

Kapitel 1

Einleitung

Im Automobil werden immer mehr Elektroniksysteme zur Verbesserung von Komfort, Sicherheit und Antriebssteuerung eingesetzt. Während der vergangenen 30 Jahre ist ihr Wertschöpfungsanteil am Kraftfahrzeug auf 20 % bis 40 % angestiegen [1], [2]. Über 50 mit Mikrocontrollern ausgestattete Steuergeräte werden gegenwärtig in Oberklassefahrzeugen verbaut [3] und sind mit bis zu sieben unterschiedlichen Netzwerken untereinander verbunden [4]. Anfang der 80er Jahre wurde der erste elektrische Datenbus CAN (Controller Area Network) [5], [6] entwickelt und erstmals 1992 serienmäßig für das Motormanagement zur Emissionsreduzierung in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Das CAN-Netzwerk hat sich mittlerweile weltweit als Standard-Netzwerk für die gesamte Automobilindustrie etabliert. Momentan werden jährlich über 150 Millionen CAN Schnittstellen in Kraftfahrzeugen verbaut [7]. Heute vernetzen bis zu drei CAN-Netzwerke mit unterschiedlichen Datenraten von 125 kBps bis zu 500 kBps sowohl Funktionen wie Sitzsteuergeräte und Fensterheber als auch zeitkritische Anwendungen wie das Anti-Blockier-System (ABS) oder die Traktionshilfe Electronic-Stability-Program (ESP). Viele Komfortfunktionen wie das automatische Einschalten des Scheinwerferlichts bei Dunkelheit oder des Scheibenwischers bei Regen entlasten den Fahrer. Zur Verbesserung der Sicherheit im Straßenverkehr werden im Kraftfahrzeug zunehmend intelligente Assistenzsysteme wie Automatische Abstandsregelung (Active Cruise Control) und Unfallverhinderungssysteme eingesetzt. Mit steigender Anzahl an vernetzten Komponenten steigt gleichzeitig die erforderliche Bandbreite der Netzwerke. Vor allem komplexe Sensornetzwerke für Sicherheitsfunktionen sowie Infotainment¹ und Telematiksysteme² beanspruchen schnelle und hochbitratige Datenbusse.

Aufgrund der erhöhten elektromagnetischen Störempfindlichkeit bei Datenraten über 1 MBps müssen elektrische Datenleitungen aufwändig geschirmt werden oder es werden komplexe Treiberschaltungen benötigt, was sich in Automobilanwendungen oft als zu teuer und unpraktikabel erweist. Dagegen sind optische Datenleitungen gegen elektromagnetische Störeinstrahlung (electromagnetic interference, EMI) unempfindlich und einfacher in Kraftfahrzeugen zu verbauen. Aus diesem Grund werden optische Datenbusse in Kraftfahrzeugen immer häufiger eingesetzt. Nachdem im Jahr 1998 der D²B (Domestic Digital Bus) [8] als erster optischer

¹Information und Entertainment

²Telekommunikation und Informatik

Datenbus in Mercedes-Benz Fahrzeugen eingeführt wurde, wird mittlerweile von mehreren Automobilherstellern das Nachfolgesystem MOST (Media Oriented System Transport) [9], [10] für Telematik- und Infotainment-Anwendungen eingesetzt. Das MOST Netzwerk basiert auf einer Ringbus-Architektur mit 1 mm Polymerfasern (polymer optical fiber, POF) und rot emittierenden Leuchtdioden (light emitting diodes, LED). Die Datenrate des Systems liegt bei 22.5 MBps und erlaubt die Übertragung von Sprache, Audio, Video und Kontrolldaten. Aktuell werden mehr als 30 Baureihen unterschiedlicher Fahrzeughersteller mit dem MOST Datenbus ausgestattet. Darüberhinaus wurde im Jahr 2001 der ByteFlight Bus [11] für die Airbag-Ansteuerung in BMW Fahrzeugen eingeführt. Für dieses Netzwerk werden ebenso rote LEDs und 1 mm Polymerfasern verwendet, die Steuergeräte sind jedoch nicht im Ring, sondern über eine aktive Stern-Topologie miteinander verbunden [12].

Neben den bereits erwähnten optischen Netzwerken werden in den kommenden Jahren neuartige Datenbusse für Anwendungen, wie z.B. Sensorsysteme für Sicherheitsanwendungen, Motorsteuerung, X-by-Wire Systeme (z.B. Steer-by-Wire oder Brake-by-Wire) und videobasierte Fahrerassistenzsysteme, erwartet [13]. Für derartige Anwendungen eignen sich die momentan eingesetzten Technologien und Systeme nicht, vor allem aufgrund deren begrenzter thermischer Belastbarkeit, der geringen Systemreserve und der maximal erreichbaren Datenraten. Zukünftige Anwendungen erfordern eine temperaturstabile physikalische Busschicht bis zu 125 °C, ausreichende Systemreserven zur Realisierung von passiv gekoppelten Netzwerken und Datenraten größer 100 MBps zur Übertragung von Videodaten in Echtzeit für sicherheitskritische Anwendungen. Darüberhinaus muss die Kompatibilität zu elektrischen Verbindungskonzepten und Fahrzeuginstallationsprozessen, eine einfache Erweiterbarkeit (Plug-and-Play) zur nachträglichen Installation von Komponenten und eine einfache Wartung gewährleistet werden. Die Entwicklung von geeigneten optoelektronischen Modulen und Wellenleiterelementen für den Einsatz in Kraftfahrzeugen ist daher Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Bedingt durch die immer größer werdende Anzahl an Steuergeräten und einem zunehmenden Vernetzungsgrad kann in den letzten Jahren ein sprunghafter Anstieg von Volumen und Gewicht der Verkabelung im Kraftfahrzeug beobachtet werden. In einem Oberklassefahrzeug befinden sich heute über 4 km Gesamtleitungslänge mit ca. 4000 elektrischen Kontakten. Sowohl die Herstellung eines Leitungssatzes bei den Zulieferbetrieben, als auch der Installationsprozess in das Fahrzeug ist bis heute nicht automatisiert und wird noch von Hand durchgeführt. Bei der Vernetzung von Steuergeräten in Kraftfahrzeugen zeichnet sich deshalb ein Trend ab, welcher in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen wird. Der konventionelle Leitungssatz wird durch Flachleiter (flat flexible cable, FFC) und gedruckte Schaltungen (flat printed circuits, FPC) ersetzt, um Gewicht und Bauraum einzusparen [14], [15]. Die Gewichtersparnis beträgt ersten Abschätzungen zufolge über 20 %. Aufgrund der besseren Wärmeabfuhr von Flachleitern wird eine größere Strombelastbarkeit erreicht, womit die Leitungsquerschnitte kleiner gewählt werden können. Durch die definierte Lage der elektrischen Leitungen in einem Flachleiterverbund können Simulationen der elektrischen Eigenschaften des Leitungssatzes vereinfacht und bei der Herstellung Verdrahtungsfehler vermieden werden. Wird ein konventioneller Leitungssatz noch von Hand aufgebaut, lassen sich Leitungssätze

aus Flachleitern automatisiert fertigen.

Ersten Abschätzungen zufolge lassen sich zwei Drittel des konventionellen Leitungssatzes durch Flachleiter ersetzen [15]. Dabei lassen sich Stromversorgungsleitungen und Datenleitungen bis max. 500 kbps relativ einfach in Flachleiter integrieren. Die Einbettung einer Schirmung für hochbitratige Datenleitungen könnte durch das Einbetten spezieller leitfähiger Kunststoffe oder flacher Drahtgeflechte realisiert werden, was jedoch zu Lasten der Biegsamkeit und des Gewichts geht. Optische Leitungen könnten sich aufgrund ihrer Flexibilität und geringen Größe besser für die Integration in Folienleiter eignen. Die Integration von optischen Wellenleitern, Koppellementen oder optoelektronischen Bauelementen in elektrische Folienleitungssätze ist im Hinblick auf eine automatisierte und somit kostengünstige Herstellung von Leitungssätzen im Kraftfahrzeug daher von besonderem Interesse.

In der vorliegenden Arbeit werden Lösungsansätze für neue leistungsfähige optische Netze für den Einsatz im Kraftfahrzeug untersucht. Schwerpunkte der Arbeit sind hierbei neue optische Netze auf Basis von Glasfasern mit optischem Polymermantel (polymer cladded silica, PCS) mit 200 μm Kerndurchmesser und vertikalemittierenden Laserdioden (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL), die Integration von PCS-Fasern und 200 μm Wellenleitern in elektrische Folienleitungssätze und Koppelkonzepte zwischen optoelektronischen Bauelementen und integrierten Wellenleitern. In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Technik optischer Fahrzeugnetze, deren Limitierung und die Anforderungen an neue optische Netze im Kraftfahrzeug beschrieben. Davon ausgehend wird in den folgenden Kapiteln eine neue physikalische Busschicht auf Basis von polymerbeschichteten Glasfasern (polymer cladded silica, PCS) und vertikal-emittierenden Laserdioden (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) vorgestellt. In Kapitel 3 werden grundsätzliche Eigenschaften von VCSEL als Sendeelemente, vor allem deren Temperatur-, Abstrahl- und Modulationsverhalten und in Kapitel 4 optische Empfänger beschrieben. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Charakterisierung von 200 μm PCS-Fasern. Dabei wird besonders die Modenanregung in Kombination mit VCSEL als Sendeelemente behandelt. In Kapitel 6 werden Aspekte zur Integration von VCSEL und PCS basierten Netzwerken in Kraftfahrzeuge aufgezeigt und erste Prototypen von MOST-Komponenten mit integrierten VCSEL-Bauelementen demonstriert. Für planare optische Verbindungen werden in Kapitel 7 zunächst Technologien zur Herstellung von 200 μm Wellenleitern vorgestellt und auf die Eigenschaften von direkt geschriebenen planaren Wellenleitern und Wellenleiterstrukturen eingegangen. Ferner werden Möglichkeiten zur Integration von Wellenleitern und optoelektronischen Bauelementen in Folienleitungen beschrieben und Koppelkonzepte für integrierte Wellenleiter vorgestellt. Den Abschluss der Arbeit bildet eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Kapitel 2

Optische Datenbusse im Kraftfahrzeug

2.1 Optische Netzwerke auf Basis von Polymerfasern

Für optische Datenbusse werden im Automobilbereich derzeit polymeroptische Fasern (POF) aus Polymethylmethacrylat (PMMA) mit 1 mm Kerndurchmesser als Übertragungsmedium, lichtemittierende Dioden (LEDs) als kostengünstige Sender und Silizium PIN Photodioden als Empfänger verwendet. Die Betriebswellenlänge liegt bei 650 nm. In den folgenden Abschnitten soll die physikalische Busschicht, basierend auf Polymerlichtwellenleitern, beschrieben und ihre Grenzen für zukünftige Fahrzeuganwendungen gezeigt werden.

2.1.1 Polymerfasern

Seit den späten 60er Jahren sind die Eigenschaften unterschiedlicher Kern- und Mantelmaterialien von Polymerfasern für verschiedenste Anwendungen untersucht worden [16]. Fasern aus einem Polymethylmethacrylat (PMMA) Kern und einem darauf extrudierten fluorierten Acrylat mit geringerer Brechzahl werden sowohl als Lichtleiter zur Beleuchtung [17], als auch für Kurzstreckenübertragungssysteme unter 100 m [18] verwendet. Polymerfasern haben gegenüber Glasfasern Vorteile. Durch die gute Flexibilität des Polymermaterials sind Fasern mit großen Kerndurchmessern von z.B. 1 mm bei gleichzeitig guter Biegebarkeit realisierbar und durch die geeignete Wahl von Kern- und Claddingmaterial kann eine hohe numerische Apertur von z.B. 0.5 erreicht werden. Ein großer Kerndurchmesser und eine hohe numerische Apertur der Faser erhöht die Koppeltoleranz zwischen Fasern, bzw. die Koppeleffizienz zwischen Fasern und Leuchtdioden (light emitting diodes, LEDs). Dadurch können Sende- und Empfangsmodule (Transceiver) und Steckverbinder in Spritzgusstechnik günstig gefertigt werden, was den Einsatz im Automobil attraktiv macht [19], [20]. Vor allem im Kraftfahrzeug zeigen Kurzstreckenverbindungen unter 20 m auf Basis von Polymerfasern ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis, da die Systemkosten im Wesentlichen vom Preis der Steckverbinder und Transceiver aber auch vom Aufwand bei der Installation und Wartung bestimmt werden.

Bild 2.1 vergleicht die spektrale Dämpfung verschiedener Polymerfasern. Das Dämpfungsspektrum der Standard Stufenindex (step-index, SI) PMMA Faser besitzt im sichtbaren Wellenlängenbereich drei Minima bei 520 nm, 570 nm und 650 nm. Für kommerzielle Anwen-

dungen wird vorwiegend das Fenster im roten Wellenlängenbereich genutzt. Dort beträgt das Dämpfungsminimum 0.14 dB/m. Die Absorptionsbanden und die zunehmende Dämpfung im infraroten (IR) Bereich werden durch die Resonanz von CH-Verbindungen verursacht [21]. Bei perfluorierten Gradientenindex Fasern (perfluorinated graded index POF, PFGI-POF) werden diese Absorptionsbanden durch Substitution der Wasserstoffatome durch Fluor in den fernen IR-Wellenlängenbereich verschoben [22]. Bild 2.1 zeigt auch das Dämpfungsspektrum einer PFGI-POF [23]. Diese Fasern wurden in den vergangenen Jahren intensiv erforscht [24], [25], [26] und werden gegenwärtig zum Massenprodukt entwickelt [27]. Der Temperatureinsatzbereich dieser Fasern ist jedoch auf ca. 70 °C beschränkt.

Der Einsatz von Standard PMMA Fasern ist bis zu einer Temperatur von 85 °C zulässig. Der Glasübergang von PMMA ist bei 115 °C [28], jedoch treten bereits ab 85 °C irreversible Veränderungen im Polymermaterial auf. Aus diesem Grund ist für Automobilanwendungen der Einsatz von Standard PMMA Fasern auf den Fahrzeuginnenraum beschränkt und sie können nicht im Bereich des Motors oder des Dachhimmels verwendet werden, wo höhere Temperaturen auftreten. Polycarbonat (PC) Fasern wurden für höhere Temperaturanforderungen entwickelt und können mit bis zu 135 °C belastet werden. Allerdings ist die Dämpfung dieser Fasern höher und beträgt im Minimum bei 780 nm um 0.6 dB/m [16].

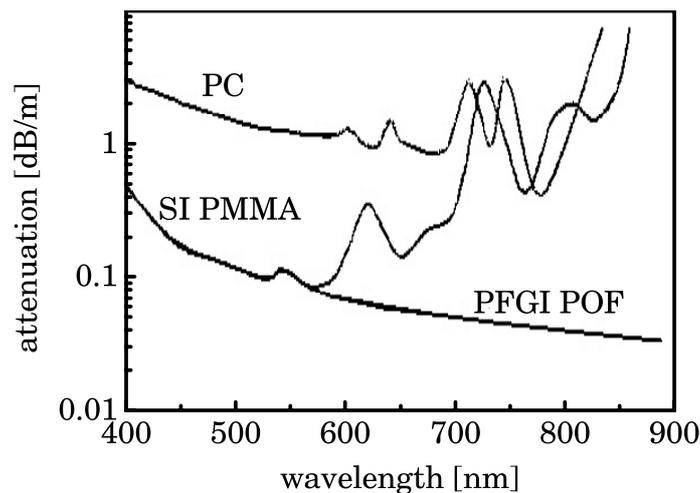


Bild 2.1: Vergleich der spektralen Dämpfung verschiedener Polymerfasern: SI PMMA (Stufenindex Polymethylmethacrylat), PC (Polycarbonat) und PFGI POF (perfluorinated graded index POF).

Die Bandbreite von Stufenindexfasern ist durch die Modendispersion, d.h. durch Pulsverschmierung, die sich aus dem Laufzeitunterschied zwischen den Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Weglängen in der Faser ergibt, beschränkt. Mit Hilfe von speziellen Anregungsbedingungen (Anregung niedriger Moden, Ausnutzung von Modenmischungs- oder Modendämpfungseffekten) können Datenraten bis zu 10 MHz·km übertragen werden [29], [30], [31]. Für Anwendungen im Kraftfahrzeug lassen sich speziell abgestimmte Anregungsbedingungen nur schwer realisieren, womit sich für eine Standard-POF mit einer NA von 0.5 und einer Kernbrechzahl von 1.5 ein maximales Bandbreiten-Längenprodukt von 1.6 MHz·km ergibt. In Abschnitt 5.3 wird noch genauer auf die Berechnung des Bandbreiten-Längenprodukts ein-

gegangen. Für heutige Fahrzeugnetze ist das Bandbreiten-Längenprodukt von 1.6 MHz·km noch ausreichend, da die Leitungslängen 20 m praktisch nicht übersteigen und somit 80 MHz Bandbreite zur Verfügung stehen.

2.1.2 Sender und Empfänger für PMMA Netzwerke

Leuchtdioden (light emitting diodes, LEDs) mit einer Emissionswellenlänge von 520 nm, 570 nm und 650 nm sind für kostengünstige PMMA-Netzwerke mit geringer Datenrate attraktive Sendeelemente. Die Modulationsbandbreite von kommerziell erhältlichen Leuchtdioden beträgt aufgrund des spontanen Rekombinationsprozesses maximal 50 MHz bis 100 MHz und die externe Quanteneffizienz liegt bei 4 %. Die Bandbreite kann durch Erhöhung der Dotierkonzentration in der aktiven Schicht, was eine geringere Ladungsträgerlebensdauer zur Folge hat, erhöht werden [32]. Allerdings wird durch die Störstellen die Effizienz weiter verringert. Eine andere Möglichkeit zur Bandbreitenerhöhung ist das sogenannte Peaking. Dabei wird der Treiberstrom zu Beginn eines Datenpulses überhöht, womit eine hohe Flankensteilheit erreicht wird. Jedoch werden hierfür aufwändige Ansteuerschaltungen benötigt. Offensichtlich lassen sich Bandbreite und Effizienz nicht gleichzeitig optimieren.

In den frühen neunziger Jahren wurden erstmals resonante Leuchtdioden (resonant cavity light emitting diodes, RCLEDs) vorgestellt [33], [34]. In RCLEDs wird die aktive Schicht zwischen einen kurzen Resonator eingebettet, wodurch eine Erhöhung der Effizienz und der Modulationsbandbreite erreicht werden kann. Damit lassen sich Bauelemente mit Bandbreiten von 100-500 MHz [35], [36] und mit Quanteneffizienzen von 5 % [37], [38] bis 10 % [39] realisieren. Gegenüber der Lambert'schen Abstrahlcharakteristik von LEDs lassen sich durch die gerichtete Leistungsemission Koppeleffizienzen zu 1 mm Polymerfasern von bis zu 25 % erreichen [40].

Bild 2.2 stellt die Temperaturabhängigkeit verschiedener Sender, einer rot [41] und einer grün [42] emittierenden LED und verschiedener RCLED Typen, dar. Die Leistungsvariation im Temperaturbereich von -40 °C bis +85 °C beträgt bei der roten LED ca. 2 dB und ca. 1 dB bei der grünen LED. Im Gegensatz zu konventionellen Leuchtdioden wird die Leistungsvariation in RCLEDs nicht nur durch die Verringerung der Quanteneffizienz im Halbleitermaterial, sondern auch durch die relative Lage zwischen dem Emissionsspektrum und der Resonanzwellenlänge beeinflusst. Dadurch können sich hohe Leistungsschwankungen, wie bei der RCLED vom Typ I [43] gemessen, von bis zu 10 dB ergeben. Im Falle einer günstigen Wahl der Emissions- und der Resonatorwellenlänge kann die Variation auf 3 dB verringert werden, wie es bei der RCLED II [44] in Bild 2.2 dargestellt ist.

Aufgrund ihrer hohen Effizienz und der Modulationsbandbreite von weit über 500 MHz würden sich rote Laserdioden sehr gut für PMMA-Netze eignen. Bild 2.3 zeigt auf der linken Seite gemessene Leistungskennlinien eines kommerziell erhältlichen Vertikalemitters (vertical cavity surface emitting diode, VCSEL) bei 670 nm und auf der rechten Seite eines Kantemitters (edge emitting laser, EEL) bei 650 nm in Abhängigkeit vom Laserstrom und der

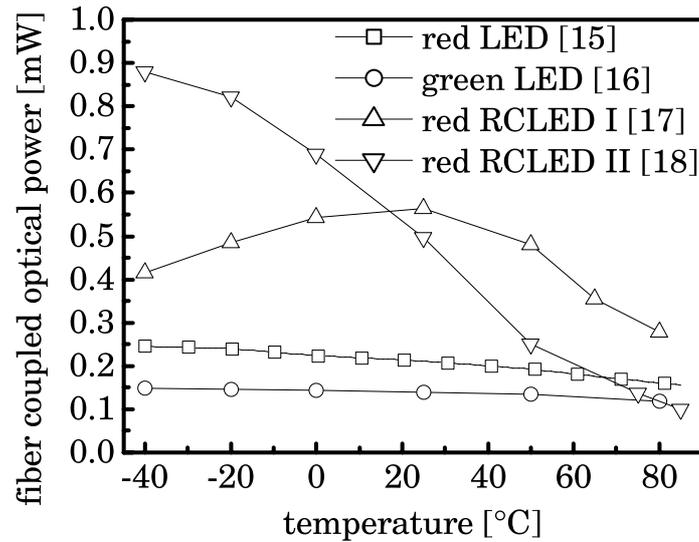


Bild 2.2: Temperaturabhängigkeit verschiedener Sender für POF-Netzwerke. Der Diodenstrom beträgt für alle Bauelemente $I = 30 \text{ mA}$.

Umgebungstemperatur. Die Leistungskennlinien zeigen für beide Bauelemente eine sehr starke Temperaturabhängigkeit des Schwellstroms und der differentiellen Effizienz, was durch eine temperaturgeregelte Laseransteuerung kompensiert werden muss [45]. Außerdem ist zurzeit die zulässige Umgebungstemperatur von verfügbaren Kantenemittern auf 70 °C und von roten Vertikalemittlern auf 50 °C beschränkt [46], [47], so dass deren Verwendung eine aktive Bauelementkühlung notwendig machen würde.

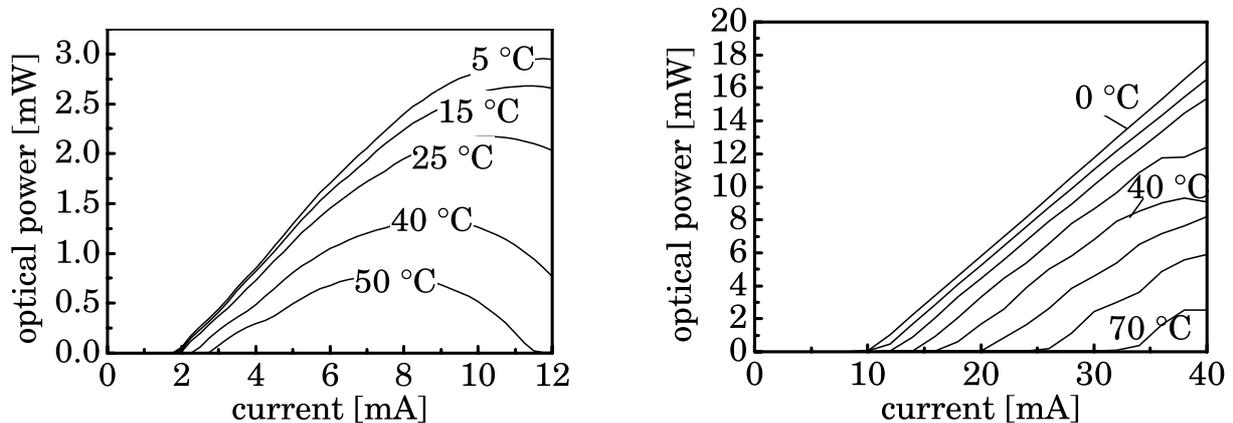


Bild 2.3: Optische Leistung eines 670 nm Vertikalemitters [48] (links) und eines 650 nm Kantenemitters [49].

Zur Wandlung optischer in elektrische Signale werden im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1100 nm Silizium PIN Photodioden als kostengünstige Empfängerbauelemente verwendet. Die Empfindlichkeit steigt nahezu linear von 0.32 A/W bei 500 nm bis 0.7 A/W bei 900 nm an. Bei 650 nm beträgt die Empfindlichkeit ca. 0.47 A/W . Um Licht von PMMA-Fasern mit einem Kerndurchmesser von 1 mm effizient zu wandeln, werden großflächige Photodioden benötigt. Allerdings bedeutet eine große Empfängerfläche gleichzeitig eine hohe Kapazität,