen Frequenzen
- Dispersion Compensating Fibers
  - Spezielle LWL mit negativer Dispersion im Bereich 1550 nm
- Chirped Fiber Bragg Grating



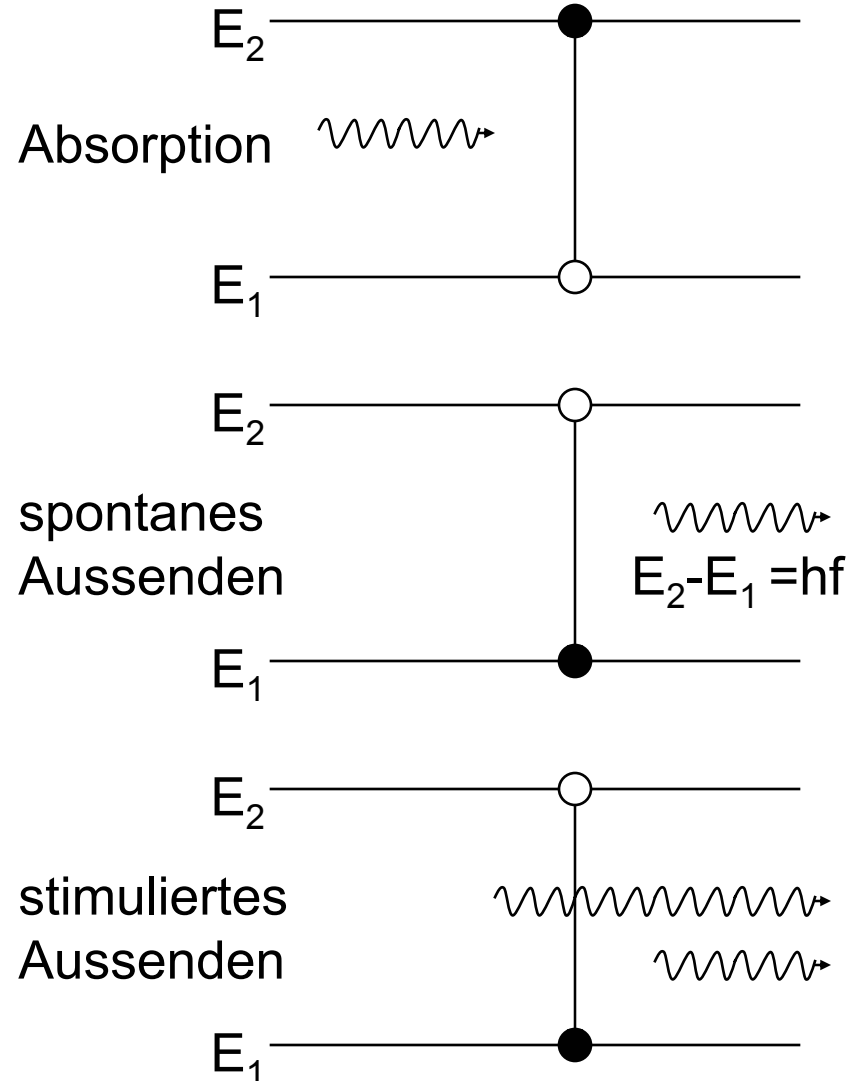
# Light Emitting Diod

- Anlegen einer externen Spannung an Kontakten
- In der aktiven Verbindung rekombinieren Elektronen und Löcher.
- Energie wird in Form von Licht abgestrahlt
- inkohärentes Licht mit relativ grosser spektraler Bandbreite → Dispersion
- schlechter Einkoppelungsgrad



# Laserdioden

- Aufbau ähnlich wie LED
- Planck: Wenn Elektronen zwischen Energieebenen  $E_1$  (Basis) und  $E_2$  (angeregt) wechseln, wird entweder ein Photon gesendet oder absorbiert.
- Spontanes Aussenden erfolgt eher zufällig.
- Stimuliertes Aussenden
  - Stimuliertes Photon ist mit stimulierendem Photon in Phase
  - Normalerweise werden Photonen absorbiert
  - Stimuliertes Aussenden > Absorption nur, wenn angeregte Zustände > Basiszustände (*Population Inversion*)
  - Population Inversion wird durch Pump-Techniken erreicht, z.B. durch Injizieren von Elektronen

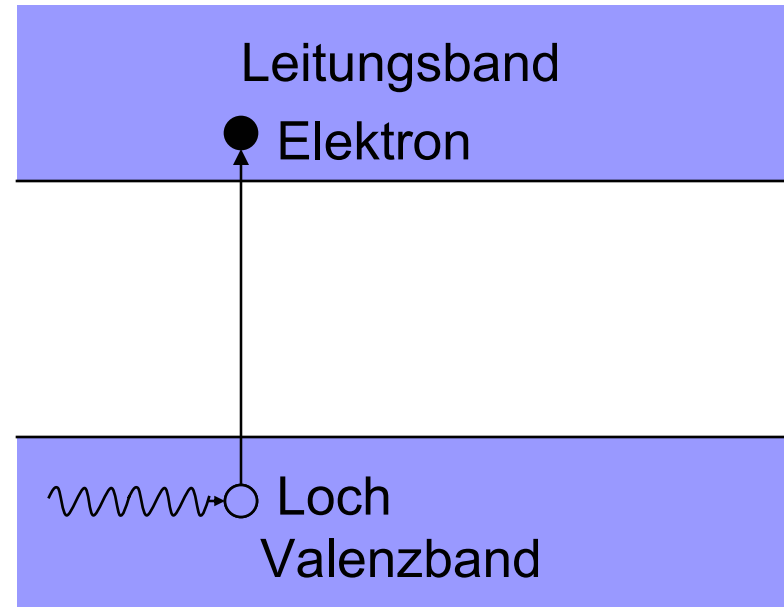


# Laserdioden

- Höhere Ausgangsleistungen
- Guter Einkopplungsgrad wegen besserer Abstrahlcharakteristik und kleine strahlende Fläche (eingekoppelte Lichtleistung bis zu 30 dB höher als bei LED)
- Weitgehend kohärentes Licht durch Reflexionseffekte
- Einstellbare Laser
  - Steuerung der Lichtfrequenz durch Beeinflussung des Brechungsindex
  - Einstellzeit  $< 500$  ns
- Laser sind erheblich teurer als LED
- Schutzvorrichtungen notwendig
- kurzlebiger

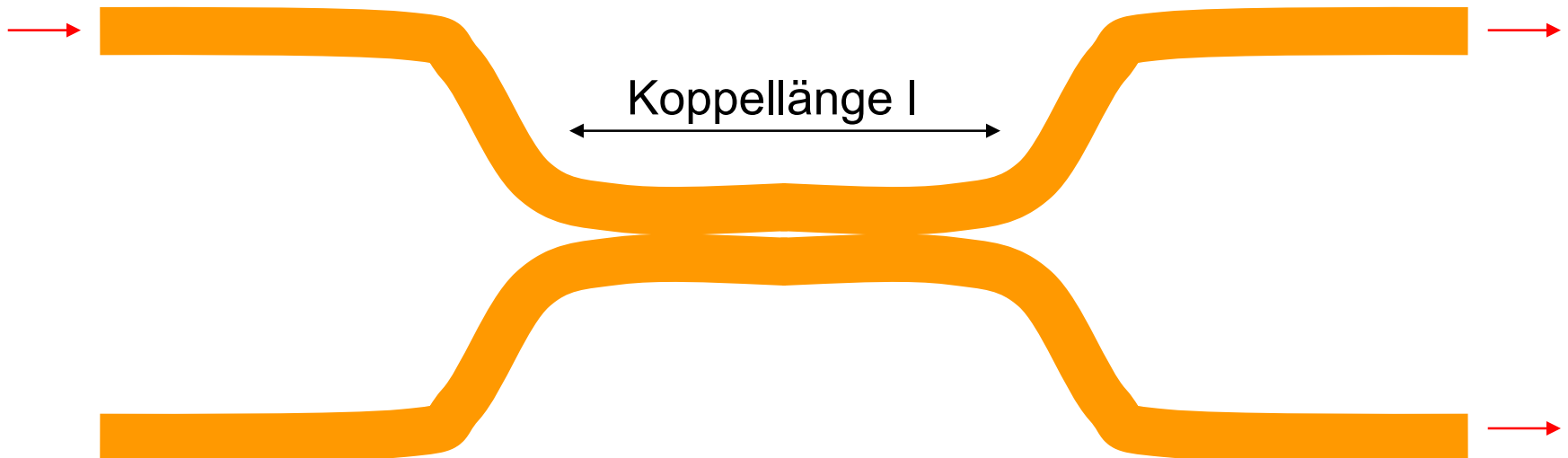
# Photodetektoren

- Anregung von Elektronen durch Photonen  
→ Stromanstieg (bei Anlegen einer Spannung)
- PIN-Photodioden
  - Leicht dotierter Halbleiter zwischen p- und n-Halbleiter



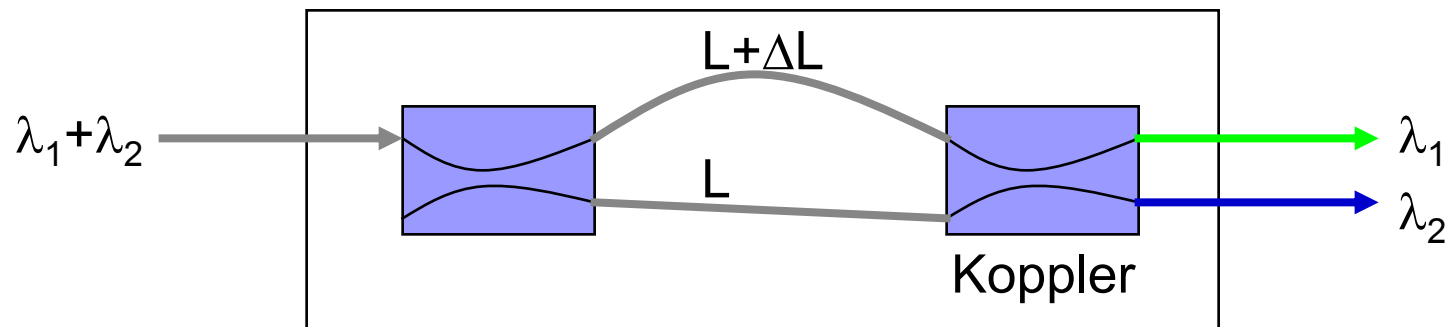
# Koppler

- Anteil des Eingangs 1 (2) wird an Ausgang 2 (1) weitergeleitet.
- Anteil hängt von Koppellänge ab.
- Aufbau von grösseren Kopplern (n x n)
- Monitoring-Funktionen
- Phasenverschiebung zwischen 2 Signalen, die Ausgänge 1 und 2 verlassen:  $\pi/2$



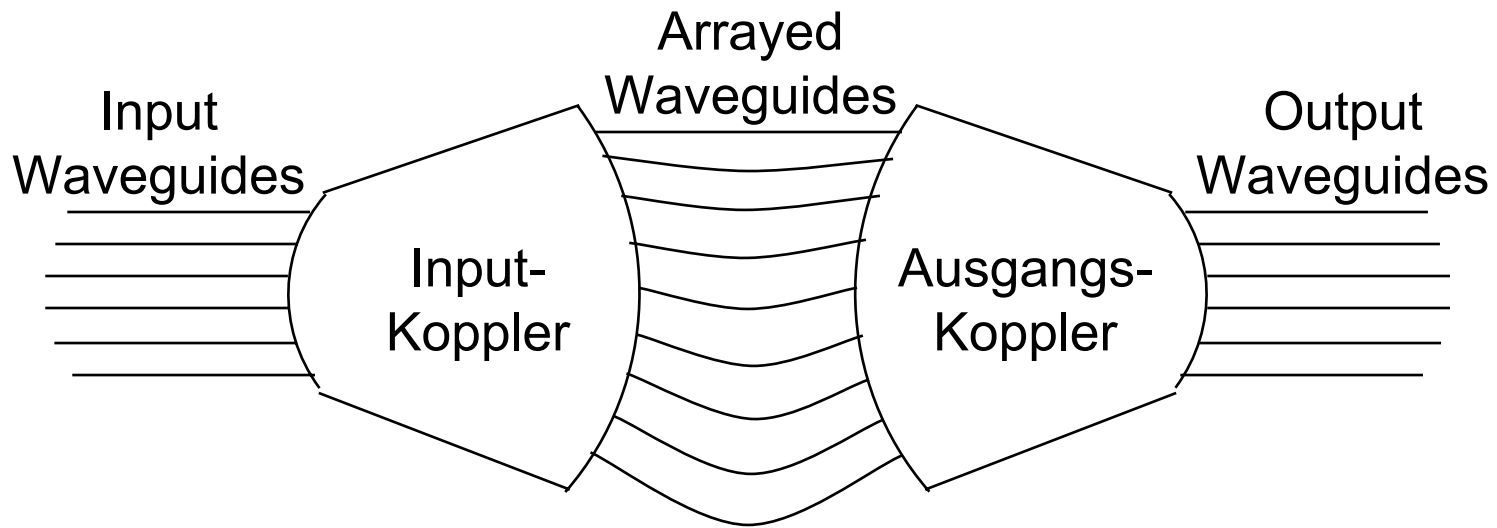
# Mach-Zehnder Interferometer

- Phasenverschiebung zwischen Signalen, die unterschiedliche Wege nehmen
  1. Ausgang:  $\pi/2 + \beta\Delta L + \pi/2 = \beta\Delta L + \pi$
  2. Ausgang:  $\pi/2 + \beta\Delta L - \pi/2 = \beta\Delta L$
- Wellenlängen  $\lambda_1$  mit  $\beta\Delta L = k\pi$  (k ungerade)
  - addieren sich an Ausgang 1
  - heben sich an Ausgang 2 auf
- Wellenlängen  $\lambda_2$  mit  $\beta\Delta L = k\pi$  (k gerade)
  - heben sich an Ausgang 1 auf
  - addieren sich an Ausgang 2



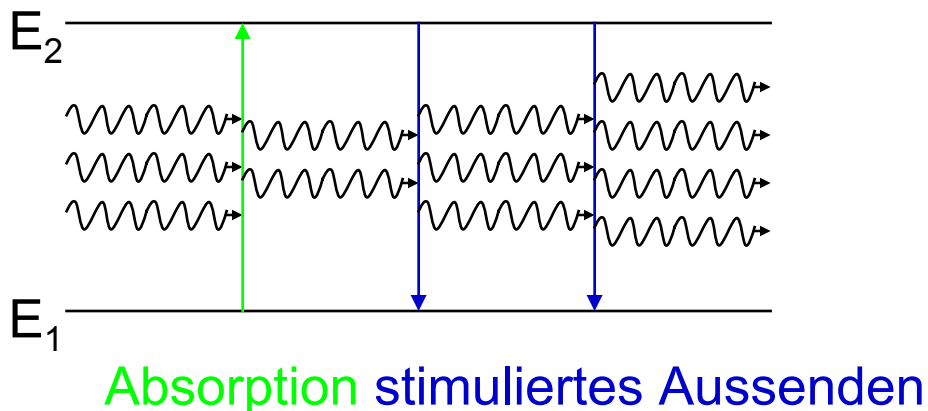
# Arrayed Waveguide Grating

- Verallgemeinerung des MZI
- Aufbau von  $1 \times n$  - Demultiplexern und  $n \times 1$  - Multiplexern



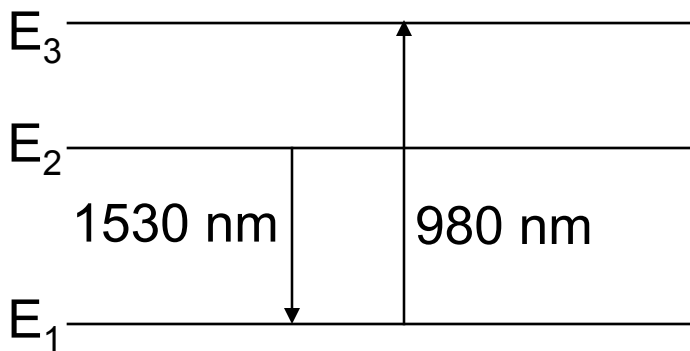
# Optische Verstärker

- basieren auf stimuliertem Aussenden von Photonen
- Spontanes Aussenden wirkt als Rauschen
- Population Inversion durch Pump-Einrichtungen
- Varianten
  - Erbium-Doped Fiber Amplifiers
  - Semiconductor Optical Amplifiers



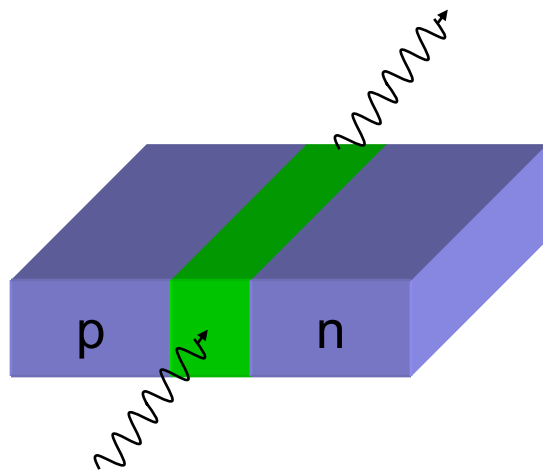
# Erbium-Doped Fiber Amplifiers

- Population Inversion:  $N_2 > N_1$
- Pumpen von Photonen mit Wellenlänge 980 nm führt zu grossem  $N_3$ .
- Spontanes Aussenden  $\rightarrow N_2 > N_1$
- Problem: mehrere km lange LWL

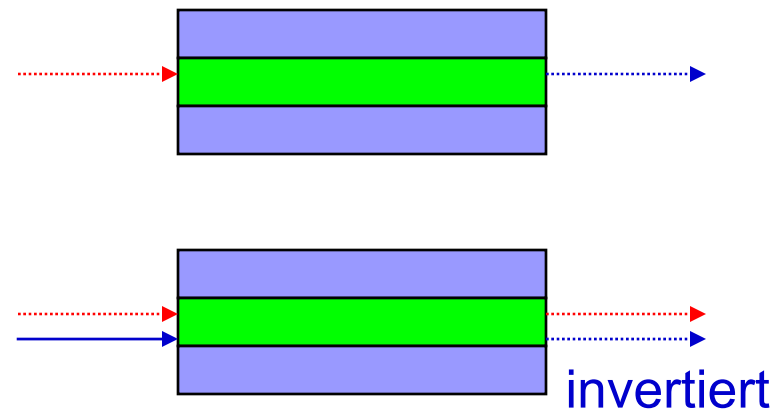


# Semiconductor Optical Amplifiers

- Population Inversion durch Anlegen einer Spannung
- Kompakte Komponenten
- hohes Rauschen
- Einsatz in Wellenlängenkonvertern



aktive Region



# Mikroelektromechanische Systeme

- winzige Spiegel
- elektronische Ansteuerung
- Schaltzeiten im Bereich von  $\mu\text{s}$

