



## Rechnernetzpraxis

# Optische Übertragungstechnik

Grundlegende Prinzipien und Kopplungstechnologien



Dipl.-Inf. Tenshi C. Hara  
[tenshi.hara@tu-dresden.de](mailto:tenshi.hara@tu-dresden.de)  
[www.rn.inf.tu-dresden.de/hara/](http://www.rn.inf.tu-dresden.de/hara/)



# Gliederung

- Grundlagen
  - Vor- und Nachteile der optischen Übertragungstechnik
  - Allgemeine Physikalische Grundlagen
  - Dämpfung
  - Optische Fenster
  - Dispersion
  - Moden
- LWL-Typen
  - Stufenindex-LWL
  - Gradientenindex-LWL
- Kopplungselemente
  - Optoelektrische/Elektrooptische Koppler
  - Optische Koppler

# Grundlagen

# Vorteile der optischen Übertragungstechnik

Im Vergleich zu elektrischer Übertragungstechnik

- hohe Übertragungskapazität
- geringe Dämpfung
- vollständige elektrische Isolation der beteiligten Kommunikationsparteien
  - keine elektrischen Potentiale  
(Spannungsunterschiede gibt es nicht)
  - kein Nebensprechen
- Resistenz gegen elektrische und magnetische Störungen
- geringer Kabelquerschnitt
  - geringes Längengewicht
  - einfache Bündelung von Kabelsträngen

# Nachteile der optischen Übertragungstechnik

## Im Vergleich zu elektrischer Übertragungstechnik

- empfindliche Kabel
  - höhere Kurvenradien
  - Knicken verboten
  - aufwändige Kopplungen
  - aufwändige Herstellung
- schwierige Signalverstärkung
- „simple“ Switches erfordern Signalumwandlung
  - optoelektrischer Eingang
  - elektrische Verarbeitungskomponenten
  - elektrooptischer Ausgang

# Physikalische Grundlagen

Bei der Verwendung von Licht als Informationsträger im Übertragungssystem ist zu beachten

- Welle-Teilchen-Dualismus
  - Welle: Licht hat Eigenschaften einer elektromagnetischen Welle
  - Teilchen: Licht hat Eigenschaften eines Photonenstroms
- besondere Anforderungen an das Übertragungsmedium
  - keine Glasfaser, sondern besondere Lichtwellenleiter
  - optische Kopplung erfordert hohe Präzision

# Physikalische Grundlagen

## Welle-Teilchen-Dualismus

- Welleneigenschaft des Lichtes
  - Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium begrenzt
    - nicht Lichtgeschwindigkeit!
    - sondern:  $v = \lambda \cdot f = \frac{c}{n}$  (Geschwindigkeitsgleichung)
      - » Beispiel Quarzglas:  $n \approx 1,45 \Rightarrow v \approx 207000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$
      - » Achtung: Brechungsindex von Wellenlänge abhängig!
  - geeignete Frequenzbereiche im Medium begrenzt
    - abhängig von Materialdämpfung
      - » Dämpfung: Abschwächung der Wellen
    - nur bestimmte optische Fenster nutzbar

$v$ : Lichtgeschwindigkeit im Übertragungsmedium,  
 $\lambda$ : Wellenlänge des Lichtes,  $f$ : Frequenz des Lichtes,  
 $c$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $\text{ca. } 300000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ),  
 $n$ : Brechungsindex des Übertragungsmaterials

# Physikalische Grundlagen

## Welle-Teilchen-Dualismus

- Teilcheneigenschaft des Lichtes
  - jedes Teilchen hat bestimmte Energie
    - abhängig von der Frequenz:  $E_p = h \cdot f$
  - energieabhängige Einflussfaktoren:
    - Dämpfung: Reduktion der Photonenenergie
    - Absorption: Photonenverlust im Photonenstrom
    - Dispersion:  $E_p$ -abhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit
      - » Brechung und Streuung: Ablenkung von Photonen

$E_p$ : Photonenenergie,  $f$ : Frequenz des Lichtes,

$h$ : Plancksches Wirkungsquantum (ca.  $6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \text{J} \cdot \text{s}$ )

**Achtung:** Dämpfung ist ein Einflussfaktor sowohl für die Wellen- als auch die Teilcheneigenschaft



# Materialdämpfung

Material	Dämpfung in dB/km	Eindringtiefe in m bei 30dB-Grenze
Fensterglas	50.000	0,6
Optisches Glas	3.000	10
Stadtatmosphäre	10	3.000
Industrieller LWL	3	10.000
Labor-LWL	<0,25	100.000

- Materialien mit hoher Dämpfung
  - billiger
  - nur für kurze Strecken
- Materialien mit niedriger Dämpfung
  - teurer
  - für MAN und Interkontinentalverbindungen unverzichtbar

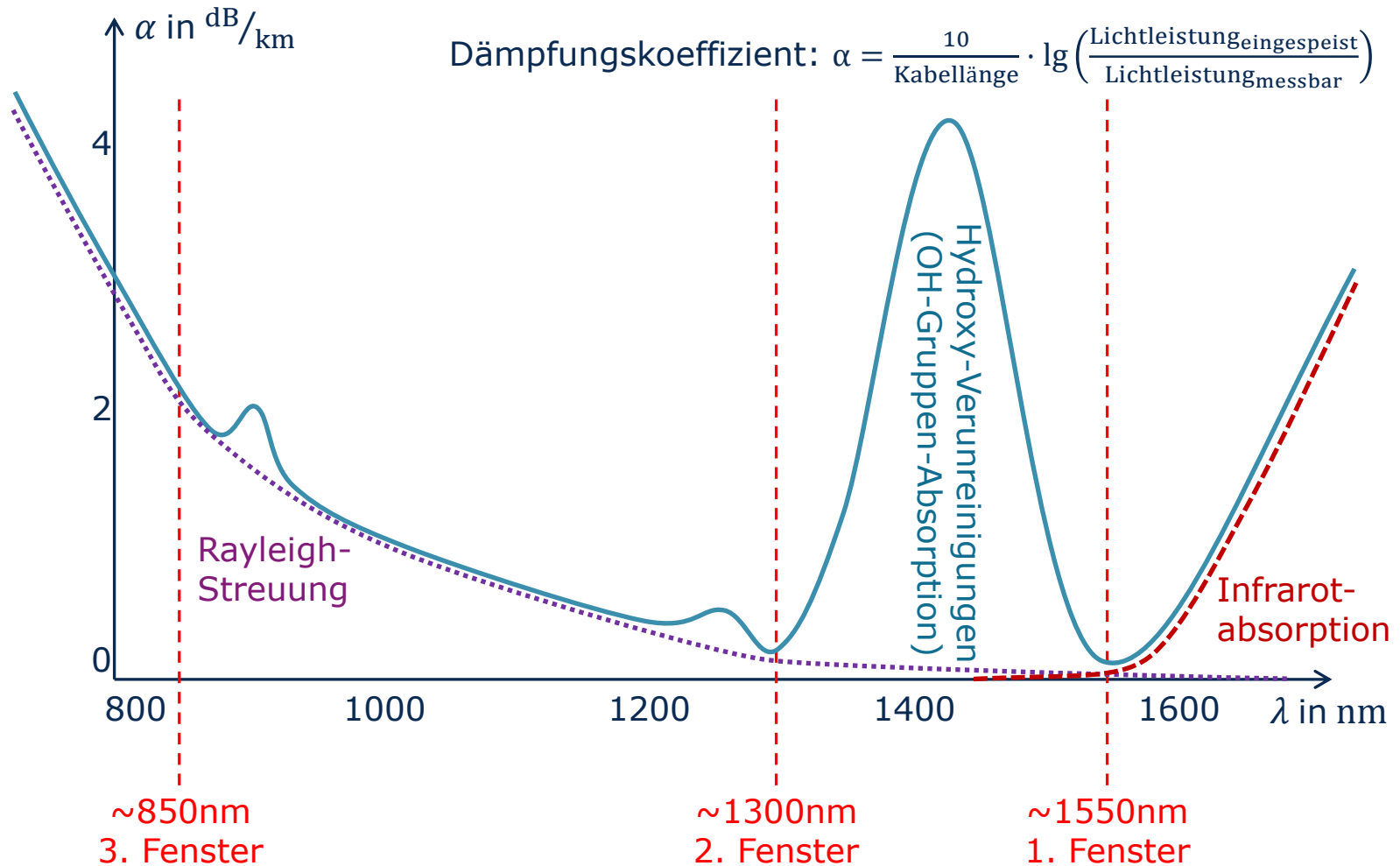
# Folgen aus den physikalischen Grundlagen

## Beschränkung auf bestimmten Lichtbereich bei leitungsgebundenen Übertragungssystemen

- Verwendung von hochreinem Quarzglas
  - Minimierung der Dämpfung im Vergleich zu anderen Materialien
  - 3 (sinnvoll) nutzbare optische Fenster
- Beschränkung auf „nahes Infrarot“
  - Wellenlänge zwischen 800nm und 1700nm
  - grenzt direkt an sichtbares Licht (400nm bis 800nm)

# Optische Fenster

## Dämpfung im hochreinen Quarzglas-LWL (qualitativ)



# Optische Fenster

## 1. Fenster

- globales Minimum aus Rayleigh-Streuung und Infrarot-Absorption
  - Wellenlänge  $\lambda = 1,55\mu\text{m} = 1550\text{nm}$
- teuer in der Umsetzung

## 2. Fenster

- lokales Dämpfungsminimum
- absolutes Dispersionsminimum bei Quarzglas
  - Wellenlänge  $\lambda = 1,3\mu\text{m} = 1300\text{nm}$
  - Dispersion wird später erklärt

# Optische Fenster

## 3. Fenster

- Einfach nutzbar
  - Einfach herstellbare LASER-LEDs
  - Kostengünstige Sende- und Empfangseinheiten
- (Relativ) Hohe Dämpfung

Von den drei optischen Fenstern sind das 2. und das 3. Fenster besonders interessant.

➔ Bei optischen Übertragungssystemen müssen immer Materialeigenschaften und Kosten abgewogen werden.

# Dispersion

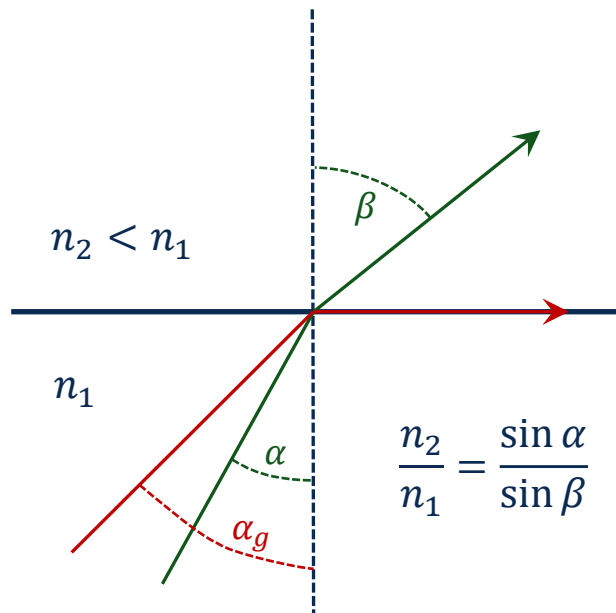
Es gibt zwei wichtige dispersive Einflüsse auf die optische Übertragung

- Brechung
  - abhängig vom Material werden Lichtstrahlen gebrochen, abgelenkt oder reflektiert
- Modendispersion
  - unterschiedliche Moden des Lichts durchlaufen den LWL unterschiedlich schnell
    - Erklärung der Moden folgt später
  - Lichtsignale (Impulse) werden verformt
  - in Multimode-LWL unvermeidbar da eingespeiste Lichtenergie auf alle stabilen Moden quantisiert wird

# Brechung

Wie bei der aus der Schule bekannten Strahlenoptik:

- zwei Materialien unterschiedlicher Brechzahl



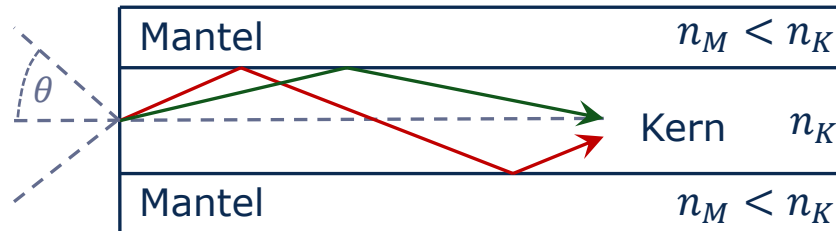
- ab einem bestimmten Grenzwinkel  $\alpha_g$  geht der Lichtstrahl nicht mehr von Medium 1 in Medium 2 über
- wird Medium 1 vom anderen „ummantelt“, kann man das Licht führen  $\rightarrow$  LWL

# LWL-Typen



# Brechung

## Lichtwellenleiter (LWL):



Beispielhafter  
Stufenindex  
Multimode-LWL  
(2 Moden eingezeichnet)

- LWL funktioniert nur, wenn Licht an Stirnfläche innerhalb eines definierten Einfallstrichters eintritt
- halber Öffnungswinkel des Einfallstrichter definiert „Numerische Apertur“ (NA)  
→ Immer in LWL-Datenblättern angegeben!

$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_K^2 - n_M^2}$$

# LASER-Licht

Damit brauchbare Signale übertragen werden können, muss auf Grund der vorgenannten Einflussfaktoren wohl definierbares Licht verwendet werden:

- eine (oder wenige) definierte Wellenlänge(n)
- große Kohärenzlänge
- hohe Intensität
- geringe Streuung

Die Anforderungen an das signaltragende Licht erfüllt LASER<sup>1</sup>-Licht bzw. Licht von LASER-Dioden, die LASER-ähnliches Licht erzeugen.

<sup>1</sup> Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

# Moden

Nicht alle Lichtwellen können sich im LWL ausbreiten

- nur diskrete Eintrittswinkel führen zu ausbreitbaren Lichtwellen (Quantisierungseffekt)
- abhängig von Kerndurchmesser  $d_K$  und Lichtwellenlänge  $\lambda$
- jede Mode durchläuft auf Grund unterschiedlicher Winkel den LWL unterschiedlich schnell
- Anzahl  $M$  der Moden:

$$M = \left( \frac{\pi \cdot d_K \cdot \text{NA}}{\lambda \cdot \sqrt{2}} \right)^2 \quad (\text{Moden-Gleichung})$$

- ➔ Monomode-LWL mit sehr dünnem Kern erlauben nur eine ausbreitungsfähige Mode
- ➔ Multimode-LWL erlauben mehrere Moden

# LWL-Typen

Mit heutigen Herstellungsverfahren gibt es zwei Typen von LWL, die sich in drei Gebrauchsmuster klassifizieren lassen:

- Multimode-Stufenindex-LWL
- Monomode-Stufenindex-LWL
- Multimode-Gradientenindex-LWL

Die ersten beiden unterscheiden sich lediglich im Kerndurchmesser.

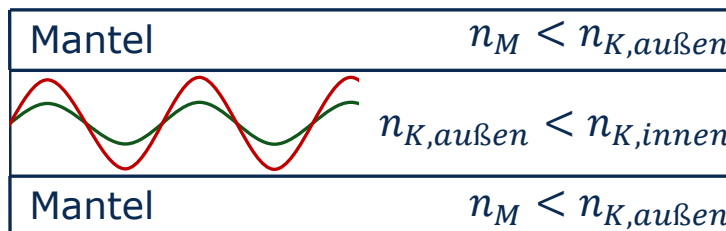
→ Ist der Kerndurchmesser klein genug, gibt es nur eine ausbreitungsfähige Mode.

# Gradientenindex-LWL

Beim Gradientenindex-LWL gibt es nicht eine einzelne Brechzahlstufe zwischen Kern und Mantel, sondern einen Brechzahlgradienten

- Gradient ist in der Regel Parabelförmig (siehe Moden-Gleichung)
- Modenwellen haben gemeinsame Knoten
- Geringere Laufzeitunterschiede als beim Stufenindex-LWL
  - Laufwege der Moden unterscheiden sich durch unterschiedlichen Abstand zum Kernzentrum, aber
  - Strahlen nah am Mantel sind schneller als im Zentrum (siehe Geschwindigkeitsgleichung)

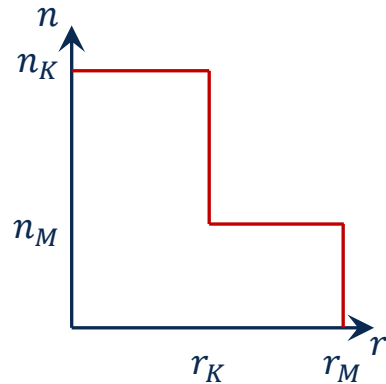
Strahlengang im Gradientenindex-LWL:



Beispielhafter  
Gradientenindex-LWL  
(2 Moden eingezeichnet)

# Zusammenfassung: LWL-Typen

## Multimode

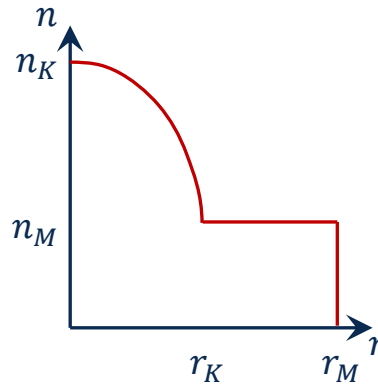


SI-LWL

$$r_K \approx 100\mu\text{m}$$

$r_M$  nicht genormt

große  
Modendispersion



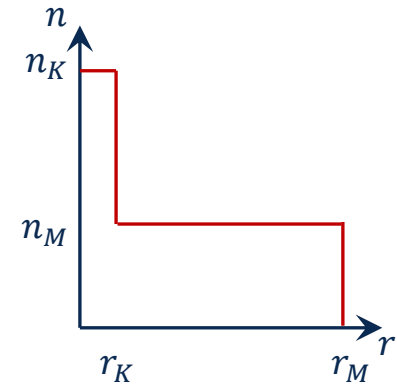
GI-LWL

$$r_{K, \text{Europa}} = 25\mu\text{m}$$
$$r_{K, \text{USA}} = 31,25\mu\text{m}$$

$$r_M = 62,5\mu\text{m}$$

Modendispersion  
 $\sim 1\%$  im Vergleich  
zu SI-LWL

## Monomode



SI-LWL

$$4\mu\text{m} \leq r_K(\lambda) \leq 5\mu\text{m}$$

$$r_M = 62,5\mu\text{m}$$

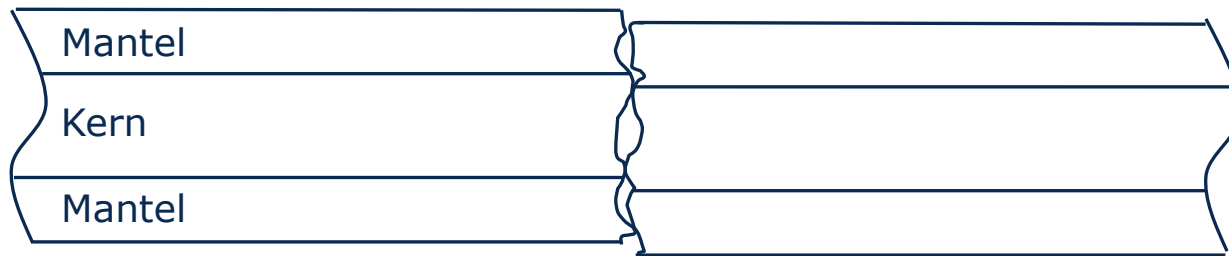
keine Modendis-  
persion, aber  
andere Effekte

# Kopplungselemente

# Steckverbindung

Die einfachste Form der optischen Kopplung ist die simple, lösbare Steckverbindung

- Steckbuchsen
- Drehverschluss
- Quetschverbindung (Maximierung der Kontaktfläche)



Grundlegende Probleme aller Steckverbindungen:

- hohe Verluste an der Kontaktfläche
- hohe Verluste durch Versatz
- Mehrfachbrechung durch eingebrachtes Drittmedium (in der Regel Luft)



# Steckverbindung

## Generelle Verlustquellen

- Intrinsische Quellen
  - unterschiedlicher Kerndurchmesser
  - unterschiedliche Numerische Aperturen
  - unterschiedliche Brechzahlprofile
  - Kontaktrückstreuung/-reflexion
- Extrinsische Quellen
  - radialer Versatz der Kabel
  - Winkelverbindung (Kabel gegeneinander verkippt)
  - fehlender Kontakt (Kabelenden berühren sich nicht)
  - ungünstige Kontaktflächenbeschaffenheit  
(Schnittwinkel, Oberflächenstruktur, Rauigkeit, ...)

## Lösungsmöglichkeiten

- Präzisionshülsen
- Linsen

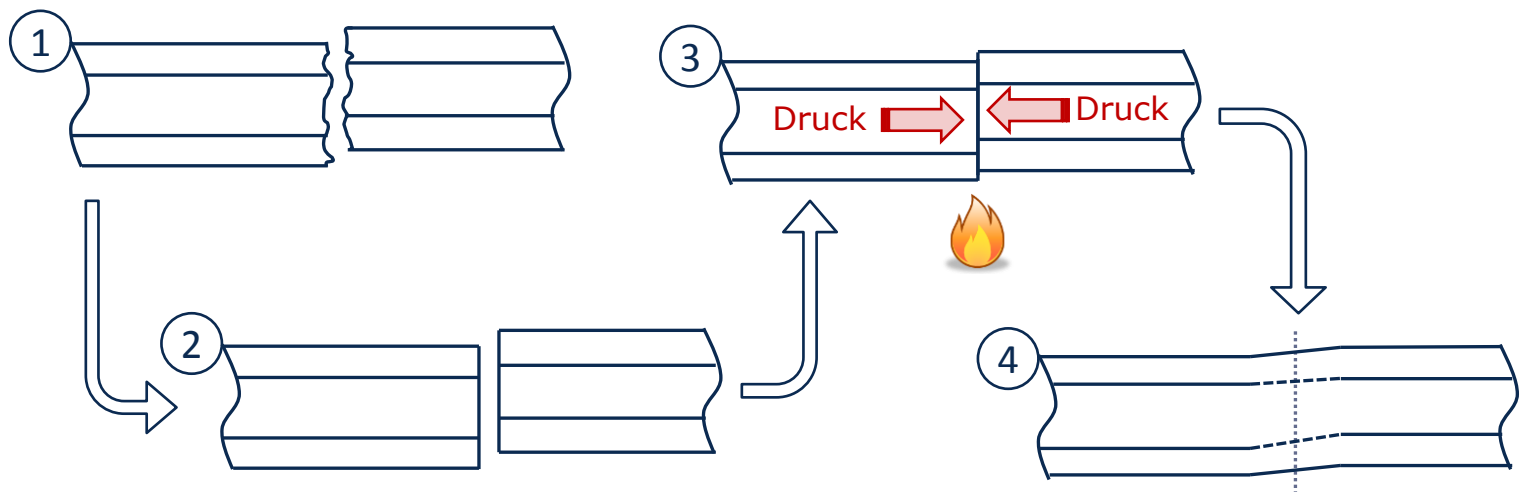
# Spleißverbindung

Bruchfeste, dauerhafte, selbstheilende Verbindung

## Vier Schritte zum Spleiß

1. Kabelenden schneiden, glätten und reinigen
2. Kabelenden zusammenführen
3. Zusammendrücken und Erhitzen
4. Ohne Druck abkühlen lassen

Der Spleiß ist im Bezug auf das Brechzahlprofil selbstheilend!



# Opto-Repeater

Trotz geringerer Dämpfung im LWL gegenüber elektrischen Kommunikationskabeln ist der Dämpfungsverlust nicht vernachlässigbar. → Optische Verstärker notwendig.

- Signalauskopplende Verstärker
  - Zeitverlust durch optoelektrische und elektrooptische Wandlung
  - Signaldegeneration/-verunreinigung durch elektrisches Rauschen
- Faserintegrierte Verstärker
  - keine optoelektrische/elektrooptische Wandlung
  - reine Signalverstärkung
    - bereits im Signal enthaltene Störungen werden (leider) mit verstärkt
    - keine Einbringung zusätzlicher Störungen

# Faserintegrierte Opto-Repeater

In Kabel eingelassene Verstärker geringer Baugröße  
auf Basis einer Erbium-Dotierung  
(EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier)

## Prinzipielle Funktionsweise

1. Licht wird aus LWL direkt in eine Schleifenspule (Erbium-dotierte Faser) eingekoppelt
2. Ein Pump-LASER hebt Elektronen im Erbium auf ein LASER-taugliches Energieniveau
3. Während das eingekoppelte Licht durch die Schleifenspule propagiert, werden die angeregten Elektronen zur Emission kohärenten Lichts auf der Signalwellenlänge angeregt
4. Eingekoppeltes und stimuliertes Licht werden gemeinsam in den LWL zurückgekoppelt

# Optoelektrische Netz-Koppler

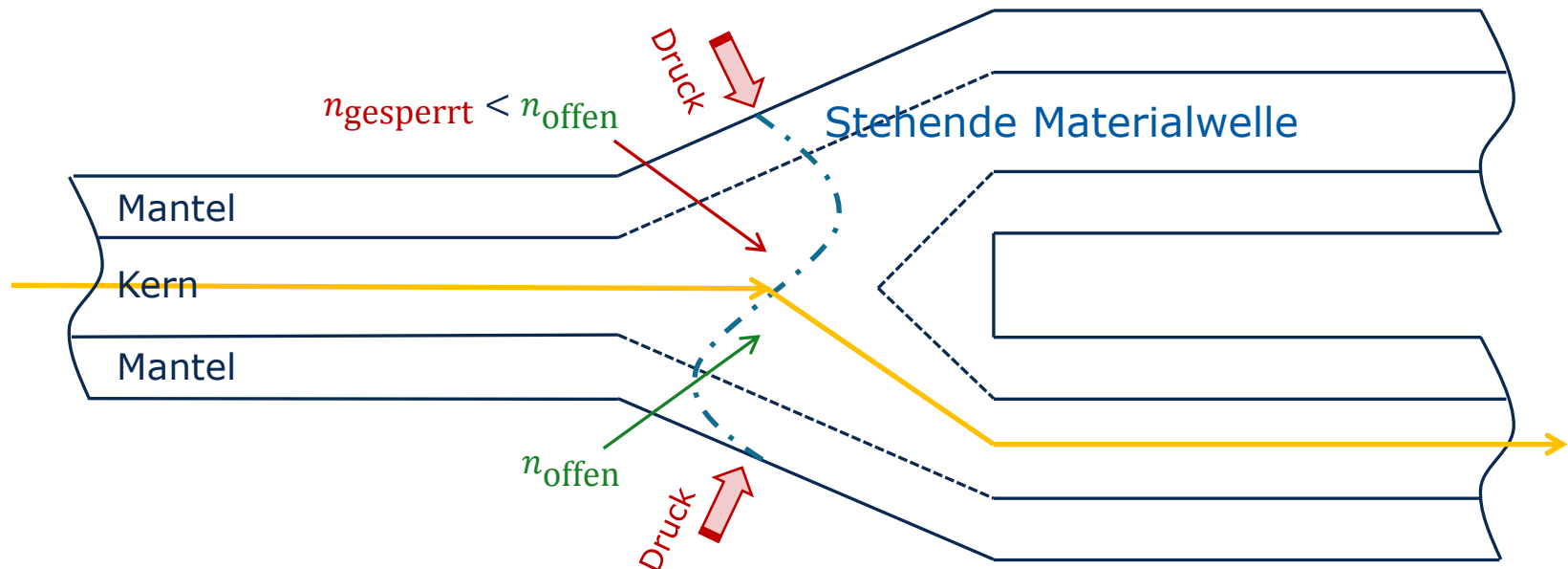
Wie bei elektrischer Übertragungstechnik gibt es auch in der optischen Übertragungstechnik diverse Netz-Koppler

- ohne Netztrennung
  - Hub (mehrere aneinander gespleißte LWL)
    - auf den  $n$  Ausgängen jeweils nur  $\frac{1}{n}$  der Eingangsleistung
  - Multiport-Repeater  
(EDFA mit mehreren aufgespleißten Ausgängen)
- geschaltete Netztrennung
  - optoelektrischer Switch  
(optoelektrische Auskopplung, elektrische Wegewahl, elektrooptische Einkopplung)
  - fotoelastischer/akustooptischer Switch  
(Brechzahlmanipulation: faserintegrierte Wegewahl)
  - (rein-)optischer Switch  
(Energieniveaumanipulation: faserintegr. Wegewahl)

# Fotoelastischer/Akustooptischer Switch

Wegwahl auf Basis einer gezielten Brechzahlmanipulation durch

- Veränderung des Leiterenergieniveaus durch anlegen einer äußeren Spannung
- Generierung stehender Materialwellen im Leiter (akustische Wellen, die in der Regel piezoelektrisch das Material beeinflussen)



# Fotoelastischer/Akustooptischer Switch

## Probleme

- Wissen, wohin ein Lichtsignal geschwitcht werden soll muss vor dem Switchen bereits existieren
- elektrische Generierung der stehenden Materialwelle ist langsamer, als das Lichtsignal

## Häufige Vorgehensweise

- Lichtsignal duplizierend auskoppeln
- Lichtsignal auf „lange“ Warteschleife wohl definierter Länge einkoppeln (so lang, dass das Licht etwas länger braucht, als die elektrische Schaltung zum Switchen)
- elektrische Auswertung der Switchanweisungen
- elektrische Generierung der stehenden Welle
- Lichtsignal verlässt Warteschleife und durchläuft Switch

## Vorteil gegenüber elektrooptischem Switch:

Keine Signalverunreinigungen durch die elektrische Schaltung, da das eigentliche Lichtsignal unangetastet bleibt

# Fotoelastischer/Akustooptischer Switch

## Ähnliches Prinzip: Elektrooptische Streifenschalter

- Mach-Zehnder-Interferometer
  - Häufig dem fotoelastischen Switch vorgelagert
- Richtungskoppler (DIDO-NPC)
  - Signalübergang zwischen zwei LWL
  - Dual-Input / Dual-Output – No Physical Contact
- Aktive Optogabel (DIDO-DPC)
  - Signalmischung/-trennung zweier LWL
  - Dual-Input / Dual-Output – Direct Physical Contact
- X-Koppler (DIDO-SM)
  - Richtungsumschalter zwischen zwei LWL
  - Dual-Input / Dual-Output – Shared Medium

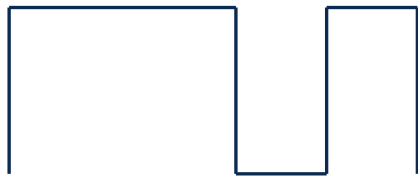
Multiple-Input / Multiple-Output Switches entstehen durch Hintereinanderschaltung von DIDO-Switchen.



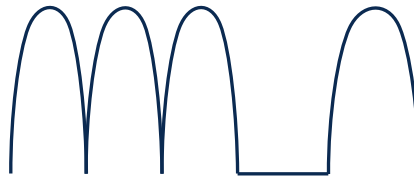
# Optischer Switch: Solitonen

## Grundlage für optische Switches: Solitonenübertragung

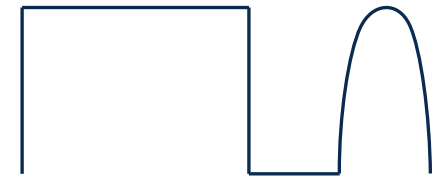
- Lichtenergie-abhängiger Fotorefraktiver Effekt führt zu
  - reversibler Verminderung der Brechzahl,
  - variabler Ausbreitungsgeschwindigkeit und
  - nichtlinearen Wellenformen (Solitonen)
- ermöglicht stabile Wellenpulse bei bekannter Dispersion
- ähnlicher Effekt in der Natur: Tsunami



Herkömmliches Signal



Solitonensignal

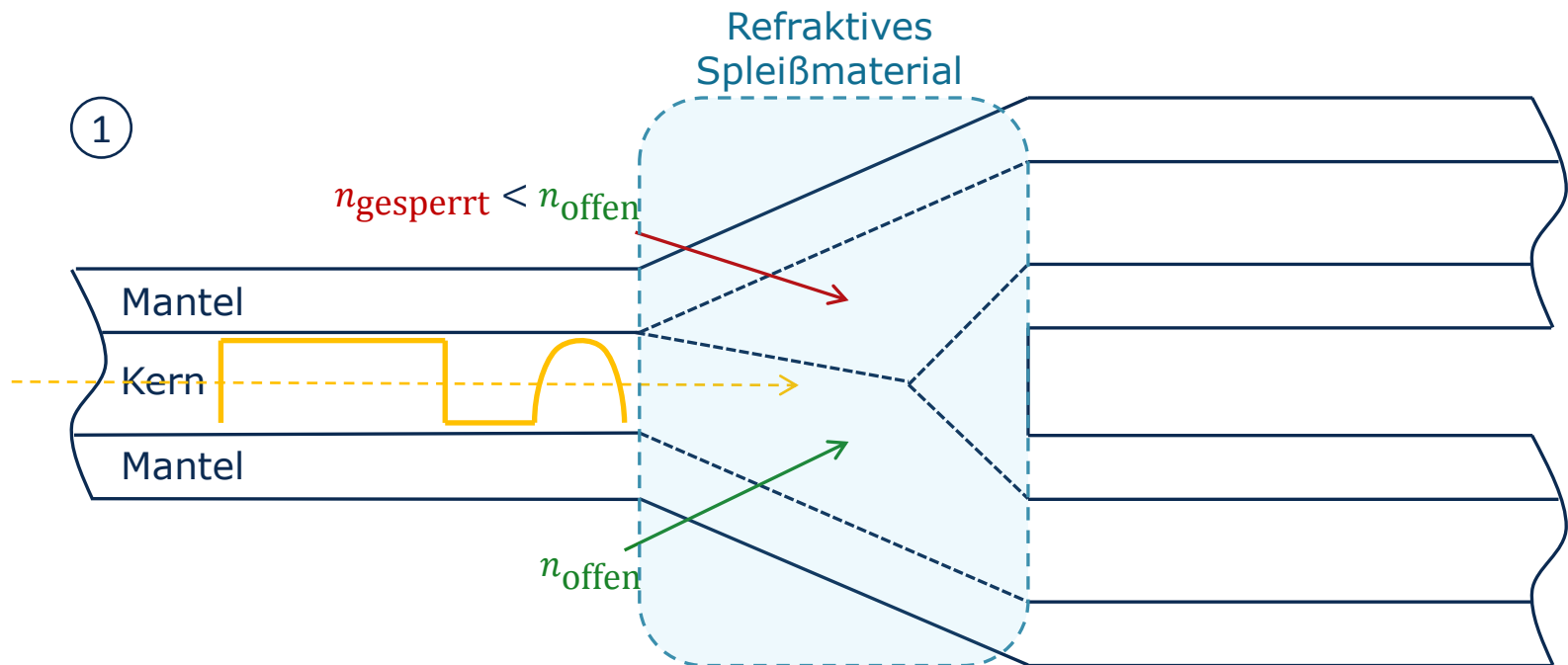


Kombinationssignal

# Optischer Switch

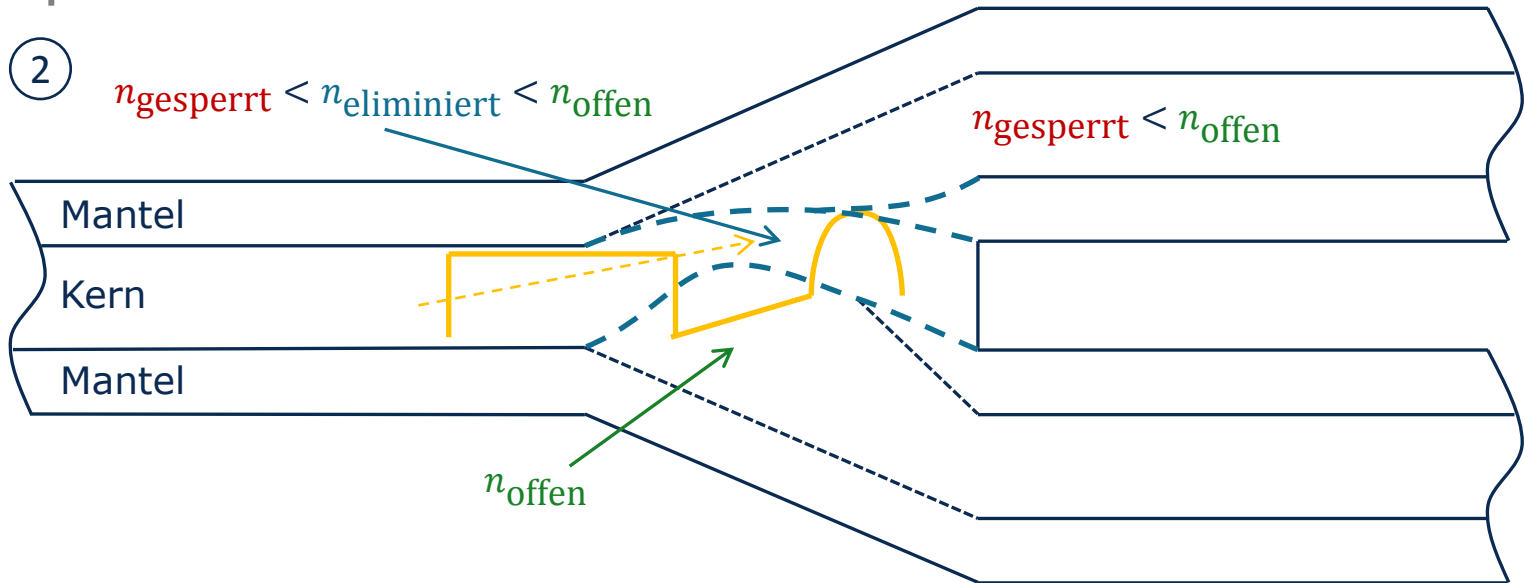
## Wegewahl auf Basis gezielter Energieniveaus

- Veränderung des Leiterenergieniveaus durch vorausseilende Solitone
- Generierung eines richtungsbestimmenden Brechungsgradienten und Valenzbandes

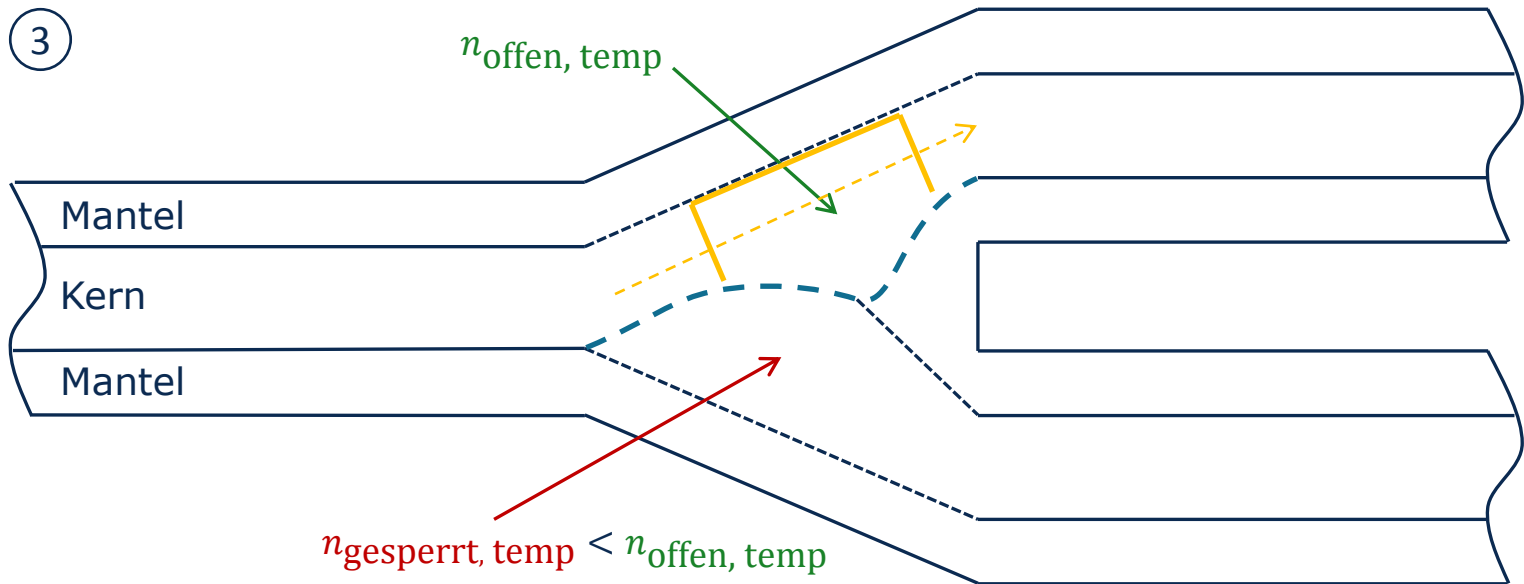


# Optischer Switch

②

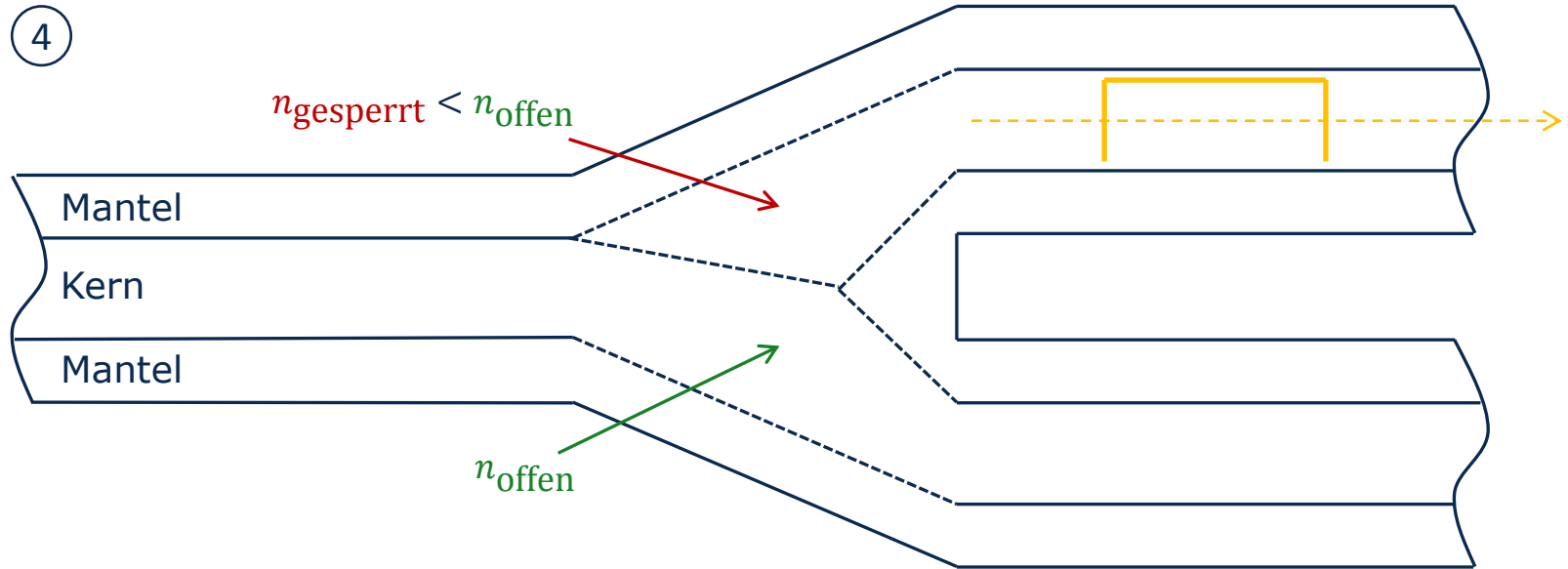


③



# Optischer Switch

④



Nach dem Switchvorgang kehrt die LWL-Kopplung in den Ausgangszustand zurück

Vor- und Nachteile des (rein-)optischen Switches:

- keine elektrische Komponenten notwendig
- vernachlässigbarer Platzbedarf
- anspruchsvolle Solitonengenerierung
- refraktives Spleißmaterial notwendig

# Quellen und Literatur

## **DIN VDE 0899-1 VDE 0899-1:1987-12**

Verwendung von Lichtwellenleiter-Fasern, -Einzeladern, -Bündeladern und -Kabeln für Fernmelde- und Informationsverarbeitungsanlagen

## **Physik**

Tipler, Paul; Mosca, Gene; 2009 (6. Auflage)  
Springer Spektrum

## **Experimentalphysik 2**

Demtröder, Wolfgang; 2013 (6. Auflage)  
Springer Spektrum

## **Gerthsen Physik**

Meschede, Dieter; 2010 (24. Auflage)  
(Vogel, Helmut; Gerthsen, Christian)  
Springer Spektrum