

Lichtwellenleiter – Theorie, Technik, Natur

Christoph Egger

27. Januar 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	5
2	Entwicklung und Erforschung	6
3	Theoretische Betrachtung	7
3.1	Strahlenoptische Betrachtung	7
3.1.1	Totalreflexion	7
3.1.2	Interferenz	7
3.1.3	Grenzen der geometrischen Betrachtung	8
3.2	Die verschiedenen Moden	8
3.2.1	Erklärung	8
3.2.2	Auswirkung	8
3.3	Dispersion	9
3.3.1	Allgemein	9
3.3.2	Folgen	9
3.4	Dämpfung	9
4	Versuche zur Wellenleitung	11
4.1	Unter Verwendung von Licht	11
4.1.1	Versuchsaufbau	11
4.1.2	Auswertung	11
4.2	Unter Verwendung eines Lasers	13
4.2.1	Versuchsaufbau	13
4.2.2	Auswertung	13
4.3	Zusammenfassung	16
5	Wellenleiter in der Technik	17
5.1	Materialeigenschaften	17
5.1.1	Unstrukturierte Faser	17

Inhaltsverzeichnis

5.1.2	Stufenindexfaser	17
5.1.3	Gradientindexleiter	17
5.1.4	Weitere Möglichkeiten	18
5.2	Netzwerktechnik	18
5.2.1	Einsatzgebiet	18
5.2.2	Vorteile	18
5.2.3	Einschränkung	19
5.3	Weitere Einsatzgebiete	20
6	Wellenleiter in der Natur	21
6.1	Photorezeptoren	21
6.1.1	Einführung	21
6.1.2	Lichtwellenleitung	21
6.1.3	Fazit	22
6.2	Weitere Gebiete	22
7	Schlussbemerkung	23

Abbildungsverzeichnis

4.1	Versuchsaufbau mit Licht	11
4.2	Kurve mit Licht	12
4.3	Lichtleiterkabel mit Licht	12
4.4	Stab mit Licht	13
4.5	Versuchsaufbau mit Laser	14
4.6	Transparente Kurve mit Laserlicht	14
4.7	Mit Laserlicht beleuchtetes Lichtwellenleiterkabel	15
4.8	Unförmiges Glaselement mit Laserlicht beleuchtet	15

1 Vorwort

Während die Wellenleitung dem Menschen erst seit dem 19. Jahrhundert bekannt ist, nutzt die Natur diese physikalische Erscheinung schon seit Jahrtausenden, z. B. zur visuellen Wahrnehmung. Dies wird in Kapitel 6 näher betrachtet wird.

Doch auch in der Technik spielt Wellenleitung des Lichtes, eine bedeutende Rolle. So wird in Kapitel 5 ein technisches Anwendungsgebiet vorgestellt.

Nach einer Abhandlung der theoretischen Grundlagen werde ich ein paar Experimente zur Veranschaulichung beschreiben. Darauf folgen dann zwei Kapitel, die sich mit realen Beispielen der Verwendung von Lichtwellenleitern beschäftigen, einerseits in der Technik und andererseits auch in der Natur.

In der vorliegenden Facharbeit werde ich mich an der Nomenklatur der (Nachrichten)Technik orientieren. Dies ist primär der verfügbaren Literatur geschuldet, sollte aber den Inhalt der theoretischen Betrachtung nicht stören.

2 Entwicklung und Erforschung

Während die Totalreflexion, die die Grundlage der Wellenleitertechnik bildet, bereits im 19. Jahrhundert bekannt war, wurden die ersten Wellenleiter in den 1920er Jahren technisch hergestellt.

Da dabei allerdings noch kein Mantel eingesetzt wurde und die Lichtleiter daher kaum eingesetzt werden konnten, ging die Entwicklung zunächst noch langsam voran. Erst die Verwendung von Mantelschichten in den 1950er Jahren brachte den Durchbruch. Von da an setzte auch eine rapide Weiterentwicklung der Technik ein. Eingesetzt wurden optische Wellenleiter zunächst zur Bildübertragung.

Zunächst stellte die Dämpfung – ausgelöst durch Unreinheiten im Glas – das größte Problem dar. In den 1970er Jahren jedoch wurden die Fertigungsprozesse soweit verbessert, dass sich Unreinheiten kaum mehr auf die Dämpfung auswirken.

Dies ermöglichte auch erstmals den Einsatz von Lichtwellenleitern in der digitalen Nachrichtenübertragung, einem Gebiet, in dem Lichtwellenleiter mittlerweile nicht mehr wegzudenken sind.

Die aktuelle Forschung beschäftigt sich immer noch mit dem Problem der Dämpfung sowie dem Effekt der Dispersion, um immer weitere Strecken ohne Zwischenverstärker überbrücken zu können, wobei mit verschiedenen Materialien des Lichtwellenleiters sowie komplexeren Leiterprofilen gearbeitet wird.

3 Theoretische Betrachtung

3.1 Strahlenoptische Betrachtung

3.1.1 Totalreflexion

Lichtwellenleiter nutzen den physikalischen Effekt der Totalreflexion. Dabei wird Licht beim Wechsel von optisch dickeren zu optisch dünneren Materialien nicht gebrochen, sondern nahezu vollständig zurückgeworfen.

In Anlehnung an [Mit05, Seite 15 ff] gelten folgende Aspekte bezüglich der Totalreflexion:

Die Brechungsbeziehung für α als Einfallswinkel und β als Ausfallswinkel:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_L}{n_G} \quad (3.1)$$

Dabei ist es nicht denkbar, dass β den Wert 90° übersteigt, da in diesem Fall der ausfallende Lichtstrahl wieder in das Glas eindringen würde. Daraus lässt sich ableiten, dass ab diesem Punkt die Totalreflexion einsetzt.

Setzt man für $\sin \beta$ jetzt den Wert 1 – entsprechend dem Winkel 90° – ein, so erhält man als Grenzwert für α :

$$\sin \alpha_{Grenz} = \frac{n_L}{n_G} \quad (3.2)$$

$$\alpha_{Grenz} = \arcsin \left(\frac{n_L}{n_g} \right) \quad (3.3)$$

Totalreflexion ist also für $\alpha \geq \arcsin \left(\frac{n_L}{n_g} \right)$ gegeben.

3.1.2 Interferenz

Durch den Gangunterschied der verschiedenen geometrischen Ausbreitungsrichtungen kommt es bereits nach zu einer destruktiven Interferenz.

3.1.3 Grenzen der geometrischen Betrachtung

Bekanntlich besitzt Licht unter anderem Wellennatur. Die Welleneigenschaften des Lichtes spielen eine um so größere Rolle, je näher der Durchmesser des Lichtwellenleiters an die Wellenlänge des Lichtes herankommt. Eine rein geometrische Betrachtung ist dann nicht mehr sinnvoll.

3.2 Die verschiedenen Moden

3.2.1 Erklärung

Bei der wellenoptischen Betrachtung der Lichtleitung lässt sich eine diskrete Anzahl sogenannter *Moden* feststellen. Es handelt sich dabei um Ausbreitungswege des Lichts, deren Anzahl von Wellenlänge und Kernradius abhängig ist.

Die Anzahl der Moden nimmt dabei ab, je weiter sich der Kernradius an die Wellenlänge des sich ausbreitenden Lichtes annähert. Entgegen der vielleicht naheliegenden Annahme, alle Ausbreitungsrichtungen in einem bestimmten Winkelbereich wären denkbar, existiert nur eine diskrete Anzahl an möglichen Wegen.

Man unterscheidet dabei primär zwischen *Singlemode*-Wellenleitung, bei der genau eine Mode ausbreitungsfähig ist, und *Multimode*-Wellenleitung, bei der viele, mitunter einige tausend Moden ausbreitungsfähig sind.

3.2.2 Auswirkung

Durch die diskrete Anzahl der Ausbreitungswege ist das Licht im Wellenleiter nicht gleichverteilt. Gerade in Bereichen mit wenigen Moden kann Lichtenergie nur in bestimmten Bereichen des Wellenleiters festgestellt werden.

Dabei ist zu beachten, dass nur ein Teil der Energie innerhalb des *Kerns* transportiert wird, sich also Teile der Lichtenergie stets im *Mantel* befinden.

Des Weiteren ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Achse des Wellenleiters nicht in allen Moden gleich, wodurch die Moden zu der in Folge behandelten Dispersion beitragen.

3.3 Dispersion

3.3.1 Allgemein

Mit *Dispersion* wird die Signalverbreitung beschrieben, die im Wellenleiter durch unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Energieanteilen hervorgerufen wird. Dabei treten verschiedene Formen von Dispersion auf, Beispielsweise:

Modendispersion: Wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben, gibt es im Multimode Lichtwellenleiter mehrere mögliche Ausbreitungswege des Lichtes, die zu unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten entlang der Leiterachse führen.

Diesen Effekt nennt man *Modendispersion*, er kommt in Singlemode Lichtwellenleitern nicht vor.

Chromatische Dispersion: Von *Chromatischer Dispersion* spricht man im Zusammenhang von einmodigen Wellenleitern. Sie entsteht durch die Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl, die sich auf alle optischen Signale auswirkt, da perfekt monochromatisches Licht nicht denkbar ist.

3.3.2 Folgen

Besondere Bedeutung hat die Dispersion in der Nachrichtenübertragung. Durch die verschiedenen Laufzeiten der Energieanteile eines Signalimpulses wird dieser verbreitert, die Nachrichtendichte im Streckenverlauf reduziert.

Wird hingegen ein kontinuierlicher Lichtstrahl übertragen, so ist die *Dispersion* nicht von Bedeutung, da die Summe der Lichtenergie über die Zeit unverändert bleibt.

3.4 Dämpfung

Mit *Dämpfung* wird im Allgemeinen der Energieverlust beim Durchlaufen des Wellenleiters bezeichnet.

Während bei den ersten Lichtwellenleitern noch die geringe Reinheit des Glases und die damit verbundenen Energieverluste die Hauptursache der Dämpfung waren, liegen die Ursachen heute im Molekülaufbau bedingt.

3 Theoretische Betrachtung

So bildet die Resonanz der Elektronen im hochfrequenten und die Resonanz der Moleküle im niedriger frequenten Bereich zusammen mit der Rayleigh-Strahlung heute einen Großteil der Dämpfung

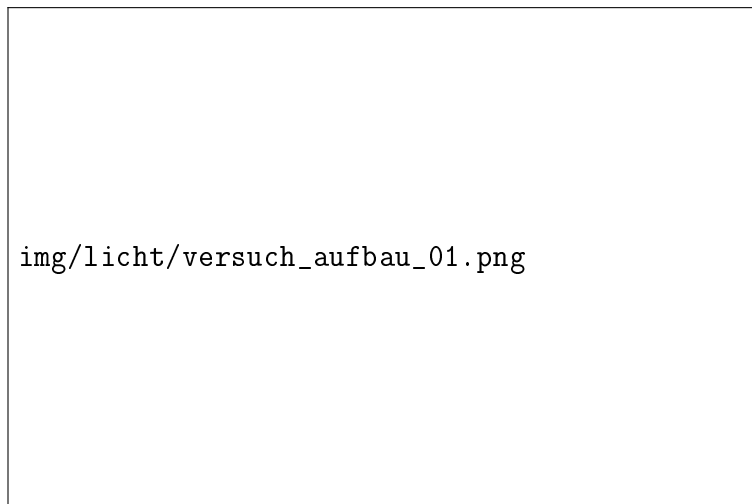
4 Versuche zur Wellenleitung

4.1 Unter Verwendung von Licht

4.1.1 Versuchsaufbau

Für die Versuche mit gewöhnlichem Licht wird als Lichtquelle eine Glühlampe verwendet. Durch einen Spalt¹ wird ein Strahl ausgeblendet. Dieser wird dann auf die Stirnflächen wellenleitender Materialien gerichtet. Dies ist auch in Abbildung 4.1 zu sehen.

Abbildung 4.1: Versuchsaufbau mit Licht

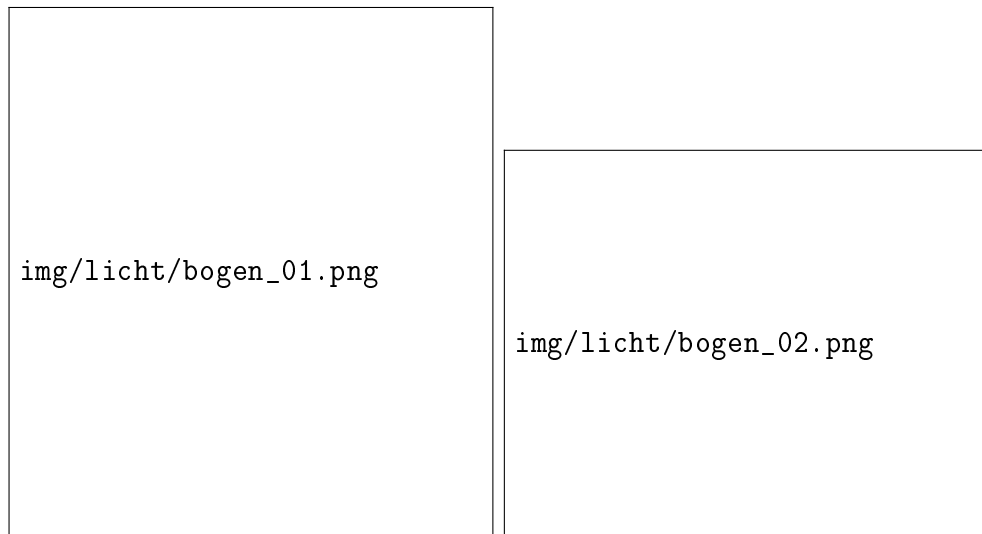


4.1.2 Auswertung

Wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, lassen sich an dem breiten Kurvenstück die erwarteten strahlenoptischen Figuren feststellen. Allerdings irritieren die an den Reflexionsstellen auftretenden Linien. Ich werde am Ende dieses Kapitels noch einmal auf diese Linien kurz eingehen.

¹Aufgrund der Breite kann die Interferenz hier vernachlässigt werden

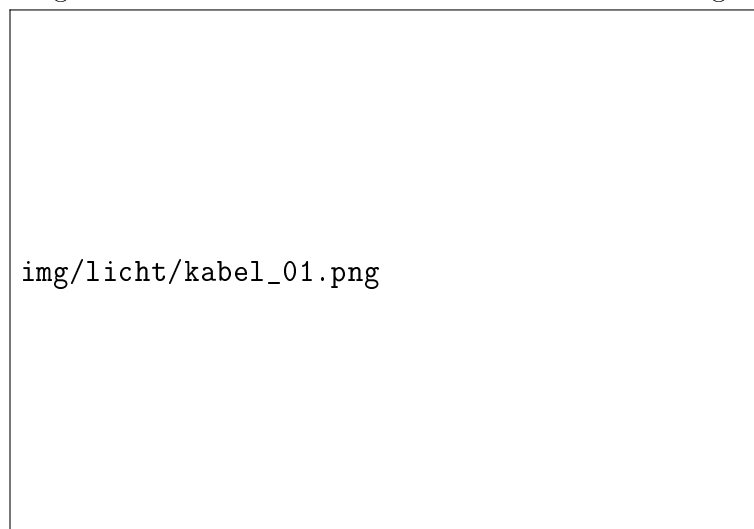
Abbildung 4.2: Transparentes Kurvenstück wird mit weißem Licht beleuchtet



Ersetzt man das Kurvenstück durch ein dünnes Lichtleiterkabel (Abbildung 4.3), so kann man den strahlenoptischen Weg nicht mehr verfolgen, das Aufleuchten des sonst im Schatten liegenden Kabelendes lässt jedoch auf eine Wellenleitung schließen.

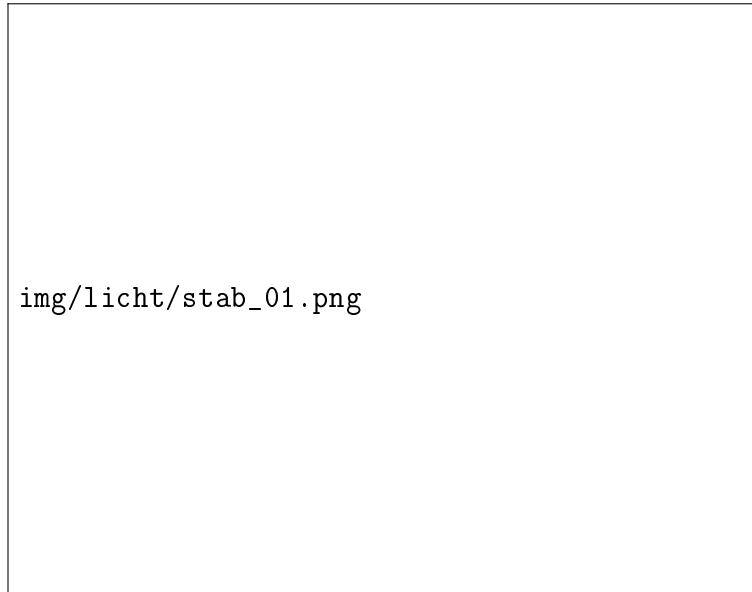
Beim Lichtwellenleiterkabel wäre eine Leuchterscheinung innerhalb des Kabels, so wie sie bei der Kurve sichtbar war, auch schwer vorzustellen, da die Lichtleitung ja auf Totalreflexion beruht, alles Licht, das seitlich ausgestrahlt und somit sichtbar wird, verloren wäre.

Abbildung 4.3: Lichtleiterkabel wird mit weißem Licht angeleuchtet



Der Versuch wurde ebenfalls mit einem transparenten Stab durchgeführt (Abbildung 4.4). Auch hier ist lediglich das leuchtende Ende ein Hinweis auf die Wellenleitung.

Abbildung 4.4: Transparenter Stab wird mit weißem Licht beleuchtet



4.2 Unter Verwendung eines Lasers

4.2.1 Versuchsaufbau

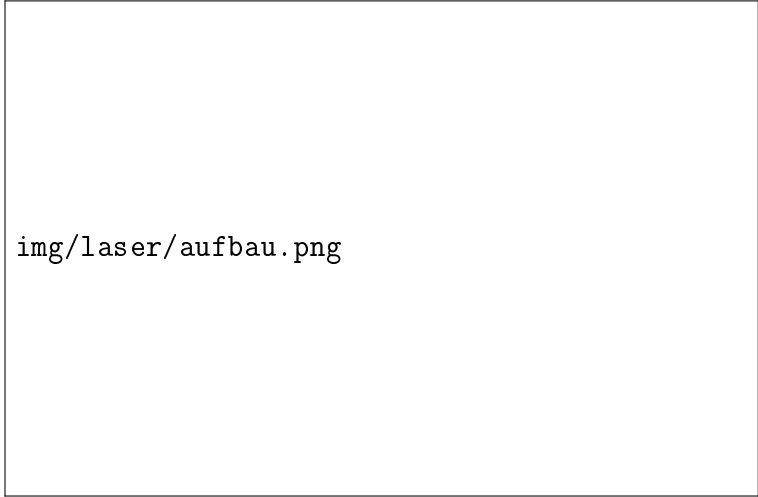
Für eine weitere Versuchsreihe wurde die weiße Lichtquelle durch einen roten (He-)Laser ersetzt. Durch die monochromatische Natur des Laserlichtes können dabei sämtliche wellenlängenabhängigen Elemente² ignoriert werden. Der Aufbau ist auch in Abbildung 4.5 zu sehen.

4.2.2 Auswertung

Beleuchtet man die bereits mit dem weißen Licht eingesetzte Kurve mit dem Laser, so lassen sich die bereits festgestellten wellenoptischen Erscheinungen wieder erkennen. Deutlich ist in diesem Fall auch die Reflexion auf der Stirnseite des Kurvenstücks erkennbar, da es beim Eintritt des Lichtes in den Wellenleiter zu einer teilweisen Reflexion kommt.

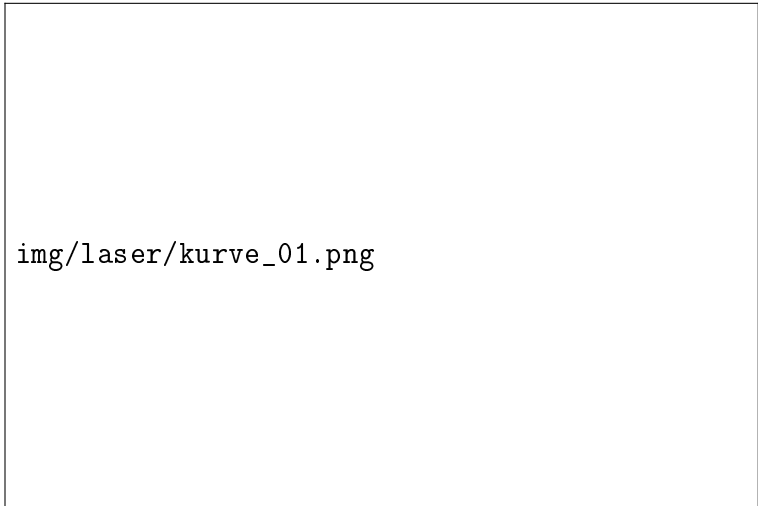
²Auf die in dieser Facharbeit nicht näher eingegangen wird

Abbildung 4.5: Versuchsaufbau mit Laser



img/laser/aufbau.png

Abbildung 4.6: Transparente Kurve mit Laserlicht

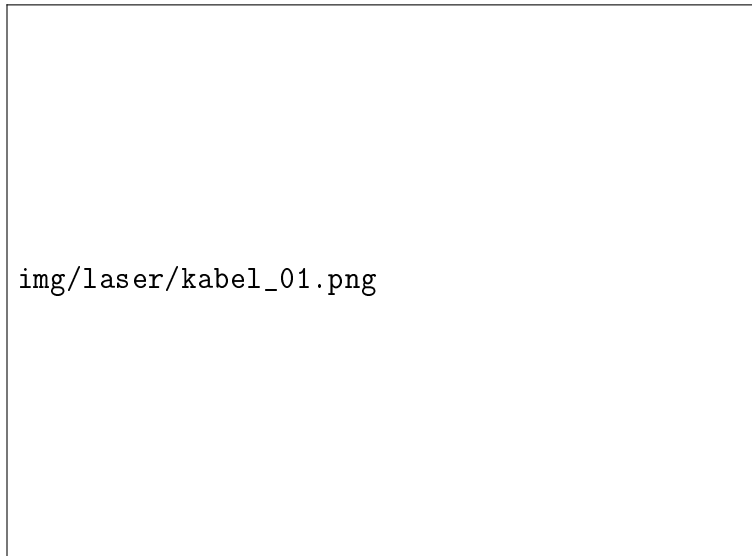


img/laser/kurve_01.png

4 Versuche zur Wellenleitung

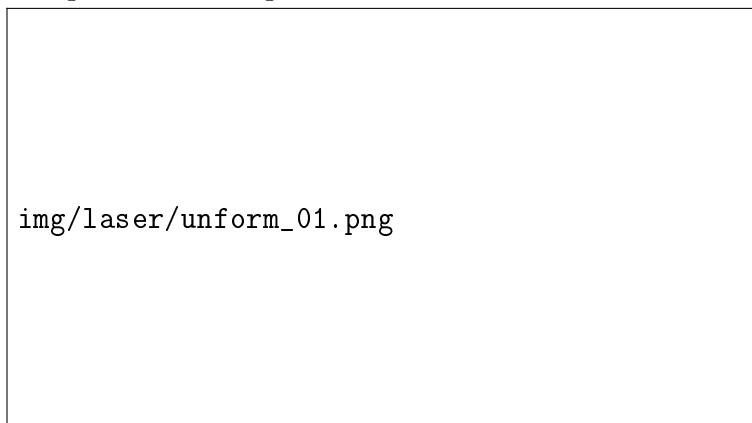
Im freigelegten Bereich des Lichtwellenleiters (Abbildung 4.7) ist bei der Beleuchtung mit Laserlicht auch im Verlauf des Kabels eine Leuchterscheinung festzustellen. Diese kann sowohl durch die Krümmung des Lichtwellenleiters, die zu Verlusten der weitergeleiteten Energie führt, als auch durch Unreinheiten im Kabel erklärt werden.

Abbildung 4.7: Mit Laserlicht beleuchtetes Lichtwellenleiterkabel



Auch in weniger regelmäßig geformten Glaselementen (Abbildung 4.8) lässt sich der Effekt der Lichtwellenleitung nachvollziehen. Besonders deutlich ist dabei die unterschiedlich starke Leuchterscheinung im wellenleitenden Bereich, was auf die unregelmäßige Form des Lichtleiters zurückzuführen ist.

Abbildung 4.8: Unförmiges Glaselement mit Laserlicht beleuchtet



In einem letzten Versuch wurde ein einige Meter langes Lichtleiterkabel, dessen Fasern einen Durchmesser im Bereich von 10^{-4} Metern besitzen, mit dem Laser beleuchtet. Dieses Kabel lässt bereits einen Einblick in die Funktion der nachrichtentechnischen Lichtwellenleiter zu.

Da trotz der erheblich größeren Länge auch hier an den Faserenden Laserlicht festzustellen war, ist der Lichtverlust im Kabelverlauf folglich deutlich geringer. Eine Überprüfung dieser Tatsache war nicht möglich, da das Kabel durch eine Schutzschicht von Einblicken abgeschirmt war.

4.3 Zusammenfassung

Während der Versuchsdurchführung ließen sich die wellenoptisch erklärten Strahlengänge nur an den kurvenförmigen Elementen ³ erkennen. In allen Experimenten konnte die Lichtleitereigenschaft durch den Austritt des Lichts am Ende des Leiters bestätigt werden.

Wie an den bei praktisch jedem Versuch auftretenden Leuchterscheinungen innerhalb der Leiterstrecke zu erkennen ist, muss eine verhältnismäßig starke Dämpfung⁴ angenommen werden.

Die bei den Versuchen mit dem Kurvenstück auftretenden, fortgeführten Linien, die in Abbildung 4.2 zu sehen sind, aber auch beim Experimentieren mit Laserlicht auftraten, sind wohl auf zusätzliche Reflektionen zurückzuführen und stellen bei meiner Versuchsreihe eine Unerwartete Erscheinung dar.

Bei der Versuchsdurchführung konnte ebenfalls die Abhängigkeit des geleiteten Lichts vom Einfallswinkel festgestellt werden. Dieses Ergebnis ließ sich jedoch nur schwerlich photographisch festhalten.

³Abbildung 4.2 und 4.6

⁴Vergleich Abschnitt 3.4

5 Wellenleiter in der Technik

5.1 Materialeigenschaften

5.1.1 Unstrukturierte Faser

Da Luft bereits eine geringere optische Dichte aufweist als Glas wäre es theoretisch denkbar, einen reinen Glasstrang als Lichtwellenleiter einzusetzen. Dieser weist jedoch den Nachteil auf, dass er stark von Verschmutzungen beeinflusst wird.

«Man denke im Extremfall nur an die Benetzung mit einem Tropfen Öl oder dergleichen mit einem Brechungsindex ähnlich dem des Glases: die Totalreflexion, auf der die Wellenleitung ja beruht, wäre verloren.» [Mit05, Seite 17]

5.1.2 Stufenindexfaser

Diese Anfälligkeit für Verschmutzung kann mit einer Stufenindexfaser umgangen werden. Dabei kommt ein Mantel aus einem optisch dünneren (meist dotiertem) Glas zum Einsatz, sodass jetzt die Totalreflexion zwischen Kern und Mantel erfolgt.

5.1.3 Gradientindexleiter

Gradientindexleiter sind das Ergebnis von Überlegungen zur Minimierung der Modendispersion. Dabei wird der Zeitunterschied durch die verschiedenen langen Ausbreitungswege dadurch minimiert, dass sich geometrisch längere Ausbreitungswege in optisch dünnerem Glas ausbreiten.

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes indirekt proportional zum Brechindex des Glases ist, breitet sich das Licht im optisch dünneren Glas schneller aus und gleicht damit den längeren Weg aus.

Für a als Kernradius, n_M als Brechzahl des Mantels und n_K als maximale Brechzahl des Kerns lässt sich folgendes Brechzahlprofil ableiten:

$$n(r) = \begin{cases} n_K \sqrt{1 - 2\Delta(r/a)^\alpha} & : |x| \leq a \\ n_M & : |x| > a \end{cases} \quad (5.1)$$

Dabei weist die Dispersion für $\alpha \approx 2$ ein Minimum auf.

5.1.4 Weitere Möglichkeiten

In der technischen Anwendung lassen sich noch weitere Brechzahlprofile antreffen, die weitere Verbesserungen der Lichtleitereigenschaften mit sich bringen. Unter anderem kann durch eine geeignete Wahl des Profils auf die Polarisation Einfluss genommen werden.

5.2 Netzwerktechnik

5.2.1 Einsatzgebiet

5.2.2 Vorteile

Hohe Datenrate

Während bei konventionellen Leitern Datenraten im Bereich von 1 GBit/s technisch verbreitet sind, lassen sich mit Lichtwellenleitern Datenraten im Bereich von 1 TBit/s erreichen.

Unempfindlich gegen Störungen

In Anwesenheit anderer elektrischer Geräte und in Umgebungen mit starker Störstrahlung z.B. in der Nähe starker, elektrischer Motoren, zeigt die Nachrichtenübertragung durch Lichtwellenleiter im Vergleich zu elektrischen Leitern kaum Störanfälligkeit.

Analog dazu werden von Lichtwellenleitern auch keine abhörbaren Strahlungen an die Umgebung abgegeben, sodass eine Risikoquelle beim Übertragen geheimer Nachrichten ausgeschlossen werden kann.

Potentialtrennung

Da klassische Lichtwellenleiter aus elektrischer Sicht Isolatoren sind, stellen optische Datenwege im Kontrast zu z.B. Kupfer-/Koaxialkabeln eine Trennung der Potentiale dar.

Dies kann z. B. in der Nähe hochentzündlicher oder explosiver Stoffe von Vorteil sein, da dies einer Funkenbildung entgegenwirkt.

Gewichts- und Raumersparnis

Bei der Verwendung von Lichtleitern an Stelle von herkömmlichen Kupferkabeln kann bei gleichem Datendurchsatz eine Gewichtsreduzierung um etwa 10^{-4} erfolgen¹.

Dieser Effekt ist zum großen Teil auf den deutlich geringeren Durchmesser der Lichtleiter – nicht die geringere Dichte von Quarzglas im Vergleich zu Kupfer – zurückzuführen.

Während die Gewichtsreduzierung vor allem in der Luft- und Raumfahrt relevant ist, stellt der geringere Raumbedarf z.B. bei einer Kapazitätserweiterung bestehender Verbindungen, einen Vorteil dar, da bereits bestehende Kabelschächte weiterverwendet werden können.

5.2.3 Einschränkung

Begrenzung durch Dämpfung

Der Effekt der Dämpfung führt zu einer Abnahme der Signalintensität im Verlauf der Strecke. Für einen Empfang des Signales muss die Strecke somit unter einer durch Fasermaterial, Sendekraft und Empfindlichkeit resultierenden Länge bleiben.

Begrenzung durch Dispersion

Unter Dispersion wird die Signalverbreiterung im Verlauf der Fortbewegung der Wellen verstanden. Da mit einer größeren Signalbreite der Abstand zwischen zwei Signalen größer sein muss um eine Eindeutige Datenübertragung zu gewährleisten begrenzt die Dispersion die Datenrate bei größeren Strecken.

¹Angaben nach [Mit05, Seite 12]

5.3 Weitere Einsatzgebiete

Neben dem großen Einsatzbereich in der Nachrichtentechnik kommen Lichtwellenleiter auch anderweitig zum Einsatz. Die Möglichkeit Licht um Ecken zu leiten macht Lichtwellenleiter beispielsweise in der Chirurgie zu einer nützlichen Lichtquelle.

Lichtwellenleiter können zum Transport von Energie, meist in Form starken Laserlichtes, eingesetzt werden und spielen auch in der Messtechnik eine Rolle.

6 Wellenleiter in der Natur

6.1 Photorezeptoren

6.1.1 Einführung

Photorezeptoren dienen als optische Sinnesorgane. Diese Sinnesorgane setzen sich aus einer Vielzahl einzelner Sensoren zusammen, die jeweils zu einem geometrischen Bereich des wahrgenommenen Bildes Intensität, Wellenlänge und Polarisation des einfallenden Lichtes feststellen.

Ein höheres Auflösungsvermögen des Sinnesorgans lässt sich daher durch eine höhere Anzahl an Rezeptorzellen erreichen, da so jede einzelne Zelle einen kleineren geometrischen Bereich beobachtet. Dazu muss allerdings die Querschnittsfläche der Sinneszellen reduziert werden. Um dabei weiterhin ein ausreichendes Signal erzeugen zu können, muss die Lichtabsorption innerhalb der Sinneszelle erhöht werden.

Diese Voraussetzung legt nahe, dass die Photorezeptoren wellenleitender Natur sind, um das Licht über eine möglichst große Strecke innerhalb des Rezeptors zu leiten. Tatsächlich lässt sich nachweisen, dass sich die Sehpigmente in Bereichen mit im Vergleich zur Umgebung höherer Brechzahl befinden, ein Hinweis Wellenleitung.

6.1.2 Lichtwellenleitung

Die lichtwellenleitenden Elemente der Photorezeptoren besitzen einen der Wellenlänge des zu leitenden Lichtes ähnlichen Durchmesser. Dies hat zur Folge, dass die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Modeneffekte zu beobachten sind.

Bedingt durch den sehr geringen Durchmesser der Wellenleiter treten dabei Photorezeptoren nur eine geringe Anzahl an Moden auf, niemals einige tausende auf, wie dies z. B. in der technischen Anwendung vorkommt.

Auswirkungen der Moden

Moden spielen bei der Lichtwellenleitung in Photorezeptoren insofern eine Rolle, als ja durch die Modeneffekte nur ein Teil des Lichtes innerhalb des mit Photopigmenten besetzten Mantels transportiert wird und somit ausgewertet werden kann.

Durch die eben besprochenen wellenoptischen Einflüsse ist der Akzeptanzwinkel¹ des Photorezeptors von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. Da sich der Akzeptanzkegel direkt auf die räumliche Auflösung des Sinnesorganes auswirkt ist zu Vermuten, dass die Moden in diesem Bereich einen bedeutenden Einfluss haben.

Neben dem Winkel beeinflussen Modeneffekte auch den Radius, in dem Photorezeptoren Licht aufnehmen können. Während nach einer rein geometrischen Betrachtung nur Licht geleitet werden kann, das direkt auf das leitende Medium fällt, erreicht etwa 90 % mehr Licht die Photorezeptoren.

Dies kann durch die teilweise Leitung von Licht außerhalb des Mantels begründet werden.

6.1.3 Fazit

Die experimentel nachweisbare Wellenleitung innerhalb der Photorezeptoren ist somit Grundlage unseres hochauflösenden Sehvermögens, welches ohne Wellenleitung schwerlich denkbar wäre.

6.2 Weitere Gebiete

Photorezeptoren bilden nicht das einzige Beispiel für das Auftreten von Wellenleitung in der Natur. Wellenleitung kommt auch dort zu einer Vielzahl von Zwecken vor. So leitet das Fell der Eisbären beispielsweise Lichtwellen um mehr Licht auf die Haut zu leiten und somit die Körpertemperatur zu erhöhen.

¹Abschnitt 3.1.1

7 Schlussbemerkung

Wellenleiter spielten in ihrer natürlichen Form schon immer eine große Rolle in unserem alltäglichen Leben, auch wenn wir dies nicht unbedingt direkt erkennen. Aber auch gerade in der Nachrichtentechnik sind Lichtwellenleiter heutzutage nicht mehr wegzudenken, alltägliche Kommunikation über das Internet beispielsweise basiert auf Lichtwellenleitung.

Der technische Einsatz hat die Erforschung der Lichtwellenleitung in den letzten 50 Jahren deutlich vorangetrieben, allein schon motiviert durch die Möglichkeit weiterer Datenwege und höherer Durchsatzraten in der Nachrichtentechnik.

Viele dieser Erkenntnisse, wie zum Beispiel im Bereich der Multimoden, die in dieser Facharbeit kurz angesprochen wurden, und lichtlineare, wellenlängenabhängige Erscheinungen gehen weit über den Umfang dieser Arbeit hinaus und erfordern ein Verständnis komplexer mathematischer Beziehungen.

Trotz allem soll diese Facharbeit einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von Lichtwellenleitung geben.

Literaturverzeichnis

- [Agr07] AGRAWAL, GOVIND P.: *Nonlinear fiber optics*. Elsevier, Acad. Press, Amsterdam, 4. Auflage, 2007.
- [Ebe07] EBERLEIN, DIETER: *Lichtwellenleitertechnik*. Expert Verlag, Renningen, 7. Auflage, 2007.
- [Gec90] GECKLER, SIEGFRIED: *Lichtwellenleiter für die optische Nachrichtenübertragung*. Springer Verlag, Heidelberg, 3. Auflage, 1990.
- [Gra94] GRAF, EBERHARD HERTER ; MARTIN: *Optische Nachrichtentechnik*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1994.
- [Hop82] HOPPE, WALTER: *Biophysik – ein Lehrbuch*. Springer Verlag, Berlin u.a., 1982.
- [Mit05] MITSCHKE, FEDOR MANUEL: *Glasfasern*. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, 1. Auflage, 2005.