

1 Einleitung

Große Telekommunikationsgesellschaften (Carrier) setzen schon seit den frühen 90er Jahren auf die Technik der optischen Übertragung. Dazu gehört unter anderem der Einsatz einer optischen Multiplextechnik (WDM, Wavelength Division Multiplex) und deren Komponenten wie Multiplexer und Demultiplexer, die ausschließlich im infraroten Wellenlängenbereich des Lichts arbeiten.

Neben der Anbindung einzelner Haushalte an ein Hochgeschwindigkeitsnetz mittels optischer Übertragung werden auch in Verkehrsmitteln die kostengünstigen und breitbandigen Übertragungssysteme mit infrarotem Licht eingesetzt. Hier werden die Systeme verwendet, um die neuesten Informationstechnologien für Livebildübertragungen, Internetzugänge, Videostreaming und viele andere Multimedia-Anwendungen im Innenraum der Fahrzeuge zu nutzen. Moderne Fahrzeuge der Oberklasse verfügen bereits über Bussysteme, die mittels Polymeroptischen Fasern (POF, Polymer Optical Fiber) ihre Daten auf optischem Wege im infraroten Wellenlängenbereich übertragen. Darüber hinaus ist die optische Signalübertragung mit Lichtwellenleitern und einer optischen Multiplextechnologie für den Einsatz in Verkehrsmitteln eine platz- und gewichtssparende Alternative zu einer Verkabelung durch Kupferleitungen.

Die Umsetzung dieser Übertragungssysteme in bestehende und zukünftige Anwendungen der optischen Signalübertragung erfordert jedoch den Einsatz hoch qualifizierter Techniker mit einer umfangreichen Spezialausbildung. Der sich stark ausbreitende Einsatz der optischen Multiplextechnologie und Signalübertragung setzt Fachwissen über Montage und Service in Einsatzgebieten wie der Automobiltechnologie voraus.

Schülern, Facharbeitern und Studenten fehlt bislang eine einfache und kompakte Lehrbasis, um die Thematik der optischen Übertragung und des Wellenlängen-Multiplexens zu erlernen. Eine schnelle und kostengünstige Einführung in die Arbeitsweise optischer Übertragungstechniken und in den Umgang mit entsprechenden Bauteilen soll auch für sie möglich sein. Hier setzt die Entwicklung eines preiswerten und schnell verständlichen Lehrsystems an, welches alle wichtigen Eigenschaften der optischen Übertragungstechnik vermittelt. Dazu bieten sich Lichtquellen im sichtbaren Wellenlängenbereich an, da hiermit die geringsten Leistungsverluste des übertragenen Lichts in einer Polymerfaser auftreten. Der Sender nutzt dabei die Eigenschaften der Polymerfaser besser aus, als bei einem Einsatz von infraroten Lichtquellen. Es können somit längere Fasern eingesetzt werden. Durch das Arbeiten im sichtbaren Bereich des Lichts wird außerdem dem

Lernenden eine intuitive Erfassung und Unterscheidung der Sender mit deren verschiedenen Wellenlängen ermöglicht.

Ziel ist es, ein übergreifendes Lehrkonzept zu entwickeln und umzusetzen. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit der international tätigen Firma ELWE-Lehrsysteme GmbH aus Cremmlingen, welche sich auf den Aufbau und Vertrieb von Lehrsystemen für Schüler, Studenten und Lehrlingen spezialisiert hat.

Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Erläuterung des Lichts und dessen Wirkungsweise, der Übertragung von Signalen in optischen Fasern, Sender- und Empfängerkonzepten, optischen Multiplextechniken und der Fehlerratenmessung. Die daraus resultierenden Themenkomplexe sind in drei separate Diplomarbeiten geteilt, welche die Entwicklung von:

1. einem optischen Sender,
2. einem optischen Empfänger,
3. einem Fehlerratenmessplatz

beinhalten.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Entwicklung eines optischen Senders für die Videoübertragung beschrieben. Der Sender arbeitet mit Lichtquellen sichtbarer Wellenlängen. Als Übertragungsmedium werden kostengünstige polymeroptische Fasern verwendet.

Der Aufbau eines optischen Multiplexers und eines Senders ist ein weiterer Teil der Arbeit. Außerdem wird ein Lehrkonzept für das Lehrsystem entwickelt und erstellt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Licht

In der optischen Übertragungstechnik und in der faseroptischen Sensortechnik hat die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in einem Übertragungsmedium eine hohe Bedeutung für die Übermittlung von Informationen. Das elektromagnetische Spektrum reicht von langwelligeren Radiowellen bis hin zu ultrakurzweiliger kosmischer Strahlung. Nur ein sehr kleiner Ausschnitt aus diesen Bereichen ist für die optische Nachrichtentechnik interessant. Dazu gehört der sichtbare Bereich (VIS) und der nahe Infrarotbereich (IR). Der im engeren Sinne als Licht bezeichnete Bereich der elektromagnetischen Strahlung umfasst auch den ultravioletten Strahlungsbereich (UV).

Viele Erscheinungen wie z.B. Beugung, Reflexion oder Interferenz lassen sich mit dem Wellenmodell des Lichts beschreiben. Werden jedoch elektrische Effekte des Lichts untersucht, müssen Teilchenmodelle herangezogen werden. Dieser Welle-Teilchen-Dualismus ist in der Quantenphysik zusammengefasst. Lichtteilchen bzw. Lichtquanten (Photonen) sind nicht weiter teilbar und bilden damit eine elementare Größe. [glas97]

2.2 Licht als Welle

Jede sich ausbreitende Welle ist gekennzeichnet als sich zeitlich und periodisch wiederholender Vorgang. Die Ausbreitungsrichtung z des Lichts beschreibt eine transversale Welle und bildet mit den Feldstärkevektoren des elektrischen Feldes E und des magnetischen Feldes H sowie dem Einheitsvektor ein orthogonales System. Der Verlauf des Betrages des Vektors E in Zeit t und Raumrichtung z lässt sich zusammenfassen zu:

$$E(z, t) = E_0 \cos\left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{z}{\lambda}\right) \quad (1)$$

Dabei ist die Ausprägung der zeitlichen Periodizität T und der räumlichen Periodizität λ erkennbar [glas97].

2.2.1 Kenngrößen

Die Lichtgeschwindigkeit v ist bestimmt durch die Dielektrizitätskonstante ϵ und die Permeabilität μ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (2)$$

mit:

ϵ_r – relative Dielektrizitätskonstante

$\epsilon_0 = 8.8541 \cdot 10^{-12}$ As/Vm

μ_r – relative Permeabilität

$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am

Im Vakuum ergibt sich somit eine Geschwindigkeit des Lichts:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3)$$

In allen anderen optischen Medien ist $\epsilon_r \neq 1$ und verlangsamt die Geschwindigkeit des Lichts. Diese Verlangsamung wird mit der Brechzahl n angegeben.

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{bzw.} \quad n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

Einer der wesentlichen Parameter einer Lichtwelle ist deren Frequenz:

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

und die daraus resultierende Wellenlänge im Medium:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (6)$$

Eine interessante Eigenschaft des Lichts ist das Beibehalten der Frequenz in einem Medium mit einer Brechzahl $n > 1$ bei einer Verringerung seiner Wellenlänge λ . Im Folgenden werden daher alle Wellenlängen als Messgrößen im Vakuum betrachtet.

2.2.2 Polarisation

Die elektromagnetische Welle des Lichts ist transversal, das heißt der elektrische und der magnetische Feldvektor stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts. Die aufgespannte Ebene zwischen dem elektrischen Feldvektor E bzw. dem magnetischen Feldvektors H und der Ausbreitungsrichtung z ist die Ausbreitungsebene des Lichts. Bei natürlichem

Licht ist diese Ebene nicht festgelegt und ergibt somit unpolarisiertes Licht. Werden nun durch äußere, wellenbeeinflussende Mittel die Ausbreitungsebenen eingeschränkt, spricht man von polarisiertem Licht. Diese polarisierten Wellenfelder unterscheiden sich durch die Schwingung des elektrischen Feldvektors, der in seine Komponenten E_y und E_x zerlegt werden kann. Sind diese Feldstärkenvektorkomponenten phasengleich, entsteht eine lineare Polarisation der Lichtwelle. Sind dagegen beide Komponenten in der Phase unterschiedlich, ergeben sich elliptisch oder sogar zirkular polarisierte Wellen [glas97].

2.2.3 Interferenz

Sind Wellen kohärent, dann müssen ihre Eigenschaften wie die Phase Φ , die Frequenz f und die Amplitude A unabhängig vom zeitlichen Verlauf konstant sein [glas97]. Das heißt, für diese Wellen i ergibt sich der Feldvektor E_i :

$$E_i = A_i e^{j(2\pi f_i t + \Phi_i)} \quad (7)$$

mit:

- A_i – Amplitude der Welle i
- f_i – Frequenz der Welle i
- Φ_i – Phase der Welle i
- e – Eulersche Zahl (ca. 2,718)
- j – imaginäre Einheit $j = \sqrt{-1}$

Stimmen die Ausbreitungsrichtungen der Wellen dabei überein, ergeben sich Interferenzen zwischen diesen Wellen. Besteht ein Phasenversatz zwischen den Wellen von $0, 2\pi, 4\pi, \dots$, interferieren die Wellen konstruktiv und maximieren ihre Intensität in der resultierenden Welle. Bei ungeradzahlig Vielfachen von π wie $1\pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ löschen sich die Wellen aus. Es besteht dabei destruktive Interferenz [stro02].

2.3 Licht als Teilchen

Werden Hypothesen über die Eigenschaften des Lichts nicht durch dessen Wellenbetrachtungen im Experiment verifiziert, so müssen neue Modelle herangezogen werden. Die These einer Proportionalität zwischen der eingebrachten Lichtleistung in einen Festkörper und der dadurch hervorgerufenen freien Elektronen in diesem Körper bei jeder beliebigen Wellenlänge ist nicht im Experiment belegbar. Die Quantenoptik kann durch ihre Be-

trachtung des Lichts als Teilchen dieses Problem lösen. Quantenoptisch betrachtet hat ein Lichtteilchen (Photon) die Energie E [glas97]:

$$E = h \cdot f \quad (8)$$

mit dem Planckschen Wirkungsquantum $h = 6,26 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$. Neben der Energie ist der Impulsbetrag p eines Photons definiert mit [glas97]:

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (9)$$

2.4 Strahlenoptik

Für weitere Betrachtungen des Lichts ist die Einbeziehung von Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Optik hilfreich. Als geometrische Optik oder Strahlenoptik beschreibt man Wechselwirkungen von Licht mit Materialien, bei denen die geometrischen Dimensionen der Materialien wesentlich größer sind als die Wellenlänge. Hierdurch können leicht Zusammenhänge zwischen dem Verhalten des Lichts und den Eigenschaften optischer Medien erkannt werden. Im Fermatschen Prinzip wird beschrieben, dass ein Lichtstrahl zwischen zwei Punkten in einem homogenen Medium immer den kürzesten Weg zurücklegt. Daraus leiten sich zwei Gesetze ab – das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz – welche im Folgenden näher betrachtet werden.

2.4.1 Reflexionsgesetz

Trifft ein Lichtstrahl auf eine reflektierende Oberfläche, so entspricht der Winkel φ_1 des einfallenden Strahls zum Einfallslot dem Winkel φ_2 des reflektierten Strahls.

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (10)$$

Grafisch stellt sich diese Aussage wie folgt dar (Abb. 1).

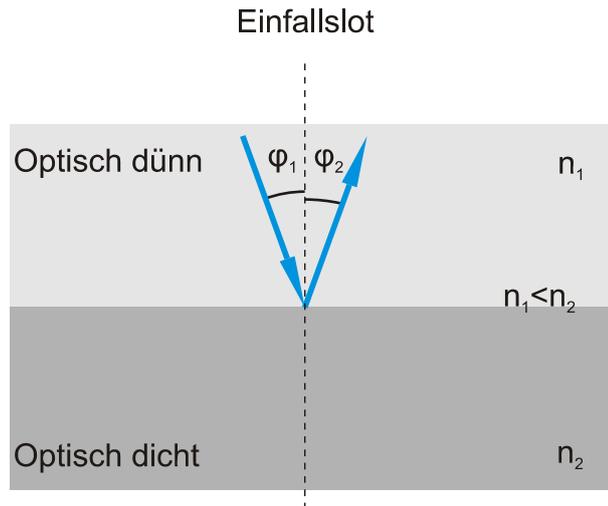


Abb. 1: Reflexionsgesetz

2.4.2 Brechungsgesetz

Das Brechungsgesetz beschreibt den Unterschied der Strahlenwinkel φ beim Übergang eines Lichtstrahls innerhalb von Medien unterschiedlicher Brechzahl n :

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (11)$$

Tritt der Lichtstrahl von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium ein, wird er zum Einfallslot hin gebrochen und umgekehrt (Abb. 2).

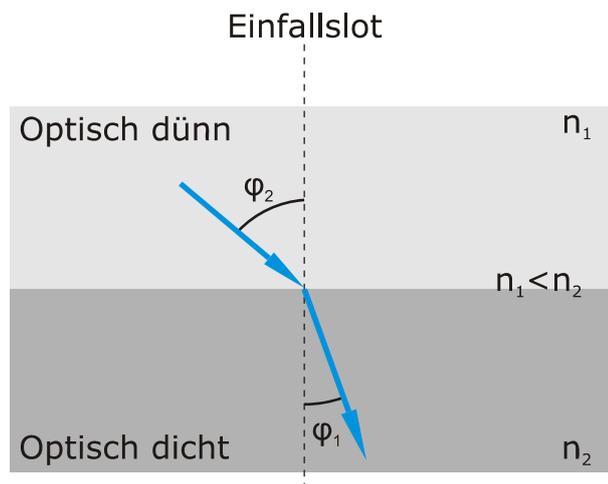


Abb. 2: Brechungsgesetz

2.4.3 Totalreflexion

Aus dem Brechungsgesetz kann eine besondere Eigenschaft zwischen zwei optischen Medien abgeleitet werden: die Totalreflexion (Abb. 3). Dabei wird ein Grenzwinkel beschrieben, welcher, sobald er überschritten wird, das Eindringen des Strahls in das andere Medium unterbindet. Der Strahl muss dabei von einem optisch dichteren Medium auf ein optisch dünneres Medium treffen und folgende Bedingungen erfüllen:

$$\frac{n_1}{n_2} \sin \varphi_2 = \sin \varphi_2' = 1 \quad (12)$$

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (13)$$

Sobald der Winkel des auftreffenden Strahls größer ist als φ_2 , wird der Strahl nicht mehr in das andere Medium gebrochen, sondern mit dem gleichen Einfallswinkel $\varphi_1 = \varphi_1'$ reflektiert (Abb. 3).

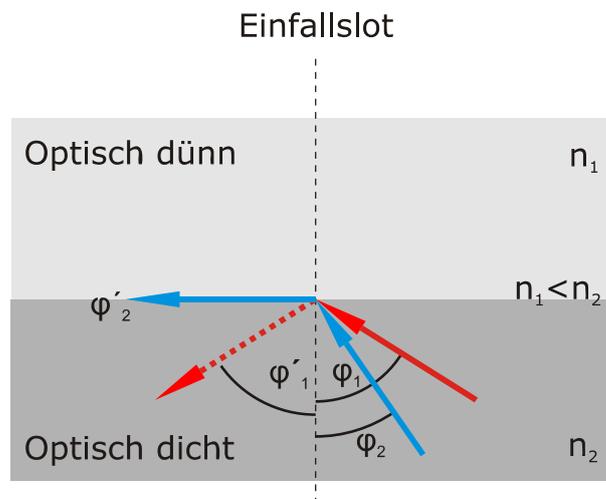


Abb. 3: Totalreflexion

2.5 Lichtwellenleiter

Der Effekt der Totalreflexion wird verwendet, um Licht in eine bestimmte Richtung zu leiten. Es wird hierbei nicht nur der Sprung der Brechzahl zwischen einem Übertragungsmedium und der Luft genutzt, sondern vielmehr jeder Übergang, der einen solchen Brechungsindexsprung hervorruft.

2.5.1 Ebene Wellenleiter

In der Halbleitertechnologie werden bevorzugt planare Wellenleiter eingesetzt, um eine bestimmte Packungsdichte aller Bauteile wie Kondensatoren und Widerstände auf einem Substrat zu realisieren. Lichtführende Schichten können so auf einem Halbleiterträger mit anderen elektrischen Komponenten untergebracht werden. In Abbildung 4 sind unterschiedliche Formen von ebenen Wellenleitern dargestellt.

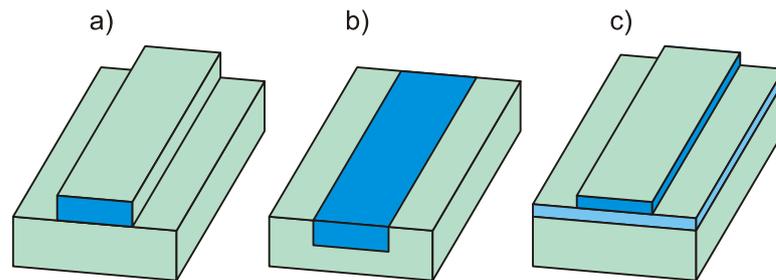


Abb. 4: a) Rippenwellenleiter, b) vergrabener Wellenleiter, c) inverser Rippenwellenleiter [fisc02]

Die Form der Wellenleiter ist in der Fertigungsweise begründet. Ebene Wellenleiter aus Halbleitermaterial können nur in Schichten aufgebaut werden, in die Fremdstoffe eingebracht werden. Das Einbringen verändert die Brechzahl und erzeugt somit den Indexsprung für die Totalreflexion [fisc02].

2.5.2 Runde Wellenleiter

Der überwiegende Teil an Lichtwellenleitern hat eine radialsymmetrische Form. Im Allgemeinen werden mit Lichtwellenleitern Glas- und Kunststofffasern bezeichnet, die für die optische Signal- oder Nachrichtenübertragung geeignet sind. Der Brechungsindexsprung wird im runden Wellenleiter wie auch im Schichtwellenleiter durch die Ummantelung des Kerns verursacht. Dieser besteht aus einem Material von geringerer Brechzahl als das Material des Kerns.

2.5.2.1 Stufenindex-Fasern

Die einfachste Form eines runden Wellenleiters ist die Stufenindex-Faser (SI-Faser, Step-Index-Fiber) (Abb. 5). Sie hat im Kern eine konstante Brechzahl n_K für jeden Radius r . Die Brechzahl des Mantels n_M ist geringfügig kleiner als die des Kerns.