

1 Einleitung

„Licht ist Leben“. Licht fasziniert schon immer die Menschheit. Ohne die Sonne als natürliche Licht- und Wärmequelle entstände kein Leben auf der Erde und es könnte auch kein Leben existieren. Schon in der Bibel wird Licht als Metapher für Gott und das Gute gesehen:

„Ich bin als Licht in die Welt gekommen, damit jeder, der mir vertraut, nicht im Dunkeln bleibt.“ (Joh 12,46)

Im Laufe der Jahrhunderte entdecken die Menschen, welches Potential im Licht steckt. Es wird heute in vielen Bereichen der Technik und des täglichen Lebens eingesetzt. Ohne die Herausforderung das Licht zu ergründen, wären die heutigen Erkenntnisse der Physik und speziell der Quantenphysik nicht vorstellbar. Dies führt bei David Bohm¹ zu folgendem Zitat:

„Licht ist Energie und ebenso Information - Inhalt, Form und Struktur. Es bildet das Potential für alles.“

1.1 Historie des Lichtes

Die Modelle über „Form und Struktur“ des Lichtes verändern sich im Laufe der letzten Jahrhunderte erheblich. Die Lehre vom Licht und die Wechselwirkung zwischen ihm und der Materie begründet daher auch einen eigenen Zweig der Physik, die Optik. Sie beschäftigt sich mit den Erscheinungen, die durch unser Sinnesorgan Auge wahrgenommen werden können. Allerdings wissen schon die Griechen, dass Licht und die Gesetzmäßigkeiten des Lichtes zu nutzen. So soll es Archimedes² schon im 3. Jahrhundert vor Christus gelungen sein, mithilfe des Sonnenlichtes und einer Reihe von kleineren Spiegeln eine ganze Flotte von römischen Schiffen in Brand zu setzen.

¹US-amerikanischer Quantenphysiker, 1917-1992.

²Griechischer Universalgelehrter, 287 v. Chr. - 212 v. Chr.

Systematisch wird seit Ende des 17. Jahrhunderts das Phänomen Licht untersucht. Sir Isaac Newton³ ist der erste, der 1672 ein physikalisches Modell vorstellt. Er nennt es *Korpuskulartheorie*, da nach ihm eine Lichtquelle kleine Teilchen, sogenannte Korpuskeln, aussendet. Diese bewegen sich mit großer Geschwindigkeit geradlinig durch den Raum, bis sie direkt oder indirekt, beispielsweise durch Reflexionen, in das menschliche Auge gelangen und dort Sinnesreize auslösen. Die Reflexion an Gegenständen kann mit der klassischen Mechanik erklärt werden. Es handelt sich dabei um einen elastischen Stoß. Mit dieser Theorie ist es möglich, die Reflexion und auch eingeschränkt die Beugung von Licht zu erklären.

Nur sechs Jahre später, im Jahr 1678, beschreibt Christiaan Huygens⁴ das Licht als Welle. In seiner *Undulationstheorie* geht er davon aus, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Welle, der so genannten Elementarwelle, betrachtet werden kann. Die neue Lage der Wellenfront ergibt sich durch Überlagerung (Superposition) sämtlicher Elementarwellen. Die sich weiter ausbreitende Wellenfront ergibt sich als die äußere Einhüllende der Elementarwellen. Mit diesem Ansatz ist es möglich, weitere Phänomene des Lichtes zu deuten, darunter zählen die Beugung und die Interferenz. Diese Theorie wird in den folgenden Jahrzehnten ergänzt und erweitert, insbesondere Thomas Young⁵ erweitert die *Undulationstheorie* erheblich.

Bis Anfang des 19. Jahrhunderts wird Licht als elastische Longitudinalwelle verstanden, das sich in einem das Weltall erfüllenden „Äther“ ausbreitet. Erst Augustin Jean Fresnel⁶ kann nach der Entdeckung der Polarisierbarkeit des Lichtes beweisen, dass es sich bei Licht um eine transversale Welle handelt.

James Clerk Maxwell⁷ erkennt 1865, dass es sich bei Licht um elektromagnetische Transversalwellen handelt. Die nach ihm benannten Maxwell'schen Gleichungen haben elektromagnetische Wellen als Lösungen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ausbreiten. Mit diesen Formulierungen ist es möglich, die Gesetze der Optik aus den Grundgleichungen der Elektrodynamik herzuleiten, so dass die Optik ein Teilgebiet der Elektrodynamik wird.

Zum Übergang in das 20. Jahrhundert wird die bis dahin etablierte Wellentheorie des Lichtes durch verschiedene Experimente als unzureichend erkannt. Vor allem kann die Wellentheorie solche Phänomene nicht erklären, die auftreten, wenn Licht und Materie in Wechselwirkung treten. Dies geschieht beispielsweise bei der Absorption und Emission des Lichtes. Eine Er-

³Englischer Physiker und Mathematiker, 1643-1727.

⁴Niederländischer Mathematiker und Physiker, 1629-1695.

⁵Englischer Augenarzt und Physiker, 1773-1829.

⁶Französischer Physiker und Ingenieur, 1788-1827.

⁷Schottischer Physiker, 1831-1879.

gänzung wird von Albert Einstein⁸ 1905 eingeführt, die Lichtquantenhypothese. Für diese Arbeit, es ist seine Doktorarbeit, erhält er 1921 den Nobelpreis für Physik. Diese These besagt, dass Licht aus Quanten, also Energiepaketen, besteht. Diese Pakete werden später Photonen genannt. Licht kann somit nur gequantelt Energie abgeben. Das Licht wird also als Teilchenstrom oder als elektromagnetische Welle angesehen. Diese Doppeldeutigkeit wird als *Welle-Teilchen-Dualismus* bezeichnet. Erst in der Quantenoptik bzw. Quantenelektrodynamik wird eine theoretische Beschreibung gefunden, die beide Aspekte vereinigt.

1.1.1 Historie der optischen Nachrichtentechnik

In der Moderne ist die Geschichte der optischen Nachrichtentechnik wesentlich kürzer, da entsprechende optische Bauteile, beispielsweise Laser, erst experimentell von Maiman um 1960 entwickelt werden und somit erst ab Mitte des 20. Jahrhunderts zur Verfügung stehen. Auch Glasfasern als Übertragungsmedium sind noch eine relativ neue Entwicklung, erste einsetzbare Typen, unter $20 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$ Dämpfung, werden Anfang der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelt.

Allerdings existiert die Nachrichtenübertragung über optische Hilfsmittel schon wesentlich länger. Schon im antiken Griechenland gibt es erste Systeme zur Übermittlung von Daten, die mithilfe von Leuchtfackeln funktionieren. Ein anderes Beispiel aus früheren Jahrhunderten ist die Übertragung von optischen Signalen per Rauchzeichen, die die Ureinwohner des amerikanischen Kontinents zur Kommunikation verwenden. Ab dem 18. Jahrhundert werden komplexere, optische Signale übertragen, dies geschieht beispielsweise mithilfe des Morsealphabets oder auch in der Schifffahrt. Hier wird ein Code aus verschiedenen Fahnenpositionen verwendet, um Informationen auszutauschen. Zu dieser Zeit kommen auch die ersten optischen Telegraphen zum Einsatz. Die erste Strecke wird in Deutschland 1813 eingerichtet. Es werden Fahnentelegraphen benutzt, dabei handelt es sich um schwenkbare Arme an einer Stange, die auf einem Turm befestigt sind. Das Verfahren wird zuerst in Frankreich während der französischen Revolution eingesetzt und ist von Claude Chappe⁹ entwickelt. Mitte des 19. Jahrhunderts existiert bereits eine optische Kommunikationsstrecke von Berlin über Magdeburg und Köln bis nach Koblenz mit einer Gesamtlänge von 550 km. Erste geführte Lichtsignale werden Ende des 19. Jahrhunderts in einer Patentschrift von W. Wheeler dargestellt.

⁸Deutscher Physiker, 1879-1955.

⁹Französischer Techniker, 1763-1805.

1.2 Anwendungsgebiete der POF

In den letzten Jahren kommt neben der Glasfaser (GOF) als Übertragungsmedium für die optische Nachrichtentechnik die Polymer Optische Faser (POF) zum Einsatz [1, 2]. Erste Veröffentlichungen zum Thema POF in der optischen Nachrichtentechnik liegen eine Dekade zurück. Auch bei der POF vollzieht sich eine ähnliche Entwicklung wie bei der Glasfaser. Um eine optische Datenübertragung zu realisieren, muss die Dämpfung der Faser verringert werden. Allerdings besitzt die POF einen deutlich höheren Dämpfungsverlauf, so dass sie nur sinnvoll zur Kurzstreckenkommunikation eingesetzt werden kann. Doch auch für diesen Einsatzbereich erschließen sich zum Teil neue Anwendungsgebiete.

Exemplarisch wird an dieser Stelle auf zwei typische Anwendungsgebiete der POF näher eingegangen, den Automobilbereich und die Inhaus-Vernetzung. Doch mit der POF können nicht nur Daten zu Kommunikationszwecken übertragen werden, sie kann auch als vielfältiger Sensor oder zur Beleuchtung verwendet werden.



Abbildung 1.1: Einsatz der POF als Übertragungsmedium im Automobil

Im Automobilbau wird die POF in einem seriellen Bussystem in Ringtopologie für Multimediaanwendungen seit 2001 eingesetzt. Dieses System wird MOST-Bus genannt (Media

Oriented Systems Transport). Es gibt davon in der Zwischenzeit mehrere Versionen, die allerdings alle unterschiedliche Übertragungsmedien verwenden. Die MOST25 Spezifikation setzt auf POF und überträgt Daten mit bis zu $25 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$, die MOST50 auf elektrische Leiter ($50 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$) und der zukünftige Standard MOST150 bis zu $150 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ ¹⁰. Typische Längen im Auto sind einige Meter bis zu zehn Meter. Es handelt sich also bei dieser Applikation um Kurzstreckenkommunikation, daher kann auch die POF trotz hoher Dämpfung gut als Übertragungsmedium eingesetzt werden. Am MOST Bus können bis zu 64 Endgeräte angeschlossen werden, die schematische Darstellung eines typischen Szenarios ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Das erste Auto, welches den MOST25 Standard nutzt, ist die 7er Reihe von BMW aus 2001. In der Zwischenzeit wird dieses Bussystem in über 40 meist europäischen Automodellen (ca. 2,5 Mio. Stück (Stand Ende 2008)) eingesetzt. Dabei handelt es sich nicht nur um hochpreisige Modelle, wie den Mercedes Maybach oder den Porsche Cayenne, sondern auch um Volumenmarktmodelle, wie den 1er von BMW oder den Smart Fourfour.

Der Einsatz der POF als Übertragungsmedium bietet im Automobil einige Vorteile gegenüber der klassischen Verkabelung per Kupferleitung. Die POF bietet ein Höchstmaß an EM-Verträglichkeit. Dies ist insbesondere in PKW wichtig, da es hier viele Störquellen für elektromagnetische Strahlungen gibt, beispielsweise die Zündspule oder die Lichtmaschine. Brummschleifen sind mit der neuen Übertragungstechnik aufgrund der kompletten galvanischen Trennung nicht mehr möglich. Darüber hinaus stellt der Austausch des Kupferkabelbaums durch die POF eine erhebliche Gewichtsersparnis dar. Die genauen Angaben zur Einsparung schwanken dazu, aber eine Reduzierung um 50 % ist realistisch, was einer Gewichtsminderung von bis zu einigen 10 kg entsprechen kann. Der Preis des Kupfers steigt in den letzten Jahren erheblich, im Vergleich dazu bietet die POF eine kostengünstige Alternative. Diese hier genannten Vorteile führen auch zu einem Einsatz der POF in der Avionik.

Ein anderer Bereich, in dem die POF vermehrt verwendet wird, ist die Inhaus-Vernetzung. Dort steht sie in direkter Konkurrenz zur Ethernetanbindung über Cat-Verkabelung (Twisted Pair Kupferkabel), PLC (Power Line Communication) und WLAN (Wireless Local Area Network). Dabei handelt es sich auch um ein typisches Szenario der Kurzstreckenkommunikation, bei dem $100 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ (Fast Ethernet) über eine Strecke von 10 m bis zu 100 m übertragen werden. Diese Anforderungen erfüllt die POF problemlos. Meist werden sogenannte Medienkonverter eingesetzt, um die elektrischen Signale, die über das Kupferkabel versendet werden in optische Signale für die POF umzuwandeln. Solche Produkte sind schon seit einiger Zeit von verschiedenen Anbietern auf dem Markt erhältlich (z.B. Siemens, DieMount, Firecomms). Die POF bietet in diesem Bereich gegenüber jeder anderen einsetzbaren Technik Vorteile. Die Verkabelung per Cat-Kabel ist wesentlich schwieriger, da das Kabel deutlich

¹⁰<http://www.mostnet.de>.

dicker (RG 58: 5 mm Außendurchmesser) und steifer ist. Daher kann die POF mit geringem Platzbedarf verlegt werden. Sie kann sogar ohne äußeren mechanischen Schutzmantel verlegt werden, so dass selbst eine direkte Aufbringung auf Tapete kaum sichtbar ist. Auch die Konfektionierung der POF ist gegenüber dem Cat-Kabel deutlich einfacher. Darüber hinaus besteht auch in diesem Anwendungsgebiet keine Störanfälligkeit der POF gegenüber elektromagnetischer Strahlung. Das Problem des Übersprechens wird auf ein Minimum reduziert. Dieses Phänomen tritt nicht nur bei Cat-Kabeln auf, sondern vor allem bei der PLC. Dort teilt sich die Technik das Übertragungsmedium mit der Stromversorgung. Dies führt zu erheblichen Störungen, sowohl bei der Datenübertragung als auch bei der Stromanbindung von Endgeräten. Gegenüber WLAN ist vor allem die Abhörsicherheit und die zugesicherte Bandbreite der Datenübertragung insbesondere für IPTV-Streaming via POF zu nennen.

1.3 WDM über POF

Die zwei im vorherigen Kapitel dargestellten Anwendungsgebiete: Inhaus- und Incarkommunikation werden in Zukunft mehr Bandbreite erfordern. Stand der Technik auf dem Gebiet der POF-Übertragung ist die Verwendung eines Kanals, meist im roten Wellenlängenbereich gelegen, da dort günstige Sender und Empfänger zur Verfügung stehen. Allerdings ist die spektrale Dämpfung dort sehr hoch. Bei der Nutzung eines Kanals kann zur Erhöhung der Bandbreite auch nur die Datenrate erhöht werden. Dies führt jedoch zu einer Verschlechterung des Signal-Rausch Verhältnisses. Aus diesem Grund ist dies nur bis zu einer bestimmten Schwelle möglich. Es ist also zwingend erforderlich, alternative Möglichkeiten zur Datenübertragung zu erforschen. Eine weit verbreitete Möglichkeit ist das Multiplexverfahren. Bei dieser Methode zur Signal- und Nachrichtenübertragung werden mehrere Signale zum Ziel der Erhöhung der Datenrate zusammengefasst und simultan über ein Medium übertragen. Es können verschiedene Parameter multiplext werden, beispielsweise die Zeit, die Codierung oder die Frequenz/Wellenlänge. Die Methode des Wellenlängenmultiplex (WDM, Englisch: Wavelength Division Multiplex) ist im Bereich der Glasfaserübertragung etabliert. Es wird daher in dieser Promotion versucht, dieses Verfahren für die POF mit ihren anderen physikalischen Eigenschaften zu adaptieren.

Zur Datenübertragung multiplexer Signale werden zwei zusätzliche Funktionsbauteile benötigt:

- ein Multiplexer, der die verschiedenen Signale zusammenfasst
- ein Demultiplexer, der die Signale nach erfolgter Übertragung wieder aufteilt

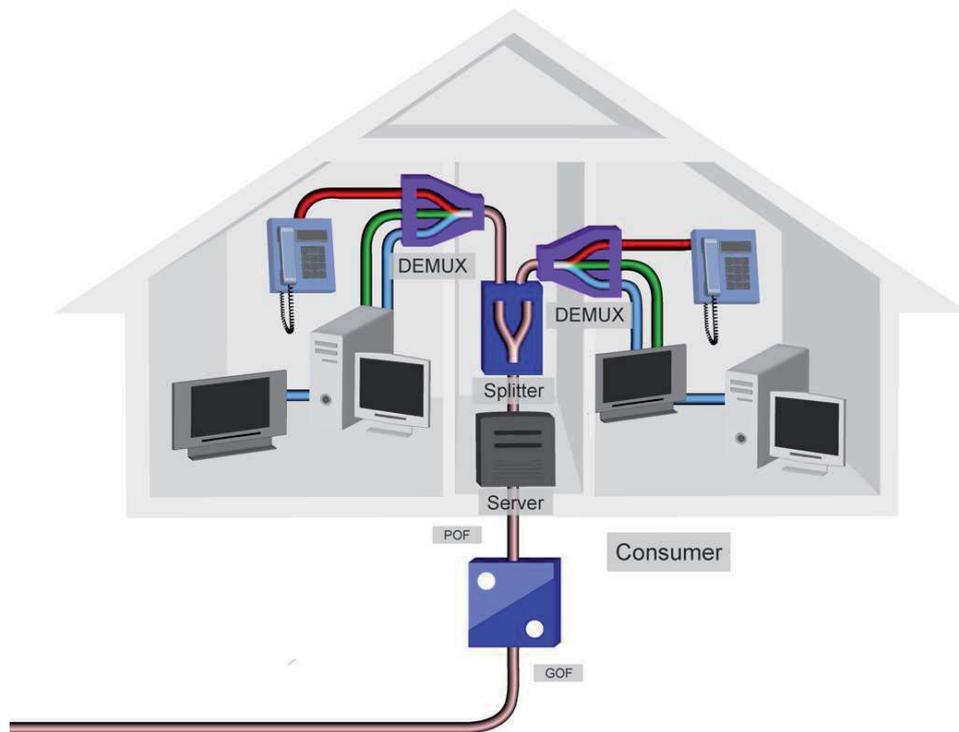


Abbildung 1.2: Einsatz der POF als Übertragungsmedium im Inhausbereich

Diese beiden Bauteile müssen also für WDM über POF komplett neu entwickelt werden, um eine Erhöhung der Datenrate zu erzielen. Es gibt zwar auch von anderen Forschergruppen erste Ansätze zur Realisierung von WDM über POF, doch diese Ansätze sind für die optische Nachrichtentechnik im Massenmarkt, zu denen die oben genannten Beispiele gehören, nur bedingt geeignet. Dies wird in Kapitel zwei ausführlich dargelegt. Allerdings sind für ein optisches Netzwerk mit POF noch weitere Funktionsbauelemente erforderlich, dies ist in Abbildung 1.2 verdeutlicht. Dazu zählt, wie zu erkennen, ein opto-opto Wandler, der die über GOF (Glasfaser) ankommenden Informationen für die intern verwendete POF übersetzt, ein Server, der die externen Informationen für die interne Weiternutzung aufbereitet, ein Splitter, der den Datenstrom aufteilt und der schon erwähnte Demultiplexer, auf dem der Fokus der Arbeit liegt. In diesem Beispiel wird durch das WDM-Verfahren für jede einzelne Übertragung ein Kanal zur Verfügung gestellt und damit die Sicherheit der Datenübertragung erheblich erhöht.