

1. Einleitung

Schneller, Weiter, Mehr Informationen

In der Geschichte waren schon immer diese drei Faktoren die treibende Kraft für die Entwicklung neuer Kommunikationssysteme. [Koi04] Dies trifft im besonderen Maße auch auf die Entwicklung von optischen Polymerfasern (POF) als Kommunikationsstrecke zu. In den frühen 1960er Jahren begann dieser Prozess mit der Firma DuPont, welche die erste POF entwickelte und herstellte. Aufgrund von Verunreinigungen im Material lag die Dämpfung damals bei 1000 dB/km. Erst in den späten 1970er Jahren konnte, durch Erhöhung der Materialreinheit, die Dämpfung annähernd auf das theoretische Minimum von 125 dB/km (bei einer Wellenlänge von 650nm) verringert werden. [ZKZD08]

Trotz der Verbesserungen der Dämpfungswerte für die POFs, lagen Polymer optische Fasern lange im Schatten der Glasfaser. Denn zur gleichen Zeit existierten schon Glasfasern mit Dämpfungswerten unter 1dB/km in großen Massen und zu niedrigen Preisen [ZKZD08]. Diese beherrschten die Langstreckennetzwerke, wohingegen in den Kurzstreckennetzwerken (LAN) vorwiegend Kupferkabel wie UTP (unshielded twisted pair) und Koaxialkabel Anwendung fanden. Der Bereich der Kurzstreckennetzwerke zwischen der letzten Verteilerbox und dem Endkunden, welche auch als "the last mile" bezeichnet wird, macht ca. 95% aller Kommunikationsnetzwerke aus [Koi04]. Für die damaligen 10 Mbit/s Verbindungen reichten die UTP-Netzwerke vollkommen aus. Aber aufgrund der begrenzten Bandbreite und Reichweite von maximal 100 m sind diese kupferbasierten Verbindungen den steigenden Datenraten nicht gewachsen. Es entstand der Bedarf nach einer kostengünstigen Lösung. Da Glasfaserkabel zwar hohe Bandbreiten lieferten, aber durch den schmalen Kerndurchmesser (z.B. $10\mu m$ Single Mode Fasern) hohe Kosten bei der Installation verursachten, wurde die Entwicklung von POF in den 1990er Jahren wiederbelebt.

Grund dafür ist, dass POFs einen großen Kerndurchmesser von ca. 1 mm aufweisen und damit einfache Justage, Installation und Handhabung erlauben. Wie alle optischen Lichtleiter sind POF unempfindlich gegenüber elektro-magnetischen Störungen aufgrund der speziellen Eigenschaften von Photonen. Diese bewegen sich mit maximaler Geschwindigkeit, lassen sich praktisch nicht von Störfeldern beeinflussen und treten untereinander auch nicht in Wechselwirkung [BL00]. Weitere Vorteile der POF liegen in ihrem geringeren Gewicht, den engen Biegeradien und der hohen mechanischen Belastbarkeit. Sie bieten Langzeitzuverlässigkeit und sind preiswert in der Herstellung. Die POF zeigen mehrere Dämpfungsminima im sichtbaren Bereich des Spektrums, was zu einer erhöhten Augensicherheit beiträgt. Aber leider sind die Dämpfungswerte

2 1. Einleitung

in diesem Bereich weit höher als bei Glasfasern, was die maximale Reichweite begrenzt. [FHJ11] [Koi91] [KK11] [LL09] [Pol06]

Diese Eigenschaften der POF machen sie zum idealen Medium für die Kurzstreckenübertragung. POF finden in vielen Bereichen wie Industrieautomation, Automotiv, Sensoren, Beleuchtung und Heimnetzwerken Anwendung. Prinzipiell unterscheiden sich die Anwendungen für POF in Datenkommunikation und Nicht-Daten-Anwendungen. Heutzutage wird der größte Teil der POF-Produktion für die Datenkommunikation verwendet. [Pol06]

Eine der Schlüsselanwendungen, welche einen neuen Aufschwung der Polymerfasern verursachte, ist die Datenkommunikation im Automobilbereich. Im Jahr 1998 erkannte Daimler-Benz, dass der steigende Bedarf an digitalen Geräten im Automobil dazu führt, dass sich das Gewicht erhöht, die Anfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern steigt und die kupferbasierten Kabelbäume immer komplexer werden. POF-Ringnetzwerke erwiesen sich nach der Analyse von Daimler-Benz als zukunftssichere Alternative, welche den Anforderungen an die zukünftigen Bedürfnisse im Auto gerecht werden. Zusammen mit sechs anderen Automobilunternehmen entstand der sogenannte MOST-Bus (Media Oriented Systems Transport) Standard. Der Most-Bus verbindet verschiedene Multimedia-Geräte in einer Ringtopologie. Mit der Einführung des MOST-Busses in die 7er BMW-Reihe startete die Erfolgsstory und heutzutage sind mehr als 180 Automodelle von 16 Autoherstellern mit MOST ausgerüstet [MOS15]. Ursprünglich wurde der erste MOST-Bus für 25 Mbit/s designt, welcher zu der heutigen 3. Generation mit 150 Mbit/s weiterentwickelt wurde. [Pol06] [Grz11]

Die zweite Hauptanwendung ist die Industrieautomation. Bis 2012 bildete die Industrieautomation den größten und auch stabilsten Markt für die POF-Industrie. Der Hauptgrund für POF in der Industrieautomation ist der Bedarf an EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) resistenten Datenverbindungen. Die Verkaufszahlen von POF im Automotive-Markt stiegen zur größten Einnahmequelle für den POF Markt auf und bilden heute den größten Markt für POF-Netze. [Ate13] Bekannteste Standards in denen POF eingesetzt wird sind SERCOS (SErial Realtime COmmunication System), Profibus, Interbus und industrielle Ethernet-Netzwerke.

Eine weitere Anwendung finden POF-Netze in der Inhouse-Vernetzung. Immer mehr Heim-Netzwerke werden mit POF ausgerüstet, da die etablierten Technologien wie UTP und WLAN an ihre Grenzen stoßen bzw. mehr Nachteile aufweisen. Mit der Bereitstellung von Datendiensten wie VolP, IPTV und VDSL (sog. "Triple Play") werden höhere Datenraten benötigt. Kupfer-basierte Lösungen werden zum Flaschenhals, weil diese bei steigenden Datenraten mit Problemen wie Anfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen, hohe Signalreflexion, hohen Energieverbrauch und hoher Hitzeentwicklung zu kämpfen haben [KK11]. Außerdem sind POF-Kabel dünner, lassen sich leichter verlegen und um enge Kanten biegen. Gegenüber WLAN bieten POF-Netze vor allem die Sicherheit vor fremden Zugriff von außen und eine zugesicherte Datenrate unabhängig von Signalstärken. Mit diesen Vorteilen gegenüber seinen Kon-

2

kurrenten kann mit einem starken Wachstum von POF-Netzwerken in diesem Sektor gerechnet werden. [aKPJ+09]

1.1. Problemstellung

Licht transportiert schon heute mehr als 90% der Datenmengen über das Glasfasernetz in Deutschland. Diese Datenmenge wird in den nächsten Jahren allein durch den Internetdatenverkehr exponentiell ansteigen [BL00]. Dieser Trend spiegelt sich auch in der Übersicht der Bundesnetzagentur über das Datenvolumen der letzten Jahre wieder, welche in Abbildung 1.1 zu sehen ist.

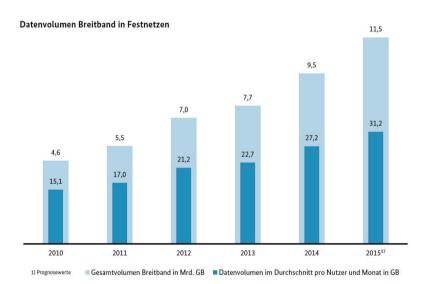


Abb. 1.1.: Entwicklung des Datenvolumen in Deutschland [Bun16]

Vor allem in der Inhouse-Kommunikation steigen die Datenraten rapide an. Aufgrund hoher Modendispersion durch den großen Kerndurchmesser der POF ist die Bandbreite in POF-Netzen begrenzt. Um trotzdem die erforderlichen Datenraten zu übertragen, wurden verschiedene Anstrengungen unternommen. Einerseits wurden verschiedenen POF-Typen entwickelt, welche höhere Bandbreiten erlauben. Darunter die sog. Gl-POF (graded-index), welche im Vergleich zu Standard SI-POF (Step-index) einen annähernd parabolischen Verlauf des Brechungsindex aufweist [KK11]. Eine genaue

4 1. Einleitung

Übersicht über die verschiedenen Typen kann in [ZKZD08] gefunden werden. Andererseits wird durch die Verwendung mehrerer Kanäle versucht, die Bandbreite zu erhöhen. Aktuell wird nur ein Kanal benutzt, meist im roten sichtbaren Wellenlängenbereich von 650 nm. Durch die Anwendung von Wellenlängen-Multiplexverfahren (WDM - Wavelength Division Multiplexing), welche für Glasfasersysteme schon zum Standard gehörten [Hul96], eröffnet sich die Möglichkeit, mehrere Wellenlängen für die Datenübertragung zu nutzen. Auf diese Weise multipliziert sich die Datenrate um die Anzahl der genutzten Wellenlängen und ermöglicht die Nutzung der günstigeren Standard SI-POF für Anwendungen mit höheren Datenraten. Nichtsdestotrotz müssen einige Hürden genommen werden, um WDM über POF zu realisieren und zu etablieren.

Für ein WDM-System (siehe Abb. 2.4 in Kapitel 2) sind dabei zwei entscheidende Schlüsselelemente notwendig, ein Multiplexer (MUX) und ein Demultiplexer (DEMUX). Der Multiplexer fügt die Signale der verschiedenen Wellenlängen zusammen in eine Faser. Am Ende der Kommunikationsstrecke wird der Demultiplexer benötigt, um die Wellenlängen wieder voneinander zu trennen. Leider können die schon vorhandenen MUX- und DEMUX- Lösungen für Glasfaser nicht für die POF genutzt werden und müssen neu entwickelt werden [ZKZD08]. Ein Grund dafür sind die großen Dimensionen der POF, welche große divergente Strahlen zur Folge haben und damit die Strahlführung erschweren.

Verschiedene Lösungsansätze für WDM Systeme über POF wurden entwickelt. Diese basieren auf Interferenzfilter [BLK00] [AVZ02], Prismen [LHF05], Strahlteilerwürfel [BPZ03] und Optiken mit planarem Beugungsgittern [ABZ96] [JTW02]. Alle Lösungen haben den gemeinsamen Nachteil, dass sie zu teuer sind und/oder einen hohen Justageaufwand verursachen. Dies macht es, mit dem aktuellen Stand der Technik, unmöglich, sich in dem preissensitiven Markt zu etablieren.

1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Demultiplexers für POF WDM-Systeme, welcher für den Massenmarkt tauglich ist. Da es sich um polymere Fasern handelt, liegt es nahe den DEMUX auch in Kunststoff zu fertigen und dabei auf die Herstellung im Kunststoffspritzguss zurückzugreifen. Dies ermöglicht es, hohe Stückzahlen zu geringen Preisen zu produzieren. Die Entwicklung basiert auf den Konzepten und Simulationen aus den Arbeiten von Haupt und Fischer [HFK07] [Hau10], welche in Abbildung 1.2 dargestellt sind. In dem Konzept wird ein konkaves Beugungsgitter verwendet. Dieses trennt das ankommende Signal in die einzelnen Wellenlängen auf und fokussiert durch die konkave Krümmung die gebeugten Strahlen auf die Ausgangsfasern.

Aufgrund der schon erwähnten divergenten Ausgangsstrahlen, welche durch den großen Öffnungswinkel der POF von 30° entstehen, muss die konkave Gitteranordnung 3-Dimensional gestaltet werden. Damit sind präzise planare Herstellungsmethoden wie



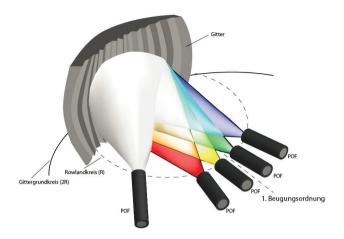


Abb. 1.2.: Konzept des DEMUX in Rowlandkreisanordnung

die Lithographie ungeeignet für die Erstellung der Spritzgussform (bzw. den Formeinsatz für das Werkzeug). Damit liegt ein Fokus der Arbeit auf der Analyse geeigneter Herstellungsmethoden für das Gitter. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Auswahl des geeigneten Materials, aus dem der DEMUX gefertigt werden kann. Zudem wurde ein Design erstellt, welches für eine Anwendung im Spritzguss geeignet ist. In der vorliegenden Arbeit wurde ganz bewusst nur die Komponente des Demultiplexers betrachtet, da der Multiplexer relativ einfach mit z.B. Kaskaden von Kopplern realisiert werden kann

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Das erste Kapitel führt in das Thema der Arbeit ein und zeigt die Zielsetzung auf. Im zweiten Kapitel wird auf die erforderlichen Grundlagen eingegangen, welche im weiteren Verlauf der Arbeit benötigt werden. Des Weiteren werden verschiedene Herstellungsmethoden dargestellt, welche für die Fertigung des Gitters in Frage kommen. Es wird im Besonderen auf die Funktionsweise des Demultiplexers und auf das verwendete Gitter eingegangen. Im dritten Kapitel werden anhand eines Entwicklungsprozesses die Anforderungen an den Demultiplexer definiert. Es wird auf die verschieden Anforderungen eingegangen und in ein erstes Design für den DEMUX überführt. Weiterhin werden verschiedene Vorbetrachtungen und -versuche beschrieben, um die Materialauswahl zu definieren und deren Eignung für den Spritzguss des DEMUX zu untersuchen. Das vierte Kapitel beschäftigt sich

6 1. Einleitung

mit der gesamten Thematik der Herstellung der ersten Prototypen und der Analysemethoden zur Überprüfung der Mikrostrukturen in Hinblick auf die Genauigkeit und Beschaffenheit. Abschließend werden Designverbesserungen beschrieben, welche iterativ in die verschiedenen Prototypengenerationen implementiert wurden, um die Funktionalität zu erhöhen. Das folgende fünfte Kapitel enthält die Analyseergebnisse für alle DEMUX Prototypen. Dazu zählen nicht nur die mechanischen Parameter sowie die Gitterparameter, sondern auch eine Prüfung der Funktionalität. Dafür wurde eine eigene Teststation aufgebaut und im Kapitel genau beschrieben. Das abschließende Kapitel gibt eine Zusammenfassung der erreichten Ziele der Arbeit und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungschwerpunkte bzw. Maßnahmen, welche für die erfolgreiche Einführung eines Demultiplexers für WDM über optische Polymerfasern nötig sind.



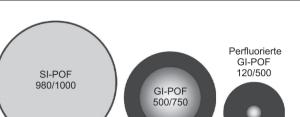
2. Grundlagen

Im folgenden Grundlagenkapitel wird auf die wichtigsten Komponenten und Technologien eingegangen, welche für die Herstellung eines DEMUX erforderlich sind. Als Erstes ist dabei die Polymerfaser als zugrundeliegendes Übertragungsmedium zu betrachten. Im Anschluss wird die Funktionsweise des Wavelength Devision Multiplex (WDM) Verfahrens erläutert. Um das Licht in die einzelnen Wellenlängen aufzuteilen, wird ein abbildendes Gitter verwendet. Dabei wird auf den Aufbau und die Funktionsweise des Gitters eingegangen. Zum Abschluss des Kapitels werden verschiedene Herstellungsmethoden für Mikrostrukturen, welche für das Gitter unabdingbar sind, erläutert

2.1. Optische Polymerfasern (POF)

Optische Polymerfasern (POF) sind hoch flexible Lichtwellenleiter aus transparenten dielektrischen Materialien. [ZA01] Das Prinzip der Wellenleitung in POF basiert, wie bei allen optischen Wellenleitern, auf der Totalreflexion an optischen Grenzflächen. Sie bestehen aus zwei koaxialen zylindrischen Schichten, dem Kern der Faser in dem das Licht geführt wird und eine Mantelschicht, welche den Kern umhüllt. Der Mantel besteht aus einem Material mit geringfügig kleinerem Brechungsindex. [GT98] Der bei weitem meist verbreitetste POF-Typ ist die Stufenindexfaser, welche in dieser Arbeit verwendet wird. Diese hat einen Kerndurchmesser von 980um und eine Mantelschicht von $10\mu m$ Dicke. Der Kern besteht aus Polymethylmethacrylat (PMMA) und besitzt einen homogenen Brechungsindex von $n_{Kern} = 1.492$. Dahingegen besteht der Mantel aus fluorierten PMMA, um den Brechungsindex zu mindern, was zu einem Index von $n_{Montel} = 1.412$ führt. Der Brechungsindex wechselt dabei stufenartig an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel. Ganz anders verhält es sich mit einem weiteren POF-Typ, der sogenannten Gradientenindexfaser. Der Kern dieser Faser besitzt einen annähernd parabolischen Verlauf des Brechungsindexes, der zum Mantel hin abnimmt. An dieser Stelle wird auf [ZKZD08] verwiesen, in dem die verschiedenen Typen und deren Eigenschaften genau erläutert werden. Ein Vergleich der Größenverhältnisse verschiedener Fasertypen ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

Weiterhin können Lichtwellenleiter in zwei Klassen unterschieden werden, Monomodefasern (Single-mode-fiber - SMF) und Multimodefaser (MMF). Wie die Namen schon sagen, unterscheiden sich die beiden Typen in der Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden innerhalb der Faser. Die Grenze zwischen diesen beiden Klassen wird über die sogenannte normierte Frequenz oder V-Parameter wie folgt definiert [Pet11]:



MM Glasfaser SM Glasfaser 50/125 9/125

Abb. 2.1.: Größenvergleich verschiedener Fasertypen (adaptiert von [Koi04])

$$V = 2\pi \frac{r_{Kern}}{\lambda} \sqrt{n_{Kern}^2 - n_{Mantel}^2}$$
 (2.1)

mit r_{Kern} dem Radius des Wellenleiterkerns. Wenn der Wert des V-Parameters kleiner als 2,405 ist, kann sich nur eine Mode ausbilden. Durch den großen Kerndurchmesser von $980\mu m$ für Standard SI-POFs ergibt sich bei einer Wellenlänge von 550nm ein V-Parameter von 2698. Daraus kann annähernd die Anzahl der Moden in einer Stufenindexfaser bestimmt werden [ZA01]:

$$N_{Moden} \approx V^2/2 \tag{2.2}$$

Die Anzahl der Moden in SI-POF liegt je nach Wellenlänge im Bereich von 10^6-10^7 . Die hohe Anzahl von Moden reduziert durch Modendispersion erheblich die Bandbreite. Modendispersion wird durch unterschiedlich lange Wegstrecken der Moden innerhalb des Wellenleiters erzeugt. Daher kommt es zu unterschiedlichen Übertragungszeiten der Moden, wodurch ein Eingangsimpuls am Ende der Faser verbreitert wird. In Abbildung 2.2 ist dieser Vorgang im Vergleich zu Monomodefasern dargestellt.

Ein weiterer wichtiger Parameter bildet die Numerische Apertur (NA) einer Faser, welche einerseits die Effektivität der Kopplung zwischen optischer Quelle und Faser definiert und andererseits die Höhe des Koppelverlustes bei Justagefehlern in Spleißverbindungen bestimmt. [GT98] Die NA wird direkt aus den Brechungsindices des Kerns und des Mantels ermittelt [FHJ11]:

$$NA = \sqrt{n_{Kern}^2 - n_{Mantel}^2}\Theta = arcsin(NA)$$
 (2.3)

Bildet man den Arcussinus der NA, erhält man den Akzeptanzwinkel Θ , welcher den größtmöglichen Einkopplungswinkel darstellt, mit dem Lichtstrahlen in der Faser mit-



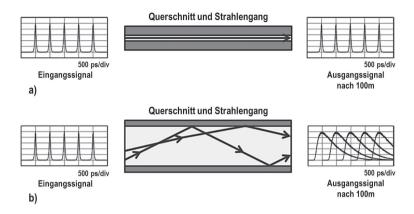


Abb. 2.2.: Übertragungsverhalten und Modenausbreitung von a) SI-SMF b) SI-POF (adaptiert von [Koi04])

tels Totalreflexion übertragen werden können. Für SI-POF ergibt sich eine NA von 0,5, woraus ein Akzeptanzwinkel zur optischen Achse der Faser von 30° folgt. Der Öffnungswinkel entspricht dem doppelten Akzeptanzwinkel, im Falle der Standard POF beträgt dieser 60°. Dieser große Öffnungswinkel führt zu einem hoch divergenten Ausgangsstrahlengang. Der große Öffnungswinkel wirkt sich positiv auf die Koppelverluste in Spleißverbindungen aus, bedingt aber auch eine kompliziertere Führung des Strahlengangs. Für die Entwicklung eines konkaven Gitter-DEMUX bedeutet das, dass der Lichtkegel aus der Faser auf ein großflächiges Gitter gelenkt werden muss. Das muss im Design und der Herstellung berücksichtigt werden.

2.1.1. Dämpfungseigenschaften von POF

Die Dämpfung begrenzt die Reichweite eines Signals bis zu dem Punkt, an dem die Signalstärke zu schwach wird, um noch detektiert werden zu können. Die Dämpfung wird dabei in Dezibel pro Kilometer angegeben und folgendermaßen definiert [GT98]:

$$\alpha = -10log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) * \frac{1}{L}$$
 (2.4)

mit P_{in} der eingekoppelten Lichtleistung, P_{out} der Ausgangsleistung und L der Länge der Übertragungsstrecken. Die Dämpfungswerte der POF liegen bei minimal 80 dB/km ($\lambda=570nm$). Dieses Minima liegt im sichtbaren Wellenlängenbereich, wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist. [Fis02] Das bedeutet, dass nur Wellenlängen im Bereich von 400nm bis 700nm als Übertragungsfenster verwendet werden können. Die

10 2. Grundlagen

verschiedenen Mechanismen, welche zur Dämpfung in POF führen, sind vergleichbar mit denen für Glasfasern, wenn auch die Größenverteilungen unterschiedlich sind. Die Ursprünge der Verlustmechanismen können in zwei Kategorien unterteilt werden, intrinsische und extrinsische. Intrinsische Leitungsverluste sind materialspezifisch und werden durch Absorption und Streuung (Rayleigh-Streuung) erzeugt. Dahingegen verursachen Kontaminationen und Fehlstellen im Wellenleiter Verluste, welche auf die Herstellung der Faser zurückzuführen sind und von extrinsischer Natur sind [Pet11] [ZA01]. An dieser Stelle wird auf [Koi04] verwiesen, in dem die Verlustmechanismen genauestens dargelegt werden.

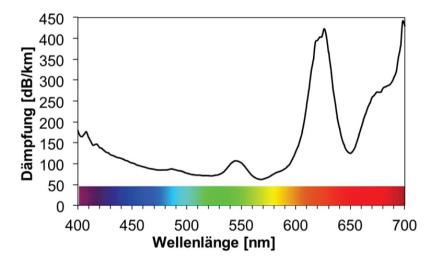


Abb. 2.3.: Dämpfungsverlauf im sichtbaren Bereich des Spektrums (VIS) [Jon16]

2.1.2. Koppeleffektivität beim Ein- und Auskoppeln

Bei der Kopplung von POF kommt es zu unterschiedlichen Verlustmechanismen, welche die sogenannte Koppeleffektivität verringern. Dies gilt sowohl für die Kopplung zweier Fasern, als auch für die Einkopplung und Auskopplung zum Demultiplexer. Da es sich um die gleichen Fasertypen und Größen bei der Ein- und Auskopplung handelt, wird im Folgenden auf die dominierenden Verluste aus der Fehljustage zwischen zwei