

# Netze und Protokolle für das Internet



## 2. Optische Datenübertragung

### Inhalt

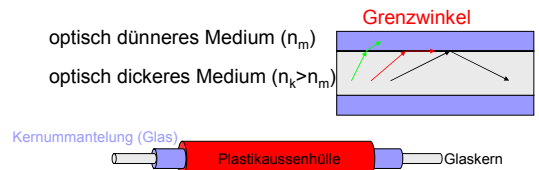
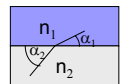
- Vorteile optischer Übertragungstechnik
- Brechung und Reflexion in Lichtwellenleitern
- Dämpfung und Dispersion in Lichtwellenleitern
- Bandbreiten-Längen-Produkt
- Verbindungstechniken
- Beugung am Spalt/Gitter
- Bragg Gating
- Einstellbare akustische Filter
- Thin Film Filter
- Dispersions-Kompensation
- 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

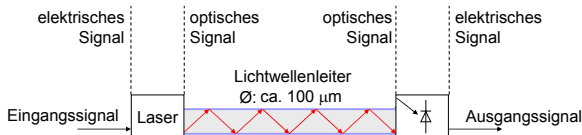
- sichtbares Licht (380 nm (violett) - 780 nm (rot))
- meist: Infrarot
- sehr grosse Übertragungskapazität (bis zu mehreren Hundert Tbit/s)
- Unempfindlichkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Störungen
- keine Potentialprobleme zwischen Sender und Empfänger
- kein Nebensprechen
- schwierigere 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  $\alpha < \alpha_g$

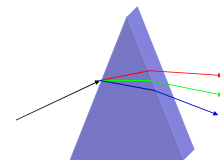


### Reflexion in Lichtwellenleitern



- Multimode-Fasern
  - Wellen mit verschiedenen Reflexionswinkeln haben unterschiedliche Ausbreitungszeit
  - „Verschmieren“ des Ausgangssignals
- Monomode-Fasern
  - auf wenige Wellenlängen reduzierter Kern (z.B. 3-15  $\mu\text{m}$ )
  - Licht kann sich nur in gerader Richtung ausbreiten
  - längere Distanzen möglich (ohne Repeater bis 100 km)
  - teurer als Multimode

### Prismen



## Dämpfung

$$A = 10 \log \left( \frac{P_r}{P_s} \right) \quad \alpha(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^4} + C_2 + A(\lambda)$$

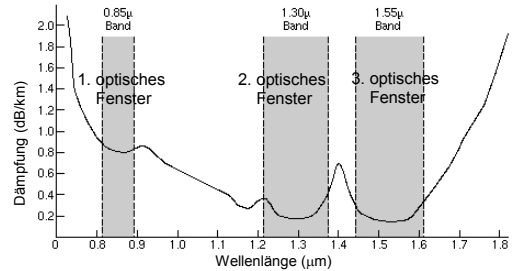
- Gründe für Dämpfung (Attenuation)
  - Materialabsorption
  - Materialfehler (Schmutzpartikel, Gasblasen, Strukturfehler)
  - Rayleigh-Streuung aufgrund von mikroskopische Materialinhomogenitäten
  - Zentrierungsprobleme von Glasfasern wegen Querschnittstoleranzen
  - Mikrobiegung (mikroskopische Krümmung 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

SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

7

## Dämpfung in Lichtwellenleitern

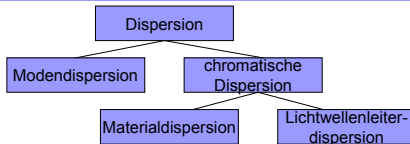


SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

8

## Dispersion



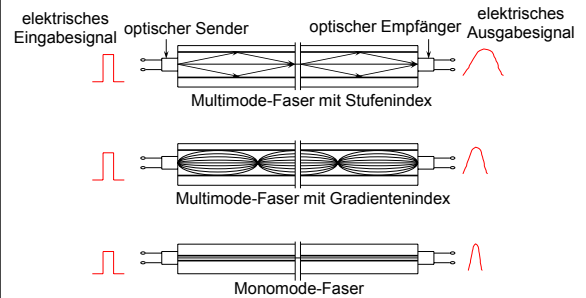
- Modendispersion
  - Moden mit unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen legen unterschiedliche Distanzen zurück
- Materialdispersion
  - Brechungsindex hängt von  $\lambda$  ab. Dispersion bei breitem Spektrum
- Lichtwellenleiterdispersion
  - Verteilung der Modenenergie hängt von  $\lambda$  ab.
  - 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

SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

9

## Dispersion in Lichtwellenleitern



SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

10

## 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  $> 100$  MHz  $\cdot$  Km
  - Monomode: BL  $> 10$  GHz  $\cdot$  Km
- SWITCHlambda (2001)
  - 2.5 Gbit/s-Kanäle ohne Verstärkung über 100 km

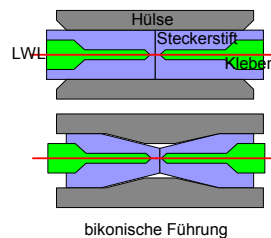
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

11

## Verbindungstechniken

- Lösbare Verbindungen
  - Steckverbinder
- Nicht lösbare Verbindungen: Spleissen
  - Klebespleissen
    - Nach Ausrichten und Zentrieren wird Anordnung mit Kleber (Anpassung an Brechungsindex!) fixiert.
  - Schmelzspleissen
    - Verschweissen der Faserenden bei 2000° C
    - Wärmeerzeugung durch elektrischen Lichtbogen
    - gute Stabilität
    - Dämpfung : ca. 0,1 dB



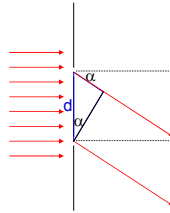
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

12

## Beugung am Spalt/Gitter

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



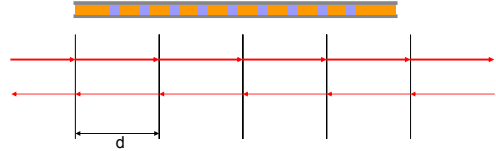
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

13

## 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



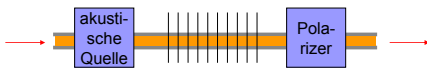
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

14

## Einstellbare akustische Filter

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



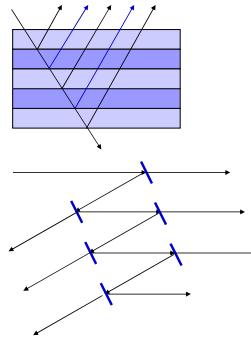
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

15

## Thin Film Filter

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



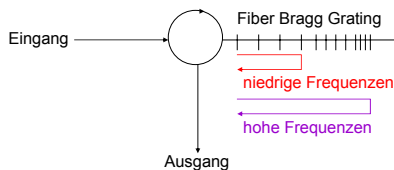
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

16

## 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



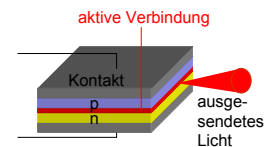
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

17

## Light Emitting Diode

- 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



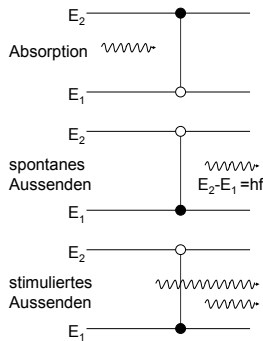
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

18

## 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

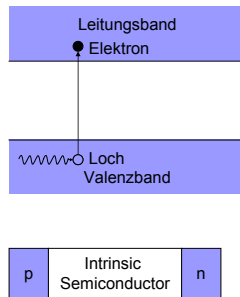


## Laserdioden

- Höhere Ausgangsleistungen
- Guter Einkopplungsgrad wegen besserer Abstrahlcharakteristik und kleine strahlende Fläche (einkoppelte 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

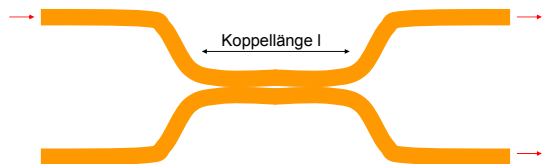
## Photodetektoren

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



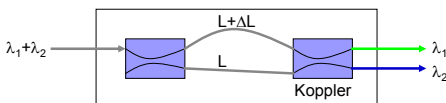
## Koppler

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



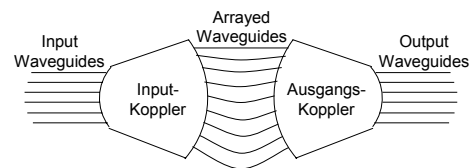
## Mach-Zehnder Interferometer

- 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



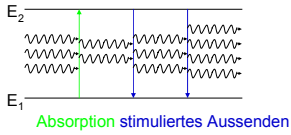
## Arrayed Waveguide Grating

- 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



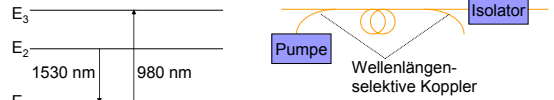
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

25

## 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



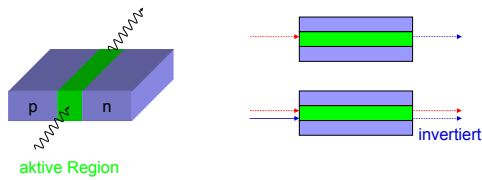
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

26

## Semiconductor Optical Amplifiers

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



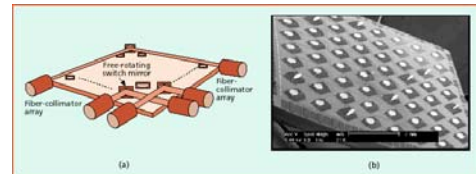
SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

27

## Mikroelektromechanische Systeme

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



SS 02

Torsten Braun (Universität Bern): Netze und Protokolle für das Internet

28