

Konzepte optischer Nachrichtenübertragung

Seminar „Moderne Optik“, WS 2007/2008, 26.11.2007

Eugen Martin, HU Berlin

Übersicht



Motivation

Grundkonzepte

Komponenten eines OS-Systems

Sender

Kommunikationskanal

Signalregeneration

Empfänger

Fortgeschrittene Konzepte

Modulatoren und Modulationssformate

Multiplexing

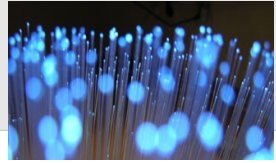
Time-Division Multiplexing (TDM)

Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Arrayed-Waveguide grating (AWG)

Faserverstärker EDFA

Rolle der Signalübertragung



Wegbegleiter des modernen Informationszeitalters

Transfervolumina verdoppeln sich um Faktor 2 alle 18 Monate

Vorhersage

Verteilte Informationssysteme

Internet und Folgetechnologien

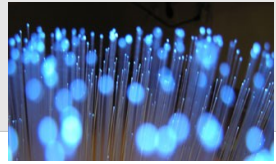
VoIP, IPTV, VideoOnDemand

Distributed Computing

Global verteilte Grids/Cluster



Warum Optische Signalübertragung?



große Distanzen

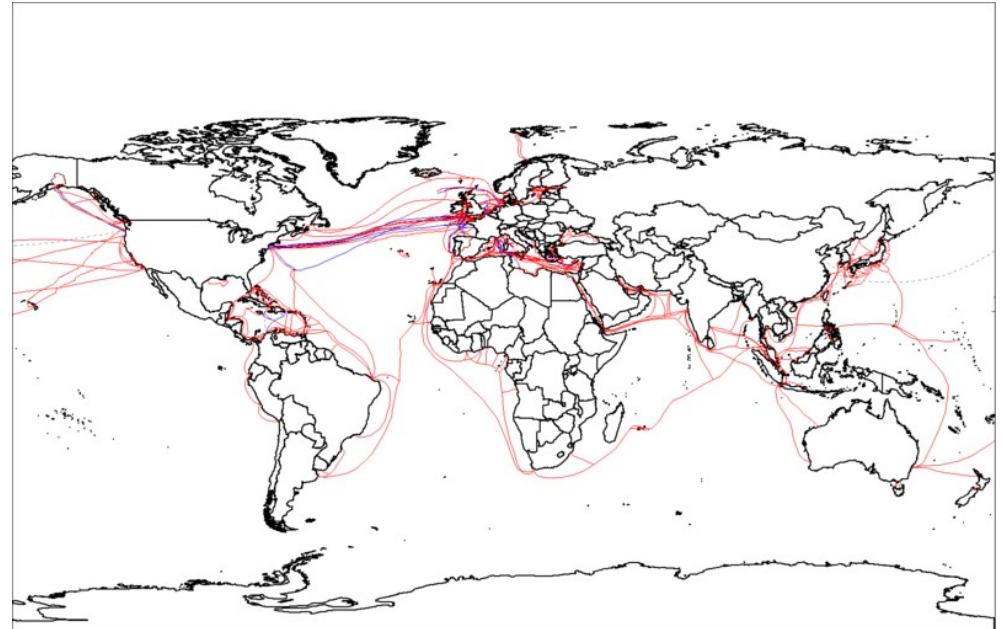
mit Regeneration mehrere 1000 km möglich

hohe Datenraten

elektrische Leitungen meist bis 10 GB/s

Optisch > 10 TB/s möglich

Packungsdichte mehrerer Faser praktisch unbegrenzt



schwierige Bedingungen

Resistenz gegenüber äußeren Störungen

EM-Pulse

Radioaktive Strahlung

Sicherheitskritische Anwendungen



Fig. 3.1.5 Light transmission through optical fibres will enable transmission capacities per carrier in the 100 Tbps range by 2015 © left: Telekom; right: France Telecom

Grund-Komponenten

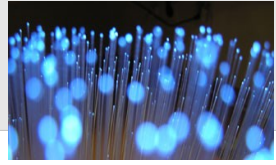
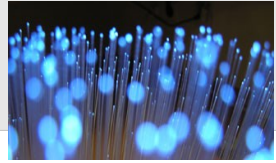


Figure 1.4: A generic optical communication system.

Sender - LED



Einfachster Sender

Light-Emitting-Diode (LED)

Halbleiterkristalle wie GaAs

Wellenlängen: 850nm, 1300nm

Spektrale Breite: 50-100nm

Ausgangsleistung: $\sim 1\text{mW}$

allerdings: divergentes Strahlungsfeld

Koppelverluste bei -17dB

Eingekoppelte Leistung im μm -Bereich

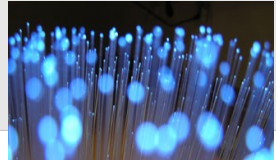
Anstiegszeit: $\sim 10\text{ns}$

Maximale Modulationsfrequenz: $\sim 100\text{ MHz}$

Max. Bitrate $\sim 200\text{ MBit/s}$



Laserdiode (LD)



Laserdioden / Halbleiterlaser

- einkoppelbare Leistung im mW - Bereich
- Multi-Mode und Single-Mode möglich
- kompakte Bauweise
- Optische Amplitude linear mit Pumprate/Diodenstrom
- direkte Amplituden-Modulation möglich

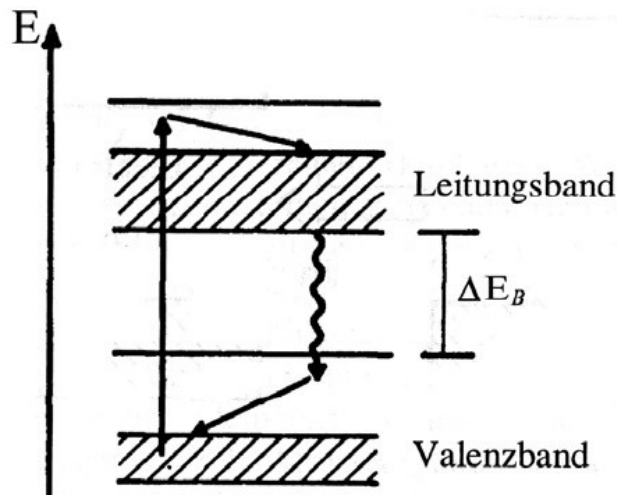
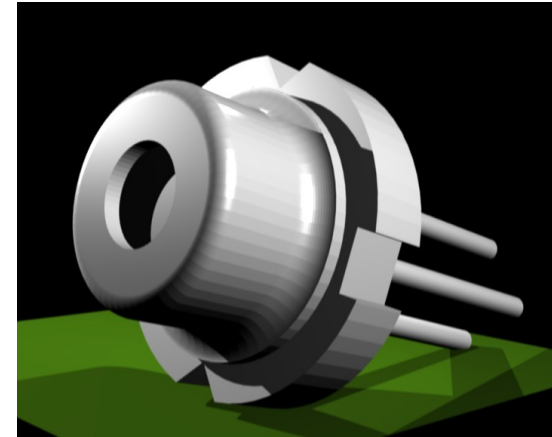
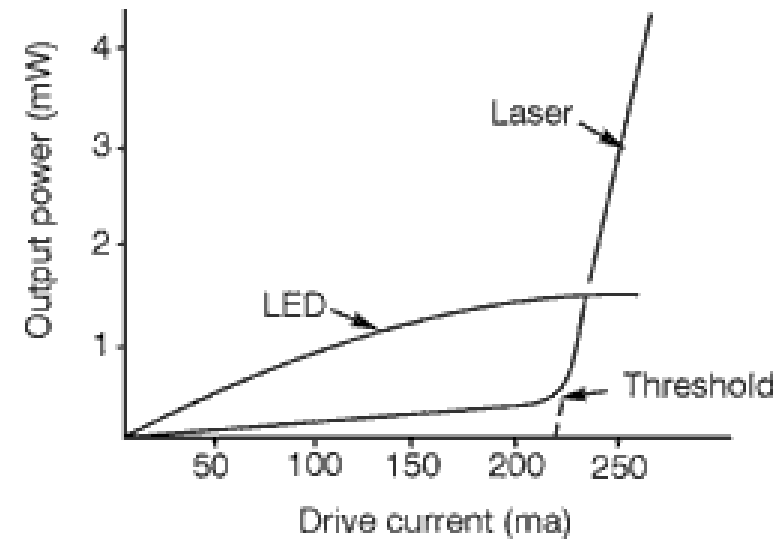
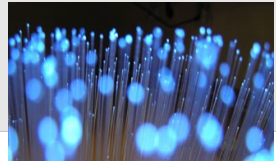


Abb. 17: Energieniveauschema für einen Halbleiterlaser [9; S. 132]



Laserdiode - Grenzen



Leistungsgrenze

endlicher „Einschaltvorgang“ des Lasers

„Einschwingen“ ~ 10 ps

Folge für OS-System

Modulationsfrequenz nur bis 10 GHz

Max. Bitrate ~ 20 GBit/s

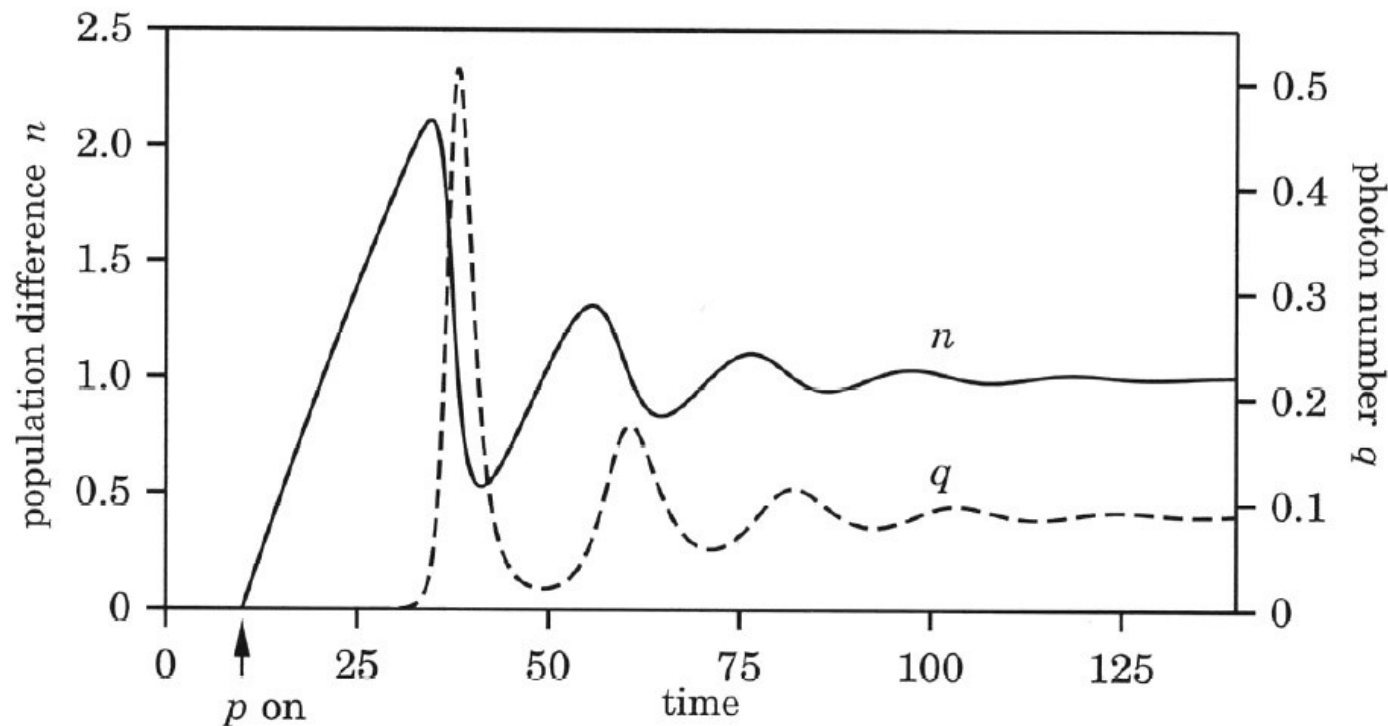
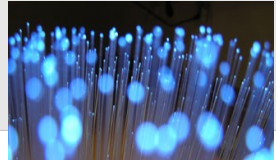


Fig. 10.9. Photon number q and population difference n when a four-level laser is switched on. At the time indicated by the arrow, the pump term is switched from $p = 0$ to $p = p_0 = 0.1$ (decay constant $b = 0.01$).

Externe Modulation



Lichtquelle

konstante Amplitude (Constant Wave)

externe Modulation

Elektro-Optischer Modulator (EOM)

Elektro optischer Effekt

Mach-Zehnder-Modulator

Magneto – optischer Effekt

Absorptionseffekte

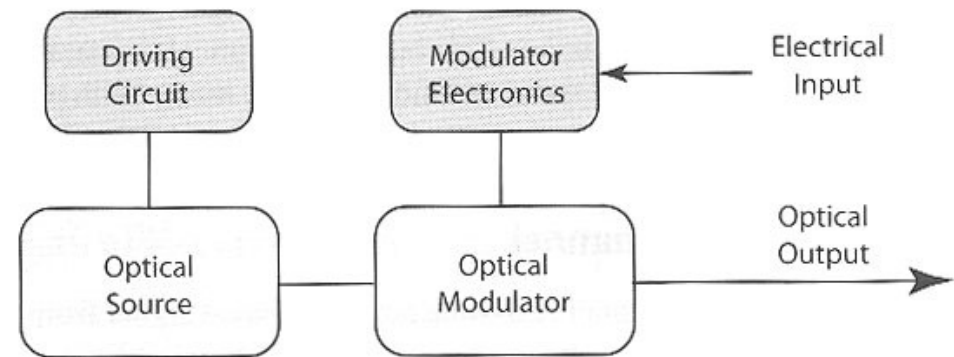
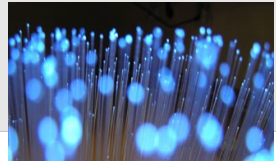


Figure 1.5: Block diagram of an optical transmitter.

Mach-Zehnder-Modulator



Elektro-Optischer Effekt

Brechindex im optischen Medium ist E-Feld-abhängig
optische Weglänge im Wellenleiter veränderbar

Leistungsgrenzen

Kann auf dem Gleichen Silizium-der HL-Laser gefertigt werden

Minimale Einkoppelverluste

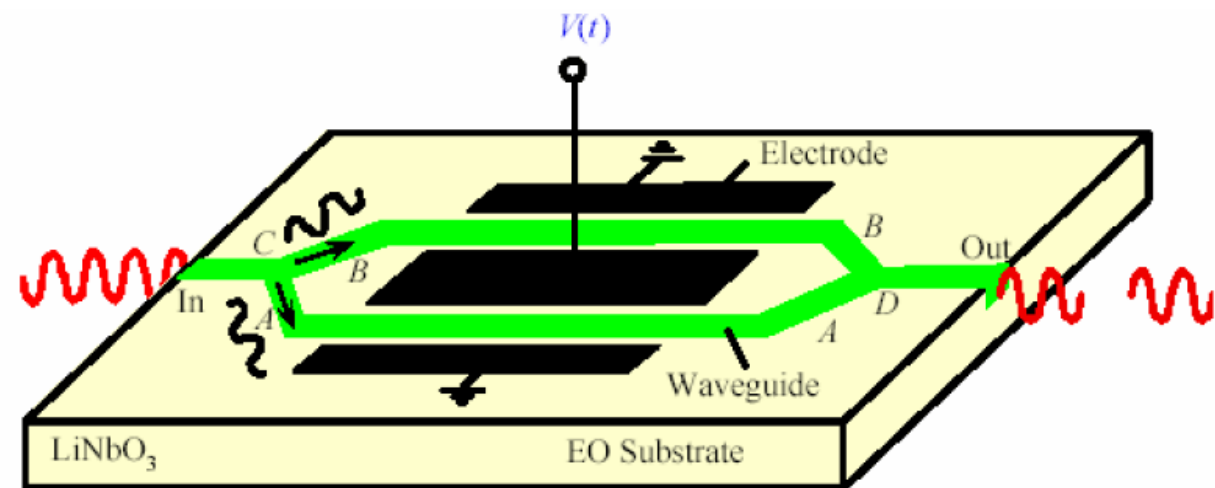
Max.Bitrate bis 40 GB/s

Mach-Zehnder-Interferometer

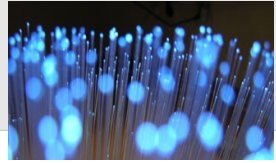
Signalteilung in 2 Kanäle
bel. Phasenverschiebung zwischen den Armen einstellbar $\Delta \phi \in [0, 2\pi]$

$\Delta \phi = 0$ konstruktive Interferenz: 1 Bit

$\Delta \phi = \pi$ Destruktive Interferenz: 0 Bit



Amplitudenmodulation



Amplitude Shift Keying (ASK) - Formate

Return-to-zero (RZ)

Puls kürzer als Bit-Slot ein
Mehrere 1-Pulse unterscheidbar

Non-return-to-zero (NRZ)

Puls nimmt ganzen Bit-Slot
Bandbreite ca. 2 mal geringer als RZ
anfälliger für Puls-Verbreiterung

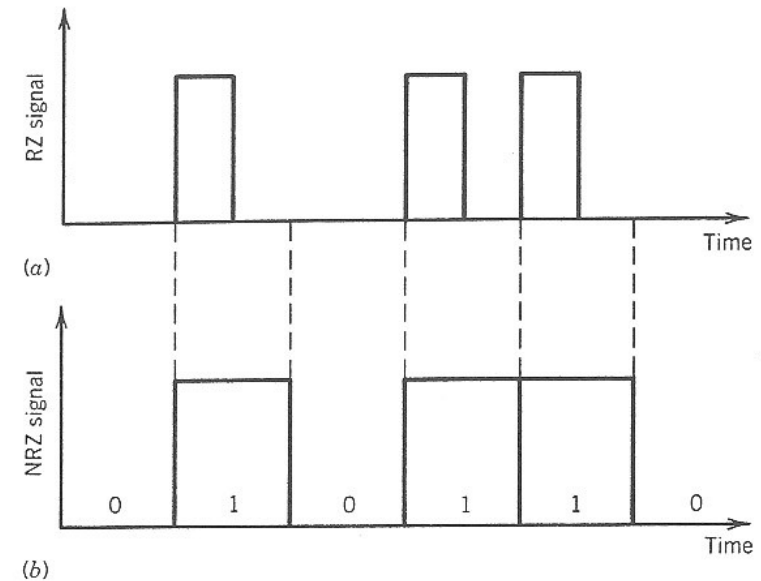
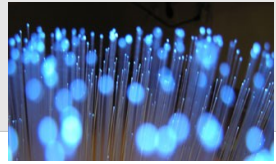


Figure 2.4: Optical bit stream 010110... coded using (a) return-to-zero (RZ) and (b) nonreturn-to-zero (NRZ) formats.

Modulation



Bisher

Amplitudenmodulation: Amplitude Shift Keying (ASK)

Kommerziell am weitesten verbreitet

Weiterhin möglich

Frequency Shift Keying (FSK)

Frequenzmodulation

Phase Shift Keying (PSK)

Phasenmodulation

Vorteil – keine Amplitudenänderung

Nichtlineare Effekte tragen wenig bei

Speziell: Differential PSK (DPSK)

Kodierung in der Phasendifferenz
aufeinanderfolgender Pulse

Polarization Shift Keying (PoSK)

Ungeeignet, da die meisten Fasern nicht
polarisationserhaltend

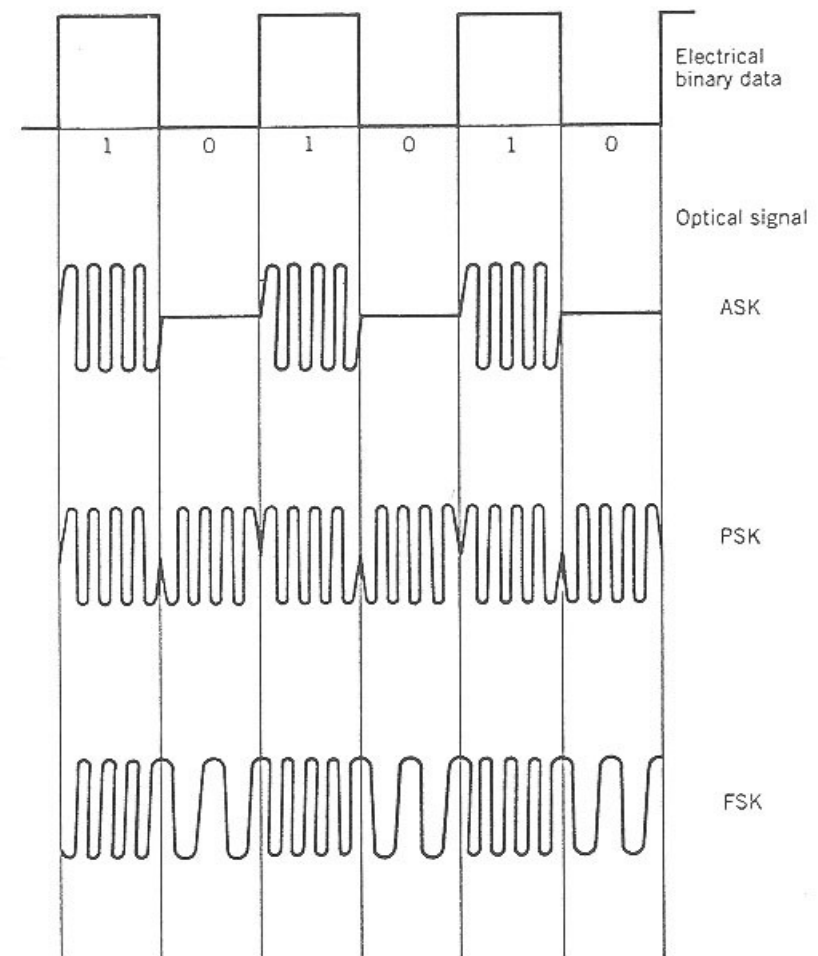
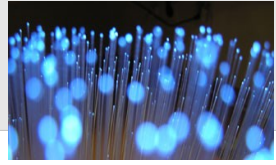


Figure 2.1: Modulated optical carrier in the case of the ASK, PSK, and FSK formats for a specific bit pattern shown on the top.

Übertragungsstrecke



Freiraum

Luft

Streuung

Dispersion

Kaum verwendet

Vakuum

Unvermeidbare Strahldivergenz

teilweise in der Weltraumtechnik eingesetzt

Lichtwellenleiter (LWL), optische Faser

Material

Mineralglas

Kieselglas

Quarzglas

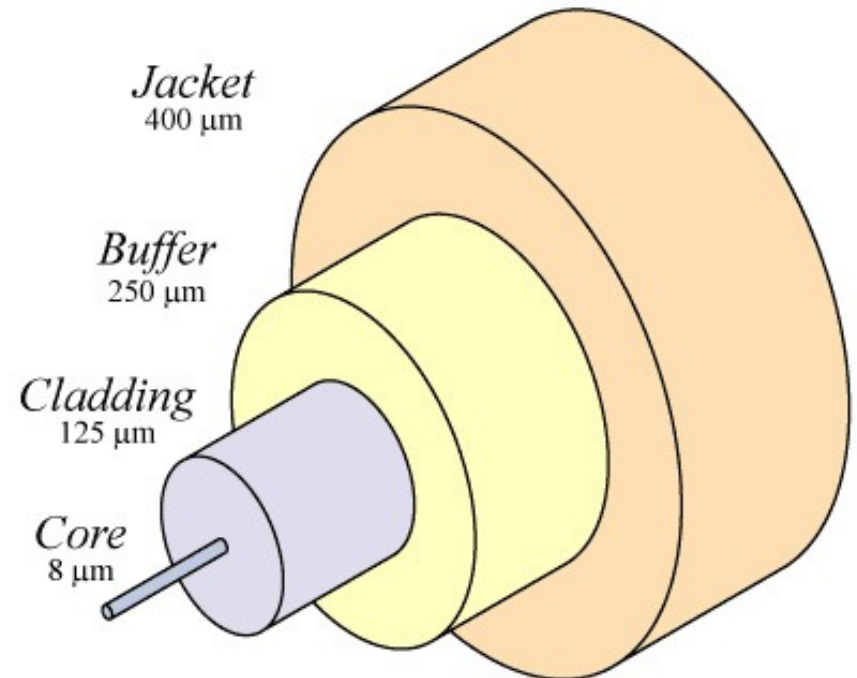
organisches Glas (Kunststoff)

Aufbau

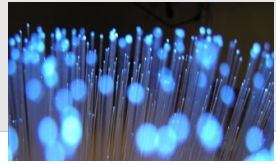
Kern

Mantel

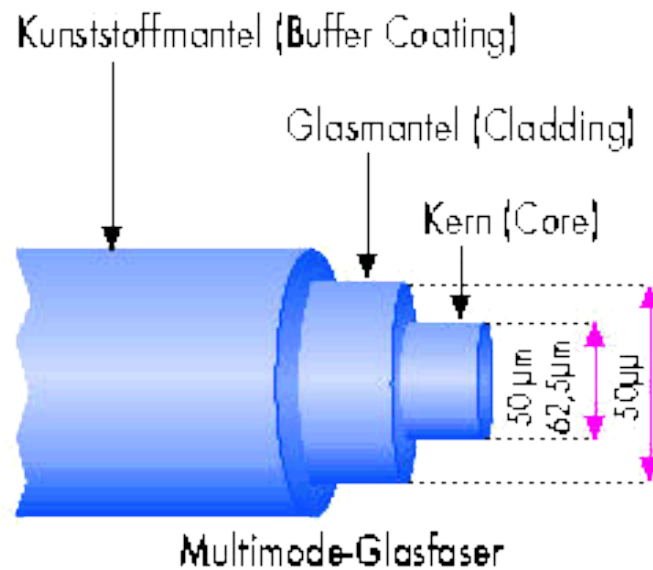
Schutzbeschichtung



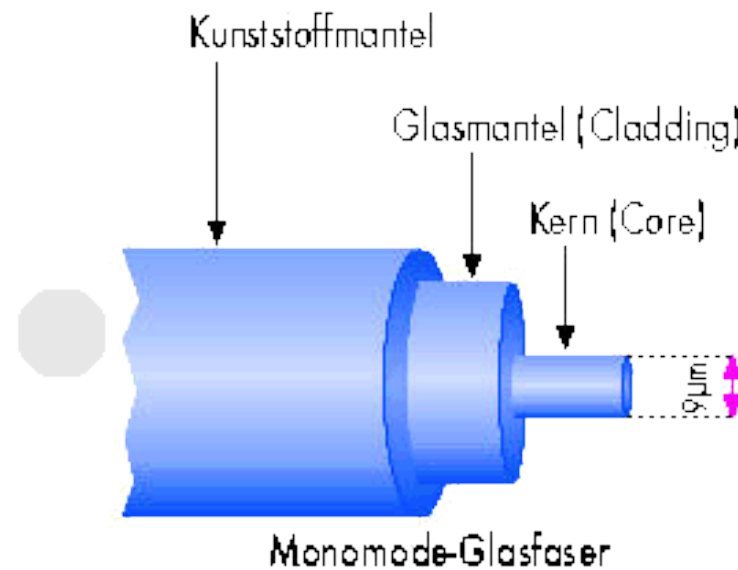
Multimode- und Singlemode-Faser



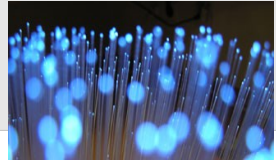
Multimode



Singlemode (Monomode)



Multimode-Faser



50 – 62,5 μm Core

mehrere Transversalmoden

Stufenindexfaser

Kern und Mantel haben versch.
Brechungsindex

Totalreflexion zwischen Kern und Mantel

Gradientenfaser

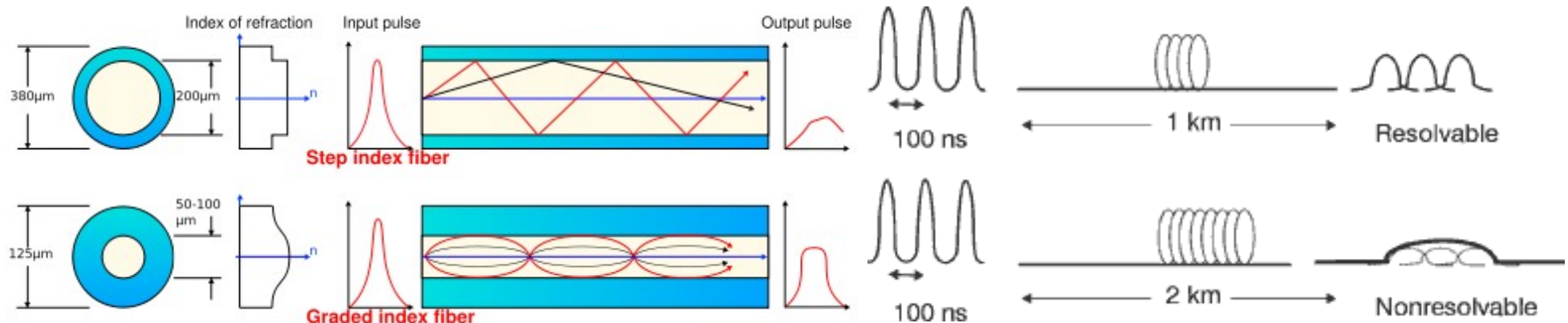
Kern hat Indexgradienten

=> Licht wird reflexionsfrei abgelenkt

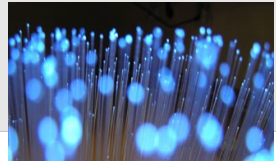
Leistungsgrenzen

Multimodendispersion aufgrund
Verschiedener Weglängen

Dispersion steigt linear mit Faserlängen
häufig in Kurzstreckensystemen verwendet



Theorie der Wellenleitung



Ausgangspunkt

Maxwell-Gleichungen im Dielektrikum für
Transversalwellen

$$\rho(\mathbf{r}, t) = 0, \quad \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = 0$$

Separationsansatz

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(x, y) e^{i(kz - \omega t)}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(x, y) e^{i(kz - \omega t)}$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\omega^2}{c_0^2} \epsilon_r(x, y) - k^2 \right] \begin{pmatrix} \mathbf{E}(x, y) \\ \mathbf{H}(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

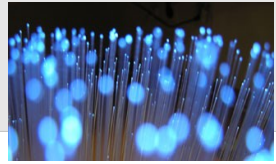
Führt zu Helmholtz-Gl.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0^2 n^2(x, y) - k^2 \right] \begin{pmatrix} E_z(x, y) \\ H_z(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_0 = \omega / c_0$$

$$n(x, y) = \sqrt{\epsilon_r(x, y)}$$

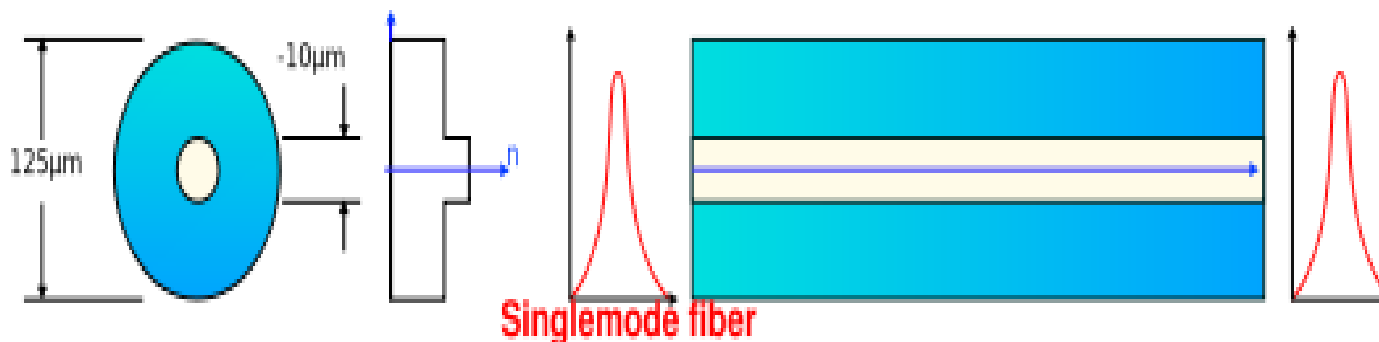
Monomoden Faser



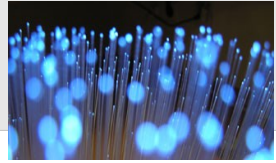
Formale Ähnlichkeit zu QM, NLS

Dielektrischer Wellenleiter	Quantenmechanik in $D = 2$
$[\Delta_{\perp} + k_0^2 n^2(x, y) - k^2] E_z(x, y) = 0$	$\left\{ \Delta_{\perp} - \frac{2M}{\hbar^2} [V(x, y) - E] \right\} \psi(x, y) = 0$
$k_0^2 n^2(x, y)$	$-\frac{2M}{\hbar^2} V(x, y)$
$-k^2$	$\frac{2M}{\hbar^2} E$
ausbreitungsfähige Mode: k reell	gebundene Lösung: $E < 0$
gedämpfte Mode: k imaginär	Streulösung: $E > 0$

Lösung für Stufenleiter
Bedingung für
Monomoden
Kleinerer Core: 3 -10
 μm



Signalpropagation in Fasern



Dämpfung

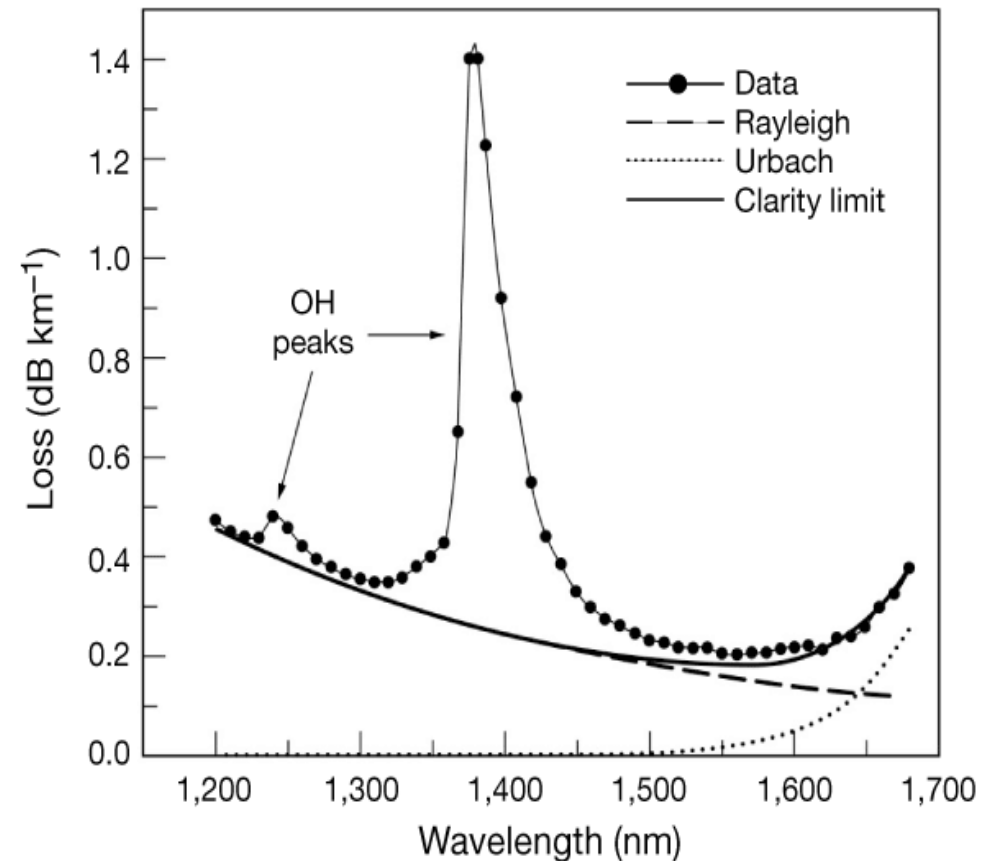
Minimum bei 0,2 dB/km nahe 1,5 μm
d.h. nur 1% optische Leistung nach 100 km

Transmissionsfenster

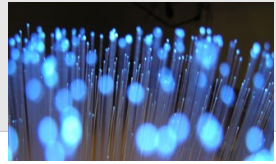
800 - 900 nm (LED)
1250 - 1350 nm (LED, HL-Laser)
1500 - 1600 nm (HL-Laser)

Material-Dispersion

Paketverbreiterung



Signalregeneration



Dämpfungsverluste in Fasern

Abschwächung des Signals

SNR niedrig

Signal nach langer Strecke nicht detektierbar

Leistungsgrenze

endliche der Operationslänge der Faser

Gegenmaßnahme: Signalregeneration

Regeneratoren / Repeater

bestehen aus Empfänger / Sender

Wandeln das Signal optisch => elektrisch => optisch

Rauschen => SNR + BER Verluste

i.d.R. komplex und kostenintensiv

Optische Verstärker

Erbium-Doped-Faser-Amplifier

Stimulierte Emission

Raman-Verstärker

Stimulierte Ramanstreuung

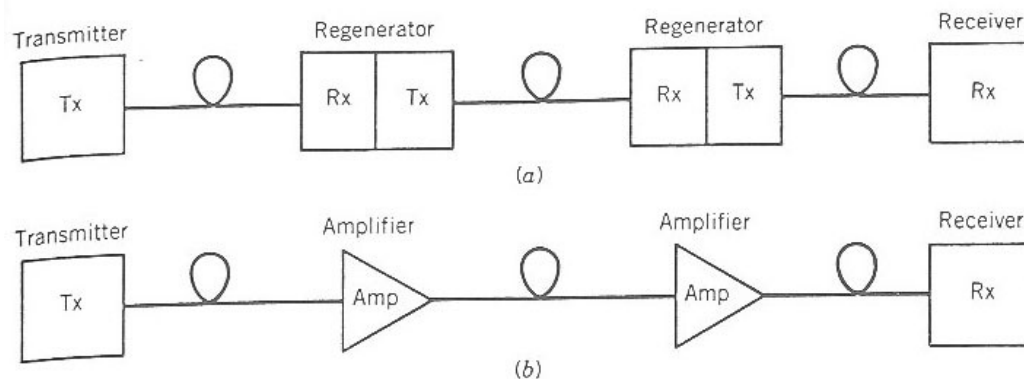
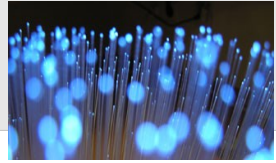


Figure 1.6: (a) Regenerators or (b) optical amplifiers used periodically for compensating fiber losses in a lightwave system; Tx and Rx stand for transmitter and receiver, respectively.

Erbium dotierte Faser-Verstärker



Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

Optischer Verstärker

mit Erbium dotiert

Direkt in der Faser

Pumpen

Durch eingekoppelte Halbleiterlaser

Erzeugt Inversion

Verstärkung durch stimulierte Emission

Wichtig

Pumpwellenlänge im Bereich starker
Dämpfung

=> Keine Störung des Signals durch Rauschen

Pumpwellenlänge:

980 nm oder 1480 nm

Betriebswellenlänge:

C-Band (ca. 1530 bis 1560 nm)

L-Band (ca. 1570 bis 1600 nm)

geringes Rauschen mit einer Rauschzahl
von 3 - 6 dB

hohe Verstärkung (20 - 40 dB)

Länge

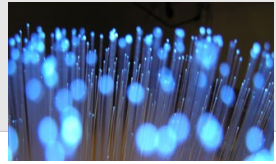
10 - 60 m für C-Band-EDFAs

50 - 300 m für L-Band-EDFAs

Regenerator – Abstand

Im Bereich von 100km

OS - Empfänger



Photodiode

p-i-n Diode

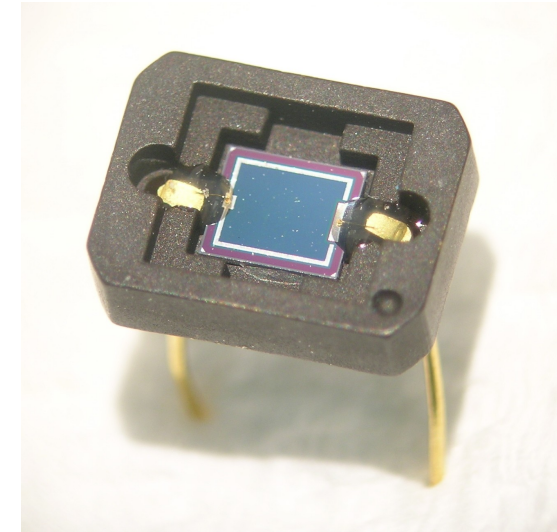
Kompakte Bauweise

Hohe Quanteneffizienz (ca. 80%)

Linearer elektr. output

Avalanche-Diode

Zusätzliche Signalverstärkung



Demodulator-Elektronik

abhängig von der Modulationsart

Grenzen: Signalrauschverhältnis (SNR)

Rauschen

thermisch

Elektronik

Photodetektion an sich

Leistungsgrenzen

Empfindlichkeit, SNR

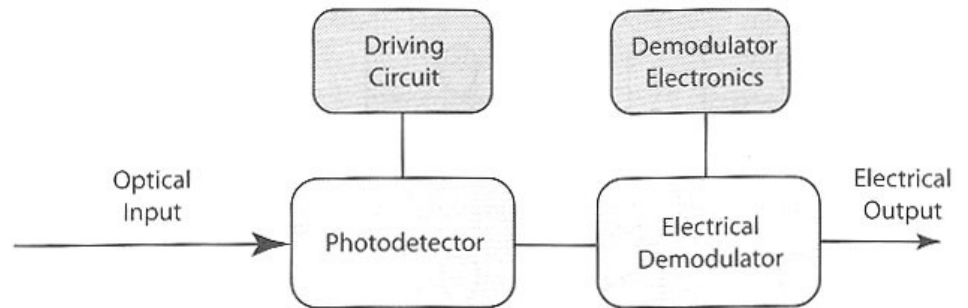
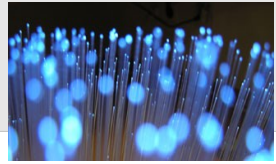


Figure 1.7: Block diagram of an optical receiver.

Channel-Multiplexing



Multiplexing

mehrere (Daten-) Kanäle in einer Faser
Gemeinsame Bandbreitennutzung

Time Division Multiplexing (TDM)

Jeder Kanal eigenes Zeitfenster

Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Jeder Kanal eigene Frequenz

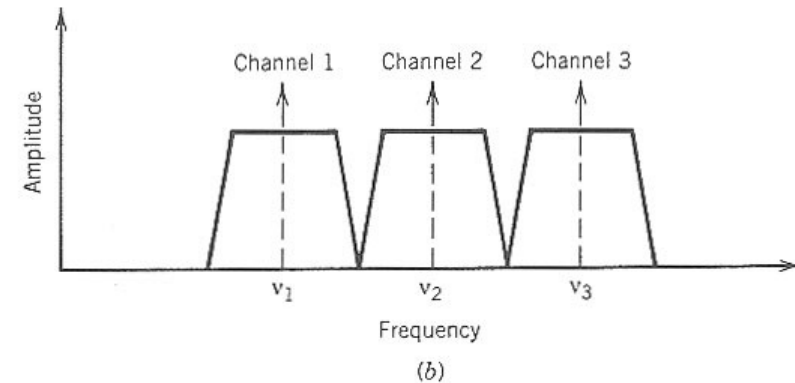
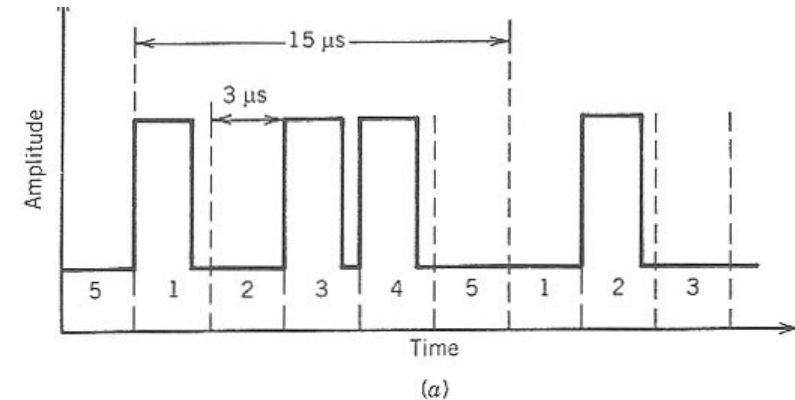
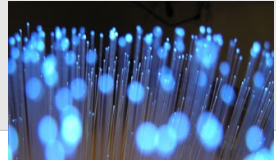


Figure 1.11: (a) Time-division multiplexing of five digital voice channels operating at 64 kb/s; (b) frequency-division multiplexing of three analog signals.

Time-Division-Multiplexing TDM



Benötigt Kurze Pulse

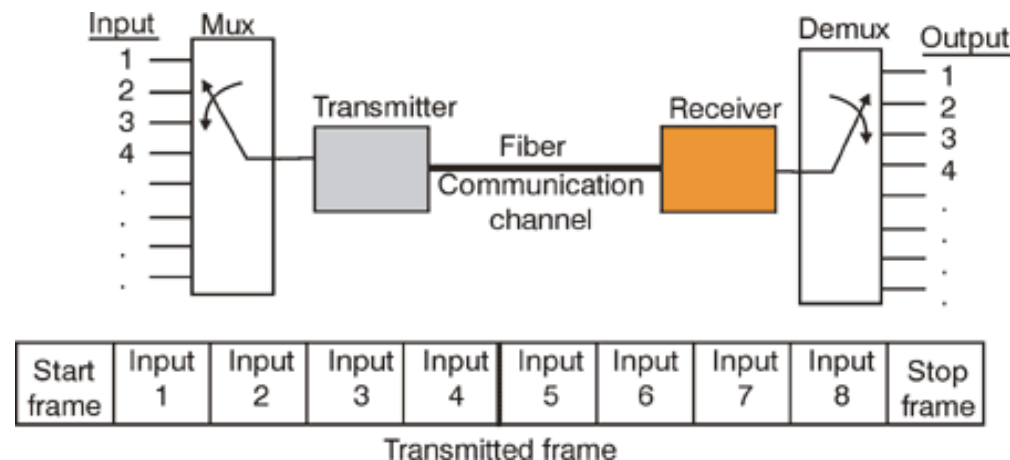
Hoch periodisch/synchronisiert

=> Halbleiterlaser mit Modensynchronisation

Elektrisches TDM (ETDM)

MUX / DEMUX findet in Elektronik statt
Verarbeitung in Elektronik führt zu

Max. Bitrate ~100Gbit/s



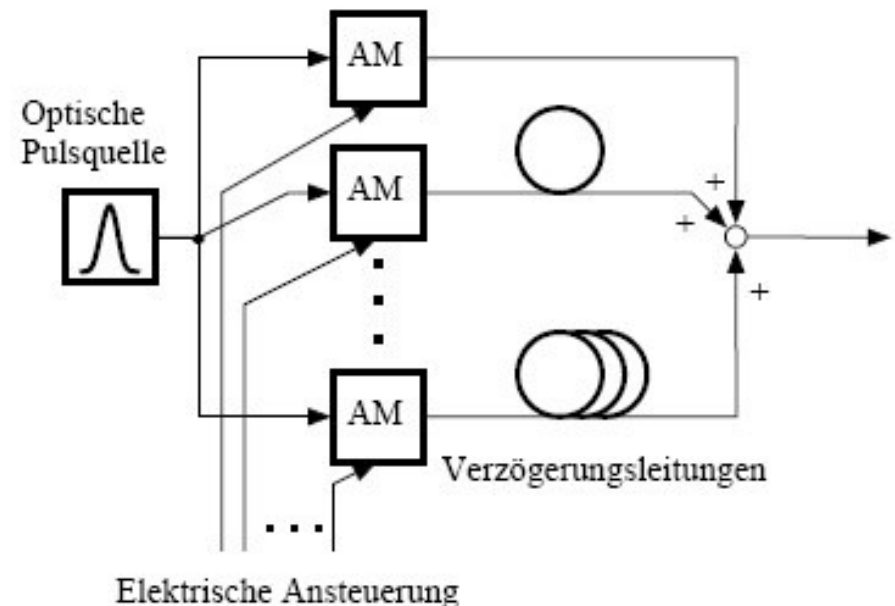
Optisches TDM (OTDM)

Mehrere Quellen bzw. Signalverzögerung

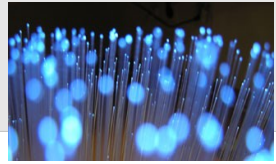
Komplex und fehleranfällig

Meist im Labor für extrem Hohe Datenraten verwendet

Max Bitrate ~ 640 Gbit / s



Wavelength Division Multiplexing (WDM)



Optisches Multiplexing

Kanäle im Frequenzraum getrennt
genaue Interferometrie-Methoden

Kombinierbar mit TDM

Realisierung

Mehrere Signalquellen versch.
Wellenlängen notwendig

MUX/DEMUX

Interferometer hinreichender Auflösung
Insb. Arrayed Waveguide Grating

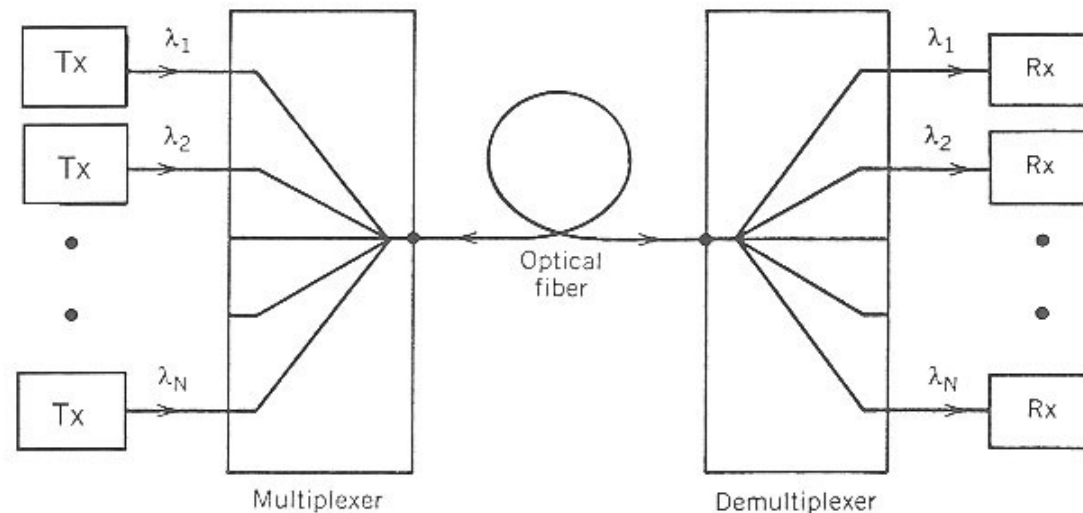
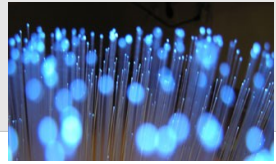


Figure 1.12: Schematic of a WDM lightwave system. Multiple channels, each operating at a fixed assigned wavelength, are first combined using a multiplexer and then separated at the receiver end using a demultiplexer.

Arrayed Waveguide Grating (AWG)



MUX / DEMUX – Element für WDM

planares Substrat - meist Silizium-Wafer

aufgebrachte Schicht (Glas, Silizium, Polymere) mit planaren Wellenleitern

Wellenleiter haben konstante Lichtwegdifferenzen

wirkt als „planares Gitter“

Interferenz führt zu räuml. Trennung verschiedener Wellenlängen in versch. Wellenleiter

Bidirektional einsetzbar

links nach rechts Demultiplexer

rechts nach links Multiplexer

Leistungsgrenze

Kanalabstand bei 50-100 GHz

Bis zu 96 Kanäle

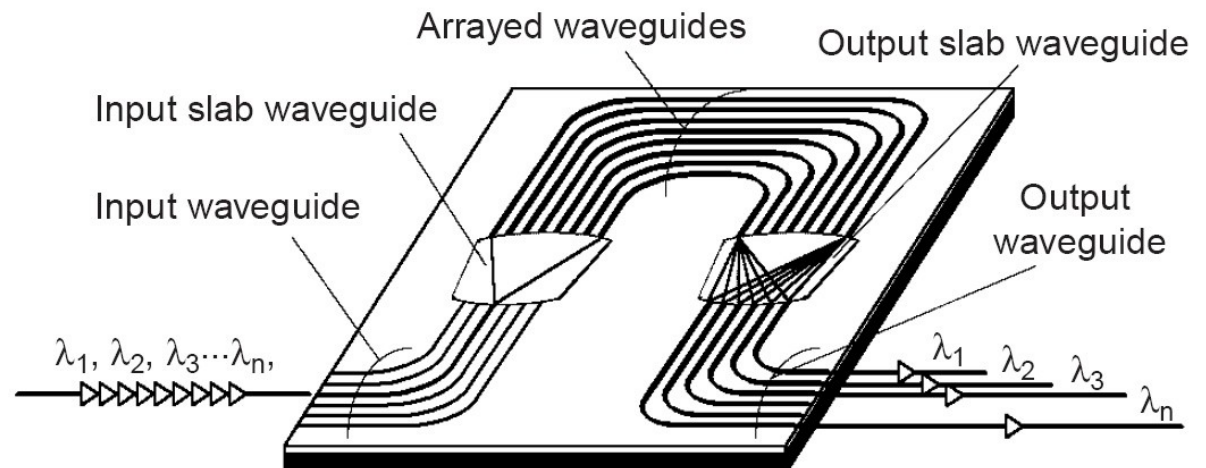
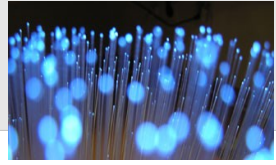


Figure 2 Optical waveguide circuit structure of AWG

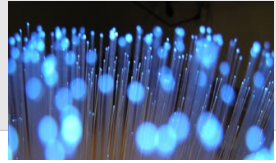


Fragen?



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Quellen



- [1] Gowind P. Agrawal, Lightwave Technology – Telecommunication Systems, Willey 2005
- [2] V. Aschoff, Geschichte der Nachrichtentechnik, Springer-Verlag, 1984
- [3] Towards a Bright Future for Europe - Strategic Research Agenda in Photonics, European Technology Platform Photonics21, 2006