

# **Konzeption und Erprobung einer Outdoor-LiFi Anwendung zur automatischen Dimmung von Außenbereichsleuchten**

**Bachelor-Thesis**

zur Erlangung des wissenschaftlichen Grades Bachelor of Science  
(B.Sc.)

**Tim Christiansen**

Matrikelnummer XXXXXXXXXX

Erstprüfer: Prof. Dr. Jan Mietzner

Zweitprüfer: Prof. Dr. Roland Greule



Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Design, Medien und Information

Department Medientechnik

Studiengang Medientechnik

Hamburg, den 06.05.2022

## **Zusammenfassung**

In dieser Arbeit werden vier verschiedene Use-Cases der Outdoor-LiFi Übertragung zwischen dimmbaren Außenbereichsleuchten vorgestellt und diskutiert. Anschließend wird auf Grundlage eines dieser Konzepte ein prototypisches System erstellt. Dabei wird ein Fokus auf die optoelektronische Sender- und Empfängerarchitektur gelegt. Die abschließende messtechnische Untersuchung geschieht unter licht- und nachrichtentechnischen Kriterien und liefert Informationen über die Praxistauglichkeit des Systems.

## **Abstract**

In this paper, four different use cases of outdoor-LiFi transmission between dimmable outdoor lamps are presented and discussed. Subsequently, a prototype system is created based on one of these concepts. The focus is on the optoelectronic transmitter and receiver architecture. The final measurements are carried out under criteria of light and telecommunications engineering and provides information about the practical suitability of the system.

## **Danksagung**

Vielen Dank an Reinhard Breuer für die Unterstützung bei den schaltungstechnischen Arbeiten

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	5
1. Einleitung .....	7
1.1 Motivation .....	7
1.2 Aufbau der Arbeit .....	7
2. Grundlagen .....	8
2.1 VLC .....	8
2.2 LiFi .....	9
2.2.1 Vorteile .....	10
2.2.2. Nachteile .....	12
2.2.3. Anwendungsfälle .....	12
2.2.4. Fotodioden und Fotodetektoren .....	13
2.3 Lichttechnische Grundlagen .....	16
2.3.1 Radiometrische Größen .....	16
2.3.2. Photometrische Größen .....	17
2.3.3 Weitere Lichttechnische Größen .....	18
2.3.4 Intelligente Außenbeleuchtung und Outdoor-LiFi.....	20
2.4 Nachrichtentechnik.....	24
2.4.1 Digitale Modulationsverfahren.....	24
2.4.2 Basisbandübertragung .....	26
3. Kommunikationsszenarien/Use-Cases .....	36
3.1 Inhaltliche Anforderungen an das Outdoor-LiFi System.....	36
3.2 Konzepte .....	37
3.2.1 Bodenreflexion .....	37
3.2.2 Horizontal emittierende Linsen.....	40
3.2.3 Oval aufweitende Linsen .....	42
3.2.4 Rundumleuchten.....	44
4. Technisches Konzept des Prototyps .....	46
4.1 Technische Anforderungen.....	46
4.2 Hardware .....	47
4.2.1 Schaltplan .....	48
4.2.2 Mikrocontroller-Board .....	48
4.2.3 LED-Platine und die Treiberschaltung .....	50
4.2.4 Dimmung.....	53
4.2.5 Seitenemitterlinse .....	54

4.2.6 Sammellinse .....	54
4.2.7 Fotodetektoren.....	55
4.2.8 Fotodetektorschaltung .....	57
4.3 Code .....	60
5. Messungen .....	62
5.1 LVK der Seitenemitterlinse .....	62
5.2 Spektrum der LED.....	63
5.3 Reichweite der Datenübertragung mit dem Wechsellichtsensor .....	64
5.4 Bytefehlerrate in Abhängigkeit der Entfernung mit dem Wechsellichtsensor ..	66
5.5 Ausgangsspannung der BPW34 Fotodiode mit Verstärkerschaltung .....	67
5.6 Probleme .....	68
5.5 Verbesserungsmöglichkeiten .....	69
6. Fazit.....	70
7. Anhang.....	76

# Abkürzungsverzeichnis

**ADC** - Analog-to-digital converter

**APD** - Avalanche-Fotodioden

**ASK** - Amplitude Shift Keying

**AWGN** - Additive white Gaussian noise

**BBE** - Bandbreiteneffizienz

**BER** - Bit-Error-Rate

**CIE** - Commission Internationale de L'Éclairage

**CRI** - Color Rendering Index

**DAC** - Digital-to-analog converter

**DD** - Direct detection

**EM** - Elektromagnetisch

**EVG** - Elektronisches Vorschaltgerät

**FPGA** - Field Programmable Gate Array

**IC** - Integrierter Schaltkreis/Integrated Circuit

**IM** - Intensitätsmodulation

**IR** - Infrarot

**ISM** - Industrial, scientific medical

**LED** - Light emitting diode

**LOS** - Line-of-sight

**NRZ** - Non-return-to-Zero

**OFDM** - Orthogonal frequency division multiplexing

**OOK** - On-Off Keying

**PAM** - Pulsamplitudenmodulation

**PPM** - Pulse-position modulation

**PWM** - Pulsweitenmodulation

**RF** - Radio frequency

**RGB** – Rot, Grün und Blau

**RIS** - Reconfigurable Intelligent Surface

**RZ** - Return-to-Zero

**SDR** - software-defined radios

**SNR** - Signal to Noise Ratio

**TIA** - Transimpedanzverstärker

**UART** - Universal Asynchronous Receiver Transmitter

**USART** - Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter

**V2I** - Vehicle-to-Infrastructure

**V2V** - Vehicle-to-Vehicle

**VLC** - Visible Light Communication

**VPPM** - Variable pulse-position modulation

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Licht zur Kommunikation zu verwenden, ist seit einigen hundert Jahren Teil der Menschheitsgeschichte und spätestens seit dem Leuchtturm von Alexandria keine neue Idee. Im Bereich der Kommunikationstechnik wird der Markt jedoch seit langem durch funkbasierte Techniken, wie z.B. WLAN, dominiert. Die Omnipräsenz von Routern und anderen elektromagnetisch strahlenden Geräten im Heim- und Industriegebrauch sowie in der Öffentlichkeit führt in diesen Wellenlängen zu einem zunehmend überfüllten Frequenzbereich („spectrum crunch“). Unsere Infrastruktur im Informationszeitalter wird vor immer größere Herausforderungen und steigende Teilnehmerzahlen gestellt, bei denen eine junge Technologie Abhilfe schaffen könnte: Light Fidelity (LiFi). Mit sehr schnell moduliertem Licht werden digitale Daten kabellos zwischen den LiFi-fähigen Geräten übertragen. Nicht nur die Lizenzfreiheit dieser Technik, sondern auch die Energieeffizienz sind vielversprechende Parameter, die sie zu einem potenziellen Anwärter auf 6G und die Smart City machen. Ein Vorteil ist, dass das Licht nach dem Prinzip des „Dual-Use“ gleichzeitig zur Beleuchtung und zur Kommunikation im Nahbereich verwendet werden kann.

Da die bisherige Forschung sich auf Datenübertragung im Innenbereich konzentriert hat, soll in dieser Arbeit eine Betrachtung der Kompatibilität von Außenbereichsleuchten, wie z.B. Straßenlaternen, mit LiFi geschehen. LEDs entwickeln sich im 21. Jahrhundert zu einer der am häufigsten vorkommenden Lichtquellen, sowohl Indoor als auch Outdoor, und eignen sich hervorragend für LiFi. Aus mehreren zu untersuchenden Konzepten, die einen Datenlink zwischen dimmbaren LED-Außenleuchten aufbauen, soll eins ausgewählt und prototypisch realisiert werden.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen von LiFi/Visible Light Communication (VLC) sowie die dahintersteckende Nachrichten- und Lichttechnik erläutert. Kapitel 3 betrachtet die verschiedenen Kommunikationsszenarien zwischen den Außenbereichsleuchten und mögliche Anwendungsfälle. In Kapitel 4 wird der realisierte Prototyp aus einem dieser Szenarien vorgestellt und sowohl Hardware- als auch Softwaretechnisch betrachtet. In Kapitel 5 werden Messungen an diesem Prototyp durchgeführt und bewertet. Kapitel 6 beinhaltet das Fazit aus dem Konzeptionierungsprozess.

## 2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Begriffe VLC und LiFi näher betrachtet und die Grundlagen der Licht- und Nachrichtentechnik in Bezug auf optische Übertragungswege erläutert.

### 2.1 VLC

Als Grundidee von VLC dient die Datenübertragung über sichtbares Licht, also die elektromagnetischen (EM) Wellenlängen zwischen 380 – 780 nm [1]. Für die Beziehung zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz gilt:

$$c = \lambda \cdot f$$

Damit ergeben sich für Licht die Frequenzen von 789 THz – 384 THz, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Das Licht des Senders wird dabei ausreichend schnell moduliert und am Empfänger demoduliert, so dass die Information übertragen werden kann. Im einfachsten Fall wäre das eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einer LED und einer Fotodiode [2]. Durch die sehr guten Reaktionszeiten von LEDs auf Signaländerungen, sind sie anderen Leuchtmitteln in Hinsicht auf optische Datenübertragung überlegen. Typischerweise liegt die obere 3-dB-Grenzfrequenz, also die Frequenz, bei der die Hälfte der Leistung erreicht wird, zwischen 2 MHz für weiße und 20 MHz für RGB LED [1]. Die Bandbreite des Empfängers ist ebenso ausschlaggebend, wie die des Senders.

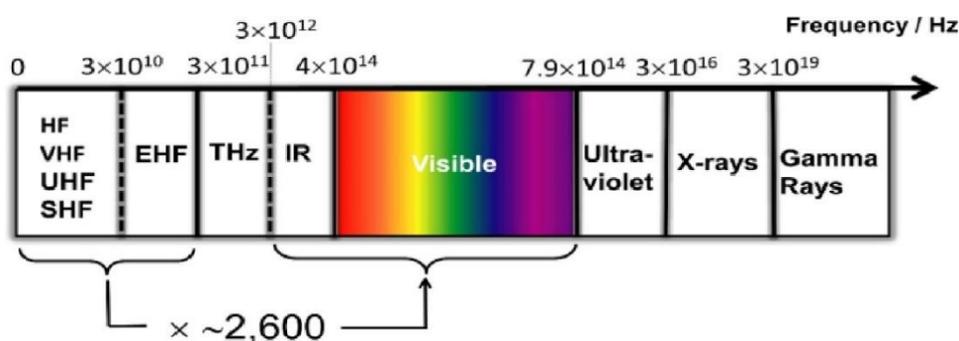


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum [2]

Da LEDs zu einem der gängigsten Lampentypen gehören, besteht hier für VLC ein hohes Innovationspotential, weil bereits bestehende Infrastrukturen genutzt werden können. Die Helligkeitsmodulation geschieht mit Frequenzen höher als die Flimmerverschmelzungsfrequenz des Auges, weshalb die Beleuchtungsfunktionalität nicht beeinflusst wird [3].

## 2.2 LiFi

LiFi (angelehnt an WiFi oder Wireless Fidelity) ist eine Erweiterung von VLC und zeichnet sich durch hohe Datenraten, Mehrbenutzersysteme und komplexere Netzwerkarchitekturen aus. Seine erste Verwendung fand der Begriff im Jahr 2011 auf einem TED Talk des Wissenschaftlers Harald Haas. Während der Downlink (DL) vom Kommunikationsnetz zum Endgerät im sichtbaren Spektrum liegt, ist die Rückverbindung/Uplink (UL) bei den kommerziell erhältlichen LiFi-Systemen (z.B. PureLifi, Signify, Firefly Lifi) im angrenzenden Infrarot (IR) Bereich zu finden [1]. LiFi umfasst also ein größeres Spektrum als VLC. Unter Laborbedingungen wurden bisweilen Datenraten von 15.7 Gbit/s mit herkömmlichen LEDs erreicht, Vorhersagen gehen jedoch von möglichen Datenraten bis zu 100 Gbit/s aus [4]. Firefly Lifi verspricht für den DL seiner Office-Anwendung maximal 700 Mbit/s und bis zu 1,3 Gbit/s für den UL [1]. Zum Vergleich: Für WLAN liegen die Datenraten bei dem aktuell am häufigsten anzufindenden Standard 802.11ac in der Praxis zwischen 150 und 400 Mbit/s [5].

Da von LEDs gesendetes Licht nicht kohärent ist, also keine feste Phasenbeziehung zwischen den emittierten Wellen hat, können nur Modulationsverfahren für die Übertragung benutzt werden, die lediglich die Intensität der Lichtquelle modulieren und nicht die Phase. Dadurch werden komplexe und negative Zahlen in der Signalkette ausgeschlossen. Am Lichtempfänger spricht man von Direct Detection (DD), wenn die Phase außer Acht gelassen wird. Einige der zahlreichen verwendbaren Verfahren sind z.B. On-Off keying (OOK), Pulse-position modulation (PPM) oder Pulsamplitudenmodulation (PAM) [6]. Das allgegenwärtig in der Nachrichtentechnik verwendete Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) musste speziell für die Kommunikation über Intensitäts Modulation (IM) angepasst werden [1]. Auf die verschiedenen Modulationsverfahren wird näher in Abschnitt 2.4.1 dieser Arbeit eingegangen. In Abbildung

2 ist die Übertragungskette eines LiFi Systems mit der Trennung in Sender, Kanal und Empfänger dargestellt.

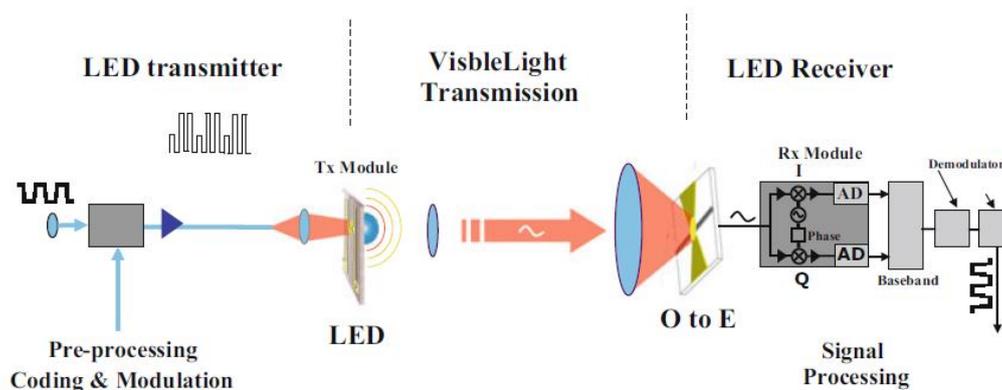


Abbildung 2: Blockdiagramm einer LiFi Übertragung [7]

### 2.2.1 Vorteile

Wie schon in Abschnitt 2.1 erwähnt, ist die Integration in bereits existierende Beleuchtungssysteme ein wichtiger Vorteil von LiFi-Systemen. Da die Lampen nach dem Prinzip des „Dual-Use“ gleichzeitig zur Kommunikation und Beleuchtung verwendet werden können, bieten sich bei dieser Technologie Ersparnisse im Energieverbrauch gegenüber RF-Kommunikation an. LEDs haben im Vergleich zu anderen Lampentypen die beste Lichtausbeute, was ein weiterer Anreiz wäre, diese vermehrt zu verwenden. Das häufige An- und Ausschalten sowie die Helligkeitswechsel haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Lebensdauer dieses Leuchtmittels [3].

Im RF-Spektrum wird die Benutzung der Frequenzbänder reguliert und Lizenzen müssen in Einzelfällen genehmigt werden. Es gibt zwar die allgemein und lizenzfrei nutzbaren Industrial, Scientific und Medical Bands (ISM-Bänder), jedoch besetzen immer mehr Geräte diese Frequenzen und die Chance von Interferenzen steigt, besonders im 2,4 GHz Bereich (WiFi). Das in Abbildung 3 aufgezeichnete Spektrogramm einer Großstadt um 433 MHz (Handfunkgeräte, Funk-Rauchmelder, Babyphone, Autoschlüssel) illustriert die zunehmende Anzahl an Geräten in diesen Kanälen. Die Lizenzierung des elektromagnetischen Spektrums wird im Regelfall international bis 3 THz von Behörden verwaltet, somit kann VLC im wesentlich höheren THz-Bereich lizenzfrei benutzt werden.

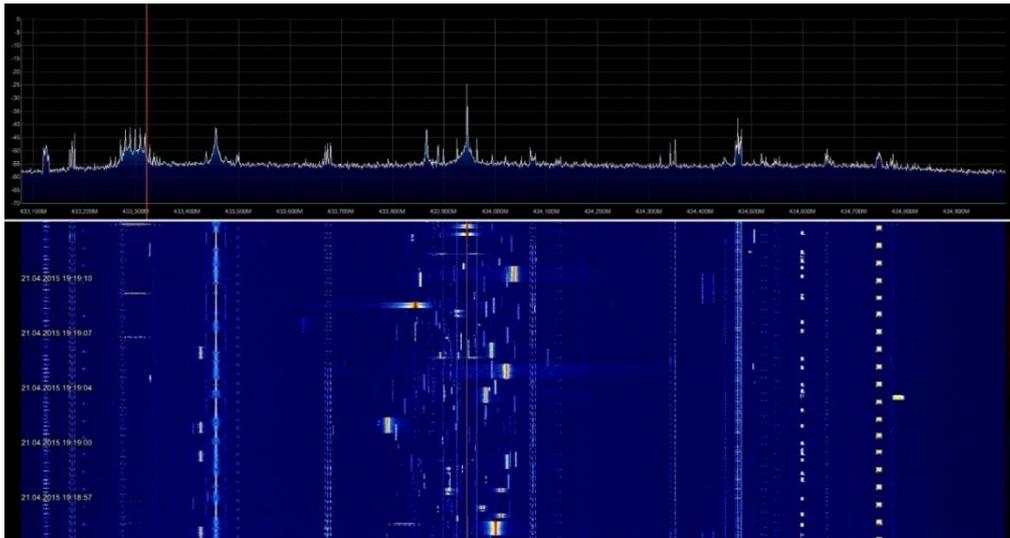


Abbildung 3: 433-MHz-Spektrum in einer Großstadt [8]

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, hat der sichtbare und infrarot Anteil des Lichts eine ca. 2600-mal so große Bandbreite wie das RF-Spektrum und damit theoretisch wesentlich größere Kanalkapazitäten. In der Praxis ist das Emissionsspektrum von LEDs über den gesamten Bereich in der Intensität jedoch nicht gleichmäßig und begrenzt somit die theoretische Bandbreite [1].

Im Indoor-Bereich lässt sich mit lichtundurchlässigen Materialien (z.B. Wände) sehr einfach die Interferenz zwischen den Zellen ausschließen und Frequenzmanagement umgehen. Physisch lassen sich somit nahtlose Zell-Grenzen gestalten und beliebig klein dimensionieren. Die Datenübertragung über Licht scheint im Allgemeinen sicher zu sein vor Lauschangriffen, da sich die Teilnehmer des Netzes (das Backbone außer Betracht gelassen) erkennbar im Lichtkegel befinden, jedoch wird in [9] gezeigt, dass die stromführenden Leitungen des Transceivers ein elektromagnetisches Seitenkanal-Signal ausgeben, welches in anliegenden Räumen aufgegriffen werden kann. Interferenzen zwischen VLC und RF sind grundsätzlich nicht vorhanden und ermöglichen auch Kombinationen von WiFi und LiFi-Systemen. In Outdoor-Situationen kann mit entsprechenden Bandpassfiltern der Einfluss von Fremdlicht oder Gleichlicht unterdrückt werden. Auch mechanische Vorrichtungen (z.B. Röhren und Lamellen) oder entsprechende rückgekoppelte Schaltungen vor der Fotodiode helfen bei der Verminderung von störenden Lichtanteilen [1].

Wie in Abschnitt 2.2 schon erwähnt wurde, ist nur die Helligkeit für die Kommunikation ausschlaggebend, weswegen die analogen Frontend-Komponenten der Transceiver

für VLC kostengünstiger und simpler als für RF sind. IM/DD sendet im Basisband und benötigt daher keinen Frequenzmischer.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Positionsbestimmung im Innenraum mit VLC. Da die Wellenlänge des Lichts so klein ist, kann mittels eines Bildsensors die Laufzeitdifferenz ausgewertet werden und anschließend die Richtung, aus welcher die Welle kam, berechnet werden [3].

### **2.2.2. Nachteile**

Ein offensichtliches Defizit von VLC ist, dass für eine unterbrechungsfreie Datenübertragung line-of-sight (LOS) prinzipiell gewährleistet sein muss. Bei Szenarien mit mobilen Endgeräten wird die Verbindung unterbrochen, sobald sich diese in der Hosentasche befinden. Straßenleuchten könnten durch Bewuchs, Bäume, bauliche Hindernisse oder Witterungsbedingungen in der Sichtverbindung eingeschränkt oder getrennt sein.

Die Vorteile des Energiesparens verschwinden, falls genügend Tageslicht vorhanden ist und die Verbindung trotzdem aufgebaut bleiben soll. Situationen, in denen das Licht aus sein, aber trotzdem Datentransfer stattfinden soll, sind auch denkbar, wie z.B. zu Ruhezeiten nachts. In diesem Fall wäre ein IR-basiertes System sinnvoller.

### **2.2.3. Anwendungsfälle**

VLC und LiFi sind flexible Technologien mit vielseitigen Anwendungsgebieten, bei denen die in Abschnitt 2.2.1 genannten Vorteile zum Einsatz kommen. Industrie- und Fertigungshallen oder Kraftwerke sind elektromagnetisch intensiv strahlenbelastete Umgebungen, die von der Immunität des Lichts gegen diese profitieren können. Umgekehrt stehen EM sensible Umgebungen, wie z.B. Flugzeuge und Krankenhäuser vor dem Problem der Interferenz durch RF-Kommunikation. Da die empfindlichen Navigationsgeräte eines Flugzeugs durch die Vielzahl an Handys beeinträchtigt werden können, gelten in der Luftfahrt strenge Vorschriften für die Konnektivität, jedoch nicht für LiFi. Unter dem Begriff Car-to-X werden Kommunikationssysteme zusammengefasst, die Verkehrsteilnehmer/-innen und -Infrastruktur miteinander vernetzen, um lokale Straßeninformationen zu vermitteln. LiFi kann insbesondere vor dem Hintergrund des autonomen Fahrens hierfür geeignet sein und die Verkehrssicherheit erhöhen. In Museen kann ortsbezogenes Infotainment den Besuchern und Besucherinnen relativ einfach zugespield werden. Eine weitere Outdoor-Anwendung neben den

Straßenbeleuchtungsanlagen ist die Unterwasserkommunikation. Mittels blauen Lichts soll ein aktuelles Produkt bis zu 50 m weit kommunizieren können [10].

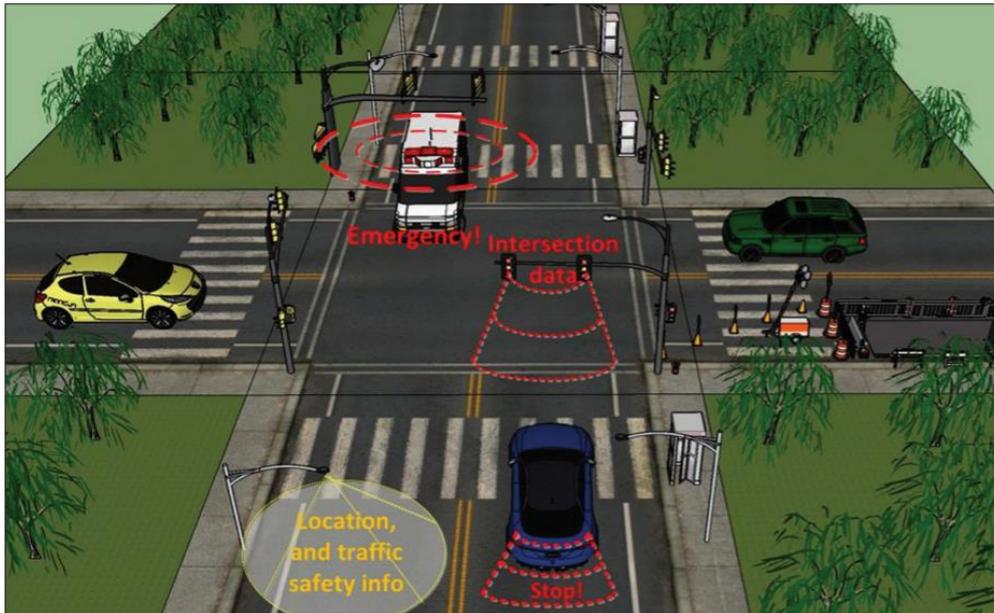


Abbildung 4: VLC Nutzungsszenario an einer Kreuzung [11]

#### 2.2.4. Fotodioden und Fotodetektoren

In den Bachelorthesen „Nachrichten- und lichttechnische Erprobung kommerziell verfügbarer LiFi-Systeme“ von Hannah Demuth [12] und „Netzwerktechnische Erprobung eines LiFi-Systems hinsichtlich des Handoververfahrens“ von Markus Rose [13] wurde die Lichterzeugung mit LEDs bereits näher untersucht, weshalb sich diese Arbeit im Folgenden mehr mit den Empfängerkomponenten beschäftigt.

Die Fotodetektoren basieren auf Halbleiterphysik und wandeln das ankommende Licht anhand des photoelektrischen Effekts in ein elektrisches Signal um. Im Vergleich zu anderen Bauelementen, wie dem Fotowiderstand oder dem Fototransistor, setzt sich die Fotodiode hauptsächlich aufgrund der hohen Empfindlichkeit und geringen Einschaltzeit als gängigster Bestandteil des Empfängers durch. Unter den Fotodioden gibt es ebenfalls diverse Typen, von denen die häufig verwendete pin-Fotodiode im späteren Verlauf dieses Kapitels genauer beschrieben wird [7]. Zuerst sollen jedoch die Grundprinzipien der Halbleitertechnik erläutert werden.

Halbleiter sind Komponenten, bei denen eine Temperaturerhöhung die Anzahl der Elektronen, im für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlichen Leitungsband drastisch erhöht. Dabei hinterlassen die angeregten Elektronen Löcher im Valenzband der Atome, die sich wie positive Teilchen verhalten und ebenfalls die Leitfähigkeit erhöhen.

In der Praxis wird die elektrische Eigenschaft von z.B. Dioden und Transistoren durch das Hinzufügen von Fremdatomen in die Halbleiterkristalle verändert. Der Vorgang dazu wird als Dotierung bezeichnet. Dotiert man einen typischen Halbleiter wie Silicium mit Arsenatomen, verringert sich der elektrische Widerstand. Vier der Valenzelektronen gehen eine Bindung mit benachbarten Siliciumatomen ein, das fünfte Valenzelektron ist nahezu frei beweglich und kann deshalb mit wenig Energieaufwand in das Leitungsband angeregt werden. In Abbildung 5 ist das Kristallgitter des dotierten Siliciums dargestellt. Da ein Überschuss an negativen Ladungsträgern vorhanden ist, wird dieser Halbleiter auch negativer Halbleiter oder n-Halbleiter genannt. Umgekehrt kann man das Silicium mit z.B. Gallium dotieren, das nur 3 Valenzelektronen besitzt und somit frei bewegliche Löcher hinterlässt. Den entstehenden positiven Halbleiter nennt man auch p-Halbleiter [14].

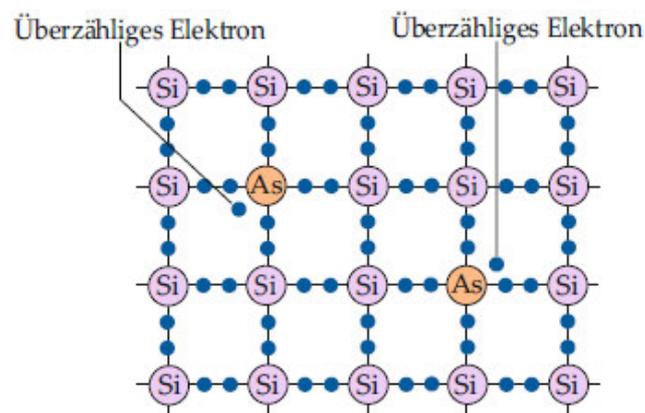


Abbildung 5: Siliciumkristall, der mit Arsen dotiert wurde [14]

Werden diese beiden Halbleiter nun zu einem pn-Halbleiterübergang verbunden, dann gleichen sich die Elektronen und Löcher aus und aufgrund fehlender Ladungsträger bildet sich in der Übergangszone eine Sperrschicht, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Ist die Spannungsquelle mit dem positiven Pol an die p-Seite angeschlossen, dann ist das Halbleiterbauelement in Durchlassrichtung geschaltet und ein Strom fließt. Wenn die Spannungsquelle umgekehrt angeschlossen ist, dann sperrt der pn-Übergang bis zu einer gewissen Durchbruchsspannung den Stromfluss. Dieses Verhalten in der Übergangszone ist das Grundprinzip, auf dem Dioden basieren [14].

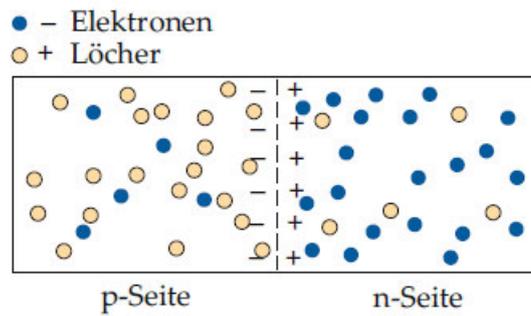


Abbildung 6: Der PN-Halbleiterübergang [14].

Der bei Lichteinfall erzeugte Strom in einer Fotodiode lässt sich wie folgt erklären: Treffen Photonen mit genügend Energie auf das Material der Diode und werden dort absorbiert, dann bilden sich durch das Anregen der Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband Elektron-Loch-Paare. Je nach Material gibt es eine konkrete Grenzwellenlänge  $\lambda_G$ , unter der dieser Effekt möglich ist. Die Grenzwellenlänge wird mit der Energielücke  $W_G$  [eV] des Halbleiterelements, dem plankschen Wirkungsquantum  $h$  [Js] und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  [m/s] bestimmt:

$$\lambda_G = \frac{hc}{W_G}$$

Silicium z.B. hat bei 27 °C eine Grenzwellenlänge von 1130 nm [15].

In dem herkömmlichen pn-Übergang absorbiert die neutrale Zone außerhalb der Sperrschicht einen Großteil des einfallenden Lichts. Folglich ist die Effizienz der photoelektrischen Umwandlung in der nur wenige Mikrometer breiten Sperrschicht gering. Positiv-intrinsisch-negativ-Dioden (pin-Fotodioden) hingegen besitzen eine nahezu undotierte i-Schicht im Halbleiterübergang, die die Breite der Sperrschicht vergrößert und damit die Einschaltzeit sowie die Quanteneffizienz (Abschnitt 2.4.2.1) verbessert. Die Sperrschicht ist im praxisüblichen Sperrbetrieb der Diode genauso dick wie die gesamte intrinsische Schicht [7][15].

Neben den pin-Fotodioden kommen Avalanche-Fotodioden (APDs) und Fototransistoren für die optische Kommunikation zum Einsatz. Die hochsensiblen APDs ähneln den pin-Dioden, besitzen aber eine zusätzliche, stark dotierte p- oder n-Schicht und nutzen die Stoßionisation am metallurgischen Übergang für eine Ladungsträgermultiplikation aus. Fototransistoren haben am pn-Übergang von der Basis zum Kollektor ihre Lichtsensible Fläche und reagieren generell langsamer als Fotodioden [1].

## 2.3 Lichttechnische Grundlagen

Bei der Quantisierung von elektromagnetischer Strahlung kann von zwei verschiedenen Einteilungen ausgegangen werden. Die radiometrischen Grundgrößen betrachten den Energiestrom der Strahlung und beziehen sich auf die Leistungseinheit Watt. Neben dem sichtbaren Lichtspektrum von 380 – 780 nm wird hier zusätzlich das UV- und IR-Spektrum berücksichtigt. Als rein physikalische Beschreibung der Systeme sind diese Größen passender. Die zweite Kategorie beinhaltet die photometrischen oder lichttechnischen Grundgrößen, welche die Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  des Auges über den Frequenzbereich berücksichtigen. Die folgenden Beschreibungen der lichttechnischen Grundlagen und Größen wurden aus [16] entnommen.

### 2.3.1 Radiometrische Größen

#### Strahlungsfluss $\phi_e$

Diese auch als Strahlungsleistung bezeichnete Größe beschreibt die ausgestrahlte Energie pro Zeit und wird in Watt [W] angegeben.

#### Strahlstärke $I_e$

Mit der Strahlstärke  $I_e$  wird die Strahlungsfluss  $\phi_e$  pro Raumwinkel  $\Omega$  bezeichnet. Die Einheit ist Watt pro Steradian  $\left[\frac{W}{sr}\right]$ .

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega}$$

#### Bestrahlungsstärke $E_e$

Die Bestrahlungsstärke  $E_e$  definiert den Strahlungsfluss  $\phi_e$ , der auf eine Fläche  $A$  trifft und ist eine Intensitätsgröße mit der Einheit Watt pro Quadratmeter  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dA}$$

#### Strahldichte $L_e$

Die Strahldichte  $L_e$  ist der Strahlungsfluss  $d^2\phi_e$  bezogen auf die Fläche und den Raumwinkel mit der Einheit  $\left[\frac{W}{sr \cdot m^2}\right]$ .

$$L_e = \frac{d^2\phi_e}{dA \cdot d\Omega}$$

### 2.3.2. Photometrische Größen

Das menschliche Auge empfindet verschiedene Wellenlängen des Lichtes bei gleicher ausgestrahlter Leistung unterschiedlich hell. Dies ist die in Abschnitt 2.3 bereits erwähnte Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$ . Die CIE (Commission Internationale de L'Éclairage) hat 1924 eine noch weitläufig verwendete Referenzkurve für die Empfindlichkeit am Tage veröffentlicht, genannt CIE 1931. Eine verbesserte Version CIE 1978 und eine Referenzkurve für die Sensitivität bei Nacht CIE 1951 wurden in den späteren Jahren veröffentlicht. In der Abbildung 7 ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit tagsüber bei 555 nm am höchsten ist, also im grüngelben Bereich. Bei geringem Umgebungslicht verschiebt sich das Maximum der Hellempfindlichkeitskurve zu einer Wellenlänge von 505 nm, was grünem Licht entspricht. Unter diesen Bedingungen wird Helligkeit von unseren Augen besser wahrgenommen.

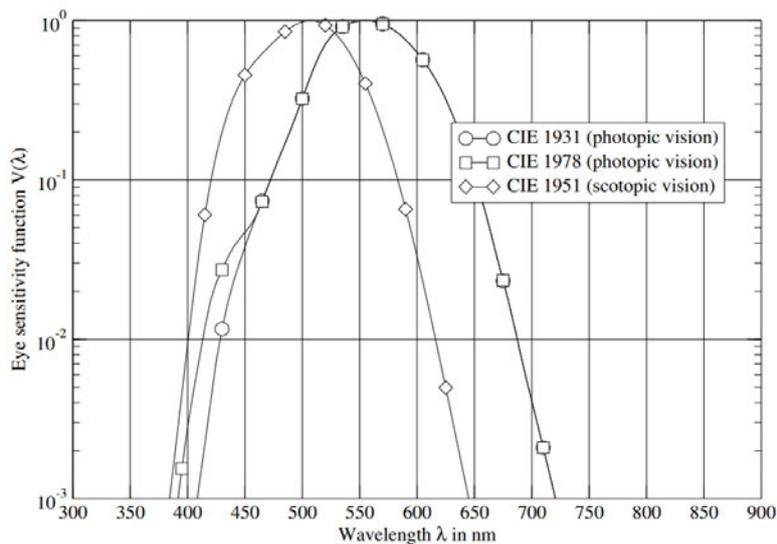


Abbildung 7: Die Hellempfindlichkeitskurven des CIE [1]

#### Lichtstrom $\phi_v$

Der Lichtstrom ist der mit der  $V(\lambda)$ -Kurve gewichtete Strahlungsfluss. Das entspricht der von einer Lichtquelle in alle Richtungen abgestrahlten Leistung. Die Umrechnung von der radiometrischen zur photometrischen Größe mit der Maßeinheit Lumen [lm] wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\phi_v = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

### **Lichtausbeute $\eta_v$**

Die Lichtausbeute ist ein Maß für die Effizienz einer Lichtquelle und hat die Einheit Lumen pro Watt  $\left[\frac{\text{lm}}{\text{W}}\right]$ .

$$\eta = \frac{\Phi_v}{P}$$

### **Lichtstärke $I_v$**

Mit dieser Größe wird der Lichtstrom, der in einen gegebenen Raumwinkel ausstrahlt, definiert. Die Einheit ist Candela [cd].

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$$

### **Beleuchtungsstärke $E_v$**

Diese Größe gibt an, wieviel Lichtstrom auf eine Fläche A trifft. Die Einheit ist Lux [lx].

$$E_v = \frac{\Phi_v}{dA}$$

### **Leuchtdichte $L_v$**

Mit der Leuchtdichte wird der Helligkeitseindruck beschrieben, der von einer Quelle oder leuchtenden Fläche A ausgeht. Die Einheit ist Candela pro Quadratmeter  $\left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}\right]$ .

$$L_v = \frac{I_v}{A}$$

## **2.3.3 Weitere Lichttechnische Größen**

### **Halbstreuwinkel**

Der Halbstreuwinkel ist der Öffnungswinkel, bei dem die Lichtstärke 50 % der maximalen Lichtstärke beträgt.

### **Farbtemperatur**

Dieser in Kelvin [K] angegebene Wert beschreibt den Farbeindruck von weißem Licht. Als Mischlicht lässt sich dieses nicht durch eine Wellenlänge beschreiben. Wenn ein Schwarzer Körper auf eine bestimmte Temperatur erhitzt wird, entspricht die Farbe des ausgestrahlten Lichts, der Strahlung, die von dem zu untersuchenden weißen

Leuchtmittel ausgestrahlt wird. Generell sind niedrige Farbtemperaturen um die 1000 K sehr warm und rötlich, während höhere Werte bis 10.000 K ins bläuliche übergehen.

### **Farbwiedergabeindex Ra/CRI**

R<sub>a</sub> ist ein Index von 0-100, der die Farbtreue von Lichtquellen beschreibt. Ein hoher Wert bedeutet, dass farbige Oberflächen unter dieser Quelle realistisch wiedergegeben werden. Ein Wert von 100 sagt aus, dass die acht verschiedenen zur Berechnung des Indexes verwendeten Referenzfarben, zu 100% korrekt dargestellt werden.

### **Reflektionsgrad ρ**

Der Reflektionsgrad geht von 0 bis 1 (keine Reflexion bis komplette Reflexion) und gibt an, wieviel des einfallenden Lichts von einer Oberfläche reflektiert werden.

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_o}$$

Φ<sub>r</sub> = reflektierter Lichtstrom

Φ<sub>o</sub> = einfallender Lichtstrom

Bei der Reflexion von Licht wird zwischen drei Fällen unterschieden: diffus, gerichtet und gemischt.

#### **1. diffuse Reflexion**

Das einfallende Licht wird gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert. Eine Fläche oder ein Objekt, das theoretisch vollkommen gleichmäßig strahlt wird Lambert-Strahler genannt.

$$L_r = \frac{\rho_d \cdot E_v}{\pi}$$

L<sub>r</sub> = reflektierte Leuchtdichte

ρ<sub>d</sub> = Reflexionsgrad der diffusen Reflexion

#### **2. gerichtete Reflexion**

Das Licht tritt an der Fläche unter dem gleichen Winkel aus, wie es eingefallen ist.

$$L_r = \rho_r \cdot L_o$$

$L_r$  = reflektierte Leuchtdichte

$L_0$  = einfallende Leuchtdichte

$\rho_r$  = Reflexionsgrad der gerichteten Reflexion

### 3. gemischte Reflexion

In der Realität reflektieren Flächen das Licht gemischt, d.h. dass eine Leuchtdichteverteilung die Stärke und Richtung der reflektierten Strahlen beschreibt. Diese Verteilung teilt sich auf in diffuse und gerichtete Anteile.

#### Photometrisches Entfernungsgesetz

Unter der Voraussetzung, dass der Abstand  $r$  zwischen Lichtquelle und Messpunkt zehnmal so groß ist, wie die Austrittsfläche der Lampe, kann die Beleuchtungsstärke bei dem Einfallswinkel  $\varphi$  anhand des photometrischen Entfernungsgesetzes berechnet werden.

$$E_v = \frac{I_v}{r^2} \cdot \cos(\varphi)$$

#### 2.3.4 Intelligente Außenbeleuchtung und Outdoor-LiFi

Neben dem verbreiteten Einsatz von LEDs zur Kostensenkung und Energieeinsparung setzen sich Lichtmanagementsysteme immer mehr als wichtiges Element moderner Beleuchtungskonzepte durch. Die Weitergabe von Daten zum Dimmen oder Ein- und Ausschalten einzelner Lichtquellen bildet meist den Kern dieser Systeme. Zusätzliche Funktionen einer intelligenten Außenbeleuchtung sind z.B. das Speichern von Informationen über Ausfälle der Geräte, den Energieverbrauch über die Zeit oder den Betriebszustand. In der Straßen- oder Parkplatzbeleuchtung können die Lichtquellen an die Erfordernisse der Situation angepasst werden und die Sicherheit im Verkehr erhöhen. Bei gefährlichen Sichtbedingungen durch Nebel, Schnee oder starken Regen kann das Beleuchtungsniveau erhöht und nach verbesserter Witterung flexibel und ohne Verzögerungen wieder heruntergefahren werden. Der effizientere Einsatz der Leuchten sorgt somit für eine höhere Lebensdauer und damit geringere Wartungskosten. Für die technische Lösung der Lichtsteuerung gibt es zwei Ansätze:

## **1. autarke Lichtsteuerung**

Dabei wird an jeder Leuchte die Steuereinheit und das elektronische Vorschaltgerät (EVG) eingebaut und programmiert, so dass z.B. an festen Zeiten je nach Sonnenunter- und -aufgang die Helligkeit geregelt wird. Es benötigt keinen zentralen Server, der die Steuerung übernimmt. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept, zählt zu den autarken Systemen, jedoch können die Geräte untereinander kommunizieren.

## **2. Tele-Management-Systeme**

Ein Netzwerk mit der Steuereinheit als Zentrum verwaltet das Lichtmanagement und kann die Teilnehmer überwachen. Informationen über die Leuchtmittel wie Ausfälle o.Ä. können direkt zurückgeleitet werden. Bei einem Tele-Management-System gibt es zwei Übertragungswege für die Datenkommunikation: Powerline oder Funk. Powerline nutzt die Stromverbindung zur Übertragung der Steuerdaten und benötigt spezielle Umwandler. Funklösungen bieten, wie auch Powerline, bidirektionale Kommunikation und verwenden Repeater an den Lampen, um die Reichweite des Netzwerkes zu erhöhen [17].

## **Outdoor-LiFi**

Die LiFi-Kommunikation im Außenbereich unterscheidet sich prinzipiell nicht von Applikationen im Innenbereich, doch erschwerende Faktoren haben dazu geführt, dass diese bisher weniger Beachtung fand. Der Dual-Use Vorteil zur Beleuchtung und Datenübertragung ist tagsüber geringfügig, weil die Sonne genügend Helligkeit ausstrahlt. Trotzdem existieren Outdoor VLC-Anwendungen, die Dual genutzt werden können. Ampeln oder lichtemittierende Wechselverkehrszeichen leuchten am Tag sowie in der Nacht, um die Verkehrsteilnehmer/-innen zu informieren und können als potenzielle VLC-Transmitter fungieren. Ein zusätzliches Problem stellt das erheblich höhere Interferenz- und Rauschniveau dar, an das sich angepasst werden muss. Schnee, Regen, Nebel, Staub und Dunst sind Quellen für Beeinträchtigungen im Kanal. Die atmosphärischen Turbulenzen, Absorptionen und geometrisch bedingten Leistungsverluste müssen für eine erfolgreiche Übertragung identifiziert und miteinkalkuliert werden. Auf der für gewöhnlich größeren Kommunikationsstrecke im Außenbereich addieren sich die Verluste durch diese. Konkurrierende Nachrichtentechnische Anwendungen können sich an die genannten Charakteristiken im Outdoor-Bereich anpassen und bilden eine Hürde, die als zu überwinden gilt [18]. Abbildung 8 illustriert den starken Einfluss von Umweltbedingungen in diesem Sachverhalt. Dort werden die

Datenraten eines LiFi-Systems in Abhängigkeit von der Entfernung sowohl im Indoor als auch im Outdoor-Bereich verglichen. Die Outdoor-Messungen sind unter sehr vorteilhaften Bedingungen (Sonnig, kein Regen/Nebel o.Ä.) durchgeführt worden und zeigen bis zu einer Distanz von 10 m kaum Abweichungen zu den Ergebnissen aus dem Innenbereich [19].

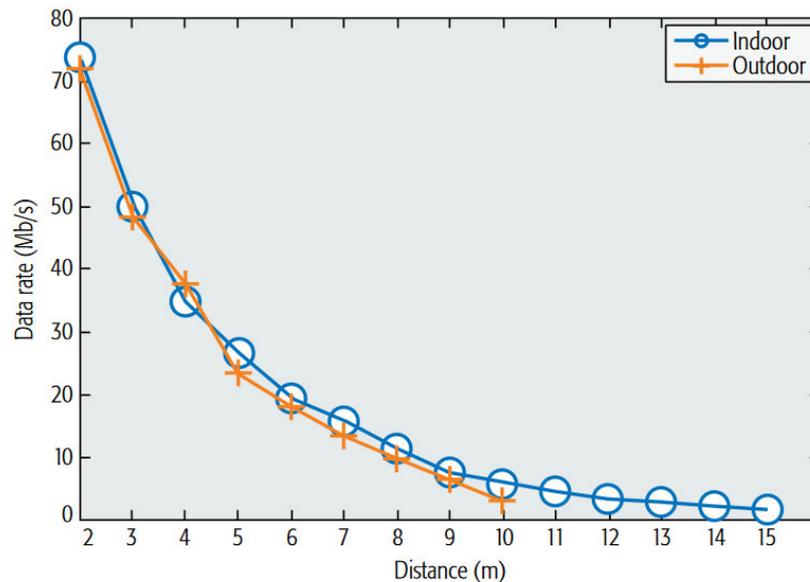


Abbildung 8: Datenratenvergleich eines LiFi-Systems im Indoor und Outdoor-Bereich [19]

Eine Möglichkeit mit diesen Herausforderungen umzugehen, sind komplexere, optoelektronische Bauteile. In [20] wurde 2017 eine Art Linse am Fotodetektor unter dem Namen *compound parabolic concentrator shape luminescent solar concentrator (CPC-shape LSC)* vorgestellt. Dieser optische Konzentrator verbessert im Vergleich zu anderen Linsen die optische Verstärkung um das Zweifache, ohne Einschränkungen auf das Sichtfeld. Die daraus folgende SNR Verbesserung kann ihr Potenzial in High-Speed oder Outdoor VLC Anwendungen finden. Weitere in [21] vorgestellte Entwicklungstrends gehen in die Richtung schneller reagierender Materialien am Sender, wie z.B. die Blaulicht-emittierenden Superlumineszenzdioden (SLD) auf Indiumgalliumnitrid-Basis mit einer ungefähren Bandbreite von 800 MHz. Für den Empfänger gibt es ebenfalls Ansätze zur Implementierung effizienterer Systeme. So wurde die höhere Empfindlichkeit gegenüber einer einzelnen Diode mittels eines 3x3 pin-Dioden array demonstriert. Im Gebiet der Kanalmodulation sind fortgeschrittenere, über die in Abschnitt 2.4.1 hinausgehende Verfahren unerlässlich für die Realisierung einer hohen spektralen Effizienz. Neue, noch nicht etablierte Technologien wie probabilistic shaping, geometric shaping oder mehrdimensionale Modulationsverfahren bedürfen

mehr Forschung, um den Weg zur Näherung an die Shannon-Grenze zu bahnen. Die digitale Signalverarbeitung unterstützt durch maschinelles Lernen ist ein weiterer Aspekt aus der aktuellen wissenschaftlichen Entwicklung, der die Nichtlinearitäten von Hochgeschwindigkeits-LiFi Applikationen ausgleichen kann. All diese Trends ermöglichen LiFi eine Perspektive als Teil zukünftiger 6G Netzwerke.

Das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (HHI) hat im Jahr 2018 in Zusammenarbeit mit der Sangikyo Corporation aus Japan das bisher einzig erhältliche Outdoor-LiFi Produkt unter dem Namen *LED-Backhaul* entwickelt und veröffentlicht.



Abbildung 9: *LED- Backhaul* vom Fraunhofer HHI [22]

Mit einer Wellenlänge von 850 nm wird außerhalb des sichtbaren Lichts in der IR-Domäne gesendet und 500 Mbit/s auf 100 Meter unter ungestörten Bedingungen erreicht. Bei einer ungefähren Entfernungsverdopplung auf 215 Meter liegt die Datenrate bei 200 Mbit/s. Die Übertragung im 100 MHz breiten Kanal hat trotz hoher Auslastung eine Latenz  $< 2$  ms [22].

Das Systemdesign des *LED-Backhaul* geschah unter den drei folgenden Zielaspekten in absteigender Priorität:

1. Robustheit gegenüber veränderlichen Wetterbedingungen
2. Robustheit gegenüber Ausrichtungsfehlern
3. Kostenminimierung

Das FHHI sieht die möglichen Anwendungsfälle für dieses System nicht in der direkten Datenübertragung zum Endnutzer, sondern eher als Alternative zu Kabel basierten Lösungen für die Kommunikation zwischen der Basisstation und dem Kernnetzwerk von Mobilfunk. Anstelle eines Ethernet Kabels, was zwischen Gebäuden gezogen

werden muss und mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden ist, können die Transceiver einfach auf den Dächern von Gebäuden platziert werden [23].

Eine weitere aufstrebende Technologie, die Zukunftsfähigkeit in Verbindung mit LiFi beweisen kann, ist das Verwenden von *Reconfigurable Intelligent Surfaces* (RIS), um die Ausbreitung hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung zu beeinflussen. Dies sind sogenannte Metaoberflächen, die unter Stimulierung mit einer Spannung das Licht z.B. bei Transmission verstärken/dämpfen oder in einem anderen Austrittswinkel als dem Eintrittswinkel reflektieren können. Im Außenbereich wäre ein mögliches Einsatzgebiet in der Vehicle-to-Vehicle (V2V) oder Vehicle-to-infrastructure (V2I) Kommunikation. Eine RIS angebracht an der Ampel kann das Licht flexibel zu den Empfängern reflektieren und auch NLOS Szenarien damit ermöglichen [24].

## **2.4 Nachrichtentechnik**

### **2.4.1 Digitale Modulationsverfahren**

Um ein Nachrichtensignal über einen gegebenen Pfad zu senden, muss dieses moduliert werden. Da LiFi die Daten über Bits überträgt, wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich auf digitale Modulationsverfahren eingegangen. Ausgangspunkt ist ein Bitstrom, der so moduliert wird, dass Störungen oder Verzerrungen keinen Einfluss auf die Eindeutigkeit der Nachricht haben. Am Empfänger sollte der Bitstrom nach der Demodulierung klar rekonstruierbar und ohne Wiederholungen sein. Die einfachsten Verfahren sind solche mit einem Träger (OOK, ASK, PWM). Qualitätskriterien für Modulationsverfahren sind die Bit-Error-Rate (BER), der Signal-Rausch Abstand (SNR)  $E_s/N_0$  und die Bandbreiteneffizienz (BBE) in Bit/s/Hz [1]. Die im Kontext der Modulation verwendete Leistungseffizienz ist der notwendige SNR, um eine gegebene BER zu erreichen [25].

#### **2.4.1.1 On-Off Keying**

Die binären Daten müssen für die anschließende analoge Übertragung entsprechenden Modulationssymbolen zugeordnet und in eine elektrische Spannung umgewandelt werden, die die Lichtquelle steuert. Bei OOK wird die digitale „1“ durch die eingeschaltete LED dargestellt und die digitale „0“ durch die ausgeschaltete LED. Die Ein- oder Ausschaltdauer entspricht der Symbollänge  $T$ . Der Zustand „aus“ heißt nicht zwangsläufig, dass die LED komplett ausgeschaltet ist, sondern nur so weit in der Intensität reduziert, bis eine Unterscheidung zwischen „an“ und „aus“ möglich ist [26]. OOK hat

den Vorteil der geringen Komplexität und benötigt einen relativ kleinen SNR für eine gewünschte Bit-Error-Rate [27]. In Abbildung 10 ist die Leistungseffizienz für NRZ-OOK (Siehe Kapitel 2.4.2.3) geplottet.

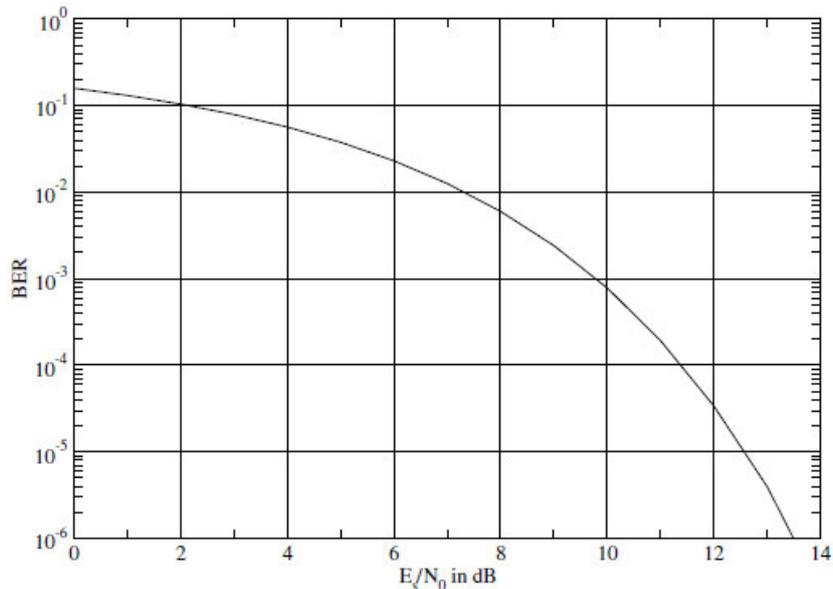


Abbildung 10: Die Bitfehlerrate von NRZ-OOK im Verhältnis zum SNR dargestellt [1]

### 2.4.1.2 Amplitude Shift Keying

Wie im Namen erkennbar ist, werden für ASK den Bits verschiedene Amplitudenwerte mit gleichem Abstand zueinander zugeordnet. OOK ist eine Art des ASK mit nur 2 Modulationssymbolen. Bei einer Modulation mit z.B. 4 Symbolen wird den Bitfolgen {00},{01},{10} und {11} jeweils eine Amplitude zugeordnet [1]. Dies wird als 4-ASK bezeichnet und in der verallgemeinerten Form als M-ASK (M = Anzahl der Modulationssymbole) [27]. Eine Modulation mit nicht-negativen Symbolen wird auch als unipolar bezeichnet.

### 2.4.1.3 Pulse Width Modulation

Die PWM verwendet Impulse gleicher Amplitude aber unterschiedlicher Länge, um die digitalen Daten darzustellen. Die Impulse werden periodisch gesendet und das Verhältnis der Impulse zur Symboldauer wird als Tastgrad bezeichnet. Für eine Bitfolge mit  $b$  bits benötigt man  $2^b$  Tastgrade, um die Daten darzustellen. Bei den Bitfolgen {00},{01},{10} und {11} wären die Tastgrade also 0%, 33,3%, 66,6% und 100%. PWM wird häufig von Mikrocontrollern, wie z.B. dem *Arduino* unterstützt und findet bei VLC häufiger seinen Anwendungsfall im Dimmen von Licht und weniger bei der Übertragung von digitalen Daten [1].

#### 2.4.1.4 Pulse-Position Modulation

Für diese Art der Modulation werden die Impulse bei  $b$  bits innerhalb der Symboldauer auf eins von  $2^b$  möglichen Zeitfenstern verschoben, um den digitalen Wert zu repräsentieren. Bei der Übertragung von 1 bit, hat OOK unter der gleichen SNR Vorgabe eine doppelt so hohe Bandbreiteneffizienz, wie die PPM [28].

#### 2.4.1.5 Variable Pulse-Position Modulation

Da die Impulse bei PPM gleich lang sind, bleibt bei hintereinander gesendeten Einsen die Helligkeit unter der Lichtquelle unverändert. Das Licht wäre nicht dimmbar, ohne den Inhalt des Datenstroms zu verändern. Die VPPM verbindet die Grundidee der PPM mit der PWM, wodurch eine Einstellung der Helligkeit möglich ist. Die Impulse werden nicht nur in ihrer Position im Zeitfenster moduliert, sondern auch in der Länge, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Ein Impuls am Anfang der Symboldauer gefolgt von einer Pause bis zum Start der nächsten Periode repräsentiert eine Null, während eine Pause zum Start gefolgt vom Impuls eine Eins repräsentiert [29].

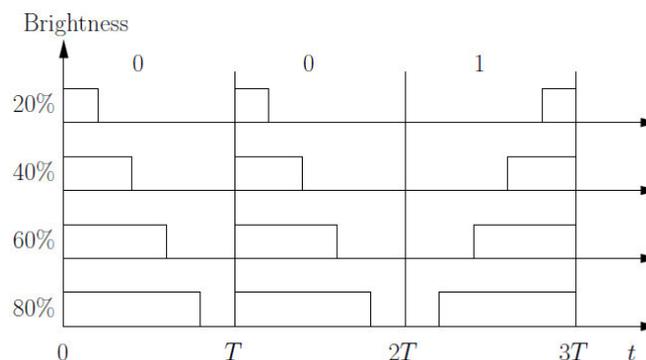


Abbildung 11: VPPM Signal mit verschiedenen Dimmstufen, um {001} zu übertragen [1]

#### 2.4.2 Basisbandübertragung

Die Übertragungsstrecke eines optischen Systems kann, wie in Abbildung 12 dargestellt, in Blöcken betrachtet werden. Die modulierten, digitalen Daten werden in der elektrischen Domäne vom Treiber zur IM verwendet. Über den physischen Kanal sendet die Lichtquelle (LED, Laser, ...) die Information, wo sie von der Fotodiode detektiert und in elektrische Energie umgewandelt werden. Zur Verstärkung der meist geringen

Ströme kommt ein Transimpedanzverstärker (TIA, siehe Abschnitt 4.2.9) zum Einsatz, der die Daten an den Demodulator weitergibt.

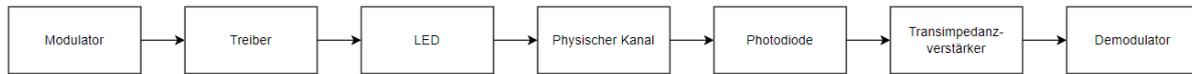


Abbildung 12: Die Übertragung eines VLC Systems als Blockdiagramm dargestellt.

### 2.4.2.1. Kanalmodell

Die physische Übertragung des Signals in der optischen und elektrischen Domäne geschieht nicht perfekt und unterliegt verschiedenen störenden, dämpfenden oder bandbegrenzenden Effekten. Zur mathematischen Beschreibung des Übertragungskanals werden Modelle entworfen, um diese Einflüsse möglichst genau zu beschreiben und Systeme simulieren zu können. Ein korrektes Modell eines VLC Kanals benötigt das Verständnis der Eigenschaften des Senders, des Empfängers und aller weiteren optischen Akteure im Ausbreitungspfad [30].

LED-Lichtquellen oder diffus reflektierende Flächen in VLC Systemen können als Lambert-Strahler beschrieben werden. Lambert-Strahler folgen der Gesetzmäßigkeit, dass die Lichtstärke proportional in Abhängigkeit zum Kosinus des Betrachtungswinkels  $\theta$  abnimmt.

$$I_v(\theta) = I_v(0) \cdot \cos(\theta)$$

$I_v(0)$  ist die Lichtstärke im Winkel 0 also, wenn man senkrecht auf eine Leuchte oder Fläche gucken würde. Die Leuchtdichte  $L_v$  eines Lambert-Strahlers ist unabhängig vom Betrachtungswinkel. Der Helligkeitseindruck für das menschliche Auge ist aus jeder Richtung gleich. Mit  $\cos(60^\circ) = 0,5$  folgt, dass ein Lambert-Strahler einen Halbstreuwinkel von  $120^\circ$  hat, jedoch besitzen LEDs auch andere Richtcharakteristiken, die mit dem Modell des generalisierten Lambert-Strahlers

$$I_v(\theta) = I_v(0) \cdot \frac{m+1}{2} \cdot \cos^m(\theta)$$

berücksichtigt werden. Die Ordnung  $m$  berechnet sich mit

$$m := -\frac{1}{\log_2\left(\cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\right)}$$

und bezieht sich auf den halben Halbstreuwinkel  $\frac{\theta_1}{2}$  [1].

Einen weiteren Einfluss auf den Übertragungskanal haben der Frequenzgang und folglich auch die Modulationsbandbreite von den LEDs und der Fotodiode. Technisch kann weißes Licht auf zwei Arten erzeugt werden, die sich im Frequenzgang unterscheiden. Die erste Methode verwendet drei LED-Chips in den Grundfarben Rot, Grün und Blau, um additiv weißes Licht zu erzeugen, während die zweite einen blauen Chip mit einer Phosphorschicht verwendet. Aufgrund der langsamen Ansprechzeit des Phosphors ist die Modulationsbandbreite der zweiten Methode geringer als bei den RGB-LED.

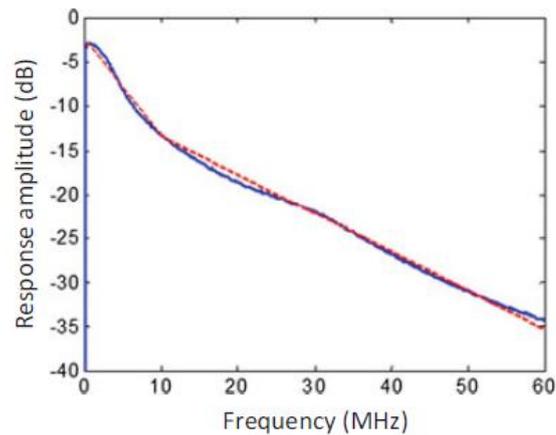


Abbildung 13: Frequenzgang einer weißen LED [7]

In [31] wird näher erläutert, wie sich durch das Einfügen von blauen Filtern am Empfänger die Bandbreite eines VLC Systems mit phosphorbeschichteten LEDs vergrößern lässt, was einen positiven Effekt auf die BER und das SNR hat. Abbildung 13 zeigt exemplarisch den Frequenzgang einer weißen LED mit einer 3dB-Modulationsbandbreite von  $\sim 4$  MHz.

Mittels des Ruhestroms  $I_0$  und der Differenz zwischen dem Spitzenstrom und dem Ruhestrom  $\Delta I$  lässt sich die Modulationstiefe  $m_d$  berechnen.

$$m_d = \frac{\Delta I}{I_0}$$

Dieser Wert ist ein Maß für das Verhältnis zwischen dem Wechselspannungssignal und dem Gleichstromanteil. Mit einer höheren Modulationstiefe kann das Signal leichter am Empfänger erfasst werden, da die benötigte optische Leistung geringer ist. Ein höherer Wert führt jedoch auch zu einer geringeren Modulationsbandbreite. Diese erschließt sich für LEDs mit:

$$f_{3dB} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot \tau_c}$$

$\tau_c$  ist die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger in dem Halbleiter und hat einen direkten Einfluss auf die Ansprechzeit. Für VLC Anwendungen mit hohen Datenraten liegen die Ansätze zur Verbesserung der Modulationsbandbreite in der Mikrostrukturierung der Halbleiter, ohne Kompromisse in der Leuchteffizienz einzugehen [7].

Der empfängerseitige Einfluss auf den Kanal ergibt sich durch die Wahl des Fotodetektors. Kriterien für diesen sind die Bandbreite, die Empfindlichkeit (responsivity) sowie die Größe der Fläche für die Lichtaufnahme. In den meisten Fällen ist eine Fotodiode für die opto-elektrische Umwandlung zuständig. Trotz der besseren Empfindlichkeit von Avalanche-Fotodioden, werden pin-Dioden bevorzugt, da sie toleranter gegenüber größeren Temperaturschwankungen sind und geringeres Schrotrauschen verursachen [31]. Auf das Rauschverhalten von VLC-Systemen wird näher in Abschnitt 2.4.2.3 eingegangen. Die wichtigsten spezifischen Parameter zur Beurteilung von Fotodioden in Anwendungen der Lichtkommunikation sind die Quanteneffizienz  $\eta$ , die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit  $\rho$ , die Bandbreite  $B$  und die Strom-Spannungs-Kennlinie.

### **Quanteneffizienz $\eta$**

Die Quanteneffizienz beschreibt die Anzahl der Elektronen, die durch ein Photon gelöst werden.

$$\eta = 1 - e^{-\alpha(\lambda)w}$$

$\alpha(\lambda)$  ist der Absorptionskoeffizient der Fotodiode in Abhängigkeit von der Wellenlänge und  $w$  ist die Breite der I-Schicht.

### **Empfindlichkeit $\rho$**

Dieser Wert wird mittels der Photonenenergie  $hf$  und der Elementarladung des Elektrons  $e$  hergeleitet:

$$\rho = \frac{\eta e}{hf}$$

Die Einheit ist Ampere pro Watt [ $\frac{A}{W}$ ].

### **Bandbreite $B$**

Die Bandbreite einer Fotodiode wird berechnet mit

$$B = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})}$$

und benötigt die Übertragungszeit  $\tau_{tr}$  sowie die Entladungszeit  $\tau_{RC}$ .

### Strom-Spannungs-Kennlinie

Zur Beurteilung der Linearität oder Nicht-Linearität von einer Fotodiode und elektronischen Bauteilen hilft die Strom-Spannungs-Kennlinie [7]. Es kann in der Praxis jedoch davon ausgegangen werden, dass die Umsetzung optischer in elektrische Leistung linear erfolgt [28].

Eine VLC-Verbindung mit dem Sendesignal  $x(t)$  unterliegt in der Realität immer Rauschen und lässt sich als mathematisches Modell ausdrücken durch:

$$y(t) = h * F(x(t)) + w(t)$$

Das empfangene Signal  $y(t)$  ergibt sich durch die Faltung der Impulsantwort des Kanals  $h$  mit der auf  $x(t)$  angewendeten nicht-linearen Verzerrungsfunktion  $F(x(t))$  des Senders und dem Rauschsignal  $w(t)$  [28]. In Abbildung 14 ist die Darstellung des Kanalmodells als Blockschaltbild zu sehen. Auf die Rauschursachen und Einflüsse wird näher in Kapitel 2.4.2.3 eingegangen.

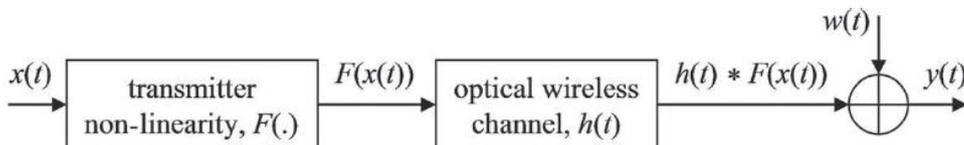


Abbildung 14: Allgemeines Blockschaltbild des VLC-Systems [28]

Nicht nur die verwendeten elektrischen Bauteile haben Auswirkungen auf die Übertragungscharakteristik, sondern auch die Sender-Empfänger Entfernung  $d$  und die geometrische Anordnung der beiden zueinander. Für die Quantisierung und genauere Beschreibung des Verhaltens verwendet man in der Nachrichtentechnik den Pfadverlust. Dieser Wert umfasst die gesamte verloren gegangene Leistung über den Kanal und kann durch das Verhältnis von der gesendeten Leistung  $P_T$  und der empfangenen Leistung  $P_R$  ausgedrückt werden [32]. In einem Ausbreitungsszenario mit direkter Sichtverbindung und keinen Streuungen wird die empfangene optische Leistung mit folgender Formel berechnet:

$$P_{R,opt} = P_{T,opt} G_{conc} G_{filter} f(\Theta, \Theta_1) \frac{A_R, eff}{\pi d^2}$$

Diese Beziehung gilt jedoch nur im Fernfeld ( $d \gg \lambda$  und  $A_R \gg \lambda^2$ ).  $G_{\text{conc}}$  beschreibt hier den Leistungsgewinn durch optische Elemente (z.B. Linsen) und  $G_{\text{filter}}$  den Leistungsverlust durch optisches Filtern. Aus der Fotodiodenfläche  $A_R$  und dem Einfallswinkel  $\varphi$  ergibt sich die effektive Fläche der Fotodiode:

$$A_{R,eff} = A_R \cos(\varphi)$$

Der Pfadverlust  $L_{PF}$  wird üblicherweise in dB angegeben und ergibt sich aus

$$L_{PF} = 10 \log\left(\frac{P_{T,opt}}{P_{R,opt}}\right).$$

In der Praxis liegen die Pfadverluste im Indoor-Bereich zwischen 50 – 80 dB [28]. Die Einflüsse der Umwelt auf die Verbindung in einem Outdoor-Szenario werden in [33] näher experimentell untersucht. Die gesendete optische Leistung wird dort mit dem Faktor  $L_A$  multipliziert, der die Dämpfung und Beugung durch Partikel repräsentiert.

$$P_{R,opt} = P_{T,opt} L_{PF} L_A$$

Mögliche Wetterbedingungen für das erhöhte Partikelauftreten können Nebel, Schnee oder Regen sein.

#### 2.4.2.2. Kanalcodierung

Die zu übertragenden binären Daten unterliegen im physischen Übertragungskanal Fehlerquellen, die die Eindeutigkeit der Nachricht beeinflussen können. Eine optionale Ergänzung zum Schutz vor Fehlern liegt in der Kanalcodierung. Dabei können Fehler nicht nur erkannt, sondern im besten Falle auch korrigiert werden. Die Grundidee liegt in dem Hinzufügen von Daten zum Nutzsignal, die mit dem eigentlichen Informationsgehalt nichts zu tun haben (Redundanz). In vielen heutigen Technologien ist die Kanalcodierung unerlässlich, „wie z. B. im Mobilfunk, bei Datenmodems, im Internet, bei der Satellitenkommunikation, bei Weltraumsonden, in der Unterwasserkommunikation, bei der digitalen Fernseh- und Rundfunkübertragung und in optischen Übertragungssystemen“ [24, p.158].

Für den Fehlerschutz auf dem Weg vom Sender zum Empfänger wird auch von Vorwärtsfehlerkorrektur/forward error correction (FEC) gesprochen. Falls der Übertragungskanal nicht auf Echtzeit ausgelegt ist, kann der Empfänger bei der Feststellung eines oder mehrerer Fehler die erneute Sendung der Information fordern. Diese Automatic Repeat Request (ARQ) genannte Kanalcodierung zählt zu den

Rückwärtsfehlerkorrekturen (backward error correction) und benötigt zwangsläufig einen Rückkanal [34].

Generell wird in der Kodierungstheorie zwischen Blockcodes, Faltungscodes und verketteten Codes unterschieden. Im folgenden Abschnitt werden die Blockcodes behandelt.

## Blockcodes

Die Daten aus dem Nutzsignal werden zu Blöcken der Länge  $K$  (Infowort) zusammengefasst und vor dem Senden mit der Codewortlänge  $N$  kanalcodiert. Die möglichen Elemente des Blocks werden als Alphabet der Infosymbole bezeichnet und können die binären Symbole  $\{0,1\}$  oder im Falle der höherstufigen Blockcodes die Symbole  $\{0,1,2, \dots, q-1\}$  umfassen. Die Länge  $q$  des Alphabets wird Mächtigkeit genannt.

Ein sehr simples und einfach zu implementierendes Beispiel eines Blockcodes ist der Wiederholungscode. Das Informationswort hat in der binären Übertragung die Länge 1 und wird  $N$ -mal hintereinander übertragen, um die korrekte Erkennung der Information zu erhöhen. Wenn also die zu übertragende Nachricht beispielsweise [1011] ist, dann wird diese bei  $N = 4$  zu [1111 0000 1111 1111] kodiert. Die Coderate

$$r = \frac{K}{N}$$

ist eine wichtige Spezifikation von Kanalcodes und beträgt hier  $1/4$ . Für niedrige Werte von  $r$  ist zur Übermittlung der gleichen Information in der gleichen Zeit, wie es im uncodierten Fall dauern würde, eine höhere Bandbreite notwendig. Ein niederratiger Code hat folglich eine geringere Bandbreiteneffizienz, gewinnt aber durch den besseren Fehlerschutz an Leistungseffizienz. Für einen hochratigen Code ist dieser Kompromiss zwischen BBE und LE genau umgekehrt [25].

Angenommen es kommt im obigen Beispiel ein Fehler an sechster Stelle vor und die Nachricht lautet [1111 0100 1111 1111]. Der Empfänger erkennt, dass ein Fehler vorhanden ist, da die einzigen möglichen Codewörter [0000] und [1111] sind. Die Nachricht kann dennoch mit recht hoher Wahrscheinlichkeit richtig dekodiert werden, da [0100] näher an [0000] liegt als an [1111]. Wie „nah“ zwei Wörter aneinander liegen, wird durch die Hamming-Distanz  $d_h$  beschrieben. Dieser Wert gibt an, um wie viele Stellen sich zwei Codewörter oder ein Codewort und ein Empfangswort unterscheiden. In dem genannten Beispiel ist  $d_h = 1$ . Die niedrigste Hamming-Distanz zwischen den

$2^k$  möglichen Codewörtern ist die sogenannte Minimaldistanz  $d_{\min}$ , welche hier 4 beträgt. Das in diesem Fall angewandte Decodierverfahren ist die Maximum-Likelihood-Decodierung, die bei einem Fehler das Codewort mit der geringsten Hamming-Distanz zu dem empfangenen Codewort auswählt [25].

Ein anderes weitverbreitetes Verfahren in der Datenübertragung und Speicherung ist die Blockcodierung mittels Hinzufügens von Prüfbits. Im Beispiel des Single-Parity-Check-Codes wird dem Infowort durch die modulo-2 Addition ( $\oplus$ ) ein Bit angehängen, das die Parität des Infoworts gerade setzt. Für einen Blockcode mit  $K = 2$  ergibt sich das Prüfbit im Codewort aus der modulo-2 Addition der Infobits. Die Tabelle der Infowörter und Codewörter ist folglich:

Infowort	Codewort
00	000
01	011
10	101
11	110

*Tabelle 1: Infowort und Codewort mit Prüfbit*

Falls ein Bitfehler vorkommt und das Codewort [011] als [001] empfangen wird, erkennt der Dekodierer an der ungeraden Parität die Ungültigkeit des Codeworts. Der Nachteil gegenüber dem Wiederholungscode ist, dass der Fehler nur erkannt und nicht korrigiert werden kann. Aufwändigere Blockcodes, die mehr Prüfbits hinzufügen, können die Übertragungsfehler auch korrigieren [25].

### 2.4.2.3. Leitungscodierung

Die Anpassung der Daten an den physikalischen Kanal geschieht mittels der Leitungscodierung, die in LiFi Anwendungen das Signalspektrum formt und je nach ausgewähltem Code die Taktrückgewinnung ermöglicht. Sie bestimmt, wie die Daten auf das Übertragungssignal abgebildet werden. Für die binäre Datenübertragung werden am häufigsten der Non-Return-to-Zero (NRZ), Return-to-Zero (RZ) und der Manchester-Code verwendet. Zusätzlich wird für NRZ und RZ zwischen unipolarer und bipolarer Codierung unterschieden. Bei der NRZ-Codierung springt der Signalpegel nicht innerhalb der Symboldauer auf 0 zurück, wie in Abbildung 15 zu erkennen ist. Der zum OOK identische unipolare NRZ-Code verwendet die Symbole  $\{0, 1\}$  und besitzt einen Gleichstromanteil. Im bipolaren Fall wird auf die Symbole  $\{1, -1\}$  abgebildet.

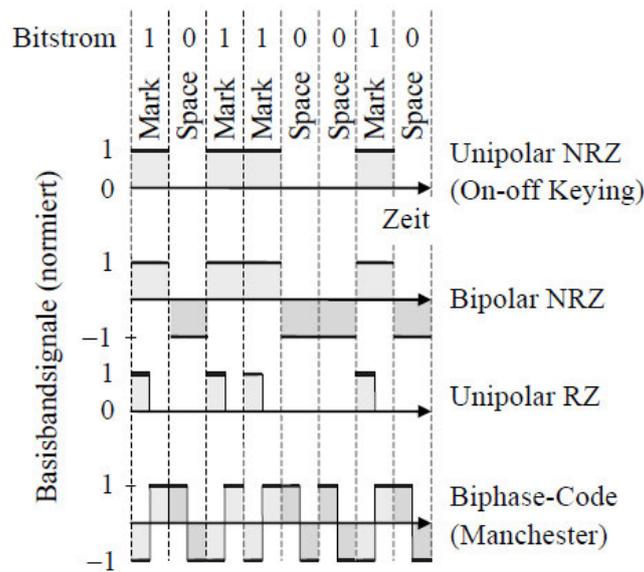


Abbildung 15: Die Signaldiagramme von 4 Leitungscodes [35]

RZ-Codierung lässt den Signalpegel innerhalb des Taktes auf den Wert 0 zurückspringen und besitzt eine doppelt so große Bandbreite wie NRZ, da die Impulse in der zeitlichen Länge halbiert werden. Der Vorteil ist, dass der Empfänger mittels der doppelten Anzahl an Signalfanken den Takt besser aus der Übertragung auslesen kann [35].

Die Manchester-Codierung hat innerhalb jeder Taktperiode einen Signalpegel-Wechsel und ist dadurch gleichstromfrei. Eine steigende Signalfanke repräsentiert eine 1 und eine fallende eine 0. Die Codiervorschrift lautet demnach  $0 = 01$  und  $1 = 10$ . Die Manchester-Codierung ist besonders für optische Anwendungen günstig, da lange Folgen von Einsen und Nullen nicht vorkommen und folglich das Flickern verhindert wird [11].

### 2.4.2.3. Rauschen

Ein möglichst hohes Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnis  $E_s/N_0$  ist in allen nachrichtentechnischen Anwendungen erstrebenswert und bewährt sich als Indikator für die Qualität der Nachrichtenübertragung und die technischen Bemühungen [35]. In der Digitaltechnik steht ein niedrigerer Wert direkt im Zusammenhang mit einer höheren Bitfehlerwahrscheinlichkeit  $P_b$ , weswegen diese oft im selben Kontext erwähnt werden. Das im Kanalmodell als  $w(t)$  bezeichnete zufällig verteilte Rauschen kann für LiFi Applikationen drei Ursachen haben, die im Anschluss behandelt werden: Schrotrauschen, Thermalrauschen und der Dunkelstrom.

### Schrotrauschen

Im Fotodetektor werden sowohl durch das einfallende Umgebungslicht als auch durch

das Kommunikationslicht zufällig freie Ladungsträger erzeugt, die eine Rauschspannung zur Folge haben. Das Schrotrauschen wächst proportional mit der empfangenen optischen Leistung  $P_{r,opt}$ .

### **Thermalrauschen**

Die von der Temperatur des Fotodetektors und des Transimpedanzverstärkers abhängigen Bewegungen der Teilchen im Stromkreis (brownsche Bewegung) induzieren einen Strom in diesem.

### **Dunkelstrom**

Der Dunkelstrom existiert unabhängig vom einfallenden Licht auf der photonenaufnehmenden Fläche und fließt in Sperrrichtung am Fotodetektor.

Diese drei Rauschquellen können statistisch betrachtet und addiert werden und erzeugen ein weißes Rauschen, das ein charakteristisch gleichmäßiges Leistungsdichtespektrum über den gesamten Frequenzbereich hat und gaußverteilt ist. Ein Kanal mit diesen Eigenschaften wird auch als additive white Gaussian noise (AWGN) Kanal bezeichnet.

Für ein VLC System ist der SNR definiert als das Verhältnis von der elektrischen Signalleistung am Empfänger zur elektrischen Rauschleistung [1].

$$SNR = \frac{P_{R,el}}{N_{R,el}}$$

Wenn das Rauschen mit dem Nutzsignal so stark interferiert, dass am Empfänger die Entscheidungsschwelle zwischen den Sendesymbolen überschritten wird, dann tritt ein Bitfehler auf. Die Bitfehlerwahrscheinlichkeit für eine bipolare Übertragung im AWGN-Kanal kann anhand der komplementären Fehlerfunktion  $erfc$  und dem SNR berechnet werden:

$$P_b = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_s}{N_0}}$$

Ein Praxiswert für die Bitfehlerwahrscheinlichkeit in der Größenordnung von  $10^{-6}$  und lässt sich mit der Kanalcodierung auf  $10^{-9}$  oder weniger senken [35] [3].

### 3. Kommunikationsszenarien/Use-Cases

Als Grundszenario für das vorgestellte Outdoor-LiFi System gilt die Datenübertragung von einer Außenbereichsleuchte zur nächsten. Die möglichen Umgebungen in denen dies geschehen kann, sind künstlich beleuchtete Areale, die durch den Menschen begangen oder befahren werden können, wie z.B. Parks, Straßenzüge oder Parkplätze. Wenn eine Person oder ein Fahrzeug sich in das leere Areal begibt, wird dies durch Bewegungsmelder erkannt und die Information zum Hochdimmen der gesamten Beleuchtungsanlage über das Licht weitergegeben. Umgekehrt kann nach dem Fehlen von Bewegungsinformation oder einer gewissen Wartezeit der Befehl zum Runterdimmen übermittelt werden und die Helligkeit wird reduziert.

#### 3.1 Inhaltliche Anforderungen an das Outdoor-LiFi System

Das zu realisierende Konzept für die LiFi-Kommunikation zwischen Außenbereichsleuchten hat folgende Ziele und Anforderungen:

- **Dimmbar:** Der Datenlink soll nicht bei verschiedenen Dimmstufen zusammenbrechen.
- **Existierende Infrastruktur ausnutzen:** Die LiFi Hardware kann mit geringem Aufwand in das Beleuchtungssystem integriert werden.
- **Kosteneffizient:** Bei einer großflächigen Ausstattung summieren sich die Kosten schnell. Die Komponenten sollten deshalb in einer vertretbaren Preisspanne liegen.
- **Vorhandenes Licht nicht stark verändern:** Die Beleuchtungsanlage soll in ihren Kerncharakteristika (Lichtstärkeverteilungskurve (LVK), Lichtfarbe, Lichtstrom etc.) nicht so sehr durch die Aufrüstung verändert werden, dass diese ihren ursprünglichen Zweck nicht mehr erfüllen kann.
- **Flimmerfrei:** Das Ein- und Ausschalten der Lichtquelle soll für den Menschen erkennbar nicht sein.
- **Bei fremder Lichteinstrahlung funktionieren:** Andere Kunstlichtquellen oder natürliche Lichtquellen sollen einen sehr geringen oder keinen Einfluss auf die Übertragung haben.

## 3.2 Konzepte

Für die Datenübertragung zwischen den Außenbereichsleuchten gibt es im Wesentlichen vier Kommunikationsszenarien:

1. Bodenreflexion
2. Horizontal emittierende Linsen
3. Oval aufweitende Linsen
4. Umgebungsleuchten

Die Vor-/Nachteile dieser Konzepte werden im Folgenden erläutert und die Anwendungsfälle diskutiert.

### 3.2.1 Bodenreflexion

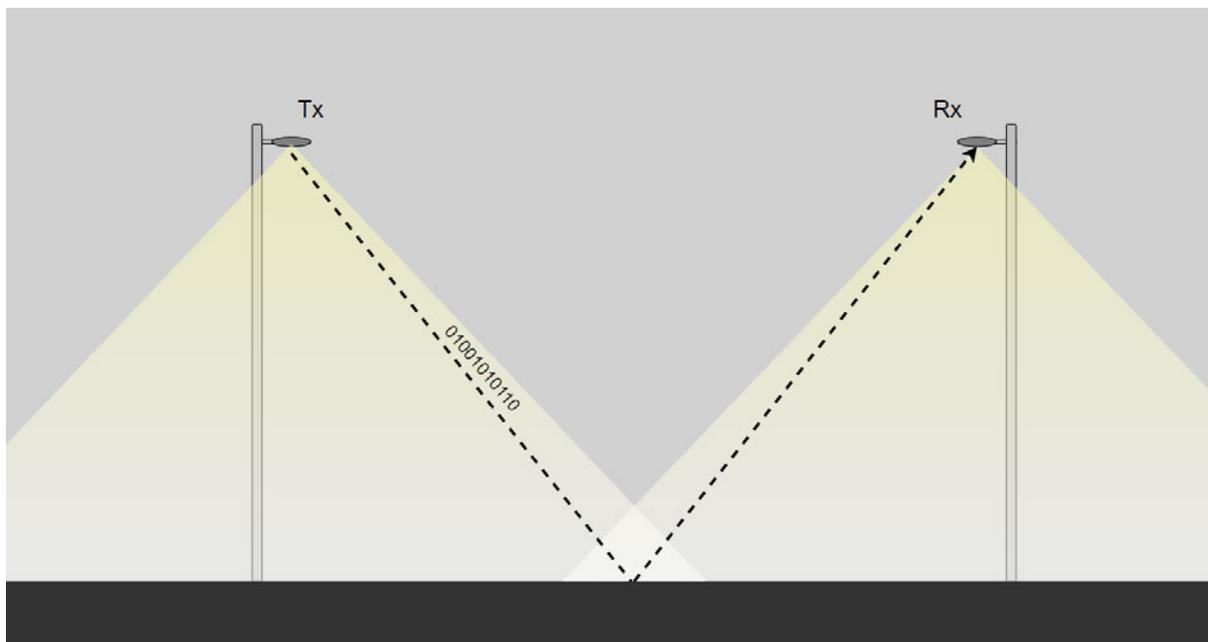


Abbildung 16: Kommunikation zwischen zwei Außenbereichsleuchten über Bodenreflexion

Die Außenbereichsleuchten sind in einer üblichen Konfiguration ausgerichtet und strahlen ihr Licht kegelförmig nach unten in Richtung des Bodens. Ein Teil des Lichtes wird auf der Bodenfläche reflektiert und erreicht den Empfänger, der am Kopf der Straßenbeleuchtung angebracht ist. Ein beispielhafter Aufbau des Systems ist in Abbildung 16 dargestellt.

#### Vorteile

Der Vorteil dieses Konzepts ist, dass die Abstrahlcharakteristik nicht grundsätzlich durch zusätzliche lichtlenkende Elemente im optischen Pfad, wie z.B. LED-Linsen,

verändert werden muss. Aus beleuchtungstechnischer Sicht arbeiten die Lampen effizient, da sie den Lichtstrom nur zur Ausleuchtung der begeh- und befahrbaren Areale verwenden und Streuverluste auf benachbarte Wege, Gebäudewände und Ähnliches vermieden werden. Außerdem ist der Installations- und Materialaufwand bei einer Ausrüstung der bestehenden Technik gering, vorausgesetzt der Boden weist bereits gute Reflektionseigenschaften auf. Abgesehen von der Fotodetektorschaltung, die bei allen Konzepten vorhanden ist, muss nur der Treiber für die Modulation und Demodulation vor das Leuchtmittel geschaltet werden.

Gegenüber den Szenarien, die eine LOS Verbindung benötigen, hat dieses System die Fähigkeit, Lichtblockaden, wie z.B. Bäume auf Höhe der Leuchte, zu umgehen. Hamburg hat mit ca. 224.000 die höchste Anzahl an Straßenbäumen pro 1000 Einwohner [36]. Erfahrungsgemäß wachsen die Baumkronen in vielen Straßenzügen und an Fußgängerwegen zwischen den Straßenleuchten und blockieren in der Blütezeit das Licht.

### **Nachteile**

Ein großer Nachteil ist der Verlust an optischer Leistung durch die Absorption der Bodenfläche. Der Reflexionsgrad von Standard-Betonstraßenbelag liegt nur bei 18% [37]. Zum Vergleich: helle Fassaden können bis zu 85 % des Lichtstroms reflektieren [17]. Der bedeutend dunklere Asphalt macht in Deutschland einen Großteil der Straßen und Parkebenen aus und hat einen noch geringeren Reflexionsgrad als Beton, was in Abbildung 17 dargestellt ist. Die Grafik stellt die Reflexionswerte der beiden Materialien in Abhängigkeit von der Wellenlänge im sichtbaren Bereich dar. Klar erkennbar sind für Beton und Asphalt die Maxima in den grün-gelblichen Wellenlängen mit abfallenden Werten zu beiden Enden des Spektrums hin. Der Peak liegt hier für Asphalt bei einem Wert von 8% und erklärt, warum asphaltierte Parkflächen einen 57% höheren Stromverbrauch haben als betonierte. Für das gleiche Beleuchtungsniveau ist bei der größeren Bodenabsorption von Asphalt zwangsläufig eine stärkere Lichtleistung notwendig [37].

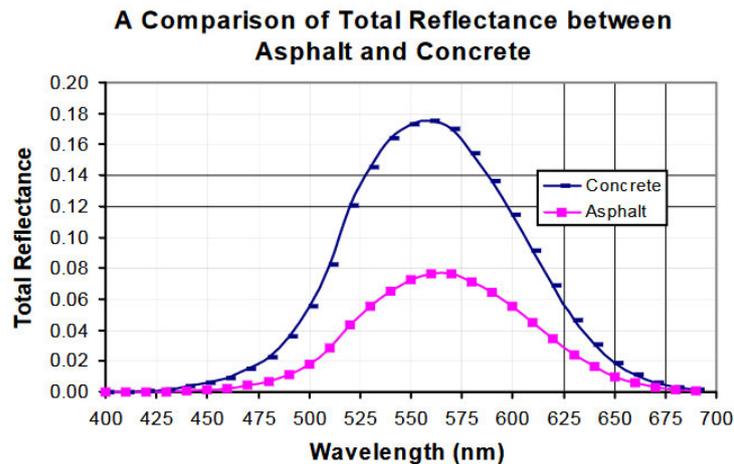


Abbildung 17: Vergleich der Wellenlängenabhängigen Reflexion von Beton und Asphalt [37]

Mittels einer baulichen Veränderung oder einem anderen Oberflächenmaterial kann die Menge an Licht, die am Empfänger ankommt, gesteigert werden. Wenn die Lichtcharakteristik der Oberfläche verbessert werden soll, hat man die Wahl zwischen gerichtet reflektierenden oder diffus reflektierenden Materialien. Eine gerichtet reflektierende Ebene funktioniert nur, wenn eine „Sichtverbindung“ zwischen Tx und Rx über die Reflektion 1. Grades an der Spiegelebene vorhanden ist. In der Praxis wäre dies innerhalb des Halbstreuwinkels und in der Mitte zwischen den Leuchten (Auftrittsort der gestrichelten Linie in Abbildung 16). Angenommen die Trägersysteme sind 8 m hoch und die Laterne besitzt einen Halbstreuwinkel von 120°. Dann wäre die maximal erlaubte Entfernung zwischen den Masten:

$$\tan(60^\circ) \cdot 8m \cdot 2 = 27,7m$$

Die Abstände zwischen den Lampen sind jedoch variabel und können weit über diesem Wert liegen, wie die Vermessung der Straßenleuchten in [38] zeigt. Dort liegt die Entfernung der 6,3 m hohen Laternen mit 57,2 m weit über den 27,7 m. Ein System mit einer diffus reflektierenden Fläche ist nicht durch diese Maximalentfernung eingeschränkt, leidet aber auch unter dem Signalverlust eines größeren Sendewegs.

Ein weiteres Problem ist die Verschmutzung und Abnutzung der Oberfläche. Staub, Ölsuren, Laub, Reifenabrieb und Feuchtigkeit/Nässe verringern die Reflektivität des Materials. Besonders ein spiegelnder Boden muss sehr robust und langlebig gebaut sein, damit der alltägliche Gebrauch kein Abschleifen der reflektierenden Schicht verursacht. Parkende Fahrzeuge, Mülltonnen, Fahrräder, Menschen etc. bilden einen

unvorhersehbaren Aspekt in der Kommunikation, der zumindest temporär den Signalweg blockieren kann.

Reflektierende Bodenflächen können im Straßenverkehr unter Umständen jedoch die Sicherheit gefährden. Ein/e Verkehrsteilnehmer/in könnte durch die helle LED kurzzeitig während der Fahrt durch z.B. das Seitenfenster aus dem unteren Sichtfeld geblendet sein.

### Anwendungsgebiete

Als Anwendungsgebiete für dieses Konzept erschließen sich durch die genannten Vor- und Nachteile hauptsächlich Gehwege oder Parkanlagen, in denen die Lampen so nah beieinanderstehen, dass sich die vom Halbstreuwinkel beleuchteten Flächen überlappen.

### 3.2.2 Horizontal emittierende Linsen

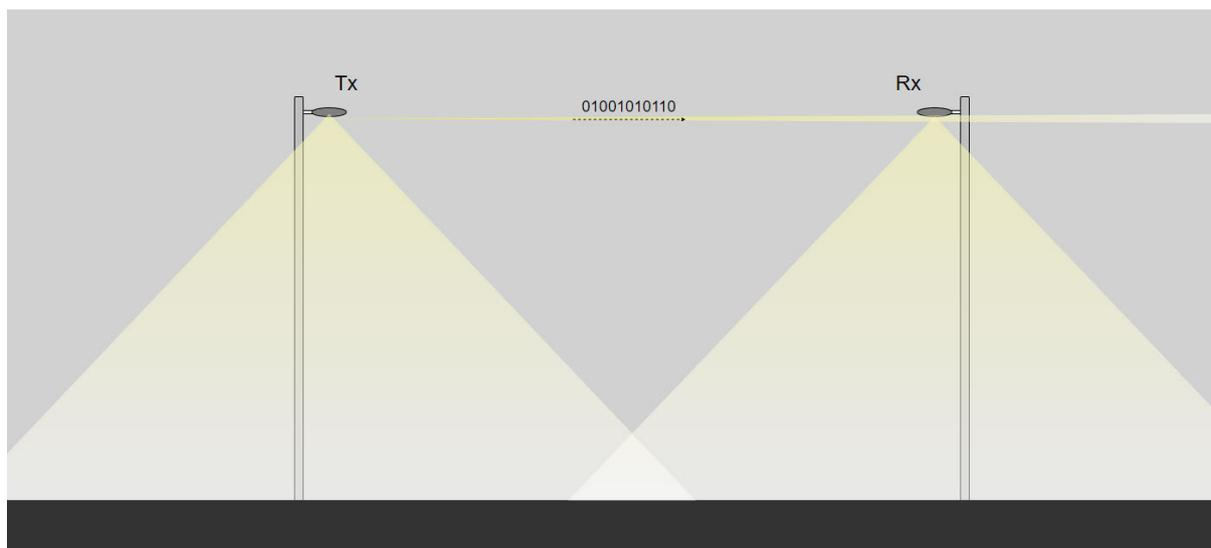


Abbildung 18: horizontale Lichtausbreitung durch Linsen

Eine andere Möglichkeit den Empfänger zu erreichen, ist das Aufsetzen von LED-Linsen/Miniaturrefraktoren, um das Licht in die horizontale Richtung zu formen. Eine Darstellung dieses Konzepts ist in Abbildung 18 zu sehen. Die Modulplatine im Gehäuse ist dabei nicht vollständig mit den Linsen besetzt, weil sonst ein wesentlicher Teil des Lichtes in Abstrahlrichtung  $0^\circ$  verloren geht und die Beleuchtungsfunktion nicht mehr ausreichend vollführt wird. Das Refraktormaterial bricht das Licht durch Totalreflexion und könnte aus Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC), Silikon oder Glas bestehen. Die Linsen sind einzeln oder in Modulen erhältlich, die sich auf mehrfach besetzte LED-Platinen einfach aufkleben lassen [39]. Ein Linsentyp, der diese

Anforderungen erfüllt, ist z.B. der Seitenemitter *VERONICA-SQ-SE* von der Firma LE-DiL mit einem Abstrahlwinkel von 190° [40]. Als alternative Möglichkeit um den Lichtanteil horizontal zu lenken, könnten Reflektorelemente an einer äußeren Reihe der LEDs angebracht werden.



Abbildung 19: Die Seitenemitterlinse *VERONICA-SQ-SE* [40]

### Vorteile

Auch dieses Konzept versucht, ungewollte Beleuchtung von Flächen außerhalb des Zielareals zu vermeiden, da nur ein kleiner Teil des Lichts auf horizontaler Ebene umgeleitet wird. Im Vergleich zur Bodenreflexion ist der entfernungsabhängige Lichtverlust geringer, da dieses Konzept eine LOS Verbindung, und somit einen kürzeren Weg, aufbaut. Außerdem gibt es keine Absorptionsverluste an Oberflächen. Für eine Leuchtenhöhe von 8 m und einen Abstand von 20 m ist die zurückzulegende Strecke im Konzept der Bodenreflexion:

$$r = 2 \cdot \sqrt{(8 \text{ m})^2 + \left(\frac{20 \text{ m}}{2}\right)^2} = 25,61 \text{ m}$$

Laut dem photometrischen Entfernungsgesetz nimmt die Beleuchtungsstärke mit dem Kehrwert der Distanz zum Quadrat ab. Wird also das Verhältnis der Verluste über 20 m und 25,6 m berechnet,

$$\frac{(25,61 \text{ m})^2}{(20 \text{ m})^2} = \frac{656 \text{ m}^2}{400 \text{ m}^2} = 1,64$$

so ist klar, dass den Empfänger bei diesem Konzept allein aufgrund der kürzeren Distanz 64 % mehr Licht (Absorptionsverluste außer Betracht gelassen) erreicht als bei der Reflexion.

## Nachteile

Optische Linsen arbeiten nicht zu 100 % effizient, deshalb entstehen während der Ausbreitung im Material unausweichliche Transmissionsverluste. Für den genannten Seitenemitter liegen diese laut Datenblatt zwischen 4 und 25 %. Die Variation dieses Wertes ergibt sich durch die Messung der Linse in Kombination mit verschiedenen LEDs. Für die rote LED *LUXEON Rebel* vom Hersteller *LUMILEDS* zeigt sich der maximale Verlust und für die weiße LED *NCSxE17A* vom Hersteller *Nichia* zeigt sich der minimale Verlust. Betrachtet man nur die weiß leuchtenden LEDs, so liegt die optische Effizienz hier zwischen 84% und 96%. Nichtsdestotrotz sind diese Transmissionsverluste wesentlich geringer als die Absorptionsverluste der Bodenreflexion.

## Anwendungsgebiete

Die Settings für dieses System sind vielfältiger als bei dem ersten Konzept und könnten Fußwege, Straßenzüge und Parkplätze sein.

### 3.2.3 Oval aufweitende Linsen

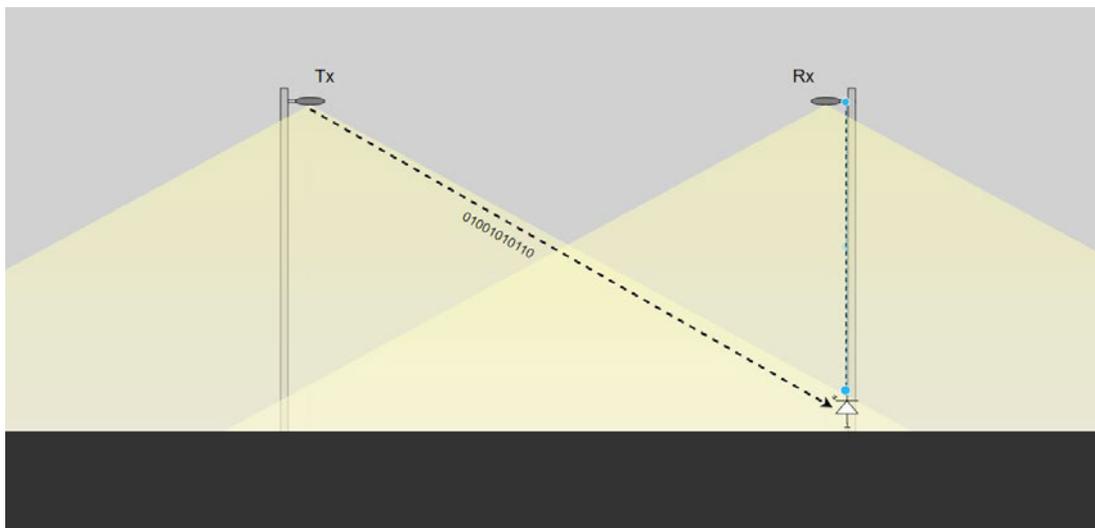


Abbildung 20: Ovale Aufweitung des Lichtkegels zum Fuß der Empfängerlaterne

Die zweite Option Linsen zu benutzen, ist die Aufweitung des Lichtkegels zum Ansatz der zweiten Beleuchtungsanlage. Die Voraussetzung für die Funktionalität ist die Installation des Fotodetektors so weit unten am Mast, dass das Licht diesen erreicht. Zur Strahlformung eignet sich z.B. das aus PMMA bestehende Model *HB-2X2-O* von *LEDiL*. Diese weiten das Licht in der C90 – C270 Ebene auf einen Halbstreuwinkel von ca. 115° auf. In der C0 - C180 Ebene wird das Licht auf ca. 20° fokussiert. Solche Linsen werden häufig zur Gangbeleuchtung in Supermärkten oder Lagerhäusern

benutzt, eignen sich aber auch für Outdoor-Anwendungen [41]. Abbildung 21 zeigt, wie diese Beleuchtung von oben betrachtet aussehen würde.



Abbildung 21: Die Lichtverteilung der HB-2X2-O Linse von oben dargestellt [41]

### **Vorteile**

Ähnlich wie bei dem vorherigen Konzept in Abschnitt 3.2.2 sind durch LOS-Ausbreitung keine Absorptionsverluste an Oberflächenmaterialien vorhanden.

### **Nachteile**

Ein Fotodetektor, der in einigen Metern Entfernung von dem Rest der Empfangsarchitektur im Lampengehäuse angebracht ist, benötigt einen höheren Installationsaufwand. In Abbildung 20 ist zu sehen, dass eine stromführende Leitung von der Fotodetektorschaltung vom Mastansatz zum Laternenkopf gezogen werden muss. Um die Komponenten vor Wasser und Staub zu schützen, sollte das Gehäuse mindestens die Schutzklasse IP65 haben und für einen erweiterten Temperaturbereich ausgelegt sein. Zusätzlich gilt zu überprüfen, ob die Übertragungsverluste im Kabel bei dieser Länge eine signifikante Auswirkung auf das System haben. Generell gilt, dass die Dämpfung mit steigender Frequenz und Kabellänge steigt. Ein Minikoaxialkabel mit einem Durchmesser von 4,4 mm hat bei einer Frequenz von 1 MHz einen Dämpfungsfaktor von 5,31 dB/km [42]. Für eine Strecke  $< 10$  m sind die Kabelverluste also verschwindend gering. Trotzdem sollte der Einfluss des Kabels berücksichtigt werden, falls ein hochfrequenter Träger zur Übertragung verwendet wird.

Des Weiteren entstehen am Anfang und am Ende einer Reihe von Leuchten, die alle mit dieser Linse bestückt sind, zwangsläufig Areale mit der halben

Beleuchtungsstärke. Gleichmäßigkeit ist in der Außenbeleuchtung und insbesondere in der Straßenbeleuchtung ein wichtiges Bewertungskriterium. Es wird empfohlen, dass die minimale Leuchtdichte in der gesamten Fläche nicht geringer als 35 % der mittleren Leuchtdichte ist [39]. In der Straßenbeleuchtung wird auch von Tarnzonen gesprochen „in denen ein ungenügender Kontrast von Hindernissen zur Umgebung auftreten kann“ [39, p.508].

Ähnlich wie bei der Übertragung über Bodenreflexion, sind auch hier Unterbrechungen in der Lichtausbreitung durch Objekte oder Menschen wahrscheinlicher als bei dem Konzept der horizontalen Lichtemission.

Während bei den anderen Konzepten prinzipiell die Datenübertragung von einer Leuchte zu mehreren umliegenden Empfängern möglich wäre, ist dies in diesem Fall nicht realisierbar, da wie erwähnt, nur auf einer Achse das Licht aufgeweitet wird.

### Anwendungsfälle

Ovale aufgeweitete Außenbeleuchtung kann potenziell in der Straßenbeleuchtung und Fußgängerwegbeleuchtung eingesetzt werden. Insbesondere wegen des zuletzt genannten Nachteils eignet sich dieses System nicht für Parkplätze, wo ein großflächig gleichmäßiges Beleuchtungsniveau gewünscht ist.

### 3.2.4 Rundumleuchten

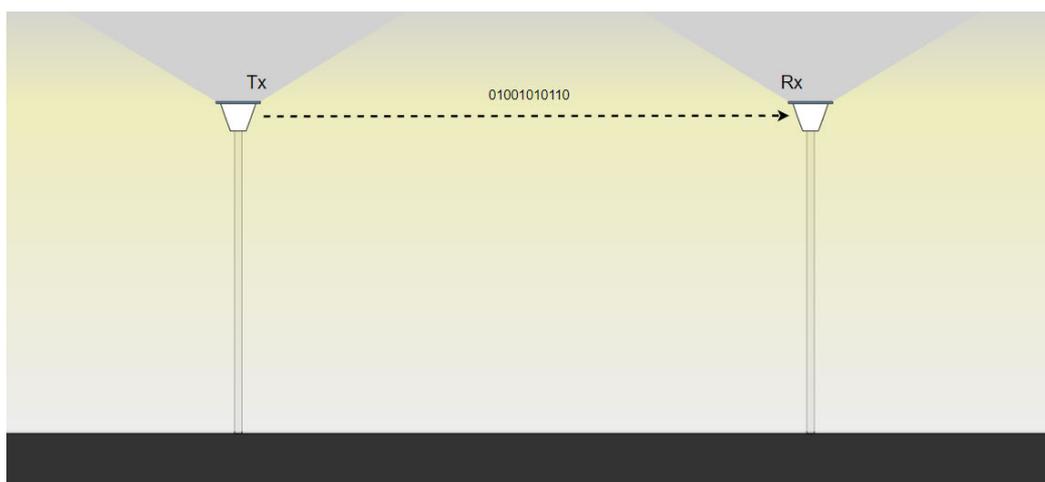


Abbildung 19: Rundumbeleuchtung mit Mastaufsatzleuchten

Als letztes Konzept wird die Kommunikation über Rundumbeleuchtung mit einem LOS-Pfad vorgestellt. Bei dieser Art der Außenbeleuchtung kommt es oft auf einen dekorativen Aspekt an, der in Parks und Grünanlagen zum Einsatz kommt. Sie zeichnen sich

durch eine sehr breite Lichtstärkeverteilung aus und setzen gewünschte Lichtakzente auf Architektur und Flora, um die Besucher emotional anzusprechen.

### **Vorteile**

In diesem System ist keine zusätzliche Installation (LED-Linsen, reflektierende Bodenfläche) im optischen Ausbreitungspfad notwendig. Außerdem ist auch hier keine Absorption in der Sichtverbindung durch Materialien vorhanden.

### **Nachteile**

Der Wirkungsgrad von Außenbereichsleuchten ohne funktionale Lichtverteilung und Reflektortechnik ist nicht gut. Durch die Streuverluste geht viel Licht nach oben verloren und erhellt als „Lichtverschmutzung“ den Himmel. Das Bundes-Immisionsschutzgesetz bewertet solche Lichtemissionen als mögliche Belästigungen für Mensch und Natur. Licht, das nachts in das Schlafzimmer leuchtet, stört den Menschen in der Ruhephase. Ein nachhaltiges und ökologisches Beleuchtungskonzept in Sichtweite von Grünanlagen sollte also möglichst nach unten gerichtete Lampen einsetzen [17]. In Zukunft kann also davon ausgegangen werden, dass dieser Lampentyp mehr und mehr verschwinden wird und eine Realisierung in Verbindung mit LiFi unwahrscheinlich ist.

### **Anwendungsfälle**

Das Rundumlicht-Konzept eignet sich für Fußgängerwege oder Straßen mit geringem Verkehrsaufkommen.

## 4. Technisches Konzept des Prototyps

In diesem Kapitel wird das prototypische Modell des Outdoor-LiFi Systems vorgestellt und in seiner nachrichtentechnischen Eignung erläutert. Es wurde sich für das Konzept der horizontal licht emittierenden Linsen aus Abschnitt 3.2.2. entschieden, insbesondere da der Streulichtanteil in ungewünschte Richtungen in einer Praxisanwendung auf ein Minimum begrenzt wird und mit einer LOS-Verbindung geometrisch betrachtet die geringsten Pfadverluste vorhanden sind. Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Prototyp gilt vor allem als Proof-of-Concept der LiFi Übertragung über diesen Weg und gleicht keinem ausgereiften System. Auf Peripheriegeräte, wie z.B. Bewegungsmelder, wurde aus zeitlichen Gründen verzichtet. Das Hinzufügen dieser sollte jedoch dank der Flexibilität des Mikrocontrollers keine große Hürde in der Entwicklung darstellen.

### 4.1 Technische Anforderungen

- **Dimmung:** Die Dimmung einer LED geschieht für gewöhnlich über die in Kapitel 2.4.1.3 erwähnte PWM. Der Datenstrom von der Lichtquelle zum Fotodetektor darf durch die eingefügten Pausen verschiedener Länge nicht „zerstückelt“ und unkenntlich gemacht werden. Eine alternative Dimm-Option ist die Regulierung des Stroms oder das Zuschalten mehrerer LEDs. In dem in [26] vorgeschlagenen Standard wird außerdem gezeigt, wie über das Hinzufügen von Kompensationsintervallen gedimmt werden kann.
- **Gleichlichtunterdrückung:** Das Sonnenlicht mit der Frequenz 0 Hz würde den Fotodetektor sättigen und Rauschen verursachen [3]. Eine schaltungstechnisch realisierte Unterdrückung dieses Gleichlichtanteils ist notwendig für die Kommunikation.
- **Latenz:** Die Dauer zwischen dem Senden des Befehls zum Dimmen der Rx Leuchte und dem Erreichen des gedimmten Zustands sollte maximal einige Sekunden betragen. Falls ein Verkehrsteilnehmer vor dem Erreichen des hochgedimmten Zustandes schon wieder das Areal verlassen hat, wird der Zweck nicht erfüllt.
- **Datenrate:** In diesem Anwendungsfall müssen keine großen Datenpakete, wie z.B. Bilder, Videos oder Audiodateien, über das Licht übertragen werden. In dem einfachen Fall, dass nur zwei Befehle zum Hoch- und Runterdimmen gesendet werden müssen, reicht eine kurze binäre Datenfolge, die am Sender und

Empfänger bekannt ist, aus. Für einen angenommenen Datendurchsatz von 57.600 bit/s ergibt sich bei der Übertragung eines simplen ASCII Zeichens mit 8 bit eine Zeit von  $\sim 139 \mu\text{s}$ . Dies dient als grober Orientierungswert zeigt, dass die technische Umsetzung auch mit niedrigen Datenraten realistisch ist.

## 4.2 Hardware

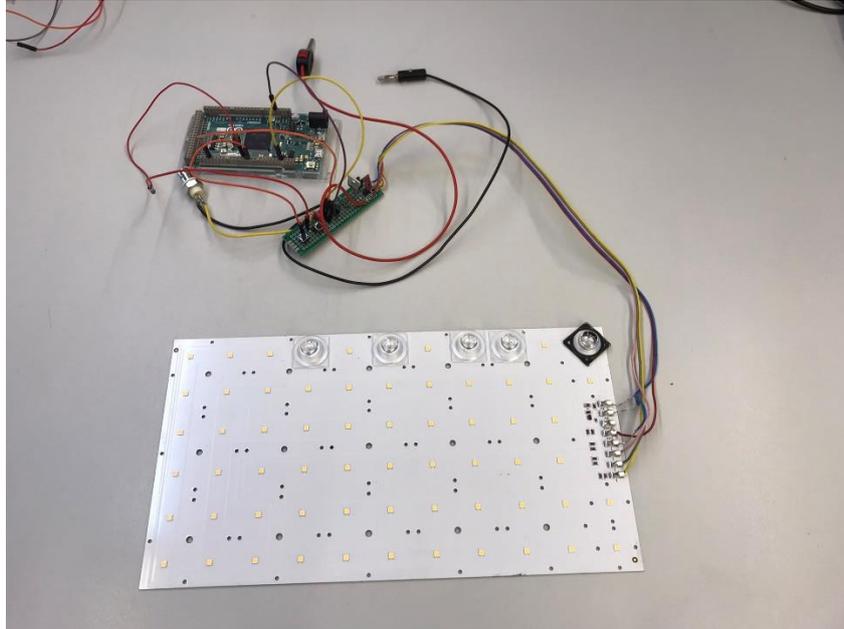


Abbildung 22: Die Senderseite

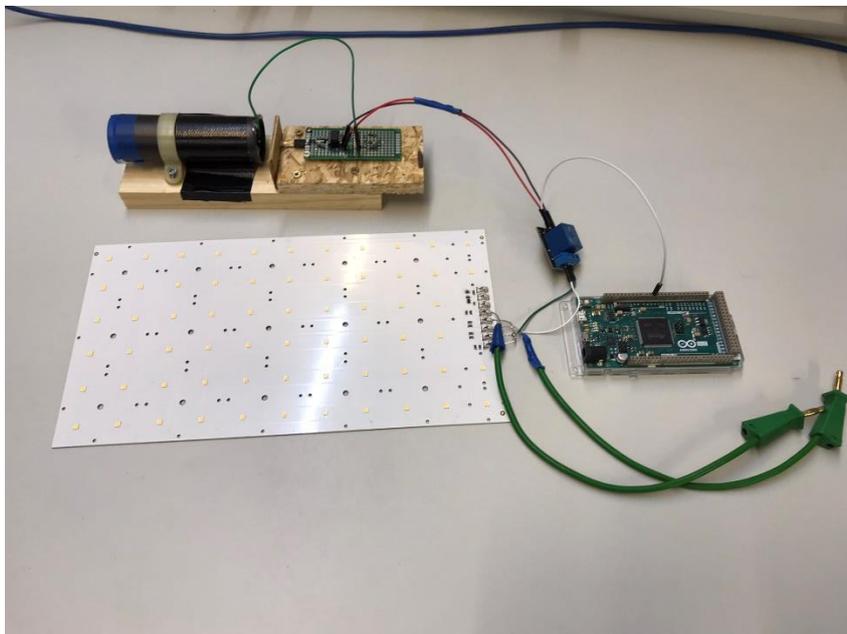


Abbildung 23: Die Empfängerseite

## 4.2.1 Schaltplan

Das Gesamtsystem lässt sich in eine Senderseitige Schaltung mit der LED- Platine und Mikrocontroller, sowie einer Empfängerschaltung mit dazugehörigem Microcontroller unterteilen. Für die +5V Spannungsversorgung der Halbleiterbauelemente und ICs wird der jeweilige Ausgang des *Arduinos* verwendet.

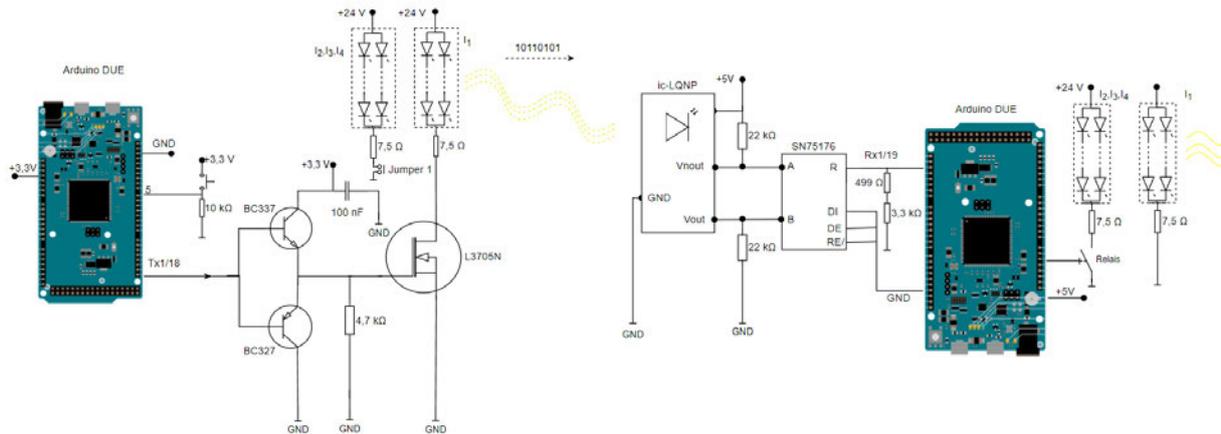


Abbildung 24: Der Gesamtschaltplan

## 4.2.2 Mikrocontroller-Board

Für die Signalverarbeitung ist ein Computer notwendig, der mit der Modulation und Demodulation im Basisband sicher umgehen kann. Diese sogenannten software-defined radios (SDR) übernehmen die Aufgabe eines Modems auf der Software-Ebene und können in der RF und optischen Signalübertragung verwendet werden. An den Eingängen wird mit einem analog-to-digital converter (ADC) die Spannung digitalisiert, während umgekehrt an den Ausgängen mit einem digital-to-analog converter (DAC) die digitalen Daten als Spannung ausgegeben werden. Mögliche Plattformen, die diese Aufgabe erfüllen, sind:

*„a general purpose processor (GPP), a digital signal processor (DSP), a microcontroller ( $\mu$ C), a graphics processor unit (GPU), a field-programmable gate array (FPGA), or a special processor architecture (like a programmable system on chip (SoC))” [3, p.172].*

Der prototypische Aufbau dieser Arbeit verwendet den *Arduino Due* Mikrocontroller zum Modulieren der LED-Platine und dem Demodulieren der Spannung an der

Fotodiode. Bevor im Anschluss alternative Plattformen erläutert werden, wird zunächst der *Due* vorgestellt und seine Wahl begründet.



Abbildung 25: Der Arduino Due Mikrocontroller [43]

Mit 84 MHz Taktgeschwindigkeit zählt der mit dem *Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 (32 bit)* bestückte *Due* zu den schnellsten *Arduino* Mikrocontrollern. Die technischen Daten sehen wie folgt aus:

Schnittstellen	54 I/O (12 mit PWM)
Analoge Eingänge	12
UART/USART (Serielle Schnittstellen)	4
Takt	84 MHz
Bit	32
Versorgungsspannung	7-12 V
Betriebsspannung	3,3 V
Flash	512 KB
SRAM	96 KB
Dimensionen	101 mm x 53 mm / 36 g

Die *Arduino* Plattform zeichnet sich durch Benutzerfreundlichkeit und eine große Online-Community aus, in der z.B. schon einige DIY LiFi Projekte umgesetzt und dokumentiert wurden. Der Hauptgrund, warum dieser Controller gewählt wurde, ist die Vorerfahrung, die aus anderen Projekten schon bestand. In der Produktpalette von *Arduino* gibt es eine große Bandbreite an verschiedenen Modellen, jedoch ist der *Due* der Einzige, der die in Abschnitt 2.4.2.2. erwähnte Manchester-Codierung herstellerseitig schon beherrscht. Dafür muss in dem Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter (USART) Register ein bestimmtes Bit gesetzt werden, was in Abschnitt 4.3 näher erläutert wird.

## Alternative Plattformen

Field Programmable Gate Arrays:

FPGAs zählen zu den Funktionsspeichern und werden schaltungstechnisch vom Anwender programmiert. Mit den zahlreichen Gattern und Flip-Flops lassen sich so logische Aufgaben durchführen. Durch die Flexibilität lassen sich sowohl einfache als auch sehr komplexe Schaltungen realisieren, weswegen sie sich auch für LiFi Anwendungen eignen. Die Verarbeitung der digitalen Daten wird im Vergleich zu DSPs parallel durchgeführt. Ein Vorteil, der FPGAs von integrierten Schaltkreisen (ICs) unterscheidet ist, dass sie im Verlauf der Entwicklung neukonfiguriert werden können [1].

System on Chip:

In einem SoC werden die verschiedenen Bausteine eines Computers auf einem Chip integriert. Ein Beispiel für solch einen Chip ist z.B. der in [44] verwendete *Zynq-7000*. In diesem Prototyp wird ein System nach dem IEEE 802.15.7 Standard aufgebaut und die Basisband-Verarbeitung mit dem genannten Chip durchgeführt. Auch der wesentlich bekanntere *Raspberry Pi* ist ein SoC und kann, anders als ein Mikrocontroller, ein Betriebssystem laufen lassen. Die Rechenleistung und Taktfrequenz sind höher als beim *Arduino*, jedoch gibt es keine analogen Ein- und Ausgänge.

### 4.2.3 LED-Platine und die Treiberschaltung

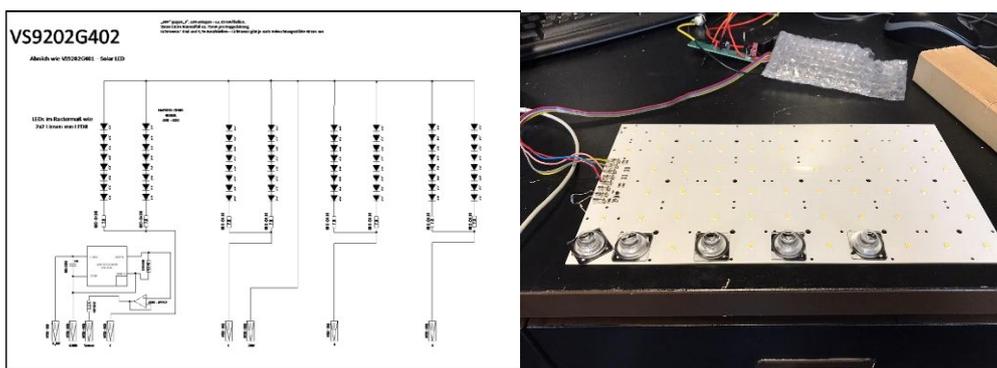


Abbildung 26: Die LED-Platine von Atlas EMS mit dem Einbauort der Seitenemitterlinsen

Die LED-Platine für die Beleuchtung wurde von der Firma *Atlas EMS* zur Verfügung gestellt. Diese besteht aus 64 *LM301B* LEDs, die in 4 parallelen Doppelsträngen mit jeweils 8 LEDs in Reihe verschaltet sind. Hinter jedem Einzelstrang sitzt ein  $7,5 \Omega$  Vorwiderstand zur Strombegrenzung. An der Platine sind insgesamt 8 Anschlüsse: 3,3 V; GND; SENSE; 24 V und 4 negative Anschlüsse (I). Die 3,3 V Versorgung ist für den

bereits eingebauten internen Foto-IC *LA0151CS*, der das Signal an SENSE ausgibt. An 24 V ist die Versorgungsspannung der LEDs anzuschließen, die an der Kathode jedes Doppelstrangs mit I verbunden sind. Der *LA0151CS* ist ein Umgebungslichtsensor, bestehend aus einer Fotodiode und anschließender Verstärkung mit einer oberen Grenzfrequenz von 1940 Hz. Dieser Wert konnte messtechnisch in [31] bestätigt werden und schließt eine LiFi Anwendung wegen der Tiefpasscharakteristik aus. Das Panel besitzt die Abmessungen 281 mm x 158 mm und die LEDs haben einen Abstand von 26 mm zueinander. Von dem Rand der Platinen bis zu den LEDs ist ein kleiner Abstand und die tatsächlich leuchtende Fläche beträgt 251 mm x 129 mm. In Abbildung 26 ist die Schaltung der Platine und ein Foto mit den Einbauorten der Seitenemitterlinsen zu sehen.

Die Kenndaten der *LM301B* LED sehen wie folgt aus:

Durchlassspannung $U_f$ bei 65 mA	2,6 V - 2,9 V
$R_a$ /CRI	80
Halbstreuwinkel	120 °
Lichtstrom	38 lm - 40 lm
Lichtausbeute	~ 220 lm/W

Mit einem angenommenen Lichtstrom von 39 lm pro LED ergibt das also insgesamt ca. 2500 lm für das gesamte Panel. In Abbildung 27 ist die im Rahmen dieser Arbeit gemessene U-I Kennlinie des Panels dargestellt. Der exponentielle Anstieg des Gesamtstroms ab ca. 21 V Versorgungsspannung ist klar erkennbar. Bei 24 V fließt ungefähr 1 Ampere, also verbraucht das Panel 24 W.

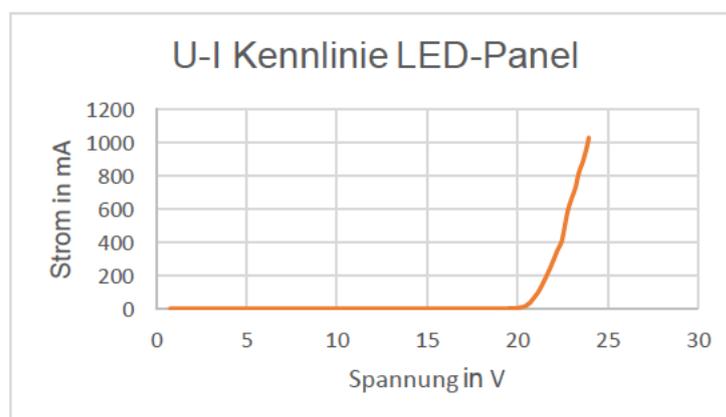


Abbildung 27: Die Spannung-Strom Kennlinie des LED-Panels

## Treiberschaltung

Als Teil des technischen Konzepts wurde eine Treiberschaltung entwickelt, damit der *Due* mit seiner Ausgangsspannung die wesentlich höhere Betriebsspannung der LEDs schalten kann. Das Panel wird dabei mit einem *L3705N* MOSFET hochfrequent an- und ausgeschaltet, um die seriellen Daten des *Arduinos* zu übertragen. Der Drain-Pin des MOSFETs ist an die positive Spannungsversorgung der LEDs und der Source-pin ist mit der Masse verbunden. Wenn das Steuersignal mit einer positiven Spannung am Gate-Pin ankommt, wird die Verbindung zwischen Drain und Source durchgeschaltet und der Strom fließt. Da es sich bei diesem Typen um einen Logikpegel-MOSFET handelt, kann die 3,3 V Ausgangsspannung des Mikrocontrollers diesen schalten. Auch dieses Bauteil wirkt wie ein Tiefpass und es sollte überprüft werden, ob dieser einen Einfluss auf den Übertragungskanal hat. Mit der aus dem Datenblatt entnommenen Anstiegszeit  $t_a = 140 \text{ ns}$  und der Näherung aus [45].

$$f_g \approx \frac{1}{3 \cdot t_a}$$

kann die 3-dB Grenzfrequenz des MOSFETs errechnet werden:

$$f_g \approx \frac{1}{3 \cdot 140 \text{ ns}} \approx 2,38 \text{ MHz}$$

Da die Gate-Source Kapazität durch ihre Aufladezeit die Bandbreite begrenzt, wurde eine Gegentaktverstärkung mit einem NPN (*bc337*) und PNP-Transistor (*bc327*) vor das Gate gesetzt, um genug Strom zur Aufladung der Kapazität zu liefern und damit die Schaltgeschwindigkeit zu erhöhen. Die folgenden Messungen illustrieren den Zusammenhang:

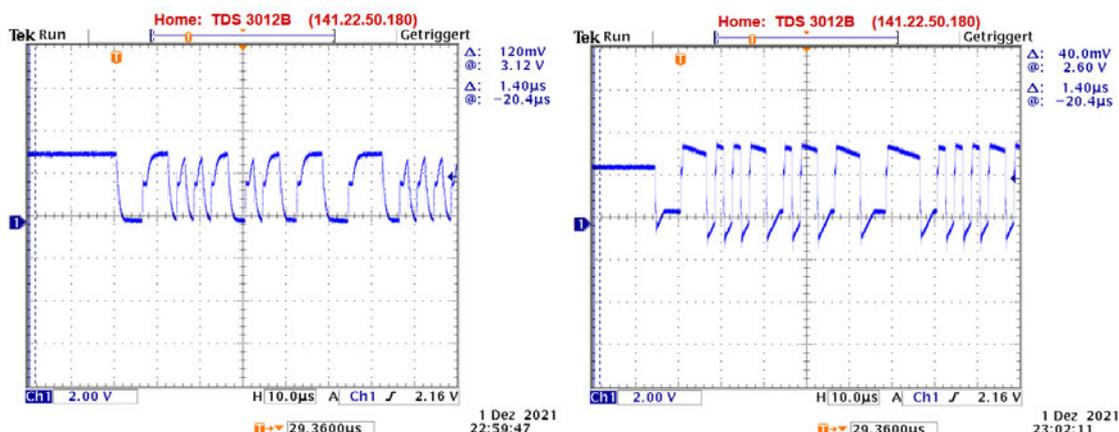


Abbildung 28: Das Serielle Signal am Gate des MOSFET ohne (l.) und mit Gegentaktverstärkung

Der *Due* sendet mit 250.000 Baud den String „Hallo Welt“ manchester-codiert an den Transistor und schaltet das Panel an und aus. Abbildung 28 zeigt das Signal am Gate des MOSFET mit (l.) und ohne Gegentaktverstärkung. Die Flanken der Impulse sind in dem rechten Bild wesentlich steiler und besonders die positive Impulsbreite ist besser erkennbar bei sich wiederholenden Nullen {01} oder Einsen {10}. Im Vergleich dazu ist das Signal in der linken Aufnahme kein Rechteck, sondern eher ein kurzer, spitzer Ausschlag, der sich nicht über die halbe Symboldauer erstreckt wie im rechten Bild. Die Gegentaktverstärkung sorgt also schon auf der Sendeseite für ein wesentlich saubereres Signal. In Abbildung 29 ist die Treiberschaltung des Panels dargestellt.

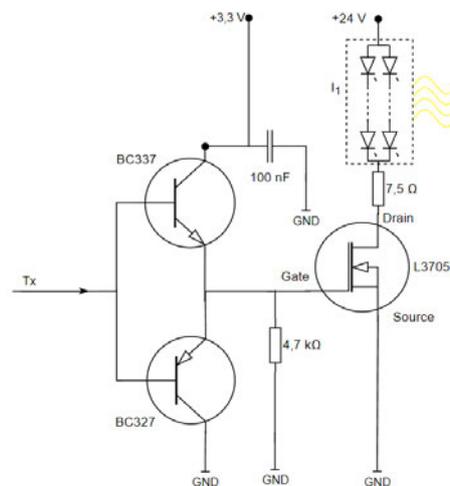


Abbildung 29: Die Treiberschaltung am LED-Panel

#### 4.2.4 Dimmung

Das Dimmen des Panels geschieht über das Zu- und Abschalten von 3 LED-Doppelsträngen, die nur zur Beleuchtung und nicht zur Datenübertragung verwendet werden. Damit lässt sich also wahlweise ein Beleuchtungsniveau von 25 oder 100 % einstellen. Zum Schalten der drei Stränge wurde der „Jumper 1“ in Reihe hinter die drei Doppelstränge gesetzt, wie in Abbildung 24 zu sehen ist. Als Verbesserungsmöglichkeit könnte dieser noch durch ein Relais ausgetauscht werden, um die Dimmung per Software ansteuerbar zu machen.

Eine andere Option, die zur Dimmung erprobt wurde, war das Verbinden von PWM und der OOK Modulation der seriellen Kommunikation des *Arduinos*. Auf Software-Ebene wurde mit einer Und-Verknüpfung der PWM Impuls mit dem Tx Signal verbunden und das Resultat an einem anderen Pin ausgegeben. Der Screenshot vom Oszilloskop in Abbildung 30 illustriert diesen Zusammenhang. Das dunkelblaue Signal ist die PWM+Tx Verknüpfung, während das türkise nur das ursprüngliche Tx Signal ist.

Es ist erkennbar, dass Bits verloren gehen und der Empfänger-*Arduino* die Daten nicht korrekt demodulieren kann. Ein zweites Problem ist das Protokoll der asynchronen, seriellen Schnittstelle. Der *Arduino* sendet einen HIGH-Pegel, wenn keine Daten übertragen werden, weswegen die Pausen zwischen den PWM Pulsen am Empfänger für Schwierigkeiten in der Synchronisation sorgen. Eine bessere Lösung wäre es, ein eigenes Protokoll mit Parametern für die Dimmung zu entwickeln oder das System nach dem *IEEE 802.15.7* Standard aufzubauen, was jedoch den Zeitrahmen dieser Arbeit überschritten hätte.

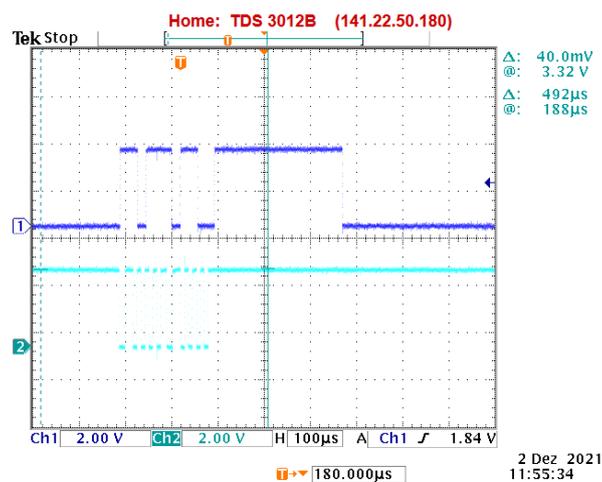


Abbildung 30: PWM verknüpft mit dem Tx (Blau) und das ursprüngliche Tx signal

#### 4.2.5 Seitenemitterlinse

Zur Lenkung des Lichts wurde sich für die in Abschnitt 3.2.2 bereits erwähnte Seitenemitterlinse *VERONICA-SQ-SE* von *LEDiL* entschieden. Diese PMMA Linsen haben eine Abmessung von 22.5 mm x 22.5 mm und lassen sich somit passend auf die Platine kleben. Der Stückpreis liegt je nach Bestellgröße zwischen 1,90 € und 2,80 €. In Abschnitt 5.1 wurde die LVK und Transmissionscharakteristik dieser Linse gemessen und mit dem Datenblatt verglichen. Für den Prototyp wurden fünf von diesen Linsen auf die äußeren LEDs geklebt (siehe Abbildung 22).

#### 4.2.6 Sammellinse

Vor dem Fotodetektor wurde eine Plankonvexe Sammellinse installiert, um die effektive Lichtsensible Fläche der Fotodiode zu vergrößern. Es handelt sich um die Acrylglaslinse *OM7* von *Astromedia*. Der Durchmesser dieser Optik ist 34,5 mm und die Brennweite 106 mm. Die Kosten pro Stück belaufen sich auf 1,70 €.

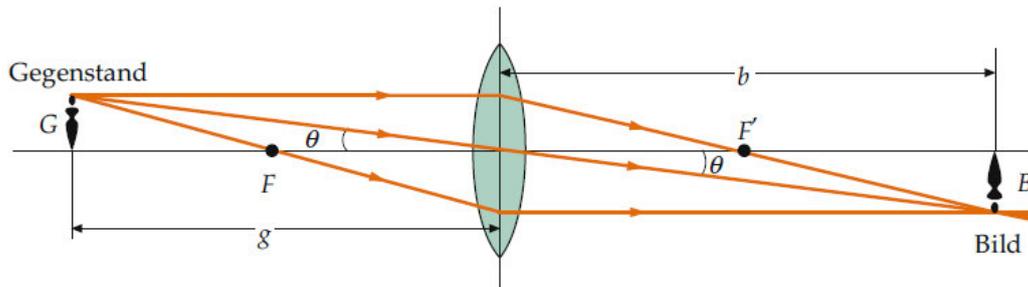


Abbildung 31: Geometrische Abbildung einer dünnen Sammellinse [14]

Die Abbildungsgleichung einer dünnen Sammellinse, wie in dem in Abbildung 31 dargestellten Szenario, lautet:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Angenommen das LED-Panel hat einen Abstand  $g = 20$  m. Dann ist die Bildweite  $b$  mit  $0,1066$  m in etwa gleich der Brennweite.

Außerdem gilt für die Vergrößerung  $V$ :

$$V = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$$

Das bedeutet, dass bei einer angenommenen Lichtaustrittsfläche von  $0,13$  m die Bildgröße  $B = 0,69$  mm beträgt. Die Lichtaustrittsfläche wurde so gewählt, da dies die Länge der kurzen Seite von der LED-Platine ist. Es kann gefolgert werden, dass bei allen drei, in Abschnitt 4.2.7 vorgestellten Fotodetektoren, das Licht komplett auf der fotosensiblen Fläche fokussiert wird. Die Fläche der verwendeten Linse beträgt  $3.739$  mm<sup>2</sup>. Für den iC-LQNP Wechsellichtsensor mit einer Fläche von  $1$  mm<sup>2</sup> resultiert dies in einem 3.739-fachen (36 dB) theoretischen Gewinn der optischen Empfangsleistung  $P_{R,opt}$ .

Die Sammellinse wurde vor ein  $10$  cm langes Metallrohr geklebt, welches auf einem Stück Holz mit dem Wechsellichtsensor platziert wurde (siehe Abbildung 23). Damit ließ sich der Sensor im Brennpunkt der Linse fixieren.

#### 4.2.7 Fotodetektoren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Fotodetektoren untersucht, die sich für den LiFi Bereich eignen.

## 1. iC-LQNP [46]

Der *ic-LQNP* ist ein Puls- und Wechsellichtsensor mit bereits vorhandener Gleichlichtunterdrückung. Auf dem IC ist also schon eine automatische Eingangsverstärkung und eine Bandpassfilter zusätzlich zur Fotodiode vorhanden. Der Amplitudenfrequenzgang dieses Sensors wurde in [38] messtechnisch untersucht und bestätigt die im Datenblatt angegebene Bandbreite (siehe Anhang). Die technischen Daten sehen wie folgt aus :

Versorgungsspannung $U_{CC}$	4,5 V - 13,2 V
zulässiger Umgebungstemperaturbereich $T_a$	-20 °C bis 85 °C
Fotodiodenfläche	1 mm <sup>2</sup>
Spektrale Empfindlichkeit $S(\lambda)_{max}$	0,5 A/W
Empfangsbereich	500 nm - 1050 nm
Wellenlänge maximaler Empfindlichkeit	875 nm
Untere 3 dB-Grenzfrequenz	40 kHz
Obere 3 db-Grenzfrequenz	400 kHz
Richtcharakteristik	28°
Kosten	3,95 €

## 2. BPW34 [47]

Die *BPW34* war in dem Elektrotechnik-Labor der HAW bereits vorhanden und zeichnet sich durch einen sehr günstigen Preis aus. Der Empfangsbereich liegt jedoch mit einer oberen Wellenlänge von 1120 nm bereits im IR-Bereich. Auch die maximale Sensitivität wird bei 920 nm außerhalb der sichtbaren Domäne erreicht. Die obere Grenzfrequenz dieser Diode berechnet sich mit der Anstiegszeit von 0,02  $\mu$ s zu 17,5 MHz. Die Spektrale Empfindlichkeit ist mit 0,62 A/W etwas besser als die 0,5 A/W des *ic-LQNP*. Auch die Richtcharakteristik ist mit 120° größer.

zulässiger Umgebungstemperaturbereich $T_a$	-40 °C bis 100 °C
Fotodiodenfläche	7,02 mm <sup>2</sup>
Spektrale Empfindlichkeit $S(\lambda)_{max}$	0,62 A/W
Spektrale Empfindlichkeit (Sperrspannung 5V, $T = 2865K$ )	80 nA/Lux
Empfangsbereich	420 nm - 1120 nm
Wellenlänge maximaler Empfindlichkeit	920 nm
Anstiegszeit (Sperrspannung 5V, $\lambda = 850$ )	0,02 $\mu$ s
Richtcharakteristik	120°
Kosten	0,60 €

## 4.2.8 Fotodetektorschaltung

Die Diode liefert bei Empfangen des Lichts nur einen sehr geringen Strom, der mithilfe eines Transimpedanzverstärkers in eine Spannung konvertiert wird. Die Grundschaltung für einen TIA ist in Abbildung 32 dargestellt.

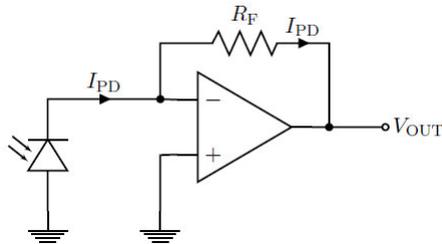


Abbildung 32: Transimpedanzverstärker Grundschaltung [1]

Für die Ausgangsspannung  $V_{out}$  am Operationsverstärker (OPV) gilt im Idealfall:

$$V_{out} = -I_{pd} \cdot R_F$$

Ein Kondensator, der parallel zu dem Rückkopplungswiderstand  $R_F$  geschaltet ist, hilft, ungewollte Schwingvorgänge zu unterdrücken, die am OPV entstehen können. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, mehrere Verstärkerstufen hintereinander zu schalten. Die Gleichlichtunterdrückung lässt sich z.B. mit einem Tiefpass realisieren, der zwischen die Kathode der Fotodiode und den invertierenden Eingang am Verstärker geschaltet ist [1]. Im Verlauf der Konzeptionierungsarbeit wurden zwei Fotodetektorschaltungen erprobt und vermessen (Kapitel 5). Diese werden im Folgenden vorgestellt.

### 1. ic-LQNP und SN75176 Bus Transceiver

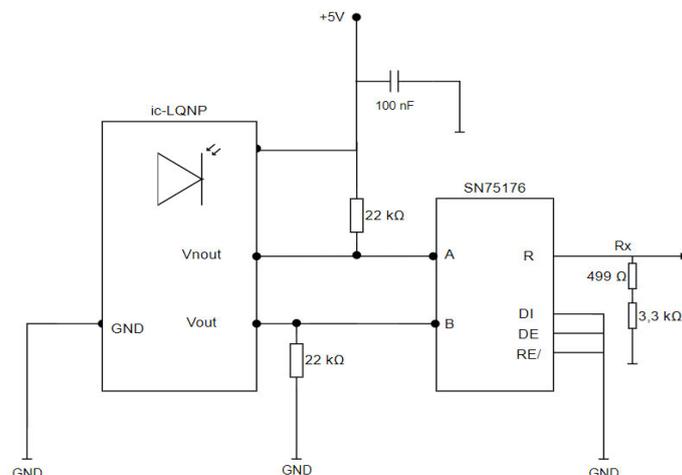


Abbildung 33: Wechsellichtsensor ic-LQNP mit dem Transceiver SN75176

Der *iC-LQNP* gibt praktischerweise ein differentielles Signal an den beiden Ausgängen  $V_{out}$  und  $V_{nout}$  aus. Dieses Signal wird an den *SN75176* IC weitergeleitet, der das störungsbehaftete Empfangssignal aus dem Sensor wiedergewinnt und für den *Arduino* besser erkennbare digitale Daten weitergibt. Das Signal aus dem *SN75176* am Ausgang *R* wird über eine Belastung von  $499\ \Omega$  und  $3,3\ k\Omega$  mit der seriellen Schnittstelle des *Arduinos* verbunden. Dieser Spannungsteiler war ursprünglich konzipiert, um die  $5V$  Ausgangsspannung auf die  $3,3V$  Eingangsspannung des *Due* zu regulieren, jedoch zeigt sich, dass bei dieser Belastung die Spannung schon um den richtigen Wert fällt. Die  $30\ k\Omega$  Widerstände an  $V_{out}$  und  $V_{nout}$  wurden aus der Beispielschaltung des Datenblatts entnommen. Mittels des  $+5V$  Ausgangs des Mikrocontrollers kann der *iC-LQNP* mit Spannung versorgt werden. Der genaue interne Aufbau des Sensors wird nicht aus dem Datenblatt klar.

Die recht hohe untere Grenzfrequenz von  $40\ kHz$  stellte ein Problem dar, wenn keine Codierung verwendet wird, um lange Folgen von Nullen und Einsen zu verhindern. Mit einem *Arduino* ohne Manchester-Codierung scheint keine verlässliche Kommunikation aufbaubar zu sein. Ein Experiment, bei dem der String „Hallo Welt“ als NRZ-OOK auf einer kurzen Strecke  $< 0,5\ m$  zwischen den seriellen Schnittstellen zweier *Arduino Uno* übertragen wurde, bestätigt dies. Wird ein „U“, was in binärer Darstellung  $[01010101]$  entspricht, mit  $57.600$  Baud über diese Verbindung gesendet, dann geht die Grundfrequenz dieses Rechtecksignals verloren. Diese ist mit  $28.880\ Hz$  die Hälfte der Baudrate und liegt niedriger als die untere Grenzfrequenz. Für andere Symbole, wie z.B. ein „H“, also  $[01001000]$ , ergibt dies noch niedrigere Grundfrequenzen im Übertragungsspektrum. Bei Erhöhung der Baudrate Schritt für Schritt wird der String etwas erkenntlicher, jedoch nicht eindeutig rekonstruierbar am Empfänger. Eine zu hohe Baudrate ist wegen der oberen Grenzfrequenz von  $400\ kHz$  nicht möglich und die harmonischen Anteile des Rechtecksignals werden rausgefiltert, was eine Beeinträchtigung der Übertragung darstellt.

## 2. BPW34 und 2 Transimpedanzverstärkerstufen

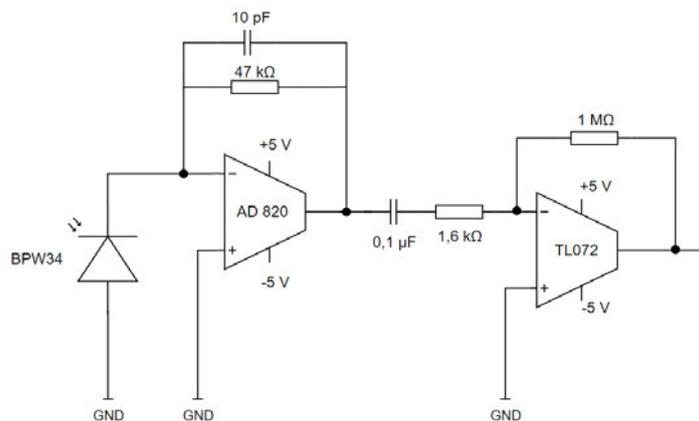


Abbildung 34: Die BPW34 Fotodiode mit 2 Verstärkerstufen

Diese Empfängerschaltung besteht aus 2 Verstärkerstufen, die in Reihe zu der BPW34 Fotodiode angeschlossen sind. Die obere Grenzfrequenz des Tiefpasses parallel zu dem ersten OPV ergibt sich zu:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot (R_F \cdot C_F)} = \frac{1}{2\pi \cdot (47 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ pF})} \approx 339 \text{ kHz}$$

Anschließend ist ein Hochpass mit der unteren Grenzfrequenz von

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot (1,6 \text{ k}\Omega \cdot 0,1 \text{ }\mu\text{F})} = 995 \text{ Hz}$$

zwischen die Verstärker geschaltet. Diese Schaltung würde so noch nicht mit dem Mikrocontroller funktionieren, da keine Komparator-Schaltung wie z.B. ein Schmitt-Trigger vorhanden ist, die das analoge elektrische Signal auf 3,3 V begrenzt und in LOW und HIGH umwandelt. Beim Überschreiten von 3,3 V würden die Pins von dem *Arduino* kaputt gehen. Die Verstärkung des Fotostroms beträgt nach der ersten Stufe 47.000 und anschließend  $\frac{1000000 \Omega}{1600 \Omega} = 625$ .

## 4.3 Code

### Sender

```
1 #define US_MAN_ONE (0x1u << 29) // an der 29. Stelle im Register das Bit 1 setzen
2
3 int Button = 0;
4 void setup() {
5     pinMode(5, INPUT);
6     Serial.begin(115200);
7     Serial1.begin(115200); // Serial1 ist für USART0
8
9     USART0->US_WPMR = 0x55534100; //den Schreibschutz deaktivieren
10    USART0->US_MR |= US_MR_MAN; // Manchester Code aktivieren
11    USART0->US_MAN = US_MAN_ONE |
12                US_MAN_DRIFT;
13 }
14
15 void loop() {
16     Button = digitalRead(5);
17
18     Serial.println("H");
19     delay(300);
20
21     if (Button == HIGH) { //Wenn der Knopf gedrückt wird, wird "L" gesendet
22         Serial.println("L");
23         Serial1.println("L");
24         delay(300);
25     }
26 }
```

Die Informationen zur Aktivierung der Manchester-Codierung sind im Datenblatt des SAM3X Prozessors leider ohne Beispiele, weswegen sich dieser Prototyp an dem Code aus [48] orientiert. In der ersten Zeile wird eine Bit-Operation definiert, die die 29. Stelle eines Registers auf „1“ setzt. Danach werden die Eingänge für die Taster definiert und die seriellen Schnittstellen mit einer Baudrate von 115.200 initiiert. Für die Manchester-Codierung würde man eine halbierte Bitrate von 57.600 bit/s erwarten. Jedoch beträgt die Bitrate tatsächlich 115.200 bit/s und die Baudrate ist 230.400. Die Zeilen 9-12 deaktivieren den Schreibschutz im US\_WPMR (USART Write Project Mode Register), damit anschließend in dem US\_MR (USART Mode Register) der Manchester-Code aktiviert werden kann. Dafür wird die vorherige Definition verwendet. Zusätzlich wird in Zeile 12 die Abweichung der internen *Arduino* Uhr kompensiert. Der Loop-Abschnitt liest den Pin aus, an dem der Taster angeschlossen ist und sendet ein „L“ alle 300 ms, wenn dieser gedrückt wird. Andernfalls wird ein „H“ gesendet. Diese beiden ASCII-Zeichen dienen als Trigger zum Hoch- und Runterdimmen an dem

Empfänger. Der Taster repräsentiert in dem Prototyp z.B. einen Bewegungsmelder, der an einer Parkfläche das Senden der beiden ASCII-Zeichen auf Softwareebene auslösen kann.

## Empfänger

```
1 #define US_MAN_ONE (0x1u << 29) // an der 29. Stelle im Register das Bit 1 setzen
2 char c = 0;
3
4 void setup() {
5   pinMode(5, OUTPUT); //Pin für das Relais
6   Serial.begin(115200);
7   Serial1.begin(115200); // Serial1 ist für USART0
8
9   USART0->US_WPMR = 0x55534100; //den Schreibschutz deaktivieren
10  USART0->US_MR |= US_MR_MAN; // Manchester Code aktivieren
11  USART0->US_MAN = US_MAN_ONE |
12                US_MAN_DRIFT;
13 }
14
15 void loop() {
16   String s;
17   s = "";
18
19   while (Serial1.available() > 0) { // die Seriellen daten auslesen
20     c = Serial1.read();
21     Serial.println(c);
22     s += c;
23     if (s == "L") { // Wenn das empfangene Zeichen ein "L" ist wird das Relais geschaltet und die Platine gedimmt.
24       digitalWrite(5, HIGH);
25     }
26     if (s == "H") { // H -> hochdimmen
27       digitalWrite(5, LOW);
28     }
29   }
30   if (s.length() > 0) {
31     Serial.println("Received Letter: " + s); // das empfangene Zeichen ausgeben im Monitor
32     Serial.println("-----");
33   }
34   delay(100);
35 }
36 }
```

Der Empfänger-Code verwendet in der setup-Funktion die gleiche Bitmanipulation auf Registerebene, wie der Transmitter. Anschließend wird ein String s definiert, der zum Auslesen der seriellen Daten dient. Dieser wird ebenfalls zur manuellen Überprüfung und Fehlerbehebung in dem Monitor ausgegeben. Falls der Empfänger ein „L“ erfolgreich erkennt, wird das Relais an Pin 5 geschaltet und die Platine gedimmt. Andersherum führt ein „H“ zu dem Hochdimmen der Platine.

## 5. Messungen

### 5.1 LVK der Seitenemitterlinse

Mit einem Messaufbau wurde die Lichtstärkeverteilungskurve der *LEDiL Veronica SQ SE* gemessen und mit einer im Datenblatt angegebenen verglichen. Der Messaufbau ist in Abbildung 35 zu sehen. In dem Schwarzen Labor der HAW Hamburg sind die Oberflächen mit Schwarzer Farbe angestrichen oder Molton abgehängt, um ungewünschte Reflektionen zu verhindern. Das Panel wurde mit Black Wrap ummantelt, so dass nur noch eine LED mit draufgeklebter Linse Licht ausstrahlt. Zur Rotation wurde ein automatischer Drehteller verwendet, der die Lichtquelle in  $5^\circ$  Schritten drehen kann. Da diese Lichtapparatur rotationssymmetrisch ist, wurde nur in einer C-Ebene gemessen. Die Spannungsversorgung wurde über das *Manson NSP3630* Labornetzgerät auf 24,1 V gestellt. Für die Messung der Beleuchtungsstärke wurde ein *Gossen Mavolux Compact* Luxmeter verwendet. Damit der Mindestabstand für das Fotometrische Entfernungsgesetz erfüllt ist, wurde das Luxmeter in 1,27 m Entfernung von der Lichtquelle positioniert und im Anschluss die Beleuchtungsstärke in der C0-C180 Ebene dokumentiert.



Abbildung 35: Messaufbau für die LVK

Die dokumentierten Lux-Werte wurden anschließend mittels des Entfernungsgesetzes in Lichtstärken umgewandelt und einem Polardiagramm dargestellt, das in Abbildung 36 (I.) zu sehen ist. Die gemessene Kurve zeigt eine große Ähnlichkeit zu der aus dem Datenblatt. Die geringfügigen Unterschiede entstehen dadurch, dass nicht die gleiche

weiße LED verwendet wurde und aufgrund des Panels nicht über die C0-C180 Ebene hinaus gemessen werden konnte.

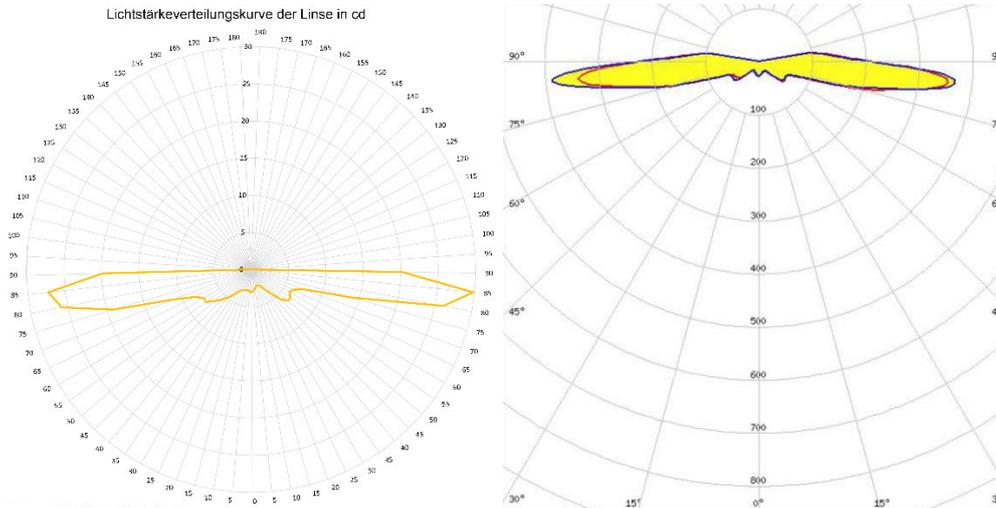


Abbildung 36: Die gemessenen LVK der Seitenemitterlinse (l.) und die aus dem Datenblatt [40]

## 5.2 Spektrum der LED

In dem reflexionsfreien Raum wurde mit dem Spektroradiometer *JETI Specbos 1211UV* im sichtbaren Bereich das Spektrum der Lichtquelle untersucht. In Abbildung 37 zeigt sich das für weiße LEDs mit Phosphorbeschichtung typische Spektrum. Der Peak im blauen Bereich kommt von dem Lichterzeugenden Chip, während der Lichtanteil ab 480 nm und aufwärts durch die Phosphoreszenz erzeugt wird. Die Messung konnte die Farbtemperatur von 4000 K und den Farbwiedergabeindex  $R_a = 80$  bestätigen. Nachtaktive Insekten, Vögel und Fledermäuse reagieren sensibel auf Kunstlicht. Für Insekten wirken Leuchtstofflampen und Quecksilberdampf-Hochdrucklampen wegen ihres bläulichen Spektrums anziehend. LED-Technik wird weitaus besser bewertet, aber nur wenn die Lichttemperatur im warmweißen Bereich liegt. 4000 K liegt im neutralweißen Bereich und ist in der Außenbeleuchtung als Störfaktor für die Tierwelt nicht zu unterschätzen.

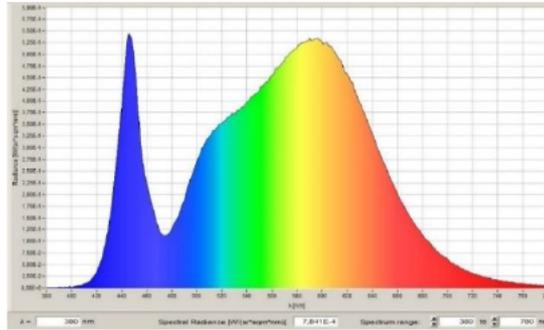


Abbildung 37: Das Spektrum der LM301b LED

### 5.3 Reichweite der Datenübertragung mit dem Wechsellichtsensor

Für die Untersuchung der maximalen Reichweite unter idealen Bedingungen wurde der Prototyp im schwarzen Labor untersucht. Die Datenrate der seriellen Kommunikation zwischen Sender und Empfängermodul wurde auf 115.200 Baud und das Sendesymbol auf das ASCII-Zeichen „H“ festgelegt. Dieses wurde alle 100 ms über das LED-Panel, das mit der Hauptabstrahlrichtung im rechten Winkel zum Empfänger stand, im gedimmten Zustand gesendet. Zu Beginn der Messreihe wurde die Sammellinse so ausgerichtet, dass das Licht fokussiert auf der Fotodiode landet. Dann wurde die Lichtquelle schrittweise auf der Messbank verschoben und das empfangene Byte im seriellen Monitor des Rx-Arduinos überprüft. Da die Messstrecke nicht lang genug war, wurde die Spannung des Panels ab 3,4 m runterreguliert und somit eine Entfernungsvergrößerung simuliert. Anhand der Luxwerte und des photometrischen Entfernungsgesetzes kann die tatsächliche Entfernung berechnet werden. In Abbildung 38 ist der Messaufbau im schwarzen Labor dargestellt. Vorne ist die verschiebbare Holzplatte mit dem Panel, welches nach rechts ausgerichtet ist, zu sehen. Im Hintergrund sitzt der Fotodetektor in der gewählten Entfernung. Die Entfernung wurde von den lichtemittierenden Linsen zur Sammellinse gemessen.

Spannung in V	Abstand in m	Lux	Übertragung
24,05	1,3	22,7	Ja
24,05	2,4	6,5	Ja
24,05	3,4	3,3	Ja
23,17	4,1	2,3	Ja
23,03	4,2	2,2	Ja, aber langsamer
22,97	4,3	2,1	Ja, aber langsamer
22,85	4,5	1,9	Ja, aber langsamer
22,74	4,6	1,8	Ja, aber langsamer
22,63	4,7	1,7	Nein

Tabelle 2: Entfernungsmessung mit dem Wechsellichtsensor

Es zeigt sich, dass bis zu einer Entfernung von 4,1 m oder einer Beleuchtungsstärke von 2,3 Lux das Symbol zuverlässig übertragen wurde. Bei größeren Entfernungen wurde das ASCII-Zeichen nicht mehr alle 100 ms erkannt, sondern nur noch alle 1 - 5 s. Mit 1,8 Lux an der Sammellinse wurde das Symbol nur noch ca. alle 14 Sekunden erkannt und bei 1,7 Lux ist die Verbindung vollständig abgebrochen.

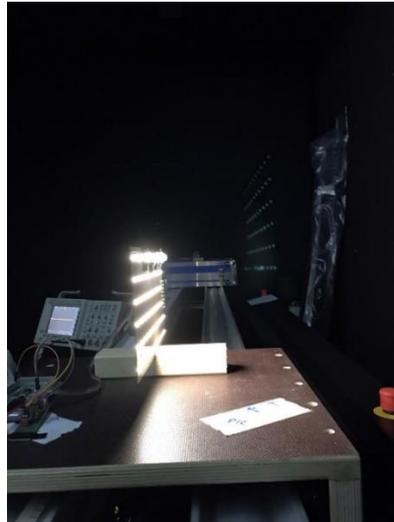


Abbildung 38: Der Messaufbau zur Entfernungsbestimmung

Trotz des Verbindungsabbruchs besaß das Signal immer noch klar unterscheidbare Pegel und ausreichend steile Flanken, wie in Abbildung 39 zu sehen ist. Der Verbindungsabbruch entsteht vermutlich durch minimale Änderungen der Impulsbreiten bei zu geringen Helligkeiten. Erst  $< 0,6$  Lux verschwindet das Signal auch messbar am Ausgang des Transceivers. Ohne die Sammellinse betrug die maximale Reichweite in etwa 50 cm, was einem Verlust von  $\sim 10$  dB entspricht. Nach der Vorberechnung aus Abschnitt 4.2.6 sollte der Gewinn durch die Linse jedoch 36 dB betragen. Die Vermutung ist, dass die Linse das Licht nicht perfekt im Fokuspunkt konzentriert und dieser den Lichtsensor nicht mittig getroffen hat.

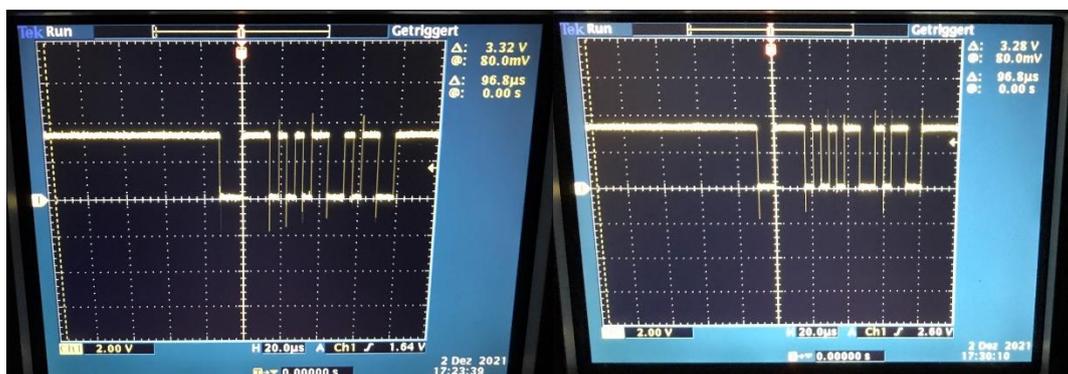


Abbildung 39: Das Rx-Signal bei 2,2 Lux (l.) und 1,6 Lux

Um den Einfluss von Tageslicht und die Wirksamkeit der Gleichlichtunterdrückung zu untersuchen, wurden bei der Entfernungsmessung an jedem Messpunkt die Rollläden der Fenster hochgefahren und die Unterschiede in der Kommunikation zu dem abgedunkelten Raum verglichen. Die Übertragung wurde auch bei verschiedenen Datenraten überprüft, die sich innerhalb des Bandpassbereichs des Empfängers befanden. In beiden Fällen zeigte sich keine Veränderung.

Eine maximale Reichweite von 4,6 m würde in einem praxisnahen Szenario nicht ausreichen, um die größeren Strecken zwischen Straßenleuchten zu überbrücken. Jedoch sollte beachtet werden, dass die LED-Platine mit 2500 lm recht dunkel im Vergleich zu anderen Lampentypen ist. In dem Portfolio des britischen Straßenbeleuchtungsherstellers Thorn werden einige Produkte mit bis zu 30.000 lm geführt [49]. Eine 10.000 lm Helle Leuchte würde theoretisch eine realistische Entfernung von 18,4 m zwischen den Masten überbrücken können. Eine Sammellinse mit 7 cm anstatt 3,45 Durchmesser könnte ohne Probleme am Gehäuse angebracht werden und die Reichweite ebenfalls um das Vierfache erhöhen.

## **5.4 Bytefehlerrate in Abhängigkeit der Entfernung mit dem Wechsellichtsensor**

Um zu quantisieren, wieviel Information bei der fehlerbehafteten Übertragung verloren geht, wurde die Bytefehlerrate in verschiedenen Entfernungen gemessen. Üblicherweise wird in der Nachrichtentechnik die Bitfehlerrate und nicht die Bytefehlerrate angegeben, jedoch gestaltete sich das Auslesen des empfangenen Bitstreams am *Arduino* schwieriger und zeitaufwändiger als gedacht, weswegen sich für Bytes entschieden wurde. Zur Messung wurde der String „Bytefehlerrate“ 10-mal in der gewählten Entfernung gesendet und dann überprüft, wieviel Bytes verloren gegangen sind oder falsch empfangen wurden. Die Bytefehlerrate resultiert aus dem Quotienten von fehlerhaften Bytes zu gesendeten Bytes. Falls das Wort „Byt**d**fehlerrate“ empfangen wird, entspricht dies einer Fehlerrate von  $\frac{1}{14} \approx 7,14\%$ .

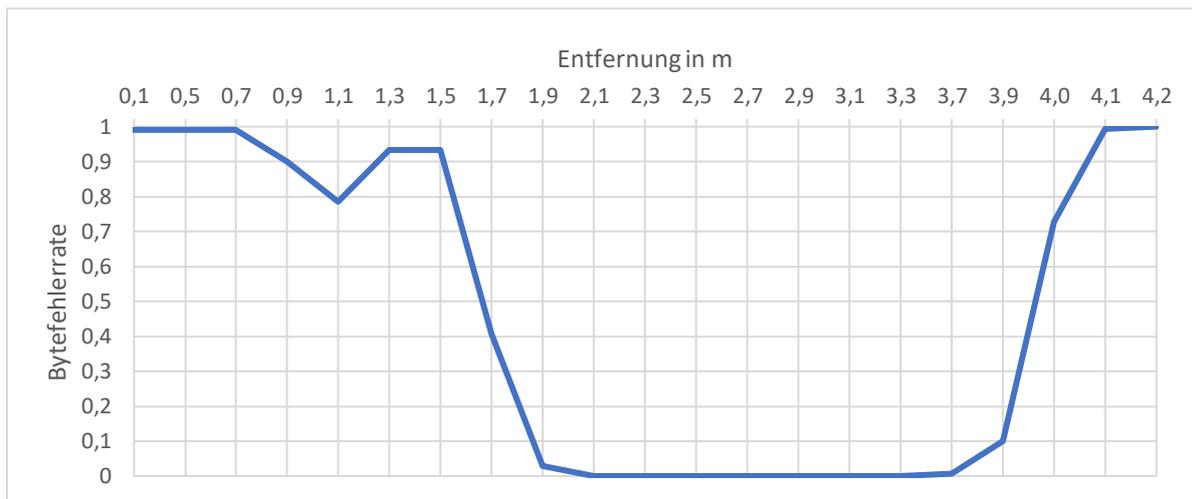


Abbildung 40: Bytefehlerrate in Abhängigkeit der Entfernung

In Abbildung 40 ist das Ergebnis dargestellt. Es zeigt sich, dass bis zu einer Entfernung von etwa 1,7 m kaum eine Kommunikation möglich war, da der Fotosensor übersteuert. Zwischen 1,9 m und 3,7 m beträgt die Fehlerrate 0 und der String wird vollständig empfangen. In den Distanzen danach springt die Fehlerrate sehr schnell wieder auf fast 100 % und ab 4,2 m ist keine Kommunikation mehr möglich. Der Unterschied zur vorherigen Abstandsmessung, bei der die Kommunikation bis 4,6 m möglich war, kommt durch geringe Helligkeitsunterschiede bei dem Bewegen der Platine.

Eine bereits erwähnte Möglichkeit zur Fehlerkorrektur besteht in der Kanalcodierung. In diesem System wäre der Vorteil jedoch geringfügig, da die Zone zwischen fehlerfreier Übertragung und Verbindungsabbruch sehr klein ist. Die Kanalcodierung könnte ihr Potenzial eher in Outdoor-Situationen entfalten, in denen durch die Witterungsbedingungen Bitfehler entstehen.

## 5.5 Ausgangsspannung der BPW34 Fotodiode mit Verstärkerschaltung

Da die Schaltung aus Abschnitt 4.2.8 nicht in Verbindung mit dem Mikrocontroller zur Entfernungsmessung genutzt werden konnte, wurde die Spannung am Ausgang in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke untersucht. Zur Signalerzeugung wurde die LED-Platine mit einer 1 kHz Rechteckschwingung geschaltet. Dann wurde die Entfernung vergrößert und die Ausgangsspannung hinter dem zweiten TIA aufgenommen. Es gilt zu beachten, dass diese Messung ohne die Sammellinse vor der Fotodiode geschah.

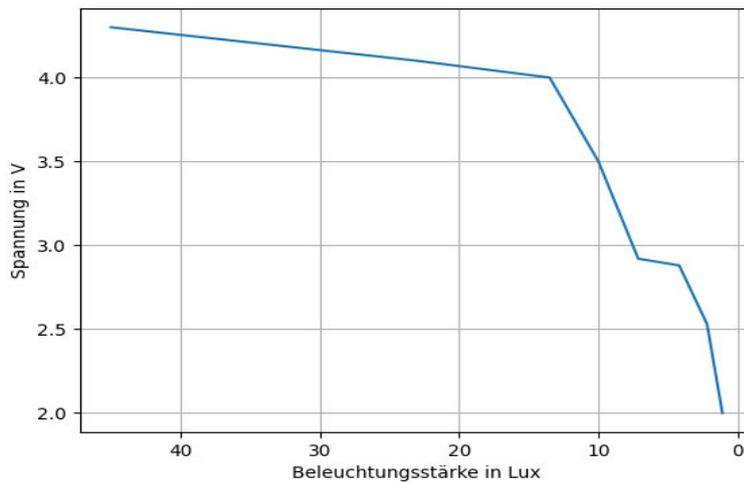


Abbildung 41: Beleuchtungsstärke-Spannung Kurve

Für die höheren Beleuchtungsstärken ist die Ausgangsspannung dieser Schaltung noch annähernd im Bereich der Versorgungsspannung von +5 V. Ab ungefähr 15 Lux beginnt die Spannung stärker zu fallen und liegt bei 2 Lux nur noch ca. bei 2.4 Volt. Trotzdem sind bei diesen geringen Beleuchtungsstärken die Flanken des Rechtecksignals immer noch klar erkennbar und könnten für die elektronische Weiterverarbeitung verwendet werden. Darüber hinaus wäre die Ausgangsspannung mit der Sammellinse vor der Fotodiode wesentlich höher und die Reichweite des Empfängers verbessert sich. Für eine Modifikation des LiFi Systems mit einer größeren Reichweite scheint dieser Detektor besser geeignet zu sein, erfordert aber weitere Signalverarbeitung, um die Schaltung in Kombination mit einem Mikrocontroller verwenden zu können.

## 5.6 Probleme

Die Fokussierung des Lichtpunktes auf der 1 mm<sup>2</sup> großen Fotodiodenfläche gestaltete sich als sehr schwierig, da eine minimale Bewegung des Sensors oder der Linse bereits signifikante Helligkeitsunterschiede verursachte. Jedoch lässt sich in Hinblick auf die Straßenleuchten festhalten, dass die Bauteile fest verbaut werden können und der Abstand unveränderlich bleibt. Es muss lediglich eine anfängliche Fokussierung vorgenommen werden.

Zudem stellte sich während dieser Arbeit in den Räumlichkeiten der HAW heraus, dass das EVG der Leuchtstoffröhren an den Decken mit bis zu 100 kHz an- und ausschaltet und sich dies am Fotoempfänger bemerkbar machte. Eine andere Wechsellichtfreie Lichtquelle (z.B. LED, Halogen) eignet sich besser zur Beleuchtung eines Labors für hochfrequente optoelektronische Schaltungen.

## 5.5 Verbesserungsmöglichkeiten

Der erste Ansatz mit diesem Konzept eine größere Distanz zu überbrücken, liegt in der Verbesserung der optischen Elemente im Ausbreitungspfad. Eine größere Sammellinse vor dem Fotodetektor würde im Gehäuse einer realen Straßenleuchte immer noch Platz finden und wesentlich mehr Licht auf der sensiblen Fläche konzentrieren. Zusätzlich könnten Spiegelelemente oder Reflektoren angebracht werden, die die Lichtstrahlen noch mehr in Richtung der anderen Leuchte bündeln. Für einen Spiegel, der das Licht, das in die falsche Richtung emittiert wurde, in Richtung des Fotodetektors reflektiert, wäre eine SNR Verbesserung von 3 dB zu erwarten.

Der zweite Punkt wäre die Verwendung des ganzen Panels zur Datenübertragung. In dem hier vorgestellten Konzept, wird nur ein Viertel der LEDs zur digitalen Modulation und der Rest zu Beleuchtungszwecken verwendet. Sollten alle 64 LEDs zur Kommunikation benutzt werden, würde sich das SNR um 6 dB verbessern.

Auf elektrischer Ebene kann mit einer komplexeren Schaltung die Verstärkung des Kleinsignals erhöht werden. Weiterführende Untersuchungen könnten z.B. mit logarithmischen Verstärkern geschehen, die geringe Eingangsamplituden wesentlich mehr verstärken als hohe Amplituden. Ein Beispiel für eine Empfängerschaltung, die in einem System mit geringer Bandbreite und 278 km Reichweite verwendet wurde, ist in [50] näher erläutert.

## 6. Fazit

Dieser Prototyp beweist, dass die Kommunikation zwischen LED-Außenbereichsleuchten, die auf einer Höhenebene liegen, mittels horizontal emittierenden Linsen und unter Vorgabe der technischen Anforderungen, möglich ist. Das System ist dimmbar, funktioniert unter natürlichen Lichteinflüssen, hat eine geringe Übertragungslatenz und realisiert eine Datenrate von 115 Kbit/s. Mit den bereits vorgeschlagenen Verbesserungsmöglichkeiten sollte ein Datenlink für praxisnahe Entfernungen, die größer als 4,5 m sind, aufbaubar sein. Die Hardware könnte in autarke Beleuchtungssysteme integrieren werden, indem z.B. der Treiber zwischen die Kathode und Masse der LED-Leuchte geschaltet wird. Würden die vorgestellten Sender- und Empfängerschaltungen kombiniert werden, so lassen sich Informationen bidirektional von einer Leuchte zur anderen weitergeben. Folglich lassen sich so Straßenzüge, Parkanlagen oder Gehwege dimmen.

Eine besondere Herausforderung dieser Untersuchung war der „Dual-Use“-Aspekt. Wird sich von diesen Einschränkungen gelöst, so bieten sich eine alternative Möglichkeiten, die die Lichtquelle zum Fotodetektor hin ausrichten könnten. Ein Laser oder eine IR-Lampe, die dediziert für LiFi eingerichtet sind, würden eine interessante Option in der Entwicklung intelligenter Außenbereichsleuchten darstellen.

Eine weitere interessante Messung, die nicht in den Zeitrahmen dieser Arbeit gepasst hat, wäre der Einfluss von Witterungsbedingungen auf die Reichweite und Stabilität der Übertragung. Welche Effekte haben Schnee, Regen, Nebel, Staub und Dunst?

Für den Zukunftsausblick wäre es ebenfalls interessant zu überprüfen, ob sich Photovoltaikmodule von Solar-Außenbereichsleuchten als Fotoempfänger eignen. Der Vorteil wäre nicht zu unterschätzen, da sich hier ein neuer „Dual-Use“ Aspekt erschließen könnte.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum [2] .....	8
Abbildung 2: Blockdiagramm einer LiFi Übertragung [7].....	10
Abbildung 3: 433-MHz-Spektrum in einer Großstadt [8] .....	11
Abbildung 4: VLC Nutzungsszenario an einer Kreuzung [11].....	13
Abbildung 5: Siliciumkristall, der mit Arsen dotiert wurde [14] .....	14

Abbildung 6: Der PN-Halbleiterübergang [14].	15
Abbildung 7: Die Hellempfindlichkeitskurven des CIE [1]	17
Abbildung 8: Datenratenvergleich eines LiFi-Systems im Indoor und Outdoor-Bereich [19]	22
Abbildung 9: LED- Backhaul vom Fraunhofer HHI [22]	23
Abbildung 10: Die Bitfehlerrate von NRZ-OOK im Verhältnis zum SNR dargestellt [1]	25
Abbildung 11: VPPM Signal mit verschiedenen Dimmstufen, um {001} zu übertragen [1]	26
Abbildung 12: Die Übertragung eines VLC Systems als Blockdiagramm dargestellt.	27
Abbildung 13: Frequenzgang einer weißen LED [7]	28
Abbildung 14: Allgemeines Blockschaltbild des VLC-Systems [28]	30
Abbildung 15: Die Signaldiagramme von 4 Leitungscodes [35]	34
Abbildung 16: Kommunikation zwischen zwei Außenbereichsleuchten über Bodenreflexion	37
Abbildung 17: Vergleich der Wellenlängenabhängigen Reflexion von Beton und Asphalt [37]	39
Abbildung 18: horizontale Lichtaufweitung durch Linsen	40
Abbildung 19: Die Seitenemitterlinse VERONICA-SQ-SE [40]	41
Abbildung 20: Ovale Aufweitung des Lichtkegels zum Fuß der Empfängerlaterne ...	42
Abbildung 21: Die Lichtverteilung der HB-2X2-O Linse von oben dargestellt [41]	43
Abbildung 22: Die Senderseite	47
Abbildung 23: Die Empfängerseite	47
Abbildung 24: Der Gesamtschaltplan	48
Abbildung 25: Der Arduino Due Mikrocontroller [43]	49
Abbildung 26: Die LED-Platine von Atlas EMS mit dem Einbauort der Seitenemitterlinsen	50
Abbildung 27: Die Spannung-Strom Kennlinie des LED-Panels	51
Abbildung 28: Das Serielle Signal am Gate des MOSFET ohne (I.) und mit Gegentaktverstärkung	52
Abbildung 29: Die Treiberschaltung am LED-Panel	53
Abbildung 30: PWM verknüpft mit dem Tx (Blau) und das ursprüngliche Tx signal ..	54
Abbildung 31: Geometrische Abbildung einer dünnen Sammellinse [14]	55
Abbildung 32: Transimpedanzverstärker Grundsaltung [1]	57
Abbildung 33: Wechsellichtsensor ic-LQNP mit dem Transceiver SN7176	57
Abbildung 34: Die BPW34 Fotodiode mit 2 Verstärkerstufen	59
Abbildung 35: Messaufbau für die LVK	62
Abbildung 36: Die gemessenen LVK der Seitenemitterlinse (I.) und die aus dem Datenblatt [40]	63
Abbildung 37: Das Spektrum der LM301b LED	64
Abbildung 38: Der Messaufbau zur Entfernungsbestimmung	65
Abbildung 39: Das Rx-Signal bei 2,2 Lux (I.) und 1,6 Lux	65
Abbildung 40: Bytefehlerrate in Abhängigkeit der Entfernung	67
Abbildung 41: Beleuchtungsstärke-Spannung Kurve	68
Abbildung 42: Der Frequenzgang des ic-LQNP [38]	76
Tabelle 1: Infowort und Codewort mit Prüfbit	33

## Literaturverzeichnis

- [1] P. A. Hoehner, *Visible Light Communications: Theoretical and Practical Foundations*, München: Carl Hanser Verlag, 2019.
- [2] H. Haas, „LiFi is a paradigm-shifting 5G technology“, *Reviews in Physics*, Bd. 3, S. 26–31, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.revip.2017.10.001.
- [3] A. Jovicic, J. Li and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26-32, December 2013, doi: 10.1109/MCOM.2013.6685754.
- [4] H. Haas, "Opportunities and Challenges of Future LiFi," 2019 *IEEE Photonics Conference (IPC)*, 2019, pp. 1-2, doi: 10.1109/IPCon.2019.8908391.
- [5] Elektronik Kompendium, „Wi-Fi 5 / IEEE 802.11ac / Gigabit-WLAN“ [Online], Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/1602101.htm> [Zugriff am 12.04.2022]
- [6] L. Langemeyer "Messtechnische Untersuchung eines Infrarot-basierten LiFi-Systems und Erprobung verschiedener Use-Cases aus dem Office-Bereich", HAW, Hamburg. 2021.
- [7] N. Chi, *LED-Based Visible Light Communications*, Peking: Springer Verlag ,2018.
- [8] P. Holzhauser, *Wikipedia.de* „ISM-Band“, 21 April 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/ISM-Band#/media/Datei:ISM-SDRSHARP.jpg> . [Zugriff am 23.11.2021]
- [9] M. Cui, Y. Feng, Q. Wang, and J. Xiong. 2020. "Sniffing visible light communication through walls" in *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '20)* Article 30, 1–14. doi: 10.1145/3372224.3419187
- [10] N. Flaherty, "LiFi goes underwater", *eeNewsEurope*, September 23,2020. [Online], Verfügbar unter: <https://www.eenewseurope.com/news/lifi-goes-underwater>[Zugriff am 20.01.2022]
- [11] A-M. Căilean, M. Dimian. "Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications" in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no.4 pp. 169-175, April 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600206

- [12] H. Demuth, „Nachrichten- und lichttechnische Erprobung kommerziell verfügbarer LiFi-Systeme,“ HAW, Hamburg, 2019.
- [13] M. Rose, „Netzwerktechnische Erprobung eines LiFi-Systems hinsichtlich des Handoververfahrens“ HAW, Hamburg, 2020.
- [14] P.A. Tipler, G. Mosca, *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Berlin-Heidelberg: Springer Spektrum, 2015
- [15] M. Reisch *Halbleiterbauelemente*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [16] R. Greule, *Licht und Beleuchtung im Medienbereich*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015.
- [17] LightAgentur „licht.wissen 03 Straßen, Wege und Plätze“ , [Online], Available: [https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen\\_Downloads/1403\\_lw03\\_Straesen\\_Wege\\_web.pdf](https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_lw03_Straesen_Wege_web.pdf) [Zugriff am 10.03.2022]
- [18] A.R. Ndjiongue, H. C. Ferreira, “An overview of outdoor visible light communications” in *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies vol. 29, Issue 7, July 2018, doi: 10.1002/ett.3448*
- [19] V. Jungnickel, “Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, February 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7402263.
- [20] Y. Dong, M. Shi, X. Yang, P. Zeng, J. Gong, S. Zheng, M. Zhang, R. Liang, Q. Ou, N. Chi, and S. Zhang, "Nanopatterned luminescent concentrators for visible light communications" in *Optics Express*, vol. 25, issue 18, pp. 21926-21934, August 2017
- [21] N. Chi, Y. Zhou, Y. Wei and F. Hu, "Visible Light Communication in 6G: Advances, Challenges, and Prospects," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 93-102, Dec. 2020, doi: 10.1109/MVT.2020.3017153.
- [22] A. Möcker, „Li-Fi: Datenfunk per Licht“ *c't*, 11/2018, p.24
- [23] Schulz, D. Jungnickel, V. Alexakis, C., Schlosser, M.; Hilt, J.; Paraskevopoulos, A.; Grobe, L.; Farkas, P.; Freund, R. „Robust Optical Wireless Link for the Backhaul and Fronthaul of Small Radio Cells” in *Journal of Lightwave Technology* 34, No.6, pp.1523-1532, 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2523801
- [24] Abumarshoud, H., Mohjazi, L.S., Dobre, O.A., Renzo, M.D., Imran, M.A., & Haas, H., “LiFi Through Reconfigurable Intelligent Surfaces: A New Frontier for 6G?” in *arXiv preprint*, April 2021, doi: 10.48550/arXiv.2104.02390
- [25] P.A. Höher, *Grundlagen der digitalen Informationsübertragung*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [26] S. Rajagopal, R. D. Roberts and S. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support," in *IEEE Communications*

- Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72-82, March 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.
- [27] J. Mietzner, Nachrichtentechnik und Telekommunikation, Vorlesung, Thema „Digitale Modulationsverfahren“, Hochschule für Angewandte Wissenschaft, Hamburg, 2019
- [28] H. Haas, S. Dimitrov, *Principles of LED Communications Towards Networked LiFi*, Cambridge: Cambridge University Press, 2015
- [29] P. Gawande, A. Sharma, P Kushwaha, “Various Modulation Techniques for LiFi” in *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 5, Special Issue 3, Nov 2016, doi: 10.17148/IJARCCE
- [30] Y. Qui, H. Chen, W. Meng „Channel modeling for visible light communications- a survey” in *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol.16, Issue 14, October 2016, doi: 10.1002/wcm.2665.
- [31] A. Ibhaze, P. Orukpe, F. Edeko “High-capacity data rate system: Review of visible light communications technology” in *Journal of Electronic Science and Technology*, August 2020, doi: 10.1016/j.jnlest.2020.100055
- [32] W. Froberg, H. Kolloschie, H. Löffler, *Taschenbuch der Nachrichtentechnik*, München: Carl-Hanser Verlag, 2008
- [33] K. Cui, G. Chen, Z. Xu, R.D. Roberts, “Experimental Characterization of Traffic Light to Vehicle VLC Link Performance”, *IEEE GLOBECOM Workshops*, 2011, doi: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162566.
- [34] U. Freyer, *Medientechnik Basiswissen Nachrichtentechnik, Begriffe, Funktionen, Anwendungen*, München: Carl-Hanser Verlag, 2013
- [35] M. Werner, *Nachrichtentechnik*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2010.
- [36] Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, “Stabiler Bestand trotz vieler Widrigkeiten“ [Online], verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/14886598/2020-02-09-bukea-baumbestand-in-hamburg/> [Zugriff am 27.03.2022]
- [37] W. Adrian, R. Jobanputra, “Influence of Pavement Reflectance on Lighting for Parking Lots”, *greenconcrete.info*, 2005. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.greenconcrete.info/downloads/8\\_InfluencePavementReflectance-LightingParkingLotsSN2458.pdf](https://www.greenconcrete.info/downloads/8_InfluencePavementReflectance-LightingParkingLotsSN2458.pdf) [Zugriff am 09. März 2022]
- [38] J. Kühnel, L. Schmidt, Nachrichtentechnik und Telekommunikation 2 „Outdoor LiFi für Straßenleuchten“, Hamburg 2021
- [39] R. Baer, M. Barfuß, D. Seifert, *Beleuchtungstechnik Grundlagen*, Berlin: HUSS-MEDIEN GmbH, 2020

- [40] LEDiL, „side-emitter beam“ VERONICA-SQ-SE Datenblatt, Juli.2019
- [41] LEDiL, “oval beam for aisle lighting“ HB-2X2-O Datenblatt
- [42] J. Mietzner, Nachrichtentechnik, Vorlesung, Thema „Signalübertragung“, Hochschule für Angewandte Wissenschaft, Hamburg, 2018
- [43] Arduino, [Online], Verfügbar unter: <http://store.arduino.cc/products/arduino-due> [Zugriff am 29.03.2022]
- [44] S. Fuada, T. Adiono, F. Ismail, and E. Setiawan, “Prototyping the Li-Fi System Based on IEEE 802.15.7 PHY.II.1 Standard Compliance” in *Journal of Communications*. Vol. 15, No. 6, June 2020 doi: 10.12720/jcm.15.6.519-527
- [45] U. Tietze, Ch. Schenk *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002
- [46] iC Haus, “Puls- und Wechsellichtsensor“ iC-LQNP Datenblatt, 2009
- [47] OSRAM, “Silicon PIN Photodiode” BPW34 Datenblatt, August 2020
- [48] Arduino Forum “Due USART register access“ [Online], verfügbar unter: <https://forum.arduino.cc/t/due-usart-register-access/947622> [Zugriff am 12.04.2022]
- [49] Thorn Lighting, “Outdoor Lighting” [Online], verfügbar unter: <https://www.thorn-lighting.co.uk/en-gb/products/catalogues-and-brochures/thorn-catalogue/thorn-outdoor-catalogue.pdf> [Zugriff am 27.04.22]
- [50] “Receivers for low-bandwidth optical (through-the-air) communications “ [Online], verfügbar unter: [http://www.modulatedlight.org/optical\\_comms/optical\\_rx1.html](http://www.modulatedlight.org/optical_comms/optical_rx1.html) [Zugriff am 19.04.2022]

## 7. Anhang

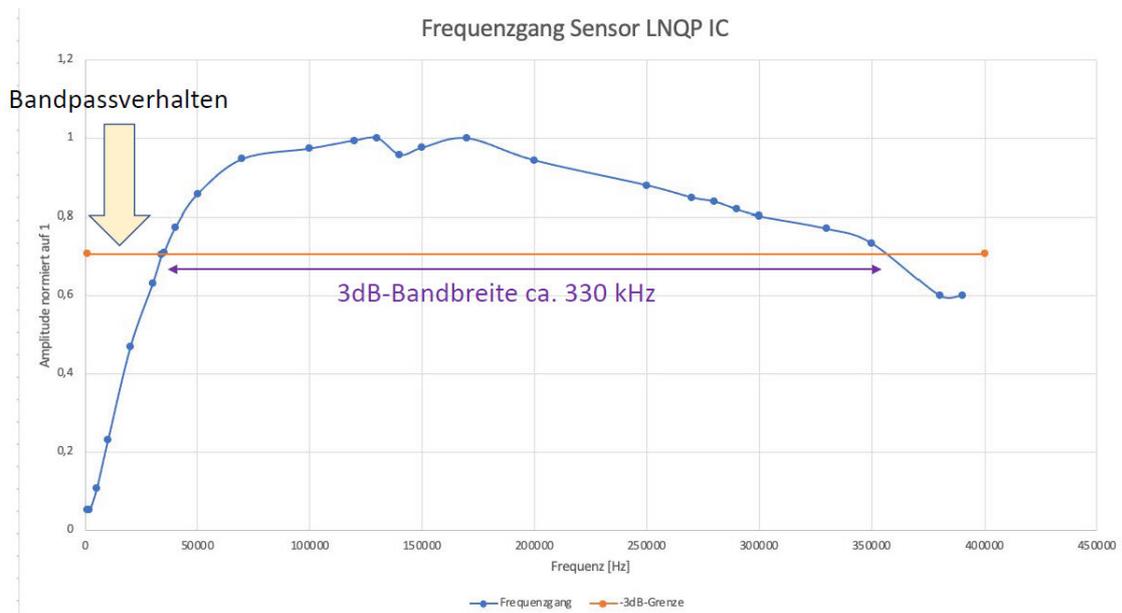


Abbildung 42: Der Frequenzgang des ic-LQNP [38]

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis mit dem Titel:

**Konzeption und Erprobung einer Outdoor-LiFi Anwendung zur automatischen Dimmung von Außenbereichsleuchten**

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 06.05.2022

