

Optische Leiter



<https://iuk.one/1010-1012>

Clemens H. Cap

ORCID: [0000-0003-3958-6136](https://orcid.org/0000-0003-3958-6136)

Department of Computer Science
University of Rostock
Rostock, Germany
clemens.cap@uni-rostock.de

9. 12. 2020 Vers. 2



1. Brechungsgesetz

Ziel: Die Grundlagen der Ausbreitung von Licht in Medien nach dem Fermatschen Modell verstehen und auf optische Datenleiter anwenden.

1. Brechungsgesetz
2. Optische Leiter
3. Optische Verbindungen
4. Grenzen und Vergleich

Beobachtung

Tritt ein Lichtstrahl von einem Medium in ein anderes Medium über, so kann er an der Grenzfläche zwischen den Medien seine Richtung ändern.

Der Effekt hängt dabei ab von

- ① den **Ausbreitungsgeschwindigkeiten** des Lichts in beiden Medien und
- ② dem **Einfallswinkel** des Lichts auf die Grenzfläche der Medien

Das Phänomen nennt man **Brechung**.

Es gilt heute als quantenphysikalisches Phänomen
wird aber "klassisch" gut durch das **Gesetz von Snellius** beschrieben.

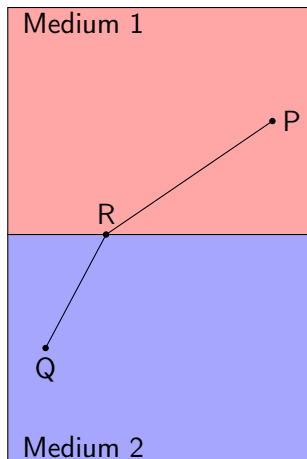


Abb. 1: Skizze zum Brechungsgesetz

Betrachte zwei Medien 1 und 2, in denen Licht unterschiedlich schnell läuft.

Ein Lichtstrahl laufe von P nach Q .

Wo liegt der Punkt R , an dem er die Trennlinie zwischen den beiden Medien überschreitet?

Fermatsches Extremalprinzip: Das Licht läßt sich durch die Annahme gut beschreiben, daß es zwischen zwei Punkten den Weg mit minimalem Zeitbedarf nimmt.

1. Brechungsgesetz

Anschauliches Analogbeispiel

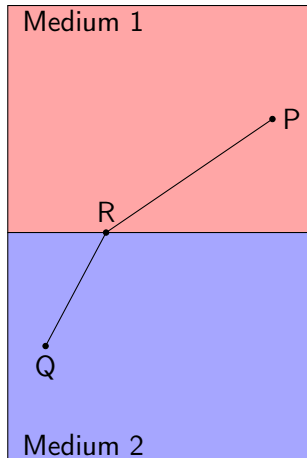


Abb. 2: Skizze zum Brechungsgesetz

Ein Rettungsschwimmer P am Strand (1) will den Ertrinkenden Q im Wasser (2) möglichst schnell erreichen.

Der Rettungsschwimmer kann am Strand schneller laufen als im Wasser. Er wird sich deshalb nicht geradlinig auf der Bahn kürzester Entfernung bewegen. Er wird die Strecke am Strand ein wenig verlängern um die Strecke im Wasser entsprechend zu verkürzen und so den Zeitbedarf optimieren.

Wo liegt Punkt R , wo er ins Wasser geht?

Der Rettungsschwimmer wird sich ebenso am Fermatschen Prinzip orientieren.

1. Brechungsgesetz

Mathematische Fragestellung

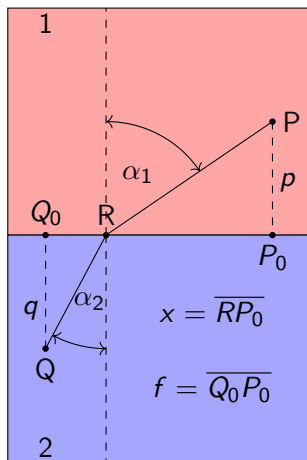


Abb. 3: Herleitung des Brechungsgesetzes

Seien P_0 und Q_0 die Fußpunkte der Lote von P und Q auf die Trennlinie.

Seien α_1 resp. α_2 die Winkel von PR resp. QR zum Lot auf die Trennlinie.

Seien v_1 resp. v_2 die Geschwindigkeiten in den Medien 1 resp. 2.

Sei $f = \overline{Q_0P_0}$ der Abstand der Fußpunkte.

Sei $x = \overline{RP_0}$.

Gesucht ist x so, daß die für den Weg \overline{PRQ} benötigte Zeit minimal wird.

$$t = \frac{\overline{PR}}{v_1} + \frac{\overline{RQ}}{v_2}$$

1. Brechungsgesetz

Brechungsindex

Der Brechungsindex ist eine Zahl, die gerade so definiert ist, daß das **Produkt aus Brechungsindex und Ausbreitungsgeschwindigkeit konstant** ist.

Der Brechungsindex im **Vakuum** ist auf 1 **normiert**.

$$c_{\text{Medium}} \cdot n_{\text{Medium}} = c \quad n_{\text{Medium}} = \frac{c}{c_{\text{Medium}}}$$

Vakuum	1,0
Luft	1,0003
Wasser	1,3000
Glas	1,40 – 1,90
Kern einer Glasfaser	1,48
Mantel einer Glasfaser	1,46
Diamant	2,40

Tab. 1: Typische Werte des Brechungsindex.

Umformulierungen des Brechungsgesetzes

Umformulierung des Brechungsgesetzes mit **Brechungsindex**:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Umformulierung des Brechungsgesetzes als **Strahlreaktion**:

Tritt ein Strahl unter dem Winkel α_1 von einem Medium mit Brechungsindex n_1 in ein Medium mit Brechungsindex n_2 über, so ist der Winkel zum Lot nach dem Übertritt gegeben durch:

$$\sin \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_1$$

Frage: Gibt es zu α_1 , n_1 und n_2 stets einen solchen Winkel α_2 ?

1. Fall: $n_1 \leq n_2$: Übergang vom optisch dünneren Medium (n_1) in das dichtere (n_2).

$\sin \alpha_1 \in [0, 1]$, $\frac{n_1}{n_2} \leq 1$ also $\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_1 \in [0, 1]$ nach α_2 auflösbar. **Antwort:** Ja.

2. Fall: $n_1 > n_2$: Übergang vom optisch dichteren Medium (n_1) in das dünnere (n_2).

Antwort: Auflösbarkeit nach α_2 erfordert $\sin \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_1 \leq 1$.

Totalreflexion als Grenzfall im Brechungsgesetz

Die **Bedingung der Auflösbarkeit** nach α_2 von $\sin \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_1$ bedeutet die Forderung, daß der **Strahl steiler als der Grenzwinkel**

$$\alpha_2 = \arccos \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_1 \right)$$

auf das zweite Medium trifft.

Trifft der Strahl aber **flacher** auf das Medium, so beobachten wir das neue Phänomen der **Totalreflexion**.

Der Strahl tritt dann nicht ins zweite Medium ein, sondern wird zurück ins erste Medium reflektiert.

Wie bei einer Reflexion üblich ist dann der **Austrittswinkel gleich dem Eintrittswinkel**.

Schematik der Totalreflexion

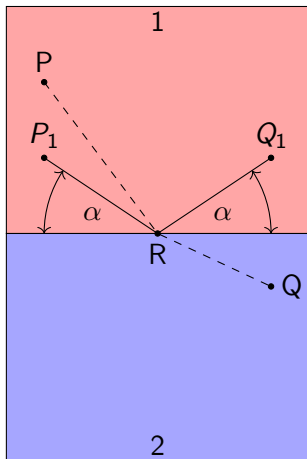


Abb. 5: Skizze zur Totalreflexion

Totalreflexion: Der Strahl von P_1 trifft unter so **flachem** Winkel auf die Trennstelle, daß es zur Totalreflexion kommt. Der Austrittswinkel α ist gleich dem Eintrittswinkel α .

Brechung: Der Strahl von P trifft jedoch unter **steilerem** Winkel auf die Trennstelle und wird gebrochen.

Medien: Das Medium 1 ist optisch dichter und das Medium 2 optisch dünner. Nur vom dichteren ins dünnere Medium wird der Strahl vom Lot weg gebrochen (also flacher); tritt er zu flach ein, tritt Totalreflexion auf.

1. Brechungsgesetz

Alltagsbeispiel der Totalreflexion



Abb. 6: Totalreflexion auf einer heißen Straße: Der Fahrer blickt unter (1) **flachem Winkel** und (2) **aus dem optisch dichteren Medium** (kalte Luft) auf das optisch dünnere Medium (heiße Luft oberhalb der Asphalt-Schichte). Bedingungen (1) und (2) bewirken Totalreflexion. Die Reflexion von Lichtstrahlen aus der Umgebung, wie sie auch eine Wasserfläche bewirken würde, kann beim Fahrer den Eindruck erwecken, die Straße wäre naß. ©

Rechtsnachweis siehe Anhang.

2. Optische Leiter

Ziel: Den Grundaufbau optischer Leiter verstehen und Modendispersion als zentrales Qualitätsmerkmal erkennen.

1. Brechungsgesetz
2. **Optische Leiter**
3. Optische Verbindungen
4. Grenzen und Vergleich

Aufbau und Prinzip eines Lichtwellenleiters

Lichtwellenleiter bestehen aus einem

- optisch dichteren **Kern** von 5–1500 [μm] Durchmesser
- in einem optisch dünneren **Mantel** von 125 – 2000 [μm] Durchmesser
- in verschiedenen äußeren Schutzschichten.

Das Licht wird durch **Totalreflexion** von Strahlen, die aus dem Kern austreten wollen, am Mantel aber in den Kern zurück totalreflektiert werden, entlang des Kabels weitergeleitet.

Das Prinzip ähnelt asymmetrischen elektrischen Leitern, wenn sie als **Wellenleiter** genutzt werden.

Je nach Anwendung können viele Leiter in einer äußeren Schutzhülle liegen.

Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters

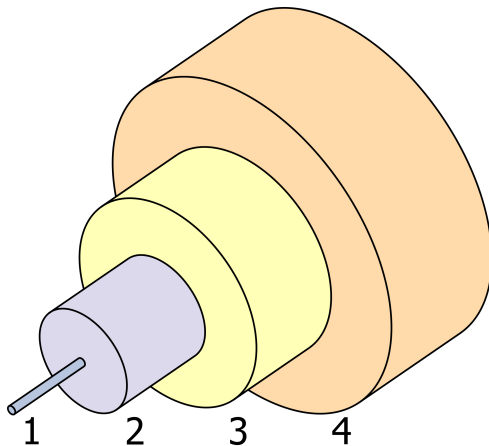


Abb. 7: Aufbau eines Lichtwellenleiters: (1) **Optisch dichtere Kern.** (2) **Optisch dünnerer Mantel.** (3) Schutzschicht für die Glasfaser. (4) Hülle für mechanische Stabilität und gegen äußere Beschädigung. © Rechtsnachweis siehe Anhang.

2. Optische Leiter

Modendispersion

Beobachtung: Unterschiedliche Moden

In einem Lichtwellenleiter bestehen je nach Einstrahlungswinkel und Breite **Wege unterschiedlicher Länge** (sogenannte "Moden").

Laufzeitunterschiede einzelner Moden betragen bis zu 50 [ns/km].

Folgerungen daraus:

- Die eingekoppelte Energie verteilt sich auf verschiedene Moden.
- Die Laufzeitunterschiede bewirken Verbreiterung des Lichtimpulses.
- Dieser ist nach längerer Entfernung schließlich nicht mehr fehlerfrei erkennbar.

Abhilfe: Reduktion der Laufzeitunterschiede der Moden – umsetzbar durch:

- Verringere die Schwankungsbreite der Längen der Moden. Gradientenfasern
- Verkleinere den Kern, idealerweise auf eine Mode. Monomodefasern
- Reduziere Leistungsstreuung auf Moden in der Einkopplung. Laser statt LED

Modendispersion: Beispiel

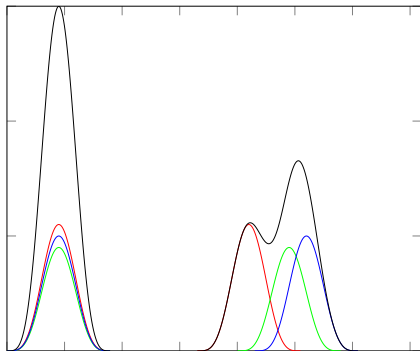


Abb. 8: Beispiel für Modendispersion: Ein Impuls (schwarz) teilt sich (additiv) in drei Teilsignale (rot, grün, blau) auf, die auf Wegen mit unterschiedlichen Laufzeiten (Moden) durch den Lichtwellenleiter gehen. Sie kommen beim Empfänger zeitlich zueinander verschoben an und addieren sich dort zu einem unscharfen Impuls, der oft nur fehlerhaft erkannt werden kann.

Arten von Lichtwellenleitern

- Multimode Fasern:** Gestatten **mehrere** Moden.
- **Stufenfasern:** **Stufenförmiger** Übergang im Brechungsindex.
Kern 50–1000 [μm].
 - **Gradientenfasern:** **Kontinuierlicher** Übergang im Brechungsindex.
Licht durch kontinuierliche Änderung auf sinusoidalem Pfad hin und her "geführt".
Kern meist kleiner, typisch 50–65 [μm].
Geringer ausgeprägte Modendispersion.

Monomode Fasern: Gestatten (theoretisch) nur **eine** Mode.
Kern 3–10 [μm].
Ideales Ziel: Nur eine Mode, keine Modendispersion.

3. Optische Verbindungen

Ziel: Einen Überblick über die Vielfalt optischer Verbindungen gewinnen.

1. Brechungsgesetz
2. Optische Leiter
3. **Optische Verbindungen**
4. Grenzen und Vergleich

3. Optische Verbindungen

Verbindungstechnik

Steckverbindungen: Steckbar und somit leicht lösbar.

- Höhere Dämpfung.
- Viele verschiedene Arten von Konnektoren für spezifische Anforderungen.

Spleißverbindungen: Dauerhaft und somit nicht leicht lösbar.

- Technisch eher aufwendig.
- Geringere Dämpfung als Steckverbindung.
- Herstellung der Verbindung technisch durch
 - Lichtbogenschweißtechnik geringer Dämpfung
 - Klebespleißung höhere Dämpfung

3. Optische Verbindungen

Steckverbindungen



Abb. 9: ST Konnektor. © Rechtsnachweis siehe Anhang.



Abb. 10: TOS Link Konnektor © Rechtsnachweis siehe Anhang.

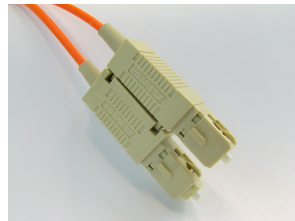


Abb. 11: SC Konnektor © Rechtsnachweis siehe Anhang.

3. Optische Verbindungen

Lichtbogenschweißen



Abb. 12: Schweißgerät für Lichtwellenleiter. Beachte die seitlichen Einführungen für die optischen Leiter und die Metallspitzen zur Ausbildung des Lichtbogens.

Wandler zwischen Elektrik und Optik

Luminiszenzdiode: (LED, light emitting diode)

- Diffuses Licht in viele Richtungen und Moden; hohe Spektralbreite.
- Modulationsfrequenz bis 100 [MHz], Impulsanstiegszeit bis 10 [ns].
- Meist bei Multimode Fasern verwendet bis 622 [Mbit/s] pro Faser.
- Hohe Lebensdauer (1 Million Stunden) und preiswert.

Laserdioden: Erzeugen Laser-Licht.

- Kohärentes Licht präziser Frequenz und Spektralbreite 1 [nm].
- Modulationsfrequenz bis 10 GHz, Impulsanstiegszeit bis 10 ps.
- Meist bei Monomodefasern und im Hochleistungsbereich bis 100 [Gbit/s] verwendet.
- Problem: Geringe Lebensdauer (10.000 Stunden) und teuer.
- Vorsicht: Hohe Leistung, schädliche Strahlung für Auge ggf. unsichtbar.

Photodioden: Sind lichtempfindlich.

- Sog. Avalanche Photodioden reagieren empfängerseitig auf den Lichteinfall.

4. Grenzen und Vergleich

Ziel: Die Grenzen optischer Datenübertragung erkennen und mit den Fähigkeiten elektrischer Leiter vergleichen.

1. Brechungsgesetz
2. Optische Leiter
3. Optische Verbindungen
4. **Grenzen und Vergleich**

Grenzen der Leistung von Lichtwellenleitern

Modendispersion (siehe oben)

Rayleigh Streuung

- Aufgrund inhomogener Materialeigenschaften streut Licht in den Mantel.
- Steigt mit Frequenz in 4. Ordnung, limitiert stark & plötzlich bei höheren Frequenzen.

Dämpfung:

- Verunreinigungen durch OH Ionen (Wasser, Feuchtigkeit).
- Absorptionspeaks bei Licht der Wellenlängen 950, 1'240 und 1'380 [nm].
- Gut geeignete Wellenlängen bei 850, 1'300 und 1'550 [nm].

Knicke und zu geringe **Biegeradien**

Dämpfung

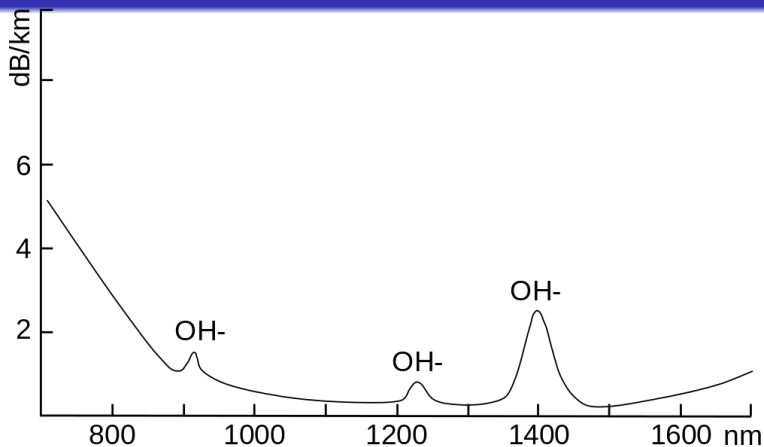


Abb. 13: Frequenzabhängige Dämpfung bei Lichtwellenleitern und Resonanzpeaks der OH-Strecke von Wasser. Vergleiche die relativ geringe Dämpfung der Lichtwellenleiter von 1-5 [dB/km] mit der Dämpfung auf elektrischen Leitern. Bei Cat 7 Kabeln beträgt die Dämpfung 5-50 [dB/100m] und steigt mit der Frequenz sehr stark an. ©

Rechtsnachweis siehe Anhang.

4. Grenzen und Vergleich

Knickstellen und Biegeradien

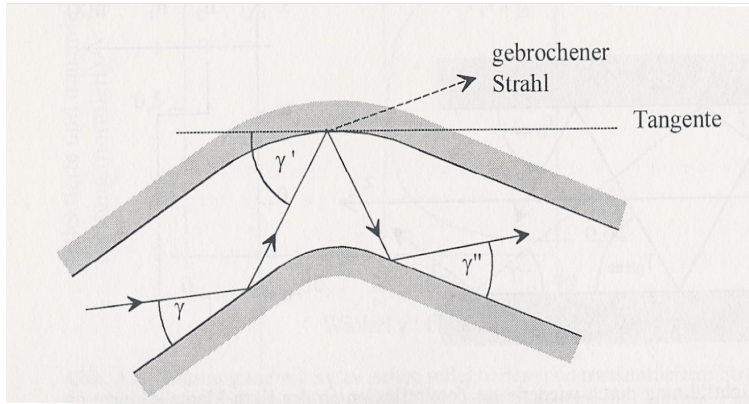


Abb. 14: Knickstellen und enge Biegeradien stellen **zwei Problemquellen** für Lichtwellenleiter dar. **Erstens** können sie **brechen** – sie sind aus Glas. **Zweitens** können zu enge Biegeradien zu einem **Zusammenbruch der geometrischen Voraussetzungen** für Totalreflexion führen – ein Teil der Lichtleistung geht dann in den Mantel und ist damit für die Kommunikation verloren. © Rechtsnachweis siehe Anhang.

Wavelength Division Multiplex

Grundidee: Parallele Übertragungen mit verschiedenfarbigem Licht.
Optisches Zusammenführen und Trennen der Kanäle durch frequenzabhängige Vorgänge.
Dadurch Erhöhung der Datenrate.

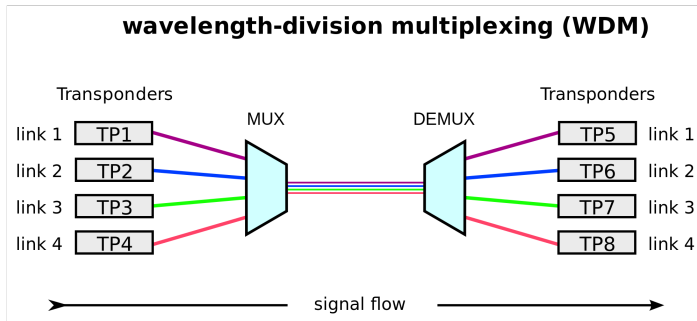


Abb. 15: Prinzip des Wavelength Division Multiplexing WDM. © Rechtsnachweis siehe Anhang.

Coarse WDM:	Geringere Zahl von Frequenzen.	Typisch: 2–4 Bis 128.
Dense WDM:	Höhere Zahl von Frequenzen.	

Limit: Rund 25 [TBit/s] auf 1'000 [km] Faser ohne Verstärker.

Hauptproblem: Signalverstärkung.

- Nach Dämpfung des Signals ist (bei allen Übertragungstechnologien!) Verstärkung, also Auffrischung und Neuformung des Signals, erforderlich.
- Elektrische Verstärkung erfordert zuvor Wandlung Optik–Elektrik.
- Bei hoher Zahl von Kanälen technologisch schwierig.
- Daher Suche nach rein optischer Verstärkung.

Signalverstärkung bei DWDM

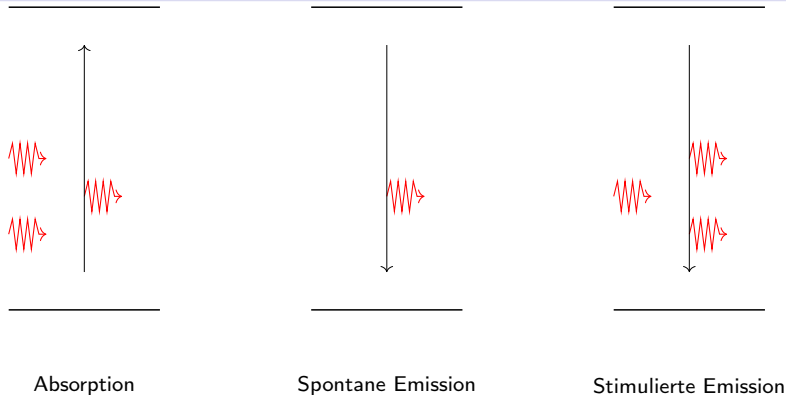


Abb. 16: Absorption, spontane Emission und stimulierte Emission von Photonen (rot) sind physikalische Phänomene, die hier schemenhaft am Übergang von Elektronen (schwarz) zwischen verschieden-energetischen Orbitalen im Bohrschen Atommodell skizziert werden. Bei DWDM wird **stimulierte Emission** zur Signalverstärkung verwendet. Dabei werden Pump-Laser Techniken an mit Erbium dotierten Glasfasern genutzt. DWDM vermeidet durch diese direkte optische Verstärkung die Übergänge Optik–Elektrik–Optik auf einer Vielzahl von Farb-Kanälen.

Vergleich mit elektrischen Leitern

Vorteile:

- **Bandbreite:** Hoch (Multimode) bis sehr hoch (Monomode).
- **Platzbedarf:** Klein, leicht, eingeschränkte Biegarkeit.
- **Dämpfung:** Sehr gering.
- **Abhören:** Schwer.
- **Störungen:** Unempfindlich gegen elektrische Störungen.

Nachteile:

- **Verbindungen:** Technisch eher aufwendig
- **Kosten:** Höher als bei Kupfer.

Abgrenzung zur drahtlosen Übertragung

An der Trennstelle zwischen optischen Leitern und drahtloser Übertragung findet man noch **optische Freiraumübertragung** mit Punkt-zu-Punkt Laser-Verbindungen.

- Erfordert freie Sicht auf der Punkt-zu-Punkt Verbindung.
- In der Atmosphäre vielfältige Störeinflüsse (Regen, Dunst, Vögel usw.)
- Hohe Datenraten möglich: Bis 40 [Gbit/s] pro "Farbe".
- Gute elektromagnetische Verträglichkeit.
- Einfache Montage da keine Grabungsarbeiten für Leitungen nötig.
- Nutzung typischerweise in Spezialanwendungen und im Weltraum.
- Schwer abhörbar (zumindest nicht unbemerkt).

Zukunftsvision: Datenübertragung durch Einzelphotonen-Experimente.

Anhang

Übersicht

Verzeichnis aller Abbildungen

Abb

Verzeichnis aller Tabellen

Tab

Rechtsnachweise

©

Rechtliche Hinweise

§

Zitierweise dieses Dokuments

→

Index

Index

Verzeichnis aller Folien



1	Skizze zum Brechungsgesetz	4
2	Skizze zum Brechungsgesetz	5
3	Herleitung des Brechungsgesetzes	6
4	Herleitung des Brechungsgesetzes	7
5	Skizze zur Totalreflexion	11
6	Totalreflexion auf einer heißen Straße: Der Fahrer blickt unter (1) flachem Winkel und (2) aus dem optisch dichteren Medium (kalte Luft) auf das optisch dünnere Medium (heiße Luft oberhalb der Asphalt-Schichte). Bedingungen (1) und (2) bewirken Totalreflexion. Die Reflexion von Lichtstrahlen aus der Umgebung, wie sie auch eine Wasserfläche bewirken würde, kann beim Fahrer den Eindruck erwecken, die Straße wäre naß.....	12

7	Aufbau eines Lichtwellenleiters: (1) Optisch dichter Kern. (2) Optisch dünnerer Mantel. (3) Schutzschicht für die Glasfaser. (4) Hülle für mechanische Stabilität und gegen äußere Beschädigung.	15
8	Modendispersion	17
9	ST Konnektor.....	21
10	TOS Link Konnektor	21
11	SC Konnektor.....	21
12	Schweißgerät für Lichtwellenleiter	22
13	Frequenzabhängige Dämpfung bei Lichtwellenleitern und Resonanzpeaks der OH-Strecke von Wasser. Vergleiche die relativ geringe Dämpfung der Lichtwellenleiter von 1-5 [dB/km] mit der Dämpfung auf elektrischen Leitern. Bei Cat 7 Kabeln beträgt die Dämpfung 5-50 [dB/100m] und steigt mit der Frequenz sehr stark an. .	26

14	Knickstellen und enge Biegeradien stellen zwei Problemquellen für Lichtwellenleiter dar. Erstens können sie brechen – sie sind aus Glas. Zweitens können zu enge Biegeradien zu einem Zusammenbruch der geometrischen Voraussetzungen für Totalreflexion führen – ein Teil der Lichtleistung geht dann in den Mantel und ist damit für die Kommunikation verloren.	27
15	Wavelength Division Multiplex	28
16	Verstärkung bei WDM	30

1	Typische Werte des Brechungsindex	8
---	---	---

Abb. 6 Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/Spiegel100531.jpg>, Anghy, Public domain, via Wikimedia Commons

Abb. 7 Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Singlemode_fibre_structure.svg, Original by Bob Mellish, SVG derivative by Benchill, Nutzung nach CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>.

Abb. 9 Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2a/ST-optical-fiber-connector-hdr-0a.jpg>, Adamantios, Nutzung nach CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>.

Abb. 10 Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:TOSLINK.jpg>, Cyvh, Public Domain.

Abb. 11 Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:SC-optical-fiber-connector-hdr-0a.jpg>, Adamantios, Nutzung nach CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>.

Abb. 13 Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/06/Waterpeak.svg/1000px-Waterpeak.svg.png>, Berklas, Public domain.

Abb. 14 Aus: Wolfgang Bludau, Lichtwellenleiter in Sensorik und optischer Nachrichtentechnik. Springer-Verlag 1998.

Abb. 15 Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WDM_operating_principle.svg, Xens, Nutzung nach CC BY-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>

Die hier angebotenen Inhalte unterliegen deutschem Urheberrecht. Inhalte Dritter werden unter Nennung der Rechtsgrundlage ihrer Nutzung und der geltenden Lizenzbestimmungen hier angeführt. Auf das Literaturverzeichnis wird verwiesen. Das **Zitatrecht** in dem für wissenschaftliche Werke üblichen Ausmaß wird beansprucht. Wenn Sie eine Urheberrechtsverletzung erkennen, so bitten wir um Hinweis an den auf der Titelseite genannten Autor und werden entsprechende Inhalte sofort entfernen oder fehlende Rechtsnennungen nachholen. Bei Produkt- und Firmennamen können Markenrechte Dritter bestehen. Verweise und Verlinkungen wurden zum Zeitpunkt des Setzens der Verweise überprüft; sie dienen der Information des Lesers. Der Autor macht sich die Inhalte, auch in der Form, wie sie zum Zeitpunkt des Setzens des Verweises vorlagen, nicht zu eigen und kann diese nicht laufend auf Veränderungen überprüfen.

Alle sonstigen, hier nicht angeführten Inhalte unterliegen dem Copyright des Autors, Prof. Dr. Clemens Cap, ©2020. Wenn Sie diese Inhalte nützlich finden, können Sie darauf verlinken oder sie zitieren. Jede weitere Verbreitung, Speicherung, Vervielfältigung oder sonstige Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts bedarf der schriftlichen Zustimmung des Rechteinhabers. Dieses dient der Sicherung der Aktualität der Inhalte und soll dem Autor auch die Einhaltung urheberrechtlicher Einschränkungen wie beispielsweise **Par 60a UrhG** ermöglichen.

Die Bereitstellung der Inhalte erfolgt hier zur persönlichen Information des Lesers. Eine Haftung für mittelbare oder unmittelbare Schäden wird im maximal rechtlich zulässigen Ausmaß ausgeschlossen, mit Ausnahme von Vorsatz und grober Fahrlässigkeit. Eine Garantie für den Fortbestand dieses Informationsangebots wird nicht gegeben.

Die Anfertigung einer persönlichen Sicherungskopie für die private, nicht gewerbliche und nicht öffentliche Nutzung ist zulässig, sofern sie nicht von einer offensichtlich rechtswidrig hergestellten oder zugänglich gemachten Vorlage stammt.

Wenn Sie Inhalte aus diesem Werk nutzen oder darauf verweisen wollen, zitieren Sie es bitte wie folgt:

Clemens H. Cap: Optische Leiter. Electronic document. <https://iuk.one/1010-1012> 9. 12. 2020.

Bibtex Information: <https://iuk.one/1010-1012.bib>

```
@misc{doc:1010-1012,  
  author      = {Clemens H. Cap},  
  title       = {Optische Leiter},  
  year        = {2020},  
  month       = {12},  
  howpublished = {Electronic document},  
  url         = {https://iuk.one/1010-1012}  
}
```

Typographic Information:

Typeset on December 9, 2020

This is pdfTeX, Version 3.14159265-2.6-1.40.21 (TeX Live 2020) kpathsea version 6.3.2

This is pgf in version 3.1.5b

This is preamble-slides.tex myFormat©C.H.Cap

- 1 Titelseite
- 1. Brechungsgesetz**
- 3 Physikalisches Prinzip
- 4 Fermatsches Extremalprinzip
- 5 Anschauliches Analogbeispiel
- 6 Mathematische Fragestellung
- 7 Mathematische Lösung
- 8 Brechungsindex
- 9 Umformulierungen des Brechungsgesetzes
- 10 Totalreflexion als Grenzfall im Brechungsgesetz
- 11 Schematik der Totalreflexion
- 12 Alltagsbeispiel der Totalreflexion
- 2. Optische Leiter**
- 14 Aufbau und Prinzip eines Lichtwellenleiters
- 15 Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters
- 16 Modendispersion
- 17 Modendispersion: Beispiel
- 18 Arten von Lichtwellenleitern




3. Optische Verbindungen

- 20 Verbindungstechnik
- 21 Steckverbindungen
- 22 Lichtbogenschweißen
- 23 Wandler zwischen Elektrik und Optik

4. Grenzen und Vergleich

- 25 Grenzen der Leistung von Lichtwellenleitern
- 26 Dämpfung
- 27 Knickstellen und Biegeradien
- 28 Wavelength Division Multiplex
- 29 Nutzung von WDM
- 30 Signalverstärkung bei DWDM
- 31 Vergleich mit elektrischen Leitern
- 32 Abgrenzung zur drahtlosen Übertragung

Legende:

-  Fortsetzungsseite
-  Seite ohne Überschrift
-  Bildseite