
Diplomarbeit

Herr

Helmuth Walder

**Experimentelle Untersuchung
der optischen Freiraumüber-
tragung (FSO) von Daten mit
ausgewählten Protokollen der
Kommunikationstechnik und
möglicher Anwendungen**

Mittweida, 2017

Diplomarbeit

Experimentelle Untersuchung der optischen Freiraumüber- tragung (FSO) von Daten mit ausgewählten Protokollen der Kommunikationstechnik und möglicher Anwendungen

Autor:
Herr

Walder Helmuth

Studiengang:
Technische Informatik

Seminargruppe:
KT13wIA-F

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Heinz Döring

Zweitprüfer:
Dipl.-Ing. Claus-Stephan Wnuck

Einreichung:
Innsbruck, 21.08.2017

Bibliografische Beschreibung:

Walder, Helmuth:

Experimentelle Untersuchung der optischen Freiraumübertragung (FSO) von Daten mit ausgewählten Protokollen der Kommunikationstechnik und möglicher Anwendungen - 2017. – 7 Seiten Verzeichnisse, 72 Seiten Inhalt, 1 Seite Anlagen.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Angewandte Computer und Biowissenschaften, Diplomarbeit, 2017

Referat:

Ziel dieser Diplomarbeit ist die experimentelle Untersuchung der optischen Freiraumübertragung (FSO) von Daten. Unter Verwendung von Protokollen der Kommunikationstechnik werden IEEE-Standards analysiert und die Anwendbarkeit für FSO überprüft. Ein geeigneter Standard wird dann verwendet, um eine experimentelle Datenübertragung mit Licht über den Freiraum durchzuführen.

Inhalt

Inhalt.....	1
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 <i>Motivation.....</i>	1
1.2 <i>Zielsetzung.....</i>	1
1.3 <i>Kapitelübersicht.....</i>	2
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	4
2.1 <i>Geschichtliche Entwicklung.....</i>	4
2.2 <i>Aktuelle FSO-Systeme</i>	6
2.3 <i>Was ist Free-Space Optics (FSO)?</i>	8
2.4 <i>Ausgewählte Protokolle der Kommunikationstechnik.....</i>	10
2.5 <i>Network-Access-Layer</i>	11
2.6 <i>Internet Layer.....</i>	13
2.7 <i>Transport Layer.....</i>	17
2.8 <i>Übertragungsfenster und Dämpfungsverhalten</i>	23
2.9 <i>Leistungsreserve eines FSO-Systems.....</i>	24
2.10 <i>Reichweitenbetrachtung.....</i>	25
2.11 <i>Optischer Tastkopf</i>	26
2.12 <i>LED versus Laser.....</i>	31
3 Präzisierung der Aufgabenstellung	33
3.1 <i>Geforderte Parameter</i>	33
3.2 <i>Ausgewählte Protokolle.....</i>	33
3.3 <i>Prototypenaufbau.....</i>	34

3.4	<i>Experimentelle Analyse bestehender Systeme</i>	34
3.5	<i>FSO-Anwendungen</i>	34
4	Experimentelle Analysen	35
4.1	<i>IEEE – Standards</i>	35
4.1.1	<i>10Base-T</i>	39
4.1.2	<i>10Base-FL</i>	44
4.1.3	<i>100Base-TX</i>	47
4.1.4	<i>100Base-FX und 100Base-SX</i>	49
5	Systemkonzept	53
5.1	<i>Systemübersicht</i>	53
5.2	<i>Vorverstärker</i>	54
5.3	<i>10Base-FL Transceiver</i>	54
5.4	<i>Lasertreiber</i>	56
5.5	<i>Hilfsmittel zu Strahlformung</i>	56
6	Implementierung für 10Base-FL	58
6.1	<i>Empfangsschaltung</i>	58
6.2	<i>Treiberschaltung für Laserdioden</i>	61
6.3	<i>Komparator</i>	62
6.4	<i>Mediakonverter</i>	64
6.5	<i>Funktionstest</i>	65
7	Mögliche FSO – Anwendungen	66
7.1	<i>Video- und Audio-Streaming mit UDP</i>	67
7.2	<i>Videotelefonie mit Punkt zu Punkt-Verbindung</i>	69
7.3	<i>Videoüberwachung eines Betriebsgeländes</i>	70
7.4	<i>Anwendung in Museen</i>	70
8	Ergebnisse und Ausblick	71
	Literaturverzeichnis	73
	Anlagen	76
	Selbstständigkeitserklärung	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Lichttelefon mit Spiegelmembran.....	4
Abbildung 2-2: Blinkgerät und Lichtsprechgerät 80/80.....	5
Abbildung 2-3: SONAbeam (Fa. Sona).....	6
Abbildung 2-4: FSO der Firma Lightpointe	7
Abbildung 2-5: Überlappende Lichtkegel.....	7
Abbildung 2-6: Grundprinzip FSO.....	8
Abbildung 2-7: Gegenüberstellung OSI- und TCP/IP Modell	10
Abbildung 2-8: Header für Ethernet II	11
Abbildung 2-9: IP-Header IPv4.....	13
Abbildung 2-10: Header des ARP-Protokolls.....	15
Abbildung 2-11: ARP-Request	16
Abbildung 2-12: ARP-Reply.....	16
Abbildung 2-13: Header ICMP-Protokoll.....	17
Abbildung 2-14: TCP-Header	17
Abbildung 2-15: TCP Client-Server Programm	18
Abbildung 2-16: TCP-Verbindungsaufbau (Syn).....	19
Abbildung 2-17: TCP-Verbindungsaufbau (Syn/Ack).....	19
Abbildung 2-18: TCP-Verbindungsaufbau (Ack)	20
Abbildung 2-19: UDP-Header.....	21
Abbildung 2-20: UDP-Datenübertragung.....	22

Abbildung 2-21: Testaufbau für die Reichweitenbetrachtung	25
Abbildung 2-22: Optischer Tastkopf	26
Abbildung 2-23: PIN-Diode mit intrinsischer Schicht	27
Abbildung 2-24: Signal an Fotodiode (1MHz).....	28
Abbildung 2-25: Signal an Fotodiode (12MHz).....	29
Abbildung 2-26: Signal an Fotodiode (20MHz).....	30
Abbildung 2-27: Signal an Fotodiode (80MHz)	31
Abbildung 4-1: Differentieller Leitungstreiber.....	40
Abbildung 4-2: Belegung RJ-45 Stecker	41
Abbildung 4-3: NLP-Impuls (100ns)	42
Abbildung 4-4: Manchestercode 10Base-T	42
Abbildung 4-5: Manchestersignal gemessen an PIN-Diode.....	43
Abbildung 4-6: FSO mit 10Base-T	44
Abbildung 4-7: Mediakonverter 10Base-T to 10Base-FL.....	45
Abbildung 4-8: 10Base-FL (1MHz-Signal und Daten mit Manchestercode).....	46
Abbildung 4-9: MLT-3 Code	47
Abbildung 4-10: Gemessener MLT-3 Code	48
Abbildung 4-11: FSO mit 100Base-TX	49
Abbildung 4-12: Transceiver Modul für 100BaseFX	50
Abbildung 4-13: Messung der Datensignale am Mediakonverter für 100Base-SX.....	50
Abbildung 4-14: 4B/5B-Codierung.....	51
Abbildung 4-15: NRZI-Code für das Symbol „0“	52
Abbildung 4-16: 100Base-FX mit NRZI-Code.....	52

Abbildungsverzeichnis	V
Abbildung 5-1: FSO-Übertragungssystem mit 10Base-FL	54
Abbildung 5-2: 10Base-FL Transceiver	55
Abbildung 5-3: Kollimator zur Strahlformung.....	57
Abbildung 6-1: FSO mit 10Base-FL.....	58
Abbildung 6-2: Kapazität der Fotodiode SFH206 in Abhängigkeit von V_R	59
Abbildung 6-3: FSO-Vorverstärker	60
Abbildung 6-4: Platinenlayout des FSO-Vorverstärkers.....	60
Abbildung 6-5: Blockschaltbild Lasertreiber.....	61
Abbildung 6-6: Lasertreiber	62
Abbildung 6-7: Platinenlayout.....	62
Abbildung 6-8: Vorwiderstand an Fotodiode $R_V = 1k\Omega$ und 180Ω	63
Abbildung 6-9: Zuschaltung eines Komparators (NE592)	63
Abbildung 6-10: Schnittstellen des Mediakonverters zu Vorverstärker und Lasertreiber..	64
Abbildung 6-11: Treiberstruktur des ML4668.....	65
Abbildung 7-1: Senden von UDP-Paketen an mehrere Teilnehmer	67
Abbildung 7-2: Multicasting	68
Abbildung 7-3: VLC-Videostreaming mit MPEG-2	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Dämpfungsparameter	24
Tabelle 2-2: Dämpfung durch Witterungseinflüsse	24
Tabelle 2-3: Laserklassen	31
Tabelle 2-4: Laserklassen nach Gefährlichkeitsgrad	32

Abkürzungsverzeichnis

ARP	<i>Address Resolution Protocol</i>
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ATM	Asynchronous Transfer Mode
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FPGA	Field Programmable Gate Array
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LD	<i>Laserdiode</i>
LED	<i>Leuchtdiode</i>
LWL	<i>Lichtwellenleiter</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
Mbps	<i>Megabits per second</i>
OSI	Open Systems Interconnection
SNMP	Simple Network Management Protocol
TCP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

1 Einleitung

Diese Graduierungsarbeit beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung der optischen Freiraumübertragung (FSO)¹ von Daten mittels Licht, sowie den dafür verwendeten ausgewählten Protokollen der Kommunikationstechnik. Diese faszinierende Technik bietet eine lizenzfreie und kostengünstige Möglichkeit den freien Raum zur Datenübertragung zu nutzen.

1.1 Motivation

Jede Art von Informationsübertragung benötigt ein Übertragungsmedium, welches Daten in der entsprechenden physikalischen Form transportieren kann. Bereits lange vor der Entdeckung der Elektrizität verwendeten Lebewesen physikalische Größen, um Information an andere Artgenossen weiterzugeben. Die Natur entwickelte akustische Sensoren welche Druckunterschiede in Form von Schall erkennen konnten, oder optische Sensoren für jenen Wellenlängenbereich, den wir heute in der Physik sichtbares Licht nennen. Eine optische Freiraumübertragung von Signalen mit einem vereinbarten Code wurde von Menschen bereits schon lange vor der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen praktiziert. Ein frühes Beispiel wäre die optische Kommunikation der Ureinwohner Nordamerikas in Form von, an Rauchzeichen, reflektiertem Sonnenlicht. Die schnelle Übertragung von Daten mittels Licht ist aber erst seit der Erfindung der Laserdiode möglich. Bewegte Elektronen in Leitern, Photonen in Glas oder Kunststoff, oder sonstige elektromagnetische Wellen die sich im freien Raum ausbreiten, alle haben eines gemeinsam, sie benötigen zur Übertragung von Daten über öffentlichen Grund Übertragungsmedien, deren Ressourcen knapp sind. Im Boden vergrabene Kupfer- und LWL-Leitungen sind teuer in der Herstellung und Wartung und die Frequenzen der elektromagnetischen Wellen im Freiraum sind begrenzt und durch internationale Vereinbarungen festgelegt, um gegenseitige Störungen zu vermeiden. Indessen kann die breitbandige Datenkommunikation mittels Licht derzeit noch von jedermann ohne Bezahlung von Lizenzen genutzt werden.

1.2 Zielsetzung

Durch experimentelle Untersuchungen an bereits existierenden Übertragungssystemen soll ergründet werden, ob die dabei verwendeten Standards und Protokolle sich eignen, eine

¹ Unter Free Space Optics versteht man die Übertragung von Information mittels Licht über den freien Raum

optische Datenkommunikation experimentell im Freiraum durchzuführen, eventuell auch unter Anpassung des Leitungscodes und der Modulationsverfahren in der physikalischen Schicht des OSI² Modells. Aus den Analysen soll dann eine Variante gewählt werden, welche sich für FSO am besten einsetzen lässt und mit möglichst geringem technischen Aufwand auch umsetzbar ist. Bei den experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit befindet man sich im Bereich der Hochfrequenz, mit allen damit zusammenhängenden Erschwernissen, wie Eigenschwingverhalten, parasitäre Kapazitäten und HF-Einstreuungen. Die LED einer Infrarot-Fernbedienung wird nur mit Frequenzen im Kiloherzbereich moduliert. Eine technische Realisierung dafür ist relativ einfach. FSO mit Frequenzen größer 1Mhz und den längeren Übertragungsstrecken, sowie den erforderlichen komplexen Protokollen für die Datenübertragung, benötigt schon einen wesentlich höheren Aufwand in der Umsetzung.

Als Lichtquellen kommen Laserdioden zum Einsatz, welche mit hohen Frequenzen moduliert werden. Sie sind für die Datenübertragung aufgrund der hohen Modulationsfrequenzen und des kohärenten Lichtstrahls besonders gut geeignet, für den Massenmarkt aber wegen der Gefahr für die Augen problematisch in der Anwendung. Laserdioden mit Leistungen bis 1mW sind ohne optische Hilfsmittel für die Augen relativ ungefährlich, die geringe Leistung erschwert aber die Datenkommunikation, aufgrund der Dämpfung über längere Strecken.

Ziel ist es, ein FSO-System experimentell zu testen, welches für die breitbandige Datenübertragung eingesetzt werden kann, um eventuell einmal schnell eine Datenverbindung über eine Straße oder ein Gewässer zu realisieren, oder sonstige private Datenkommunikation über den freien Raum zu ermöglichen.

Es soll auch der Einsatz von FSO für mögliche Anwendungen untersucht werden, bei denen eine Freiraumübertragung mittels Licht sinnvoll erscheint und die Hürden aufgezeigt werden, die sich bei der Entwicklung eines derartigen Systems ergeben, zumal sich die Signalströme in den verwendeten Empfangsdioden im μA -Bereich bewegen und sich daher Störungen der Umgebung negativ auf die Qualität der Datenübertragung auswirken können.

1.3 Kapitelübersicht

Nach dem einleitenden ersten Kapitel werden im **Kapitel 2**, nach einem geschichtlichen Überblick, die Grundlagen von FSO erläutert. Es folgt die Betrachtung von Wellenlängen, die sich zur optischen Datenübertragung eignen, die Vor- und Nachteile von LEDs und Laserdioden zur Datenübertragung werden analysiert und das Dämpfungsverhalten im Freiraum untersucht. In der Berechnung der Leistungsreserve wird die am Empfangsort zur Verfügung stehende Leistung ermittelt. Um bereits eine Idee über die erzielbare Reichweite

² Open Systems Interconnection Model ist ein Referenzmodell für Netzwerkprotokolle

von FSO zu vermitteln, werden Rechteckimpulse mit einem Laser gesendet und am Empfangsort Messungen durchgeführt.

In Kapitel 3 erfolgt die Festlegung von Parametern und Randbedingungen, wie erzielbare Reichweite, Übertragungsgeschwindigkeit und verwendete Protokolle. Es werden die erforderlichen Aufgaben erläutert, die notwendig sind, um ein FSO-Übertragungssystem zu verwirklichen und FSO-Anwendungen spezifiziert, die mit dem System möglich sein sollen.

Kapitel 4 führt experimentelle Analysen zu ausgewählten IEEE-Standards durch. Dabei sollen jene Standards experimentell näher untersucht werden, welche als aussichtsreichste Kandidaten zur Realisierung von FSO gelten. Durch Messungen an, in der Praxis eingesetzten, Übertragungssystemen werden die Signale auf der Bitübertragungsschicht untersucht und in einer anschließenden Analyse eventuell notwendige Ergänzungen dargestellt, um ein Kupfer- oder LWL-Übertragungssystem für eine Freiraumübertragung zu adaptieren. Die Motivation zu dieser Vorgangsweise besteht darin, dass von der Industrie bereits fertig entwickelte Chips (FPGAs und ASICs) zur Verfügung stehen und daher keine Neuentwicklung erforderlich ist. Man denke nur an die Menge an Netzwerkkarten in Computern, wo sich auf jeder Karte ein IC zur Kommunikation mit anderen Netzwerkgeräten befindet. Dieses Potential soll genutzt werden. In einer abschließenden Analyse wird dann entschieden, welches Kommunikationsverfahren im Systemkonzept und in der Implementierungsphase für FSO Anwendung findet.

Kapitel 5 stellt das modulare Konzept für ein FSO-System vor, basierend auf jenem System, welches in Kapitel 4 als am geeignetsten für FSO erachtet wurde. Die in ihrer Funktion vorgestellten Module werden in der Implementierungsphase in **Kapitel 6** in konkreten Schaltungen realisiert. Es wird ein Prototyp hardwaremäßig aufgebaut und die FSO-Funktion getestet. Ausgewählte Protokolle der Kommunikationstechnik werden zur Übertragung von Daten eingesetzt. Die mittels FSO gesendeten Datenpakete werden mit einem geeigneten Tool analysiert.

Kapitel 7 stellt mögliche Anwendungen für FSO vor. Schwerpunkt bildet die Übertragung von Video und Audiodaten mit UDP.

Im abschließenden **Kapitel 8** werden die Ergebnisse zusammengefasst, bewertet und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel wird, nach einem kurzen geschichtlichen Überblick und der Vorstellung von aktuellen FSO-Systemen, das Grundprinzip von Free-Space-Optics näher betrachtet und die grundlegende Struktur eines FSO-Systems erklärt. Ausgewählte Protokolle des TCP/IP-Modells werden beschrieben und bilden die Grundlage für die Datenkommunikation mit FSO.

2.1 Geschichtliche Entwicklung

Schon lange vor der Entwicklung des Lasers hatten findige Köpfe auf diesem Planeten Ideen, wie das Licht genutzt werden kann, um Kommunikation zwischen den Menschen zu ermöglichen.

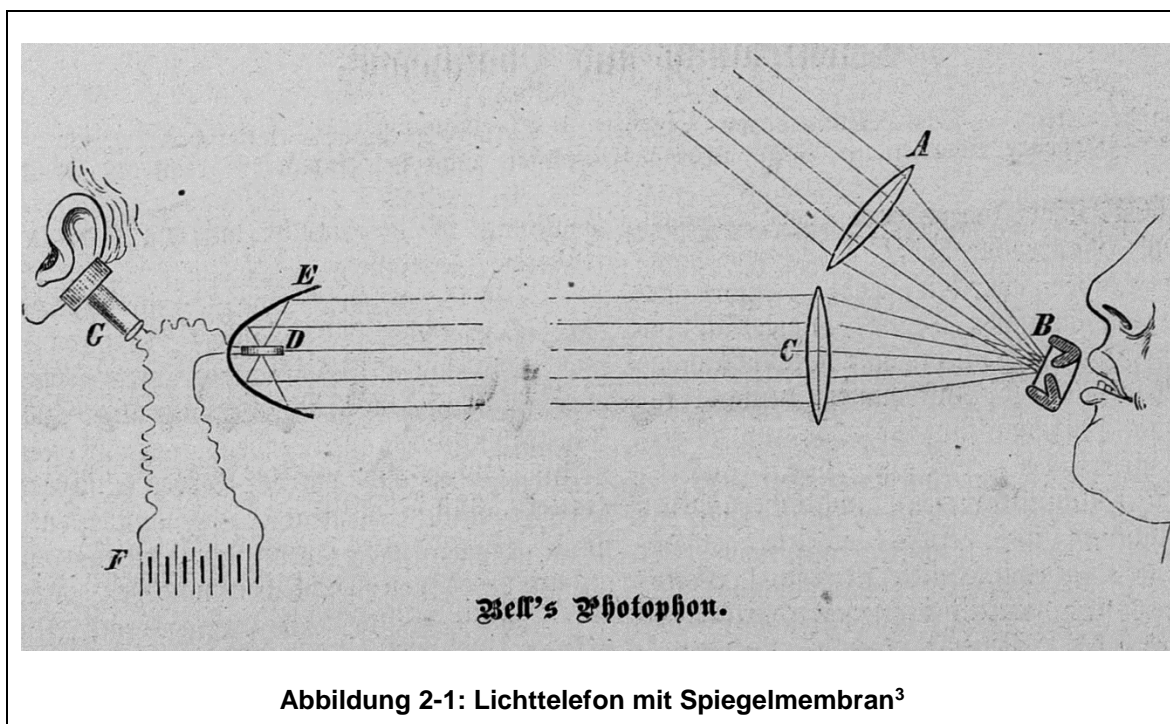


Abbildung 2-1: Lichttelefon mit Spiegelmembran³

Als Vorläufer des optischen Richtfunks gilt das von Alexander Graham Bell und Charles Sumner Tainter im Jahr 1880 erfundene drahtlose Lichttelefon (Abbildung 2-1). Die Modulation erfolgte über einen dünnen Spiegel, welcher durch die Sprache in Schwingung ver-

³ [10]

setzt wurde. Eine Sammellinse fokussierte das Licht auf den Spiegel und nach der Reflektion bündelte eine zweite Linse das Licht in Richtung Empfänger. Auf der Empfangsseite fiel der Lichtstrahl, über einen Parabolspiegel, auf die zur damaligen Zeit bereits erfundene Selenzelle. Durch einen Telefonhörer wurde der modulierte Strom hörbar gemacht. Die Selenzelle war somit das erste Fotoelement zur Nachrichtenübertragung über den Freiraum, noch bevor die erste Funkübertragung stattgefunden hatte. Im ersten Weltkrieg wurde ein Blinkgerät verwendet, da die Leitungen für die Feldtelefone immer wieder vom Gegner gekappt wurden. Als Übertragungscode verwendete man den Morsecode. Damit war bei Tageslicht eine Strecke von 4km und in der Nacht 8km überbrückbar (Abbildung 2-2). Ein Rotfilter verhinderte das Abhören durch den Gegner. Im 2. Weltkrieg kam das Lichtsprechgerät 80/80 an der Front zum Einsatz. Ein bewegliches Prisma wurde über einen Audioverstärker in Schwingungen versetzt. Der Lichtkegel bildete in einem Abstand von 250m einen Lichtfleck von 1,4m. Der Durchmesser der optischen Linse betrug 80mm. Hergestellt wurde das Gerät von Karl Zeiss Jena.



Abbildung 2-2: Blinkgerät⁴ und Lichtsprechgerät 80/80⁵

Der Durchmesser des Lichtdetektors betrug 1mm, daher war eine genaue Ausrichtung des Gerätes erforderlich. Man benötigte auch eine erhebliche Anzahl an Versorgungsspannungen: 2V für den Leuchtfaden zur Ausrichtung, 4,8V für die Lampe, 50V für den Detektor und 60V für die Anodenspannung der Verstärkerröhre.

⁴ [11]

⁵ [12]

2.2 Aktuelle FSO-Systeme



Abbildung 2-3: SONAbeam⁶ (Fa. Sona)

FSO wird kommerziell von Firmen angeboten. Die Firma SONA bietet mit der SONAbeam-Serie Geräte mit Übertragungsraten von 125 Mbps bis 2,5 Gbps an. Verwendet werden ein oder mehrere Laserdioden mit einer Leistung von 160mW. Bei klarer Sicht werden Reichweiten von bis zu 5400m erreicht. Die Dämpfung beträgt 3db/km. Die Laserdiode hat eine Wellenlänge von 1550nm und der Durchmesser der optischen Sammellinse beträgt 20cm. Es wird eine Laserdiode der Klasse 1M verwendet (Abbildung 2-3).

Die Firma Lightpointe (Abbildung 2-4) bietet mit der AireBridge LX modulare Transferraten von 250Mbps bis 1000Mbps. Verwendet werden vier optische Linsen für den überlappenden Empfang der Lichtkegel (Abbildung 2-5) und ebenso viele Sendedioden. Bei einer Dämpfung von 3db/km kann eine Strecke von 2500m überbrückt werden. Das System führt auch eine automatische Anpassung des Übertragungspegels durch und passt sich so an die Übertragungsbedingungen an. Dadurch vermeidet man ein Übersteuern des Empfängers. Die Firma BluTec bietet Gerät mit einer Übertragungsrate von 100Mbps bis 1Gbps bei einer Reichweite von bis zu 5000m. Die Übertragung erfolgt im Vollduplex Mode. Drei Laser in der Klasse 1M arbeiten mit einer Wellenlänge von 830nm - 860 nm. Die Strahldivergenz beträgt 2 mRad. Für die Überwachung und das Management wird SNMP verwendet. Bei klarer Sicht (3 dB/Km) ist eine Strecke von 5km überbrückbar, bei mittlerer Sicht (17 dB/Km) sind es noch 2500m. Das Gerät besitzt eine 1Gbps-Schnittstelle, um eine Anbindung an das Firmennetzwerk zu ermöglichen. Was auffällt ist die geringe erlaubte Strahlabweichung von 2 mRad. Das Gerät muss stabil platziert werden, da schon leichte Stöße eine Abweichung von dieser Toleranz bewirken können. Es können Daten mit den Protokollen Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, sowie FDDI und ATM gesendet werden. Laut Angaben auf der Homepage der Firma, wurden weltweit 7000 Links installiert. Damit sich auf der optischen Linse kein Kondenswasser bildet, wird die Abwärme des internen

⁶ [14]

Netzteils verwendet. Somit ist keine eigene Heizung erforderlich. Die Firma bietet, für extremen Schneefall oder Sturm eigene Frontscheiben an. Es ist auch eine Kaskadierung über mehrere Abschnitte möglich, wenn keine direkte Sicht besteht, oder die Distanz zwischen den Geräten zu groß ist. Beim teuersten Modell beträgt die gesamte Laserleistung 120 mW.



Abbildung 2-4: FSO der Firma Lightpointe⁷

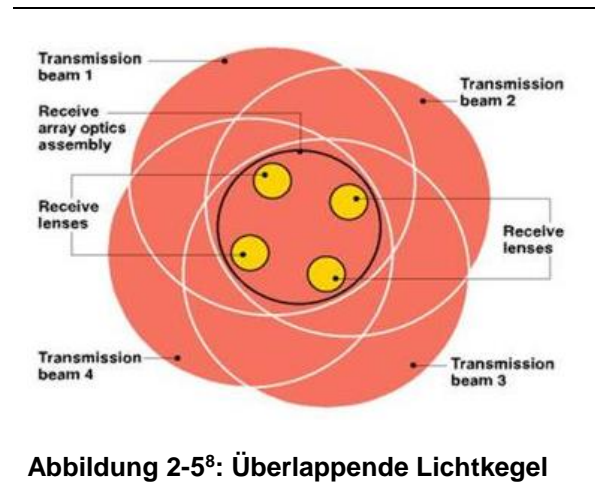


Abbildung 2-5⁸: Überlappende Lichtkegel

Alle Geräte der vorgestellten Firmen verwenden mehrere Laserdioden, um auch bei starkem Regen und Schneefall noch ein ausreichendes Signal zu empfangen. Topologisch handelt es sich um eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Die verwendeten Laserdioden gehören der Klasse 1M an, optische Instrumente dürfen nicht verwendet werden, um in den Strahl zu sehen. Die Geräte werden aber meistens auf Gebäuden und unzugänglichen Stellen installiert, somit ist die Gefahr, unabsichtlich in den Strahl zu sehen, gering. Enorm sind die Preise für die Geräte, welche sich bei mehreren Tausend Euro bewegen, allerdings liefern die Geräte auch hohe Datenübertragungsraten und jede Menge an Schnittstellen für den Anschluss an die Netzwerkgeräte. Eingesetzt werden die Geräte um auf Sichtweite Bürotürme von Unternehmen zu vernetzen. Die Verteilung zu den Büros erfolgt über Abteilungsswitches. Die Unternehmen sparen sich mit den Links hohe Kosten, da die LAN-Vernetzung zwischen den Gebäuden über gemietete Leitungen von Telekommunikationsunternehmen erfolgen müsste. Da die meisten LANs bereits über Switches mit 1Gbps vernetzt sind, müssten die Unternehmen Lichtwellenleiter mieten, wenn sie ihre eigenen Protokolle zur Datenübertragung verwenden möchten. Die Laserlinks stellen Interfaces für unterschiedliche Protokolle zur Verfügung und erlauben daher mehr Flexibilität. Die Übertragungsgeräte sind schnell aufgebaut und mit dem LAN des Unternehmens vernetzt. Dafür

⁷ [13]

⁸ <http://www.lightpointe.de/airebridge-lx-1.html>

ist nur ein Kabel zum nächstgelegenen Switch erforderlich.

Ein neuer Einsatzbereich für FSO bildet die Satellitenkommunikation. Bodenstation und Satellit werden über Laserlinks verbunden. Die größte Herausforderung dabei ist, das Lasersignal dem Satelliten nachzuführen.

2.3 Was ist Free-Space Optics (FSO)?

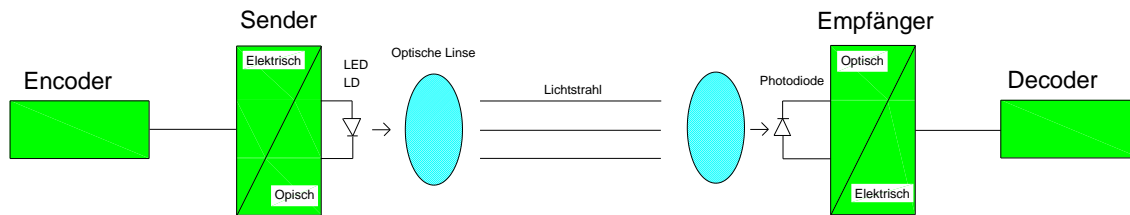


Abbildung 2-6: Grundprinzip FSO⁹

FSO ist eine Technik, die eine Datenkommunikation mittels Licht über den freien Raum ermöglicht. Prinzipiell kann jede Lichtquelle durch Modulation der Lichtstärke zur Datenübertragung genutzt werden, moderne Systeme verwenden aber hauptsächlich Leuchtdioden (LEDs) und Laserdioden (LDs), da nur sie die nötige Bandbreite liefern können. FSO funktioniert, bedingt durch die physikalischen Eigenschaften des Lichts, nur auf Sicht. Im Encoder (Abbildung 2-6) werden die Daten durch die Leitungscodierung an den Übertragungskanal angepasst. Der Sender führt dann eine elektrooptische Wandlung durch und sendet die Lichtsignale, über eine Linse gebündelt, zum Empfänger. Die Fotodiode wandelt die Lichtleistung wieder in ein elektrisches Signal um, welches im anschließenden Decoder decodiert wird. FSO-Systeme arbeiten im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts und der Infrarotstrahlung. Es gibt bei FSO keine Interferenz zwischen sich kreuzenden Lichtstrahlen, da sich Photonen nur durch Gravitation oder starke magnetische Felder beeinflussen lassen. Die Divergenz des Lichtstrahls kann mit optischen Linsen vermindert werden, um im Lichtkegel des Empfängers die maximale Lichtausbeute zu erreichen. Mit moduliertem Laserlicht können Daten über den Freiraum gesendet und empfangen werden. Anders als bei der Funktechnik, ist ein Abhören der Daten nicht so leicht möglich, da ein potentieller Angreifer sich im Kegel des Laserstrahls befinden müsste, oder mit extrem empfindlichen Empfängern das Streulicht empfangen und das Signal decodieren müsste.

Licht schwingt mit Frequenzen im Terraherzbereich. Die von Atomen emittierten Photonen können mit Modulationsverfahren wie Frequenz-, Amplituden- und Phasenmodulation aber nicht direkt beeinflusst werden, was man aber macht ist, die Anzahl der gesendeten

⁹ [20] S. 171

Photonen mit den genannten Modulationsverfahren zu ändern. Im einfachsten Fall wird die Laserdiode einfach nur ein- oder ausgeschaltet. Dies kann sie viele Millionen male in der Sekunde und sendet dabei Photonen in Abhängigkeit von der Stromstärke. Die Modulation von Laserdioden bewirkt somit nur eine Veränderung der Anzahl der emittierten Photonen, beeinflusst aber nicht die Frequenz der Photonen selbst. Anders als bei elektromagnetischen Wellen im Radiobereich, können Photonen nicht mit einfachen Drahtantennen wechselwirken, sondern man benötigt ein Fotoelement mit einer lichtempfindlichen Schicht, aus der bei Lichteinwirkung Elektronen herausgeschlagen werden. Diese Ladungsträger bewirken dann einen äußeren Fotostrom, der zur Signalverarbeitung verwendet werden kann. Jedes aus einer Laserdiode austretende Licht weitet sich auf, bildet also je nach Entfernung einen Lichtkegel mit entsprechendem Durchmesser. Dadurch verteilt sich die Lichtenergie auf eine Fläche, die wesentlich größer ist, als der lichtempfindliche Teil der Fotodiode. Daher steht nur noch wenig Energie pro Fläche zur Verfügung. Um am Empfänger ein starkes Signal zu gewinnen, benötigt man daher Sammellinsen mit möglichst großem Durchmesser, damit das Licht, im Brennpunkt konzentriert, auf die Fotodiode fällt. Zur Bündelung wäre auch die Verwendung eines Parabolspiegels möglich, der über Spiegelflächen aus Glas oder über eine Aluminiumbeschichtung das Licht auf das Fotoelement fokussiert.

Die Funktechnik hat dazu geführt, dass die verfügbaren Frequenzen im freien Raum begrenzt sind. Als Marconi seine ersten Versuche mit elektromagnetischen Wellen startete, war der Raum noch völlig frei von künstlich erzeugten Wellen. Leider verhält es sich mit FSO nicht so. Künstliche Lichtquellen führen zu Störungen der Datenkommunikation mit FSO. Dies können Glühbirnen sein, die durch die Energieversorgung mit 50Hz moduliert werden, oder andere Lichtquellen, die in ihrer Helligkeit meistens mit PWM¹⁰ gesteuert werden. Optische Hilfsmittel ermöglichen es aber, dass der Empfänger nur jene Lichtsignale auf sich fokussiert, die auch für ihn bestimmt sind. Dies ist bei Funkwellen nicht so einfach möglich, da Antennen abgestrahlte elektromagnetische Wellen nicht beliebig bündeln können und daher unterschiedliche Frequenzen verwendet werden müssen. Dies ist auch für FSO möglich, indem verschiedene Wellenlängen des Lichts am Empfänger über optische Filter selektiert werden. Dieses Verfahren wird bereits in Lichtwellenleitern zur Erhöhung der Übertragungskapazität verwendet. Neben der Pulsmodulation der Laserdioden spielt heutzutage auch immer mehr die analoge Übertragung von Daten mit OFDM¹¹ eine Rolle. Möchte man diese Signale mit einem Laser senden, so ist dies nur möglich, wenn der Arbeitspunkt der zu modulierende Laserdiode in ihrer Kennlinie so gelegt wird, dass bereits ein Fotostrom fließt und Photonen gesendet werden. Die positive Halbwelle eines Sinus-signals erhöht den Photonenausstoß der Laserdiode

¹⁰ Über die Pulsweitenmodulation wird die Helligkeit der Lampen gesteuert

¹¹ „Orthogonal Frequency Division Multiplexing“ ermöglicht hohe Datentransferraten durch komplexe Rechenalgorithmen mit Signalprozessoren

und die negative Halbwelle erniedrigt die Photonenzahl pro Sekunde. Dieses Verfahren ist etwa dann notwendig, wenn ein OFDM-Signal übertragen werden soll, da es sich dabei um eine Summe von Sinussignalen handelt. Mit OFDM sind Datenübertragungsraten im GHz-Bereich möglich, bedingt durch die hohe Rechenleistung der heutigen hochintegrierten Schaltkreise. Für kupferbasierte Systeme wird OFDM schon lange verwendet. Telekommunikationsanbieter nutzen diese Technik, um Kunden einen Internetzugang zu ermöglichen. Die Übertragung mit OFDM über LWL gewinnt für Telekommunikationsunternehmen eine immer größere Bedeutung, für FSO konnte aber, trotz Recherchen, kein derartiges System ausfindig gemacht werden. In der Regel werden pulsmodierte Signale zur Datenübertragung verwendet, womit Laserdioden einfach modulierbar sind.

2.4 Ausgewählte Protokolle der Kommunikationstechnik

OSI-Referenzmodell		TCP/IP-Modell	
Layer 7	Application Layer	Layer 4	Application Layer
Layer 6	Presentation Layer	Layer 3	Transport Layer
Layer 5	Session Layer	Layer 2	Internet Layer
Layer 4	Transport Layer	Layer 1	Network Access Layer
Layer 3	Network Layer		
Layer 2	Data Link Layer		
Layer 1	Physical Layer		

Abbildung 2-7: Gegenüberstellung OSI- und TCP/IP Modell¹²

Für die optische Datenübertragung werden Protokolle aus der Kommunikationstechnik verwendet. Dadurch muss für FSO nicht das Rad neu erfunden werden, sondern es werden die in der Praxis bewährten Übertragungsprotokolle genutzt. Um die Datenkommunikation in überschaubare unabhängige Einheiten aufzuteilen, wurde von der ISO¹³ das OSI¹⁴-Referenzmodell entwickelt. Dabei kommt ein Schichtenmodell zur Anwendung, wo jede einzelne Schicht gegen eine aktuellere ausgetauscht werden kann, ohne dass die darüber- oder darunterliegende Schicht geändert werden muss.

Für die Beschreibung der Kommunikation von Rechnern und Netzknoten des Internets wird das bereits vor dem OSI-Referenzmodell entwickelte TCP/IP-Modell verwendet. Teilweise werden mehrere Schichten des OSI-Modells zusammengefasst (Abbildung 2-7). Rechner

¹² Quelle: Eigene Darstellung nach OSI und IETF

¹³ International Organization for Standardization

¹⁴ Open Systems Interconnection Standard zur Kommunikation über unterschiedliche technische Systeme

und Netzknoten kommunizieren mittels Protokollen. Dabei kann die Kommunikation zwischen Softwareabschnitten und/oder Hardwarekomponenten erfolgen. Die in den einzelnen Schichten verwendeten Übertragungs- und Steuerprotokolle benötigen eine Datenstruktur zur Abbildung der für die Kommunikation benötigten Informationen. Dies können Adressen, Statusinformationen, Prüfsummen oder Nutzdaten aus den höheren Schichten sein. Man bezeichnet die verwendeten Datenstrukturen als Header und die Summe der Protokolle, angelehnt an das TCP/IP-Protokoll, als Protokollstapel. Dieser ist in den heutigen modernen Betriebssystemen bereits als fester Bestandteil integriert und ermöglicht über Aufrufe von Routinen des Betriebssystems die Kommunikation zwischen den Geräten. Jede Schicht besitzt einen Protokollkopf, der vor die Nutzdaten gestellt wird. Somit wird der Protokollkopf der oberen Schicht in der Darunterliegenden Teil der Nutzdaten. Die zu übertragende Datenmenge erhöht sich, ohne dass auch mehr Nutzdaten zu transportiert werden.

2.5 Network-Access-Layer

Die unterste Schicht des TCP/IP-Modells bildet der Network-Access-Layer. Hier werden die physikalischen Schnittstellen wie Stecker, Buchsen und das physikalische Übertragungsmedium Kabel, LWL und Funk spezifiziert. Im Leitungscodierung wird festgelegt, mit welcher Codierung die einzelnen Bits übertragen werden, um das Übertragungsmedium möglichst effektiv zu nutzen. Als Rahmen wird Ethernet II verwendet.

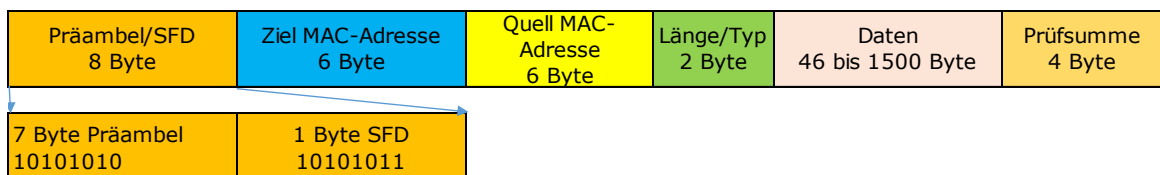


Abbildung 2-8: Header für Ethernet II¹⁵

Das höchste Oktett wird als zuerst gesendet, wobei innerhalb des Oktetts das niederwertigste Bit als erstes übertragen wird. Das Präambel-Feld dient dem Empfänger zur Synchronisierung des Taktes. Es werden alternierend Einsen und Nullen gesendet. Über das Feld SFD (Start Frame Delimiter) wird den Beginn eines neuen Rahmens angezeigt. Eigentlich ist die Präambel in heutigen Netzwerkarchitekturen nicht mehr erforderlich, da von den Netzwerkgeräten in sendefreier Zeit laufend ein Träger gesendet wird. Daher ist das Feld im Ethernet-Rahmen nur noch aus Kompatibilitätsgründen vorhanden. Nun folgt die Ziel- und Quell-Macadresse. Das Typenfeld gibt an, welches Protokoll die nächsthöhere Schicht, der Internet-Layer verwendet.

¹⁵ Quelle: Eigene Darstellung nach [22] S. 1

Einige Beispiele:

0x0800 IP Version 4

0x0806 ARP – Address Resolution Protokoll

0x86DD IP Version 6

Dann folgen die Nutzdaten und aus der anschließenden Prüfsumme kann, wenn sie ausgewertet wird, ermittelt werden, ob eine fehlerfreie Übertragung durchgeführt wurde. Die einzelnen Bits des logischen Ethernet-Rahmens werden direkt an den physikalischen Teil der Hardware von Netzwerkgeräten übergeben. Mit welchem Leitungscode sie dann gesendet werden, bestimmt der Hardwareteil der entsprechenden Geräte. Netzwerkkarten in Computern oder Routern übertragen die im Rahmen gesendeten Informationen auf dem physikalischen Übertragungsmedium mit dem dafür geeignetsten Leitungscode. Dieser kann auch durch FSO, nach entsprechender Anpassung, mit einer Laserdiode gesendet. Durch die MAC-Adressen im Rahmen erhält jedes Netzwerkgerät auf der Welt eine eigene eindeutige Hardwareadresse. Ethernet-Rahmen werden heutzutage im Vollduplex-Modus gesendet. Werden keine Daten übertragen, so senden Netzwerkgeräte, je nach IEEE-Standard, eine Trägerschwingung zur Synchronisierung von Sender und Empfänger. Früher wurden geteilte Medien verwendet, daher war es notwendig, zwischen den Rahmen Ruhepausen einzulegen, damit auch andere Netzwerkgeräte das Medium nützen konnten. Dies ist seit Einführung von Vollduplex nicht mehr erforderlich. FSO verwendet diesen Mode, da die Laserstrahlen sich gegenseitig nicht beeinflussen und die Geräte über Punkt-zu-Punkt miteinander verbunden sind. Die mit Laser übertragenen Ethernet-Rahmen können quer durch den Raum übertragen werden, es kommt zu keiner Beeinflussung, solange sich die Empfänger nicht im gemeinsamen Strahlkegel befinden. Durch die starke Bündelung des Laserlichts und Fokussierung auf der Empfangsseite kann quasi Raummultiplex betrieben werden. Somit können, anders als bei einem Shared-Medium, keine Kollisionen auftreten. Es steht somit die doppelte Übertragungsgeschwindigkeit zur Verfügung, da gleichzeitiges Senden und Empfangen möglich ist. An Nutzdaten können pro Block maximal 1500 Bytes übertragen werden. Das im Typenfeld angegebene Protokoll wird zur Interpretation der Nutzdaten verwendet. Wenn zwei Computer im Internet miteinander kommunizieren, so müssen die Geräte eine eindeutige Adresse besitzen. Ein Beispiel wäre der Netzwerkadapter in einem Kommunikationsgerät, welcher als Schnittstelle zwischen den Kommunikationspartner dient. Jeder Netzwerkadapter besitzt eine eindeutige Nummer, die MAC-Adresse, welche weltweit gültig ist. Die Ziel- und Quell MAC-Adressen bilden die Hardwareadressen der Netzwerkkarte des Quell- und Zielrechners. Im Datenfeld liegen die Nutzdaten für die höheren Schichten. Sind darin weniger als 46 Bytes enthalten, so müssen Füll-Bits eingefügt werden. Dies dient aus historischen Gründen jedoch nur der Kollisionserkennung. Für Netzwerke werden heute Switche im Vollduplex Mode verwendet, wo keine Kollisionen mehr auftreten können. Die Prüfsumme wird über den Rahmen ohne Präambel gebildet. Am Empfangsort werden die Daten aus dem Rahmen extrahiert und an die nächsthöhere Schicht, dem Internet Layer weitergegeben.

Ethernet II bildet jenen logischen Rahmen, dessen Bits an das MII¹⁶ weitergegeben werden. Es handelt sich dabei um eine vom IEEE genormte Schnittstelle, die unabhängig vom verwendeten physikalischen Übertragungsverfahren ist. Dafür wurden Daten und Steuerleitungen definiert, die von den auf den Netzwerkkarten befindlichen ICs unterstützt werden müssen. Alle Hersteller von ICs müssen die Daten und Signalleitungen der MII auf ihren Chips implementieren. Dadurch erfolgt eine logische Entkopplung von dem in weiterer Folge verwendeten physikalischen Schnittstelle zur Außenwelt. Die MII hat, neben den Steuersignalen, je 4 Datenleitungen in Sende und Empfangsrichtung. Dadurch wird die erforderliche Frequenz auf den Datenleitungen auf ein Viertel reduziert. Nachfolger von MII ist RMII¹⁷ mit 2 Datenleitungen und reduzierter Anzahl an Steuersignalen. MII und RMII bildet die Schnittstelle zur Hardware eines Computers, oder zu den IN/OUT-Ports von kleinen Prozessoren, die über entsprechende Ports die Schnittstelle steuert.

2.6 Internet Layer

Derzeit wird in der Praxis für die Datenübertragung im Internet Layer das Internetprotokoll IPv4 verwendet. Der Nachfolger IPv6 wurde zwar in den Betriebssystemen bereits implementiert, vorherrschend im Internet ist aber immer noch die ältere Version.

4	8	16	19	24	31
Version	IHL	Type of Service	Gesamtlänge		
Kennung			Flags	Fragment-Offset	
TTL		Protokoll	Header Prüfsumme		
Quelladresse					
Zieladresse					
Optionen und Fülldaten					
Daten					
...					

Abbildung 2-9: IP-Header IPv4¹⁸

¹⁶ Das „Media Independent Interface“ definiert die Schnittstelle zwischen Netzwerkinterface und Prozessor. Es verwendet 4 Datenleitungen

¹⁷ Das „Reduced Media Independent Interface“ verwendet für die Daten nur 2 Datenleitungen und weniger Steuerleitungen, dadurch reduziert sich die Komplexität des Interfaces zum steuernden Prozessor

¹⁸ Quelle: Eigene Darstellung nach [21] S. 11

Das IP-Protokoll ist ein ungesichertes Protokoll. Es können Pakete das Ziel in falscher Reihenfolge erreichen oder überhaupt verloren gehen. Fehlerhafte Übertragungen müssen durch Protokolle in den höheren Schichten abgefangen werden.

Feldbeschreibung: (Abbildung 2-9)

Im Feld **Version** (4Bit) sind derzeit die Einträge IPv4 und IPv6 möglich

Das Feld **IHL** zeigt die Länge des IP-Headers an (4Bit). Die Gesamtlänge des IP-Headers beträgt immer ein Vielfaches von 32Bit. Steht im Feld IHL die Zahl 5, so beträgt die Gesamtlänge des IP-Headers $5 \times 32\text{Bit} = 160\text{Bit}$ oder 20Byte. Es wird damit angezeigt, wo die Nutzdaten beginnen. IHL ist deshalb erforderlich, da das Feld **Optionen und Fülldaten** optional ist und dadurch der IP-Header eine flexible Länge besitzt. Für bestimmte Daten ist es wünschenswert, IP-Pakete zu priorisieren. Kommen Pakete, welche in den Datenfeldern Sprach- oder Videodaten enthalten, verspätet an, so fallen die Zeitverzögerungen eher auf, als wenn Links im Internet aufgerufen werden. Das Feld **Type of Service** kann dafür genutzt werden die Daten zu priorisieren. Festgelegt sind die Bits für die Priorisierung in RFC 3168.

Die **Gesamtlänge** gibt die Länge des IP-Paketes an (incl. Header).

Das Feld **Kennung** ist im Zusammenhang mit den beiden folgenden Feldern **Flags** und **Fragment-Offset** zu sehen. Es besteht die Möglichkeit IP-Pakete zu fragmentieren. Im Feld **Flags** ist Bit 0 reserviert. Ist Bit 1 gesetzt, so bedeutet dies, dass Datenpakete nicht fragmentiert werden dürfen. Wenn Bit 2 auf 1 steht, so folgen noch weitere Datenpakete. Steht Bit 2 auf 0, so folgt kein weiteres Paket oder es war das Einzige. **Fragment-Offset** zeigt an, ab welcher Position eines fragmentierten Paketes das Fragment anfängt.

TTL gibt die Lebensdauer eines Paketes an. Jedes IP-Gerät, welches durchlaufen wird, reduziert den Wert um 1. Ist das Feld 0, so wird das Paket verworfen. Damit soll verhindert werden, dass IP-Pakete ewig im Netz herumgeistern.

Im Feld **Protocol** wird angezeigt, zu welchem Protokoll in der übergeordneten Schicht des TCP/IP-Modells die Nutzdaten im Datenfeld des Paketes gehören.

Die **Quell-** und **Zieladresse** zeigt an, von und zu welcher IP-Adresse das IP-Paket kommt bzw. gesendet werden soll. Die Adressierung der Netzwerkadapter erfolgt im Network-Access-Layer durch MAC-Adressen. Jeder Netzwerkadapter besitzt dafür eine eindeutige 48 Bit Adresse. Auf dem Internet-Layer werden IP-Adressen zur Adressierung von Netzwerkkomponenten verwendet.

Damit nun die höheren Schichten des TCP/IP-Modells mittels IP-Adressen mit anderen Geräten kommunizieren können, wird zuerst eine Zuordnung von MAC-Adressen zu IP-Adressen benötigt. Diese Aufgabe erfüllt das Address-Resolution-Protocol (ARP). Der ARP-Cache kann im Microsoft-Betriebssystem mit dem Befehl `arp -a` abgefragt werden. Damit

erhält man zu jeder IP-Adresse die die MAC-Adresse des entsprechenden Gerätes. Nur wenn diese Zuordnung vorhanden ist, kann eine Kommunikation zwischen den Netzwerkgeräten stattfinden. Für das ARP-Protokoll wird im Betriebssystem pro Netzwerkkarte eine eigenen Header verwaltet, wo in den Feldern die Informationen gespeichert werden (Abbildung 2-10). Dieser Rahmen wird im Payload (Nutzdatenfeld) des Ethernetrahmens übertragen. Bei moderneren Betriebssystemen kann eine Netzwerkinterface auch über mehrere IP-Adressen angesprochen werden. In diesem Fall wird in der ARP-Tabelle zu den verschiedenen IP-Adressen die gleiche MAC-Adresse angezeigt.

0	15	16	31
Hardware-Type		Protocol-Type	
HW-Size	Prot-Size	OP-Code	
Sender MAC-Address			
		Sender IP-Address	
		Target MAC-Address	
Target IP-Address			

Abbildung 2-10: Header des ARP-Protokolls¹⁹

Beim Senden eines Paketes wird im ARP-Cache überprüft, ob für die Ziel-IP-Adresse die zugehörige MAC-Adresse des Zielrechners vorhanden ist. Fehlt der Eintrag, so wird ein ARP-Request als Broadcast in das Netz gesendet. Im Typ-Feld des Ethernetrahmens wird der Wert 0x0806 für ARP eingetragen. Damit weiß der Empfänger, dass es sich bei den Daten im Payload-Feld des Ethernet-Rahmens um ein ARP-Paket (Abbildung 2-10) handelt. Im ARP-Paket wird als Sender MAC-Adresse der Hex-Code FF:FF:FF:FF:FF:FF eingetragen (Abbildung 2-11). Dadurch werden alle Geräte angesprochen, es antwortet aber nur jenes, welches die Sender IP-Adresse besitzt. Das angesprochene Gerät übernimmt aus dem ARP-Paket die Sender IP-Adresse und die zugehörige MAC-Adresse und trägt sie im eigenen ARP-Cache ein. Anschließend sendet das Netzwerkgerät ein ARP-Reply zum Absender zurück. Im ARP-Reply-Paket wird zuvor im Feld Target MAC-Address die eigene MAC-Adresse eingetragen. Als OP-Code wird der Wert 2 eingetragen (Reply). Der Absender erhält das ARP-Paket und trägt seinerseits im ARP-Cache die IP- und MAC-Adresse des Zielrechners ein (Abbildung 2-12). Damit ist die ARP-Abfrage abgeschlossen und in der ARP-Tabelle besteht eine Zuordnung von MAC-Adressen zu IP-Adressen. Wird die gesamte Tabelle im Betriebssystem Windows mit dem Befehl `arp -d *` gelöscht, so muss diese mit dem ARP-Protokoll wieder neu aufgebaut werden, bevor IP-Pakete übertragen werden können. Da sich die MAC-Adressen der kommunizierenden Geräte bei einem Tausch der Netzwerkkarte ändern kann, darf die ARP-Tabelle natürlich nicht ewig im Cache des Rechners existieren und wird nach einiger Zeit gelöscht.

¹⁹ Quelle: Eigene Darstellung nach [23]

```

> Frame 1: 42 bytes on wire (336 bits), 42 bytes captured (336 bits) on interface 0
✓ Ethernet II, Src: Giga-Byt_7c:39:e8 (94:de:80:7c:39:e8), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
  > Destination: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
  > Source: Giga-Byt_7c:39:e8 (94:de:80:7c:39:e8)
    Type: ARP (0x0806)
✓ Address Resolution Protocol (request)
  Hardware type: Ethernet (1)
  Protocol type: IPv4 (0x0800)
  Hardware size: 6
  Protocol size: 4
  Opcode: request (1)
  Sender MAC address: Giga-Byt_7c:39:e8 (94:de:80:7c:39:e8)
  Sender IP address: 10.0.0.60
  Target MAC address: 00:00:00_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
  Target IP address: 10.0.0.50

```

Abbildung 2-11: ARP-Request

```

> Frame 2: 60 bytes on wire (480 bits), 60 bytes captured (480 bits) on interface 0
✓ Ethernet II, Src: HewlettP_b9:a9:8c (38:63:bb:b9:a9:8c), Dst: Giga-Byt_7c:39:e8 (94:de:80:7c:39:e8)
  > Destination: Giga-Byt_7c:39:e8 (94:de:80:7c:39:e8)
  > Source: HewlettP_b9:a9:8c (38:63:bb:b9:a9:8c)
    Type: ARP (0x0806)
    Padding: 00000000000000000000000000000000
✓ Address Resolution Protocol (reply)
  Hardware type: Ethernet (1)
  Protocol type: IPv4 (0x0800)
  Hardware size: 6
  Protocol size: 4
  Opcode: reply (2)
  Sender MAC address: HewlettP_b9:a9:8c (38:63:bb:b9:a9:8c)
  Sender IP address: 10.0.0.50
  Target MAC address: Giga-Byt_7c:39:e8 (94:de:80:7c:39:e8)
  Target IP address: 10.0.0.60

```

Abbildung 2-12: ARP-Reply

Das ARP-Protokoll ist wichtig, da der Absender sonst nie die MAC-Adresse des Zielrechners ermitteln könnte.

Ein wichtiges Protokoll zur Fehlersuche, welches ebenfalls mit IP-Datagrammen im Internet-Layer übertragen wird, ist das ICMP-Protokoll²⁰. Das Programm „ping“ verwendet ICMP um zu prüfen, ob ein anderer Rechner im Netz erreichbar ist. Die ICMP-Nachrichten werden dabei im Datenteil des IP-Datagramms übertragen.

²⁰ Das Internet Control Message Protocol überträgt Statusinformationen und Fehlermeldungen

0	15	16	31
Typ		Code	Prüfsumme
ICMP Daten			

Abbildung 2-13: Header ICMP-Protokoll²¹

Im IPv4-Header wird im Feld Protokoll für ICMP der Wert 1 eingetragen. In das Datenfeld des IP-Paketes wird der Protokollkopf von ICMP (Abbildung 2-13) eingetragen. Mit dem Befehl *ping 10.0.0.60* werden z.B. die Prüfdaten zur Empfangsstation mit der IP-Adresse 10.0.0.60 gesendet. Im ICMP-Protokollkopf wird dazu im Typenfeld der Wert 8 für Echo Request eingetragen und das ICMP-Datenfeld mit Testdaten gefüllt. Die Empfangsstation sendet die Daten zurück und trägt im Typenfeld den Wert 0 ein (Echo Reply). Mit diesem Verfahren kann überprüft werden, ob zwei Stationen über FSO ordnungsgemäß funktionieren. Das ICMP-Protokoll bietet noch wesentlich mehr Möglichkeiten, für die Überprüfung der FSO-Übertragungstrecke reicht das Dienstprogramm „ping“ jedoch vollkommen aus. Antwortet der Empfänger, so funktionieren auch alle unteren Schichten fehlerfrei.

2.7 Transport Layer

Im Transport-Layer des TCP/IP-Modells werden für FSO zwei wichtige Protokolle verwendet, TCP und UDP. TCP (Abbildung 2-14) ist ein verbindungsorientiertes Protokoll und dient der zuverlässigen Verbindung zwischen zwei Netzwerkgeräten. Für die Übertragung werden TCP-Segmente mit einer Sequenznummer versehen. Damit ist sichergestellt, dass alle Pakete beim Empfänger eintreffen.

0	15	16	31
Source Port		Destination Port	
Sequence Number			
Acknowledgement Number			
HLEN	Flags		Windows
Checksum		Urgent Pointer	
IP-Options			Padding
Data			

Abbildung 2-14: TCP-Header²²

Mit ACK bestätigt der Empfänger, dass er das Paket erhalten hat. Wenn der Sender innerhalb einer bestimmten Zeit keine Bestätigung für ein gesendetes Paket erhält, so erfolgt ein

²¹ Quelle: Eigene Darstellung nach [24] S. 3

²² [25] S. 17

erneutes Senden. Zusätzlich werden durch Prüfsummen Pakete erkannt, die fehlerhaft gesendet wurden. Um Prozesse und Programme in der Anwendungsschicht adressieren zu können, verwendet TCP und UDP Portnummern. Das HTTP-Protokoll verwendet zum Beispiel standardmäßig die Portnummer 80.

Für die Untersuchung der TCP-Kommunikation wird ein kleines Client-Server-Programm mit C#²³ erstellt. Es besteht aus einer Server, der laufend überprüft, ob ein Client eine TCP/IP-Verbindung zu ihm aufbauen möchte. Das Programm verwendet dafür die für C# verfügbaren Klassen des TCP/IP-Stacks. Im Hintergrund werden API-Funktionen des Betriebssystems verwendet.

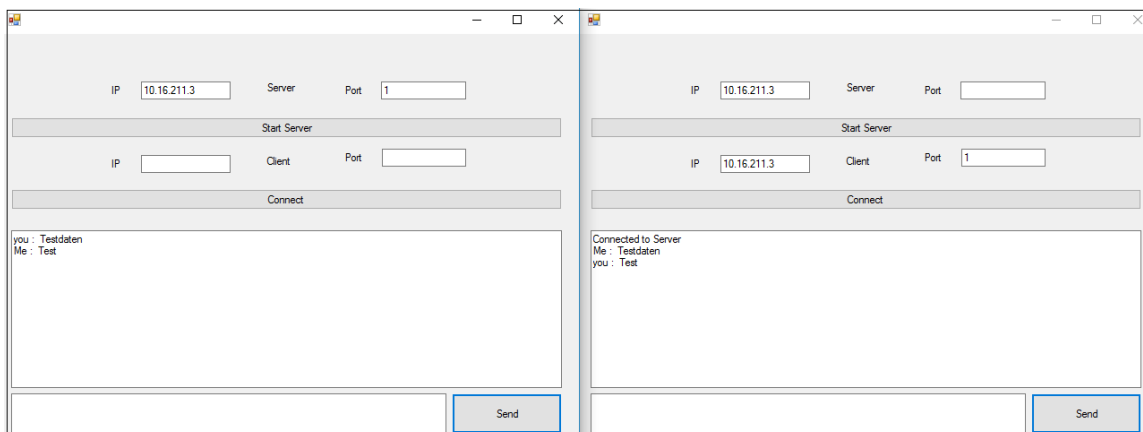


Abbildung 2-15: TCP Client-Server Programm²⁴

Ist ein Client mit dem Server verbunden, so können über ein Eingabefeld Textdaten ausgetauscht werden (Abbildung 2-15). Unter Zuhilfenahme des Netzwerktools „Wireshark“ wird der Protokollablauf analysiert und der Inhalt der beteiligten Felder des TCP-Headers dargestellt. Zum Verbindungsaufbau wird zuerst der Server auf Rechner A gestartet. Er erwartet laut Abbildung, dass sich der Client mit der Zieladresse 10.16.211.3 und dem Port 1 bei ihm meldet. Der Client auf Rechner B baut die TCP-Verbindung auf und gibt die Meldung „Connected to Server“ aus. Das TCP-Protokoll erwartet Quittierungen von der Gegenstelle, daher wird für FSO je ein System für die Hin- und Rückrichtung benötigt. Der Ablauf des Verbindungsaufbaus für TCP erfolgt folgendermaßen:

Rechner A legt eine zufällige Sequenznummer fest und trägt sie im TCP-Header ein (Sequence Number). In der (Abbildung 2-16) wird die relative Sequenznummer 0 angezeigt, da das Analysetool „Wirehark“ diese komfortable Darstellung erlaubt. Es besteht bei der

²³ C# ist eine Programmiersprache von Microsoft

²⁴ Quelle: Eigene Darstellung, programmiert in C#

Analyse dann nicht die Notwendigkeit sich mit unhandlichen Sequenznummern herumzuschlagen. Real steht im TCP-Header eine Nummer bestehend aus 32 Bits.

```

Transmission Control Protocol, Src Port: 54906, Dst Port: 1, Seq: 0, Len: 0
Source Port: 54906
Destination Port: 1
[Stream index: 0]
[TCP Segment Len: 0]
Sequence number: 0 (relative sequence number)
Acknowledgment number: 0
Header Length: 32 bytes
Flags: 0x002 (SYN)
 000. .... = Reserved: Not set
...0 .... = Nonce: Not set
.... 0... = Congestion Window Reduced (CWR): Not set
.... .0.. = ECN-Echo: Not set
.... ..0. = Urgent: Not set
.... ...0 = Acknowledgment: Not set
.... ....0... = Push: Not set
.... ..0.. = Reset: Not set
> .... ...1. = Syn: Set
.... ....0 = Fin: Not set
[TCP Flags: .....S.]
Window size value: 8192
[Calculated window size: 8192]
Checksum: 0xba4e [unverified]
[Checksum Status: Unverified]
Urgent pointer: 0

```

Abbildung 2-16: TCP-Verbindungsaufbau (Syn)

```

Transmission Control Protocol, Src Port: 1, Dst Port: 54906, Seq: 0, Ack: 1, Len: 0
Source Port: 1
Destination Port: 54906
[Stream index: 0]
[TCP Segment Len: 0]
Sequence number: 0 (relative sequence number)
Acknowledgment number: 1 (relative ack number)
Header Length: 32 bytes
Flags: 0x012 (SYN, ACK)
 000. .... = Reserved: Not set
...0 .... = Nonce: Not set
.... 0... = Congestion Window Reduced (CWR): Not set
.... .0.. = ECN-Echo: Not set
.... ..0. = Urgent: Not set
.... ...1. = Acknowledgment: Set
.... ....0... = Push: Not set
.... ..0.. = Reset: Not set
> .... ...1. = Syn: Set
.... ....0 = Fin: Not set
[TCP Flags: .....A..S.]
Window size value: 8192
[Calculated window size: 8192]
Checksum: 0x4a96 [unverified]
[Checksum Status: Unverified]
Urgent pointer: 0

```

Abbildung 2-17: TCP-Verbindungsaufbau (Syn/Ack)

Das SYN-Flag (Flags) und das Source-Port wird gesetzt und dann das TCP-Paket an Rechner B gesendet. Die zugehörige Ziel- und Quell-IP-Adressen wird dem IP-Header im Network-Layer übergeben. Rechner B antwortet nun mit gesetztem ACK- und Syn-Flag (Abbildung 2-17), inkrementiert die von Rechner A gesendete Sequenznummer und sendet diese als Quittungsnummer zurück. Rechner A quittiert mit dem ACK und inkrementierter Sequenznummer (Abbildung 2-18).

```

Transmission Control Protocol, Src Port: 54906, Dst Port: 1, Seq: 1, Ack: 1, Len: 0
  Source Port: 54906
  Destination Port: 1
  [Stream index: 0]
  [TCP Segment Len: 0]
  Sequence number: 1 (relative sequence number)
  Acknowledgment number: 1 (relative ack number)
  Header Length: 20 bytes
  Flags: 0x010 (ACK)
    000. .... = Reserved: Not set
    ...0 .... = Nonce: Not set
    ....0... = Congestion Window Reduced (CWR): Not set
    ....0.. = ECN-Echo: Not set
    ....0. = Urgent: Not set
    ....1... = Acknowledgment: Set
    ....0.. = Push: Not set
    ....0.. = Reset: Not set
    ....0. = Syn: Not set
    ....0 = Fin: Not set
  [TCP Flags: .....A.....]
  Window size value: 256
  [Calculated window size: 65536]
  [Window size scaling factor: 256]
  Checksum: 0xba42 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  Urgent pointer: 0

```

Abbildung 2-18: TCP-Verbindungsaufbau (Ack)

Damit ist die Verbindung aufgebaut und es können beide Rechner Daten senden und empfangen. Damit der Anfang der Nutzdaten bestimmt werden kann, wird im Feld HLEN die Größe des TCP-Headers eingetragen. Die empfangene Quittungsnummer bildet immer die Sequenznummer des nächsten Datagramms. Für den Verbindungsaufbau wird als Source-Port eine zufällige Nummer eingetragen. Das Ziel-Port dient dazu, die entsprechende Applikation in der Anwendungsschicht zu adressieren. Wird für FSO das TCP-Protokoll verwendet, so sind, im Gegensatz zum UDP-Protokoll, zwei Systeme erforderlich, da für eine gesicherte Übertragung Quittungsinformationen gesendet werden müssen. Anhand der Sequenznummern ist der Empfänger in der Lage, die Pakete wieder in der richtigen Reihenfolge zusammenzustellen. Die Datenpakete können über verschiedene Wege geroutet werden, dadurch ist nicht sichergestellt, dass beim Empfänger die Reihenfolge der einlangenden Pakete stimmt. Da die gesendeten Datagramme laufend quittiert werden müssen, benötigt das Protokoll relativ viel Zeit zur Datenübertragung. Dafür hat man aber die Gewissheit, dass die Daten konsistent sind und durch die fortlaufenden Sequenznummern auch nicht in der Reihenfolge vertauscht wurden. Der beschriebene Verbindungsaufbau für das TCP-Protokoll wird weltweit vermutlich viele Milliardenmale pro Sekunde angewendet und hat sich als Standard durchgesetzt. Der Verbindungsabbau ist ähnlich, wobei statt dem SYN-Bit das FIN-Bit verwendet wird. Es zeigt an, dass vom Sender keine Daten mehr zu erwarten sind. Die Gegenstelle quittiert dies mit ACK und sendet anschließend noch ein FIN, welches vom Sender bestätigt wird. Damit ist der geregelte Verbindungsabbau beendet. Ist eine TCP-Verbindung aktiv, so wird beim Datentransfer jedes Paket mit einer Sequenznummer versehen und von der Gegenstelle quittiert.

Ein Nachteil von TCP wurde bereits angesprochen, die Übermittlungsgeschwindigkeit ist

durch den erhöhten Protokollaufwand geringer und die Pakete müssen immer quittiert werden. Hier bietet sich auf der Transportschicht das UDP²⁵-Protokoll an.

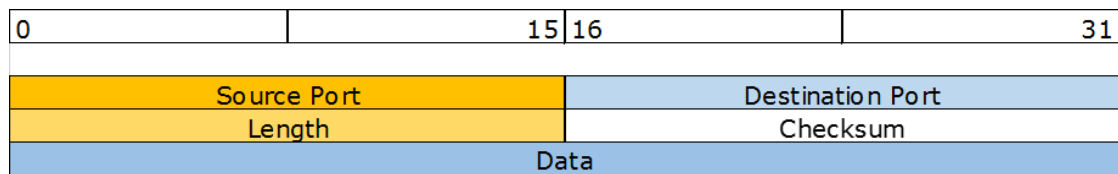


Abbildung 2-19: UDP-Header²⁶

UDP benötigt vor dem Transfer von Nutzdaten keinen Verbindungsaufbau. Durch die fehlenden Quittierungen können aber Datenpakete verlorengehen, oder sie treffen nicht in der Reihenfolge ein, in der sie gesendet wurden. Ob die empfangenen Daten konsistent sind, muss daher in höheren Schichten entschieden werden. Da die Sequenz- und Quittungsnummern und auch andere Felder des TCP-Protokolls nicht benötigt werden, vereinfacht sich der Header für UDP. Neben den Nutzdaten sind nur noch das Source- und Destination-Port relevant (Abbildung 2-19). Über eine Prüfsumme kann der Empfänger die fehlerfreie Übertragung des Paketes feststellen. Für die möglichen Anwendungen in FSO ist UDP ein wichtiges Protokoll, da damit Multimediadaten wie Video und Audio ohne hohen Protokollaufwand übertragen werden können. Es ist möglich über eine einseitige Verbindung zu mehreren Empfängern Daten zu senden, ähnlich dem Broadcasting von SAT- oder Rundfunkanlagen.

Für das Senden von UDP-Paketen werden, mit einem in der Programmiersprache C# erstellten Programm, UDP-Pakete gesendet. Damit können gezielt Nutzdaten im Datenfeld des UDP-Headers gesendet werden. Im Tool „Wireshark“ erkennt man die blau eingefärbten Nutzdaten (Abbildung 2-20) im Klartext. Ein kleines, in C# geschriebenes, Tool ermöglicht somit Nutzdaten in ein UDP-Paket zu verpacken, über den Laserstrahl zur Gegenstelle zu senden, dort auszupacken und in einem Programm auf der Applikationsebene zu verwenden. Der in den Betriebssystemen implementierte TCP/IP-Stack erledigt die gesamte Arbeit. Jede höhere Programmiersprache erlaubt über das API²⁷ den Zugriff auf die Systemaufrufe des Betriebssystems. FSO kann somit auf in der Praxis bewährte Protokolle aufsetzen. Damit wurden nun die ausgewählten Protokolle, welche in weiterer Folge für FSO benötigt werden, besprochen.

²⁵ Das User Datagram Protocol ist ein verbindungsloses Protokoll

²⁶ Quelle: Eigene Darstellung nach [26] S. 1

²⁷ Das Application Programming Interface ist eine Schnittstelle für den Aufruf von Systemroutinen

```

Frame 5536: 70 bytes on wire (560 bits), 70 bytes captured (560 bits) on interface 0
Ethernet II, Src: HewlettP_ed:38:fc (94:57:a5:ed:38:fc), Dst: HewlettP_57:27:50 (8c:dc:d4:57:27:50)
  > Destination: HewlettP_57:27:50 (8c:dc:d4:57:27:50)
  > Source: HewlettP_ed:38:fc (94:57:a5:ed:38:fc)
  Type: IPv4 (0x0800)
Internet Protocol Version 4, Src: 10.16.211.56, Dst: 10.16.211.3
  0100 .... = Version: 4
  ... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  > Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
  Total Length: 56
  Identification: 0x65ce (26062)
  > Flags: 0x00
  Fragment offset: 0
  Time to live: 128
  Protocol: UDP (17)
  Header checksum: 0x1a8b [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source: 10.16.211.56
  Destination: 10.16.211.3
  [Source GeoIP: Unknown]
  [Destination GeoIP: Unknown]
User Datagram Protocol, Src Port: 61095, Dst Port: 1
  Source Port: 61095
  Destination Port: 1
  Length: 36
  Checksum: 0xd799 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  [Stream index: 77]
Data (28 bytes)
  Data: 477574656e205461672c20646173206973742065696e2054...
  [Length: 28]

0000  8c dc d4 57 27 50 94 57 a5 ed 38 fc 08 00 45 00  ..N'P.W ..8...E.
0010  00 38 65 ce 00 00 00 11 1a 0b 0a 10 d3 38 0a 10  .8e.....8...
0020  d3 03 ee a7 00 01 00 24 d7 99 47 75 74 65 6e 20  .....$ ..Guten
0030  54 61 67 2c 20 64 61 73 20 69 73 74 20 65 69 6e  Tag, das ist ein
0040  20 54 65 73 74 20

```

Abbildung 2-20: UDP-Datenübertragung

Da Standardprotokolle aus der Kommunikationstechnik verwendet werden, müssen für FSO keine neuen Protokolle in den höheren Schichten des TCP/IP-Modells entwickelt werden. Dies ist ein erheblicher Vorteil, da die Entwicklung von eigenen Protokollen sehr zeitintensiv sein kann. Für FSO reduziert sich der Entwicklungsaufwand somit hauptsächlich auf die Anpassung des Leitungscodes oder der Modulationsart im Network-Access-Layer, also auf der physikalischen Schicht. Alle für FSO verwendeten Protokolle sind bereits in Form eines TCP/IP-Stacks in den Betriebssystemen vorhanden. Somit können bestehende Anwendungen der Applikationsschicht, die das UDP- oder TCP-Protokoll verwenden, ohne Anpassungen, auch über FSO kommunizieren. Die weiteren experimentellen Untersuchungen beziehen sich auf den Internet-Access-Layer. Es stellen sich Fragen nach dem verwendeten Leitungscodex, dem Dämpfungsverhalten von Licht im Freiraum, den Störungseinflüssen für FSO, den möglichen Reichweiten von Lichtsignalen und der Zuverlässigkeit der Übertragung, um nur einige zu nennen. Die für die FSO-Kommunikation verwendeten Protokolle benötigen, bedingt durch die Komplexität, Rechenleistung. TCP/IP-Stacks sind heute bereits schon in kleinen μ -Controllern enthalten und verwenden gleiche Schnittstellen zur Außenwelt, wie Computer. Somit macht es Sinn die Leitungscodes dieser für PCs und μ -Controller identische Schnittstellen in Bezug auf FSO zu untersuchen. Wichtige leitungsgebundene Standardschnittstellen, auf die der TCP/IP-Stack aufsetzt, sind derzeit Ethernet und Ethernet über USB. Im Prinzip kann aber jede physikalische Schnittstelle verwendet werden, wenn ein LAN-Treiber zur Verfügung steht, auf den der TCP/IP-Stack aufsetzen kann. Aufgabe der nun folgenden Kapitel wird die Untersuchung von bewährten IEEE-Standards auf dem Internet-Access-Layer sein. Aus den vielen IEEE-Standards erfolgt eine Auswahl, mit dem Ziel, einen Standard durch Anpassungen für FSO zu adaptieren.

2.8 Übertragungsfenster und Dämpfungsverhalten

Bei der Datenübertragung durch die Atmosphäre kommt es durch in der Luft befindliche Teilchen zu einer Dämpfung des FSO-Kanals und im schlimmsten Fall zum Abbruch der Verbindung. Folgende Teilchen können FSO stören:

- Aerosole²⁸
- Nebel
- Regentropfen
- Schneefall

Aerosole, bestehend aus einem heterogenen Gemisch aus festen und flüssigen Schwebeteilchen in der Luft, beeinflussen den Lichtstrahl in seiner Ausbreitung. Die Teilchen haben unterschiedliche Größen, Formen und Konzentrationen.

Die Dämpfung setzt sich zusammen aus der Absorption und der Streuung.

Bei der Absorption kollidieren die Photonen mit den Aerosolen und den Molekülen der Luft, wobei die Aerosole den größten Teil zur Absorption vor allem im Infrarotbereich beitragen. Der Grad der Absorption hängt von der Wellenlänge des zur Übertragung verwendeten Lichts ab. Es gibt atmosphärische Übertragungsfenster die bei bestimmten Wellenlängen besonders durchlässig sind. Die Absorptionslinien von sichtbarem Licht und Licht im Infrarotbereich sind schmal und unter Verwendung der Fenster vernachlässigbar. Für FSO sind die atmosphärischen Fenster der Wellenlängen von 850nm, 1300nm und 1550nm von Bedeutung, sie liegen also alle im Bereich des nicht sichtbaren Lichts. Für die Entwicklung des FSO-Systems in dieser Arbeit wird sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von 635nm (rot) verwendet, um die Ausrichtung des Lichtstrahls auf den Empfänger zu erleichtern. Die Dämpfung des Lichtstrahls in den Fenstern hängt hauptsächlich von der Konzentration des in der Luft befindlichen Wasserdampfs ab.

Die Streuung bewirkt, dass ein Teil der Energie der elektromagnetischen Welle des Lichts von den in der Luft befindlichen Partikeln entnommen- und mit derselben Wellenlänge in einem festen Winkel wieder abgestrahlt wird. Das Teilchen erfährt dabei keinen Energieverlust am Empfänger, es kommt jedoch nicht die gesamte abgestrahlte Energie beim Empfänger an. Von Bedeutung für FSO ist die Rayleigh- und die Mie-Streuung.

Bei der Rayleigh-Streuung wird das Licht durch Teilchen gestreut, deren Durchmesser klein im Vergleich zur verwendeten Wellenlänge des Lichts ist. Für FSO ist diese Streuung signifikant im ultravioletten und sichtbaren Bereich, im Infrarotbereich ist sie vernachlässigbar.

²⁸ Flüssige oder feste Teilchen in der Luft, die wenige µm bis mehrere tausendstel Millimeter groß sind

Die Mie-Streuung tritt bei Objekten mit einem Objektdurchmesser von $>2 \cdot 10\lambda$ auf. Nebeltröpfchen haben einen Durchmesser von $1 - 20\mu\text{m}$ und sind die Hauptursache für hohe Dämpfungen des Lichts in der Atmosphäre.

2.9 Leistungsreserve eines FSO-Systems

In einem FSO-System treten, zusätzlich zu den Dämpfungen in der Atmosphäre, noch optische und geometrische Leistungsverluste auf. Optische Verluste ergeben sich durch Reflexion und Absorption an den Linsen und geometrische Verluste werden durch die Aufweitung des Lichtstrahls verursacht. Zusätzlich können noch Ausrichtungsverluste auftreten, wenn der Lichtstrahl nicht genau auf die Empfängerlinse fokussiert wird und dadurch ein Teil der Lichtenergie verloren geht. Ausgehend von der Sendeleistung der LED oder Laserdiode und der Empfindlichkeit der Empfängerdiode, unter Berücksichtigung der optischen und geometrischen Verluste, muss sich eine Leistungsreserve ergeben, um die Dämpfung durch die Atmosphäre zu kompensieren. Tabelle 2-1 fasst die zu berücksichtigenden Parameter an einem Beispiel zusammen.

Parameter	Dämpfung
LED optische Leistung	10dBm
Empfindlichkeit Empfängerdiode	-30dBm
optischer Verlust	6dB
geometrischer Verlust	20dB
Verlust durch fehlerhafte Ausrichtung	2dB
Leistungsreserve	18dB

Tabelle 2-1: Dämpfungsparameter²⁹

18dB bleiben als Leistungsreserve zum Ausgleich der atmosphärischen Verluste. In der Tabelle 2-2 sind die Dämpfungswerte bei diversen Wetterbedingungen angegeben.

Nebelbezeichnung	Niederschlagsäquivalenz	Sichtweite	Signalverlust dB/km
dichter Nebel		200	59,57
mäßiger Nebel	Schnee	500	20,99
leichter Nebel	Schnee oder Wolkenbruch	770m	12,65
Nebeldunst	Schnee oder starker Regen	1,9km	4,22
Dunst	Schnee oder mittlerer Regen	2,8km	2,58
leichter Dunst	Schnee oder leichter Regen	5,9km	0,96
klar	Schnee oder Nieselregen	18,1km	0,24
sehr klar		23km	0,19

Tabelle 2-2: Dämpfung durch Witterungseinflüsse

²⁹ Quelle: Eigene Darstellung nach [80] S. 5

Dichter Nebel stellt die größte Hürde für FSO dar. Nebel mit einer Dämpfung von 59dB/km und einer Sichtweite von 200m lässt eine Datenübertragung nur schwer zu, da im Vergleich zu klarer Sicht nur mehr wenige Photonen auf der Oberfläche der Fotodiode auftreffen. Regen oder Schneefall hat im Vergleich dazu weit weniger Dämpfung. FSO kann auch im Innenbereich verwendet werden. Dabei gibt es keinen Nebel oder sonstige schlechte Sicht, man denke nur an Produktionshallen oder sonstigen großen Arealen, hier ist die Dämpfung minimal. Die Übertragungsstrecke kann bei FSO aber auch nur einige Millimeter betragen, wenn man Datenübertragungseinheiten kontaktlos koppeln möchte, ähnlich einem Optokoppler.

2.10 Reichweitenbetrachtung

Bei der optischen Datenübertragung über den Freiraum möchte man das Signal über eine größere Strecke übertragen und am Empfangsort originalgetreu wiedergewinnen. Die erzielbare Reichweite hängt, neben den atmosphärischen Eigenschaften, auch von der Leistung der Laserdiode, der Empfindlichkeit der Fotodiode, sowie der Verstärkung des Empfangssignals ab. Die Datenübertragung erfolgt bei Laserdioden seriell. Ein 1-Bit bedeutet Lichtquelle einschalten und bei einem 0-Bit wird wieder ausgeschaltet. Es gibt nur diese zwei Zustände. Nun wird experimentell untersucht, wie es sich mit der erzielbaren Reichweite verhält, wenn ein einfaches Rechtecksignal übertragen wird. Man erhält dadurch einen ersten Eindruck über den zu erwartenden Schwierigkeitsgrad, ein hochfrequentes Rechtecksignal mit FSO zu übertragen. Dafür wird ein Testsystem aufgebaut welches aus den folgenden Komponenten besteht (Abbildung 2-21):

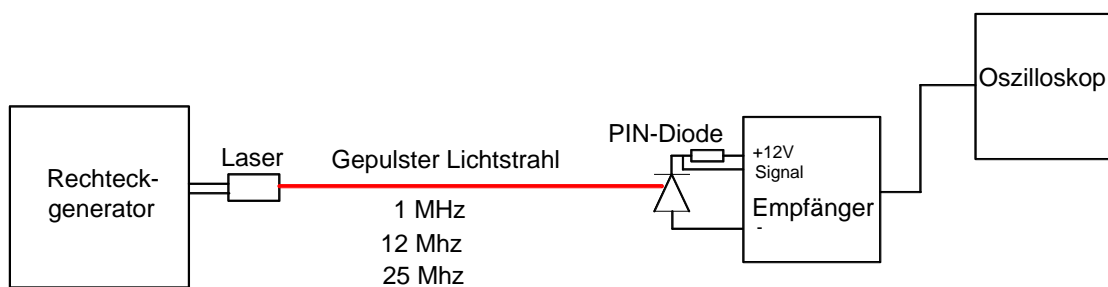


Abbildung 2-21: Testaufbau für die Reichweitenbetrachtung³⁰

³⁰ Quelle: Eigene Darstellung

Eine mit einem Rechtecksignal modulierte Laserdiode überträgt das Signal durch den Freiraum. In einem Abstand von 5m zum Sender wird an einer Fotodiode mit dem Oszilloskop das Signal gemessen. Die Laserdiode strahlt mit einer Wellenlänge von ca. 635nm, also im sichtbaren Bereich des Lichts, dadurch wird bei Experimenten durch den roten Laserstrahl die Ausrichtung auf die Fotodiode sehr erleichtert. Es werden Rechtecksignale mit Frequenzen von 1MHz, 12MHz und im Bereich von 20Mhz gesendet. Die Vorgangsweise, zuerst einfache Rechteimpulse für Übertragung zu verwenden, hat den Vorteil, dass ein neutrales Signal vorliegt, mit dem die Reichweite bei verschiedenen Frequenzen verglichen werden kann.

2.11 Optischer Tastkopf

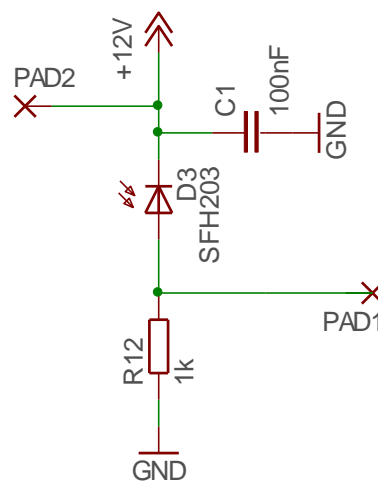


Abbildung 2-22: Optischer Tastkopf³¹

Zur Analyse der gesendeten Lasersignale, wird am Empfangsort eine Schaltung zur Umsetzung der Lichtimpulse in elektrische Signale verwendet, also eine Art optischer Tastkopf (Abbildung 2-22). Damit kann das von der Laserdiode gesendete Lichtsignal in ein elektrisches Signal verwandelt- und am Oszilloskop dargestellt werden. Es wird die Amplitude und die Form des Signals analysiert. Der kleinste einstellbare Amplitudenbereich des Oszilloskops beträgt 20mV. Daher wäre es wünschenswert, wenn das Signal an der Fotodiode im noch darstellbaren Bereich des Oszilloskops liegt, zumal die an der Fotodiode gemessenen Einstreuungen der Umgebung bereits um die 8mV liegen und somit das von der Laserdiode gesendete Signal überlagern wird. Der Abstand zwischen Stör und Nutzsignal sollte so groß wie möglich sein, um das gesendete Signal noch selektieren zu können. Als Fotoelement für die Umsetzung der Lichtleistung in ein elektrisches Signal wird eine PIN-Diode verwendet.

³¹ Eigene Darstellung, erstellt mit EAGLE

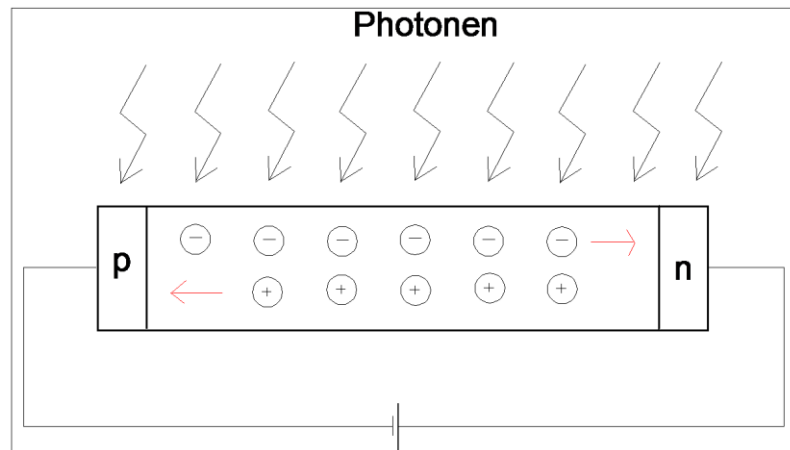


Abbildung 2-23: PIN-Diode mit intrinsischer Schicht³²

Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sich zwischen den pn-Übergängen eine schwach dotierte Zone, die „Intrinsische Zone“, befindet. Die pn-Übergänge sind damit nicht in direktem Kontakt und es bildet sich beim Anlegen einer Sperrspannung eine größere Raumladungszone aus. Nur in dieser Zone werden durch die auftreffenden Photonen Elektronen aus dem Atomverband gelöst und tragen zum äußeren Fotostrom bei. Dabei werden Elektronen/Lochpaare gebildet. Durch die angelegte Sperrspannung entsteht ein elektrisches Feld, welches Elektronen zur n-Schicht und Löcher zur p-Schicht driften lässt. Durch die Vorspannung verringert sich die Kapazität der PIN-Diode. Die interne Kapazität der Fotodiode ist ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl des Fotoelements. Hohe Kapazitäten bedeuten, dass das Signal besonders im HF-Bereich stark gedämpft wird. Je stärker die Fotodiode vorgespannt wird, umso mehr verringert sich die innere Kapazität der PIN-Diode. Damit können hochfrequente Signale detektiert werden. Je größer die lichtempfindliche Fläche einer PIN-Dioden ist, desto mehr Fotostrom liefert sie, allerdings nimmt auch die Kapazität zu und dämpft das Signal. In der Schaltung ist der Kondensator C1 besonders wichtig. Er schließt den Fotostromkreis. Ansonsten würde das hochfrequente Signal über die Versorgungsspannung laufen. Diese hat meistens interne Kapazitäten und führt dazu, dass das Signal gedämpft wird. Fällt ein Laserimpuls auf die Fotodiode, so werden durch die auftreffenden Photonen Elektronen freigesetzt. Diese bewirken einen äußeren Fotostrom, welcher an R12 einen Spannungsabfall erzeugt. Die PIN-Diode liefert, abhängig von der Beleuchtungsstärke, einen Strom von $1 \mu\text{A}$ – $100 \mu\text{A}$. Ein hoher Widerstand von R12 bewirkt, dass, trotz der geringen Fotostrome, an der Fotodiode bei High/Low-Signalen Spannungsunterschiede von $>10 \text{ mV}$ auftreten. Diese Spannung ist mit dem verwendeten Oszilloskop noch messbar.

³² Eigene Darstellung

Der Abstand zwischen dem Nutzsignal und eventuell auftretenden Störungen aus der Umgebung soll möglichst groß sein. Da das verwendete Oszilloskop Spannungen von 4mV/DIV noch auflösen kann, wäre es wünschenswert, wenn die Signalspannung an R12 ebenfalls in diesem Bereich liegt, da ansonsten eine Signalauswertung nur mit Vorverstärkung möglich wäre. Wird die PIN-Diode SFH203 mit einer Vorspannung von +12V betrieben, so hat sie laut Datenblatt eine innere Kapazität von 2,5pF. Diese Kapazität in Verbindung mit R12 bestimmt, ob das Rechtecksignal abhängig von der gesendeten Frequenz noch das Impulsdach erreichen kann und somit auch das originale Rechtecksignal des Senders angezeigt wird. Je kleiner R12 gewählt wird, umso höher ist die erzielbare Bandbreite. Leider führt ein geringer Widerstandswert von R12 auch zu einer geringeren Empfindlichkeit der Fotodiode für Signale und damit zu einer eingeschränkten Reichweite. Es muss also ein Kompromiss gefunden werden zwischen Reichweite und erzielbarer Bandbreite. Für die nun folgenden Messungen wird das Lasersignal, über eine optische Sammellinse genau auf die Fotodiode ausgerichtet. Der Durchmesser der Sammellinse beträgt 8cm, womit es möglich ist, durch die geringe Divergenz der Laserdiode, das gesamte ausgestrahlte Licht auf die Fotodiode zu bündeln. Dafür erhält man bei 1MHz eine Amplitude von mehr als 240mV, wobei die Laserdiode eine Ausgangsleistung von 5mW liefert. Fällt kein Licht auf die Fotodiode, so zeigt das Oszilloskop Störspannungen durch Einstreuungen aus der Umgebung mit einer Amplitude von 8mV an. Die Einstreuungen treten durch die Anschlussdrähte für die Spannungsversorgung auf. Trotz der geringen Frequenz von 1MHz erkennt man die exponentielle Ladekurve des Signals, bedingt durch die interne Kapazität der Fotodiode (Abbildung 2-24). Damit die Flanken des Rechtecksignals noch steiler verlaufen, könnte man den Widerstandswert von R12 noch mehr verkleinern.

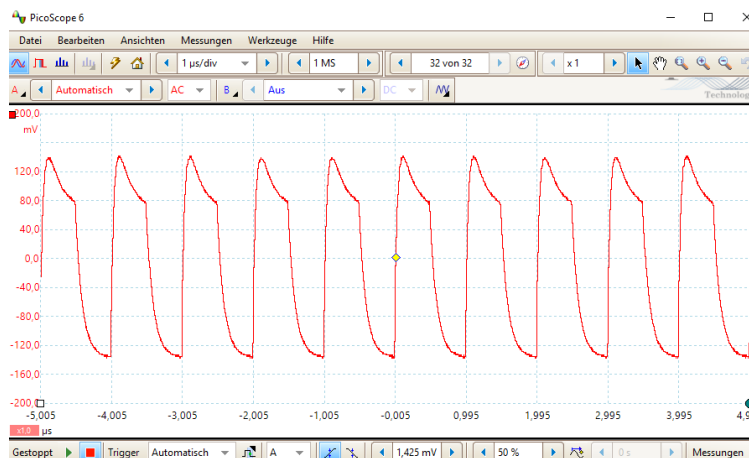


Abbildung 2-24: Signal an Fotodiode (1MHz)

Dies führt aber dazu, dass die Signalamplitude am Widerstand kleiner wird und somit auch die Reichweite sinkt. Dies kann über eine weitere Verstärkerstufe wieder kompensiert werden, wenn der Abstand des Nutzsignals vom Störsignal hoch genug ist.

Die nächste Frage ist nun, wie verhält es sich, wenn die Frequenz des Rechtecksignals auf 12MHz (Abbildung 2-25) gesteigert wird. Sieht man sich die Messung am Oszilloskop an, so hat das dargestellte Signal wenig Ähnlichkeit mit einem Rechtecksignal. Man erkennt die exponentielle Ladekurve, das Impulsdach wird aber nicht mehr erreicht. Außerdem ist die Signalspannung auf 80mV gesunken. Bei der hohen Frequenz wirkt sich somit die interne Kapazität der Fotodiode voll auf das Signal aus. Wiederum könnte man den Widerstand R12 verkleinern mit dem Effekt, dass auch die Signalamplitude kleiner wird und sich dem Wert der Umgebungsstörung annähert. Würde man zur Übertragung von Nullen und Einsen einen Leitungscode verwenden, bei dem es auf die exakte Breite des Impulses ankommt, so wäre keine fehlerfreie Informationsübertragung möglich, da das Impulsdach des Signals nie erreicht wird. Auswertbar im Empfänger wären Leitungscode, wo die Information in den steigenden und fallenden Flanken enthalten ist. Ein Beispiel dafür ist der Manchestercode, wo eine fallende Flanke eine Eins und eine steigende Flanke eine logische Null darstellt. Um die Flankensteilheit zu verbessern, kann ein Komparator nachgeschaltet werden. Dabei handelt es sich meistens um einen Operationsverstärker mit invertierenden und nicht invertierenden Eingang und hohem Verstärkungsfaktor. Eine kleine Spannungsdifferenz an den Eingängen bewirkt dann, dass der OP-Verstärker sofort die maximal mögliche Spannung ausgibt, also in die Sättigung kommt. Damit können Rechtecksignale mit steilen Flanken gewonnen werden.

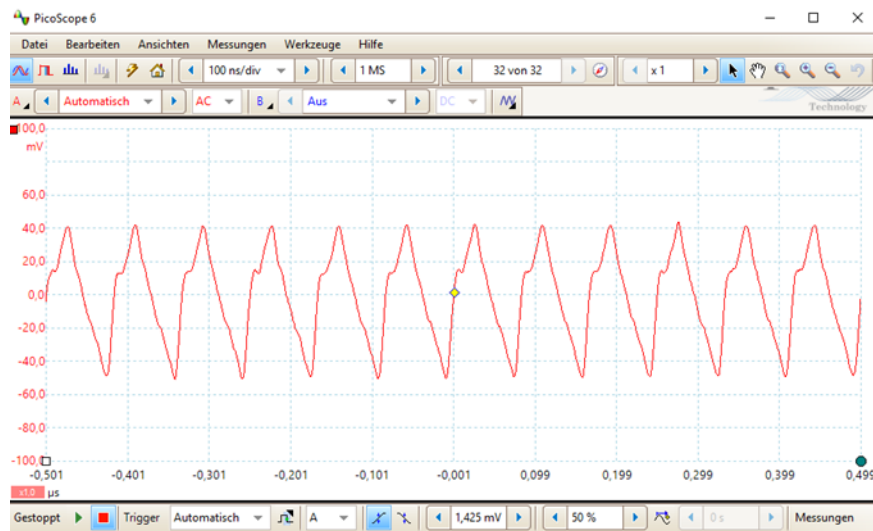


Abbildung 2-25: Signal an Fotodiode (12MHz)

In der nächsten Messung wird nun die Frequenz des Rechtecksignals auf 20MHz erhöht. Damit hat man das Zwanzigfache gegenüber der ersten Messung. Bei diesen hohen Frequenzen führt die innere Kapazität der Fotodiode ebenfalls zu einer weiteren signifikanten Dämpfung des Signals. Man erhält zwar immer noch eine Amplitude im mV-Bereich, in einer Entfernung von 100m wäre die Signalerkennung aber bereits wesentlich schwieriger zu bewerkstelligen, als bei einem Signal mit der Frequenz von 1MHz. Der Rechteckimpuls hat bei 20Mhz eine Breite von 50ns.

Wie in der Messung am Oszilloskop zu sehen ist, verringert sich nun die Signalspannung auf 60mV. Diese Amplitude wird auch nur deshalb erreicht, weil der Laser genau

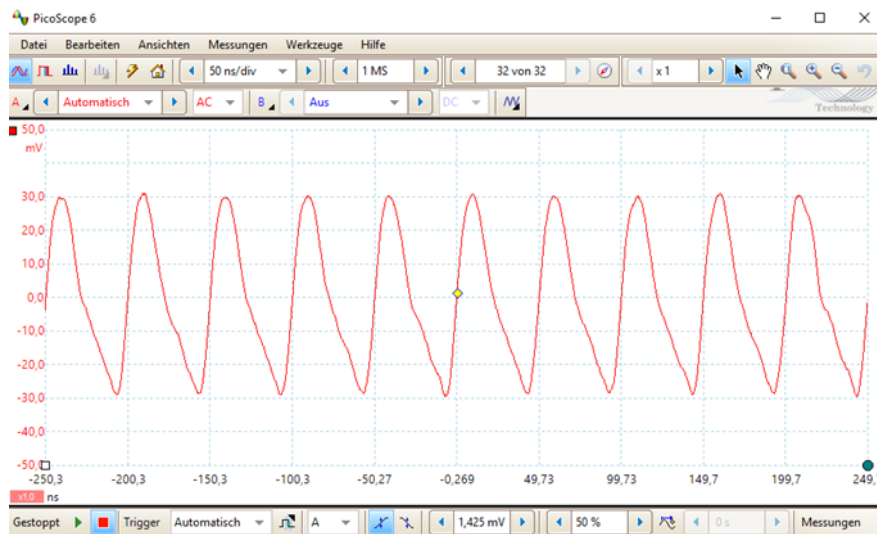


Abbildung 2-26: Signal an Fotodiode (20MHz)

auf die Fotodiode ausgerichtet ist, der Abstand zwischen Sender und Empfänger nur 5m beträgt und über eine Sammellinse die gesamte Energie des Laserlichts gebündelt auf die Fotodiode fällt. Das bedeutet, in der Praxis ist zur Datenübertragung mit FSO über eine größere Strecke ein extrem genaues Ausrichten des Laserstrahls auf die Empfängerdiode erforderlich. Schon ein leichtes Abweichen bewirkt eine starke Dämpfung des ohnehin schon schwachen Signals an der Fotodiode. Sobald nur mehr Signalspannungen unter 20mV gemessen werden, machen sich Einstreuungen von Radiosendern und anderen elektronischen Geräten bemerkbar. Um dies zu unterdrücken, müsste der Empfänger in einem gut geschirmten Metallgehäuse untergebracht werden. Wenn der Signaleingang des Tastkopfes sauber gegen Masse geschaltet wird, ist immer noch ein Störsignal von 2 mV bis 4 mV vorhanden. Nun könnte man auf den Gedanken kommen, einfach mehr Fotodioden zu verwenden, um die Fläche für die Lichtaufnahme zu erweitern. Je größer die Fläche, umso mehr Fotostrom wird durch das einfallende Laserlicht erzeugt, umso größer ist die Amplitude des Signals. Um dies zu testen, wurden 24 PIN-Dioden vom Typ SFH206 parallelgeschaltet, in der Hoffnung, ein starkes Signal Empfangssignal zu erhalten. Die PIN-Diode SFH206 bietet eine Fläche von 7mm². Damit steht in Summe eine sensitive Fläche von 168mm² für die Photonen zur Verfügung. Leider funktionierte das im Test nicht, da mit jeder parallel geschalteten Fotodiode sich die Gesamtkapazität der Fotodioden erhöht. Die ganze Schaltung verhält sich dann wie ein Tiefpass. Sendet die Laserdiode an Signal mit einer Frequenz von 20MHz, so wird das Signal stark gedämpft und man erhält ein Ausgangssignal, dessen Amplitude nicht viel höher ist, als wenn man nur eine Fotodiode verwendet. Testweise wird nun die Laserdiode mit einer Frequenz von 80MHz moduliert, um zu überprüfen, ob überhaupt noch ein Signal messbar ist.

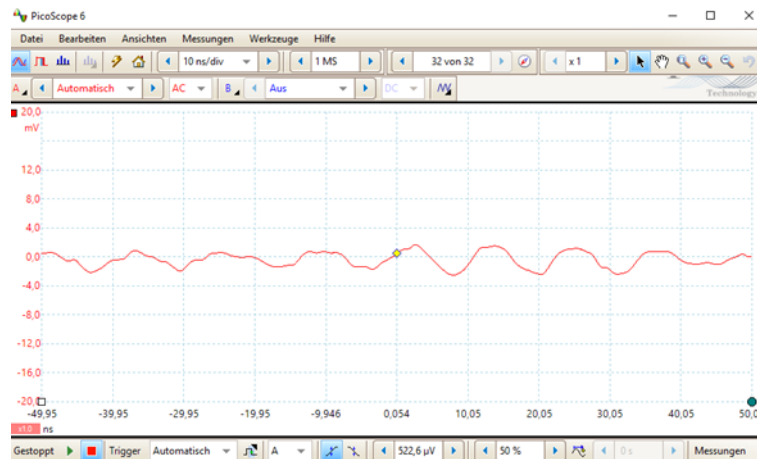


Abbildung 2-27: Signal an Fotodiode (80Mhz)

In der abgebildeten Messung sieht man das unerfreuliche Ergebnis: Die Signalspannung geht völlig in der Störspannung unter. An eine Signalauswertung ist hier nicht mehr zu denken. Die Signalamplituden an der Fotodiode liegen im μV -Bereich. Die einzige Möglichkeit die Störspannungen zu unterdrücken, wäre eine extrem gute HF-Abschirmung.

2.12 LED versus Laser

Bei der Reichweitenbetrachtung wurde eine 5mW Laserdiode verwendet. Die Anwendung von LDs ist aber nicht unproblematisch in Bezug auf die Augensicherheit. Die Sicherheit für Mensch und Tier muss unter allen Umständen gewährleistet sein. In einer Entfernung von 100m hat der Strahlkegel einer Laserdiode, bei Verwendung eines Kollimators immer noch einen Durchmesser von nur wenigen Zentimetern.

Klasse	Beschreibung
1	Die Laserstrahlung ist nicht gefährlich für das Auge
1M	Solange keine optischen Instrumente verwendet werden, ist die Laserstrahlung für das Auge ungefährlich.
2	Die Laserstrahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich (400nm bis 700nm). Kurzzeitbestrahlung bis 0,25s ist für das Auge auch mit optischen Hilfsmitteln ungefährlich.
2M	Nur sichtbare Laserstrahlung (400nm bis 700nm). Mit freiem Auge bis 0,25s Bestrahlungsdauer sicher.

Tabelle 2-3: Laserklassen³³

Am Empfangsort kann daher mit einer optischen Sammellinse fast die gesamte Lichtleistung auf eine kleine Fläche konzentriert werden. Das ist für FSO optimal, da man damit

³³ Quelle: Eigene Darstellung nach [15]

einen hohen Fotostrom erhält. Würde aber der gebündelte Strahl in das Auge eines Beobachters treffen, so kann dies böse Folgen für die Augengesundheit haben. Laser werden nach DIN EN 60825-1 in Laserklassen eingeteilt (Tabelle 2-3). Für FSO sind nur die Laserklassen 1, 1M und 2 von Relevanz. Lasergeräte der Klasse 1 sind zwar für das Auge ungefährlich, wegen der geringen Leistung aber für Übertragungen im Freiraum über längere Strecken in der Laserleistung zu schwach.

Die Klasse 1M („M“ steht für Magnifying Instruments) ist bei Verwendung von Lupen und Ferngläser für die Augen gefährlich, da speziell bei der Infrarotstrahlung keine natürliche Abwehrreaktion (Lidschlussreflex) durch das Auge erfolgt.

Nur sichtbare Laserstrahlung (400 – 700nm) beinhaltet die Klasse 2. Hier kommt es zur natürlichen Abwehrreaktion (Lidschlussreflex) des Auges. In diesen Bereich fallen die meisten Laserpointer, deren zulässige Leistung $\leq 1\text{mW}$ betragen muss. Es darf aber nicht absichtlich in den Strahl gestarrt werden.

Die Klasse 2M gilt für den sichtbaren Bereich des Lichts (400 – 700nm), die Verwendung von optischen Hilfsmitteln stellt aber eine Gefahr für das Auge dar. Dies gilt für direkte Langzeit- und Kurzzeitbestrahlung.

Lasergeräte mit höheren Laserklassen wären, bezüglich der optischen Leistung, zur Übertragung von Daten über längere Strecken optimal, sind aber für die Augen zu gefährlich und werden daher hier auch nicht verwendet. Für Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit kommen Laserdioden mit einer Leistung von 5mW im Bereich des sichtbaren Lichts zur Anwendung. Dies entspricht der Laserklasse 2M. Man erhält dann auch in einem Abstand von 100m für experimentelle Untersuchungen noch einen deutlichen Lichtfleck an einer hellen Reflexionsfläche. Am Kollimator lässt sich die gewünschte Bündelung des Strahls durch verschieben der Linse einstellen. Damit kann das Licht auf einen extrem kleinen

Klasse	Langzeitbestrahlung		Kurzzeitbestrahlung $\leq 0,25\text{s}$	
	opt. Instrument	freies Auge	opt. Instrument	freies Auge
1	sicher	sicher	sicher	sicher
1M	gefährlich	sicher	gefährlich	sicher
2 (sichtbar)	gefährlich	gefährlich	sicher	sicher
2M (sichtbar)	gefährlich	gefährlich	gefährlich	sicher

Tabelle 2-4: Laserklassen nach Gefährlichkeitsgrad³⁴

Punkt gebündelt werden, oder man weitet den Strahl aus Gründen der Augensicherheit künstlich auf.

³⁴ Quelle: Eigene Darstellung

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

In Kapitel 1 wurde bereits das Ziel definiert, ein FSO-Übertragungssystem experimentell zu testen, um Daten über den Freiraum übertragen zu können. In diesem Kapitel werden nun die weiteren Schritte und Parameter, sowie Randbedingungen festgelegt. Auf Grundlage von, in der Praxis, bereits angewandten kabelgebundenen Übertragungssystemen (Kupfer bzw. LWL) soll ein Konzept entwickelt werden, um Daten über den Freiraum mittels Licht experimentell zu übertragen.

3.1 Geforderte Parameter

Folgende Parameter und Randbedingungen werden festgelegt:

- Einsatz von Laser-Dioden mit einer Leistung von >1 mW
- Zu übertragende Freilandstrecke <50 m
- Wellenlänge des Lasers im Bereich des sichtbaren Lichts
- Anwendung bestehender Protokolle aus der Kommunikationstechnik
- Simplexbetrieb für Broadcasting

Die Gefahr für das Auge ist bei Laserdioden mit Leistungen kleiner 1mW und sachgemäßer Anwendung gering. Für experimentelle Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden dennoch Laserdioden mit größerer Leistung als 1mW eingesetzt. Die Verwendung von Wellenlängen des sichtbaren Lichts erleichtern das Justieren des Laserstrahls auf den Empfänger. Im Infrarotbereich wäre es weitaus schwieriger den Laserstrahl auf die kleine Fläche der Fotodiode zu konzentrieren. Moderne FSO-Systeme haben dafür eigene Zielsysteme, meist in Form eines Fernrohrs mit Fadenkreuz.

3.2 Ausgewählte Protokolle

Während die Modulation der Laserdiode für FSO auf dem Layer 1 des TCP/IP-Modells stattfindet, werden für den Transport der Daten auf den höheren Schichten die Netzwerkprotokolle IP, TCP und UDP verwendet. Durch die Anwendung von bereits existierenden Protokollen soll vermieden, dass ein eigener sogenannter Protokollstapel für FSO implementiert werden muss, denn in fast allen Betriebssystemen ist dieser bereits enthalten. Dadurch erspart man sich für die Entwicklung eigener Übertragungsprotokolle jede Menge an Programmieraufwand und Zeit. Zusätzlich werden die für FSO wichtigen Steuerprotokolle ICMP und ARP (siehe Abschnitt 2) für die Fehlersuche und Zuordnung von MAC-Adressen zu IP-Adressen verwendet.

3.3 Prototypenaufbau

Da das TCP/IP-Modell in den Betriebssystemen bereits abgebildet ist, sind Anpassungen sind nur auf Layer 1 (Network Access Layer) erforderlich. Dafür soll schnelles Prototyping verwendet werden. Der Aufbau der notwendigen Schaltungen erfolgt auf geätzten Kupferplatten, da die Herstellung von gedruckten Schaltungen bei externen Firmen zu zeitaufwändig wäre. Die Lieferung der Platinen kann bis zu zwei Wochen in Anspruch nehmen. Erhält man dann die Platinen und stellt einen Fehler fest, so muss man nach der Korrektur wieder auf die Lieferung warten.

3.4 Experimentelle Analyse bestehender Systeme

Bestehende Übertragungssysteme nach dem IEEE-Standard sollen auf Anwendbarkeit für FSO in Form von Messungen untersucht werden. Die Untersuchungen werden auf dem Network Access Layer des TCP/IP-Modells durchgeführt. Durch die Analyse des verwendeten Leitungscodes soll überprüft werden, ob dieser für FSO direkt verwendet werden kann, oder Anpassungen auf dem Layer 1 erforderlich sind. Aus den ausgewählten IEEE-Standards soll dann jener gewählt werden, welcher sich am besten für FSO eignet. Daraus basierend wird ein Konzept entwickelt, um FSO experimentell zu realisieren. Es werden dafür alle erforderlichen Komponenten in Modulform zusammengestellt. In der Implementierungsphase wird das erstellte Konzept umgesetzt und die Funktion getestet.

3.5 FSO-Anwendungen

Für FSO sollen in weiterer Folge folgende mögliche Anwendungen experimentell untersucht werden:

- Multimedia-Streaming zu mehreren FSO-Empfängern
- Videokonferenz im Duplexbetrieb
- Simplex Audioübertragung

Die Verteilung von Multimediadaten an mehrere Empfänger wird nur in eine Richtung angewandt (Simplexübertragung) und über eine für alle Empfänger gemeinsame Adresse erfolgen. Es soll untersucht werden, welches Übertragungsprotokoll dafür verwendet werden kann. Im Gegensatz dazu ist bei einer Videokonferenz eine Kommunikation in beide Richtungen erforderlich. Dies soll über zwei getrennte Übertragungssysteme erfolgen. Videodaten benötigen hohe Bandbreiten, daher muss in diesem Fall das FSO-System eine Übertragungsrate von mindestens 10Mbit/s zur Verfügung stellen. Für die Übertragung von Audiodaten sind die Anforderungen an die Datenübertragungsrate weitaus geringer. Es wird für die Übertragung von Video- und Audio-Daten jedoch die gleiche Technik verwendet.

4 Experimentelle Analysen

Es sollen nun Datenübertragungssysteme analysiert werden, die sich in der Praxis durchgesetzt- und als weltweit anerkannter Standard etabliert haben. Einheitliche Standards ermöglichen es den Firmen, geeignete integrierte Schaltungen zu entwickeln und anzubieten, die den entsprechenden Standard auf wirtschaftliche Weise umsetzen, optimiert im Energieverbrauch und im Aufwand an Schaltungselementen. Diese Bauelemente können dann in hohen Stückzahlen und zu einem wirtschaftlichen Preis am Markt angeboten- und von den Firmen zur Entwicklung von Übertragungssystemen eingesetzt werden. Beispielsweise werden Millionen von Ethernet-Chips in Netzwerkkarten von Computern verbaut. Die benötigten Treiber liefern die Entwickler für die verschiedenen Betriebssysteme gleich mit. Sollte sich bei den nun folgenden Analysen ergeben, dass unter Verwendung bestehender Standards ein funktionierendes FSO-System implementiert werden kann, so spart man sich damit gleich einmal die aufwendige Programmierung von Treibern für die verschiedenen Betriebssysteme und die Implementierung von Logik-Schaltkreisen. Es kann dann einfach der im Standard verwendete Leitungscode für FSO genutzt werden.

4.1 IEEE – Standards

Technische Standards sind wichtig, um das Zusammenspiel von Komponenten verschiedenster Hersteller zu ermöglichen. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ein Berufsverband von Ingenieuren im Bereich Elektro- und Informationstechnik, setzt sich aus 38 Societies zusammen, welche wiederum aus Projektgruppen zur Standardisierung von Techniken bestehen. In der Society IEEE Communications gibt es die Projektgruppe 802, welche LAN³⁵ und WAN-Netzwerke³⁶ im Physical-Layer (OSI-Schicht 1) und Data Link Layer (OSI-Schicht 2) standardisiert. Es sollen nun Standards nach IEEE 802 experimentell untersucht werden, ob sie sich für FSO eignen, oder eventuell unter Anpassung des Network-Access-Layers für FSO nutzbar gemacht werden können. Speziell werden Standards nach IEEE 802.3 für die unterste physikalische Schicht näher betrachtet. Für die Kommunikation eines Netzwerkgerätes mit der Außenwelt ist immer ein Stück Hardware (Interface) erforderlich. Der am Interfaceausgang über das Übertragungsmedium gesendete Leitungscode ist interessant für die Fragestellung, ob damit im Freiraum eine Datenübertragung mit Laserdioden möglich ist. Bei den Untersuchungen wird also das Interface „angezapft“.

³⁵ Unter Local Area Network versteht man die Vernetzung von Netzwerkgeräten über lokale Switches

³⁶ Beim Wide Area Network handelt es sich um die Vernetzung von LANs über Weitverkehrsnetze

Folgende Fragen werden bei den Messungen gestellt:

1. Welche Spannungswerte werden für die Signalübertragung verwendet?
2. Welcher Leitungscode kommt zur Anwendung?
3. Sind es unipolare oder bipolare Signale?
4. Werden Multilevel-Signale³⁷ verwendet?
5. Wie verhält es sich mit dem Gleichanteil des Signals?
6. Wird ein NRZ oder RZ-Signal verwendet?
7. Wie verhält es sich mit der erforderlichen Bandbreite?
8. Ist eine einfache Taktrückgewinnung am Empfänger möglich?
9. Welche Modulationsart wird verwendet?
10. Mit welchen Anstiegs- und Abfallzeiten hat man es zu tun?

Zu den angeführten Punkten einige Erläuterungen:

Punkt 1:

Um eine Laserdiode direkt anzusteuern, wird ein Lasertreiber verwendet. Dieser benötigt einen entsprechenden Spannungspegel an seinem Eingang. Daher muss festgestellt werden, mit welcher Signalspannung der entsprechende IEEE-Standard arbeitet.

Punkt 2:

Der Leitungscode bestimmt, wie die Nullen und Einsen codiert werden. Ein typischer Vertreter dafür ist der Manchestercode. Eine Eins wird durch die steigende Flanke und eine Null durch die fallende Flanke ausgedrückt. Für die FSO-Übertragung muss überprüft werden, ob der Leitungscode überhaupt mit FSO geeignet ist, oder ob eine Anpassung durchgeführt werden muss.

Punkt 3:

Mit bipolaren Signalen kann keine Laserdiode angesteuert werden. Es ist vorher eine Signalwandlung erforderlich, um aus positiven und negativen Spannungen ein unipolares Signal, mit einem entsprechenden Spannungspegel, für den Lasertreiber zu erzeugen.

Punkt 4:

In der Informationstechnik werden meistens binäre Signale verwendet (zwei Spannungszustände für die binären Werte 0 und 1) Multilevel-Signale setzen sich aus mehreren Spannungspegeln zusammen. Zum Beispiel 2,5V, 0V und -2,5V. Hier ist eine Anpassung für die Lasertreiber erforderlich, da dieser nur mit unipolaren Signalen direkt angesteuert

³⁷ Die Informationsdarstellung erfolgt mit mehr als zwei Spannungszuständen

werden kann. Wird z.B. der ternäre Code verwendet ($m = 3$), so können damit 3^m Symbole dargestellt werden, es wird also die Anzahl der benötigten Symbole reduziert.

Punkt 5:

Signalimpulse bilden im Mittelwert eine Gleichspannung. Dieser Gleichanteil bewirkt, dass der Empfänger logische Nullen und Einsen nicht mehr unterscheiden kann, da sich an der Empfangsdiode, abhängig von den Impulsbreiten, eine Offsetspannung ausbildet und die Signale nicht mehr erkennen kann. Daher ist man immer bestrebt, ein Datensignal mit möglichst geringem Gleichanteil zu übertragen.

Punkt 6:

NRZ-Signale wechseln bei mehreren aufeinanderfolgenden gleichen logischen Werten nicht den Zustand. Dies beeinflusst auch den Gleichanteil eines Signals und die Fähigkeit des Empfängers, das Taktsignal wiederzugewinnen. RZ-Signale benötigen die doppelte Bandbreite, da das Signal vor der nächsten logischen Eins einen Signalwechsel durchführen muss.

Punkt 7:

Wie bereits in Punkt 6 besprochen wurde, benötigt die RZ-Codierung im Gegensatz zur NRZ-Codierung die doppelte Bandbreite, da nach jedem Bit ein Flankenwechsel erforderlich ist. Bandbreite kann aber gespart werden, wenn nur im Falle eines 1-Bits ein Flankenwechsel erfolgt, 0-Bits dagegen zu keiner Änderung des Pegels führen (NRZI). Dies kann noch kombiniert werden, indem man drei oder mehrere Spannungspegel für die Übertragung verwendet. Für FSO müssen diese Signale allerdings in ein unipolares Signal konvertiert werden, damit der Lasertreiber angesteuert werden kann.

Punkt 8:

Damit der Empfänger den Takt wiedergewinnen kann, wird meistens eine PLL-Regelschleife verwendet, um einen Taktgenerator mit dem gesendeten Signal zu synchronisieren. Dazu müssen aber genügend Flankenwechsel im Signal stattfinden. Wird eine größere Anzahl Einsen oder Nullen aufeinanderfolgend gesendet, so kann sich der Taktgenerator des Empfängers nicht mit dem Sender synchronisieren.

Punkt 9:

Laserdioden können direkt mit Impulsen moduliert werden. Es ist aber auch möglich analoge Verfahren wie die Amplituden- oder Phasenmodulation zu verwenden. Um die negativen Halbwellen eines Signals darstellen zu können, muss die Diode bereits Licht senden.

Punkt 10:

Für hohe Übertragungsraten werden Laserdioden mit kurzen Anstiegs- und Abfallzeiten benötigt. Für 100Mbps müssen die Laserdioden z.B. Schaltzeiten von 1ns verarbeiten.

In den nun folgenden Untersuchungen der ausgewählten IEEE-Standards wird das Übertragungsverfahren des jeweiligen Standards erklärt und der gesendete Leitungscode nach den oben genannten Kriterien analysiert. Zentrales Instrument ist dabei das Oszilloskop. Damit kann die Signalform in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dargestellt werden. Bei den in den Standards verwendeten Übertragungsmedium handelt es sich um Kupfer und Lichtwellenleiter. Funktechnische Standards, wie WLAN³⁸ oder Bluetooth, werden nicht auf die Anwendbarkeit für FSO analysiert, da die verwendeten Frequenzen dieser Technik im GHz-Bereich liegen und nur mit hohem Aufwand für FSO angepasst werden können. Man müsste dafür die Möglichkeit haben, die gesendeten Bits bereits vor dem Modulator abgreifen zu können, um zu ermitteln, ob damit eine Laserdiode angesteuert werden kann, da nach dem Modulator Frequenzen um die 2,4GHz auftreten, die von preislich günstigen Fotodioden nicht verarbeitet werden können. Dazu kommt noch, dass für industriell gefertigte WLAN-Geräte keine Schaltpläne zu bekommen sind. Dies wäre aber notwendig, um die Datensignale bereits vor der Modulation mit dem 2,4GHz-Träger abgreifen zu können. Den Übertragungscode, welcher dem Übertragungsmedium aufgeprägt wird, nennt man den Leitungscode. Zweck der Leitungscodierung ist die gezielte Anpassung des Datensignals an den Übertragungskanal. Die Übertragung von Daten mit einem modulierten Laser erfordert, dass zur Ansteuerung der Laserdiode ein unipolares Signal vorliegt. Eine logische Eins (engl. Mark) wird mit einem normierten Pegel dargestellt, z.B. einem Spannungswert von 5V, für eine logische Null wird ebenfalls ein normierter Pegel verwendet (0V für Laser aus). Bei einer logischen Eins muss der Pegel die ganze Zeit für die Laserdiode zur Verfügung stehen. Der Leitungscode am Ausgang des, für die Übertragung zur Verfügung stehenden, Interfaces von leitungsgebundenen Übertragungssystemen bildet die Grundlage für die Übertragung von Daten mit FSO. Entweder wird eine Laserdiode damit direkt moduliert, oder es erfolgt eine Anpassung des Leitungscodes. Es könnte sich z.B. als günstig erweisen, logische Nullen und Einsen getrennt über zwei Laserdioden zu übertragen. In den zu untersuchenden Standards werden binäre und ternäre Signale auftreten, oder NRZI-Codes zur Übertragung verwendet. All dies wird analysiert und in Hinblick auf die Übertragung mit FSO bewertet. Die zu analysierenden Signale werden entweder direkt am Ausgang der Interfaces abgenommen, oder durch Zwischenschaltung von Hardware eine Pegelanpassung durchgeführt. Zum Beispiel sind die Signale nach der Übertragung über Kupferleitungen verschliffen und müssen regeneriert und im Spannungspegel angepasst werden, damit man Laserdioden über Lasertreiber ansteuern kann.

³⁸ Das WLAN ist der allgemeine Name für Funkstandards zur Anbindung von drahtlosen Netzwerkgeräten

4.1.1 10Base-T

Der Standard 10Base-T wurde bereits 1991 vom IEEE zum Standard erklärt und ermöglicht eine Übertragungsgeschwindigkeit von 10Mbit/s über eine Twisted-Pair Verkabelung. Obwohl moderne LANs in Firmen oder im Home-Bereich bereits mit 100- oder 1000 Mbps arbeiten, wird 10Base-T trotzdem experimentell auf die Anwendbarkeit für FSO untersucht, da für diesen Frequenzbereich auch LEDs verwendet werden könnten. Ursprünglich wurden Hubs für 10Base-T verwendet, um die angeschlossenen Geräte sternförmig zu verbinden. Diese führen lediglich eine Signalregenerierung der Bits auf Layer 1 durch und leiten die Information dann unverändert an alle Stationen weiter.

Senden mehrere Geräte gleichzeitig, so wird durch das CSMA/CD-Protokoll verhindert, dass Stationen zeitgleich senden.

Protokollablauf:

1. Station A hört ab ob andere Stationen senden. Da der Hub auf Layer 1 die Bit-Informationen an alle weiterleitet, kann jede Station ermitteln, ob von einer anderen Station gesendet wird.
2. Ist der Kanal frei, so sendet Station A und hört gleichzeitig ab, ob eine andere Station ebenfalls zu senden begonnen hat. Ist dies der Fall, so wird ein JAM-Signal an alle Beteiligten gesendet und damit hört auch die störende Station auf zu senden.
3. Nach einer zufällig gewählten Zeit die für alle Stationen unterschiedlich ist beginnt der Ablauf von vorne.

Hubs wurden mittlerweile durch Switches ersetzt welche die Datenpakete nur mehr an jene Station weitersenden, für die sie bestimmt sind. Die Übertragung erfolgt auf einem Twisted-Pair-Kabel im Vollduplexbetrieb, daher können auch keine Kollisionen mehr auftreten.

In einem Testsystem werden nun zwei Rechner mit einem Ethernet-Kabel verbunden und an der Sende- und Empfangsleitung das Signal gemessen, um zu überprüfen, ob damit Laserdioden für FSO direkt moduliert werden können. Dafür wird eine Hilfsschaltung benötigt (Abbildung 4-1), damit das Signal der Ethernet-Schnittstelle der beiden PCs am Oszilloskop abgebildet werden kann. Zwei Rechner werden mittels Crossover-Kabel über die LAN-Buchsen miteinander verbunden. Die Sende- und Empfangsadern sind durch die Schaltung durchgeschliffen. Der Baustein DS26LS32, ein differentieller Leitungsempfänger, wandelt das Differenzsignal der Ethernet-Schnittstelle in einen TTL-Pegel von 5V. Die Hysterisis des Bausteins beträgt 100mV. Eine Differenzspannung zwischen TX1+ und TX1- von PC1 ergibt an OUT1 ein Signal von 5V und das gleiche gilt für TX2+ sowie TX2- und Out2 von PC2. Mit dieser Hilfsschaltung können die Signale auf der ersten Schicht hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeit für FSO analysiert werden. An den beiden PCs werden die Netzwerkkarten auf 10Mbit im Duplex-Mode eingestellt. Damit können die IP-Pakete gleichzeitig in Sende- als auch in Empfangsrichtung übertragen werden. Für 10Base-T wird in der Konfiguration der Netzwerkkarte „10 Mbps Vollduplex“ ausgewählt.

Normalerweise sind die Netzwerkkarten auf Autonegotiation konfiguriert, da durch den verbauten Chip die IEEE-Standards 10Base-T, 100Base-TX und 1000Base-T unterstützt werden. Ältere Netzwerkkarten, die nur 10Base-T verwenden, senden einen „Normal Link Pulses“ (NLP). Alle 16ms wird ein 100ns-Impuls gesendet. Erst wenn die Netzwerkkarte diese Impulse empfängt, wechselt sie in den aktiven Zustand und kann Daten senden. Ein Link-Fehler tritt auf, wenn 50 bis 100ms weder ein NLP empfangen wird, noch Datenverkehr stattfindet. Wird der Standard 10Base-T für FSO verwendet, so müssen nicht nur die Daten, sondern auch die NLPs durch die Laserdiode gesendet werden, damit die Gegenseite den Linkstatus der Netzwerkkarte auf aktiv setzen kann, ansonsten lassen die Treiber der Netzwerkgeräte kein Senden von Daten zu.

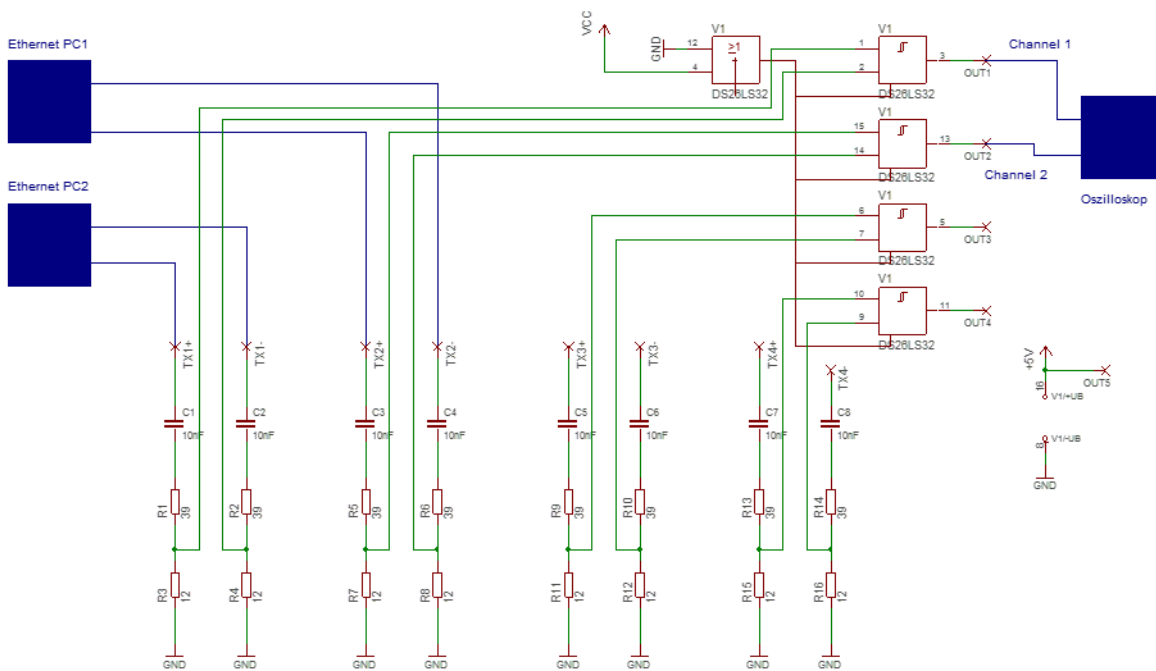


Abbildung 4-1: Differenzieller Leitungstreiber³⁹

Die Ethernet-Schnittstellen von 10Base-T-Netzwerkgeräten senden auf den Leitungspaaren 1-2 sowie 3-6 ein bipolares Signal von +2,5V und -2,5V. Diese Spannungen wären nicht geeignet, um damit direkt eine Laserdiode zu modulieren. Jede Netzwerkkarte der PCs hat am Ausgang eine Übertragungsspule. Dadurch wird das Gerät von der Umgebung entkoppelt. Die Widerstände bilden mit dem Kondensator und der Übertragungsspule im PC einen geschlossenen Stromkreis. An den zwei Widerständen von 12Ω entsteht ein Spannungsabfall des Differenzsignals. Der differentielle Leitungsempfänger DS26LS32 wertet das Signal aus und erzeugt aus den bipolaren Impulsen ein TTL-Signal. Dieses wird am Oszilloskop analysiert. Zur Verfügung stehen im IC vier Schaltkreise, wovon zwei für 10Base-T für die Analyse benötigt werden. Der Ausgang des Oder-Gliedes bildet das Select-Signal

³⁹ Quelle: Eigene Darstellung erstellt mit EAGLE

für den Leitungsempfänger. Jeder davon besitzt eine Hysterese von 100mV. Damit werden kleine Einbrüche im Signal ausgefiltert. Die Differenzspannung an den Eingängen muss laut Datenblatt mindestens 200mV betragen. Die Schaltzeit bei einem Polaritätswechsel des Differenzsignals beträgt 17ns. Die PCs sind mit der Schaltung über ein RJ-45-Kabel verbunden, wobei die Sendeleitung von PC1 zur Empfangsleitung von PC2 geführt wird. Dieses Auskreuzen ist bei modernen Netzwerkkarten nicht notwendig, da über Auto-MDI/MDIX⁴⁰ die richtige Zuordnung der Sende- und Empfangsadern erfolgt.

Belegung nach EIA/TIA 568A			Belegung nach EIA/TIA 568B		
Signal	Pin	Farbe	Signal	Pin	Farbe
TX+	1	weiß/grün	TX+	1	weiß/orange
TX-	2	grün	TX-	2	orange
RX+	3	weiß/orange	RX+	3	weiß/grün
	4	blau		4	blau
	5	weiß/blau		5	weiß/blau
RX-	6	orange	RX-	6	grün
	7	weiß/braun		7	weiß/braun
	8	braun		8	braun

Abbildung 4-2: Belegung RJ-45 Stecker⁴¹

Für die Belegung gibt es die zwei Normen EIA/TIA 568A und EIA/TIA 568B (Abbildung 4-2). Der Unterschied liegt in den vertauschten Aderpaaren 1-2 und 3-6. Weltweit hat sich für die Netzwerkverkabelung IA/TIA 568A durchgesetzt.

Bei der nun folgenden Messung wird nur ein PC1 mit der Schaltung verbunden, sodass keine Datenübertragung stattfinden kann, sondern nur der NLP-Impuls gesendet wird. Das Oszilloskop ist auf 100ns/Division eingestellt. Angezeigt wird der NLP mit einer Impulsbreite von 100ns. Zur besseren Darstellung des Impulses wird der Tastkopf des Oszilloskops auf 10x eingestellt. Jede Netzwerkkarte sendet diesen NLP normalerweise an einen Switch und erhält von diesem auf den Empfangsadern ebenfalls ein NLP-Signal. Alle 16ms +/-8ms muss dieser Impuls eintreffen, da ansonsten das Betriebssystem die Netzwerkkarte auf inaktiv setzt. Bei den Netzwerkeinstellungen wird dann die Meldung „Netzwerkkarte wurde entfernt“ angezeigt. Der NLP ist ein positiver Impuls (Abbildung 4-3), der immer dann gesendet wird, wenn kein Netzwerkverkehr stattfindet. Das Signal dient der Gegenstelle auch zur Synchronisierung. Stehen Daten an, so wird der NLP unterbrochen und nahtlos daran werden die Datenbits gesendet.

⁴⁰ Erkennt vertauschte Sende- und Empfangsadern und kreuzt sie aus

⁴¹ Quelle: Eigene Darstellung

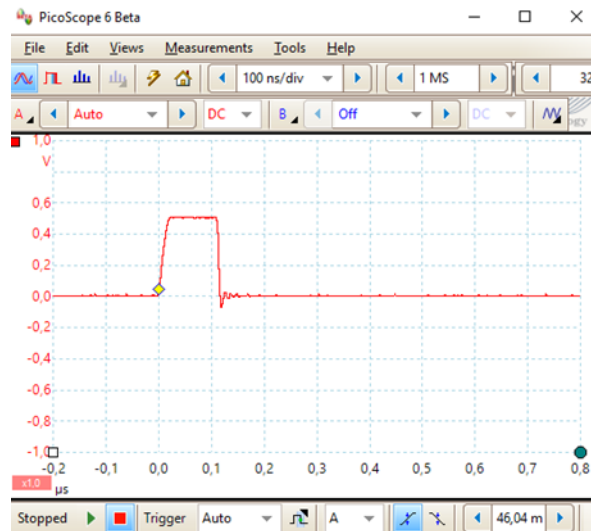


Abbildung 4-3: NLP-Impuls (100ns)

Nun werden beide PCs mit der Schaltung nach Abbildung 4-1 verbunden. Da beide Geräte NLPs im Abstand von 16ms erhalten, ändert das Betriebssystem den Link-Status der Netzwerkkarten auf aktiv und ermöglicht die Datenübertragung zwischen den Geräten. Für die Messung am Oszilloskop werden nun UDP-Testdaten von PC1 zu PC2 gesendet (Abbildung 4-4).

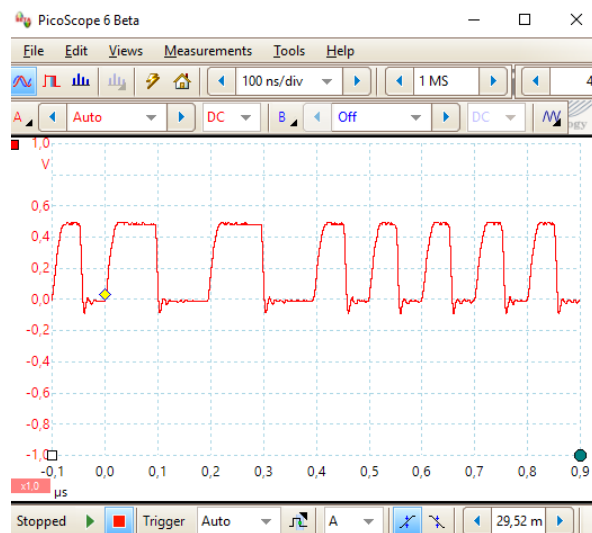


Abbildung 4-4: Manchestercode 10Base-T

Diese durchlaufen, beginnend vom Applikation-Layer die verschiedenen Schichten des TCP/IP-Stacks. Im Transport-Layer werden die Nutzdaten in das Datenfeld des UDP-Headers gepackt und an die unteren Schichten weitergeleitet. Die Bits des Ethernetrahmens übergibt das Betriebssystem über den im Betriebssystem implementierten Treiber an den

IC der Netzwerkkarte von PC1, der die Codierung in den Leitungscode durchführt. 10Base-T verwendet die Manchester-Codierung. Eine steigende Flanke bedeutet eine „Eins“ und eine fallende Flanke wird als eine „Null“ interpretiert. In der Messung (Abbildung 4-4) ist deutlich erkennbar, dass bei der Übertragung von aufeinanderfolgenden Nullen oder Einsen für 10Base-T eine Bandbreite von 20Mhz erforderlich ist, da Impulse mit einer Impulsbreite von 50ns übertragen werden müssen. Für die Übertragungsrates von 10Mbps verdoppelt sich durch die Manchestercodierung die benötigte Bandbreite. Demgegenüber ergibt sich aber der große Vorteil, dass der Takt am Empfangsort leicht wiedergewonnen werden kann, da bei jedem übertragenen Bit mindestens ein Flankenwechsel stattfindet. Zudem ist der Manchestercode gleichanteilsfrei. Mit dem vom differentiellen Leitungstreiber DS26LS32 gelieferten TTL-Signal kann direkt ein Lasertreiber angesteuert werden. Durch die Verwendung des Manchestercodes eignet sich 10Base-T ausgezeichnet für FSO, da nur eine Flankenänderung übertragen werden muss. Die Information der Einsen und Nullen ist nicht abhängig von der Breite der Impulse, sondern wird durch die steigenden und fallenden Flanken ausgedrückt. Der Empfänger muss bei der Decodierung nur erkennen, ob zwischen den 100ns ein Flankenwechsel stattfindet. Dies passiert immer dann, wenn mehrere aufeinanderfolgende 0-Bits oder 1-Bits übertragen werden, ansonsten beträgt die Breite des Impulses immer 100ns. Das Manchestersignal muss am Empfangsort vorverstärkt werden. In Kapitel 2 wurde bei der Reichweitenbetrachtung bereits gezeigt, dass die Empfindlichkeit der PIN-Diode für Lasersignale vom gewählten Vorwiderstand der Fotodiode abhängig ist. Um eine größere Übertragungsstrecke zu realisieren, darf der Wert nicht zu klein sein. Ein hoher Widerstandswert führt dagegen dazu, dass kein vollständiger Impuls an der Fotodiode gewonnen wird. Man erhält nur einen Teil der Ladekurve (Abbildung 4-5). Für ein sauberes Signal wird nach einer Vorverstärkung ein Komparator nachgeschaltet. Führt man das Manchestersignal dem Komparator zu, so erhält man steile Flanken, da bereits eine kleine Differenzspannung den Komparator in die Sättigung treibt.

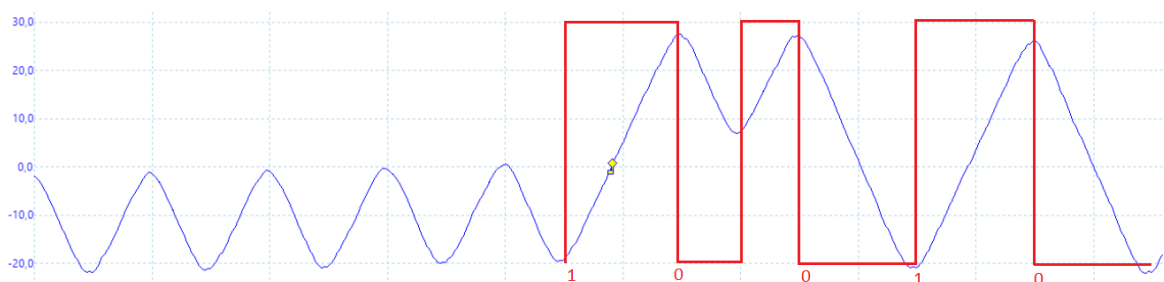


Abbildung 4-5: Manchestersignal gemessen an PIN-Diode⁴²

⁴² Quelle: Eigene Darstellung

Wird das Signal am Empfangsort über ein Twisted-Pair-Kabel der Netzwerkkarte des PC zugeführt, so benötigt das differenzielle Signal eine Amplitude von 2,5V. Die Decodierung des Manchestersignals wird durch den Chip auf der Netzwerkkarte durchgeführt.

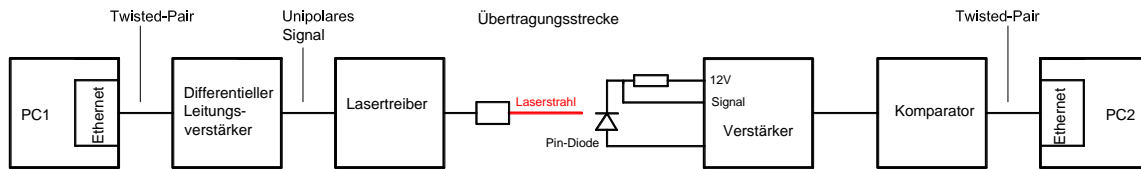


Abbildung 4-6: FSO mit 10Base-T⁴³

Der differentielle Leitungsverstärker muss ein unipolares Signal an seinem Ausgang zur Verfügung stellen, damit der Lasertreiber direkt angesteuert werden kann, idealerweise einen TTL-Pegel. Die Netzwerkkarte in PC1 und PC2 ist auf Vollduplex mit 10Mbps eingestellt. Die Übertragung nach Abbildung 4-6 läuft nur in eine Richtung. Das bedeutet aber, dass die Netzwerkkarte von PC1 aus der Gegenrichtung keinen NLP erhält und daher das Netzwerkinterface nicht aktiv wird. Damit können keine Datenpakete übertragen werden. Um dies trotzdem zu ermöglichen, werden die Empfangsadern RX+ und RX- am Ethernetanschluss mit einem NLP von einer eigenen, aktiven Netzwerkkarte versorgt. Alle 16ms muss ein Impuls mit einer Impulsbreite von 100ns gesendet werden, damit das Netzwerkinterface des Empfängers aktiv bleibt.

Mit dem System nach Abbildung 4-6 können in der Transportschicht natürlich nur UDP-Pakete gesendet werden, da für TCP ein Rückkanal für die Quittierungsinformationen erforderlich ist. Möchte man auch das TCP-Protokoll verwenden, muss für die Rückrichtung ein identisches System vorhanden sein. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass 10Base-T für FSO verwendbar ist. Die Herausforderung besteht vor allem darin, dass das an der Fotodiode empfangene Signal auf einen Pegel von 2,5V gebracht wird, damit die Netzwerkkarte des angeschlossenen PCs die Flanken des Manchestersignals sauber erkennen- und weiterverarbeiten kann.

4.1.2 10Base-FL

10Base-FL verwendet, wie 10BASE-T, als Leitungscodierung den Manchestercode. Der Standard stammt aus dem Jahre 1993, hat eine Übertragungsrate von 10Mbps und benötigt eine Bandbreite von 20MHz. Es werden, bedingt durch die Übertragung mit LEDs, nur unipolare Signale gesendet werden.

⁴³ Quelle: Eigene Darstellung

Verwendet wird die Basisbandmodulation, d.h. die Laserdiode wird direkt mit dem Leitungscode angesteuert. Die Übertragung erfolgt über ein LWL-Kabel, womit eine maximale Distanz von 2000m überbrückt werden kann. Es wird je ein eigenes Kabel für die Sende- und Empfangsrichtung verwendet. Der Grund 10Base-FL für die Anwendbarkeit von FSO zu untersuchen, liegt in der Robustheit des verwendeten Leitungscode, dem Manchestercode. Es ist einfacher, für FSO steigende und fallende Flanken zu übertragen, als wenn man einen NRZ-Code verwendet, wo die Information von mehreren Bits in der Impulsbreite liegt. Allerdings wird auch für 10Base-FL, wie bei 10Base-T, die doppelte Bandbreite benötigt, also 20MHz. Für die Taktrückgewinnung müssen nur die Flanken ausgewertet werden, da die Bit-Informationen in den Wechseln der Flanken enthalten sind. Moduliert werden LED-Sendediode mit einer Wellenlänge von 850nm, womit man sich im Infrarotbereich befindet. Bei einer notwendigen Bandbreite von 20MHz muss die LED Impulsbreiten von mindestens 50ns verarbeiten können. Um eine Analyse des Standards durchzuführen, wird ein Medienkonverter verwendet (Abbildung 4-7). Auf dem Network-Access-Layer wird damit eine Konvertierung zwischen 10Base-T und 10Base-FL durchgeführt. Verwendet wird ein industriell gefertigtes Board mit dem Transceiver ML4668, welcher von der Firma Micro Linear (heute RF Micro Devices) entwickelt wurde.



Abbildung 4-7: Mediakonverter 10Base-T to 10Base-FL

Es gibt auch ein aktuelleres Nachfolgemodell mit dem Chip ML6652, welcher auch 100Base-FX und 100Base-SX unterstützt, für die Analyse von 10Base-FL reicht aber das Board nach Abbildung 4-7 aus. Die LWL-Module wurden abgelötet und an RX (Eingang) und TX (Ausgang) Anschlüsse für den nachfolgenden Lasertreiber und dem Empfänger gelötet. Ebenfalls auf dem Board befindet sich ein Hub Controller, der eine Umsetzung von AUI nach Twisted-Pair durchführt. Der Chip sieht aufgrund der vielen Anschlüsse recht komplex aus, beinhaltet aber einfach nur mehrere Ports für Twisted-Pair und AUI⁴⁴, wovon

⁴⁴ AUI ist eine ältere Spezifikation für eine Hardwareschnittstelle zwischen dem Transceiver und dem Ethernet-Controller (im PC meistens auf dem Motherboard). Der Nachfolger ist die MII bzw. die RMII-Schnittstelle

von beiden Typen nur je eines verwendet wird. Man sieht dies an den in der Abbildung markierten Anschlüsse, welche an die beiden Koppelspulen (16PT-006A und FL1012) angeschlossen sind. Leider steht, trotz Suche im Internet, für das Board kein vollständiger Schaltplan zur Verfügung, daher wird für die Untersuchung das Referenzdesign im Datenblatt verwendet. Das Board ist über den RJ45-Stecker mit dem PC verbunden. Da NLP-Impulse über das Twisted-Pair-Kabel zum PC gesendet werden, erkennt dieser, dass die Ethernet-Schnittstelle des Mediakonverters eine Übertragungsgeschwindigkeit von 10Mbps unterstützt und schaltet seine Netzwerkkarte in diesen Modus.

Empfängt der Medienkonverter am Eingang RX des optischen Interfaces von der Fotodiode keine Daten, so wird am Ausgang TX ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 1MHz zur Gegenstelle gesendet (Idle). Dieses Signal dient der Synchronisierung von Sender und Empfänger. Sobald zwei über RX und TX verbundene Mediakonverter das Signal erkennen, werden die Interfaces aktiv. Beim Senden von Daten geht das 1MHz-Signal nahtlos in die zu übertragenen Bits über. Wäre das Trägersignal nicht vorhanden, so müsste sich der Empfänger bei der Übertragung der Datenbits erst mit dem Sender synchronisieren, d.h. vor den Nutzdaten müssen Synchronisationsbits gesendet werden. Durch das 1MHz-Trägersignal ist das Übertragungssystem bereits synchronisiert und zur Datenübertragung bereit. Abbildung 4-8 zeigt das an RX gemessene Signal, wenn keine

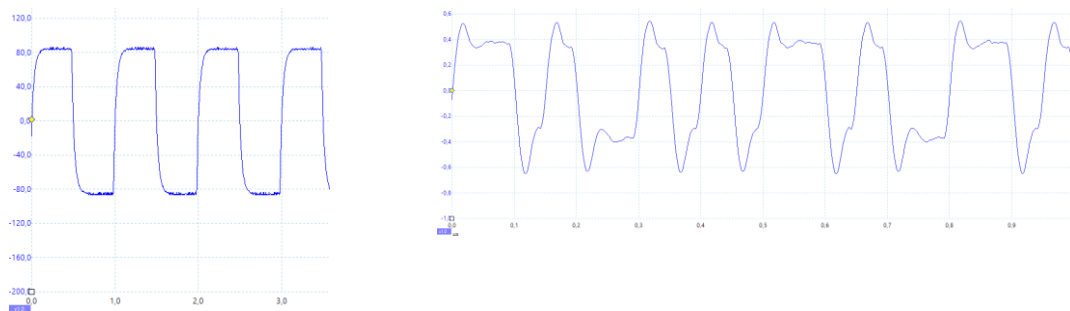


Abbildung 4-8: 10Base-FL (1MHz-Signal und Daten mit Manchestercode)

Datenbits übertragen werden (1MHz-Signal) und wenn eine Datenübertragung mit dem Manchestercode erfolgt. Für FSO eignet sich der Standard ausgezeichnet, da man mit dem unipolaren Signal direkt eine Laserdiode modulieren kann. Durch den verwendeten Manchestercode ist der Gleichanteil im Mittel immer 0V. Da für mehrere aufeinanderfolgende Einsen oder Nullen kein NRZ-Code verwendet wird, muss der Empfänger nur zwischen Impulsbreiten von 100ns und 50ns unterscheiden. Die größere Herausforderung ergibt sich beim Empfänger. Es muss das an der Fotodiode gewonnene schwache Signal wieder auf einen ausreichenden Spannungspegel bringen, damit am Eingang RX (Abbildung 4-7) die von der Gegenstelle gesendeten Datenbits erkannt werden. Wie in 2.10 bei der Reichweitenbetrachtung bereits gezeigt wurde, ist dies für eine 1MHz-Signal kein Problem. Wenn aber Datensignale mit Impulsbreiten von 50ns gesendet, so müssen diese, von der Fotodiode gelieferten, Signale verstärkt werden, da bei 20MHz die durch die Fotodiode gewonnenen Signale bereits stark gedämpft werden.

Abhängig vom Vorwiderstand der Fotodiode und der inneren Kapazität der Fotodiode, erhält man nur mehr kleine Signalspannungen, wobei durch die gegebene Zeitkonstante das Impulsdach des Signals nicht erreicht wird, d.h. der Empfänger muss eine Regeneration des Signals durchführen.

4.1.3 100Base-TX

Nach 10Base-T und 10Base-FL drängten neue Standards mit höheren Bandbreiten, als 10Mbps, auf den Markt und versuchten im LAN-Bereich Fuß zu fassen, um 10Base-T abzulösen. Viele setzten sich aber nicht durch. Etablieren konnte sich 100Base-TX mit 100Mbps. Als Übertragungsmedium wird Kupfer in Form von Twisted-Pair-Kabeln in verschiedenen Kategorien verwendet, welche sich hinsichtlich der verwendbaren Frequenzen unterscheiden. Die Kategorie 5 ist für Fast Ethernet verwendbar. Die Segmentlänge beträgt, wie bei 10Base-T, 100m. Durch die Verwendung von Switches (statt Hubs) können keine Kollisionen mehr auftreten. Es ist gleichzeitiges Senden und Empfangen möglich. Verwendet werden, wie bei 10Base-T, zwei Doppeladern mit derselben RJ45-Steckerbelegung wie 10Base-T (Abbildung 4-2). Die CSMA/CD Kollisionserkennung spielt bei Verwendung von Switchen keine Rolle mehr. Als Codierungsverfahren wird, wie die 4B/5B-Codierung verwendet, welche in 4.1.4 vorgestellt wird. Als Leitungscode kommt MLT-3 zum Einsatz (Abbildung 4-9). Dafür werden drei Spannungsstufen verwendet: +V, 0V und -V.

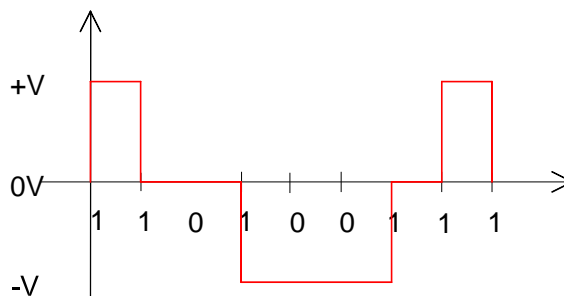


Abbildung 4-9: MLT-3 Code⁴⁵

Der Empfänger muss diese unterschiedlichen Spannungswerte erkennen können. Bei 100Mbps und den zusätzlichen 25Mbps für Kontrolldaten (4B/5B-Code), müsste das Kupferkabel für eine Bandbreite von 125Mhz ausgelegt sein. Durch MLT-3 werden innerhalb einer Periode vier Bits übertragen, daher wird die Bandbreite für das Kupferkabel auf 31,25MHz reduziert. Die kleinste Impulsbreite tritt auf, wenn nur aufeinanderfolgende Ein-

⁴⁵ Quelle: Eigene Darstellung

sen übertragen werden. Die Laserdiode muss dann Impulsbreiten von 8ns übertragen können. Bei jeder logischen Eins erfolgt ein Flankenwechsel, logischen Nullen bewirken keine Änderung.

Eine Taktrückgewinnung ist mit MLT-3 nur schwer möglich, da mehrere aufeinanderfolgende Nullen auftreten können. Daher wird zusätzlich der 4B/5B-Code verwendet, welcher garantiert, dass ausreichend Flankenwechsel auftreten, um ein Taktsignal wiedergewinnen zu können. Der 4B/5B-Code wird beim Standard 100Base-FX in 4.1.4 erklärt. Für die nun folgende Messung werden zwei PCs über ein Twisted-Pair-Kabel verbunden und die Sender an ein Oszilloskop angeschlossen. Damit wird auf dem Internet-Access-Layer das Signal analysiert, welches zwischen den Ethernet-Schnittstellen der gekoppelten PCs gesendet wird. Das Oszilloskop hat eine Bandbreite von 200Mhz. Damit werden Signale mit Impulsbreiten von 8ns verfälscht dargestellt, da die Frequenzen der Oberwellen ein Vielfaches der Grundfrequenz von 125Mhz betragen. Erforderlich wäre ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 1GHz. Leider liegen die Preise dafür

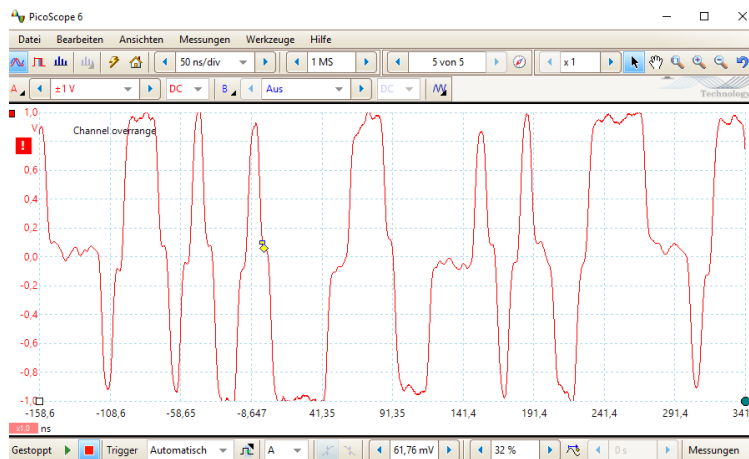


Abbildung 4-10: Gemessener MLT-3 Code

bei astronomischen Höhen. Der Signaltrend ist aber auch mit einem 200MHz-Oszilloskop noch erkennbar. Die Abbildung 4-10 zeigt das ternäre Signal, welches auf der Kupferleitung übertragen wird. Die schmalsten Impulse entsprechen der Impulsbreite von 8ns. Diese treten dann auf, wenn mehrere aufeinanderfolgende Einsen übertragen werden. Für FSO ist der Leitungscode MLT-3 nicht direkt anwendbar, da die Laserdiode keine ternären Zustände übertragen kann. Verwendet man aber für die Übertragung der positiven und negativen Impulse zwei Laserdioden, so ist eine Übertragung auch mit FSO möglich. Dies wird in Abbildung 4-11 dargestellt. Das System besteht aus zwei Lasertreiber, die über den MLT-3-Decoder angesteuert werden. Der Encoder hat folgende Aufgabe: Er muss durch Auswertung der Flanken erkennen, ob der positive oder negative Impuls des MLT-3 Signals vorhanden ist, oder ob das Signal von V+ bzw. V- gegen Masse wechselt und somit als 0V interpretiert werden soll. Auf der Empfangsseite ist es Aufgabe des MLT-3 Encoders, aus

den von den zwei Komparatoren gelieferten Datensignalen wieder ein vollständiges MLT-3 Signal zu generieren und an den PC auf der Empfängerseite weiterzugeben.

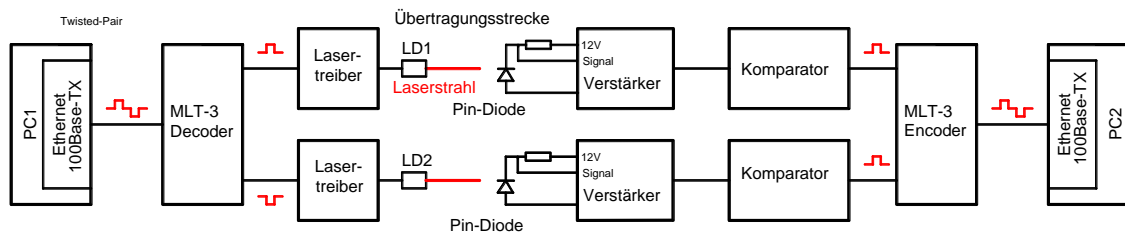


Abbildung 4-11: FSO mit 100Base-TX⁴⁶

Sendet also keine der beiden Laserdioden, so würde dies dem MLT-3-Pegel von 0V entsprechen. Die positiven und negativen Signale werden durch die jeweilige Laserdiode zum Empfänger gesendet. Benötigt wird dafür eine Schaltung, die aus dem ternären MLT-3-Signal die positiven und negativen Impulse decodiert und damit zwei Lasertreiber direkt ansteuert. Auf der Empfängerseite muss eine Logikschaltung aus den getrennt übertragenen Impulsen das MLT-3-Signal generieren. Am Ausgang des MLT-3 Decoders steht jeweils nur das positive oder negative Signal zur Verfügung. Daher sendet zu einem Zeitpunkt immer nur eine Laserdiode. Die Impulsbreiten hängen außerdem nur von der Anzahl aufeinanderfolgender 0-Bits ab, da nur die 1-Bits einen Flankenwechsel erfordern. Der MLT-3 Encoder muss die empfangenen Impulse wieder in ein MLT-3 Signal umwandeln.

4.1.4 100Base-FX und 100Base-SX

Diese beiden Standards verwenden zwei LWL-Kabel, eines in Sende- und eines in Empfangsrichtung. Der Unterschied zwischen den beiden Standards liegt in den Wellenlängen der verwendeten Sendedioden und der Länge der LWL-Kabel. 100Base-SX verwendet anstatt der teureren Laserdioden LEDs mit einer Wellenlänge von 850nm. Diese sind günstiger im Preis, das Kabel darf aber nur 300m lang sein (Multimodefaser). 100Base-FX arbeitet bei einer Wellenlänge der Laserdioden von 1300nm und die Länge der LWL-Strecke beträgt maximal 2000m (Monomodefaser). Es werden nun anhand eines Laboraufbaus die gesendeten Lichtimpulse im LWL-Kabel analysiert. Zum Einsatz kommen dafür zwei Medienkonverter der Firma TP-LINK MC 100CM (Abbildung 4-12), welche über LWL miteinander verbunden sind. Für das Senden und Empfangen von Daten wird für jede Richtung eine Faser benötigt, da die Laserdioden für beide Richtungen die gleiche Wellenlänge verwenden, somit würde es in einer gemeinsamen LWL-Ader zu Beeinflussungen kommen. Der Testaufbau entspricht einem realen Einsatz des Mediakonverters in der Praxis.

⁴⁶ Quelle: Eigene Darstellung

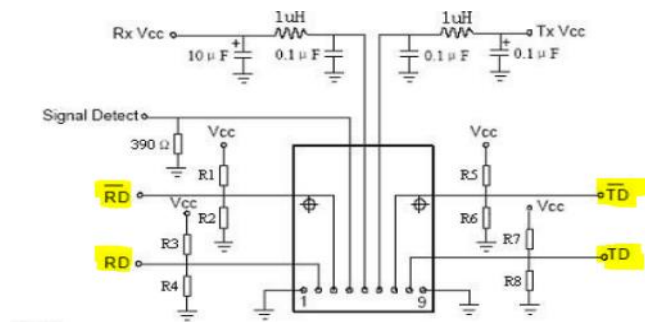


Abbildung 4-12: Transceiver Modul für 100BaseFX

Auf der Platine befindet sich der Chip IP113A und der Transceiver HDTR-03-33F11LF (Abbildung 4-12) mit der Sende- und Empfangsdiode. Am Anschluss RD liegt das von der Fotodiode empfangene Signal und an TD das Sendesignal des Medienkonverter-Chips. Für das Oszilloskop kann an diesen Kontakten direkt jenes Signal abgegriffen werden, welches über das LWL-Kabel in Sende- und Empfangsrichtung übertragen wird.

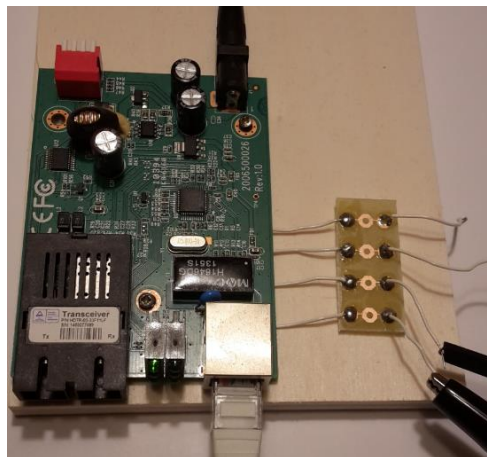


Abbildung 4-13: Messung der Datensignale am Mediakonverter für 100Base-SX

Die vom PC gesendeten Datenpakete werden in serieller Form an die Ethernet-Schnittstelle des Medienkonverters übergeben. Aus dem seriellen Datenstrom werden immer 4 Bits entnommen (Nibble) und ein Mapping in den 4B/5B-Code durchgeführt. Dies ist erforderlich, da für Empfänger sonst keine Taktrückgewinnung möglich wäre, wenn die Nutzdatenbits nur aus Nullen bestehen würden. So darf es nicht mehr als eine führende „0“ und nicht mehr als zweimal eine abschließende „0“ geben (Abbildung 4-14). Durch das zusätzliche Bit in jedem Datensymbol ergibt sich eine Brutto-Übertragungsrate von 125Mbit. 16 von 32 möglichen Kombinationen werden für die Nutzdaten verwendet und sechs von den übrigen Kombinationen dienen Steuerzwecken.

Der 4B/5B-Code wird als NRZI-Codierung übertragen. Diese bildet den Leitungscode. Bei den 1-Bits erfolgt ein Signalwechsel, bei 0-Bits gibt es keine Änderungen. In der nun

folgenden Messung werden vom Netzwerkgerät erst einmal keine Daten gesendet, daher wird das Symbol „11111“ übertragen. Durch die Verwendung von NRZI⁴⁷ reduziert sich die Bandbreite, welche von der Sendediode verarbeitet werden muss, von 125Mhz auf 62,5Mhz. Die Laserdiode müsste, bei einer Frequenz von 125Mhz, Impulsbreiten

Daten		4B5B Code
Hexadezimal	Binär	
0	0000	11110
1	0001	01001
2	0010	10100
3	0011	10101
4	0100	01010
5	0101	01011
6	0110	01110
7	0111	01111
8	1000	10010
9	1001	10011
A	1010	10110
B	1011	10111
C	1100	11010
D	1101	11011
E	1110	11100
F	1111	11101
		11111 Idle
		11000-10001 Start of Stream
		01101-00111 End of Stream
		00100 Transmit Error

Abbildung 4-14: 4B/5B-Codierung

von 4ns verarbeiten, mit NRZI reduziert sich die erforderliche Bandbreite. Die (Abbildung 4-15) zeigt als Beispiel den 4B/5B-Code für das Symbol „0“ im NRZI-Code. Immer bei den 1-Bits wechselt die Flanke, bei der letzten binären Null des Symbols erfolgt keine Änderung. Durch die 4B/5B-Codierung erhöht sich für die Übertragung von Information zwar die erforderliche Bandbreite, man hat aber durch die zusätzlichen Bits den Vorteil, dass neben der Möglichkeit der Taktrückgewinnung auch Steuerinformationen im Leitungscode übertragen werden können. So beginnt beispielsweise ein Datenrahmen mit dem Steuercode „Start of Stream“ bzw. endet mit „End of Stream“, oder es werden fehlerhafte Übertragungen mit dem Steuercode „Transmit Error“ angezeigt. Damit können auf Hardwareebene Statusinformationen und Informationen für die Synchronisation zwischen den Kommunikationspartnern ausgetauscht werden. Der Informationsaustausch erfolgt somit auf Hardwareebene, wobei aber kein Protokoll verwendet wird. Es werden nur Statusinformationen beim Empfänger ausgewertet, eine Rückmeldung an den Sender erfolgt keine. Ansonsten wäre es nicht möglich das System für FSO im Simplexbetrieb zu betreiben, um Daten nur in eine Richtung zu übertragen.

⁴⁷ NRZI ist ein Codierverfahren, bei dem ein 1-Bit einen Signalwechsel durchgeführt wird, bei einem 0-Bit erfolgt kein Wechsel

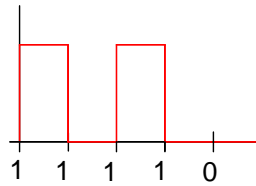


Abbildung 4-15: NRZI-Code für das Symbol „0“⁴⁸

Bei der nun folgenden Messung werden UDP-Pakete über die Ethernet-Schnittstelle des PCs an den Medienkonverter gesendet und die Signale direkt am Transceiver gemessen (Abbildung 4-16). Ein Flankenwechsel tritt nur bei einer logischen Eins auf, bei logischen Nullen gibt es keine Änderung. Es handelt sich um einen NRZI-Code, daher ist es für den Empfänger wichtig, dass die Impulszeiten der empfangenen Signale zeitlich passen, da die Information in den Impulsbreiten liegt. Dieses Signal könnte nun für FSO verwendet werden, um eine Laserdiode mit einem für die hohe Frequenz

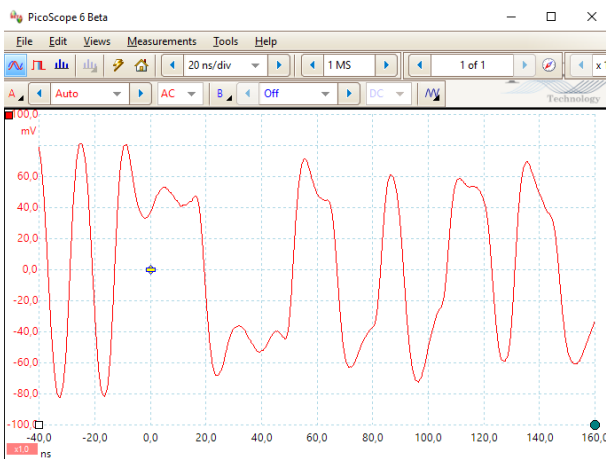


Abbildung 4-16: 100Base-FX mit NRZI-Code

geeigneten Treiber direkt zu modulieren. Die Sendediode muss natürlich diese steilen Flanken verarbeiten können, also den Impuls in entsprechende Lichtleistung umsetzen. Die Impulse sind zeitkritisch, vor allem wenn mehrere Nullen in Folge übertragen werden. Der Empfänger benötigt saubere Impulsbreiten mit einem Vielfachen von 8ns, um den ursprünglichen Bit-Datenstrom wiedergewinnen zu können. Dies gilt auch für die Taktrückgewinnung. Nur über den Takt kann die Schaltung im Chip feststellen, wieviel Nullen in Folge übertragen wurden. Beim Manchestercode ergibt sich dieses Problem nicht, da bei jedem übertragenen Bit mindestens ein Flankenwechsel erfolgt, aber auch die erforderliche Bandbreite verdoppelt wird.

⁴⁸ Quelle: Eigene Darstellung

5 Systemkonzept

Es soll nun ein Konzept für die Übertragung von Daten mittels FSO entwickelt werden. Bei den in Kapitel 4 untersuchten IEEE-Standards wurde, als für FSO praktikabelster Standard, 10Base-FL ausgewählt. 10Base-FL mit einer maximalen Übertragungsgeschwindigkeit von 10Mbit/s ist gegenüber den anderen untersuchten IEEE-Standards zwar langsam in der Übertragungsgeschwindigkeit, aber einfacher in der Umsetzung, da die Anstiegszeiten der Signale moderat sind und daher für die Implementierung Bauteile verwendet werden können, die das Budget des Studenten etwas schonen. Die Standards 100Base-TX und 100BASE-FX benötigen z.B. elektronische Komponenten, deren Anstiegszeiten kleiner 8ns sind, während für 10Base-FL gängige Logikbausteine mit Anstiegszeiten 50ns verwendet werden können. Zusätzlich macht sich bei hohen Frequenzen die Dämpfung des Signals an der Fotodiode immer stärker bemerkbar.

Die für 10Base-FL verwendete Manchesterkodierung hat einige entscheidende Vorteile:

- Direkte Modulierbarkeit der Laserdiode mit dem Leitungscode
- Im Mittel Gleichanteilsfreiheit
- Einfache Taktrückgewinnung am Empfangsort
- Einfache Regenerierung der empfangenen Impulse
- Robustheit gegenüber Störungen des Übertragungskanals
- Geringe zeitliche Abhängigkeit von der Impulsbreite des Signals

5.1 Systemübersicht

Das FSO-Übertragungssystem setzt sich aus mehreren Modulen zusammen (Abbildung 5-1) und ist auf der Sende- und Empfangsseite identisch aufgebaut. Werden nur UDP-Datenpakete in eine Richtung gesendet, so benötigt man ein Sende- und Empfangssystem. Dies ist der Fall, wenn Broadcasting⁴⁹ betrieben wird. Für TCP-Pakete ist, wegen der erforderlichen Quittierungen, auch ein Rückkanal erforderlich. Zentrales Element ist der Transceiver-Modul, der die gesamte Signalkonvertierung von 10Base-T zu 10Base-FL durchführt. Um ihn herumgebaut ist ein Vorverstärker zur Verstärkung des sehr schwachen Signals an der PIN-Diode. Der Lasertreiber wird vom Transceiver direkt angesteuert und liefert den notwendigen Treiberstrom für die Laserdiode. Es kann aber auch der interne Treiber des Transceivers verwendet werden, da dieser bis zu 100mA liefern kann.

⁴⁹ Übertragung von Datenpaketen zu mehreren Teilnehmern

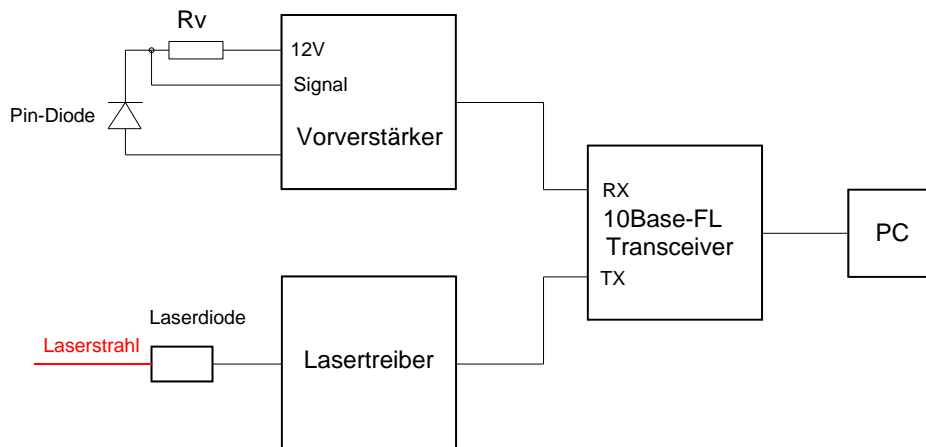


Abbildung 5-1: FSO-Übertragungssystem mit 10Base-FL⁵⁰

5.2 Vorverstärker

Der an der PIN-Diode eintreffenden Manchestercode muss über den Vorverstärker auf einen Signalpegel gebracht werden, damit die anschließende Schaltung die steigenden und fallenden Impulse auswerten kann. Der Vorverstärker liefert ein unipolares Ausgangssignal, welches, im Rhythmus der eintreffenden Lasersignale, zwischen dem 0- und 1-Pegel wechselt. Dieses wird an den Transceiver übergeben. Damit das von Lampen erzeugte künstliche Licht nicht zu Übertragungsstörungen führt, benötigt der Vorverstärker einen Filter, um das künstliche, mit 50Hz schwingende, Umgebungslicht auszufiltern. Dafür reicht ein Hochpassfilter, bestehend aus einem Kondensator und einem gegen Masse liegenden Widerstand. Das gefilterte Signal wird dann einem Verstärker mit hohem Eingangswiderstand zugeführt. Verwendet wird dafür eine einfache Verstärkerstufe, bestehend aus einem FET-Transistor. Die weitere Verarbeitung des Signals erfolgt durch das Transceiver-Modul.

5.3 10Base-FL Transceiver

Der Transceiver (Abbildung 5-2) beinhaltet die gesamte Logik, um in Sende- und Empfangsrichtung eine Konvertierung zwischen 10Base-FL und 10Base-T durchzuführen. An TPIN wird das Manchestersignal kommend vom PC eingespeist. RX SQUELCH TP leitet das Signal aber erst weiter, wenn ein bestimmter Pegel an TPIN ansteht. Damit wird verhindert, dass eventuelle Störsignale, die unter einem Mindestpegel liegen, als Nutzsignale

⁵⁰ Quelle: Eigene Darstellung

interpretiert werden. Sendet der PC keine Daten, so stehen NLPs an TPIN an. Der LINK PULSE CHECK erkennt diese Impulse und veranlasst den IDLE GENERATOR ein 1MHz-Signal über die Treiberschaltung OP TX an OPOUT, an den Treiber der Laserdiode auszugeben. Treffen Daten an TPIN ein, so wird das Senden des 1MHz-Signals gestoppt und die Daten über OPOUT und OPVCC zur Laserdiode gesendet. Sind die Sendeader TX+ und TX- vom PC kommend vertauscht, so wird dies über POLARITY CORRECT automatisch korrigiert.

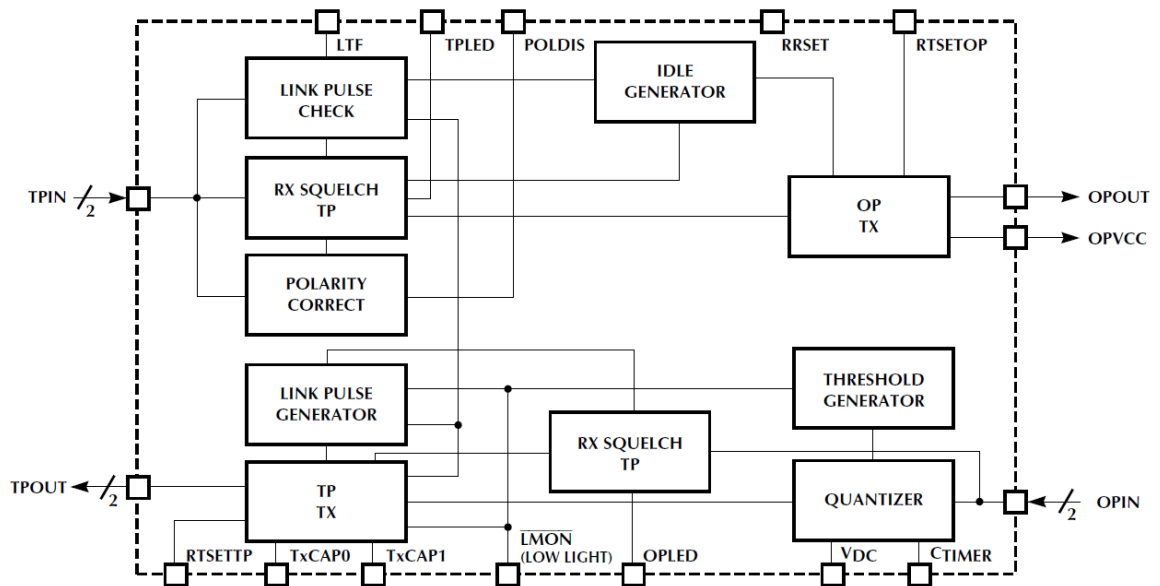


Abbildung 5-2: 10Base-FL Transceiver⁵¹

Bei einer Vertauschung der Sendeader des Twisted-Pair Kabels, würde das Netzwerkgerät ansonsten die empfangenen Bits falsch interpretieren. Die vom Lasertreiber gesendeten Signale werden nach der Vorverstärkung an OPIN weitergeleitet. Der QUANTIZER muss Signale mit einem hohen Dynamikbereich erkennen, da diese bei FSO durch Wetterbedingungen stark schwanken können. Die Signale gehen weiter zu TP TX und werden wieder in ein differentielles Signal gewandelt und an TPOUT ausgegeben. Über ein Twisted-Pair-Kabel erhält die Netzwerkkarte des PCs die Daten. Diese erkennt anhand der 8 Byte langen Präambel im Ethernetrahmen den Beginn der Nutzdaten und übergibt diese über die Hardware-Schnittstelle der Netzwerkkarte an das Motherboard. Der TCP/IP-Stack, gesteuert durch Prozesse im Betriebssystem, ist dann verantwortlich die Daten zu extrahieren und im entsprechenden Layer des TCP/IP-Modells zu behandeln. Der IC des Transceivers führt somit eine Vielzahl an Aufgaben und man vermeidet den hohen Aufwand einer Eigenentwicklung.

⁵¹ [18] Seite 1

5.4 Lasertreiber

Die Sendeimpulse des Moduls 10Base-FL steuern über einen Lasertreiber die Laserdiode an. Da das Manchester-Signal für 10Mbps eine Bandbreite von 20MHz erfordert, muss der Treiber Impulse von 50ns verarbeiten können. Man könnte den Aufbau in diskreter Technik mit Transistoren durchführen, dies ist aber in Anbetracht der hohen Frequenzen nicht günstig, da die Gestaltung des Layouts der Platine mit diskreten Bauteilen im HF-Bereich sich nicht sehr einfach gestaltet. Parasitäre Kapazitäten führen rasch zu eigenem Schwingverhalten durch Rückkopplung. Daher wird ein spezieller IC für die Ansteuerung der Laserdiode verwendet. Der Treiber-IC muss folgende Anforderungen erfüllen:

- CMOS-Eingänge
- Strombegrenzung zum Schutz der Laserdiode
- Steile Flanken des Treiberstromes
- Abschaltung bei Übertemperatur
- Direkter Anschluss der Kathode
- Verarbeitung hoher Impulsfrequenzen
- Lieferung hoher Impulsströme

Auf dem Markt wird eine Vielzahl von Lasertreibern angeboten. Die Auswahl des ICs erfolgt im Kapitel für die Implementierung eines FSO-Systems.

5.5 Hilfsmittel zu Strahlformung

Der Strahl von Laserdioden weist eine Divergenz bei der Ausbreitung des Lichtes auf. Das Auseinanderlaufen des Strahls wird durch Winkelangaben beschrieben. Je nach Geometrie des Resonators im Halbleiterlaser können die Raumwinkel unterschiedliche Werte aufweisen. Auf der Übertragungsstrecke muss der Laser eine geringe Divergenz haben, um am Empfangsort eine möglichst kleine Bestrahlungsfläche zu erreichen, damit mit optischen Hilfsmitteln die gesamte Lichtenergie auf die Fotodiode gebündelt werden kann. Zur Bündelung des Strahls wird ein Kollimator (Abbildung 5-3) verwendet. Er besteht aus einer kleinen optischen Linse zur Parallelisierung des Strahlverlaufs. Durch ein Gewinde wird deren Abstand zur Laserdiode feinjustiert. Damit kann der Strahl fokussiert werden. Am Empfangsort möchte man einen möglichst hohen Prozentsatz des Lichtes wieder in ein elektrisches Signal umwandeln. Um dies zu erreichen, wird eine konvexe Linse mit möglichst großem Durchmesser verwendet. Die PIN-Diode befindet sich dabei im Brennpunkt der Sammellinse. Je genauer die Fokussierung erfolgt, umso größer ist die Anforderung an die mechanische Befestigung der Komponenten. Kleine Erschütterungen können zu einer großen Abweichung des Laserstrahls führen. Ideal wäre, wenn keine optischen Hilfsmittel erforderlich wären, bei der Reichweitenbetrachtung im früheren Kapitel wurden aber bereits die kleinen Spannungspegel erwähnt, die man an der PIN-Diode, trotz Sammellinse, erhält.



Abbildung 5-3: Kollimator zur Strahlformung⁵²

Man befindet sich in einem Dilemma. Ohne Sammellinse ist das Signal an der Fotodiode in einem größeren Abstand extrem klein, mit Sammellinse erhält man einen Signalpegel im mV-Bereich, es besteht aber Brandgefahr bei starker Sonneneinstrahlung, wenn die mechanische Befestigung versagt und die Sammellinse eine ungünstige Position in einem Bereich mit entzündlichen Stoffen einnimmt. Verwendet man keine Linse, dafür aber einen stärkeren Laserstrahl, so findet man sich in den gefährlichen Laserklassen wieder, wo Gefahr für die Augen besteht. Weicht man in den Infrarotbereich aus, so besteht bei entsprechender Laserleistung eine noch größere Gefahr für das Auge, da der Lidschlusseffekt nicht zum Tragen kommt und man hat zudem noch das Problem, dass die Ausrichtung des Laserstrahls durch den unsichtbaren Strahl erschwert wird. Der Idealfall wäre eine Matrix, bestehend aus PIN-Dioden. Leider können nicht einfach mehrere Fotodioden parallelgeschaltet werden, da dann durch die erhöhte Kapazität der Fotodioden Tiefpasseigenschaften auftreten und es zu einer Dämpfung des hochfrequenten Signals kommt. Für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden Laserdioden der Klasse 2 verwendet. Dadurch erhält man an der PIN-Diode am Empfangsort ein starkes Signal. Natürlich können diese Laserdioden nicht in käuflichen Systemen für einfache Anwender eingesetzt werden, da man nicht erwarten kann, dass diese eine Laserschulung erfahren haben. Die technischen Prinzipien sind jedoch, unabhängig von der verwendeten Laserklasse, die gleichen. Es werden in der Praxis Laserdioden der Klasse M1 verwendet, oder, wer es ganz sicher haben möchte, LEDs. Kostengünstige LEDs mit starker Leuchtkraft gibt es jedoch nur bis Frequenzen bis 20MHz und der Einsatz ist nur für Strecken bis ca. 15m sinnvoll. Zusätzlich werden am Sendestandort optische Linsen benötigt, die ihrem Durchmesser mindestens der Größe der LED entsprechen. Kollimatoren wie in der Abbildung 5-3 sind für LEDs nicht geeignet.

⁵² http://www.roithner-laser.com/datasheets/ld_acc/lda-56.pdf

6 Implementierung für 10Base-FL

Das im vorangegangenen Kapitel entworfene Konzept soll in der nun folgenden Implementierungsphase umgesetzt werden. Das Blockschaltbild in Abbildung 6-1 zeigt die Module für die Realisierung des FSO-Systems. Zentrales Element ist ein Mediaconverter für 10Base-FL. Er wird durch entsprechende Beschaltung tauglich für die FSO-Übertragung gemacht. Dafür sind die entsprechenden Module in Form von Prototypen zu erstellen und auf ihre Funktion zu testen.

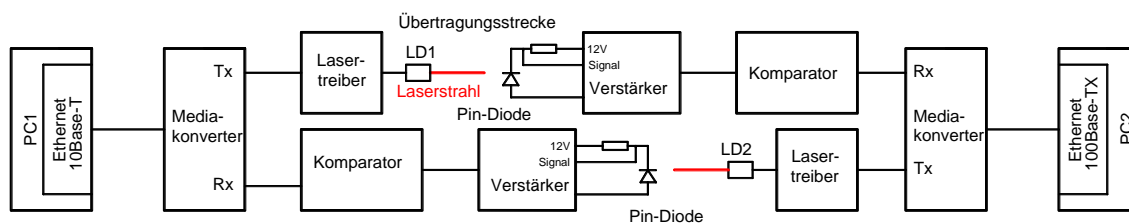


Abbildung 6-1: FSO mit 10Base-FL⁵³

6.1 Empfangsschaltung

Das am Empfangsort eintreffende optische Signal der Laserdiode muss mit einer dafür geeigneten Empfangsschaltung in ein elektrisches Signal gewandelt werden. Wichtigstes Element dafür ist die PIN-Diode. Abhängig wieviel Licht auf die lichtempfindliche Fläche des Halbleiterelementes auftritt, sind in der Regel Spannungswerte im mV- bzw. μ V-Bereich zu erwarten. Diese kleinen Signale müssen verstärkt werden, um eine logische Auswertung in den nachfolgenden Komponenten zu ermöglichen. Die Funktionalität dafür erfüllt der elektrooptische Wandler. Als Fotoelement für den Vorverstärker wird die PIN-Diode SFH-206 verwendet. Mit einer aktiven Fläche von 7.02mm^2 stellt sie einen guten Kompromiss zwischen spektraler Empfindlichkeit und kapazitivem Widerstand dar. Bekanntlich steigt der Wert der inneren Kapazität, je größer die lichtempfindliche Fläche ist. Der spektrale Bereich der Fotodiode reicht von 400 bis 1100nm und die maximale Lichtausbeute liegt bei der Wellenlänge von 850nm im Infrarotbereich. Für Laserdioden mit einer Wellenlänge von 635nm, also im sichtbaren Bereich, liegt die Empfindlichkeit bei 60%. Das von der Fotodi-

⁵³ Quelle: Eigen Darstellung

ode gelieferte Signal ist sehr schwach und muss über einen Vorverstärker auf einen Spannungspegel gebracht werden, damit ein nachgeschalteter Komparator⁵⁴ steile Flanken des Signals erzeugen kann. Die SFH206 hat laut Datenblatt (Abbildung 6-2) ohne Vorspannung eine Kapazität von 74pF und mit einer Vorspannung von 12V reduziert sich diese auf 15pF. Die Anstiegs- und Abfallzeit der Fotodiode beträgt 20ns.

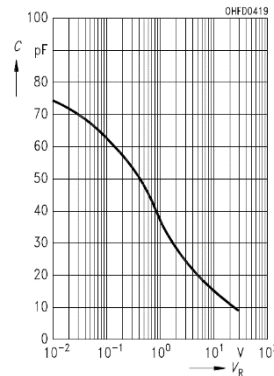


Abbildung 6-2: Kapazität der Fotodiode SFH206 in Abhängigkeit von V_R

Damit können Frequenzen bis 50Mhz verarbeitet werden, also ausreichend um ein Manchester-Signal von 20Mbps zu übertragen. Fällt kein Laserstrahl auf Fotodiode, so hat sie einen hohen ohmschen Widerstand. Bei Bestrahlung liefert sie nur kleine Ströme von 80nA/lx. Der anschließende Vorverstärker (Abbildung 6-3), bestehend aus einem FET-Transistor, muss einen hohen Eingangswiderstand haben, da ansonsten durch den belasteten Spannungsteiler das Signal an der PIN-Diode zu stark gedämpft würde. Wichtig in der Schaltung ist der Kondensator C5. Er wird benötigt, damit der im Rhythmus des Signals sich ändernde Fotostrom nicht über die Spannungsversorgung geführt wird, da parasitäre Kapazitäten der Spannungsquelle das Signal dämpfen können. Ebenfalls eine wichtige Funktion erfüllt der Hochpassfilter bestehend aus C6 und R1. Von Lampen produziertes Licht schwankt in der Helligkeit, mit einer Frequenz von 50Hz und würde Störungen beim Empfang der Lasersignale verursachen. Der Hochpassfilter blendet diese aus und liefert an den Eingang des FET das hochfrequente Nutzsignal. Das verstärkte Signal wird an R5 mit den Kondensatoren C3 und C4 ausgekoppelt und an den Komparator weitergeleitet. Mit den Widerständen R4 und R1 kann das an der Fotodiode gewonnene Signal an die Übertragungsstrecke und der Signalform angepasst werden. Wird R4, wie in der Abbildung, mit 100k Ω sehr hoch gewählt, so erhält man eine hohe Signalspannung an der Fotodiode, das Signal erreicht aber nicht die volle Höhe des Impulsdaches. Die Größe dieses Widerstandes wird experimentell ermittelt, da, abhängig von der zu überbrückende Übertragungstrecke, ein Übersteuern des Empfängers verhindert werden muss und gleichzeitig die Erkennung

⁵⁴ Vergleicht zwei Spannungen und liefert ein binäres Ausgangssignal

50- und 100ns-Impulse ebenfalls vom Vorwiderstand abhängen.

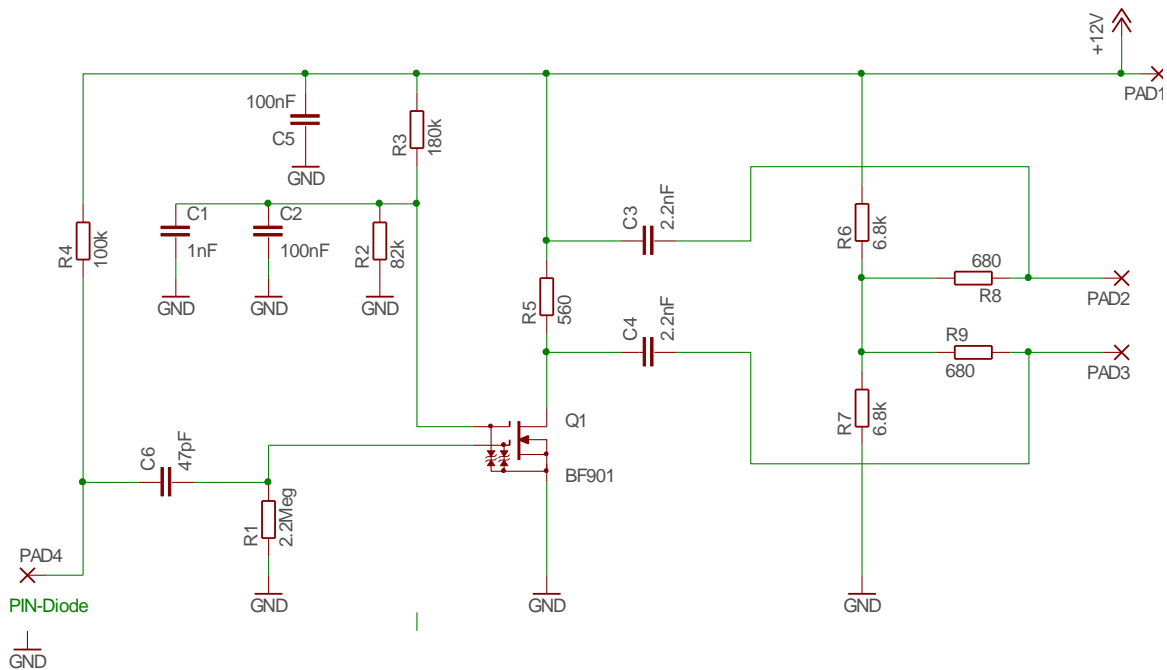


Abbildung 6-3: FSO-Vorverstärker⁵⁵

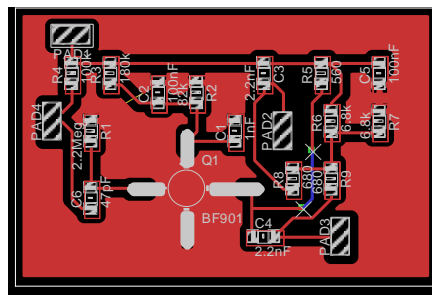


Abbildung 6-4: Platinenlayout des FSO-Vorverstärkers⁵⁶

Sein Wert wird solange reduziert, bis das am Ausgang des Vorverstärkers gelieferte Manchester-Signal vom Medienkonverter sicher erkannt wird. Die Zeitkonstante hängt ab von R4 und der inneren Kapazität der Fotodiode. Der Hochpass, bestehend aus C6 und R1 blockiert niederfrequenten Licht, welches von 50Hz-Lampen herrühren kann. Die Widerstände R2 und R3 stellen den Arbeitspunkt des FET-Transistors ein. An R5 erhält man das verstärkte Manchester-Signal. Dieses wird über die Kondensatoren C3 und C4 ausgekoppelt und dem Komparator zugeführt. Die Platine mit der aufgelöteten PIN-Diode wird auf eine

⁵⁵ [17] Seite 1

⁵⁶ Eigene Darstellung, erstellt mit EAGLE

Halterung montiert und in den Brennpunkt der Sammellinse des Empfängers gebracht.

6.2 Treiberschaltung für Laserdioden

Als Treiberschaltung für den optischen Sender wird ein von der Firma iCHaus angebotener IC verwendet. Damit können Laserdioden mit einer Frequenz von bis zu 150Mhz moduliert werden.

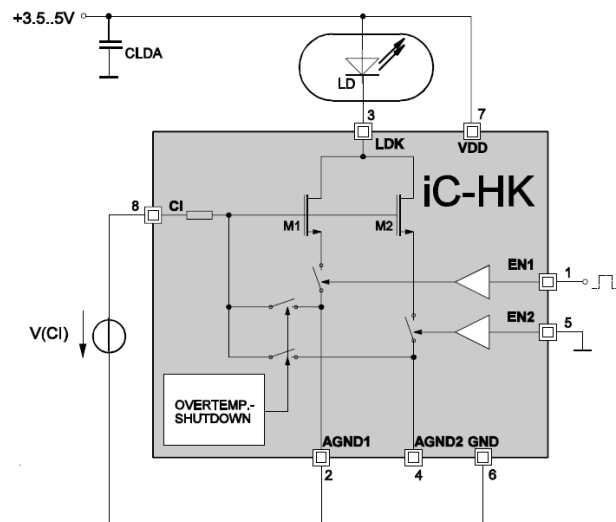


Abbildung 6-5: Blockschaltbild Lasertreiber⁵⁷

An den Eingang EN1 wird das digitale Signal herangeführt. Die Kathode der Laserdiode wird an LDK angeschlossen und AGND1 mit Masse verbunden. Ein High-Signal an EN1 schaltet den symbolisch angedeuteten Transistor durch und damit die Laserdiode ein. Die Anstiegs- und Abfallzeit des Laserstromes beträgt maximal 1,5ns, erlaubt also sehr schnelle Schaltvorgänge. Zusätzlich schützt der IC durch interne Schaltungen die Laserdiode vor Zerstörung. Schon kurze Stromspitzen können die LD dauerhaft beschädigen. Der Spannungsteiler R3/R4 legt über den Eingang VCI den maximalen erlaubten Strom der LD fest. TP1 und TP5 sind Mess- und Anschlusspunkte. Über den Eingang EN1 können digitale Signale mit einer Amplitude von bis zu 6V eingespeist werden, somit sind Signalquellen mit TTL-Pegel zur Ansteuerung verwendbar. Die Einstellung des Laserstroms erfolgt nach dem Kennlinienfeld des Datenblattes. Für die experimentelle Analyse wird der Laserstrom mit maximal 100mA festgelegt. Am Eingang V(CI) muss dafür eine Spannung von 1,75V anliegen. Der PIN AGND1 wird direkt an Masse gelegt, da laut Kennlinie kein Lastwiderstand ($RKx=0\Omega$) benötigt wird. Für den Treiber-IC musste im Programm „Eagle⁵⁸“ ein eigenes

⁵⁷ [19] Seite 1

⁵⁸ Software bestehend aus Layout-Editor, Schaltplan-Editor und Autorouter

„Device“ erstellt werden, damit die Anschlüsse (PINs) mit den externen Bauteilen verknüpfbar sind und auch ein Platinen-Layout erstellt werden kann. Die verwendeten Widerstände und Kondensatoren sind in SMD⁵⁹-Technik gefertigt und werden auf der geätzten Kupferplatine an der Oberseite verlötet. Die Lötunkte TP1 bis TP5 dienen dem

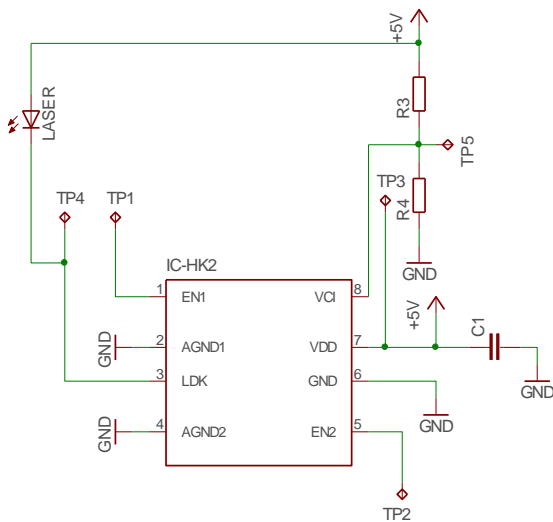


Abbildung 6-6: Lasertreiber⁶⁰

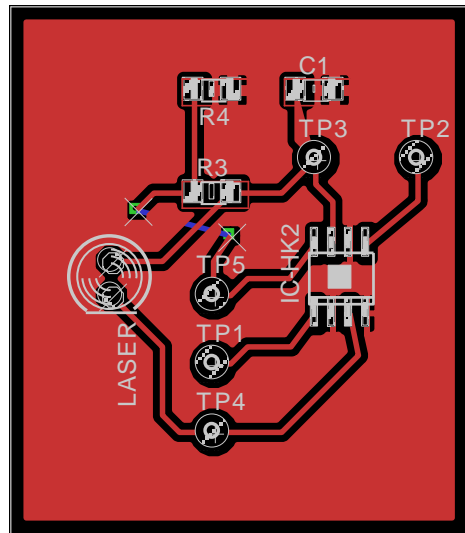


Abbildung 6-7: Platinenlayout⁶⁰

Anschluss von Stromversorgung und Ausgangssignal. Die in den Schaltungen verwendeten SMD-Bauteile haben den Vorteil, dass keine parasitären Kapazitäten und Induktivitäten auftreten, die sich bei Frequenzen im MHz-Bereich negativ bemerkbar machen. Damit können Eigenschwingungen der Schaltungen vermieden werden und die verwendeten Impulse zeichnen sich durch saubere Flanken aus. Das Löten der Schaltungen ist mit SMD-Technik zwar etwas schwieriger, aber mit geeigneten Lötspitzen machbar. Es ergibt sich auch eine Zeitersparnis, da keine Bohrungen für das durchstecken der Drähte erforderlich sind.

6.3 Komparator

Das am Ausgang des FSO-Vorverstärkers (Abbildung 6-3) gewonnene Signal sollte ein Signal mit kurzen Anstiegszeiten liefern. Die Signalform hängt aber davon ab, welcher Wert für die Widerstände R4 (Abbildung 6-6) gewählt wurde. R4 und die innere Kapazität der Fotodiode bestimmen die Zeitkonstante $\tau = RC$. Ein hoher Wert von R4 bewirkt, dass am Fotelement trotz des kleinen Fotostroms eine hohe Spannungsdifferenz zwischen den High-Low-Signalen auftritt, gleichzeitig wird aber das Impulsdach nicht erreicht. Man erhält nur einen Teil der vollständigen Ladekurve (Abbildung 6-8). Bei Daten, wo mehrere 0-Bits

⁵⁹ Surface Mounting Devices

⁶⁰ Quelle: Eigen Darstellung erstellt mit Eagle

oder mehrere 1-Bits übertragen werden, muss der Komparator die Differenzspannung auswerten können. Man erkennt deutlich, dass bei einem Widerstandswert von 180Ω

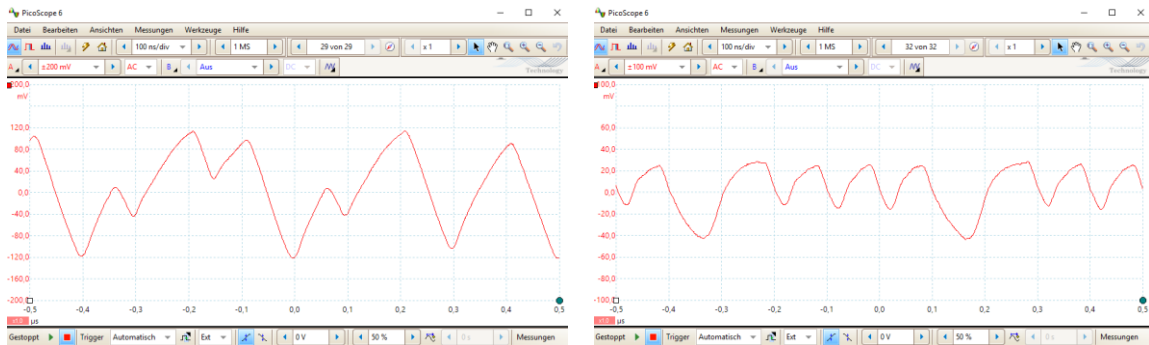


Abbildung 6-8: Vorwiderstand an Fotodiode $R_V = 1k\Omega$ und 180Ω

zwar das Impulsdach erreicht wird, die Flankensteilheit des Signals lässt aber immer noch den exponentiellen Anstieg am Oszilloskop erkennen. Zusätzlich verringert sich die Spannung des Signals von 240mV auf etwa 60mV. Bei der Messung betrug der Abstand zwischen Laser und Empfänger ca. 15m. Um aus dem Signal steile Flanken zu gewinnen, kann am Ausgang des Vorverstärkers ein Komparator angeschlossen werden. Verwendbar ist dafür der Videoverstärker-IC NE592. Er unterstützt eine Bandbreite von 120 MHz.

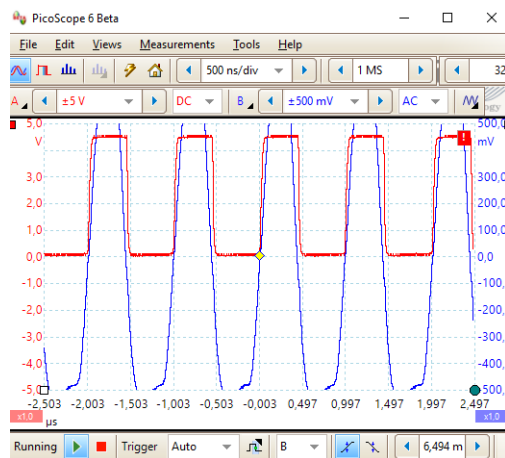


Abbildung 6-9: Zuschaltung eines Komparators (NE592)

Die Abbildung 6-9 zeigt das Signal von 1MHz (Idle) wenn keine Daten gesendet werden. Am Ausgang des Komparators erhält man die gewünschten steilen Rechteckimpulse mit einer Amplitude von ca. 4,5V. Werden diese sauberen Impulse dem Eingang des Medienkonverters zugeführt, so erkennt dieser sofort das IDLE-Signal und setzt das Interface auf einen aktiven Zustand. Treffen nun Datensignale von PC ein, so geht das IDLE-Signal direkt in die zu übertragen Datensignale über.

6.4 Mediakonverter

Das am Komparator gewonnene Signal wird dem Mediakonverter übergeben (Abbildung 6-10). An den Eingängen 26, 27 wird das Empfangssignal angeschlossen. Es besteht auch die Möglichkeit, bei entsprechende kleinen Vorwiderstand der Fotodiode an diesen Eingängen direkt das Signal des Vorverstärkerausgangs zu verwenden, da der Mediakonverter bereits Signalamplituden von $2mV_{p-p}$ durch den internen Verstärker erkennen kann. Der industriell gefertigte Medienkonverter setzt intern die Signale des AUI-Interfaces in Twisted-Pair-Signale um und liefert diese direkt dem angeschlossenen Netzwerkgerät.

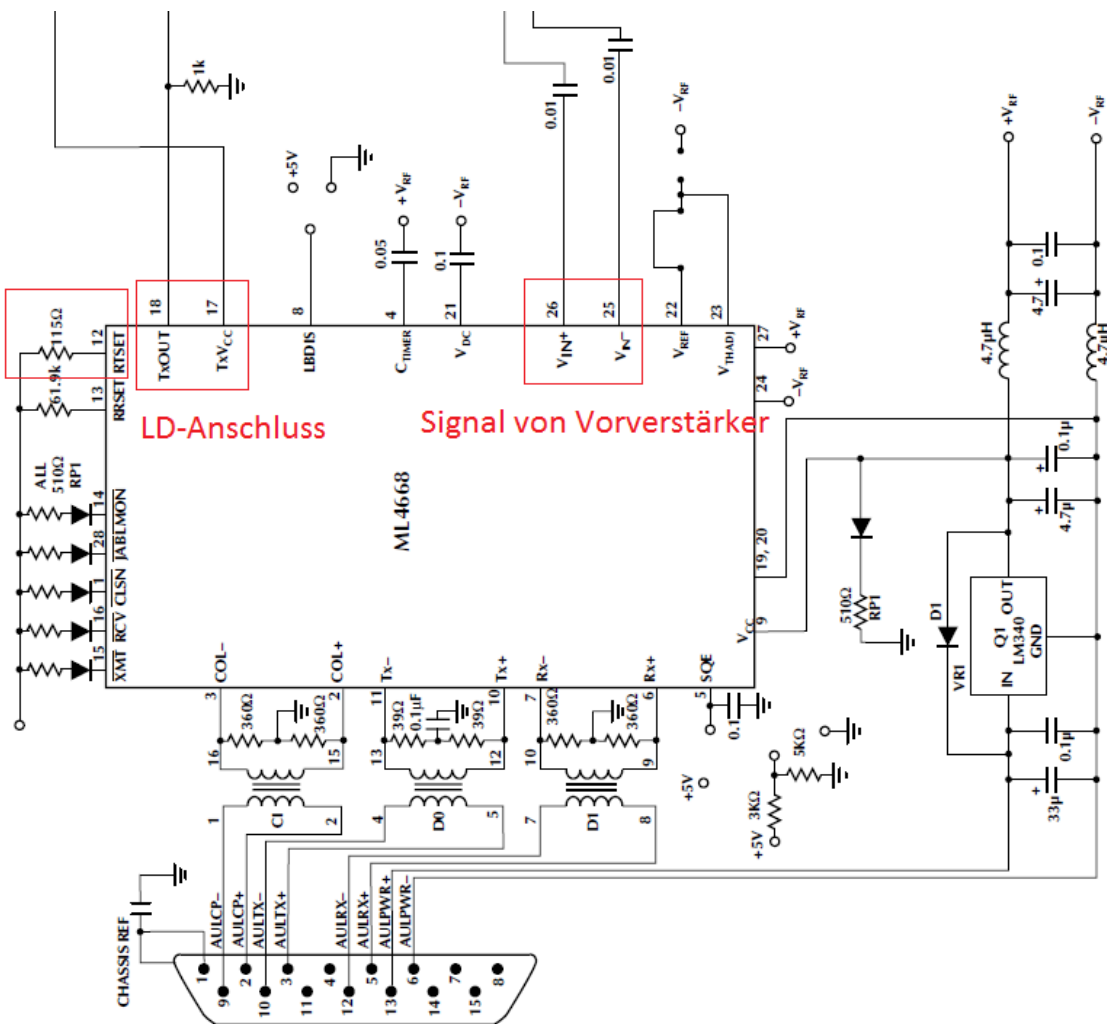


Abbildung 6-10: Schnittstellen des Mediakonverters zu Vorverstärker und Lasertreiber⁶¹

⁶¹ [27] S. 5

An die Anschlüsse 17, 18 wird der Lasertreibers angeschlossen. Bleibt der Treiberstrom für die Laserdiode unter 100mA, so kann auch der interne Treiber des ML4668 betrieben werden, da dann dieser der Laserdiode den erforderlichen Treiberstrom liefern kann. Abbildung 6-11 zeigt die Treiberstruktur des Medienkonverters. Der Ausgangstrom für die Laserdiode wird durch TxOUT (PIN 18 in Abbildung 6-10) geschaltet. Bei einem HIGH-Signal wird die Laserdiode mit TxOUT über eine Konstantstromquelle gegen Masse geschaltet.

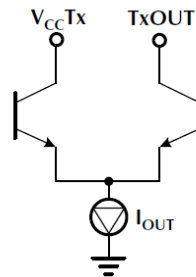


Abbildung 6-11: Treiberstruktur des ML4668⁶²

Der Strom kann über RTSET (PIN 12) nach der folgenden Formel festgelegt werden:

$$RTSET = \left(\frac{52mA}{I_{out}} \right) 115\Omega$$

Die verwendete Laserdiode hat eine Ausgangsleistung von 5 mW und benötigt dafür laut Datenblatt einen Vorwärtsstrom von 34mA. Daraus errechnet sich ein RTSET von 175 Ω . Gewählt wird aus der Normreihe 180 Ω . Damit stehen nun alle Komponenten zur Verfügung, um mit FSO Daten übertragen zu können.

6.5 Funktionstest

Über das FSO-System werden nun, um die Funktion zu testen, UDP-Pakete eines MPEG-4 Videos mit dem Programm VLC-Player übertragen. Dabei zeigt sich, dass nach ca. 50m das IDLE-Signal von 1MHz sauber empfangen wird und auch die Datensignale mit den Pulsbreiten von 50ns sind bei genauer Ausrichtung des Laserstrahls auf die PIN-Diode auswertbar. Das vom Mediakonverter, über ein Twisted-Pair-Kabel, an einen Laptop gelieferte Video läuft ohne Ruckeln und auch der Ton ist sauber hörbar. Somit kann das FSO-System für Anwendungen verwendet werden, welche im nun folgenden Kapitel besprochen werden.

⁶² [27] S. 7

7 Mögliche FSO – Anwendungen

Im nun folgenden Kapitel werden mögliche Anwendungen für FSO vorgestellt. Dabei wird unterschieden zwischen der Verteilung von Daten an mehrere Empfänger (Multicast) und der Kommunikation zwischen zwei Teilnehmern (Unicast). Der Aufwand für ein FSO – Übertragungssystem wird drastisch verringert, wenn von einer zentralen Stelle die Verteilung von Daten nur in eine Richtung erfolgt. Auf der Gegenstelle ist dann keine aufwendige Ausrichtung des Laserstrahls, zurück zum Sender, erforderlich. Dies bietet sich vor allem dann an, wenn, ähnlich dem SAT – Empfang, eine Verteilung von Fernseh- oder Radioprogrammen erfolgen soll. Als Übertragungsprotokoll wird nach dem TCP/IP – Modell auf dem Transport-Layer das UDP – Protokoll verwendet. UDP – Pakete werden gesendet, ohne dass eine Rückmeldung an den Sender erfolgt, ob die Übertragung erfolgreich war. Bei der Übertragung von Video- oder Audiodaten spielt es keine Rolle, ob eventuell einige Pakete verloren gehen. Geringe Paketverluste verursachen nur kleine Pixelfehlern bei der Wiedergabe. Die zuverlässige Verteilung von Dateien mit UDP erfordert zusätzliche Maßnahmen. Hier würde sich eine fehlerhafte Datenübertragung fatal auswirken. Wird das UDP – Protokoll verwendet, so kann die erfolgreiche Übertragung in der Applikations-Schicht mittels einer vom Sender übertragenen Prüfsumme festgestellt werden. Das Programm im obersten Layer des TCP/IP – Modells muss sich dann darum kümmern, ob die Daten korrekt empfangen wurden. Damit das funktioniert, ist in der Applikations-Schicht des TCP/IP - Modells eine eigene Datenstruktur (Header) mit genau definierten Feldern erforderlich, damit der Empfänger auch feststellen kann, wie die empfangenen Daten zu interpretieren sind, in welchem Feld die Prüfsumme liegt, wo die Nutzdaten beginnen oder wie viele Bytes gesendet wurden. Der Nachteil einer Simplex-Verbindung besteht natürlich immer darin, dass der Sender nie wissen kann, ob die Informationsübertragung erfolgreich war. Bei der Duplex-Übertragung werden Daten auch wieder an den Sender zurückgesendet. Die Übertragung zurück zur sendenden Station kann ebenfalls wieder mit dem UDP-Protokoll erfolgen. Eine typische Anwendung wäre die Video- oder Audiokommunikation zwischen zwei Stationen. Über zwei identische FSO-Systeme werden die Video- oder Audiodaten gesendet. Auch hier ist festzustellen, dass es sich um keine gesicherte Datenübertragung handelt. Der Absender der Daten erhält aber Informationen, ob die Datenübertragung zum Empfänger erfolgreich war. Dies geschieht wiederum über die Applikations-Schicht. Über ein für die Anwendung speziell entworfenes Protokoll kann der Datenfluss in beide Richtungen kontrolliert werden. Damit wäre eine zuverlässige Datenübertragung, gesichert durch ein Protokoll in der Anwendungsschicht, möglich.

Wird anstatt des UDP-Protokolls das in der Transport-Schicht definierte TCP-Protokoll verwendet, so ist eine beidseitige Verbindung erforderlich, da Quittungsinformationen ausgetauscht werden müssen.

7.1 Video- und Audio-Streaming mit UDP

Das Senden von UDP-Paketen an mehrere Empfänger über FSO wird nun in Form einer Multicastübertragung experimentell getestet. In der Applikations-Schicht wird als Anwendungsprogramm der VLC-Player verwendet. Damit hat man eine einfache Möglichkeit, Video- und Audio-Testdaten in Form eines Datenstroms zu senden.

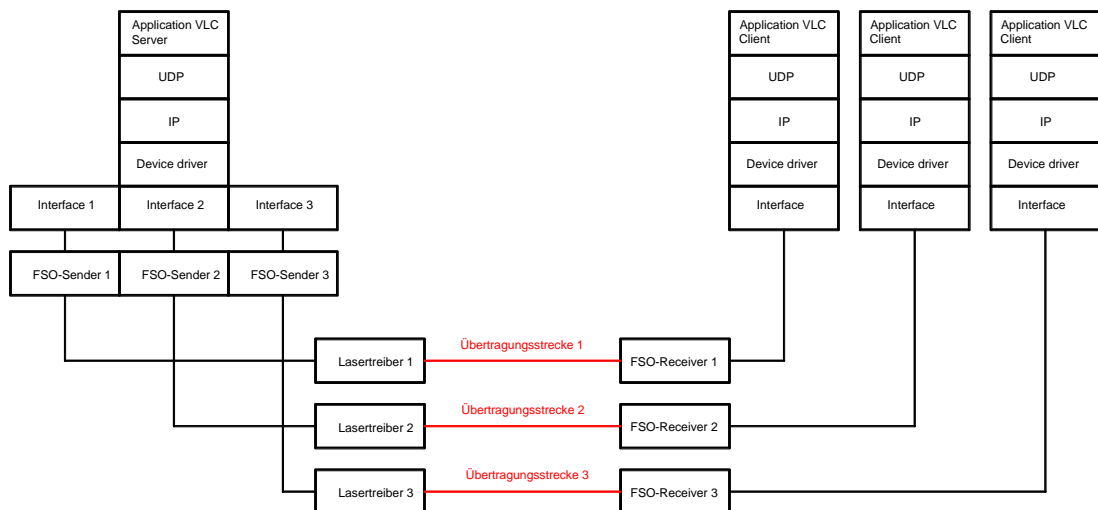


Abbildung 7-1: Senden von UDP-Paketen an mehrere Teilnehmer⁶³

Das Programm packt in der Applikationsschicht das Streaming-Protokoll MPEG-2 in das Nutzdatenfeld des UDP-Headers. MPEG-2 ist ein Standard zur Komprimierung und Übertragung von Audio- und Videodateien. Die unteren Schichten benötigen vom Anwendungsprogramm zwingend die Portnummer der Anwendung und die gemeinsame Multicast-Adresse der Empfänger. Die Ziel-MAC-Adresse kann mit dem ARP-Protokoll nicht ermittelt werden, da ja für das Ziel eine gemeinsame Multicast-Adresse verwendet wird. Daher wird vom Betriebssystem eine virtuelle MAC-Adresse generiert. Die oberen drei Bytes der MAC-Adresse sind über den Standard vorgegeben (01-00-5e), der untere MAC-Adress-Bereich erhält die letzten drei Bytes der Multicast-Adresse per Mapping. Für die FSO-Übertragung eines Testvideos wurde die Multicast-Adresse 239.2.16.1 und die Portnummer 5805 verwendet. Als Protokoll auf dem Transport-Layer wurde von der Applikation UDP gewählt, dadurch werden die Pakete übertragen, unabhängig davon ob sie das Ziel in der richtigen Reihenfolge, oder überhaupt erreichen. Die FSO-Receiver empfangen die Datenpakete und geben sie an die höheren Schichten weiter. Auf der Anwendungsschicht wird die VLC-Applikation für den Empfang der Pakete eingestellt. Die Applikation hört ständig ab, ob z.B. für die Multicast-Adresse 239.2.16.1 mit der Portnummer 5805 UDP-Pakete gesendet werden. Ist dies der Fall, so werden in der Transport-Schicht die Daten aus dem Payload-Feld

⁶³ Quelle: Eigene Darstellung

entnommen und über das Programm entsprechend ausgewertet und dargestellt. Es wäre auch möglich über einen FSO-Sender mehrere Streams mit unterschiedliche Multicast-Adressen zu übertragen.

```

v Ethernet II, Src: HewlettP_11:29:3d (fc:3f:db:11:29:3d), Dst: IPv4mcast_02:10:01 (01:00:5e:02:10:01)
  > Destination: IPv4mcast_02:10:01 (01:00:5e:02:10:01)
  > Source: HewlettP_11:29:3d (fc:3f:db:11:29:3d)
  Type: IPv4 (0x0800)
v Internet Protocol Version 4, Src: 10.16.211.4, Dst: 239.2.16.1
  0100 ... = Version: 4
  ... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  > Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
  Total Length: 1344
  Identification: 0x4009 (16393)
  > Flags: 0x00
  Fragment offset: 0
  Time to live: 1
  Protocol: UDP (17)
  Header checksum: 0x988c [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source: 10.16.211.4
  Destination: 239.2.16.1
  [Source GeoIP: Unknown]
  [Destination GeoIP: Unknown]
v User Datagram Protocol, Src Port: 54463, Dst Port: 5805
  Source Port: 54463
  Destination Port: 5805
  Length: 1324
  Checksum: 0x7328 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  [Stream index: 0]
v ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=13
  > Header: 0x4740451d
  [MPEG2 PCR Analysis]

```

Abbildung 7-2: Multicasting

Die VLC-Applikation kann dann durch Auswahl der entsprechenden Adresse den zugehörigen Datenstrom auswerten. Dies wäre eine Einsatzmöglichkeit, wenn an einen größeren Häuserblock per FSO Fernsehprogramme übertragen werden und die weitere Verteilung dann per Kabel erfolgt. Allerdings wird dafür ein FSO-System mit mindestens 100Mbps benötigt, um die erforderliche Verteilungskapazität liefern zu können, da ein Video mit MPEG-2 eine Übertragungsrate von mindestens 10Mbps erfordert. MPEG-2 ist ein Standard zur Videokompression und wurde von Experten der „Moving Picture Experts Group“ entwickelt. Das Kompressionsverfahren wird sowohl für DVDs als auch für die Satellitenübertragung von Fernsehprogrammen verwendet. Der neueste Standard für die Satellitenübertragung heißt DVB-S2, welcher auch MPEG-4 AVC⁶⁴ unterstützt. Damit lassen sich hochwertige Videos auch über FSO mit einer Datenübertragungsrate von 10Mbps übertragen. Ohne Kompressionsverfahren wäre die Videotelefonie über Handy und PC undenkbar, da die dafür notwendige Bandbreite unwirtschaftlich wäre. Der VLC-Player unterstützt auch Transportströme (TS). Damit können zum Beispiel im Audiosignal unterschiedliche Sprachen unterstützt werden. DVDs verwenden dafür Programmströme (PS) und erlauben am DVD-Player die Auswahl mehrerer Sprachen. Bei TS und PS handelt es sich um sogenannte Container, die mehrere Video- oder Audiodatenströme enthalten können.

⁶⁴ „Advanced Audio Coding“ ist ein Kompressions und Codierungsverfahren für Audio

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für FSO besteht in der Übertragung von Radioprogrammen. Die erforderliche Übertragungsrates ist jedoch weit niedriger, als sie für die Videoübertragung notwendig wäre. Daher können unter Verwendung von mehreren Multicastadressen eine große Anzahl von unterschiedlichen Radioprogrammen mit 10Mbps übertragen werden. Als Kompressionsverfahren kommt dafür MP3 oder AVC zur Anwendung.

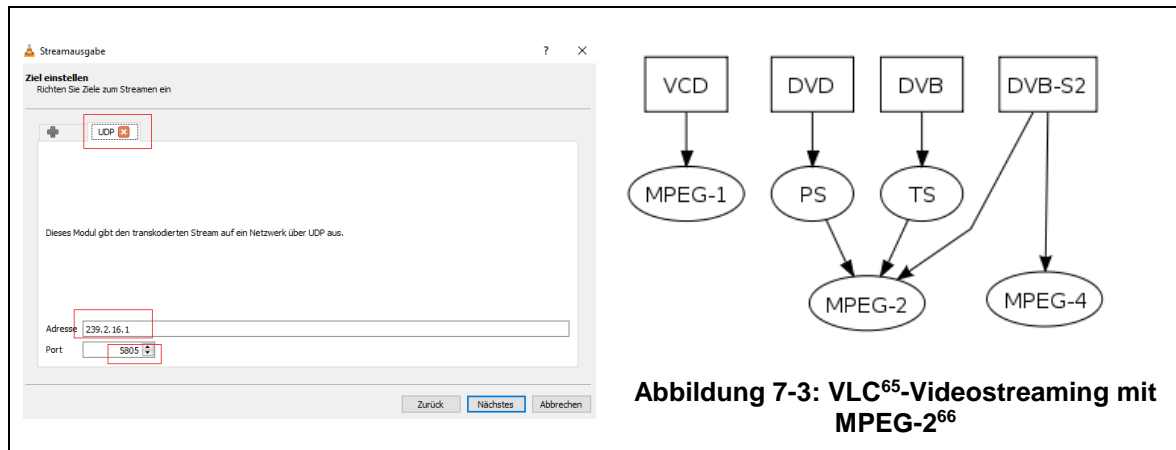


Abbildung 7-3: VLC⁶⁵-Videostreaming mit MPEG-2⁶⁶

7.2 Videotelefonie mit Punkt zu Punkt-Verbindung

FSO kann auch für die Videokommunikation eingesetzt werden. Auf dem Transport-Layer muss dafür nicht TCP verwendet werden, sondern es können zwei identische Übertragungstrecken unter Verwendung des UDP-Protokolls aufgebaut werden. Eine Unterbrechung des Laserstrahls bewirkt dann, dass die Videostrecke nur in einer Richtung unterbrochen ist. TCP mit den erforderlichen Quittierungen hätte ansonsten eine beidseitige Unterbrechung des Kamerasignals zur Folge. Für die Videokommunikation können dieselben Kompressionsverfahren wie in Punkt 7.1 beschrieben verwendet werden. Als Signalquelle dient eine einfache Webcam, die an einem USB-Anschluss eines PCs oder Laptops hängt und im VLC als Videoquelle auswählbar ist. Um Bandbreite zu sparen, kann dann das Bild- und Tonsignal über den VLC-Player mit MPEG-4 komprimiert werden. Mit 4Mbps können damit hochwertige Multimediadaten über mit dem IEEE-Standard 10Base-FL übertragen.

⁶⁵ <http://www.videolan.org/>

⁶⁶ https://de.wikipedia.org/wiki/Moving_Picture_Experts_Group

7.3 Videoüberwachung eines Betriebsgeländes

Ähnlich der Videotelefonie kann man die Signale von mehreren Kameras über FSO an einem zentralen Punkt sammeln und somit die Überwachung eines Betriebsgeländes realisieren. Die Kameras wären dann auf erhöhten Positionen montiert, wo für die Laserstrahlen Sichtverbindung zum Empfänger besteht. Als Stromversorgung würde ein Akku, gespeist von einer Solaranlage, ausreichen. Somit ist keine teure Verlegung von Koax- oder Netzkabeln erforderlich.

7.4 Anwendung in Museen

Meistens erhalten Besucher von Museen einen „Audioguide“ zur akustischen Erklärung der Ausstellungsstücke. Mit Kopfhörern in den Ohren stehen sie dann vor Exponaten, drücken auf dem Audioguide den erforderlichen Zifferncode und hören die Erklärungen. Dafür stellen die Museen meistens Monitore auf. Diese sind aber nicht individuell für den Nutzer verwendbar, sondern alle Museumsbesucher im Bereich dieses Monitors sehen das gleiche Video. Besser wäre es, wenn jeder Besucher bei der Kassa ein Tablet ausleihen kann, welches ein optisches Interface besitzt um an einem Terminal bei den Ausstellungsstücken das Gerät mit einem zentralen Informationsserver zu verbinden. Damit kann dann jeder Besucher individuell Informationen zu Ausstellungsstücken abrufen. Als Schnittstelle kann, ähnlich einem Mediakonverter, ein optischer Empfänger dienen, der in einem kleinen Magneten untergebracht ist. Dieser kann dann von den Besuchern am Terminal mit metallischer Oberfläche gelegt werden. Über diese Schnittstelle wird der Videodatenstrom mit dem UDP-Protokoll an das Tablet gesendet. An entsprechenden Tastern am Terminal kann der Besucher Steuerbefehle eingeben. Damit können viele Videodatenströme im selben Raum an Terminals verteilt werden, was über WLAN für eine große Zahl von Anwendern technisch nicht umsetzbar wäre, da es sich dabei um ein Shared-Medium handelt. Die Verteilung der Videoströme zu den Terminals kann über POF⁶⁷ erfolgen. Somit können durch die kupferlose Übertragungstechnik auch keine Störungen durch Interferenzen zwischen den Kabeln auftreten. Die Signale der Steuertasten an den Terminals können ebenfalls über POF-Kabel an den zu steuernden Server übertragen werden. Dafür gibt es auf dem Markt entsprechende POF-Mediakonverter. Für die, mit dem UDP-Protokoll, übertragenen Videodaten wird nur eine POF-Faser benötigt.

⁶⁷ Damit ist eine Datenübertragung über polymere optische Fasern möglich. Es sind keine teuren Laserschweißgeräte erforderlich, da die Fasern über einfache Koppellemente verbunden werden können.

8 Ergebnisse und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, die optische Freiraumübertragung von Daten mittels Licht experimentell zu untersuchen. Dafür wurden zuerst jene Protokolle der Kommunikationstechnik ausgewählt, welche benötigt werden, um Daten mit FSO zu übertragen. Diese Protokolle, eingebettet in den verschiedenen Schichten des TCP/IP-Modells, bildeten die Grundlage für die FSO-Übertragung. Anhand von Reichweitenbetrachtungen wurde ausgelotet, welche Amplituden und Signalformen man für ein, durch einen Laser, übertragenes Signal am Empfangsort erwarten darf, denn diese Ergebnisse wurden auch als relevant für jene Signalformen und Amplituden eingestuft, die dann in der Implementierungsphase verwendet wurden. Bewährte IEEE-Standards, die sich in der Praxis durchgesetzt haben, wurden durch Analysen und Messungen mit dem Oszilloskop, nach verschiedenen Parametern, auf der physikalischen und logischen Ebene, einer Bewertung dahingehend unterzogen, ob mit dem untersuchten Standard direkt, oder unter Anpassung der physikalischen Schicht, ein FSO-Übertragungssystem realisiert werden kann. Zu diesem Zweck wurden Schaltungen auf Platinen aufgebaut, die der Unterstützung der Analysen dienten. Ausgehend von den Ergebnissen, wurde jener Standard für die Implementierung eines funktionierenden FSO-Systems ausgewählt, welcher sich in Bezug auf Realisierbarkeit, Aufwand und Kosten am besten für FSO eignet. Dieser Standard wurde dann verwendet, um in der Implementierungsphase ein funktionierendes FSO-System auf Basis von 10Base-T zu verwirklichen. Damit kam nicht jener Standard zur Auswahl, der die höchste Übertragungsrate lieferte, sondern es wurde vor allem Augenmerk auf die Umsetzbarkeit gelegt, bedingt durch die dabei verwendeten hohen Frequenzen. Eigenschwingverhalten und Einstreuungen durch fremde HF-Quellen stellten die größten Hürden, sowohl bei den Untersuchungen der Standards als auch bei der Realisierung des FSO-Systems, dar. Oft traten Eigenschwingungen bei den Bauteilen auf, die einfach nicht unterdrückt werden konnten und in der Fehlersuche viel Zeit und Nerven verbrauchten. Im letzten Kapitel wurden Anwendungsmöglichkeiten für FSO vorgestellt. Das wichtigste Protokoll dafür war UDP, um zum Beispiel Broadcasting für die Verteilung von Daten an mehrere Empfänger zu realisieren.

Während des Schreibens der Arbeit kamen neue Ideen hinzu, die einer näheren Betrachtung unterzogen werden könnten. Dazu gehört zum Beispiel, bedingt durch die extrem schwachen Signale an einer einzelnen Fotodiode, die Verwendung von mehreren Fotodioden, aber nicht durch simple Parallelschaltung, sondern durch einzelne Empfangseinheiten, deren Signale über einen OP-Verstärker aufsummiert werden und in Summe ein starkes Empfangssignal ergeben sollten. Damit kann eine Matrix aus Fotodioden gebildet werden und die Verwendung von Linsen am Empfangsort vielleicht erübrigen. Eine Idee, die auch näher verfolgt werden könnte, ist die Verwendung von zwei Laserdioden zur getrennten Übertragung einer logischen Null und Eins. Dadurch wäre die Form des Signals, ob es sich also um einen sauberen Rechteckimpuls, wie bei NRZI-Signalen erforderlich, handelt, nicht

mehr von so großer Relevanz. Entscheidend wäre beim Empfänger dann nur, ob irgendetwas empfangen wird, was als eine logische Null Eins interpretiert werden kann. Die Verzerrungen des Signals auf der Übertragungsstrecke wären dann nicht mehr von so großer Bedeutung für die Wiedergewinnung des Signals am Empfangsort. Alle untersuchten IEEE-Standards verwenden zur Datenübertragung Impulse, daher wäre die die Erhöhung der Bandbreite mit neuen analogen Übertragungsverfahren auf Basis von OFDM ein lohnenswertes Projekt, da mit den heutigen Rechenleistungen von Signalprozessoren Rechenleistungen erreicht werden, die eine Fast Fourier Transformation in Echtzeit ermöglichen. In Verbindung mit OFDM können damit hohe Datenübertragungsraten erreicht werden. In der Arbeit wurde die Untersuchung von Übertragungsverfahren mit OFDM nicht weiterverfolgt, da die Reichweitenbetrachtung im 2. Kapitel gezeigt hat, dass bei Modulationsfrequenzen von 80MHz keine vernünftigen Impulse mehr an der Fotodiode zur Verfügung stehen. Analoge Signale sind bei diesem Frequenzbereich und den in der Stärke schwachen Signalen noch schwerer zu beherrschen.

Es hat sich gezeigt, dass ein einfaches FSO-System mit bis zu 20Mbps mit relativ einfachen Mitteln realisiert werden kann. Bitraten von über 100Mbps lassen sich jedoch nur mit wesentlich höherem Aufwand realisieren. In der heutigen Zeit, wo WLAN hohe Übertragungsraten Gigabitbereich ermöglicht, mag man sich daher fragen, ob es sinnvoll ist, Zeit für die Entwicklung eines 10Mbps-System zu entwickeln. Die Tatsache aber, dass die Ressource Bandbreite mit niemanden geteilt werden muss und die Daten sozusagen auf dem eigenen Laserstrahl „reiten“, rechtfertigt die investierte Zeit. Nebenbei brachte es auch einen großen Lerneffekt.

Literaturverzeichnis

- [1] H. H. Bahnes, Halbleiterlasertechnik, München: Franzis, 1990.
- [2] P. D. O. Hagenbruch, Taschenbuch Digitaltechnik, Hochschule Mittweida, 2014.
- [3] D. Halliday, Fundamentals of Physics (Optic), University of Pittsburgh, 2001.
- [4] R. Hilmar, Berechnung von Verstärkerschaltungen, Stuttgart: Teubner, 1978.
- [5] M. Rudolf, Hochfrequenzmesstechnik, Meßverfahren und Meßgeräte, Heidelberg: Dr. Alfred Hüthing Verlag, 1983.
- [6] F. Stefan, Laserdioden sinnvoll einsetzen (Empfängerteil), München: Franzis Verlag, 1991.
- [7] F. Stefan, Mit Laserdioden experimentieren, München: Franzis-Verlag, 1990.
- [8] Wikipedia, „OSI - Modell,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/OSI-Modell>.
- [9] Wikipedia, „Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Orthogonales_Frequenzmultiplexverfahren. [Zugriff am 01 07 2017].
- [10] Wikipedia, „Photophon,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Photophon>. [Zugriff am 01 05 2017].

- [11] Wikipedia. [Online]. Available: <http://www.lightpointe.de/airebridge-lx-1.html>. [Zugriff am 02 05 2017].
- [12] „SONAbeam,“ [Online]. Available: <http://fsonadirect.com/model/mseries/>. [Zugriff am 05 05 2017].
- [13] „Laserklassen,“ [Online]. Available: <https://www.eval.at/lasa---laser-sicherheit-in-der-ausbildung/kapitel-1---laser-allgemein/1-6-laserklassen>. [Zugriff am 03 05 2017].
- [14] „OSRAM,“ [Online]. Available: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic0/00211439_0.pdf. [Zugriff am 01 06 2017].
- [15] „Ronja,“ [Online]. Available: http://ronja.twibright.com/schematics/10M_receiver_00.pdf. [Zugriff am 01 06 2017].
- [16] M. Linear. [Online]. Available: <http://pdf.seekdatasheet.com/ML4/ML4665.pdf>. [Zugriff am 01 07 2017].
- [17] i. Haus. [Online]. Available: http://www.ichaus.de/upload/pdf/HK_datasheet_F2en.pdf. [Zugriff am 21 07 2017].
- [18] Wikipedia, „Wikipedia-Blinkgerät,“ [Online]. Available: https://www.revolvy.com/topic/Free%20Space%20Optics&item_type=topic. [Zugriff am 01 05 2017].
- [19] Wikipedia, „Lichtsprechgerät 80-80,“ [Online]. Available: <http://www.la6nca.net/tysk2/lispr/>. [Zugriff am 01 05 2017].
- [20] G. Alkolidi, „Intech,“ [Online]. Available: <https://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/47585.pdf>. [Zugriff am 31 07 2017].
- [21] IETF, „Internetprotocol,“ [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc/rfc791.txt.pdf>. [Zugriff am 05 05 2017].

- [22] IETF, „Ethernet II,“ [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc894.txt.pdf>. [Zugriff am 16 07 2017].
- [23] I. Network Sorcery, „Address Resolution Protocol,“ [Online]. Available: <http://www.networksorcery.com/enp/protocol/arp.htm>. [Zugriff am 29 07 2017].
- [24] IETF, „Internet Control Message Protocol,“ [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc792>. [Zugriff am 20 05 2017].
- [25] IETF, „Transmission Control Protocol,“ [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc793.txt.pdf>. [Zugriff am 31 05 2017].
- [26] IETF, „User Datagram Protocol,“ [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc768.txt.pdf>. [Zugriff am 08 08 2017].
- [27] M. Linear, „ML4668,“ [Online]. Available: <http://doc.chipfind.ru/micro-linear/ml4668.htm>. [Zugriff am 01 08 2017].
- [28] U. Dresden, „Praktikum Kommunikationstechnik,“ [Online]. Available: https://www.htw-dresden.de/fileadmin/userfiles/et/Labore/Nachrichtentechnik/Praktikumsanleitungen/O8_FSO_WS1314.pdf. [Zugriff am 12 07 2017].

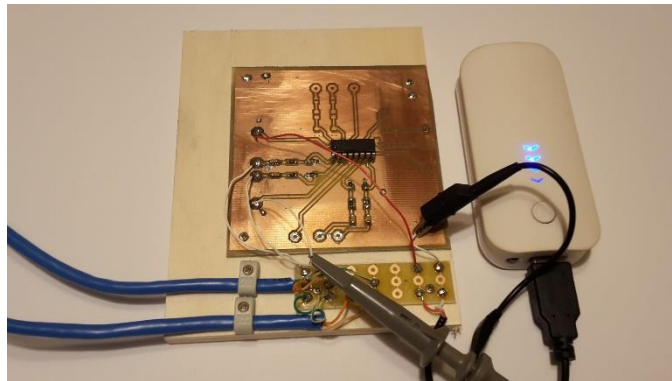
Anlagen, Teil 1

CD mit Programmcode

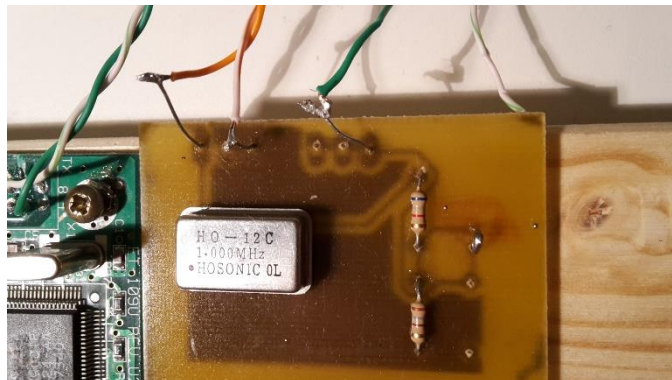
Client-Server Programm in C#, erstellt in Visual Studio 2017 und .NET Framework 4.5

Anlagen, Teil 2

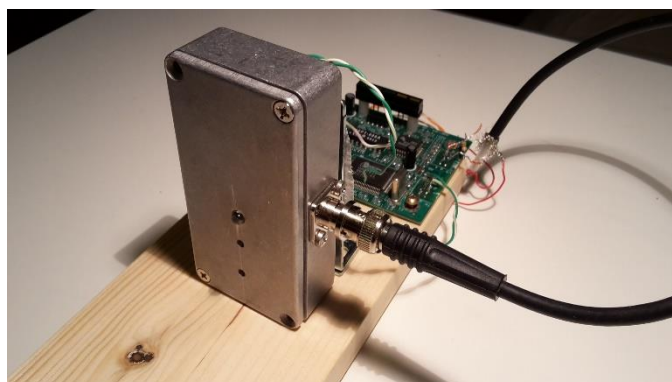
Auszüge aus den Laboraufbauten:



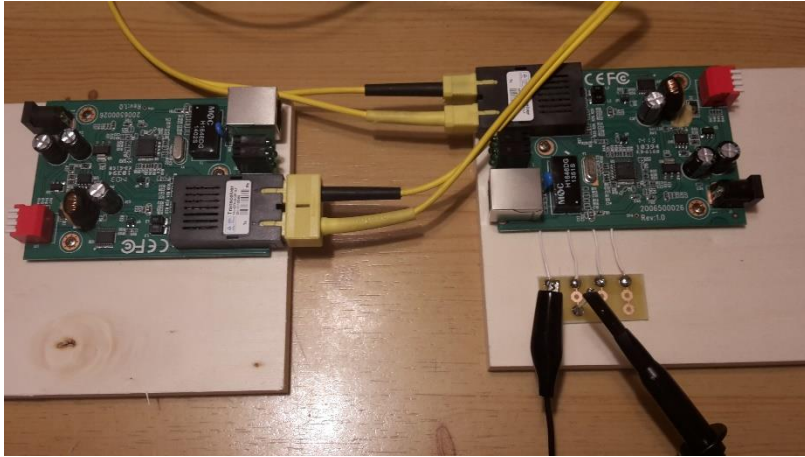
Differentieller Leitungstreiber aus Abbildung 4-1



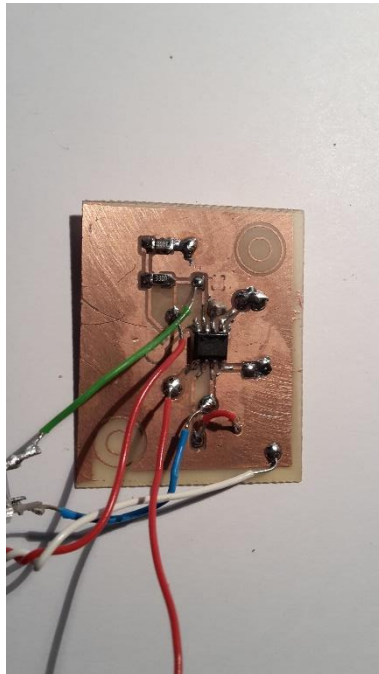
Simulation des IDLE-Signals für 10Base-FL (1MHz)



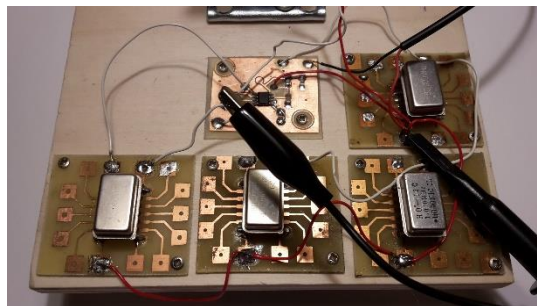
Vorverstärker mit angeschaltetem Mediakonverter



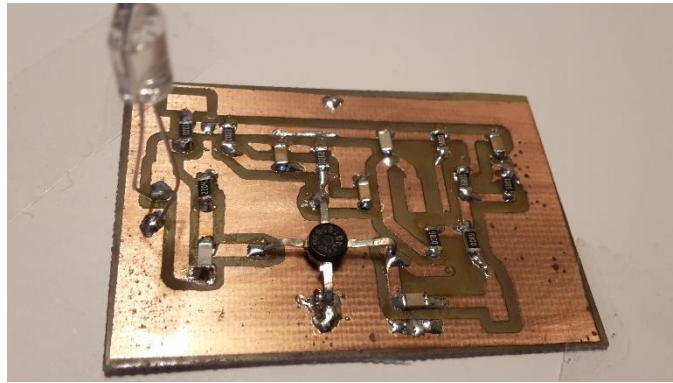
Messung an 100Base-FX



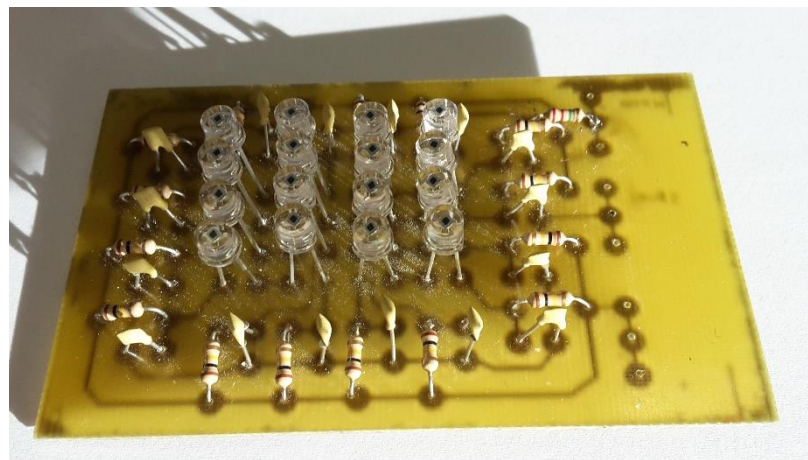
Lasertreiber für Reichweitentest



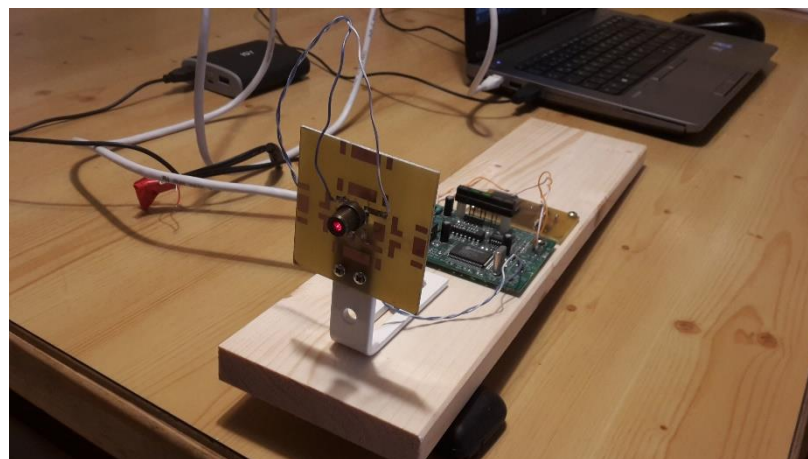
Schaltung für Reichweitenbetrachtung aus Abbildung 2-21 (1MHz, 12MHz und 25MHz)



Testschaltung für Vorverstärker



Testplatine für Parallelschaltung von PIN-Dioden



Mediakonverter und Laserdiode mit Kollimator

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Innsbruck, den 21.08.2017

Helmuth Walder