

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG

Department DMI
Studiengang Medientechnik

Bachelorarbeit

Nachrichten- und lichttechnische Erprobung kommerziell
verfügbarer LiFi-Systeme

Abgabetermin: 28. Oktober 2019

Verfasserin:

Hannah Demuth

■■■■■■■■■■

■■■■■■■■■■

Fachrichtung: Medientechnik

Matrikelnummer: ■■■■■■

Erstprüfer: Prof. Dr. Jan Mietzner

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Thorsten Wagener

Zusammenfassung

In dieser Thesis wird ein aktuell verfügbares LiFi-Produkt vorgestellt. Das System wird nachrichtentechnisch und lichttechnisch erprobt und auf seine Leistungsfähigkeit überprüft.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Motivation	2
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen	4
2.1	VLC und LiFi	4
2.2	Flackern	6
2.3	Dimmen	6
3	Lichttechnik	8
3.1	Die LED zur Datenübertragung	8
3.1.1	Phosphortechnik	8
3.1.2	Die RGB-LED	9
4	Aktuelle VLC-Standards	11
4.1	IEEE Standard 802.15.13	11
4.2	Modulationsverfahren	12
4.2.1	On Off Keying-Modulation	15
4.2.2	(Variable) Pulse Position-Modulation	17
4.2.3	Color Shift Keying-Modulation	19
4.2.4	DCO-OFDM	20
5	Netzwerkaspekte	23
5.1	Transmission Control Protocol	24
5.2	User Datagram Protocol	27
6	Das PureLiFi System	29
6.1	Aufbau und Funktionsweise des Systems	29
7	Messungen	32
7.1	Lichttechnische Messung	32
7.1.1	Versuchsaufbau	33
7.1.2	Messungen	34
7.2	Nachrichtentechnische Messung	35
7.2.1	Versuchsaufbau	37
7.2.2	Messungen mit TCP	38
7.2.3	Messungen mit UDP	46
7.2.4	Betrachtung möglicher Störfaktoren	49
8	Fazit und Aussichten für weiterführende Arbeiten	53

9	Anhang	55
9.1	Weitere Messergebnisse	55
9.2	Datenblätter	58

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Verhältnis zwischen der wahrgenommenen und gemessenen Helligkeit [3]	7
Abb. 2:	Schematischer Aufbau einer blauen LED mit einer gelben Phosphorschicht	9
Abb. 3:	Spektrum einer blauen LED mit gelber Phosphorschicht	9
Abb. 4:	Schematischer Aufbau einer RGB-LED	9
Abb. 5:	Spektrum einer RGB-LED	10
Abb. 6:	Die PHY-Schichten in Hinblick auf Bandbreite und Datendurchsatz [7]	11
Abb. 7:	Graphische Darstellung der Schichten eines VPAN nach dem IEEE-Standard 802.15.7 [8]	13
Abb. 8:	Übersicht der Betriebsarten von PHY I [3]	14
Abb. 9:	Übersicht der Betriebsarten von PHY II [3]	14
Abb. 10:	Graphische Darstellung der PHY-Schichten im Modulationsspektrum [8]	15
Abb. 11:	Rahmenstruktur zum Dimmen mit OOK nach Standard IEEE 802.15.7 [3]	17
Abb. 12:	Konzept 2-PPM [3]	18
Abb. 13:	Konzept VPPM mit 75% Pulsweite [3]	18
Abb. 14:	Rahmenstruktur zum Dimmen mit VPPM [3]	19
Abb. 15:	CIE 1931 xy Farbkoordinaten mit den sieben Farbbändern nach IEEE 802.15.7 [3]	20
Abb. 16:	Übersicht der Betriebsarten von PHY III [3]	20
Abb. 17:	Struktur eines DCO-OFDM Systems nach [9]	21
Abb. 18:	Ein Beispiel für das OSI-Referenzmodell [10]	23
Abb. 19:	Aufbau des TCP-Segment-Formats [11]	25
Abb. 20:	Aufbau einer Verbindung nach dem Prinzip des Three Way Handshake [10]	25
Abb. 21:	Abbau einer Verbindung nach dem Prinzip des sogenannten double half close [10]	26
Abb. 22:	Aufbau eines UDP-Datagramms [11]	28
Abb. 23:	Aufbau des PureLiFi-Systems	30
Abb. 24:	Spektroradiometer specbos 1201 der Firma JETI [12]	32
Abb. 25:	Benutzeroberfläche der Software JETI LiVal6.8.4 [13]	32
Abb. 26:	Messaufbau der lichttechnischen Vermessung des Systems	33
Abb. 27:	Spektrum der LED ohne Datenübertragung	34
Abb. 28:	CIE-xy-Diagramm	35
Abb. 29:	Spektrum der LED während der Datenübertragung	35

Abb. 30:	Berechnung der Messpunkte	36
Abb. 31:	Messpunkte in vertikaler Richtung	37
Abb. 32:	Messaufbau der nachrichtentechnischen Vermessung des Systems	38
Abb. 33:	Vertikale Messwerte	39
Abb. 34:	Horizontale Messwerte	39
Abb. 35:	Downstream am Messpunkt 0°	40
Abb. 36:	Upstream am Messpunkt 0°	40
Abb. 37:	RTT des Downlinks an dem Messpunkt 0°	41
Abb. 38:	RTT des Uplinks an dem Messpunkt 0°	41
Abb. 39:	IO-Graph des Downlinks an dem Messpunkt 0°	42
Abb. 40:	IO-Graph des Uplinks an dem Messpunkt 0°	42
Abb. 41:	Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt $l25^\circ$	42
Abb. 42:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt $l25^\circ$	43
Abb. 43:	RTT des Downlinks an dem Messpunkt $l25^\circ$	43
Abb. 44:	RTT des Downlinks an dem Messpunkt $l25^\circ$	44
Abb. 45:	IO-Graph des Downlinks an dem Messpunkt 0°	44
Abb. 46:	IO-Graph des Uplinks an dem Messpunkt 0°	44
Abb. 47:	Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt $r35^\circ$	45
Abb. 48:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt $r35^\circ$	45
Abb. 49:	RTT des Downlinks an dem Messpunkt $r35^\circ$	46
Abb. 50:	RTT des Uplinks an dem Messpunkt $r35^\circ$	46
Abb. 51:	IO-Graph des Downlinks an dem Messpunkt $r35^\circ$	46
Abb. 52:	RTT des Uplinks an dem Messpunkt $r35^\circ$	47
Abb. 53:	vertikale Messwerte des Uplinks	47
Abb. 54:	horizontale Messwerte des Uplinks	48
Abb. 55:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt 0°	48
Abb. 56:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt $l25^\circ$	49
Abb. 57:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt $r35^\circ$	49
Abb. 58:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt 0° mit Deckenbeleuchtung	50
Abb. 59:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt 0° mit Deckenbeleuchtung	50
Abb. 60:	Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt $r25^\circ$ ohne Deckenbeleuchtung	51
Abb. 61:	Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt $r25^\circ$ mit Deckenbeleuchtung	51
Abb. 62:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt $r25^\circ$ mit Deckenbeleuchtung	51
Abb. 63:	Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt $r25^\circ$ mit Tageslicht	52

Abb. 64:	Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt $r25^\circ$ mit Tageslicht	52
Abb. 65:	Uplink bei 5° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP . . .	55
Abb. 66:	Uplink bei 10° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP . . .	55
Abb. 67:	Downlink bei 5° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP . .	56
Abb. 68:	Downlink bei 10° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP .	56
Abb. 69:	Uplink bei 5° in alle Richtungen unter Verwendung von UDP . . .	57
Abb. 70:	Uplink bei 10° in alle Richtungen unter Verwendung von UDP . . .	57

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Berechnete Messpunkte	36
---	----

Abkürzungsverzeichnis

ACK Acknowledgement

AP Access Point

AWGN Additive White Gaussian Noise

BER Bit Error Rate

CCT Correlated Color Temperature

CRD Clock and Recovery Detection

CSK Color Shift Keying

CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection

DCF Distributed Coordination Function

DCO-OFDM DC-biased Optical OFDM

DMT Discrete Multitone Transmission

DNS Domain Name System

eMBB Enhanced Mobile Broadband

EMV elektromagnetische Verträglichkeit

eU-OFDM enhanced Unipolar OFDM

FDM Frequency Division Multiplexing

FFT Fast Fourier Transformation

FIN Ende

FSK Frequency Shift Keying

FTP File Transfer Protocol

HSLED High Speed Light Emitting Diodes

IFFT Inverse Fast Fourier Transformation

IM/DD Intensity Modulation/ Direct Detection

IP Internet Protocol

IPTV Internet Protocol Television

LiFi Light Fidelity

LOS Line Of Sight

MFTP Maximum Flickering Time Periode

MIMO Multiple Input Multiple Output

mMTC Massive Machine Type Communications

NRZ Non Return to Zero

OCR Optical Clock Rates

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OOK On-Off-Keying

OWC Optical Wireless Communication

PCF Point Coordination Function

POE Power over Ethernet

PPM Pulse Position Modulation

PWM Pulse Width Modulation

QAM Quadrature Amplitude Modulation

RF Radio Frequency

RP-OFDM Reverse Polarity Optical OFDM

RST Reset

RTT Round Trip Time

SMTP Simple Mail Transfer Protocol

SNR Signal to Noise Ratio

SSF Short Sync Field

SYN Synchronisation

TCP Transmission Control Protocol

UDP User Datagram Protocol

URLLC Ultra Reliable and Low Latency Communications

VPAN Visible-Light Communication Personal Area Network

VPPM Variable Pulse Position Modulation

WLAN Wireless Local Area Network

1 Einleitung

1.1 Motivation

Frequenzen zur Datenübertragung sind in unserem Zeitalter der fortschreitenden Digitalisierung ein knappes Gut. Dennoch wachsen die übertragenen Datenvolumina unaufhörlich, gerade mit dem sich entwickelnden IoT-Zeitalter (Internet of Things), in dem sogar Geräte wie Toaster mit dem Internet verbunden sein können. Derzeit werden monatlich rund 600 Terabyte an Daten von 1,4 Millionen Funktürmen und rund 8 Milliarden Handys übertragen, und das ohne das IoT einzubeziehen, mit dem bis 2020 voraussichtlich weitere 50 Milliarden Geräte online gehen. Die Folge sind übervolle Netze, wobei hier auch die WLAN-Netze inbegriffen sind. Schon heute sind in deutschen Großstädten kaum noch freie Frequenzen für den Router zu finden. Abhilfe soll die Datenübertragung mittels Licht statt Funkwellen schaffen. Diese Art der Übertragung wurde maßgeblich von dem deutschen Professor Harald Haas geprägt, welcher die Idee für die neue Übertragungstechnologie namens light fidelity, kurz LiFi, schon im Jahre 1997 hatte. LiFi funktioniert im Prinzip wie Morsezeichen, nur um ein Vielfaches schneller. Es bietet die Möglichkeit der Ergänzung zu dem bisherigen Wifi, hat jedoch auch das Potenzial dieses in Innenräumen zu ersetzen. Dabei ist es von großem Interesse die LiFi-Technologie in die bereits vorhandene Beleuchtung zu integrieren. Hierbei spielen jedoch nicht nur die technischen Aspekte eine Rolle, vielmehr muss auf die Wahrnehmung des sichtbaren Lichts durch den Menschen geachtet werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen zur Funktionsweise von visual light communication (VLC) und dem dazugehörigen LiFi dargestellt. Hierzu wird auch ein kurzer Überblick über technische Aspekte beziehungsweise zu beachtende Problematiken gegeben. In Kapitel 3 erfolgt ein kurzer Überblick über die Funktionsweise verschiedener weißer LEDs, sowie der Nutzung dieser als Lichtquelle zur Datenübertragung. Darauf folgt in Kapitel 4 ein Abriss der aktuellen VLC-Standards, bei dem der neue IEEE-Standard 802.15.13 näher beleuchtet wird, da dieser bei dem von mir untersuchten System Verwendung findet. Auch wird auf einige Modulationsverfahren, die bei LiFi verwendet werden, näher eingegangen. In Kapitel 5 werden die Netzwerkeaspekte besprochen, welche für die späteren Messungen von Bedeutung sind. Vor allem gibt dieses Kapitel einen Einblick in die für die Messungen verwendeten Netzwerkprotokolle. Kapitel 6 beschäftigt sich mit dem in dieser Arbeit untersuchten LiFi-System der Firma pureLiFi. Es beinhaltet die Funktionsweise, den Aufbau und die Inbetriebnahme dieses Systems. Die für die Arbeit angestellten Messungen werden in Kapitel 7 dargestellt, mit den jeweiligen Versuchsaufbauten und Ergebnissen.

Als Abschluss der Arbeit wird in Kapitel 8 ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf weitere Arbeiten zum Thema LiFi gegeben. Außerdem werden verschiedene interessante LiFi Produkte anderer Firmen vorgestellt, sowie mögliche Aspekte zu dem pureLiFi-System, die in dieser Arbeit nicht untersucht wurden.

2 Grundlagen

2.1 VLC und LiFi

Visual Light Communication (VLC) ist eine optische Datenübertragungstechnologie, welche Daten auf kurze Distanzen mit Hilfe von Licht überträgt. Die Frequenzen des hierfür genutzten Lichts liegen im sichtbaren Bereich von 400 THz bis 800 THz was einer Wellenlänge λ von 380 nm bis 780 nm entspricht. VLC nutzt, ähnlich wie die Radiofrequenzen (RF), elektromagnetische Wellen als Träger. Es kann sowohl leitungsgebunden (Lichtwellenleiter) als auch leitungslos (Optical Wireless Communication, OWC) betrieben werden. Die OWC umfasst den Infrarotbereich (λ von 780 nm bis 3000 nm), das sichtbare Licht (λ von 380 nm bis 780 nm) und die UV-Strahlung (λ von 200 nm bis 275 nm). VLC kann im Prinzip über jede künstliche Lichtquelle Daten übertragen, wobei die Funktionsweise der Lichtquelle die übertragbare Datenrate beeinflusst. Entscheidend für die Entwicklung von VLC ist die Tatsache, dass zunehmend LEDs klassische Leuchtmittel wie die Halogenlampe ersetzen, vor allem aus Gründen der Energieeffizienz. Meist werden HSLEDs (High Speed Light Emitting Diodes) als Sender und Photodioden als Empfänger bei VLC-Systemen genutzt.

Der Begriff LiFi (light fidelity), eine Unterkategorie von VLC, wurde wie bereits erwähnt von Professor Harald Haas von der Universität Edinburgh geprägt. Dieser präsentierte im Jahre 2011 jene Technologie bei der TED Konferenz (Technology, Entertainment & Design). LiFi stellt eine neue Generation der Nahbereichskommunikation dar und hat das Ziel alle Funktionen, die laut Standard IEEE 802.11 für WiFi mittels Radiofrequenzen definiert sind, zu beinhalten. So soll die VLC-Technologie unter anderem die Funktion des Frequenzduplexes, die parallele Übertragung von Up- und Downlink in verschiedenen Frequenzbändern, beinhalten. Die VLC-Technologie hat sowohl Vor- als auch Nachteile, gerade gegenüber der Hochfrequenztechnik (RF). So erzeugen die hochfrequenten Radiowellen der RF-Technologie elektromagnetische Felder, wodurch sie in Bereichen mit sensiblen Gerätschaften zu Störungen führen können. Dazu zählen unter anderem Einrichtungen wie Krankenhäuser oder aber Transportmittel wie Flugzeuge. In diesen Bereichen besteht ein großes Potential für VLC-Technik, da diese das sichtbare Licht nutzt, welches keine störenden elektromagnetischen Felder erzeugt. Ein nicht unerheblicher Vorteil besteht in der Verringerung des Gesundheitsrisikos, durch eine bessere elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Ein weiterer Bereich für den die Technologie von großem Interesse sein wird, ist die Industrie, da sie besonders vom hohen Sicherheitsstandard profitieren kann. Auf der einen Seite bilden Fabrikhallen eine natürliche Grenze für die Lichtdaten und zum anderen haben Produktionsroboter und Fertigungsmaschinen in den meisten Fällen einen festen Platz in der

Arbeitsumgebung oder bewegen sich nur in vorher festgelegten Bereichen. Somit ist es um einiges einfacher, die Sichtverbindung aufrecht zu erhalten. Durch extrem kurze Latenzzeiten lässt sich somit die Anlage fast in Echtzeit steuern. Das Fraunhofer IPMS hat hierfür bereits ein passendes Produkt entwickelt. Ein weiteres vielversprechendes Anwendungsgebiet ist die Indoor-Navigation, die Kommunikation und Positionsbestimmung innerhalb von Räumen. So wird in der Pariser Métro Lichttechnik benutzt um sehbehinderten Menschen zu helfen sich zurecht zu finden. Hier ist das Unternehmen Oledcomm federführend und plant in 66 U-Bahn-Stationen über 250 000 LEDs zur LiFi-Kommunikation zu installieren. Es gibt allerdings auch Nachteile bei der neuen Technologie, wie die Tatsache, dass eine Sichtverbindung (Line Of Sight, LOS) zwischen dem Sender und dem Empfänger für eine Datenübertragung bestehen muss, wobei dieser LOS gleichzeitig den Vorteil hat, dass das System dadurch abhörsicherer ist als die RF-Technik. Mögliche Interferenzen durch andere Lichtquellen und das Sonnenlicht sind ein Aspekt, welcher zu beachten ist, wobei es Systeme gibt, die für Outdoor-Anwendungen genutzt werden können und somit dieses Problem gemeistert haben. Gerade in Bezug auf den Uplink, der meist durch Infrarotlicht realisiert wird, ist der Einfluss des Sonnenlichts in Betracht zu ziehen, da dieses einen hohen Infrarotanteil aufweist. Auch ist die VLC-Technik darauf angewiesen, dass die Lichtquelle angeschaltet ist, damit Daten übertragen werden können, dies führt jedoch zu einem erhöhtem Stromverbrauch. Diese Erhöhung des Stromverbrauchs relativiert sich allerdings in Hinblick auf WLAN (Wireless Local Area Network), da ein WLAN-Router ebenso Strom verbraucht, sodass dieser Verbrauch bei LiFi eingespart wird. Durch die Nutzung des sichtbaren Bereichs des Lichtes besitzt diese Technologie dafür eine um vielfaches größere Bandbreite als die RF-Technologie. Auch ist zu bedenken, dass die Radiofrequenzen Lizenzen unterliegen und somit die Nutzung der vorhandenen Bandbreite recht teuer ist. Sichtbares Licht hingegen ist lizenzfrei, sodass für den Nutzer der Frequenzen keine Kosten anfallen. Es ist der VLC-Technik aufgrund des benötigten LOS möglich die gleichen Frequenzbänder erneut zu nutzen, solange sich verschiedene LOS-Pfade mit den selben genutzten Frequenzbändern nicht gegenseitig stören. VLC hat zwei signifikante Herausforderungen zu bewältigen: zum einen die Vermeidung von Flackern bei Datenübertragung, welche als sehr störend empfunden wird und zusätzlich gesundheitsschädigend sein kann, und zum anderen die Möglichkeit das Licht aus Gründen des Stromsparens und der Energieeffizienz zu dimmen. Eine Anpassung der Helligkeit ohne große Einbußen bei der Reichweite des Systems und der Datenübertragungsqualität ist von großer Bedeutung.

2.2 Flackern

Der Begriff Flackern beschreibt eine sich schnell ändernde Helligkeitserscheinung, welche je nach Frequenz visuell wahrnehmbar ist oder nicht. So sind Frequenzen bis etwa 80 Hz für das menschliche Auge wahrnehmbar. Diese Frequenz bezeichnet man generell als Flimmerverschmelzungsfrequenz. LEDs weisen mit einer Reaktionszeit von ca. 300 Mikrosekunden eine sehr geringe Trägheit auf. Dies ist zwar von großem Nutzen beim Betrieb mit PWM (Pulse Width Modulation), jedoch von Nachteil im Hinblick auf gewünschte Flimmerfreiheit eines Leuchtmittels. Mögliche Ursachen für Flackern können Störungen in der Netzspannung, Fehlfunktion des LED-Treibers oder Wechselwirkungen mit Dimmern sein. Frequenzen von 100 bis 400 Hz können außerdem laut IEEE 1789 [1] negative Auswirkungen auf den Organismus haben. Das Flackern lässt sich in zwei grobe Kategorien aufteilen. Zum einen gibt es das visuell wahrnehmbare Flackern, welches bei Frequenzen von ca. 3 bis 70 Hz auftritt, wobei der obere Wert von der Flimmerverschmelzungsfrequenz abhängig ist. Solches Flackern kann bei längerer Exposition starke Kopfschmerzen und eingeschränkte Sehfähigkeit zur Folge haben. Bei ungefähr 0,1 % der Bevölkerung kann es sogar zu fotosensitiver Epilepsie führen. Die zweite Kategorie ist die des unbewusst wahrgenommenen Flackerns, zu dem es oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz kommt und von dem Menschen nicht bewusst wahrgenommen wird. Jedoch kann diese Art des Flackerns Auswirkungen auf das neurologische System haben, was an dem Vermögen des Sehnervs und des visuellen Cortex¹ liegt, Reize bis 160 Hz zu detektieren. Auswirkung dieser Art von Flackern sind Kopfschmerzen, Migräne und Erschöpfungserscheinungen. Um Flackern zu vermeiden muss die Veränderung der Lichtstärke in eine Maximum Flickering Time Periode (MFTP) fallen. Als MFTP wird die Zeit bezeichnet, in der die Lichtintensität sich ändern kann, ohne dass es das menschliche Auge wahrnimmt. Es gibt keine festgelegte optimale Flickerfrequenz, jedoch kann angenommen werden, dass Frequenzen größer als 200 Hz, was einer MFTP kleiner als 5 ms entspricht, sicher sind.

2.3 Dimmen

„Dimmen ist die Möglichkeit, die abgestrahlte Lichtstärke einer Lichtquelle und somit deren Leuchtdichte zu variieren“. [2] Der Aspekt der Dimmbarkeit ist besonders in Bezug auf die Energieeffizienz der LED und den Gedanken des Stromsparens von Bedeutung. Es wäre wünschenswert die Verbindung des Systems ohne große Einbußen in der Übertragungsqualität aufrecht zu erhalten während ein Nutzer die Lichtquelle beliebig dimmt. Da die Pupille sich bei geringer Lichtstärke weitert und somit mehr Licht ins Auge fällt, gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen

¹ Der visuelle Cortex ist der Teil des visuellen Systems, dass die visuelle Wahrnehmung ermöglicht.

der gemessenen Helligkeit einer Lichtquelle und der wahrgenommenen Helligkeit der selben Lampe. Nach IEEE 802.15.7 [3] ist das Verhältnis zwischen den beiden Helligkeiten wie folgt:

$$\text{Wahrgenommene Helligkeit (\%)} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\text{Gemessene Helligkeit (\%)}}{100}} \quad (1)$$

Wie Abbildung 1 zeigt, wird eine Lampe, die auf 10 % gedimmt ist, von dem menschlichem Auge als ungefähr 30 % gedimmt wahrgenommen. Das Verhältnis zwischen absoluter Lichtreduktion und der Empfindlichkeit des menschlichen Auges ist also nichtlinear.

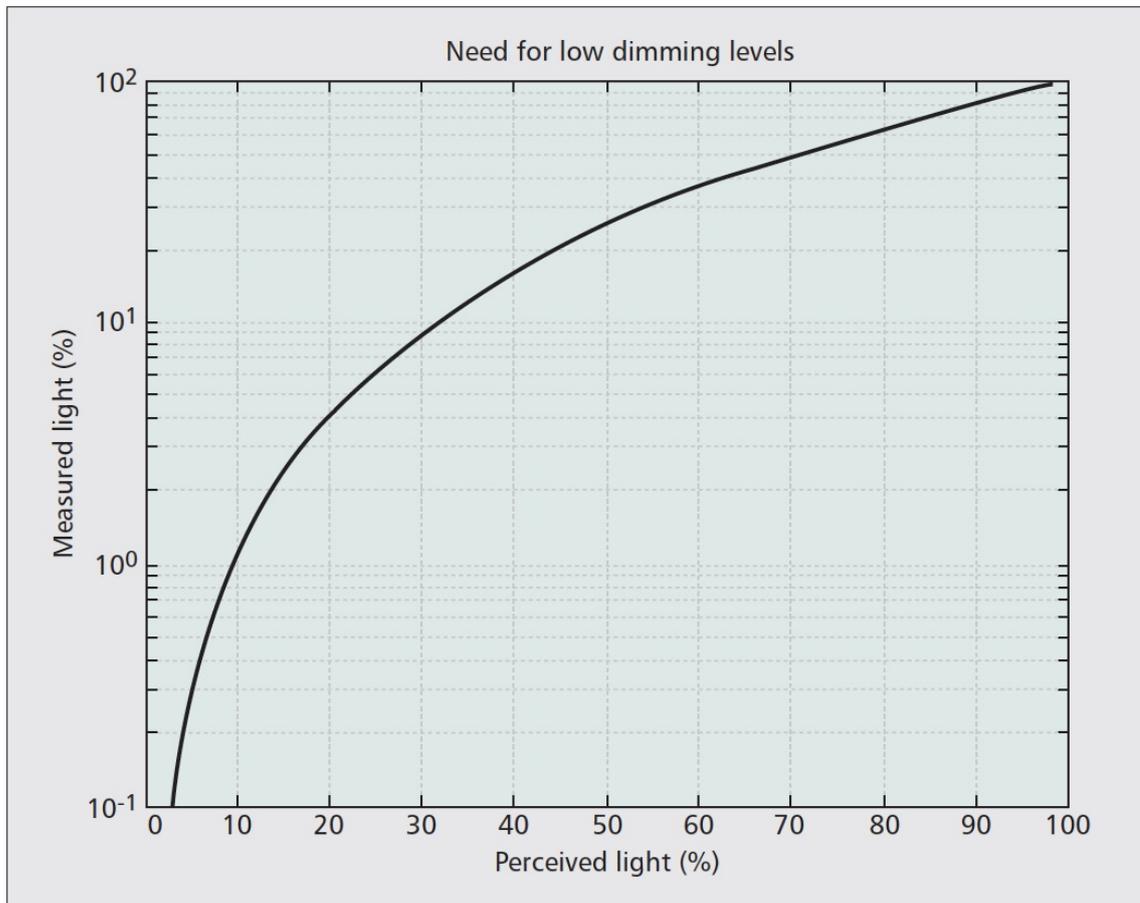


Abbildung 1: *Verhältnis zwischen der wahrgenommenen und gemessenen Helligkeit [3]*

3 Lichttechnik

3.1 Die LED zur Datenübertragung

Eine LED (light emitting diode) ist im Prinzip wie eine herkömmliche Halbleiterdiode aufgebaut. Sie besteht aus zwei Schichten von Halbleitermaterial: der n-leitenden Schicht mit einem Elektronenüberschuss und der darüber liegenden dünneren p-leitenden Schicht mit einem Elektronendefizit und somit einem Überschuss an Defektelektronen. Zwischen diesen beiden Schichten befindet sich eine Sperrschicht. Wird eine Spannung an dem p-n-Körper in Durchlassrichtung angelegt, fließt ein elektrischer Strom von der n-Schicht in die p-Schicht. Dabei kommt es zu einer Rekombination der Elektronen aus der n-Schicht mit den Defektelektronen der p-Schicht. Die überschüssige Energie wird in Form von Licht abgegeben und tritt aus der Oberfläche der p-Schicht aus. Die Lichtausbeute einer LED steigt nahezu proportional mit der Stromstärke an. Sowohl das gewählte Halbleitermaterial als auch die bei der Dotierung der Schichten verwendete Atomart beeinflussen die entstehende Lichtfarbe. Zu Beginn der Entwicklung von LEDs konnte noch kein weiß abgestrahlt werden. Dementsprechend wurden die ersten LEDs hauptsächlich für Anzeigetafeln und ähnliches genutzt. Das für eine weiße Lichtfarbe erforderliche breite Wellenlängenspektrum kann nur indirekt mit Halbleiter-Leucht Komponenten erzeugt werden. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten, die Phosphorbeschichtung und mehrfarbige RGB-LEDs.

3.1.1 Phosphortechnik

Bei dieser Technik werden ultraviolette oder blaue LEDs mit einer gelb-fluoreszierenden Phosphorschicht beschichtet, wobei der gelbe Phosphor eine Konversionsschicht bildet. Die Photonen der blau strahlenden Leuchtdiode aktivieren die Phosphorschicht, welche die blaue Strahlung in gelb-weißliches Licht konvertiert, wodurch ein breites Wellenlängenspektrum entsteht. Das menschliche Auge interpretiert die Kombination aus blau und gelb zu einer weißen Farbe. Bei dieser Art der LED gibt es verschiedene Farbtemperaturen abhängig von der Phosphorschicht und dem Leuchtmittel. Die Farbtemperatur reicht von ca. 2500 Kelvin bis 10000 Kelvin. In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau einer solchen LED zu sehen.

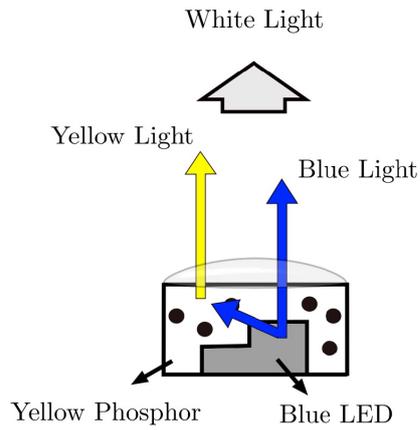


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer blauen LED mit einer gelben Phosphorschicht
[4]

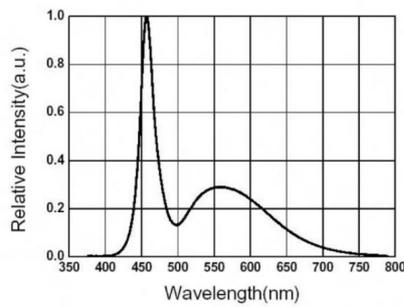


Abbildung 3: Spektrum einer blauen LED mit gelber Phosphorschicht
[5]

3.1.2 Die RGB-LED

Das Addieren von mindestens drei verschiedenen schmalbandigen, bunten Lichtquellen ist eine weitere Möglichkeit mittels LEDs weißes Licht zu erzeugen. (siehe Abbildung 4)

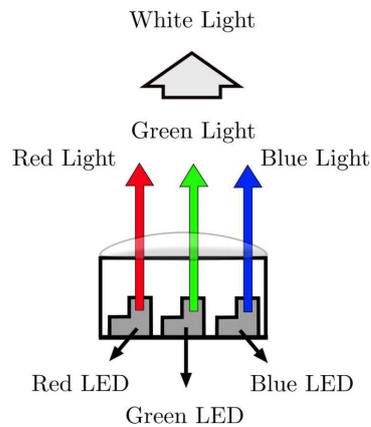


Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer RGB-LED
[4]

Die Farbe kann bei dieser Art der weißen LED gesteuert werden, indem jede Farbe einzeln moduliert wird. Es ist bekannt, dass die Intensität einer LED mit steigender Temperatur abnimmt, jedoch nimmt nicht die Intensität jeder Farbe gleich schnell ab. Somit kann es dazu kommen, dass sich die Farbe der Lichtquelle mit der Zeit verschiebt. Auch konvertieren grüne LEDs Spannungen nicht so effizient in Lichtintensitäten wie es blaue und rote LEDs vermögen. Als Folge ist die Lichtausbeute bei RGB-LEDs im Vergleich zu phosphorbasierten LED um 30 % geringer. Dies sind einige Gründe, weshalb diese Art der weißen LED weniger beliebt ist bei der Nutzung für Beleuchtungsanwendungen. In der folgenden Abbildung ist ein typisches Spektrum einer solchen RGB-LED zu sehen. Es sind deutliche Peaks in den drei Farbbereichen - blau, grün und rot - zu erkennen.

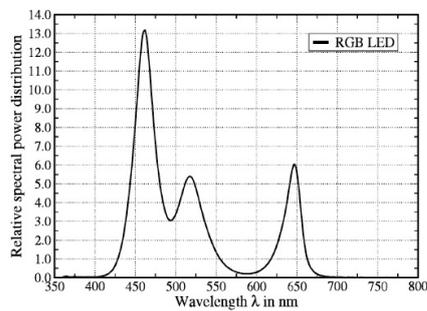


Abbildung 5: *Spektrum einer RGB-LED*
[6]

4 Aktuelle VLC-Standards

4.1 IEEE Standard 802.15.13

Es gibt eine Arbeitsgruppe, die zur Zeit an einem neuen Standard für VLC dem IEEE 802.15.13 arbeitet. Dieser Standard soll voraussichtlich bis April 2020 veröffentlicht werden. Es werden drei PHY-Schichten vorgestellt. Diese befinden sich in Layer 2 des OSI-Schichtenmodells, der Bitübertragungsschicht, welche mechanische, elektrische und weitere Hilfsmittel zur Verfügung stellt, um eine physikalische Verbindung zu aktivieren bzw. zu deaktivieren und diese aufrecht zu erhalten. Über diese Verbindung werden Bits übertragen, was in Form von elektrischen Signalen, optischen Signalen, elektromagnetischen Wellen oder Schall geschieht. In dem Standard wird eine Low Bandwidth OFDM PHY (LB-PHY), eine High Bandwidth OFDM PHY (HB-PHY) und eine Pulsed Modulation PHY (PM-PHY) definiert.

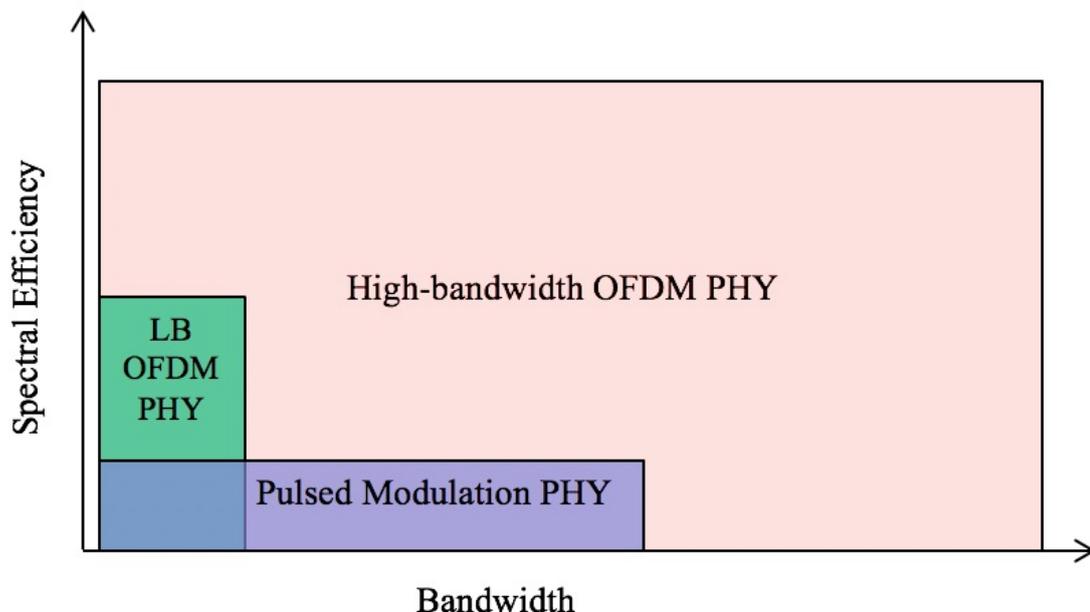


Abbildung 6: Die PHY-Schichten in Hinblick auf Bandbreite und Datendurchsatz [7]

Alle drei Schichten können für URLLC verwendet werden, da sie MIMO (Multiple Input Multiple Output) unterstützen. Die HB-Schicht besitzt eine hohe Bandbreite (von 12 bis 1000 MHz) sowie einen hohen Datendurchsatz (10 bps/HZ) und findet Verwendung bei eMBB, da sie zwischen moderaten und hohen Datenraten (bis 10 Gbit/s) skalierbar ist. Die PM-PHY ist für erweiterte Benutzeroberflächen entwickelt worden und findet Verwendung bei mMTC. Sie verfügt über eine erhöhte Bandbreite (3 bis 200 MHz) bei einem geringen Signal to Noise Ratio (SNR) und einem Datendurchsatz unter 100 Mbit/s. Die LB-PHY ist für LiFi-Anwendungen mit geringer Datenrate (Dutzende von Mbit/s) gedacht und nutzt das OFDM-Verfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). OFDM in der aktuellen Spezifikation

bietet eine adaptive Implementierung. Sie unterstützt einen hocheffizienten PHY-Modus, welcher entwickelt wurde um die Ressourcen geringer Bandbreite (bis 40 MHz einseitiger Bandbreite) optimal zu nutzen. Außerdem unterstützt sie einen niedrigkomplexen PHY-Modus, der eine hohe Energieeffizienz in mobilen Anwendungen ermöglicht. Ziel von LB-PHY ist es, die Übertragungssicherheit zu verbessern und die optische Bandbreite effizient zu nutzen. Diese Herangehensweise unterstützt Applikationen bei denen eine hohe Datenrate benötigt wird. Zur Modulation der LED werden vielfältige optische Taktraten (Optical Clock Rates, OCR) genutzt. Darüberhinaus ermöglicht die Spezifikation eine flexible, modulare Einführung energieeffizienter Signalformen, wie die enhanced Unipolar OFDM (eU-OFDM) und leistungssteigernde Signalformen, welche für verbesserte Beleuchtungssteuerung entwickelt wurden, wie die Reverse Polarity Optical OFDM (RPO-OFDM). Außerdem wird die Verwendung von anpassbaren Bit- und Energie-Ladetechniken sowie MIMO-Techniken unterstützt. Letztere können die zusätzliche Kommunikationskapazität von Multi-Lichtquellen, sowie die zusätzliche Kapazität durch die Verwendung verschiedener optischer Wellenlängen und Lichtpolarisation zur Kommunikation nutzen. Grundlage für diese Konzepte ist eine DC-biased Optical OFDM (DCO-OFDM), über welche im nächsten Abschnitt ein Überblick gegeben wird. Die LB-OFDM PHY findet in dem pureLiFi- System Verwendung.

Die MAC bei pureLiFi ist angelehnt an die im Standard IEEE 802.11a beschriebenen Version mit ein paar Veränderungen, über die jedoch zu diesem Zeitpunkt keine näheren Informationen verfügbar sind. Sie befindet sich in Schicht 2 des OSI-Modells, der Sicherungsschicht, und hat die Aufgabe eine weitgehend fehlerfreie Übertragung zu gewährleisten und den Zugriff auf die Übertragungsmedien zu regeln. Grundsätzlich bietet die MAC-Schicht Funktionen für verschiedene Aufgaben, wie den Zugriff auf Kontrollmedien sowie die Unterstützung für Energieeinsparung oder aber Roaming. Die Basisdienste sind sowohl obligatorische asynchrone Datendienste als auch ein optionaler zeitgebundener Dienst. In IEEE 802.11a werden zwei MAC-Unterebenen definiert. Einmal die Distributed Coordination Function (DCF), welche CSMA/CD als Zugriffsmethode verwendet. Diese Funktion bietet nur einen asynchronen Service an. Die zweite Unterebene ist die Point Coordination Function (PCF), welche auf Basis von DCF arbeitet und hauptsächlich die Übertragung von Zeitservices ermöglicht. Sie bietet sowohl einen asynchronen als auch zeitgebundenen Service.

4.2 Modulationsverfahren

In diesem Abschnitt werden verschiedene Modulationsverfahren nach dem IEEE-Standard 802.15.7 Visible Light Communication vorgestellt, sowie die in der LB-OFDM PHY verwendete Modulationsart. Die Architektur eines Visible-Light Com-

munication Personal Area Network (VPAN) nach IEEE 802.15.7 wird in Form einer Reihe von Schichten und Unterschichten definiert um den Standard zu vereinfachen (vgl. Abbildung 7). Jede dieser Schichten ist für einen Teil des Standards verantwortlich und bietet den höheren Schichten Dienstleistungen an.

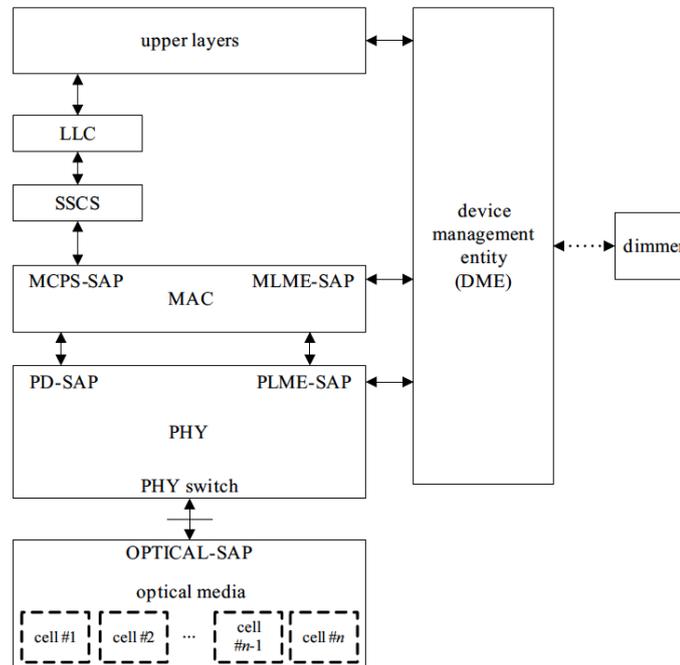


Abbildung 7: Graphische Darstellung der Schichten eines VPAN nach dem IEEE-Standard 802.15.7 [8]

Es werden drei physikalische Schichten für VLC festgelegt, auch kurz PHY genannt, die wahlweise zum Einsatz kommen können. Sie bilden in der Architektur eine eigene Schicht, welche sich unterhalb der sogenannten MAC-Schicht (Medium Access Control) befindet. Die MAC-Schicht dient dem Zugriff auf den physikalischen Kanal aller Arten des Transfers. Die PHY-Schicht beinhaltet den Lichtsender-Empfänger, welcher über einen Switch die darunter liegende Optical Media-Schicht ansteuert. Diese Schicht kann einzelne oder mehrere Lichtquellen und Fotodetektoren beinhalten. Es gibt die Schicht PHY I, welcher hauptsächlich für Outdooranwendungen gedacht ist. Diese Schicht verwendet als Modulationsarten On-Off-Keying (OOK) und Variable Pulse Position Modulation (VPPM). Je nach Modulationsart, Leistung sowie Kanalkodierung und optischer Taktfrequenz kann die PHY I-Schicht Datenraten zwischen ≈ 12 kb/s und 266 kb/s erreichen. Die PHY II-Schicht ist gedacht für Indooranwendungen mit moderaten Datenraten und erreicht je nach Modulationsart, Leistung und Kanalkodierung und optischer Taktfrequenz Datenraten zwischen $\approx 1,25$ Mb/s und 96 Mb/s. Auch diese Schicht verwendet als Modulationsverfahren OOK und VPPM. Die dritte Schicht PHY III hingegen moduliert nach dem Verfahren des Color Shift Keyings (CSK) und erreicht Datenraten von ≈ 12 Mb/s bis 96

Mb/s. Sie nutzt hierzu mehrere Lichtquellen und Detektoren in unterschiedlichen Spektralbereichen.

Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC		Data rate
			Outer code (RS)	Inner code (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,11)	1/3	24.44 kb/s
			(15,11)	2/3	48.89 kb/s
			(15,11)	none	73.3 kb/s
			none	none	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	none	35.56 kb/s
			(15,4)	none	71.11 kb/s
			(15,7)	none	124.4 kb/s
			none	none	266.6 kb/s

Abbildung 8: Übersicht der Betriebsarten von PHY I [3]

Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC	Data rate
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mb/s
			RS(160,128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mb/s
			RS(160,128)	4 Mb/s
OOK	8B10B	15 MHz	RS(64,32)	6 Mb/s
			RS(160,128)	9.6 Mb/s
		30 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
			RS(160,128)	19.2 Mb/s
		60 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
			RS(160,128)	38.4 Mb/s
		120 MHz	RS(64,32)	48 Mb/s
			RS(160,128)	76.8 Mb/s
none	96 Mb/s			

Abbildung 9: Übersicht der Betriebsarten von PHY II [3]

Die drei physikalischen Schichten bestehen zwar nebeneinander, können jedoch nicht miteinander interagieren. PHY I und PHY II belegen unterschiedliche Spektralbereiche im Modulationsspektrum und können somit durch Frequency Division Multiplexing (FDM) koexistieren. Auch das parallele Bestehen von PHY I und PHY III stellt kein Problem dar, da sie verschiedene Datenraten und optische Taktraten nutzen. Die optischen Taktfrequenzen von PHY II und PHY III überlappen

sich jedoch und zeigen somit eine signifikante Überschneidung im Frequenzspektrum. Auch unterstützen nicht alle Geräte die für PHY III benötigten multiplen optischen Frequenzbänder. Daher verwendet jedes PHY III-Gerät ein PHY II-Gerät zur Geräteerkennung, wodurch zusätzlich die Koexistenz der beiden PHY-Schichten unterstützt wird. Die PHY Schichten PHY IV, V und VI befinden sich spektral unterhalb der PHY I-Schicht und verwenden hoch direktive Empfänger (z.B. Kameras) um mittels räumlichen Multiplexing zu koexistieren. Hierbei ist die PHY IV-Schicht für den Einsatz bei diskreten Lichtquellen und bietet eine Datenrate bis zu 22 Kb/s unter Verwendung verschiedener Modulationsverfahren. Die PHY V-Schicht kommt bei diffusen Oberflächenlichtquellen zum Einsatz und schafft Datenraten bis zu 5,71 Kb/s bei Nutzung unterschiedlicher Modulationsverfahren. Im Bereich der Verwendung von Videodisplays kommt die PHY VI-Schicht zum Tragen mit Datenraten von bis zu 368 Kb/s. Die PHY-Schichten IV bis VI sind für unsere Anwendung nicht von weiterem Interesse.

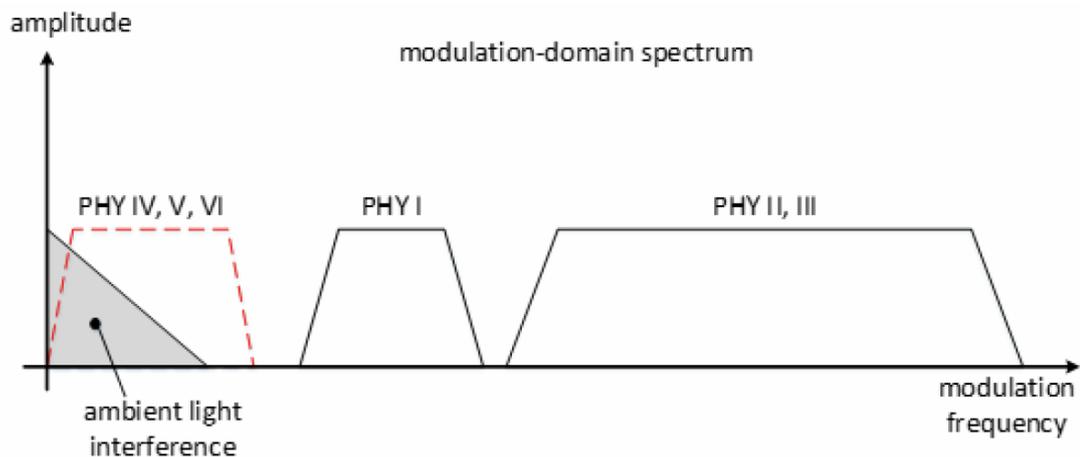


Abbildung 10: Graphische Darstellung der PHY-Schichten im Modulationsspektrum [8]

Im Folgenden werde ich auf die oben genannten Modulationsarten näher eingehen. Einen guten Überblick über weitere Modulationsverfahren, die hier nicht thematisiert werden, bietet die Arbeit von Jan Lorenz [2].

4.2.1 On Off Keying-Modulation

OOK ist die einfachste Form der Intensitätsmodulation. Sie findet, wie bereits zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, in den physikalischen Schichten vom Typ PHY I und PHY II Verwendung. Bei diesem Modulationsverfahren wird die Information in die Lichtstärke aufmoduliert und durch simples An- und Ausschalten der LED übertragen. Ist das Licht für die Länge eines Symbols T an, wird es als „1“ erkannt, ist es hingegen aus, wird es als „0“ erkannt. Hierbei bedeutet „aus“ allerdings nicht zwangsläufig, dass das Licht komplett abgeschaltet wird, sondern vielmehr wird die Intensität des Lichtes soweit reduziert, dass weiterhin klar zwischen „an“

und „aus“ unterschieden werden kann. Durch die Verwendung eines geeigneten Leitungscodes, wie dem 8B10B oder dem Manchester-Code, kann eine lange Abfolge von logischen „1en“ oder logischen „0en“, welche zu Flickern der Leuchte und CRD-Problemen (Clock and Recovery Detection) führen kann, vermieden werden. Hierzu wird eine logische „0“ durch den Manchester-Code als OOK-Symbol „01“ und eine logische „1“ als OOK-Symbol „10“ kodiert. Das Signal ist nun gleichstromanteilsfrei, allerdings verdoppelt sich die zur Übertragung benötigte Bandbreite bei einer solchen Leitungskodierung gegenüber einer einfachen Binärcodierung, wie z. B. dem NRZ-Code (Non Return to Zero). In dem Standard IEEE 802.15.7 [3] wird zwischen zwei Methoden zum Dimmen unterschieden. Bei der ersten Methode werden die Intensitäten der „An-“ und „Aus-“Level verändert, sodass sich die Intensität einer logischen „1“ so weit verringert, bis die gewünschte Lichtintensität erreicht ist. Die zweite Methode behält die Intensitätslevel bei und verändert hingegen die durchschnittliche Taktlänge durch Einfügen einer sogenannten Kompensationszeit in die Wellenform der Modulation. Dadurch bleibt die Intensität der Lampe gleich und der Dimmeffekt wird durch frühzeitiges Abschalten der LED innerhalb eines Taktes realisiert (vgl. Abbildung 11). Die durchschnittliche Helligkeit N (%), die sich durch die Art des Dimmens ergibt, kann nach [3] wie folgt beschrieben werden:

$$N = \frac{AT_1 + BT_2}{T_1 + T_2} \quad (2)$$

Wobei AT_1 die Helligkeit der Daten A in der Periode T_1 beschreibt und BT_2 die Helligkeit des Kompensationssymbols B in der Periode T_2 . So kann die durchschnittliche Helligkeit N durch Anpassen der Helligkeit der Daten und der Helligkeit der Kompensationssymbole erzielt werden.

Beide Dimmverfahren für OOK bringen ihre Vor- und Nachteile mit sich. So verringert sich bei der ersten Variante durch die Reduzierung der Intensität einer logischen „1“ zum einen die Reichweite des Signals, und zum anderen schrumpft der Symbolabstand zwischen einer logischen „1“ und einer logischen „0“. Dies hat zur Folge, dass sich die Fehlerrate (Bit Error Rate, BER) erhöht. Auch kann es zu Farbfehlern kommen, da die LED unterversorgt ist. Der Vorteil dieses Dimmverfahrens besteht darin, dass die Datenrate während des gesamten Dimmvorgangs konstant bleibt. Bei der zweiten Variante, dem Einfügen von Kompensationszeiten, hat man den Vorteil von konstanten Lichtintensitäten und somit auch konstanten Fehleraten, indes verringert sich die Datenrate. Laut dem Standard gibt es zugehörige Arbeiten in denen Kompressionstechniken verwendet werden um die Verringerung der Datenrate zu reduzieren. Der Standard hat eine Rahmenstruktur zum Dimmen mit OOK, wie in Abbildung 11 zu sehen, festgelegt. In dieser Struktur wird der Datenstrom in einzelne Blöcke aufgeteilt, welche verschiedene Aufgaben ha-

ben. Bevor Daten übertragen werden, wird eine Leerlaufbitfolge (idle pattern) mit $N\%$ durchschnittlicher Lichtintensität an die LED weitergegeben. Sie enthält keine Daten, sondern dient lediglich zur Sicherstellung einer von der LED abgestrahlten, konstanten Lichtstärke. Darauf folgt die eigentliche Datenübertragung, die man wiederum in einzelne Blöcke aufteilen kann. Der erste Block enthält die zum Dimmen eingefügten Kompensationszeit, gefolgt von einer Präambel zur Synchronisation und dem PHY-Header. Der PHY-Header enthält Details über die Framelänge, die Modulation und die Kodierung der zu übertragenden Daten. Darauf folgt die eigentliche Datenübertragung, welche wiederum in einzelne Teilblöcke unterteilt wird. So besteht sie aus der Kompensationszeit, einem sogenannten Short Sync Field (SSF), welche den Empfänger vor Datenübertragung neu synchronisiert und die eigentlichen Daten. Während der gesamten Datenübertragung ist die durchschnittliche Lichtintensität gleich der gewünschten Lichtintensität. Somit wird über die gesamte Zeit eine konstante Lichtstärke von der LED abgestrahlt, wodurch ein Flimmereffekt vermieden wird. Die Synchronisations- und Datensymbole besitzen fortwährend eine Helligkeit von 50% und die Kompensationssymbole eine entsprechende Helligkeit von $N\%$ um die gewünschte Lichtintensität zu erreichen.

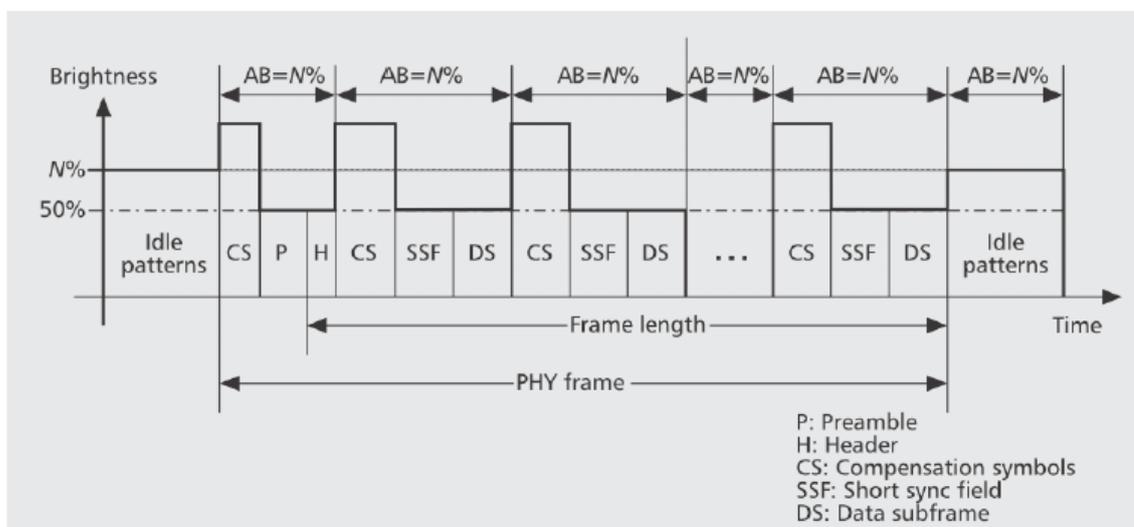


Abbildung 11: Rahmenstruktur zum Dimmen mit OOK nach Standard IEEE 802.15.7 [3]

4.2.2 (Variable) Pulse Position-Modulation

Die Pulse Position Modulation (PPM) moduliert die zu übertragenden Informationen in die Position eines Pulses innerhalb eines Taktes. So wird ein Puls, der am Anfang eines Taktes auftritt, als „0“ interpretiert, wohingegen ein Puls, der sich ab Mitte bis zum Ende eines Taktes befindet, als „1“ interpretiert (vgl. Abbildung 12). Eine Hälfte des Taktes entspricht einer Pulsweite von 50% .

Kombiniert man die PPM mit einer PWM, so erhält man die in den PHY-Schichten

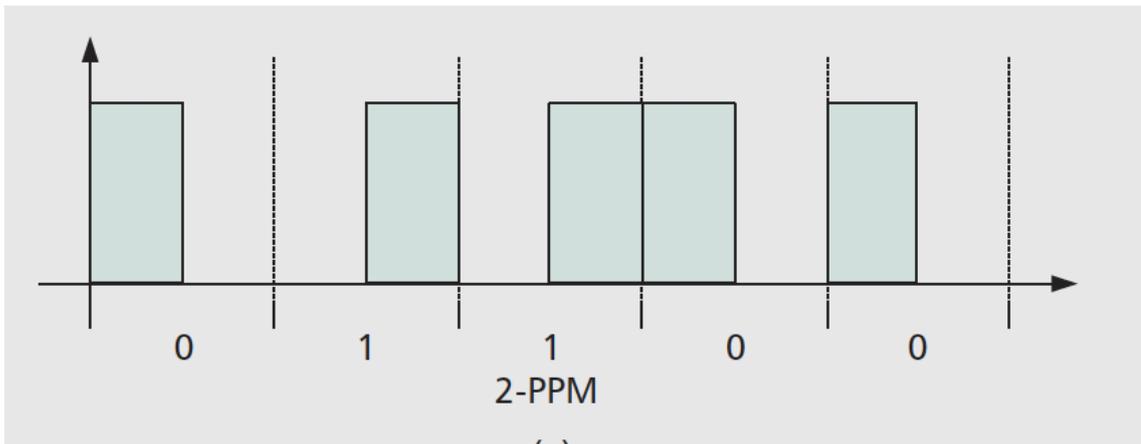


Abbildung 12: Konzept 2-PPM [3]

I und II enthaltene VPPM (Variable Pulse Position Modulation). Diese Art der Modulation verändert das Tastverhältnis jedes optischen Symbols zur Kodierung der Bits. Das „variable“ in VPPM stellt die Änderung des Tastverhältnisses, in Relation zu dem gewollten Dimmgrad dar. So kann man durch die Veränderung der Pulsweite die Lichtstärke senken und infolgedessen das Licht dimmen.

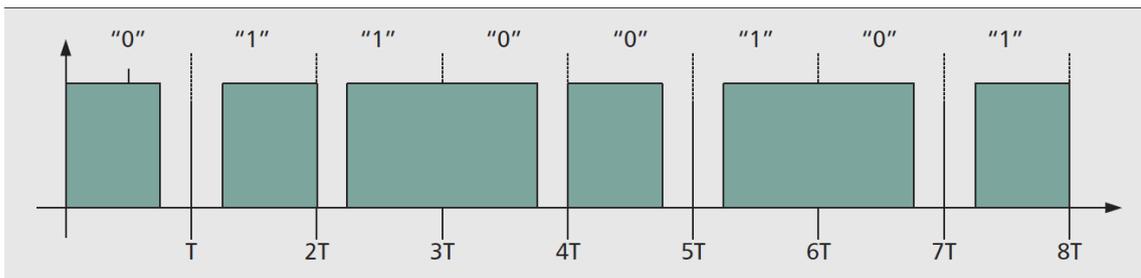


Abbildung 13: Konzept VPPM mit 75% Pulsweite [3]

Bei diesem Modulationsverfahren wird, dank den konstanten Pulsweiten, eine entsprechend konstante Helligkeit und somit auch eine gleichbleibende Bitfehlerrate erreicht. Der Standard hat eine Rahmenstruktur für diese Art der Modulation entwickelt (siehe Abbildung 14). So wird, solange keine Daten übertragen werden, wie auch schon bei OOK, eine Leerlaufbitfolge mit der gewünschten durchschnittlichen Helligkeit an die LED gesendet. In dem Moment, in dem die Datenübertragung startet, wird ein Block mit Kompensationssymbolen sowie einer Präambel und der PHY-Header mit den grundlegenden Informationen generiert. Im Anschluss wird ein zweiter Block gesendet, welcher die gewünschte Lichtstärke abstrahlt und die VPPM-modulierten Bits mit einer festen Symbollänge und variablen Pulslänge beinhaltet. Im Anschluss an die Datenübertragung wird erneut eine Leerlaufbitfolge mit der gewünschten Helligkeit gesendet.

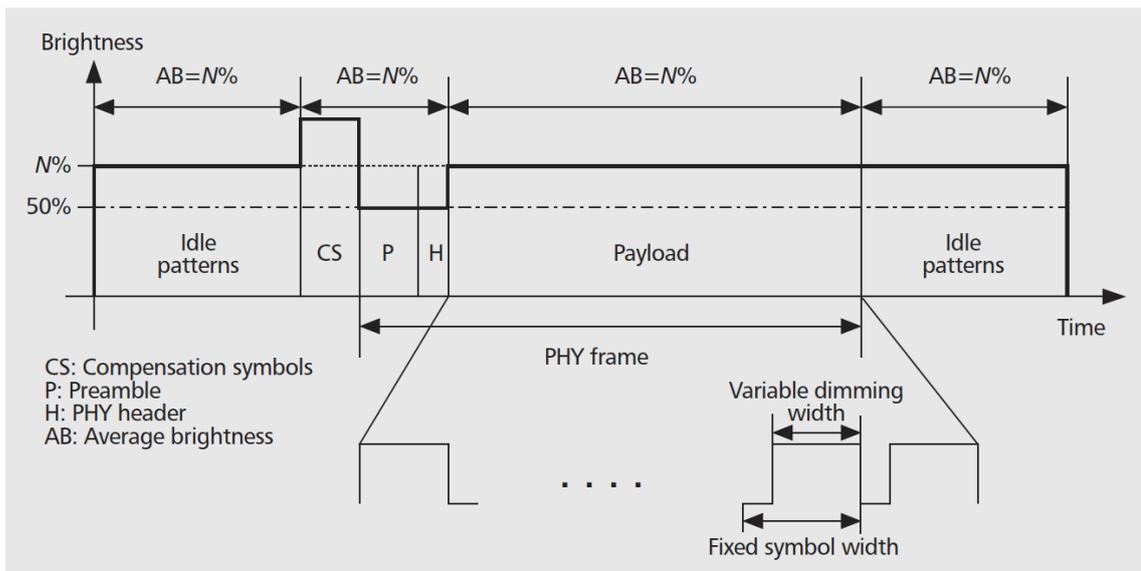


Abbildung 14: Rahmenstruktur zum Dimmen mit VPPM [3]

4.2.3 Color Shift Keying-Modulation

Die CSK-Modulation (Color Shift Keying) nutzt das Prinzip des parallelen Anregens einer roten, grünen und blauen LED. Durch das Prinzip der additiven Farbmischung entsteht hierdurch eine weiße LED. Dieses Prinzip hat den Vorteil von schnelleren Umschaltzeiten als es eine blaue LED mit einer gelben Phosphorschicht, die zweite Variante eine weiße LED zu simulieren, erreichen kann. Die CSK-Modulation funktioniert nach einem Prinzip ähnlich dem Frequency Shift Keying (FSK), bei dem jeder Bitfolge eine feste Frequenz zugeordnet wird. So wird bei dem CSK jede Bitfolge auf eine bestimmte Wellenlänge und somit Farbe aufmoduliert. Bei 4-CSK (2bit/Symbol) wird die Lichtquelle so kodiert, dass eine von 4 Wellenlängen pro Bitpaar-Kombination übertragen wird. Nach dem Standard IEEE 802.15.7 wird das Farbspektrum in sieben Farbbänder unterteilt um unterschiedliche LED-Farbauswahlen zur Übertragung zu unterstützen (vgl. Abbildung 15).

Dimmen findet hierbei durch Amplitudendimmung statt, was bedeutet, dass der Strom, der die Lichtquelle betreibt, je nach gewünschtem Dimmgrad erhöht oder aber abgesenkt wird. Es wird allerdings sichergestellt, dass der durchschnittliche optische Strom der Lichtquelle konstant bleibt und die Intensität der gewünschten Abstrahlfarbe der Farbkombination konstant ist. Die Lichtintensität über alle Symbole ist gleichbleibend, sodass kein Flickereffekt auftritt. Empfängerseitig wird durch Detektion der entsprechenden Wellenlängen die Farbe wieder dem ursprünglichem Symbol zugeordnet. CSK ist Teil der PHYIII-Schicht nach IEEE 802.15.7 und kann je nach Modulation, Kanalkodierung und optischer Taktrate Datenraten von ≈ 12 Mb/s bis ≈ 96 Mb/s erreichen (vgl. Abbildung 16).

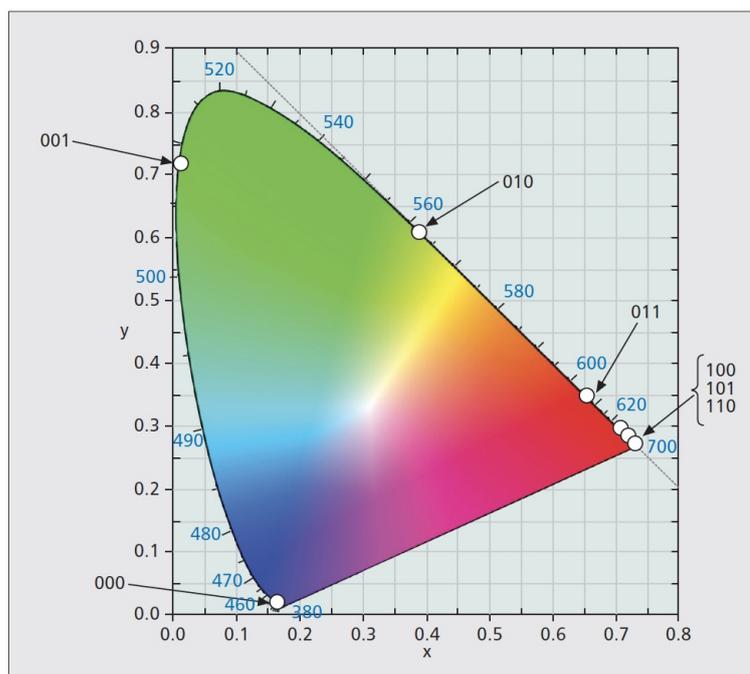


Abbildung 15: CIE 1931 xy Farbkoordinaten mit den sieben Farbbändern nach IEEE 802.15.7 [3]

Modulation	Optical clock rate	FEC	Data rate
4-CSK	12 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	18 Mb/s
4-CSK	24 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	36 Mb/s
16-CSK		RS(64,32)	48 Mb/s
8-CSK		none	72 Mb/s
16-CSK		none	96 Mb/s

Abbildung 16: Übersicht der Betriebsarten von PHY III [3]

4.2.4 DCO-OFDM

Es gibt zwei Probleme von OFDM in Verbindung mit IM/DD (Intensity Modulation/ Direct Detection). So ist das Basisbandsignal komplexwertig und bipolar und somit nicht für VLC verwendbar. Es wurden verschiedene modifizierte Varianten von Mehrträgerverfahren entwickelt, wie die OFDM-Modulation, die für VLC eine interessante Option darstellen. Eine dieser Varianten ist die DC-biased optical OFDM (DCO-OFDM), auf die in diesem Abschnitt genauer eingegangen wird. Eine weitere Einschränkung für VLC ist, dass das Signal nicht-negativ zu jeder Zeit sein muss. Am

einfachsten ist dies zu erreichen, indem ein positiver Bias-Term zu dem Ausgang im Zeitbereich eines DMT-Modulators (Discrete Multitone Transmission) hinzugefügt wird um ein unipolares Signal zu erzeugen. Diese Technik wird als DCO-OFDM bezeichnet. Das DC-Offset muss so groß gewählt werden, dass die Wahrscheinlichkeit negativer Amplituden vernachlässigbar gering wird. Wird das Offset zu klein gewählt, würde es zu starkem Clipping kommen, was einen Error Floor² zur Folge hätte. Auf der anderen Seite hat ein zu groß gewähltes Offset zur Folge, dass die Datenübertragung an Energieeffizienz verliert, da zu viel Energie zur Erstellung des Bias-Terms benötigt wird und somit diese Energie nicht für die Datenübertragung zur Verfügung steht. In Abbildung 17 ist die Struktur eines DCO-OFDM Systems dargestellt.

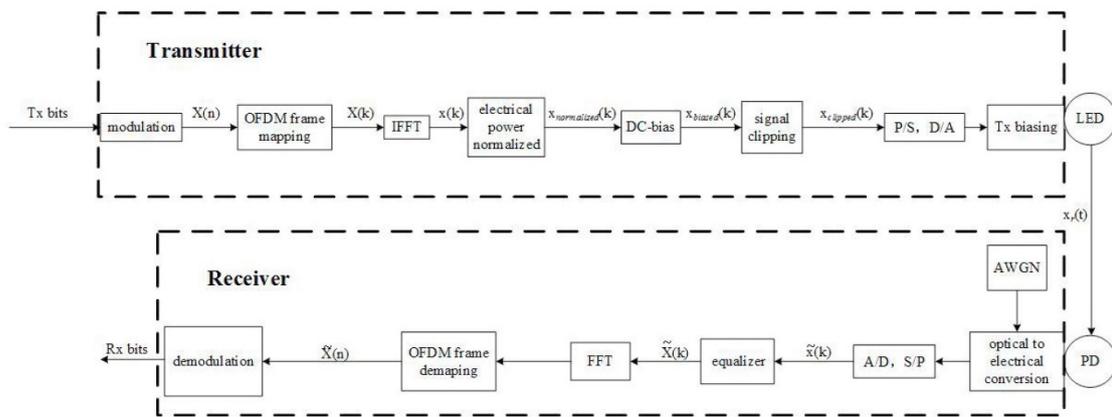


Abbildung 17: Struktur eines DCO-OFDM Systems nach [9]

Auf Senderseite wird ein Bitstrom T_x mittels eines M-QAM Modulators (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) in komplexe Symbole kodiert, wobei M die Anzahl der bei der Modulation verwendeten Symbole beschreibt. Diese Symbole werden auf N Hilfsträger verteilt, $X(k), 0 \leq k \leq N - 1$, wobei N die Größe der IFFT/FFT ((Inverse) Fast Fourier Transformation) definiert. Im nächsten Schritt wird das komplexe Signal, welches auf die Hermitian Symmetrie beschränkt ist, in die IFFT gegeben, wobei das Ausgangssignal dieser dank der Hermitian Symmetrie reelwertig ist ($x(k)$). Es folgt eine Normierung der elektrischen Leistung und dann wird ein passender DC-Bias hinzugefügt um ein annähernd nicht-negatives Signal zu erhalten. Vor der Übertragung des Signals mittels der LED werden alle übergebliebenen negativen Spitzen abgeschnitten und das Signal durch einen P/S- und A/D-Wandler (P/S bedeutet parallel zu seriell, A/D bedeutet analog zu digital) geschickt. Empfängerseitig wird das Signal von einer Photodiode erkannt, welche das optische Intensitätssignal in ein elektrisches Signal mit AWGN (Additive White Gaussian Noise) konvertiert. Nach einem A/D- und S/P-Wandler und dem Equalizer

² Ein Error Floor tritt meist bei modernen Fehlerkorrekturcodes wie dem LDPC-Code oder Turbo-Codes auf und bezeichnet den Bereich, in welchem die Leistung des Codes nachlässt.

werden die zurückgewonnenen OFDM-Symbole durch die FFT geschickt. Bei DCO-OFDM sind nur $\frac{N}{2-1}$ Symbole der Hilfsträger zum Bilden einer QAM-Symbolstruktur von Bedeutung. Die erkannten QAM-Symbole werden im nächsten Schritt dekodiert und am Empfänger als Bitstrom R_x ausgegeben.

5 Netzwerkaspekte

Dieses Kapitel befasst sich mit den Protokollen der Transportschicht (Schicht 4 des OSI-Modells), welche sich über der Internetschicht befindet (vgl. Abbildung 18). Die Aufgaben dieser Schicht sind die Segmentierung des Datenstroms und die Stauvermeidung. Ihre wichtigsten Protokolle sind das Transmission Control Protocol (TCP) und das User Datagram Protocol (UDP). Sie setzen auf dem Internet Protocol (IP) der darunter liegenden Schicht auf. Da das IP keinen Mechanismus zur Gewährleistung von Datensicherheit und die Fähigkeit der Datenflusssteuerung besitzt, müssen diese Aufgaben von den zu Beginn genannten Protokollen der Transportschicht übernommen werden. Allgemein unterscheidet man zwischen verbindungslosen und verbindungsorientierten Protokollen. Bei verbindungsorientierten Protokollen wie dem TCP, kann eine Session in drei Phasen aufgeteilt werden: den Verbindungsaufbau, die Datenübertragung und, als abschließende Phase, den Verbindungsabbau. Seine Aufgabe besteht darin einen sicheren Ende-zu-Ende Transport von Daten im Netzwerk bereit zu stellen. Das Protokoll arbeitet aus Sicht der Anwendung, die es bedient, datenstromorientiert. Somit muss sich die Anwendung nicht um die Segmentierung kümmern. Für sie existiert lediglich ein kontinuierlicher, byteweiser Datenstrom. Verbindungslose Protokolle wie das UDP bieten Anwendungen die Möglichkeit rohe IP-Pakete zu übertragen (siehe 5.2 User Datagram Protocol). Durch sein Vermögen des Datentransport hat dieses Protokoll die Berechtigung, Teil der Transportschicht zu sein. Ansonsten ist es sehr konträr zu dem TCP, da es ungesichert, verbindungslos und ohne Recovery- oder Fehlermanagement ist. Das IP ist ein Protokoll der Layer 3 während TCP und UDP Protokolle der Layer 4 sind. Auf diese beiden Protokolle werde ich im Folgenden näher eingehen.

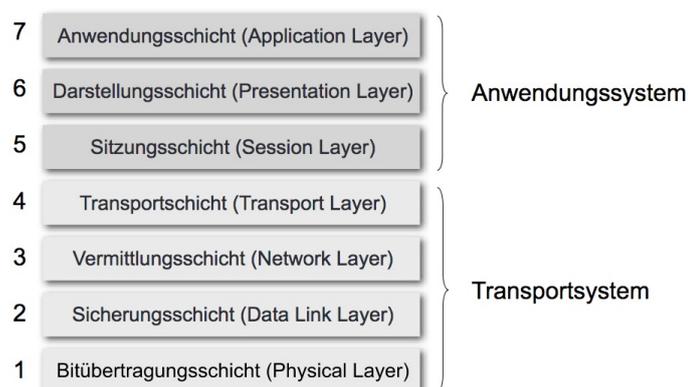


Abbildung 18: Ein Beispiel für das OSI-Referenzmodell [10]

5.1 Transmission Control Protocol

Das TCP gehört zu der Gruppe der verbindungsorientierten Protokolle (connection oriented), was bedeutet, dass es eine Verbindung zwischen zwei Partnern herstellt. Beide Partner können sowohl Daten senden als auch empfangen. Es handelt sich somit um eine bidirektionale Verbindung. Darüberhinaus ist das TCP ein sehr sicheres und paketorientiertes Protokoll. In diesem Fall heißt paketorientiert, dass es den aus Sicht des Anwendungsprogramms unendlichen Datenstrom auf Senderseite in einzelne Pakete unterteilt und auf Empfängerseite in der richtigen Reihenfolge wieder zusammensetzt. Es ist das zentrale Protokoll der TCP/IP-Protokollfamilie und die Grundlage für die Leistung zahlreicher komplexer Anwendungsprotokolle, wie unter anderem das File Transfer Protocol (FTP) oder das Simple Mail Transfer Protocol (SMTP).

Seine Hauptfunktionen sind [11] :

- Datenstromtransfer
- Virtuelle Full-Duplex-Verbindungen
- Datenflusssteuerung
- Fehlererkennung
- Prioritätensteuerung

Auf einige dieser Hauptfunktionen wird nachfolgend näher eingegangen. Zunächst umreißt ich allerdings kurz die grundlegende Funktionsweise des Protokolls. So veranlasst eine Anwendung zu Beginn TCP zum Aufbau einer logischen Verbindung von zwei oder mehreren Hosts ³. Sie übergibt datenstromorientiert die Daten (üblicherweise in Oktetten). Das TCP übernimmt nun die Aufgabe jenen Datenstrom zu segmentieren und jedes dieser entstandenen Segmente mit einem eigenen TCP-Header (siehe Abbildung 19) zu versehen.

Anschließend werden die Daten durch das IP über das Netzwerk transportiert und im Anschluss daran an das TCP des Empfängers übergeben. Dort überprüft das TCP den empfangenen Datenfluss auf Fehler, sortiert die Segmente anhand ihrer individuellen Segmentnummer, entfernt den TCP-Header und übergibt die Daten schließlich an die Zielanwendung. Sobald diese Anwendung die Anweisung erteilt die Verbindung zu beenden, wird dieser Schritt durch das TCP umgesetzt. Das TCP verfügt über ein Verbindungsmanagement, welches vorgeschriebene Maßnahmen zu Verbindungsaufbau, -kontrolle und -abbau beinhaltet. Bevor eine Verbindung durch das TCP aufgebaut wird, müssen drei Phasen durchlaufen werden. Dieser Vorgang wird als Three Way Handshake bezeichnet.

³ Host beschreibt jeden Computer, der einen wechselseitigen Zugriff zu anderen Rechnern im Internet hat

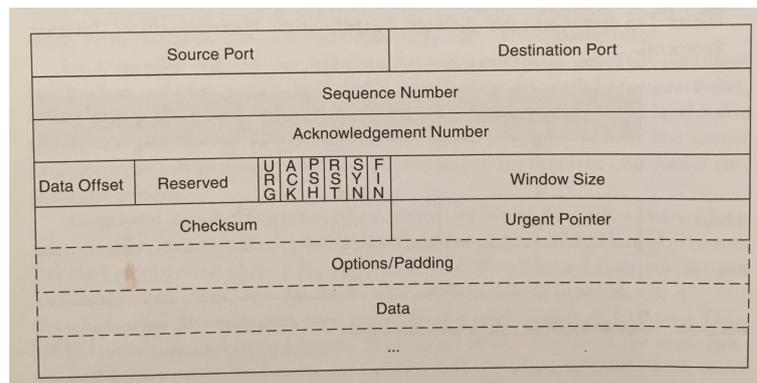


Abbildung 19: Aufbau des TCP-Segment-Formats [11]

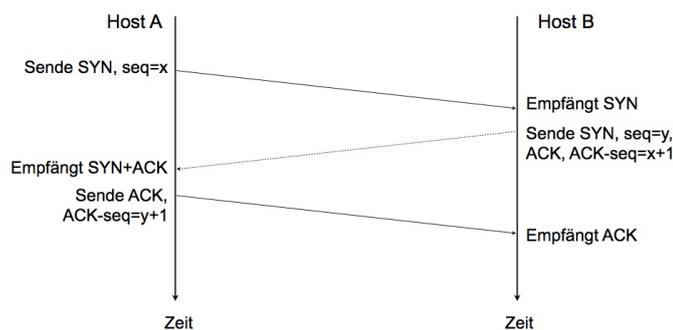


Abbildung 20: Aufbau einer Verbindung nach dem Prinzip des Three Way Handshake [10]

Phase eins besteht darin, dass durch einen sogenannten „connection primitive“ der Verbindungsaufbau zwischen zwei Prozessen eingeleitet wird. Der Sender (Prozess A) befindet sich in dem „active open“-Status und sendet an seinen Partner-Host (den Empfänger Prozess B) einen „connection request“ in Form eines Segments mit einem SYN-Flag (Der Sender teilt dem Empfänger auf diese Weise mit, dass eine Verbindung aufgebaut werden soll und leitet den Synchronisationsprozess ein). Diese Verbindungsanfrage beinhaltet die IP-Adresse des Empfängers und den Port, über den der Sender sich die Verbindung wünscht. Die nächste Phase besteht aus dem Empfang des SYN-Segments durch den Ziel-Host. Er bestätigt diesen durch das Senden eines Segments mit einem SYN-Flag und fügt zusätzlich ein ACK-Flag als Bestätigung hinzu. Das sogenannte Acknowledgement signalisiert dem Sender den Empfang von gesendeten Daten durch den Empfänger. Auf diese Weise wird dem Requesting-Host (Sender) zu verstehen gegeben, dass der Empfänger bereit ist eine logische Verbindung einzugehen. In der letzten Phase geht die Bestätigung des Ziel-Hosts bei dem Requesting-Host ein und wird von diesem durch den Versand eines letzten ACK (während der Aufbauphase) bestätigt, sodass die logische Verbindung nun aufgebaut werden kann. Sobald dies geschehen ist, können Daten übertragen werden. Durch den eben beschriebenen Einigungsprozess während der Aufbauphase wurden zwischen dem Ziel- und Quell-Host Sequenznummern ausgetauscht, was zur

Initialisierung der Verbindung geführt hat.

Nach abgeschlossener Datenübertragung gibt es zwei Möglichkeiten die Verbindung zu beenden. Fall eins ist der Fehlerfall, bei dem ein „abort primitive“ eingeleitet wird. Durch das Setzen des RST-Flags (Reset-Flag) wird die Verbindung ohne Verzögerung beendet. Dabei kann es zu Datenverlust kommen, da keine Vorkehrungen vorhanden sind um diesen zu vermeiden. Fall zwei hingegen (siehe Abbildung 21) beendet die Verbindung durch ein erneutes gegenseitiges Abstimmungsverfahren in Form von FIN-Flags, sodass sichergestellt wird, dass keine Daten verloren gehen.

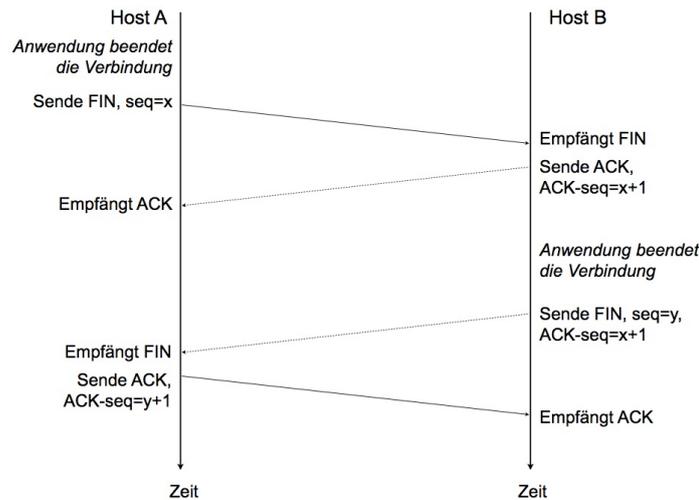


Abbildung 21: Abbau einer Verbindung nach dem Prinzip des sogenannten *double half close* [10]

Wie am Anfang erwähnt, ist einer der wichtigsten Eigenschaften der höheren Protokolle, wie dem TCP, dass sie für eine angemessene Datensicherheit auf Transportwegen zwischen verschiedenen Hosts sorgen. Dieses Merkmal ist unbedingt zu erfüllen, da Protokolle wie das IP auf der Netzwerkschicht diese Fähigkeit nicht besitzen. In der Praxis bedeutet das, dass der Empfang jedes TCP-Segments durch den Ziel-Host mit einem ACK-Flag bestätigt werden muss um zu gewährleisten, dass zu jedem Zeitpunkt der Verbindung ein zuverlässiger Datentransport garantiert ist. Jedes weitere Segment kann dementsprechend erst versendet werden, sobald das vorangegangene Segment beim Empfänger eingetroffen ist. Dieses Verfahren bietet zwar die geforderte Sicherheit, lässt jedoch andere wichtige Gesichtspunkte einer Verbindung, wie die Geschwindigkeit im Netzwerk, beinahe unbeachtet. Da dieser Aspekt gerade heutzutage immer wichtiger wird, gibt es bei dem Protokoll einen Kompromiss in dem das Prinzip des windowing bzw sliding windows genutzt wird. Das bedeutet, dass nicht nach jedem TCP-Segment eine Bestätigung durch den Empfänger erfolgt, sondern diese erfolgt nun für eine Gruppe von Segmenten. Der Empfang solcher Gruppen erfordert jedoch eine hohe Kapazität an Buffer beim Empfänger. Dieses Nadelöhr wird durch die window-size insofern umgangen, als

dass sie die Datenmenge, welche von dem Empfänger angenommen wird bis er ein ACK senden muss, limitiert wird. Der Empfänger verschickt ein ACK an den Sender sobald die Window-Size erreicht ist und kann im Anschluss daran neue Segmente empfangen. Die Größe der Window-size wird im Verbindungsaufbau von Sender und Empfänger vereinbart, kann jedoch während der Verbindung dynamisch durch den Empfänger, je nach vorhandener Kapazitäten, angepasst werden. Diese Anpassung wird mit jedem von Empfängerseite versendeten ACK-Segment neu festgelegt, was als Datenflusssteuerung bezeichnet wird. Für das Empfangen einer Bestätigung der gesendeten Segmente gibt es eine bestimmte Zeit um sicher zu gehen, dass die Segmente ankommen. Wird diese Zeit überschritten, ohne dass der Sender ein entsprechendes ACK-Segment für die gesendeten Daten erhält, wird das verlorengegangene Segment erneut versandt. Dieses Zeitintervall wird in dem Round Trip Time-Timer (RTT) hinterlegt und kontinuierlich neu berechnet. Das bedeutet, dass in dem Moment, in dem die Zeit für ein gesendetes Segment abläuft, dieses neu versandt wird und somit eine neue RTT für jenes neu versandte Segment berechnet wird.

5.2 User Datagram Protocol

Das User Datagram Protocol (UDP) gehört zu den verbindungslosen, ungesicherten Protokollen (connectionless oriented). Verbindungslos bedeutet, dass vor Beginn der Übertragung keine Verbindung aufgebaut werden muss. Das dient zur Beschleunigung von Anwendungen, die eher kleinere Datenmengen versenden und bei denen nicht von allzu großer Bedeutung ist, dass alle gesendeten Daten bei dem Empfänger ankommen. Der letzte Punkt umfasst auch die Bezeichnung des Protokolls ungesichert zu sein. Es ist nicht garantiert, dass die gesendeten Daten bei dem Empfänger überhaupt ankommen, geschweige denn in der richtigen Reihenfolge oder aber nicht doppelt. Eine Anwendung, die das UDP nutzt, muss also gegenüber diesen Störfaktoren unempfindlich sein oder eigene Mechanismen beinhalten, die mögliche Fehler korrigiert. Das UDP hat allerdings dennoch seine Berechtigung in der Transportschicht neben dem TCP zu sein. So wird es für seine einfache Handhabung geschätzt. Im Gegensatz zu dem TCP müssen nicht vor der eigentlichen Datenübertragung schon mindestens drei Datenpakete verschickt werden, die Datenübertragung kann unverzüglich starten. Ein Anwendungsbereich sind einfache Frage-Antwort-Protokolle wie eine Domain Name System (DNS) Abfrage. Hier ist es irrelevant ob ein Paket ankommt. Sollte es nicht ankommen, wird es auf Nachfrage erneut versendet. Auch unterstützt das UDP Multicasts, bei denen ein Paket nicht nur an einen, sondern gleich mehrere Empfänger verschickt wird. Da es bei UDP keine Bestätigungsnachrichten gibt, ist es für den Sender irrelevant an wie viele verschiedene Empfänger die Datenpakete verschickt werden. Ebenso ist es nicht von Bedeutung bei wievielen der Empfänger die Daten wirklich auch angekommen

sind. Aus den vorangegangenen Gründen ist UDP vor allem bei verschiedensten Multimediaanwendungen beliebt, da es dort allgemein besser ist einzelne Informationen zu verlieren als diese mit einer undefinierbaren Verzögerung zu erhalten. So käme es zum Beispiel bei Anwendungen wie Internetfernsehen (IPTV) bei erneut übertragenen Paketen, die mit Verzögerung empfangen werden zu Aussetzern wohingegen wenige fehlende Pakete lediglich die Qualität der Übertragung verringern. Bei UDP spricht man im allgemeinen von empfangendem und sendendem Partner. Der Empfänger erzeugt ein sogenanntes Datagram-Socket⁴ und wartet im Anschluss darauf ein Datagramm zu empfangen. Die Senderseite erzeugt ebenfalls solch ein Socket und versendet über dieses sein Datagramm. Wichtig hierbei ist, dass beide Partner identische Sockets verwenden, welche sich lediglich in der verwendeten Socket-Methode unterscheiden. Da die Übertragung über UDP ungesichert ist, muss sichergestellt werden, dass der Empfänger empfangsbereit ist sobald das Datagramm verschickt wird, da die Nachricht ansonsten ohne Fehlermeldung verloren geht. Der Aufbau des UDP-Datagrammformats ergibt sich nach Abbildung 22

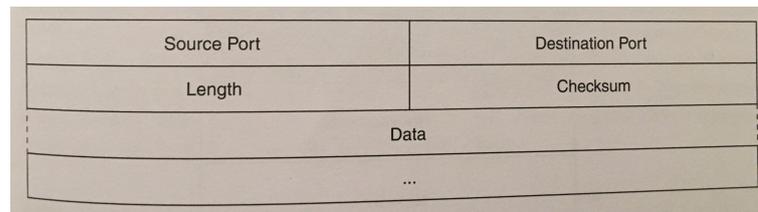


Abbildung 22: *Aufbau eines UDP-Datagramms [11]*

⁴ Als Socket bezeichnet man den logischen Endpunkt einer Verbindung, welcher über die Datenstruktur, den Port, die IP-Adresse und das Transportprotokoll definiert ist

6 Das PureLiFi System

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem von mir untersuchten LiFi-System des Herstellers PureLiFi. Es bietet einen Überblick über die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Informations- und Datenblätter, den Aufbau des Systems und die Art der Modulation, die hier verwendet wird. Für diese Arbeit wird das LiFi Starter Kit (1 Access Point, 1 LED-Leuchte, 1 Empfänger-Stick) der Firma PureLiFi verwendet, welches ich aufgebaut und untersucht habe. Für diese Untersuchung wurden geeignete Testprogramme hinsichtlich der Datenübertragungs- und Lichtqualität (siehe Abschnitt 7) genutzt. In dem Informations- und Datenblatt des Systems werden sowohl die Vorteile als auch die Anwendung des Systems dargestellt. Als Vorteile werden die Sicherheit in verschiedenen Bereichen, die Datendichte und Standortservices hervorgehoben. In Bezug auf die Sicherheit wird zum einen darauf eingegangen, dass sich die Daten durch die Übertragung mittels Licht in einem, für den Nutzer erkennbaren, physikalischen Raum befinden und somit sicherer gegenüber Fremdnutzung sind als die herkömmlichen Funkfrequenzen. Der zweite Aspekt bezüglich der Sicherheit betrifft die Interferenzen des Signals mit anderen Geräten. Die LiFi-Technologie ist gerichtet, was bedeutet, dass Interferenzen einfacher zu vermeiden sind und sogar verhindert werden können. Hinsichtlich der Datendichte weist das Informationsblatt darauf hin, dass die Bandbreite von LiFi nicht, wie es bei WiFi der Fall ist, mit anderen Nutzern geteilt werden muss. Dies führt dazu, dass LiFi eine um einiges höhere Datenmenge pro Quadratmeter aufweist. Als letzten Vorteil nennen die Hersteller den Standortservice, womit gemeint ist, dass geo fencing⁵ eingesetzt werden kann. In den Datenblättern wird von einer Datenrate für Up- und Downlink von bis zu 43 Mbit/s geworben und einem Arbeitsabstand von 1 - 6m.

6.1 Aufbau und Funktionsweise des Systems

In Abbildung 23 ist der generelle Aufbau des Systems zu sehen. Das System ist einfach zu installieren und bedarf keiner gesonderten Konfiguration. Zu beachten ist lediglich der Arbeitsabstand, sowie der Abstand zwischen Access Point und Lampe, der maximal 12 cm betragen soll um eine optimale Übertragung zu gewährleisten. Die Stromzufuhr des Systems wurde in diesem Fall mit einem S350 Series 8-Port Gigabit POE+Switch (Power over Ethernet) der Firma Netgear realisiert. Es ist wichtig, dass ein POE+Switch oder POE+Injektor verwendet wird, da eine Leistung von 30W benötigt wird. So führt ein Ethernetkabel von dem im Raum befindlichen Router zu dem POE+Switch. Dieser wird wiederum mittels eines Ethernetkabels mit dem Access Point (AP) verbunden, an welchem über den TX-Driver die LED angeschlossen ist. Alternativ gibt es die Möglichkeit ein zusätzliches Stromkabel des

⁵ Bei Geo fencing wird durch das Überschreiten einer physikalischen Begrenzung eine bestimmte Aktion ausgelöst, wie etwa das Senden einer Nachricht oder eines Warnsignals.

Herstellers zu bestellen und dem AP über darüber Strom zuzuführen. Die Internet-
verbindung ist in dem Fall mit einem Ethernetkabel vom Router direkt zu dem AP
zu realisieren.

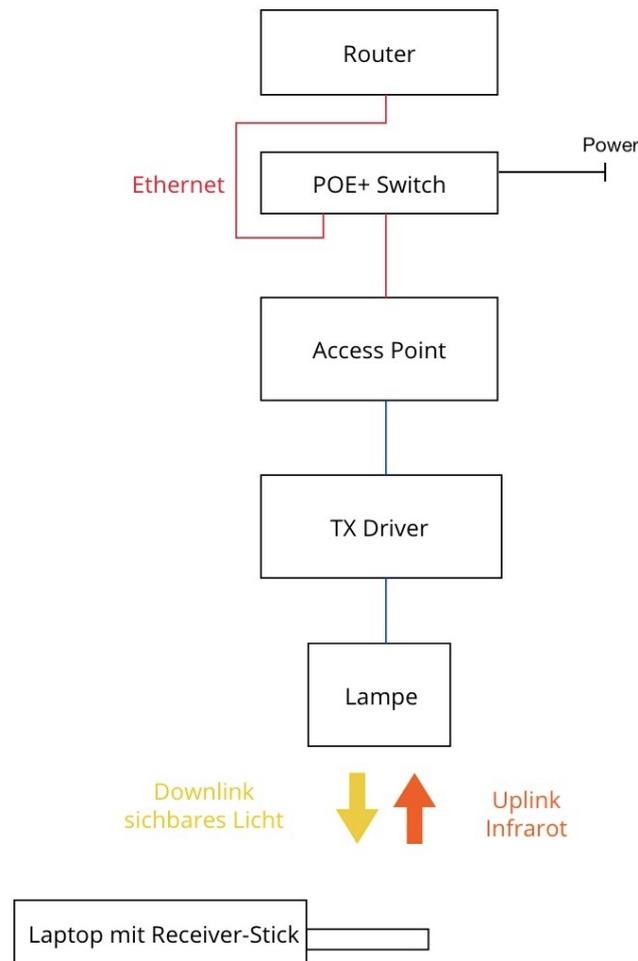


Abbildung 23: *Aufbau des PureLiFi-Systems*

Zum Starten des Systems muss nun lediglich der Switch mit Strom versorgt werden, und nach etwa einer halben Minute geht die Lampe an. Die einzelnen Bauteile des Systems haben Status-LEDs eingebaut, sodass mithilfe dieser weitestgehend erkennbar ist, ob das System richtig verkabelt wurde. Im nächsten Schritt muss die mitgelieferte Installationsdatei für den Empfängerstick installiert werden. Es gibt die Möglichkeit das System sowohl auf Windows, MacOS als auch Linux zu installieren (leider fehlte auf dem mitgelieferten Installationsstick die entsprechende Datei für das MacOS System). Nach erfolgreicher Installation steckt man lediglich den Empfängerstick in einen USB-Port des gewünschten Computers, und nach kurzer Initialisierung taucht die Verbindung mit „LiFi-XC“ in dem Fenster für Netzwerkverwaltung auf. Durch Auswahl des Netzwerks wird die Verbindung hergestellt, wie es auch bei WLAN die Vorgehensweise ist, und es kann auf das Internet zugegriffen werden.

Der Downlink des Systems wird durch das von der LED übertragene Licht realisiert, welches von der Photodiode im Empfänger demoduliert wird. Der Uplink wird mithilfe einer Infrarot LED am Empfängerstick und einer entsprechenden Photodiode am AP realisiert.

7 Messungen

7.1 Lichttechnische Messung

Die lichttechnischen Messungen wurden mit einem specbos 1201 der Firma JETI durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein sehr präzises und dabei kompaktes Spektroradiometer für den sichtbaren Wellenlängenbereich. Es ist sehr vielseitig und kann eine große Bandbreite an lichttechnischen Größen messen, unter anderem die Farbtemperatur, die x-y- und u'-v-Koordinaten sowie die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts einer LED. Dies sind auch die für diese Arbeit relevanten Messgrößen um sich einen Überblick zu verschaffen was für eine LED für das System genutzt wurde.



Abbildung 24: Spektroradiometer specbos 1201 der Firma JETI [12]

Die Messergebnisse werden im Anschluss von der Software JETI LiVal V6.8.4 berechnet, ausgewertet und graphisch dargestellt. Eine Beispielsicht der Benutzeroberfläche ist in Abbildung 25 zu sehen. Das Programm ist sehr intuitiv und durch die graphische Darstellung der Ergebnisse sehr benutzerfreundlich.

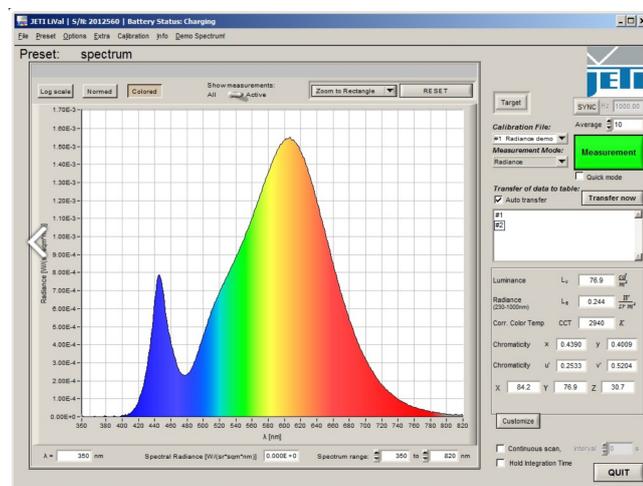


Abbildung 25: Benutzeroberfläche der Software JETI LiVal6.8.4 [13]

7.1.1 Versuchsaufbau

Für die Messung wurde die LED auf eine schwarze Referenzplatte gerichtet, genauso wie der Sensor des Messgeräts. Ein Bild dieses Messaufbaus ist in Abbildung 26 zu sehen. Das Messgerät wurde per USB-Kabel an einen Rechner angeschlossen, auf welchem die Messsoftware installiert war. Die Messung wurde in dem Motion Capture Labor der HAW Hamburg durchgeführt, welches mit Hilfe von blickdichten Vorhängen bestmöglich abgedunkelt wurde, um Streulicht zu vermeiden und das Spektrum der LED nicht zu verfälschen. Die Messung konnte nicht in dem Schwarzen Labor der Universität, welches speziell für solche Messungen ausgelegt ist, durchgeführt werden, da für die eine Messung Daten über das Licht übertragen werden müssen, und dieser Aufbau bereits in dem Motion Capture Labor installiert war.



Abbildung 26: *Messaufbau der lichttechnischen Vermessung des Systems*

7.1.2 Messungen

Zunächst wurden die Messungen ohne Datenübertragung durchgeführt. Das dabei gemessene Spektrum der LED ist in Abbildung 27 zu sehen. Das Spektrum lässt darauf schließen, dass es sich um eine blaue LED mit Phosphorbeschichtung handelt (vgl. Abbildung 3 in ??). Es ist diesem von seinem Verlauf sehr ähnlich, außer dass der Ausschlag im Bereich zwischen 500 nm und 700 nm nicht so stark ausgeprägt ist.

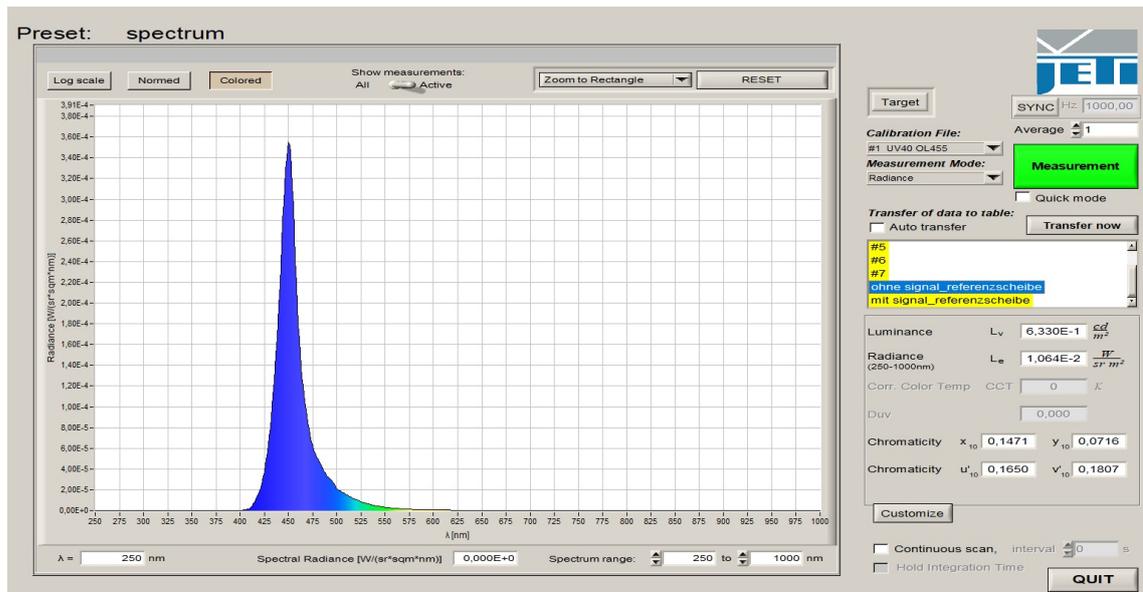


Abbildung 27: Spektrum der LED ohne Datenübertragung

Auch die Farbtemperatur (CCT) der LED ist von Interesse, laut Herstellerangabe soll es sich um eine Farbtemperatur von 4000 K handeln, welches einem neutralen Weiß entspricht, mit einer maximalen Abweichung von weniger als 3 MacAdam-Ellipsen⁶. Da sich der gemessene Weißpunkt zu weit von der Black-Body-Curve⁷ befindet (vgl. Abbildung 28), konnte die Farbtemperatur von dem System jedoch nicht gemessen beziehungsweise errechnet werden.

Betrachtet man das Spektrum, welches während der Datenübertragung gemessen wurde, wird deutlich, dass dieses sich nicht verändert. Es ist nach wie vor der Peak bei etwa 450 nm und eine geringe Strahlungsdichte bis etwa 650 nm zu erkennen. Auch der Weißpunkt im CIE-xy-Diagramm bleibt an etwa der selben Stelle mit $x = 0,1471$ und $y = 0,716$.

⁶ der Umfang um eine Bezugsfarbe im CIE-xy-Diagramm, in dem die zu vergleichenden Farben als gleichabständig wahrgenommen werden

⁷ zeigt im CIE-Farbraum den Verlauf der Farbtemperatur an und durchläuft den definierten Weißpunkt bei $x, y = (0.333, 0.333)$

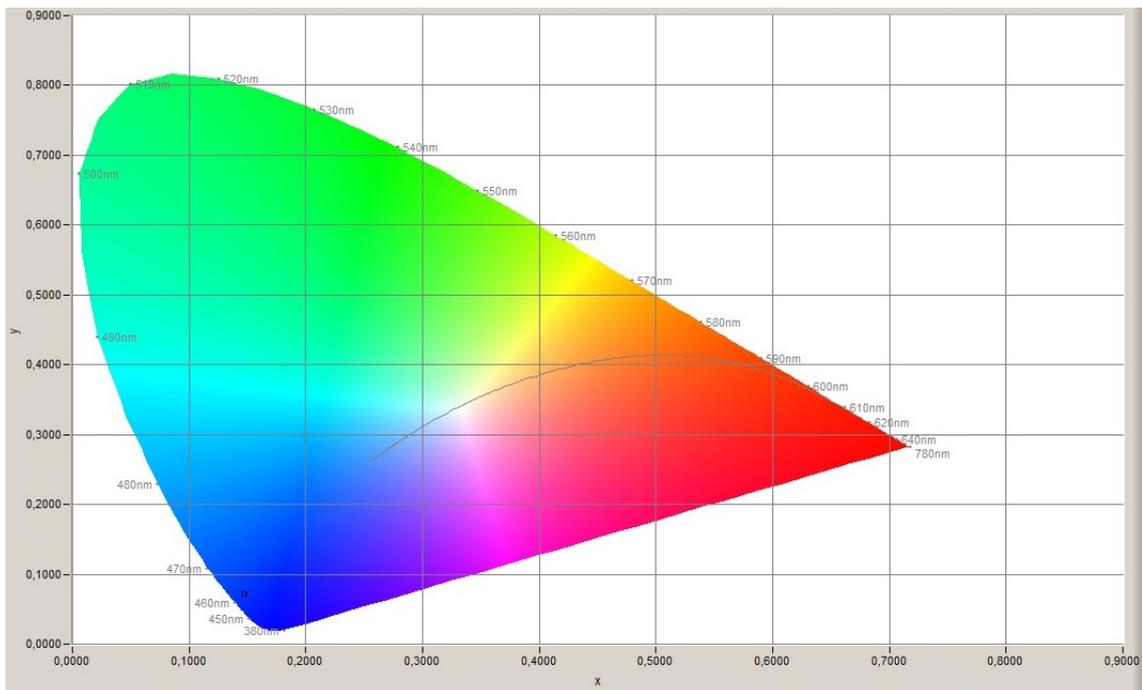


Abbildung 28: CIE-xy-Diagramm

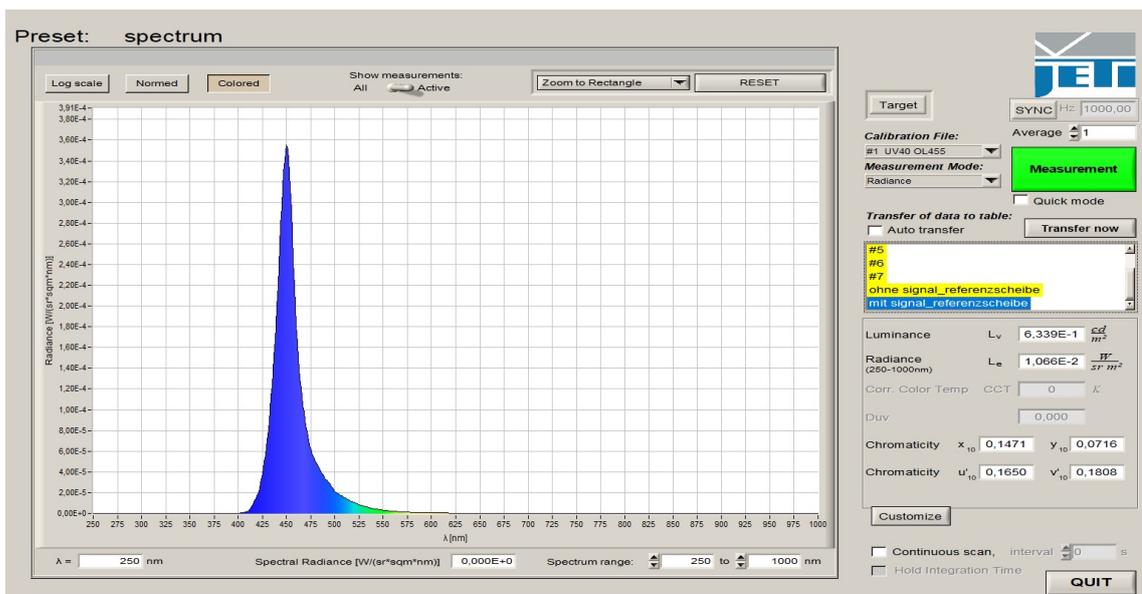


Abbildung 29: Spektrum der LED während der Datenübertragung

7.2 Nachrichtentechnische Messung

Im nachrichtentechnischen Bereich erfolgten Messungen zum Datendurchsatz, der Round-Trip-Time und TCP-Fehlern an verschiedenen Messpunkten. Die Berechnung dieser Messpunkte ist wie folgt: $Gegenkathete = \tan(\alpha) \cdot Ankathete$ mit der Gegenkathete als Entfernung der Messpunkte auf dem Boden zur Mitte und der Ankathete als Höhe der Lampe von 1,95m. Diese Höhe entspricht dem Abstand eines Arbeitsplatzes zur Decke in einem Büro.

Somit kommt es zu folgenden Messpunkten, wobei b die Gegenkathete ist:

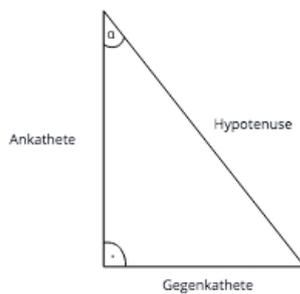
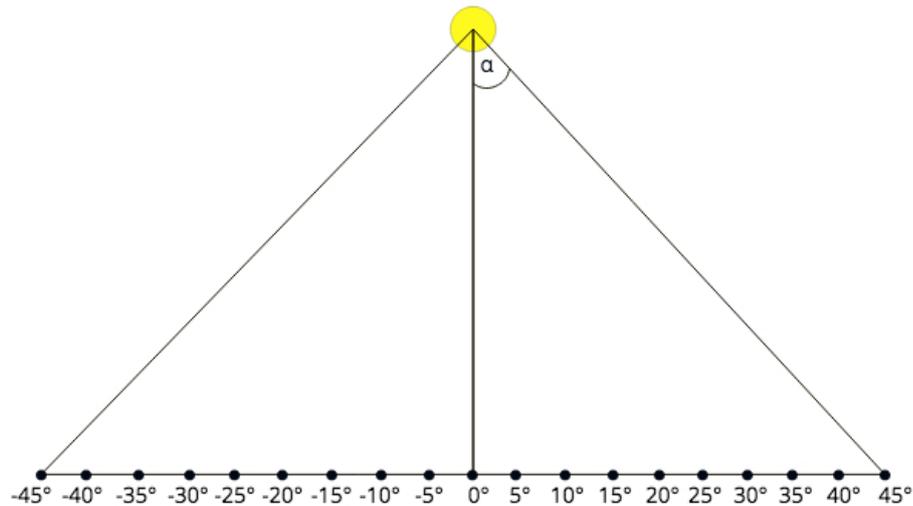


Abbildung 30: *Berechnung der Messpunkte*

α	b
5 °	0.17 m
10 °	0.34 m
15 °	0.52 m
20 °	0.71 m
25 °	0.91 m
30 °	1.13 m
35 °	1.36 m
40 °	1.70 m
45 °	1.95 m

Tabelle 1: *Berechnete Messpunkte*

Als Messprogramme wurden Iperf Version 3.1.3 und Wireshark Version 3.0.5 genutzt. Iperf ist eine freie Software zum testen des Datendurchsatzes von Rechnernetzen. Hierzu erzeugt Iperf TCP- und UDP-Datenströme. Parameter wie uni- oder bidirektionale Datenströme, Puffergröße, zu übertragende Datenmenge und die Zeit frei gewählt werden. Für die Messungen mit dem TCP wurden keine Änderungen an den, vom dem Programm automatisch eingestellten, Parametern genommen. Für die

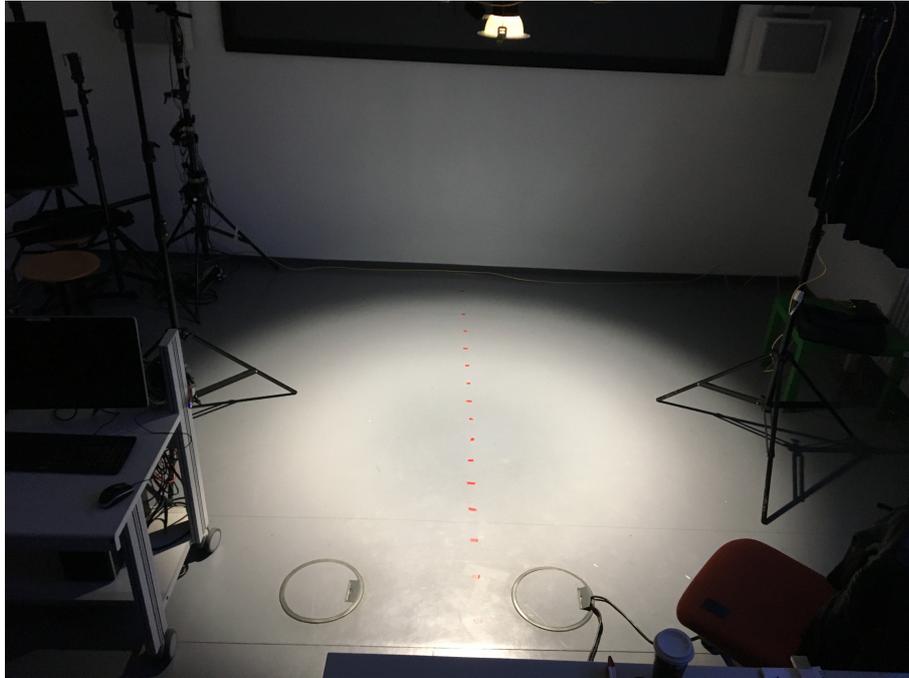


Abbildung 31: *Messpunkte in vertikaler Richtung*

Messungen mit dem UDP wurde die Bandbreite auf 0 Mbit/s (Standardeinstellung ist 1 Mbit/s für UDP) und das Zeitintervall, in dem gemessen werden soll, wurde auf 10 s gesetzt. Zum Aufzeichnen und grafischen Darstellung der Ergebnisse wurde die kostenlose Software Wireshark genutzt. Es ist eine Software zur Analyse und der grafischen Aufbereitung von verschiedenen Datenprotokollen. Sie stellt entweder während oder nach der Aufzeichnung eines Datenverkehrs einer Netzwerkschnittstelle Daten in Form von einzelnen Paketen dar. Sie stellt mehrere Analysemöglichkeiten zur Verfügung, von denen bei diesen Messungen der Datendurchsatz, die RTT und der IO-Graph genutzt wurden. Es wurde ein Latitude E6520-Laptop für die Messungen der UDP- und TCP-Datenströme eingesetzt und der Up- und Downlink des Systems unabhängig voneinander gemessen. Die Messungen wurden im Motion Capture Labor der HAW Hamburg durchgeführt, welches für diese mit blickdichten Vorhängen abgedunkelt wurde.

7.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist wie folgt: Das LiFi-System ist an einer Stange auf Stativen in einer Höhe von 1,95 m angebracht. Die LED ist so ausgerichtet, dass sie sich direkt über dem Messpunkt 0° befindet. Der AP des Systems befindet sich rechts von der LED in einem Abstand von 20 cm. Die Messpunkte sind in vertikaler Richtung mit - 40 bis + 40 bezeichnet und in horizontaler Richtung mit den Bezeichnungen rechts und links, wobei rechts in Richtung des AP und links entgegengesetzt des AP bedeutet. Zum Messen wurde der Laptop so platziert, dass der Receiverstick auf dem jeweiligen Messpunkt liegt. Zwar würde eine Platzierung des Laptops mittig

auf dem Messpunkt eher dem Arbeitsverhalten eines Nutzers des Systems entsprechen, da man das Licht nicht nur zur Datenübertragung nutzt, sondern zusätzlich zur Beleuchtung des Arbeitsplatzes. Jedoch wäre es voraussichtlich zu stärkeren Ungenauigkeiten bei dieser Art der Platzierung gekommen.



Abbildung 32: *Messaufbau der nachrichtentechnischen Vermessung des Systems*

7.2.2 Messungen mit TCP

Zu Beginn werden die Messungen der Datenübertragung mit dem TCP näher beleuchtet. In den folgenden zwei Graphen ist der durchschnittliche Datendurchsatz an den verschiedenen Messpunkten, aufgeteilt in Uplink und Downlink, zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Datenrate zum Rand des Lichtkegels nicht langsam abnimmt, sondern viel mehr abrupt abbricht. Auch ist zu erkennen, dass der Datendurchsatz des Downlinks deutlich besser ist als der des Uplinks. In den Datenblättern ist die Rede von einer maximalen Datenrate von 43 Mbit/s für Up- und Downlink. Diese wird weder von dem Down- noch dem Uplink des Systems erreicht. Vielmehr liegt die bei den Messungen herausgekommene maximale Datenrate des Downlinks bei etwa 32 Mbit/s und die des Uplinks sogar nur bei etwa 24 Mbit/s und somit deutlich unter der Angabe des Datenblattes. Jedoch muss man bedenken, dass die im Datenblatt angegebene Datenrate bewusst als maximale Datenrate angegeben wird, vergleichbar mit den Datenraten, die bei einer Wlan-Verbindung angegeben werden. Auch hier liegt die tatsächliche Datenrate der Verbindungen meist sehr deutlich unter der vom Anbieter angegebenen maximal erreichter Datenrate.

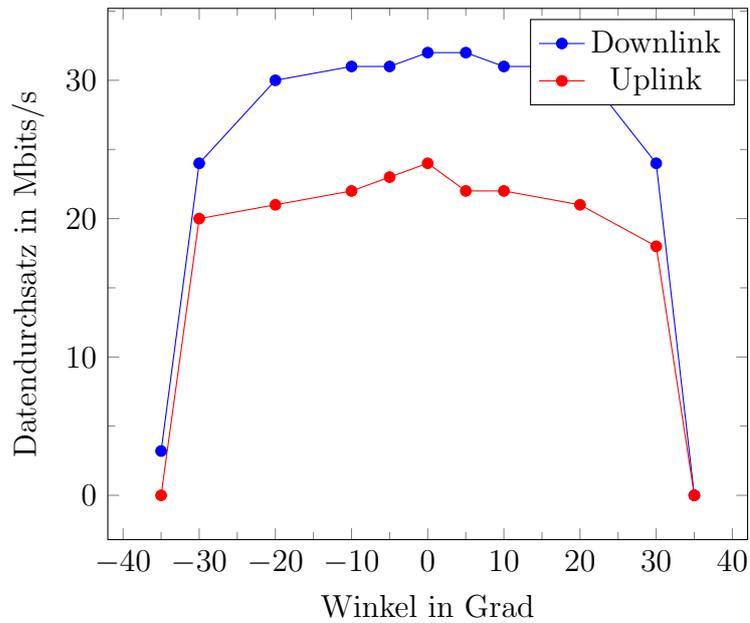


Abbildung 33: *Vertikale Messwerte*

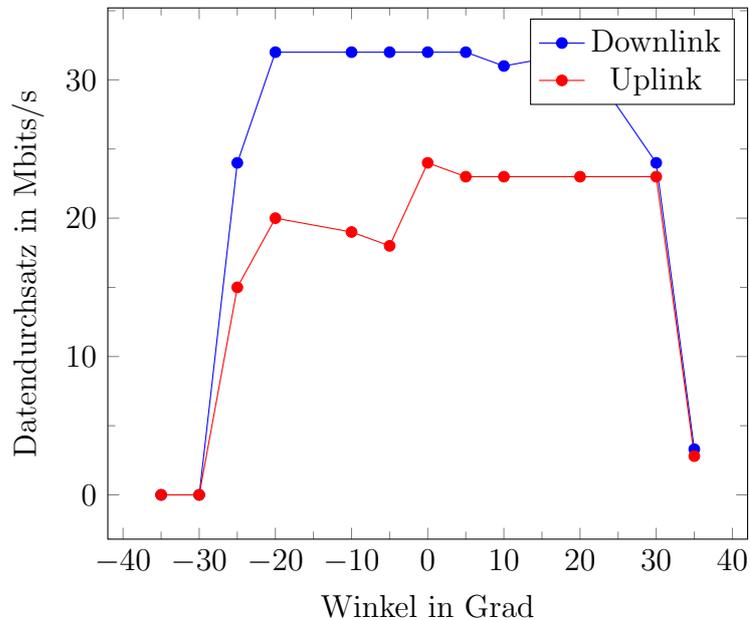


Abbildung 34: *Horizontale Messwerte*

Da für die Messungen mit dem Latitude E6520 ein relativ langsamer Rechner genutzt wurde, lag die Vermutung nahe, dass mit einem schnelleren, beziehungsweise neuem Modell eventuell bessere Messwerte erreicht werden können. Der Rechner zeigte auch während der Messungen Probleme, da er zwischenzeitlich den Receiver-Stick nicht mehr erkannte und der Rechner somit neugestartet werden musste. Also wurden mit dem Razor Blade QHD+ ,14 Gaming PC Referenzmessungen gemacht, um den ...Rechner als Nadelöhr der Datenübertragung bestätigen oder aber ausschließen zu können. Diese Referenzmessungen ergaben, mit ein paar kleinen Abweichungen, jedoch die selben Ergebnisse wie die vorangegangenen Messungen, sodass ausgeschlossen werden kann, dass die erreichte Datenrate an der Leistung des Rech-

ners liegt. Eine weitere Möglichkeit für die geringe Datenrate ist es, dass die mitgelieferte LED nicht leistungsfähig genug ist um die gewünschten Datenraten von 43 Mbit/s zu erreichen. Eventuell schafft dies eine leistungsfähigere LED mit schnelleren Umschaltzeiten.

Interessant ist auch der Unterschied zwischen Up- und Downlink in der horizontalen Bewegung. Es war zu erwarten, dass die Messwerte in die eine Richtung besser sind als in die andere Richtung. Dies liegt an der stärkeren Bündelung der Infrarot-LED, über die der Uplink läuft. Man erkennt deutlich auf welcher Seite der LED der AP mit dem Infrarot-Receiver angebracht ist, da in diese Richtung der Uplink einen besseren Datendurchsatz zeigt als in der entgegengesetzten Richtung (vgl. ??).

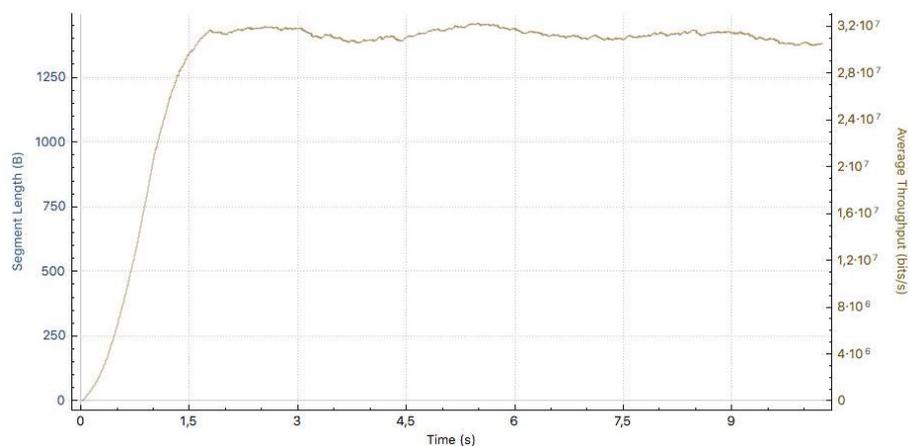


Abbildung 35: *Downstream am Messpunkt 0°*

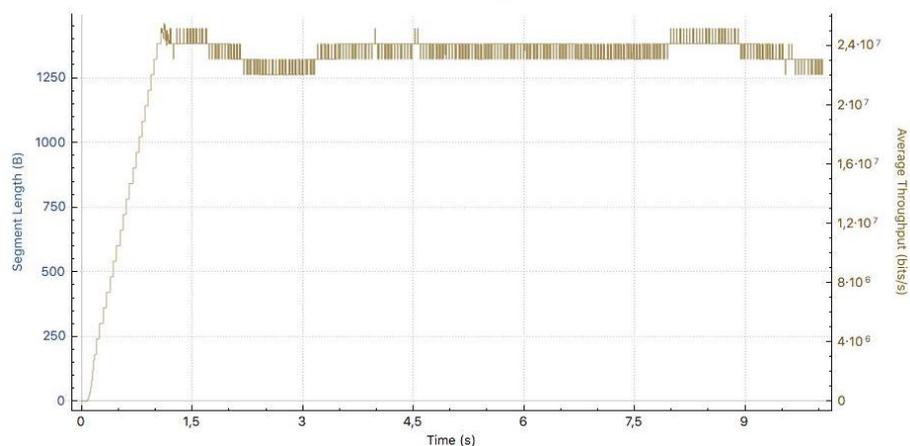


Abbildung 36: *Upstream am Messpunkt 0°*

In Abbildung 35 sieht man den Datendurchsatz für den Downstream an dem Messpunkt von 0°. Hierbei sollte es sich um den Sweetspot handeln, da der Receiverstick optimal für den Downlink platziert ist. Für den Upstream müsste der Sweetspot etwas nach rechts verschoben sein, da sich der Empfänger für den Uplink im AP befindet, welcher rechts von der Lampe angebracht ist. Bei dem Vergleich des Up- und Downstreams ist deutlich zu erkennen, dass der Downstream nicht nur einen

höheren Datendurchsatz aufweist, sondern auch weniger Schwankungen in der Datenübertragung. Der maximale Datendurchsatz der Messung wird bei dem Downlink bei etwa 1,5 s und bei dem Uplink nach etwa 1 s erreicht.

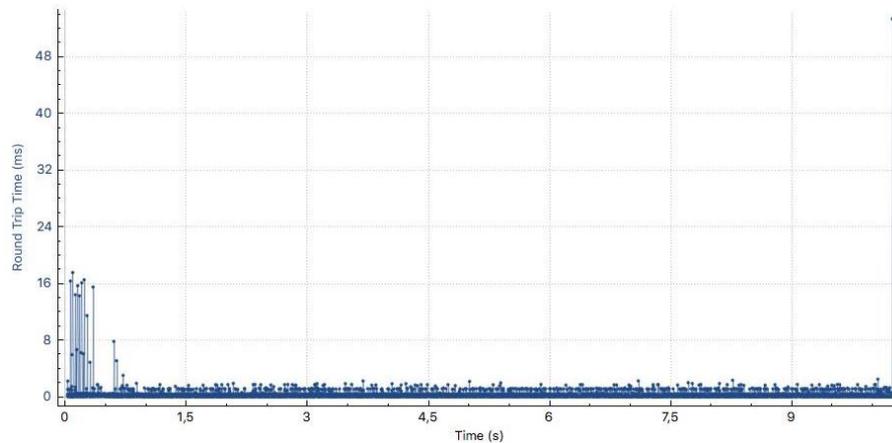


Abbildung 37: *RTT des Downlinks an dem Messpunkt 0°*

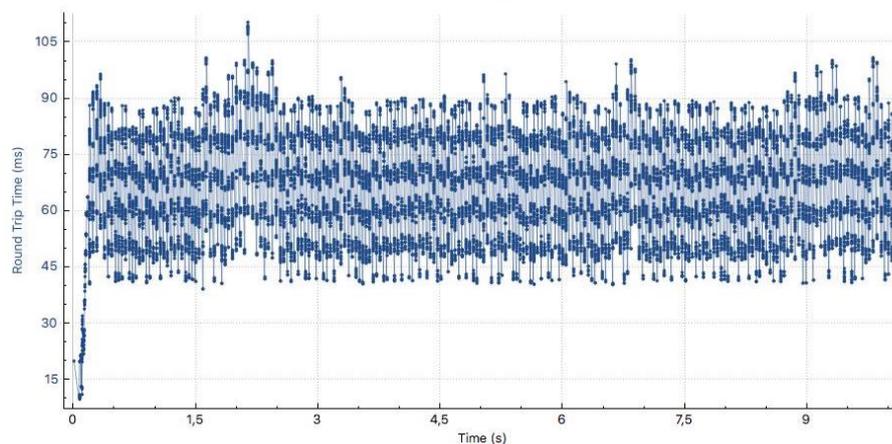


Abbildung 38: *RTT des Uplinks an dem Messpunkt 0°*

Ein Blick auf die in Abbildung 37 und Abbildung 38 dargestellten RTTs zeigt, dass es bei dem Uplink zu signifikant höheren RTTs kommt als bei dem Downlink. So kommt es hier zu RTTs zwischen 40 ms und 105 ms, wohingegen die Messung des Downlinks RTTs von maximal 18 ms aufweist und dies auch nur zu Beginn der Verbindung. Danach liegen die RTTs des Downlinks im Bereich von 2 ms. Eine hohe RTT bedeutet höhere Latenzen und Paketfehlerraten bei der Datenübertragung. Bei Internetverbindungen über Netzwerkkabel liegt sie in einem Bereich von einigen Millisekunden bis hin zu 500 Millisekunden.

Die IO-Graphen der selben Messungen zeigen die TCP-Fehler. So kommt es im Downlink zu keinen TCP-Fehler während der Uplink vor allem zu Beginn der Verbindung einige dieser Fehler aufweist, zu erkennen an den senkrechten Balken in Abbildung 40. Dies erklärt auch die stärker schwankende Datenrate und die großen RTTs des Uplinks.

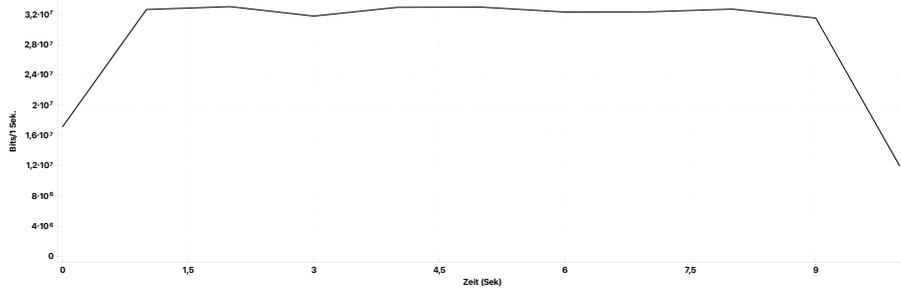


Abbildung 39: IO-Graph des Downlinks an dem Messpunkt 0°

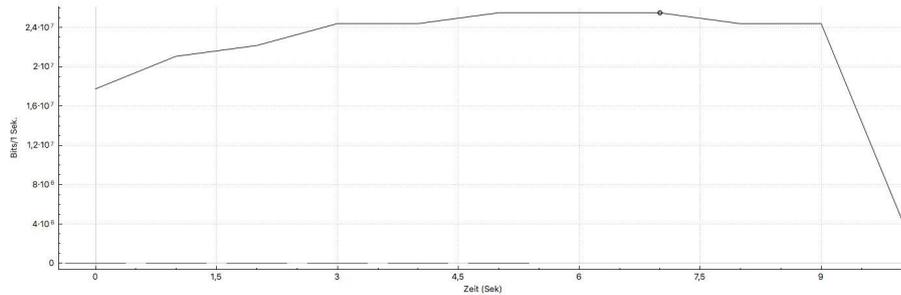


Abbildung 40: IO-Graph des Uplinks an dem Messpunkt 0°

Als nächstes werden die Randgebiete in horizontaler Richtung des Systems an den Messpunkten $l25^\circ$ und $r35^\circ$ genauer betrachtet. An dem Messpunkt $l25^\circ$ ist ein deutlicher Abfall des Datendurchsatzes, sowohl von dem Down- als auch dem Uplink, im Vergleich zu der Messung an dem Messpunkt 0° zu erkennen. So fällt dieser für den Downlink auf durchschnittlich 24 Mbit/s und für den Uplink auf durchschnittlich 15 Mbit/s ab. Auch kommt es bei beiden zu größeren Schwankungen im Datendurchsatz im Vergleich zu dem ersten Messpunkt. Dieser ist der letzte Messpunkt an dem eine Datenübertragung möglich ist, die Datenrate fällt jenseits des Punktes auf 0 Mbit/s ab.

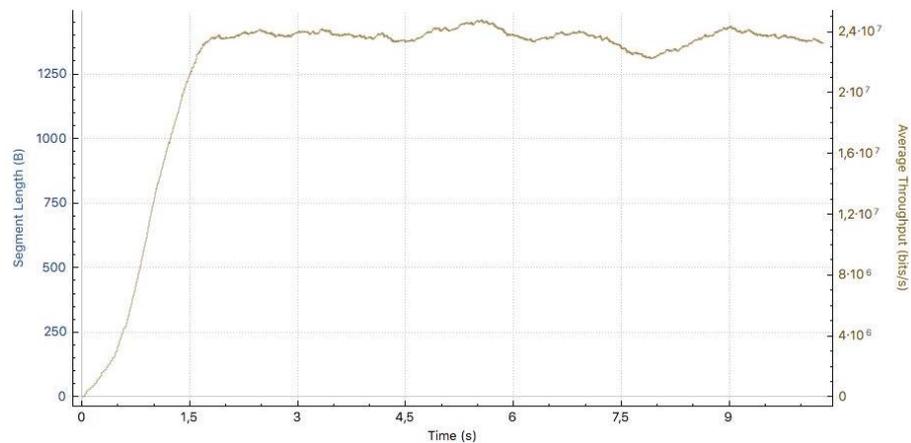


Abbildung 41: Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt $l25^\circ$

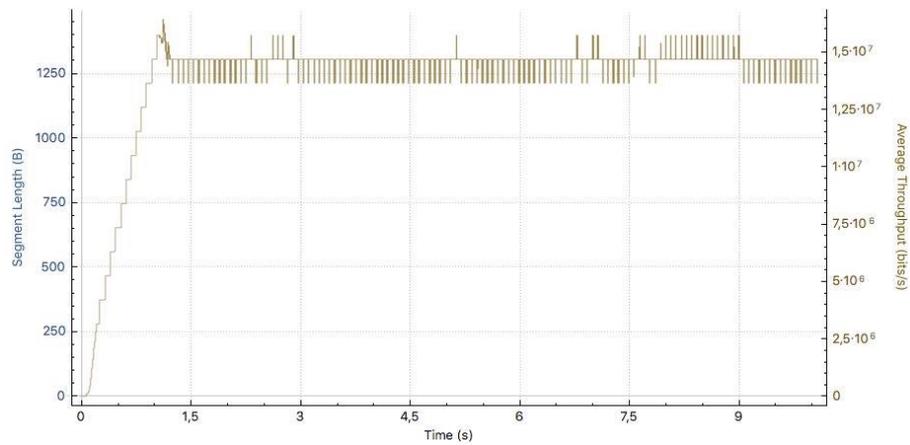


Abbildung 42: *Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt l25°*

In den folgenden zwei Abbildungen ist der Verlauf der RTT über die Zeit der Messungen für Up- und Downlink zu sehen. Auch an diesem Messpunkt ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Richtungen zu erkennen. So ist die RTT für den Downlink signifikant geringer als die für den Uplink. Zu Beginn der Messung des Downlinks wurde eine RTT von maximal 26 ms gemessen, im Vergleich bei 0° war es eine maximale RTT zu Beginn von 18 ms, danach pendelt sich die RTT bei etwa 2 ms ein, wie auch am Messpunkt 0°. Bei dem Uplink haben wir erneut deutlich höhere Werte für die RTT als beim Downlink, auch im Vergleich zu dem ersten Messpunkt werden größere Werte gemessen, hier liegen sie im Bereich zwischen 70 ms und 150 ms.

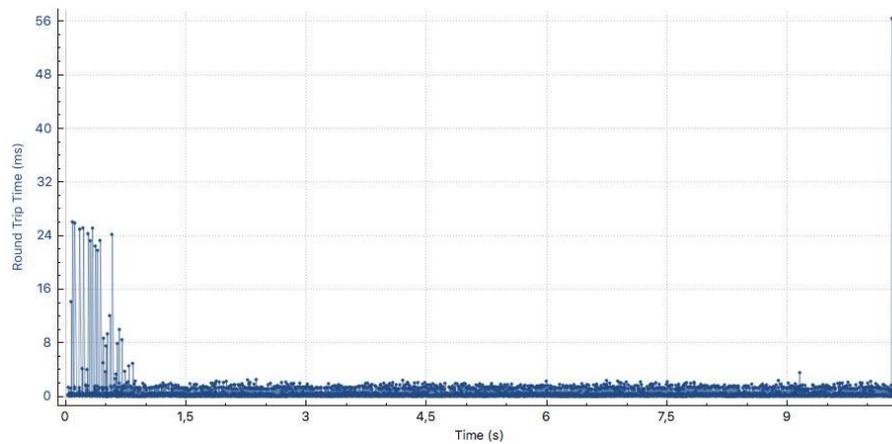


Abbildung 43: *RTT des Downlinks an dem Messpunkt l25°*

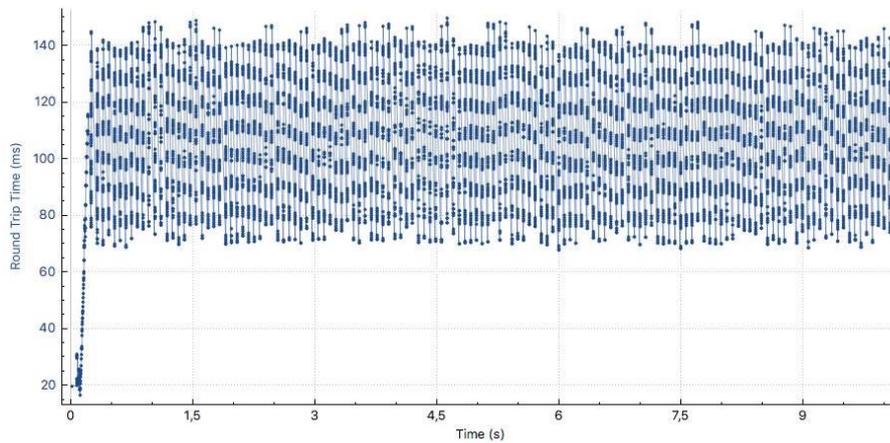


Abbildung 44: *RTT des Downlinks an dem Messpunkt l25°*

Ein Blick auf die IO-Graphen der Messungen zeigt, wie schon am ersten Messpunkt, für den Uplink vermehrt auftretende TCP-Fehler.

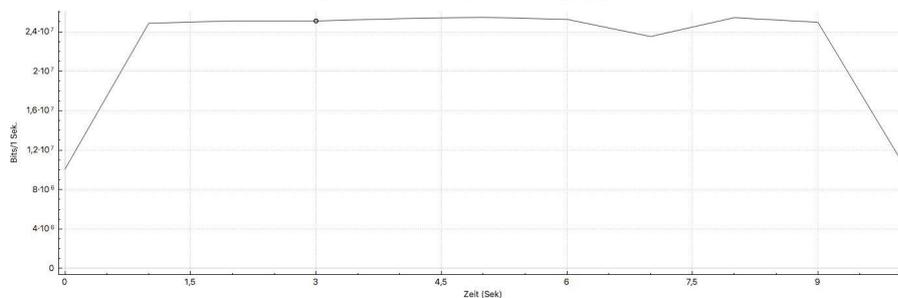


Abbildung 45: *IO-Graph des Downlinks an dem Messpunkt 0°*

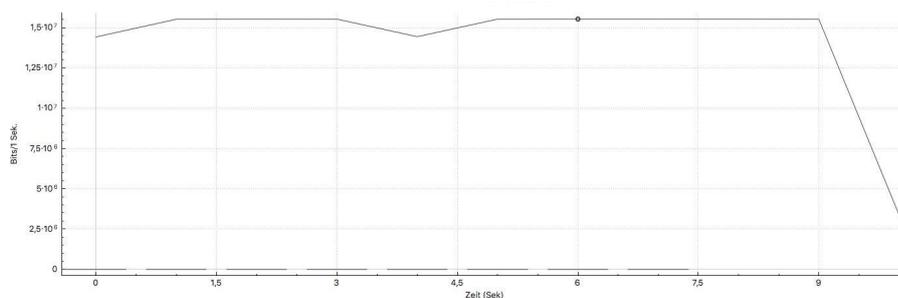


Abbildung 46: *IO-Graph des Uplinks an dem Messpunkt 0°*

Der Messpunkt $r35^\circ$ stellt den letzten Messpunkt dar, an dem auf dieser Seite des Messaufbaus eine Datenübertragung möglich ist. Der Datendurchsatz an diesem Messpunkt liegt bei durchschnittlich 2,8 Mbit/s für den Uplink und 3,3 Mbit/s für den Downlink. Der letzte Messpunkt auf dieser Seite des Messaufbaus liegt weiter am Rand des Lichtkegels als der auf der anderen Seite. Es kommt sowohl beim Up- als auch beim Downlink zu sehr starken Schwankungen und zu vermehrten deutlichen TCP Fehlern (vgl. Abbildung 50 und Abbildung 51).

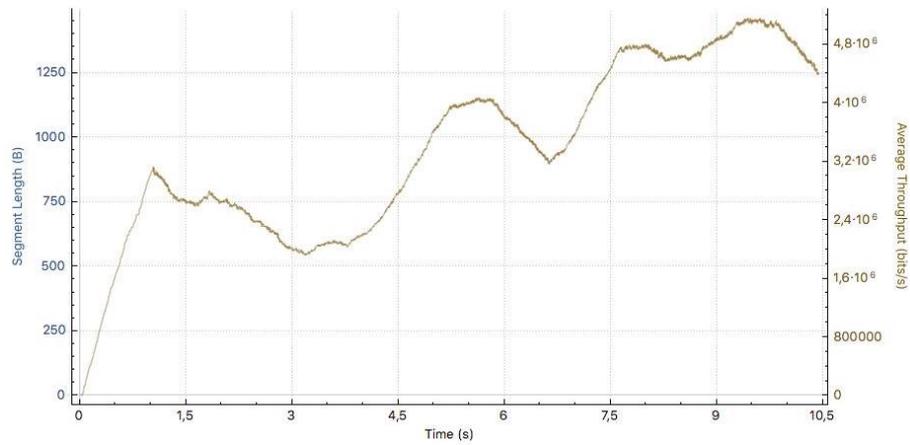


Abbildung 47: Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt r35°

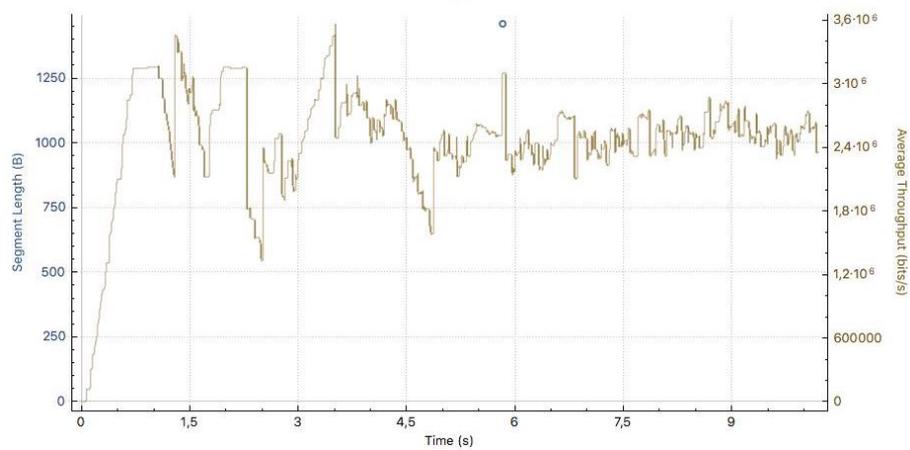


Abbildung 48: Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt r35°

Die RTT an diesem Messpunkt schwankt für den Downlink zwischen 3 ms und 30 ms. Gerade zu Beginn der Messung kommt es zu RTTs von bis zu 30 ms, was sich auch in dem IO-Graph wieder spiegelt, da es in dem Bereich zu den größten TCP-Fehlern kommt. Bei der Messung des Uplinks kommt es, wie auch schon bei den vorangegangenen Messungen, zu deutlich höheren RTTs - hauptsächlich im Bereich zwischen 50 ms und 600 ms - und mehr TCP-Fehlern.

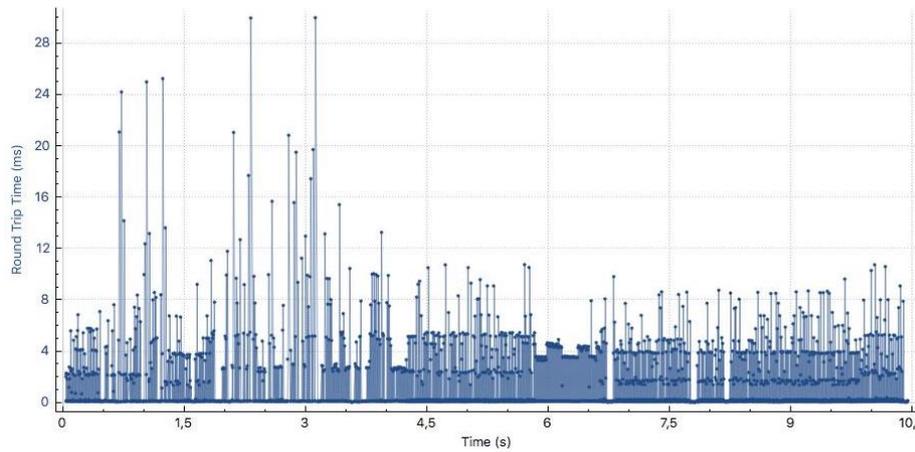


Abbildung 49: RTT des Downlinks an dem Messpunkt r35°

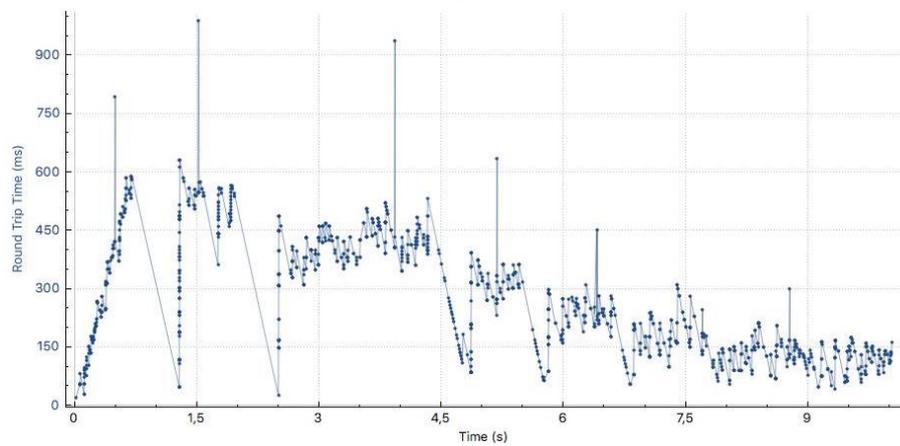


Abbildung 50: RTT des Uplinks an dem Messpunkt r35°

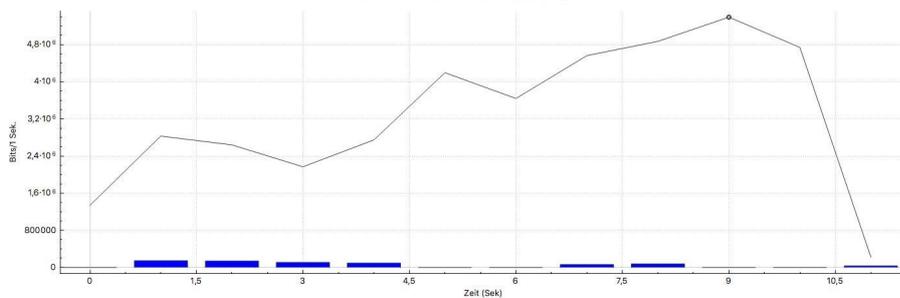


Abbildung 51: IO-Graph des Downlinks an dem Messpunkt r35°

7.2.3 Messungen mit UDP

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Messungen mit dem UDP gegeben. Hierzu wurden die selben drei Messpunkte gewählt, wie auch schon für das TCP. In den folgenden zwei Graphiken ist der durchschnittliche Datendurchsatz für den Uplink an den Messpunkten in vertikaler und horizontaler Richtung zu sehen. Wie auch schon bei TCP werden Datenraten von maximal 24 Mbit/s erreicht. Auch sieht man erneut in der horizontalen Bewegung die Abnahme der Datenrate für den

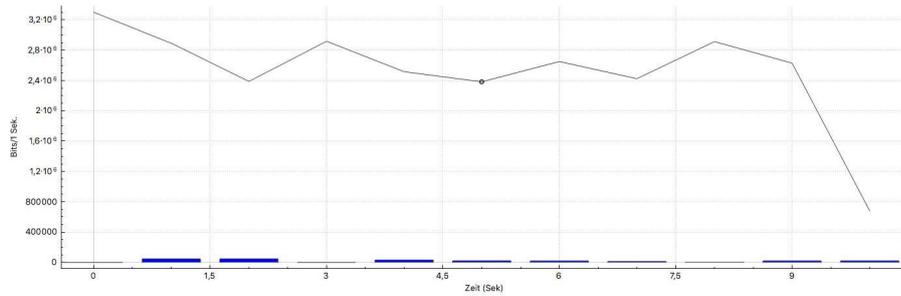


Abbildung 52: *RTT des Uplinks an dem Messpunkt r35°*

Uplink, wenn man sich von dem AP entfernt. Aufgrund technischer Probleme konnte für das UDP nur der Datendurchsatz für den Uplink gemessen werden. Wie zu erwarten, ist die Datenrate bei Nutzung des UDP etwa die selbe wie bei der Nutzung des TCP. UDP nimmt keine Fehlerkorrektur vor, was zu Datenrateneinbrüchen führen kann. Dementsprechend wäre zu erwarten gewesen, dass das Protokoll in den Randgebieten einen konstanteren Datendurchsatz aufweist. Dies ist jedoch bei den Messungen nicht bestätigt worden.

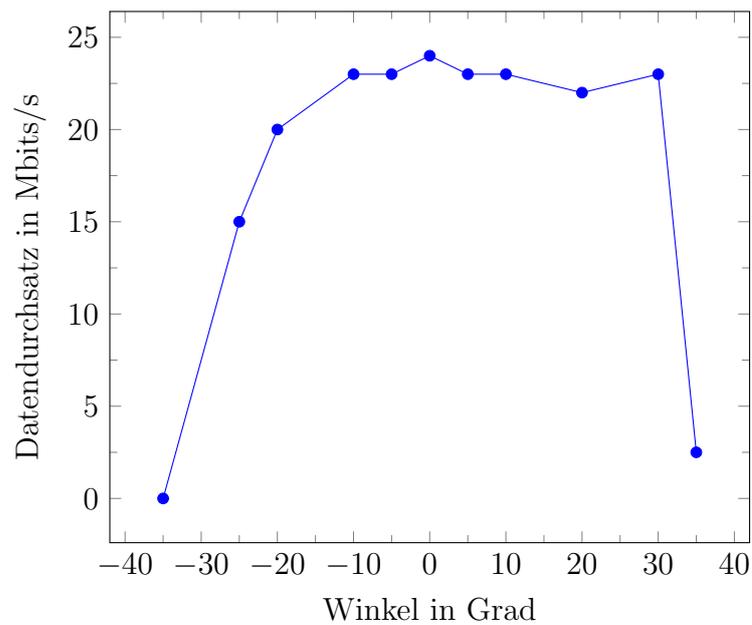


Abbildung 53: *vertikale Messwerte des Uplinks*

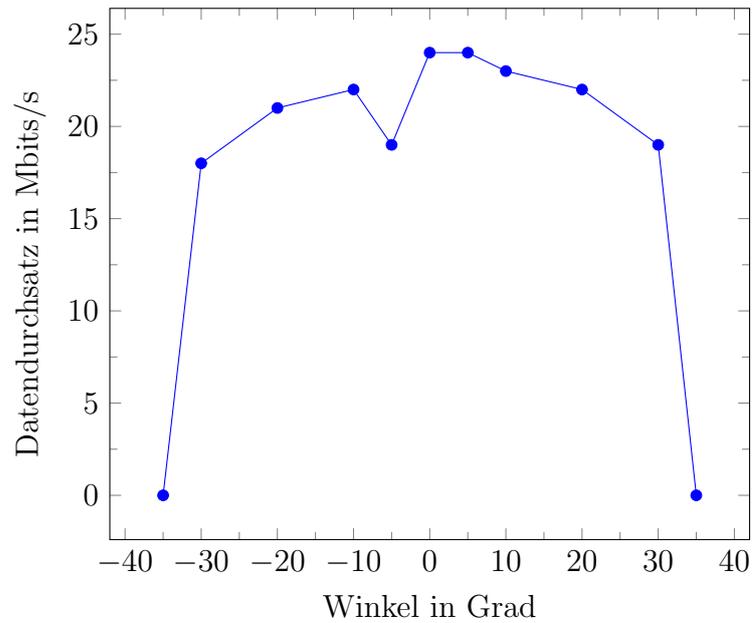


Abbildung 54: *horizontale Messwerte des Uplinks*

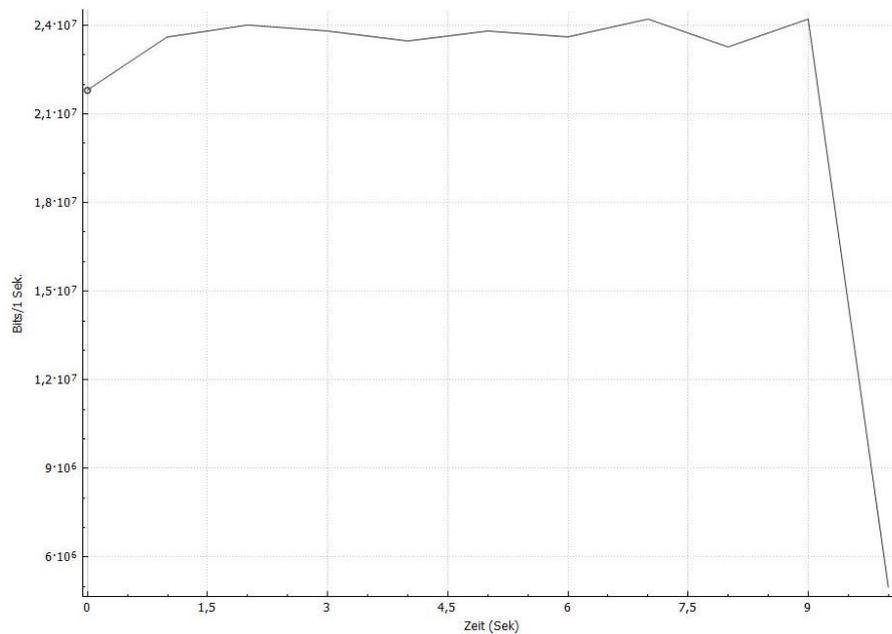


Abbildung 55: *Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt 0°*

An dem Messpunkt von 0° sieht man eine relativ konstante Datenrate von durchschnittlich 24 Mbit/s mit ein paar Schwankungen. Im Vergleich dazu sieht man in den horizontalen Randgebieten, den Messpunkten $l25^\circ$ und $r35^\circ$ einen starken Abfall der Datenrate. In Richtung des AP liegt der letzte Messpunkt etwa 45 cm weiter am Rand des Lichtkegels als der letzte Messpunkt auf der entgegengesetzten Seite. An dem Messpunkt $l25^\circ$ wird eine Datenrate von etwa 15 Mbit/s erreicht. Im Vergleich dazu werden an dem Messpunkt $r25^\circ$ noch durchschnittlich 23 Mbit/s übertragen. Dies liegt wahrscheinlich, wie schon bei den TCP-Messungen erwähnt, an der Lage

des AP, welcher sich rechts von der LED befindet, und somit des Receivers für den Uplink.

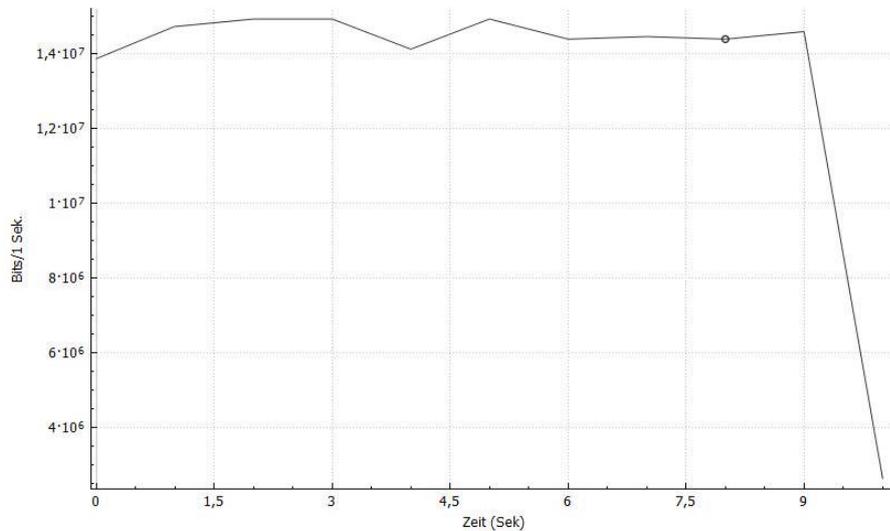


Abbildung 56: Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt l25°

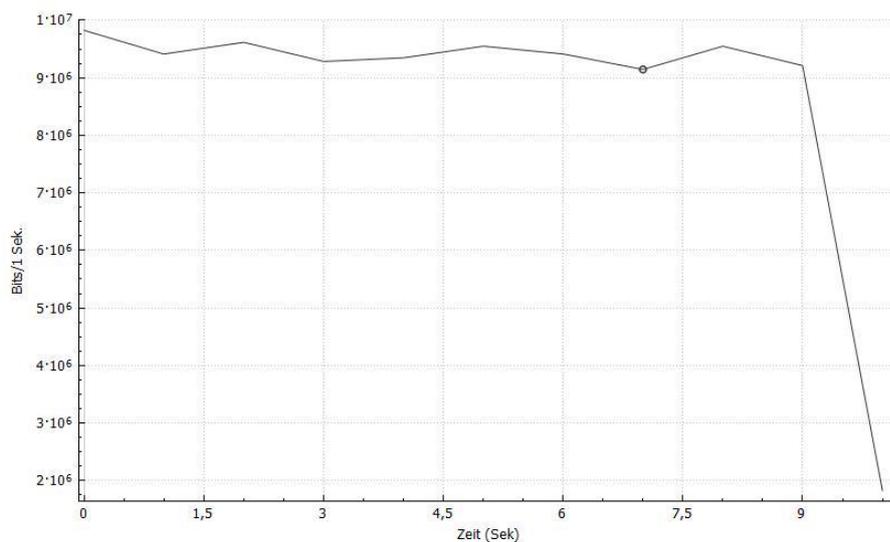


Abbildung 57: Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt r35°

7.2.4 Betrachtung möglicher Störfaktoren

Da allgemein eine geringere Datenrate übertragen wird als erwartet, ist eine Überlegung ob die Höhe, in der das System angebracht ist, nicht der optimalen Höhe entspricht. Laut Datenblatt kann das System in einem Abstand von 1 - 6 m operieren. Dementsprechend wurden vier verschiedene Höhen eingestellt und die Datenrate an dem optimalen Messpunkt 0° gemessen. Bei diesen Messungen kamen Datenraten für den Uplink von 20 bis 24 Mbit/s und für den Downlink von 22 bis 33 Mbit/s heraus. Die besten Ergebnisse lieferte hierbei die Messung in einer Höhe von etwa 1,80 m. Je höher das System hing, desto schlechter wurden die Ergebnisse.

Als Nächstes wurde der Störfaktor des Umgebungslichts angeschaut. Dies erfolgte in Form von Messungen bei Tageslicht und Messungen bei eingeschalteter Deckenbeleuchtung des Motion Capture Labors. Die Messungen mit Deckenbeleuchtung zeigten am Messpunkt 0° keine großen Veränderungen gegenüber den Messungen im abgedunkelten Raum. So kam es bei dem Downlink zu Einbußen von etwa 3 Mbit/s und bei dem Uplink zu Einbußen von etwa 1 Mbit/s. Diese geringen Unterschiede sind auf Messungenauigkeiten zurückzuführen.

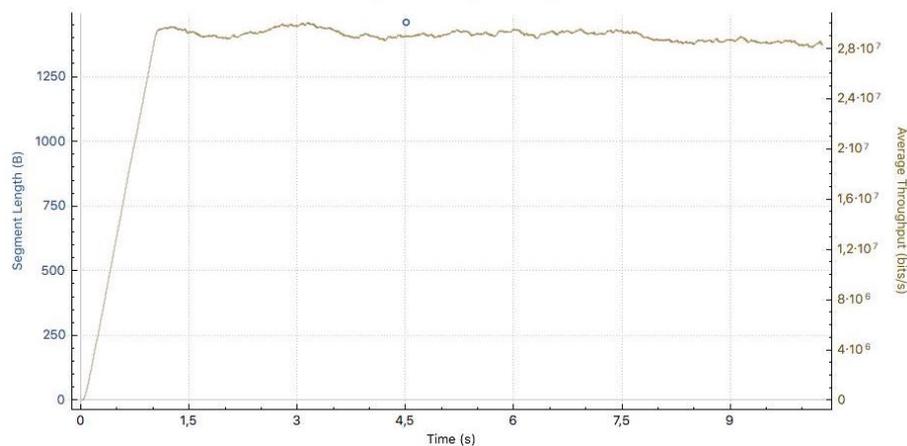


Abbildung 58: *Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt 0° mit Deckenbeleuchtung*

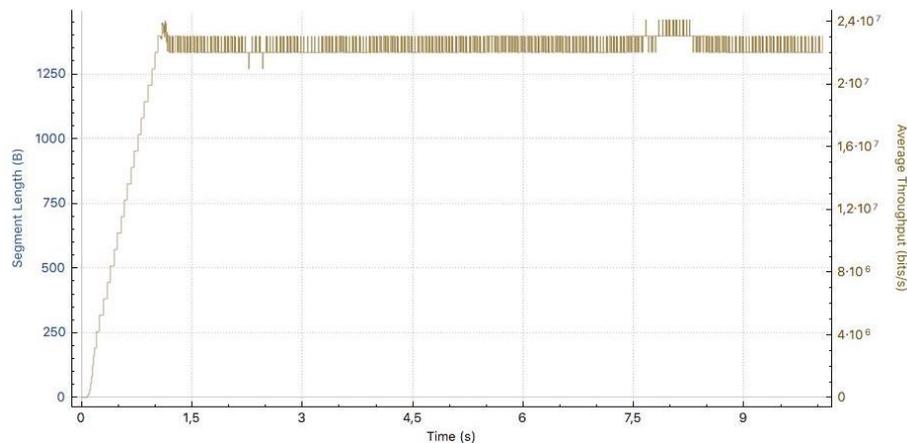


Abbildung 59: *Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt 0° mit Deckenbeleuchtung*

In den Randgebieten hingegen kam es, besonders bei dem Datendurchsatz des Downlinks zu starken Schwankungen. Der Datendurchsatz des Downlinks lag zwar bei durchschnittlich 22 Mbit/s und somit nicht weit entfernt von den 24 Mbit/s, die bei den Messungen im dunklen Raum durchschnittlich erreicht wurden. Bei dem Uplink kam es zu keiner signifikanten Abweichung.

Ein möglicher Grund für die stärkeren Unterschiede beim Downlink könnte sein, dass das Spektrum der Deckenbeleuchtung ähnliche Wellenlängen beinhaltet wie

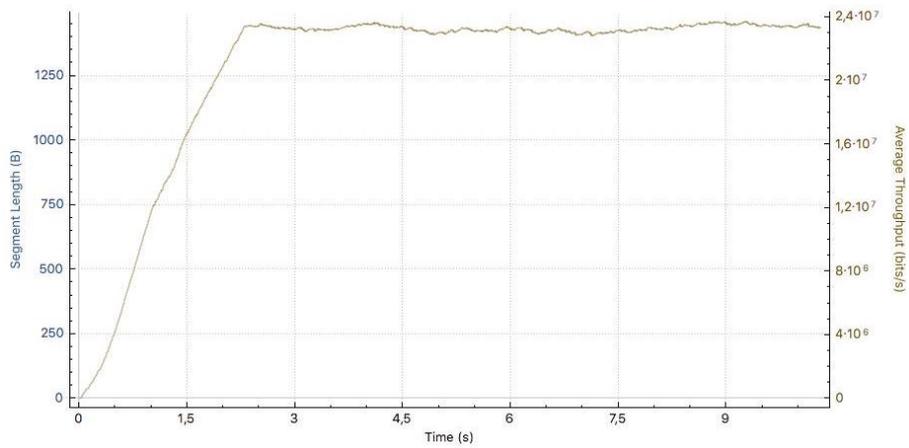


Abbildung 60: *Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt r25° ohne Deckenbeleuchtung*

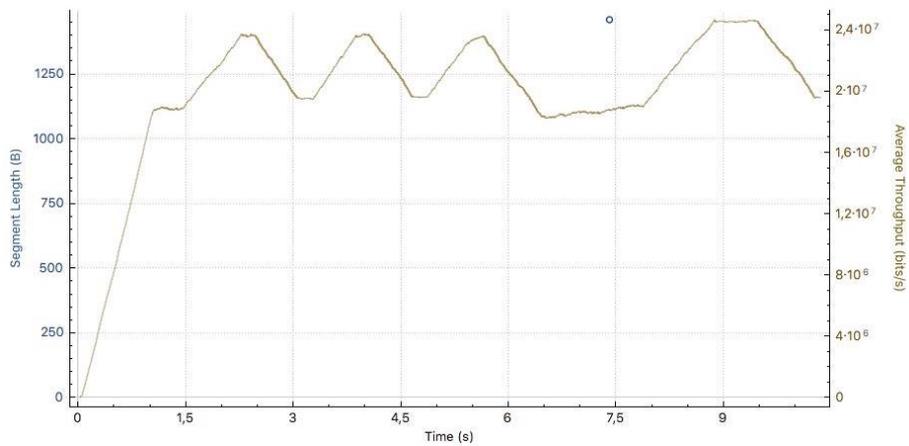


Abbildung 61: *Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt r25° mit Deckenbeleuchtung*

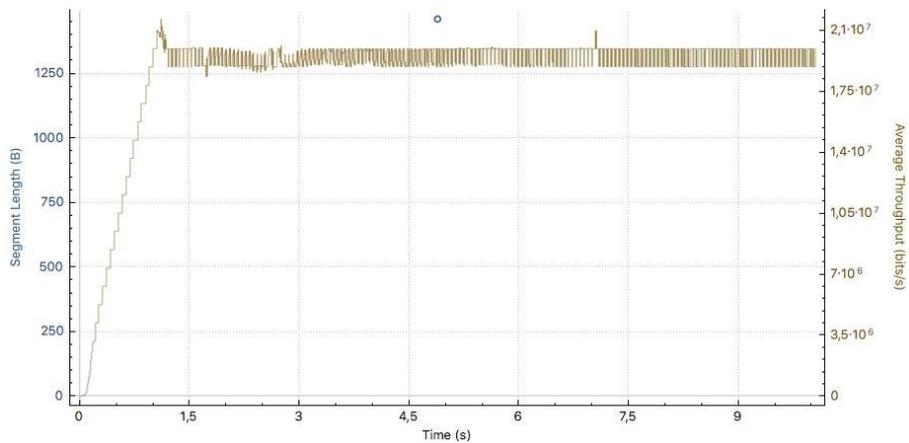


Abbildung 62: *Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt r25° mit Deckenbeleuchtung*

das der LED. Die Infrarot-LED, welche für den Uplink benutzt wird, liegt hingegen am Rand, beziehungsweise außerhalb dieses Spektrums, und ist sollte somit nicht

so anfällig für die Störungen durch die Deckenbeleuchtung sein. Es handelt sich bei den Abweichungen um keinen massiven Abfall der Datenrate. Bei den Messungen mit Tageslichteinfluss kam es zu keinen signifikanten Abweichungen gegenüber den Messungen im abgedunkelten Raum. Die Abweichungen beliefen sich auf wenige Mbit/s. Dieses Ergebnis ist nicht verwunderlich, da zwar das Tageslicht einen gewissen Infrarotanteil aufweist, welcher potentiell ein Problem für den Uplink darstellt, jedoch wird dieser Infrarotanteil durch die Fenster des Raumes nahezu komplett herausgefiltert.

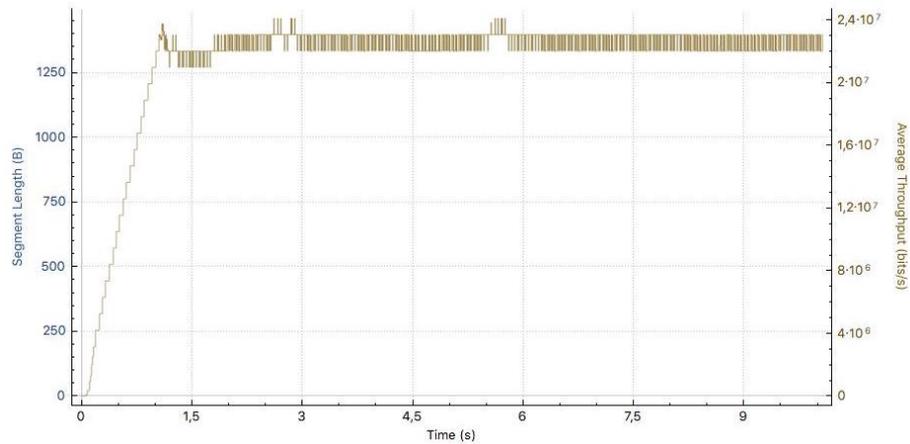


Abbildung 63: *Datendurchsatz des Uplinks an dem Messpunkt r25° mit Tageslicht*

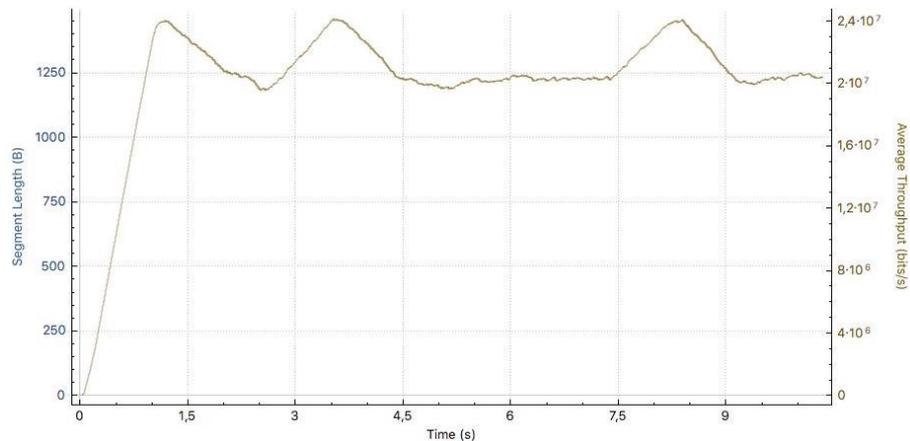


Abbildung 64: *Datendurchsatz des Downlinks an dem Messpunkt r25° mit Tageslicht*

Weitere Ergebnisse der Messungen in Form von Graphen befinden sich im Anhang.

8 Fazit und Aussichten für weiterführende Arbeiten

Insgesamt sind bei der Arbeit interessante Ergebnisse entstanden. Das leicht zu installierende und benutzerfreundliche pureLiFi-System schafft einen angenehm ausgeleuchteten Arbeitsplatz. Es erreicht allgemein eine recht konstante Datenrate auf der beleuchteten Fläche, ausgenommen an den Randgebieten. Sehr positiv ist die Tatsache, dass es bei den Messungen mit Störquellen, in Form von Umgebungslicht, zu keinen signifikanten Einschränkungen in der Leistung des Systems kam. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Realisierung in Form eines Sticks nicht optimal ist, wobei das ein Aspekt ist, an dem laut der Internetseite der Firma bereits gearbeitet wird, da er sehr warm wird. Bei dem Latitude E6520 kam es zu Problemen, da der USB-Port nach längerer Benutzung den Stick nicht mehr erkannte, sodass der Laptop neugestartet werden musste. Es ist jedoch die Frage, ob dies auch der Fall gewesen wäre, hätte man den Stick normal genutzt und nicht über einen langen Zeitraum mit durchgängigen Messungen belastet. Auch ist zu erwähnen, dass dieses Problem lediglich bei dem Laptop aufgetreten ist und nicht bei dem Razer Blade QHD+. Ein weiteres Manko des Systems ist, dass während der Messungen die angegebene Datenrate nicht erreicht werden konnte. Jedoch ist die Datenrate des Downlinks für den normalen Nutzer durchaus ausreichend. Mit einer Datenrate von 32 Mbit/s ist es bereits möglich mehrere Videos in HD-Qualität zu streamen und parallel ein Video-Gespräch zu führen. Für zukünftige Arbeiten ist es sehr interessant die von dem System bereitgestellten Möglichkeiten, wie das Handover-Verfahren, zu testen. Die Möglichkeit dazu besteht durch das im FTZ Digital Reality⁸ vorhandene pureLiFi-System. Es ist von großem Interesse herauszufinden wie weit das Licht gedimmt werden kann, um eine fehlerfreie Datenübertragung zu gewährleisten und wie sich dies auf die Reichweite auswirkt. Auch Test mit unterschiedlichen hochleistungsfähigen LEDs bietet die Untersuchung der Datengeschwindigkeit in Abhängigkeit mit dem Leuchtmittel. Es wäre interessant zu untersuchen in wiefern sich die Datenrate des Systems verändert und eventuell näher an die vom Hersteller angegebene Datenrate herankommt. Auch der Vergleich mit ähnlichen Produkten anderer Hersteller böte eine interessante Erweiterung für diese Arbeit. So sind an der HAW Hamburg und dem FTZ unterschiedliche Systeme der Hersteller Oledcomm, in Form einer Schreibtischleuchte, und Signify, in Form von Deckenleuchten, vorhanden, die für einen Vergleich herangezogen werden könnten.

⁸ Forschungs- und Transferzentrum Digital Reality

Literatur

- [1] IEEE 1789 ein neuer standard zur bewertung von flimmernden leds. <https://www.dial.de/de/article/die-ieee-1789-ein-neuer-standard-zur-bewertung-von-flimmernden-leds/>. Accessed: 2019-10-25.
- [2] Jan Lorenz. Signaldesign und simulation fur datenubertragung mittels sichtbarenlichts, August 2018.
- [3] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. Lim. Ieee 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. *IEEE Communications Magazine*, 50(3):72–82, March 2012.
- [4] B.Sc. ERIC MONTEIRO. Design and implementation of color-shift keying for visible light communications. Master’s thesis, department of electrical & computer engineering and the school of graduate studies of mc master university, September 2013.
- [5] B. Kainka. *Schnellstart LEDs: Leuchtdioden in der Praxis ; [Grundlagen der LED-Schaltungstechnik, superhelle weiÙe LEDs im Einsatz, Messtechnik und LED-TestgeräÙe, komplexe Schaltungen mit LEDs, Stromversorgung und Spannungswandler]*. Do-it-yourself. Franzis, 2005.
- [6] Peter A. Hoehner. *Visible Light Communication: Solutions Manual*. Hanser Fachbuch, 2019.
- [7] Fraunhofer HHI. Standardization of lifi in ieee 802.15.13, 2018.
- [8] IEEE P802.15.7 Working Group. Ieee standard for local and metropolitan area networks–part 15.7: Short-range optical wireless communications. *IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011)*, pages 1–407, April 2019.
- [9] Ying-Dong Zang and Jian Zhang. Optimal scheme of dco-ofdm for optical frequency-selectivity. *Procedia Comput. Sci.*, 131(C):1074–1080, May 2018.
- [10] Harald Sack Christoph Meinel. *Internetworking Technische Grundlagen und Anwendungen*. Springer Verlag, Oktober 2011.
- [11] Gerhard Lienemann; Dirk Larisch. *TCP/IP Grundlagen und Praxis*. Heise Verlag, 2013.
- [12] JETI Technische Instrumente. Spektroradiometer specbos 1201.
- [13] JETI Technische Instrumente, 2019. [Online; accessed 22-Oktober-2019].

9 Anhang

9.1 Weitere Messergebnisse

Die Anordnung der Bilder ist wie folgt:

Links oben: Messpunkte in positiver vertikaler Richtung

Links unten: Messpunkte in negativer vertikaler Richtung

Rechts oben: Messpunkte nach rechts in horizontaler Richtung

Rechts unten: Messpunkte nach links in horizontaler Richtung

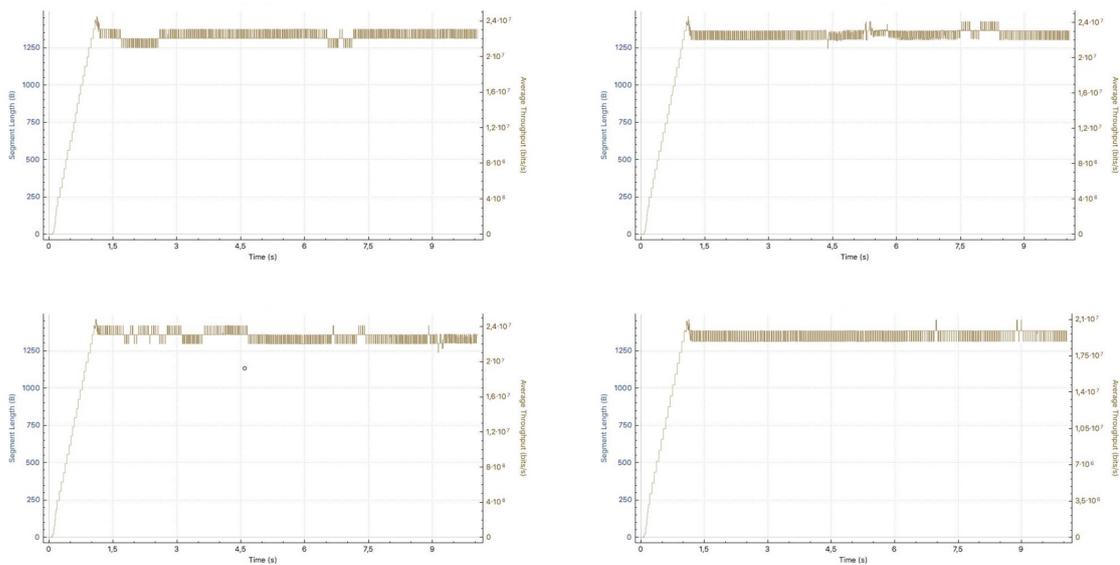


Abbildung 65: Uplink bei 5° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP

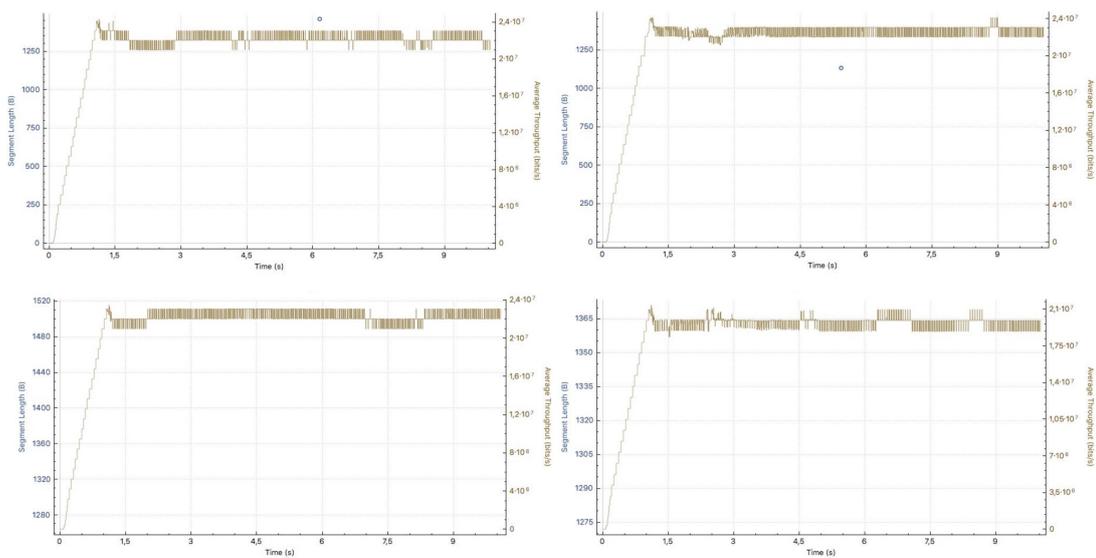


Abbildung 66: Uplink bei 10° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP

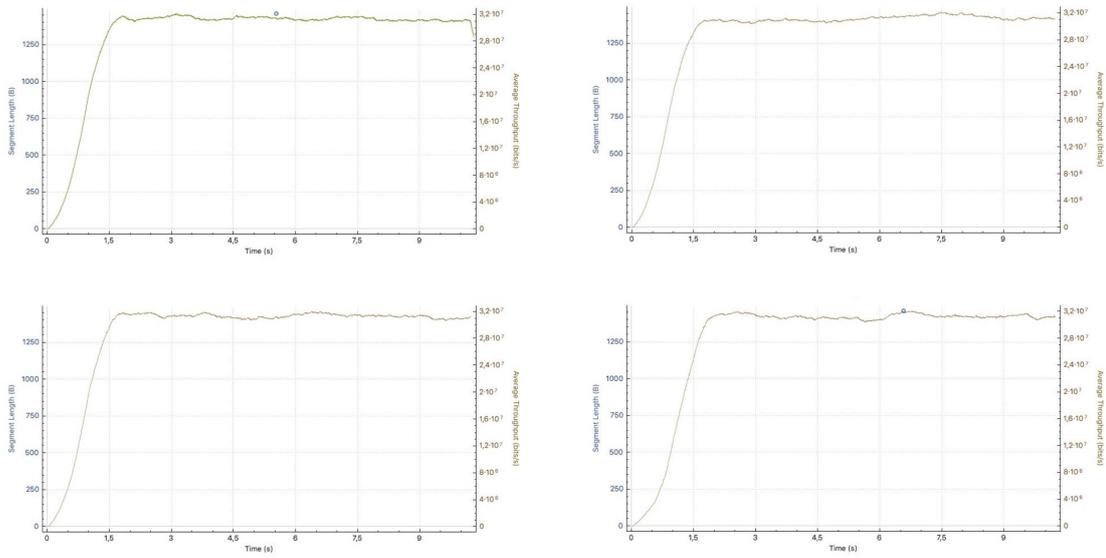


Abbildung 67: Downlink bei 5° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP

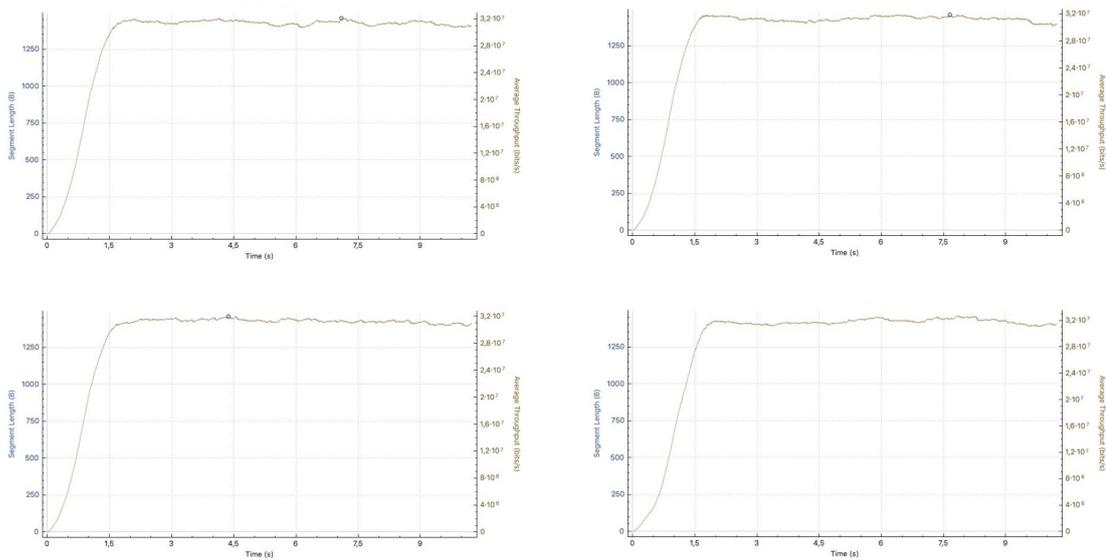


Abbildung 68: Downlink bei 10° in alle Richtungen unter Verwendung von TCP

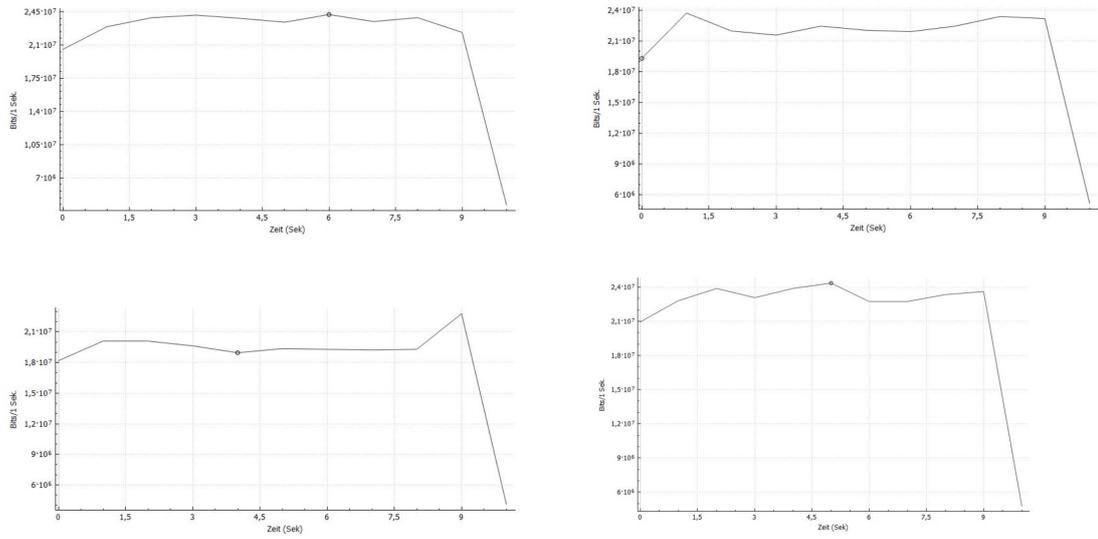


Abbildung 69: Uplink bei 5° in alle Richtungen unter Verwendung von UDP

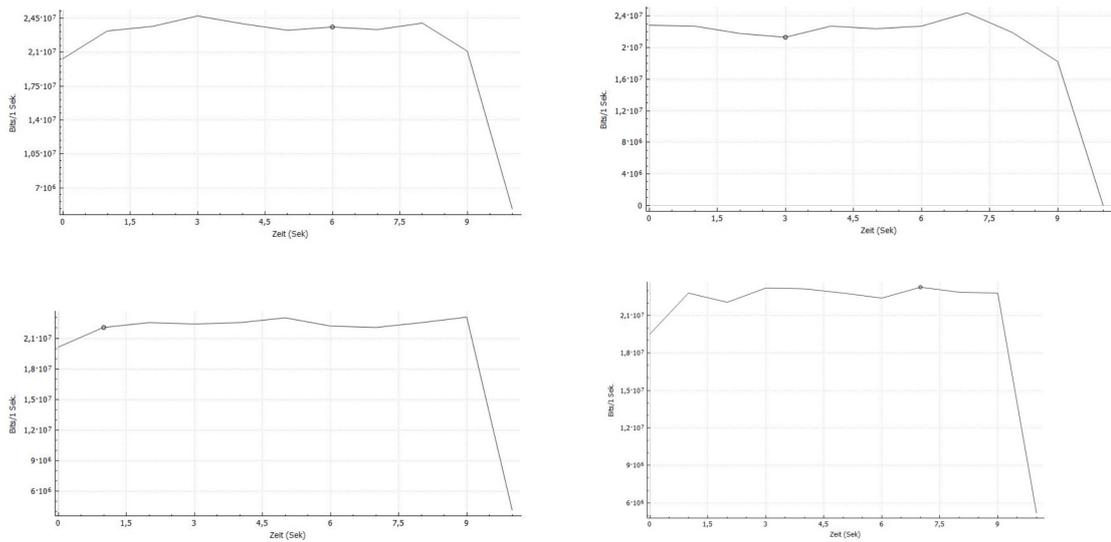


Abbildung 70: Uplink bei 10° in alle Richtungen unter Verwendung von UDP

9.2 Datenblätter

Snapshot



LiFi systems provide immersive connectivity

Connectivity is evolving. The spectrum now has to accommodate more mobile users and a forecasted increase to 20 Billion IoT devices by the year 2020.

It is time to future proof our networks to enable the connectivity demands of tomorrow. With LiFi we can utilise spectrum more than 1000 times greater than the spectrum utilised for radio frequencies. LiFi is beginning to unlock unprecedented data and bandwidth.

Getting more from your network with LiFi

Imagine every LED light in our offices, buildings and cities could become a high speed, smart, and secure internet access point.

The pureLiFi LiFi-XC system offers partners the ability to deploy a fully networked LiFi solution. LiFi-XC supports multiple access, roaming, complete mobility and ease of use – providing a level of user experience that is comparable to existing wireless technologies such as Wi-Fi with the added security, safety and data density of visible light.

Benefits

Security: Light can be contained in a physical space making LiFi inherently more secure. Users can see where data is going and there is less requirement for additional security.

Safety: Radio frequency technologies such as Wi-Fi cause interference to electronic devices. LiFi is directional meaning interference is simpler to avoid and even prevent all together. This means LiFi can be used in RF hostile zones.

Data Density: LiFi offers a greater user experience as it reduces the need to share wireless bandwidth with other users. LiFi can achieve approximately 1000 times the data density of Wi-Fi offering substantially more data per square metre.

Location Services: LiFi systems are fully networked and each LiFi enabled light has it's own IP address which means advanced geo fencing can be deployed simply in a LiFi network.

Sixty percent of total mobile data traffic was offloaded from the fixed network through Wi-Fi or femtocell in 2016, making a total of 10.7 exabytes of mobile data traffic offloaded each month.

If mobile data traffic continues to increase as expected the world will run out of RF spectrum before 2025.

LiFi Deployment

LiFi products from pureLiFi are LED agnostic allowing for LiFi technology to transform existing LED lighting infrastructures into reliable, fast, secure and highly dense wireless networks. The installation process is straightforward and flexible. LiFi backhaul can be deployed using a standard mains powered solution. The LiFi Access Point also supports PoE/PoE+ and Cisco UPOE to minimise the cabling required for deploying the network. In addition to the standard lighting and LiFi functionality, the LiFi-XC AP also allows the attached LED luminaire to be dimmed using a proprietary control protocol over IP, DALI frames, or an analogue level where available.

TR-069 remote management and automatic provisioning software suite are also available to ease the deployment and management of large LiFi networks.

The LiFi-XC Station (STA) is USB powered to enable complete mobility and ease of use. After installing the provided device driver, the system simply uses existing operating system tools for scanning and connecting to LiFi-XC Access Points.

Downlink rate: 43 mbps
Uplink rate: 43 mbps

Next Steps

Visit www.purelifi.com or talk to your account manager to learn how you can harness light to power your connectivity needs.

At-a-Glance: Data Sheet



Features

- Fully networked LiFi system providing end-to-end IP connectivity
- Full-duplex wireless link providing up to 43 Mbps in downlink and uplink
- A single access point (AP) supports up to 8 stations (STAs)
- PoE/PoE+ and Cisco UPOE support
- Capable of working with a range of LED luminaires
- TR-069 remote management as well as SNMP v3
- DALI building management support
- Analog dimming control interface
- EnergyWise support
- Proprietary protocol for power management/dimming
- pureLiFi user roaming between APs on the same subnet
- USB 2.0 powered STA unit allows complete mobility
- Supports WPA2-Personal and Enterprise (802.1X) authentication
- Compact design for improved mobility and handling
- Link status

Complete System

Parameter	Nominal Value	Unit
Downlink line rate (max.):	43	Mbps
Uplink line rate (max.):	43	Mbps
Minimum operational distance	1.0	m
Maximum operational distance	6.0	m
Maximum concurrent users	8	-
Inter-AP handover (roaming)	Supported	-
Atto-Cell Diameter @ 2.5m range	2.8	m
Atto-Cell Diameter @ 3m range	3.5	m

Access Point

Parameter	Nominal Value	Unit
Supply voltage	27 - 57	VDC
Data interface	Gigabit Ethernet Port	-
Driver box interface	10-way Micro-Fit 3.0 connector	-
Power input	2-way Microfit 3.0 connector	-
Stand-by power consumption	4	W
Max. active power consumption	8	W
Remote management	TR-069, SNMP v3	-
Status LED indicator	Tristate - red, orange, green	-
Unit size	88 x 88 x 20	mm
Unit weight	200	g
Operating Temperature	0 - 35	°C
Humidity (Non-condensing)	20 - 95	%

TX Driver

Parameter	Nominal Value	Unit
Min lamp voltage	2	VDC
Max lamp voltage	55	VDC
Max DC lamp current	700	mA
AP interface	10-way MicroFit-3.0 connector	-
Lamp connector	3-way push-in	-
Lamp wire cross-section area	0.05 - 1.31	mm ²
Lamp wire gauge	30-16	AWG
Stand-by power consumption	4 (excluding lamp)	W
Max. active power consumption	4.2	W
Unit size	74 x 55 x 32	mm
Unit weight	124	g
Operating Temperature	-10 - 45	°C
Humidity (Non-condensing)	20 - 95	%

Station

Parameter	Nominal Value	Unit
Data interface	USB 2.0	-
Max. power consumption	2.5	W
Unit Size	85 x 29.4 x 10.2	mm
Unit weight	42	g
Operating temperature	0 - 35	°C
Humidity (Non-condensing)	20 - 95	%

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und mich anderer als der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Alle Internetquellen sind der Arbeit beigefügt. Des Weiteren versichere ich, dass ich die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und dass die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht.

Ort, Datum

Unterschrift