

**BACHELORARBEIT**

# **Konzeption und Simulation hierarchischer digitaler Modulationsverfahren für LiFi-Anwendungen mit phosphoreszierenden weißen LEDs**

---

vorgelegt am 12. Juli 2023  
Juliane Kühnel



Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Jan Mietzner  
Zweitprüfer: M.Sc. Max Schurwanz



**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Medientechnik  
Finkenau 35  
20081 Hamburg

## **Zusammenfassung**

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Konzeption einer hierarchischen Modulation für LiFi-Anwendungen. Diese Modulation soll für phosphoreszierende weiße LEDs entwickelt werden und auf unterschiedliche Empfänger angepasst werden. Einer der Empfänger ist dabei auf die Bandbreite des Phosphormantels zugeschnitten, während der andere für die Bandbreite der blauen LED optimiert ist.

Anhand einer Simulation soll festgestellt werden, ob die entwickelte hierarchische Modulation Einfluss auf die Übertragungsqualität der Signale hat.

## **Abstract**

This thesis deals with the conception of a hierarchical modulation for LiFi applications. This modulation is intended to be developed for phosphorescent white LEDs and adapted to different receivers. One of the receivers is tailored to the bandwidth of the phosphor coating, while the other is optimized for the bandwidth of the blue LED.

Through simulation, it will be determined whether the developed hierarchical modulation has an impact on the transmission quality of the signals.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	5
1.1	Motivation .....	5
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	6
2	Technische Grundlagen .....	7
2.1	VLC .....	7
2.2	Fotodiode .....	12
2.2.1	Rauschen von Optischen Sensoren .....	13
2.3	Hierarchische Modulation .....	14
2.4	Monte-Carlo Simulation .....	15
2.5	Multicast .....	16
3	Modulation bei LiFi.....	17
3.1	On-Off Keying.....	18
3.2	Pulsweitenmodulation.....	19
3.3	Pulsphasenmodulation .....	20
4	Aktueller Forschungsstand .....	22
4.1	Bluefiltering.....	22
4.2	Nutzung von hierarchischer Modulation in DVB-T.....	24
4.3	Experimente zur hierarchischen QAM in VLC-Systemen .....	26
5	Konzeption des Codes .....	29
5.1	Erstellung des Konzepts .....	29
5.2	Phosphor Reaktion .....	31
5.3	Modulationsverfahren .....	32
5.4	Rauschen .....	34
5.5	BER ermitteln .....	35
5.6	Funktionsweise des Codes.....	36
6	Auswertung.....	40
7	Anwendungsbeispiel .....	45

8	Ausblick .....	55
	Literaturverzeichnis .....	56
	Abbildungsverzeichnis .....	59
	Abkürzungsverzeichnis.....	60
	Formelverzeichnis .....	61
	Eigenständigkeitserklärung.....	62

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

LiFi ist ein wachsendes Feld, in welchem es viel aktuelle Forschung gibt.

Dabei ist besonders die große verfügbare Bandbreite im Lichtspektrum und das damit in Verbindung stehende Potential für hohe Datenrate interessant. Dieses ist von großer Bedeutung, da die Frequenzen zur Datenübertragung mit der fortschreitenden Digitalisierung immer knapper werden. Die Möglichkeit eine Ergänzung für das IoT (Internet of Things) zu schaffen hat somit eine große Attraktivität.

Ein großer Vorteil von LiFi ist es, dass das entsprechende Licht zur selben Zeit als Raumbeleuchtung und Datenübertragung genutzt werden kann. Somit bietet es eine energieeffiziente Möglichkeit Kommunikation im Nahbereich umzusetzen.

Außerdem hat die Übertragung per sichtbarem Licht den Vorteil, dass Lichtwellen keinen Einfluss auf Radiowellen haben, wodurch ein Einsatz der Technologie in elektromagnetisch empfindlichen Bereichen ermöglicht wird.

Um eine effiziente Ergänzung darstellen zu können, soll der größtmögliche Teil der Potenziell zur Verfügung stehenden Bandbreite genutzt werden. Um dies zu ermöglichen, gibt es bereits mehrere Ansätze, wie zum Beispiel die Unterdrückung des Phosphoranteils des Lichtspektrums anhand eines optischen Filters. So kann die deutlich höhere Bandbreite der blauen LED genutzt werden. Bei einer Nutzung von sowohl dem Phosphoranteil und der blauen LED, bieten sich nun neue Möglichkeiten das Potential von LiFi-Anwendungen zu nutzen.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Konzeption einer hierarchischen Modulation für LiFi-Anwendungen. Bei LiFi-Anwendungen ist es eines der Ziele die Lichtquelle zur selben Zeit als Möglichkeit der Datenübertragung und als Raumbelichtung zu nutzen.

Um bei dieser eine hohe Lichtqualität zu erreichen, werden für Weißlicht meist blaue LEDs mit einer Phosphorschicht genutzt. Für die Datenübertragung ist dabei relevant, dass die blaue LED mit einer Bandbreite von etwa 20MHz übertragen kann, während die Phosphorschicht nur eine Bandbreite von etwa 1MHz unterstützen kann. Um eine höhere Bandbreite zu erhalten, wird in aktuellen LiFi-Systemen der Phosphoranteil des Lichtspektrums gefiltert. Dafür wird ein optischer Filter genutzt, welcher nur den Blauanteil des Lichts passieren lässt. Dieses Verfahren wird auch „Bluefiltering“ genannt.

Im Laufe dieser Arbeit soll nun eine Alternative zu diesem Verfahren entwickelt werden. Der Ansatz ist dabei ein hierarchisches digitales Modulationsverfahren zu entwickeln. Durch dieses Verfahren soll es möglich werden sowohl den Phosphoranteil als auch den Blauanteil des Lichtspektrums zu nutzen.

Dabei soll ein Signal nach der konzipierten hierarchischen Modulation an unterschiedliche Empfänger gesendet werden. Zum einen soll es einen „Low-Cost“ Empfänger geben, welcher den Phosphoranteil empfängt, und einen „State-of-the-Art“ Empfänger, welcher den Blauanteil nutzt.

Um das konzipierte Modulationsverfahren zu testen, soll eine MATLAB-Simulation entstehen. Anhand dieser soll die Bitfehlerrate des Verfahrens für die einzelnen Empfänger bestimmt werden. In einem Vergleich mit entsprechenden Einzelübertragungen an die einzelnen Empfänger sollen die Bitfehlerkurven dann gegenübergestellt werden.

## 2 Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen zum Verständnis der in dieser Arbeit behandelten Themen und Aspekte vorgestellt. Diese Grundlagen beinhalten sowohl die technischen Details als auch die technischen Komponenten, welche für eine optische Datenübertragung relevant sind. Anschließend werden die standardisierten Modulationsverfahren für optische Datenübertragungen vorgestellt. Diese stellen eine wichtige Grundlage für die Konzeption der hierarchischen Modulation dar, welche im Verlauf dieser Arbeit entstanden ist.

### 2.1 VLC

Visual Light Communication, kurz VLC, ist eine Technik der Datenübertragung, bei der sichtbares Licht als Übertragungsweg genutzt wird. Die Motivation dahinter ist es, die bereits vorhandene Raumbelichtung als sogenannte Optical Wireless Communication (OWC) zu nutzen. Dafür sollen die bereits weit verbreiteten LEDs (light-emitting diode) genutzt werden.

Für die Übertragung werden die elektromagnetischen Wellen des Lichts genutzt, um eine Datenübertragung auf kurze Entfernung zu realisieren. Das sichtbare Lichtspektrum, welches für diese Übertragungen zur Verfügung steht, liegt zwischen 380nm und 780nm[1]. Dies entspricht einer Bandbreite von 750THz für sichtbares Licht[1].

VLC kann sich jedoch auch den für das menschliche Auge nicht sichtbaren Bereichen von Infrarot und Ultraviolett bedienen, wodurch sich das insgesamt zur Verfügung stehende Spektrum auf den Spektralbereich von 200nm bis 1600nm erweitert. Damit ist es um ein Vielfaches größer als das traditionelle Funkspektrum mit 300GHz. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei optischen Frequenzen keine Lizenzen erworben werden müssen.

Bei einem beispielhaften VLC-System wird eine optische Quelle wie zum Beispiel eine LED oder Laserdiode genutzt, um die Daten zu übertragen. Diese Daten werden durch eine Intensitätsmodulation, also eine Veränderung der Helligkeit, übertragen. Als Empfänger kann ein simpler Fotodetektor dienen. Aber auch eine einfache Kamera, wie sie mittlerweile zur Grundausstattung der meisten Mobilgeräte wie Smartphones und Laptops gehört, kann zur Verarbeitung der Daten genutzt werden.

Der Begriff LiFi steht für Light Fidelity. Er wurde von Professor Harald Haas geprägt, in dem dieser eine Verbindung zwischen visuell light communication und der Nutzung im Alltag herstellte[2].

Bei LiFi handelt es sich um eine Unterkategorie von VLC. Es handelt sich dabei um eine Kommunikations- und Netzwerkvariante, welche hohe Datenübertragungsraten unterstützt. Dabei soll LiFi als alternative oder zumindest als Unterstützung zu Wi-Fi dienen.

Eine der Motivationen für die Entwicklung von LiFi ist die Tatsache, dass Radiofrequenzen für kabellose Radiosysteme nur noch in geringeren Mengen zur Verfügung stehen. Das Lichtspektrum bietet im Gegensatz dazu eine große nutzbare Bandbreite.

Zudem ist ein großer Vorteil von LiFi im Vergleich zu Radiofrequenzen die Tatsache, dass sich Interferenzen leichter kontrollieren lassen.

Während die Kontrolle von Interferenzen bei Radiofrequenzen viel Rechenleistung erfordert, reicht bei optischer Übertragung die Abschirmung durch Wände und die beamforming Eigenschaften der LEDs.

Beamforming ist eine Technik, um Signale zu fokussieren. In der Beleuchtung ist das Beamforming eine durch die Bauform der Lampe gegebene Eigenschaft. Das Ziel dabei ist es, dass das Licht nur an den Stellen ankommt, wo es auch benötigt wird.[2]

So können zum Beispiel einzelne Arbeitsplätze durch individuelle Lampen beleuchtet werden, deren Abstrahlwinkel so gewählt sind, dass nur der entsprechende Arbeitsplatz beleuchtet wird. Die folgende Grafik zeigt ein Beispiel für ein solches Set-Up.

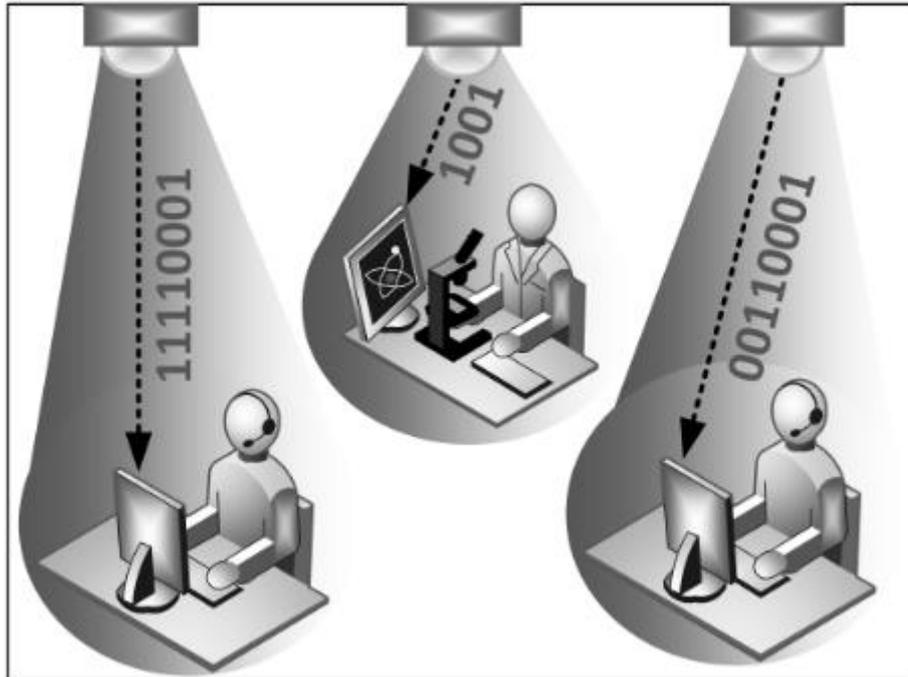


Abbildung 1 Darstellung des Konzepts von Beamforming [1, S. 8]

Dieses Beamforming kann genutzt werden, um Interferenzen zwischen den einzelnen LiFi Übertragungen zu minimieren. Ein weitere Anwendungszweck liegt darin das Streulicht der restlichen Raumbelichtung zu minimieren, um so Störsignale bei den Übertragungen verringern zu können.

Bei einer Datenübertragung mittels Radiowellen im selben räumlichen Bereich, müssen solche Vorkehrungen nicht getroffen werden. Das Lichtspektrum, welches für die Übertragung genutzt wird, beeinflusst die Radiowellen nicht und hat somit keine Auswirkungen auf die Radiofrequenzen.

Ein weiterer großer Punkt, welcher in Zusammenhang mit LiFi oft erwähnt wird, ist die Nachhaltigkeit.

Da die bereits vorhandene Infrastruktur der Stromversorgung für die Datenübertragung genutzt werden kann, entstehen deutlich geringere Kosten als bei einem komplett neu installierten System. Die vorhandene Beleuchtung kann somit einfach durch LiFi fähige Hardware ersetzt werden.

Außerdem gilt LiFi als grünes System[1], da keine weitere Energie für die Datenübertragung benötigt wird, als für die bereits genutzte Raumbelichtung.

Das volle Potenzial von LiFi kann erst dann erreicht werden, wenn es zusätzlich zu einer effizienten Datenübertragung auch alle Beleuchtungsstandards erfüllt. [1]

Zu diesen Beleuchtungsstandards gehören zum Beispiel die in DIN EN 12464-1 festgelegten Mindestwerte für die Beleuchtungsstärke an unterschiedlichen Arbeitsplätzen. So muss laut dieser Norm ein Arbeitsplatz, welcher für Tätigkeiten wie lesen, schreiben, tippen und Datenverarbeitung ausgelegt ist, mit einem Mindestwert von 500lx beleuchtet werden.

Bei Untersuchungs- und Behandlungsräumen in Gesundheitseinrichtungen liegt der entsprechende Mindestwert bei 1000lx. Die entsprechenden Werte sind in den für die Tätigkeit korrespondierenden Tabellen hinterlegt. Es folgen die Auszüge der Tabellen für Bürobereiche und Gesundheitseinrichtungen. Diese Beispiele beziehen sich spezifisch auf die vorgeschlagenen Anwendungsbereiche für LiFi Anwendungen.

Tabelle 34 – Büros

Ref. Nr.	Bereich der Sehaufgabe/Tätigkeit	$\bar{E}_m$ lx		$U_o$	$R_a$	$R_{UGL}$	$\bar{E}_{m,z}$ lx	$\bar{E}_{m,Wand}$ lx	$\bar{E}_{m,Decke}$ lx	Spezifische Anforderungen
		Erforderlich <sup>a</sup>	Modifiziert <sup>b</sup>							
34.1	Ablegen, Kopieren, usw.	300	500	0,40	80	19	100	100	75	
34.2	Schreiben, Tippen, Lesen, Datenverarbeitung	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Bildschirmarbeit, siehe 5.9. Raumhelligkeit, siehe 6.7 und Anhang B. Die Beleuchtung sollte steuerbar sein, siehe 6.2.4. Bei kleineren Einzelbüros gilt die Anforderung an die Wand für die Vorderwand. Für andere Wände könnte eine geringere Anforderung von mindestens 75 lx akzeptabel sein.
34.3	Technisches Zeichnen	750	1 500	0,70	80	16	150	150	100	Bildschirmarbeit, siehe 5.9. Raumhelligkeit, siehe 6.7.
34.4	CAD-Arbeitsplätze	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Bildschirmarbeit, siehe 5.9.
34.5.1	Konferenz- und Sitzungsräume	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Die Beleuchtung sollte steuerbar sein, siehe 6.2.4.
34.5.2	Konferenztisch	500	1 000	0,60	80	19	150	150	100	Die Beleuchtung sollte steuerbar sein, siehe 6.2.4.
34.6	Empfangstheke	300	750	0,60	80	22	100	100	75	Wenn die Empfangstheke regelmäßige Arbeitsplatzaufgaben beinhaltet, sollten diese Bereiche entsprechend beleuchtet werden.
34.7	Archivieren	200	300	0,40	80	25	75	75	50	

<sup>a</sup> Erforderlich: Mindestwert.  
<sup>b</sup> Modifiziert: Berücksichtigt übliche Kontextmodifikatoren in 5.3.3.

Abbildung 2 Tabelle für die Mindestwerte der Beleuchtung in Büros [3, S. 61]

Ref. Nr.	Bereich der Schaufgabe/Tätigkeit	$\bar{E}_m$ lx		$U_o$	$R_a$	$R_{UGL}$	$\bar{E}_{m,z}$	$\bar{E}_{m,Wand}$	$\bar{E}_{m,Decke}$	Spezifische Anforderungen
		Erforderlich <sup>a</sup>	Modifiziert <sup>b</sup>				lx	lx	lx	
47.3	Stationen – Einfache Untersuchungen	300	500	0,60	80	19	100	100	75	Für die normale Untersuchung und besondere Behandlung siehe auch Tabelle 48 – Gesundheitseinrichtungen – Untersuchungsräume (allgemein) und Tabelle 59 – Gesundheitseinrichtungen – Autopsieräume und Leichenhallen.
47.4	Untersuchung und Behandlung	1 000	1 500	0,70	90	19	150	150	100	Raumhelligkeit, siehe 6.7, sollte berücksichtigt werden. Die Beleuchtung sollte steuerbar sein, siehe 6.2.4.
47.5	Nachtbeleuchtung, Beobachtungsbeleuchtung	5	—	—	80	—	—	—	—	$2\,200\text{ K} \leq T_{cp} \leq 3\,000\text{ K}$ Beleuchtungsstärke auf Bodenhöhe.
47.6	Badezimmer und Toiletten für Patienten	200	300	0,40	90	22	75	75	50	Eine niedrigere Farbtemperatur und niedrigere Beleuchtungsstärke für Nachtbeleuchtung sollte berücksichtigt werden.
Zu hohe Leuchtdichten im Gesichtsfeld des Patienten müssen vermieden werden.										
<sup>a</sup> Erforderlich: Mindestwert.										
<sup>b</sup> Modifiziert: Berücksichtigt übliche Kontextmodifikatoren in 5.3.3.										

Abbildung 3 Tabelle für die Mindestwerte der Beleuchtung in medizinischen Umgebungen [3, S. 78]

## 2.2 Fotodiode

In VLC-Systemen werden oftmals Fotodioden als Empfänger eingesetzt. Diese bestehen aus einer n- und p-Halbleiterschicht, welche durch die sogenannte Sperrschicht voneinander getrennt sind.

Bei der Fotodiode ist diese Sperrschicht baulich so gelegen, dass sie für das einfallende Licht gut zugänglich ist. Durch die Photonenenergie des einfallenden Lichts werden die Elektronen aus ihrem Valenzband gelöst und in das höher gelegene Leitungsband angeregt. Dadurch werden in der Sperrschicht freie Ladungsträger erzeugt. Diese freien Ladungsträger bewegen sich aus der Sperrschicht und der Sperrstrom steigt an.

Um diesen Effekt zu bewirken, müssen die auftreffenden Photonen eine Energie aufweisen, welche höher ist als die der Bandlücke.

Der Sperrstrom ändert sich proportional zu der einfallenden Lichtintensität, wobei die Änderungen nahezu trägheitslos umgesetzt werden.

Wird die Diode nun in Sperrrichtung mit einer Spannung versorgt, entsteht ein Fotostrom, welcher entsprechend proportional zum einfallenden Licht ist.

Wenn kein Licht auf die Fotodiode trifft, fließt allerdings trotzdem ein geringer Strom. Diesen Strom nennt man Dunkelstrom.

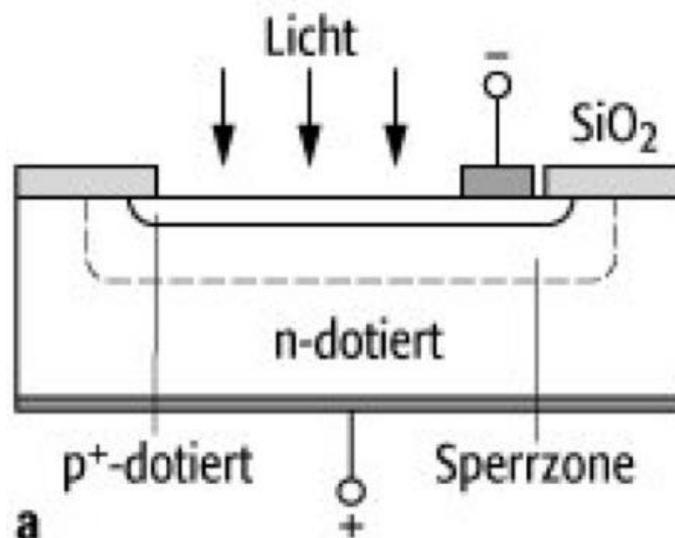


Abbildung 4 Schematischer Aufbau einer Fotodiode[4]

## 2.2.1 Rauschen von Optischen Sensoren

Durch das Rauschen eines Empfängers wird die Empfindlichkeit bestimmt. Bei einem starken Rauschen können nur starke Signale erkannt werden, da sich kleinere Signale nicht von dem Rauschen abheben. Somit wird die Detektierbarkeit von schwächeren Signalen limitiert. Aus diesem Grund ist es das Ziel, das Rauschen der Empfänger so gering wie möglich zu halten.

Zu den verschiedenen Rauschquellen einer Fotodiode gehören das thermische Rauschen, das Rauschen des Verstärkungsprozesses sowie das Schrot- und Dunkelrauschen.

Das thermische Rauschen wird durch den Lastwiderstand der Diode erzeugt. Es tritt durch die thermische Bewegung der Ladungsträger auf und ist unabhängig von der Leistung des einfallenden Lichts.

Durch die Verstärkung des in der Fotodiode entstehenden Fotostroms wird ein Rauschen erzeugt. Dieses ist das Rauschen des Verstärkungsprozesses.

Schrotrauschen entsteht, wenn durch den photoelektrischen Prozess ein elektrisches Signal entsteht. Der Ladungstransport des p-n Übergangs der Fotodiode ist nur im zeitlichen Mittel konstant. Im momentanen Fluss kommt es zu Schwankungen, da der Ladungstransport in Einheiten der Elementarladung stattfindet.

Durch den Dunkelstrom der Diode entsteht zusätzlich noch das Dunkelrauschen. Besonders bei kleinen Signalen ist das Dunkelrauschen ein großer Teil des gesamten Rauschens am Empfänger.[5]

## 2.3 Hierarchische Modulation

Hierarchische Modulation ist ein Überbegriff, um eine gestufte Modulation zu realisieren. Oft wird sie genutzt, um das gleiche Signal in unterschiedlichen Qualitäten zu senden. Dabei wird das Sendesignal in zwei Datenströme aufgeteilt. Diese erhalten unterschiedliche Priorisierungen, wobei der höher priorisierte Datenstrom eine deutlich robustere Modulation verwendet als der Datenstrom mit der niedrigeren Priorität. So kann der hochpriorisierte Datenstrom zum Beispiel mit QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) moduliert sein und der niedrig priorisierte Datenstrom mit einer 64-QAM (Quadraturamplitudenmodulation).

Die einzelnen Datenströme werden nach der Modulation zu einem Sendestrom zusammengeführt, wodurch nur ein Signal übertragen werden muss. Welchen der beiden Datenströme ein Empfänger verarbeiten kann, hängt von verschiedenen Bedingungen, wie technische Limitierungen des Empfängers oder unterschiedlicher Empfangsbedingungen ab.

So kann ein technisch guter Empfänger bei guten Empfangsbedingungen den niedriger priorisierten Datenstrom empfangen, welcher aufgrund der höheren Modulation mehr Informationen enthält. Ein schlechterer Empfänger hingegen kann nur den hochpriorisierten Datenstrom verarbeiten und empfängt dadurch nur die notwendigen Informationen.

Dies ist hilfreich, um ein Signal für verschiedene Empfänger mit unterschiedlichen Bandbreiten verfügbar zu machen und sicherzustellen, dass ein Sendesignal von allen Empfängern verarbeitet werden kann. Außerdem kann dadurch eine Sicherheit geschaffen werden, dass ein Signal auch bei sich verschlechternden Empfangsbedingungen empfangen werden kann.

Der Unterschied zwischen den Datenströmen kann sich durch eine schlechtere Audioqualität oder eine schlechtere Bildqualität bemerkbar machen. So kann zum Beispiel bei dem hochpriorisierten Datenstrom ein SD-Bild übertragen werden, während der niedrigpriorisierte Datenstrom genug Zusatzdaten transportieren kann, um ein HD-Bild zu übertragen.

## 2.4 Monte-Carlo Simulation

Für die Bewertung von Übertragungsqualitäten muss eine Übertragungstrecke in mehreren Durchläufen getestet werden. Dadurch kann festgestellt werden, wie die durchschnittliche Übertragungsqualität sich verhält. Eine Möglichkeit, um diese Ergebnisse zu erhalten, ist es viele Übertragungen nacheinander zu simulieren und aus den Ergebnissen einen Mittelwert zu bilden.

Dafür kann eine Monte-Carlo-Simulation verwendet werden. Dabei handelt es sich um eine Art Mehrfachwahrscheinlichkeitssimulation.

Die Monte-Carlo Simulation ist ein mathematisches Verfahren, welches zur Schätzung von möglichen Ergebnissen genutzt wird. Dabei wird ein spezifisches Experiment üblicherweise tausende Male wiederholt und aus den Ergebnissen wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung erstellt.

Dadurch, dass die Ergebnisse auf der tatsächlichen Durchführung des Experiments beruhen und nicht wie bei anderen Verfahren auf reiner Berechnung ist diese Wahrscheinlichkeitsverteilung deutlich genauer. Aufgrund dieser Genauigkeit wird die Monte-Carlo Simulation auch für langfristige Vorhersagen verwendet.

Ein weiterer Vorteil der Monte-Carlo Simulation ist, dass sie sehr flexibel ist. Diese Art der Simulation kann auf verschiedene Arten von Problemen angewandt werden, um Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu bestimmen.

Als Beispiel für eine solche Simulation kann ein Würfelspiel dienen. Wenn man zwei Würfel nimmt und mit diesen würfelt, gibt es 36 verschiedene Möglichkeiten für das Ergebnis. Die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Ergebnisse kann man berechnen. Bei einer Monte-Carlo-Simulation wird stattdessen tausendmal, oder öfter, gewürfelt. Anhand der erhaltenen Ergebnisse kann eine genauere Vorhersage der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Ergebnisse getroffen werden.

## 2.5 Multicast

Als Multicast wird eine Kommunikationsmethode in der Netzwerktechnik bezeichnet, bei der einzelne Datenpakete zeitgleich an eine ausgewählte Gruppe Empfänger übertragen wird. Im Gegensatz zur Unicast-Übertragung, bei der die Datenpakete nur an einzelne Empfänger verteilt werden, bietet Multicast eine effizientere Verteilung der Daten in einer Gruppe von Empfängern.

Bei einer Multicast Übertragung sendet der Sender das Multicast-Datenpaket an eine spezielle Multicast IP-Adresse. Im Header dieses Datenpakets wird die Empfängergruppe spezifiziert. Innerhalb der Netzwerkstruktur von Routern und Switches, wird dieses Datenpaket nun an alle Mitglieder der Empfängergruppe weitergeleitet.

Da das Datenpaket nur einmal gesendet wird, bietet dies eine effiziente Nutzung der Netzwerkbandbreite. Da die Informationen über die Empfängergruppe innerhalb des Datenpakets definiert wird, lässt sich eine Multicast Übertragung gut skalieren.

Eine weitere Übertragungsform, bei der Datenpakete an mehrere Teilnehmer des Netzwerks verteilt werden, ist Broadcast. Dabei wird ein Datenpaket an eine Broadcast IP-Adresse gesendet. Durch die Netzwerkstruktur wird das Datenpaket dann an alle Teilnehmer verteilt.

Der Nachteil dieser Übertragung im Vergleich zu Multicast ist es, dass so großer Traffic entsteht, da das Datenpaket auch an die Empfänger weitergeleitet wird, die es nicht benötigen. Aus diesem Grund sollte von der Nutzung von Broadcast Übertragungen abgesehen werden, wenn es sich nicht um allgemeine Informationen für alle Teilnehmer des Netzwerks handelt.

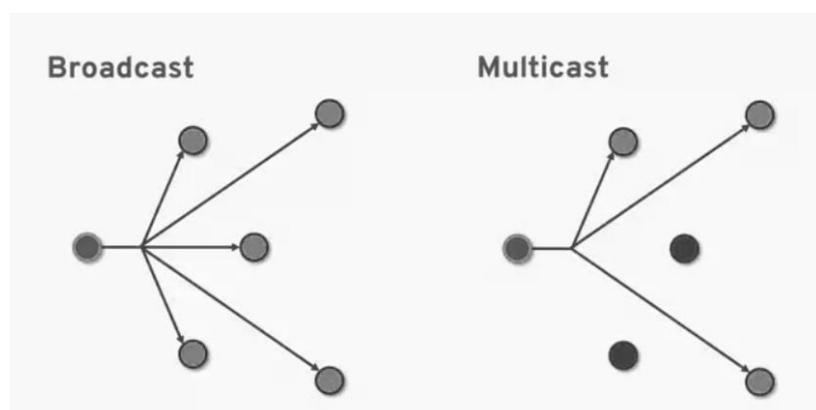


Abbildung 5 Grafische Darstellung von Broadcast und Multicast

### 3 Modulation bei LiFi

Im Hinblick auf die optische Übertragung gibt es einige Punkte, welche bei der digitalen Modulation beachtet werden müssen. Die Modulation der Signale kann verschiedene Auswirkungen auf das sichtbare Licht haben. Da für die LiFi Übertragung die Raumbelichtung genutzt werden soll, muss darauf geachtet werden welche Auswirkungen die Modulationen auf den Lichteindruck für das menschliche Auge hat.

So muss zum Beispiel darauf geachtet werden, dass trotz Datenübertragung eine Flimmerfreiheit der Raumbelichtung gegeben ist. Dieses Flimmern wird auch als temporale Lichtartefakte (TLA) bezeichnet. Diese TLA können den Sehkomfort und darauf bezogen auch die Arbeitsleistung vermindern. Außerdem kann es zu physiologischen Effekten kommen wie zum Beispiel Müdigkeit und Kopfschmerzen. [3]

Auch das Dimmen der LEDs kann beeinflusst werden, wodurch der Nutzer nicht mehr die Möglichkeit hat, die Helligkeit der Beleuchtung nach Belieben zu verändern.

Bei LEDs handelt es sich um eine inkohärente Lichtquelle. Da diese aus einem breiten Spektrum an elektromagnetischen Wellen besteht, ist es nicht möglich, die Phase des Signals zur Datenübertragung zu nutzen. Zur Übertragung von Daten mit LEDs sind nur reellwertige Wellenformen geeignet, was die Bandbreiteneffizienz beeinträchtigt.

Anstelle der Phasenmodulation wird bei LEDs die Intensitätsmodulation verwendet. Dabei wird die Helligkeit der Lichtquelle moduliert, wobei zu beachten ist, dass eine Helligkeit zu keinem Zeitpunkt negativ sein kann. Somit muss das Übertragungssignal reellwertig und nicht negativ sein.

Viele der Modulationsverfahren, welche diese Ansprüche erfüllen, gehören zu den linearen Modulationsverfahren. Eine solches lineares Modulationsverfahren lässt sich anhand folgender Formel darstellen.

$$s(t) = \sum_k x[k] \cdot g_{\text{Tx}}(t - kT) \quad (3.1)$$

Dabei ist  $s(t)$  das Übertragungssignal. Der Zeitindex wird durch  $k$  beschrieben, wodurch  $x[k]$  das Datensymbol an  $k$ -ter Stelle beschreibt.  $g_{\text{Tx}}$  beschreibt den Basisbandpuls und  $T$  die Symbol Periode.

### 3.1 On-Off Keying

Die einfachste Modulationstechnik für LiFi ist das On-Off Keying in der spezifischeren Form des Non-Return-to-Zero On-Off Keying (NRZ-OOK). Dabei wird jeweils ein signifikanter Wert als „off“ und „on“ definiert, ohne dass ein zusätzlicher Ruhezustand übertragen wird.

In diesem Verfahren wird das Informationssignal in die Lichtstärke aufmoduliert. Durch ein Wechseln in der Lichtintensität, wird dieses Signal übertragen. Dabei wird eine höhere Lichtintensität als „1“ erkannt, wenn diese Intensität für die Länge des Symbols T festgestellt wird. Eine „0“ hingegen wird erkannt, wenn eine niedrigere Intensität festgestellt wird.

Bei der Übertragung von langen Abfolgen desselben Symbols, kann es zu einem Flackern der LED kommen. Um dies zu vermeiden, werden Leistungscodes, wie der 8B10B oder der Manchester-Code verwendet.

Bei Verwendung des Manchester-codes wird eine logische „0“ als OOK-Symbol „01“ und eine logische „1“ als OOK-Symbol „10“ übertragen. Dadurch verdoppelt sich die zur Übertragung benötigte Bandbreite des Signals, im Vergleich zu einer einfachen Binärcodierung.

Eine 8B10B-Codierung funktioniert, indem ein 8-Bit Symbolwort auf ein 10-Bit-Wort abgebildet wird. Durch diese Konvertierung kann verhindert werden, dass sich lange Abfolgen von Nullen oder Einsen bilden. Dies erleichtert die Taktrückgewinnung und Datenregenerierung.

Nach dem IEEE-Standard 802.15.7 gibt es für die OOK-Modulation zwei Methoden, die Art der Modulation mit dem Dimmen der LEDs zu verbinden. In der ersten Methode werden die festgelegten Intensitäten für die Zustände so angepasst, dass die Intensität der logischen „1“ dem gewünschten Intensitätswert entspricht. Da die Periode der Übertragung nicht verändert wird, bleibt die Bitrate bei dieser Methode gleich.

Die andere anderen Methode wird die Intensität nicht verändert. Bei dieser wird dem Signal eine Kompensationszeit hinzugefügt, diese sorgt dafür, dass die LED während eines Takts frühzeitig abgestellt wird. Dadurch wird die durchschnittliche Taktlänge der Wellenform verändert, wodurch das Dimmen realisiert wird.

## 3.2 Pulsweitenmodulation

Bei einer Pulsweitenmodulation (PWM) handelt es sich um eine digitale Modulationsart. Bei dieser Modulationsart wird aus einem realwertigen unipolaren Signal ein Rechteck-Signal erzeugt.

Die Amplitude und die Impulsrate des Rechteck Signals ist dabei gleichbleibend. Die Länge des Signals ist dabei veränderbar und in Abhängigkeit von der momentanen Amplitude des Informationssignals.

Dabei wird das Verhältnis zwischen dem Impuls und der Periodendauer verändert. Dieses Verhältnis wird als Tastgrad bezeichnet. Die benötigte durchschnittliche Energie pro übertragenen Wert ändert sich in Abhängigkeit von dem modulierten Signal, da ein breiteres Signal mehr Energie benötigt. Aufgrund dieser Tatsache wird PWM nur selten für die optische Datenübertragung eingesetzt. Die Änderung der Energie des Signals kann allerdings auch als Vorteil für andere Verwendungszwecke dienen. So wird PWM regelmäßig genutzt, um die Dimmbarkeit der LEDs zu unterstützen. Durch die sich ändernde Energie des Signals ändert sich auch die ausgegebene Lichtleistung der LED. So kann anhand der Länge des Pulses der Lichtoutput variiert werden. Die Möglichkeit, das Helligkeitsempfinden anhand des Tastgrads zu kontrollieren ist Hardware schonender als eine Änderung der Eingangsspannung.

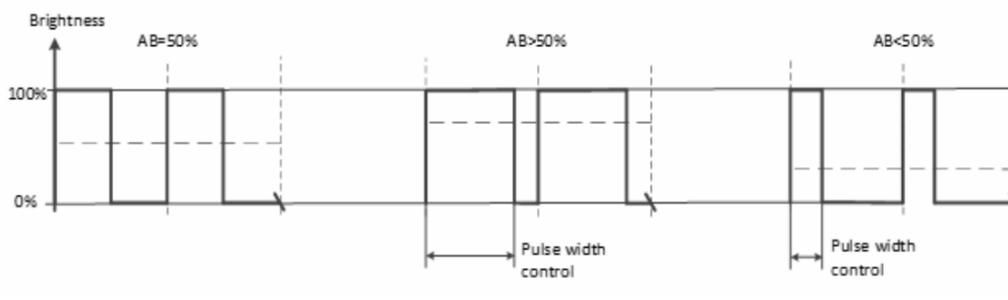


Abbildung 6 Dimmen mit Hilfe von Pulsweitenmodulation [6]

### 3.3 Pulsphasenmodulation

Bei der Pulsphasenmodulation handelt es sich um ein digitales Modulationsverfahren, bei dem das modulierte Signal eine feste Amplitude und Pulslänge besitzt. Die Phasenlage des modulierten Signals im Bezug zum Trägersignal, hängt dabei von der Amplitude des Informationssignals ab.

Für diese Modulation wird das Eingangssignal in diskrete Zeitabschnitte unterteilt. Diesen Abschnitten werden dann bestimmte Positionen innerhalb des Zeitfensters der Übertragung zugewiesen. Diese Position ist abhängig von der zu übertragenden Information. In Abbildung 7 ist eine 2-PPM Modulation dargestellt. Es werden 5 Takte dargestellt. Pro Takt wird ein Bit übertragen, dabei wird eine logische „0“ übertragen, wenn sich der Puls in der ersten Hälfte des Taktes befindet und eine logische „1“, wenn dieser in der zweiten Hälfte ist.

Diese Modulation wird oft auf Grund der Einfachheit und Robustheit gegenüber Störungen eingesetzt. Da sich bei diesem Verfahren nur die Position des Pulses ändert, ist die durchschnittliche Energie der Signale gleichbleibend, was ein wichtiger Punkt für optische Übertragungen ist.

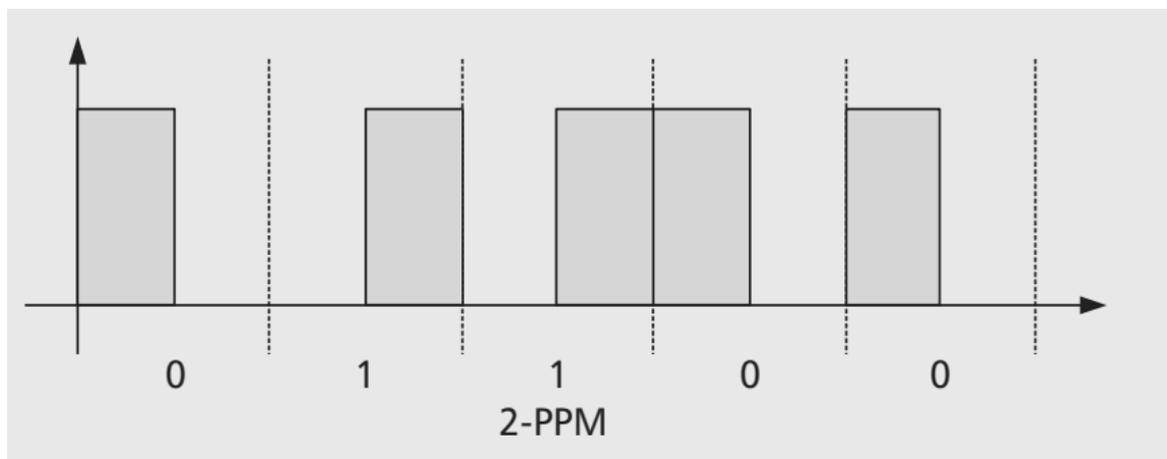


Abbildung 7 Konzept einer 2-PPM [6]

Eine in der optischen Datenübertragung genutzte Variante der PPM ist die Variable Puls Position Modulation, kurz VPPM. Bei dieser Variante wird 2-PPM mit einer Pulsweitenmodulation kombiniert. Bei dieser Modulation wird das Tastverhältnis für jedes Symbol zur Kodierung der Bits verändert. Der Begriff „Variable“ in VPPM bezieht sich damit auf die

Änderung der Pulsweite in Bezug auf den gewünschten Dimmgrad[17]. Der Dimmgrad gibt an, in welchem Verhältnis die Lichtintensität reduziert oder erhöht wird. Ein Dimmgrad von 100% entspricht dabei der maximalen Helligkeit[6]. In Abbildung X ist ein Beispiel für eine VPPM mit einem Dimmgrad von 75% dargestellt. Dieser Dimmgrad wird mit einer Pulsweite von ebenfalls 75 % umgesetzt. Aufgrund dessen lässt sich bei einem Dimmgrad von 100% keine Datenübertragung realisieren, da sich die Pulse bei einer Pulsweite von 100% nicht differenzieren lassen.

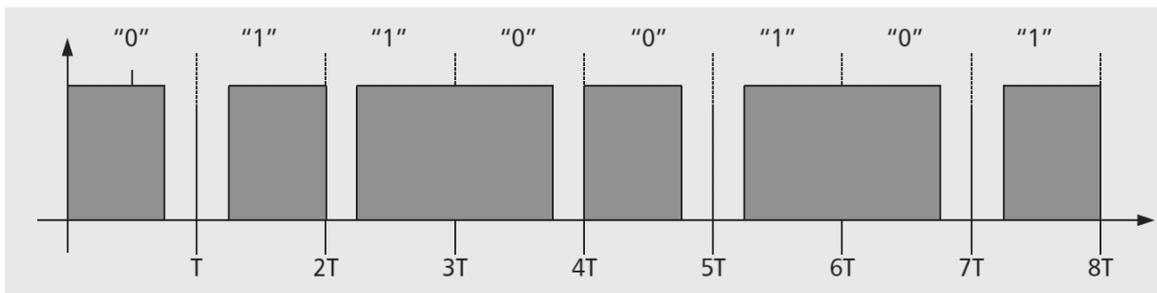


Abbildung 8 Konzept einer VPPM mit 75% Pulsweite [6]

## 4 Aktueller Forschungsstand

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem aktuellen Forschungsstand zu dem Thema hierarchische Modulation bei VLC-Übertragungen. Da es in diesem spezifischen Bereich noch keine verfügbaren Forschungsergebnisse gibt, wurden die einzelnen Aspekte der Übertragung betrachtet und zu diesen Punkten die Recherche Ergebnisse zusammengetragen. Dabei wurde besonders auf vergleichbare Modulationsverfahren in anderen Anwendungen geachtet, wobei sich insbesondere der Themenbereich des digitalen Video-Broadcastings als wichtiger Punkt dargestellt hat.

Auch einzelne Themenbereiche wie das Bluefiltering wurden betrachtet, da in diesem Bereich bereits versucht wird, die Datenraten der VLC-Übertragung anhand der Nutzung der blauen LED zu verbessern. Zum Ende wird in diesem Teil noch ein bereits durchgeführtes Experiment zum Thema hierarchische Modulation bei VLC vorgestellt, welches sich jedoch hauptsächlich mit der Videoübertragung anhand einer solchen Methode beschäftigt.

### 4.1 Bluefiltering

Die Lichtabgabe einer phosphor-beschichteten LED besteht aus dem blauen Licht der LED und dem vom angeregten Phosphor abgegebenen gelben Licht. Da die Phosphorschicht eine langsame Zeitkonstante hat, wird die Datenrate dadurch eingeschränkt.

Diese Limitierung wird auf zwei unterschiedliche Weisen umgangen. Zum einen kann OFDM-Modulation genutzt werden, um die Datenrate zu erhöhen. OFDM steht dabei für Orthogonal Frequency-Division Multiplex, wobei es sich um ein Vielträgerverfahren handelt.

Die andere Methode ist, am Empfänger einen Blaufilter zu verbauen.

Bei diesem Blaufilter handelt es sich um einen optischen Filter, welcher niedrigere Frequenzen, wie die des angeregten Phosphors, unterdrückt. Der blaue Anteil des abgegebenen Lichts wird dafür höher moduliert, wodurch der langsamere Spektralanteil des Phosphors gefiltert werden kann.

Durch die Filterung dieses Spektralanteils wird der Kanal flach. Es wurde in [7] argumentiert, dass ein optischer Blaufilter die niedriger frequenten Komponenten des Signals ab-

schwächt, was dazu führen kann, dass für die übertragene Information relevante Komponenten des Signals unterdrückt werden. Dies würde bedeuten, dass ein solcher Blaufilter für den erhofften Effekt nicht geeignet wäre.

Diese Annahme wurde in weiteren Arbeiten aufgegriffen und weiter diskutiert. Dabei kam [5] zu dem Ergebnis, dass die Effizienz des Einsetzens eines Blaufilters stark abhängig ist von den spektralen Eigenschaften des optischen Filters.

Mit zunehmender Selektivität des Blaufilters steigt auch die mögliche Datenrate der Übertragung. Dabei wird eine gute Selektivität eines Filters dadurch definiert, dass er nicht nur den Spektralanteil des gelben Phosphors eliminieren kann, sondern auch andere Spektralbereiche der Raumbeleuchtung im sichtbaren Bereich. Dies bezieht sich auf Streulicht der umliegenden, für die Übertragung irrelevanten Beleuchtung.

Durch das Filtern des gelben Spektralanteils wird die Gesamtsignalstärke reduziert, da jedoch auch das Umgebungsrauschen gefiltert wird, verbessert sich der Signal-Rausch-Abstand des Signals. Diese Verbesserung beträgt laut [8] etwa 1,3%.

Aus mehreren unabhängigen Abhandlungen ergab sich ein ähnliches Ergebnis. So sind alle Experimente zu dem Fazit gekommen, dass ein gut angepasster optischer Filter die Datenrate der Übertragung verbessern kann. Wichtig ist dabei einen optischen Filter mit einer hohen Selektivität zu verwenden und diesen auf den Anwendungsbereich anzupassen.

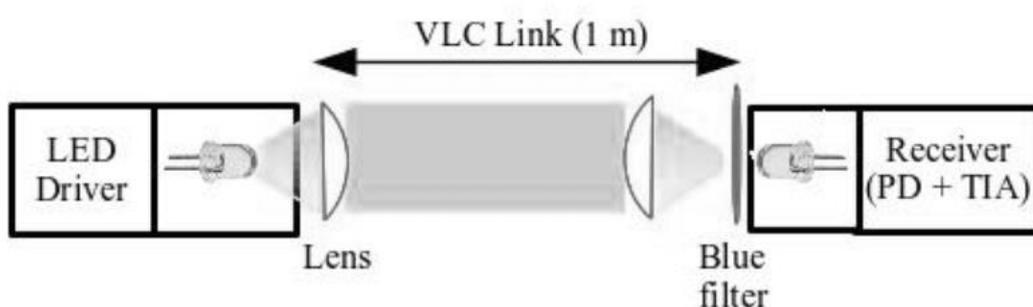


Abbildung 9 Darstellung des Aufbaus eines VLC-Systems mit Bluefiltering [7]

## 4.2 Nutzung von hierarchischer Modulation in DVB-T

Hierarchische Modulation findet bereits Anwendung in der Datenübertragung.

Im Digitalen Video-Broadcasting (DVB) wird diese Art der Modulation besonders im Bereich des Antennen-Fernsehens genutzt (DVB-T).

Dies liegt daran, dass die digitale Übertragung einen großen Nachteil gegenüber der analogen Übertragung hat, wenn es um schlechte Empfängerverhältnisse geht. Während bei einem analogen Signal das empfangene Video- und Audiosignal verrauschter wird, wenn die Empfangsbedingungen schlechter werden, bricht die Verbindung jedoch selten komplett ab.

Bei der Digitalen Übertragung werden das Video und Audiosignal klar übertragen, bis der Quasi Error Free (QEF) Schwellenwert überschritten wird. Dieser QEF-Wert gibt an, ob es sich um ein korrekt arbeitendes System handelt oder nicht.

Der Wert ist auf maximal einen nichtkorrigierbaren Fehler pro Stunde definiert[9]. Sobald dieser Wert überschritten wird, kommt es in der Videoübertragung zum sogenannten Block-Effekt.

Wenn sich die Empfangsbedingungen weiter verschlechtern, und auch die „Forward-Error-Correction“ (FEC) Schwelle überschritten wird, kommt es zu Abbrüchen der Verbindung.

Durch die Anwendung einer hierarchischen Modulation des Sendesignals soll eine bessere Anpassung an die verschiedenen Empfängerbedingungen ermöglicht werden.

Bei Anwendung der Hierarchischen Modulation für DVB-T wird der Datenstrom in zwei getrennte Ströme aufgeteilt. Einer dieser Ströme ist der hochpriorisierte Strom mit einer niedrigeren Datenrate, während der Strom mit der niedrigeren Priorisierung eine höhere Datenrate hat und somit eine höhere Auflösung des Signals bieten kann.

Beide Ströme werden von jeweils separaten FEC-Blöcken verarbeitet, welche sich durch ihre unterschiedlichen Codierungsraten unterscheiden. Die Codierungsraten, welche für den „Low-Priority“ Strom genutzt werden können, sind dabei die gleichen wie bei einer Übertragung ohne hierarchische Modulation. Er hat somit eine Grundcodierungsrate von  $1/2$ .

Um höhere Datenraten zu erreichen, bei denen weniger Fehlerkorrektur notwendig ist, ist es möglich durch Punktierung eine geringere Codierungsrate zu erreichen. Die punktierten Codierungsraten sind  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $5/6$  und  $7/8$ . [10]

Für den hoch priorisierten Strom sollten nur die robustesten Codierungsraten verwendet werden. Somit kommen hier nur die Codierungsraten  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{2}{3}$  und  $\frac{3}{4}$  zur Anwendung.

Die beiden Ströme werden dann im inneren Zwischenspeicher zusammengeführt und es werden Sendesymbole erstellt. Diese Sendesymbole bestehen je nach gewähltem Modulationsverfahren aus 4 Bits für 16-QAM und 6 Bits für 64-QAM. Die ersten beiden Bits jedes Symbols stammen dabei aus dem Hochpriorisierten Strom und die restlichen jeweils 2 bei 16-QAM oder 4 bei 64-QAM stammen aus dem niedrigen priorisierten Strom.

Anschließend wird ein Gray-Mapping durchgeführt, um die Symbole in 16-QAM oder 64-QAM Konstellationen zu modulieren. Dabei werden die Konstellationen so abgebildet, dass die ersten beiden Bits des Symbols in einem Quadranten immer gleich sind.

Dies ist in Abbildung 10 beispielhaft dargestellt. Dadurch können auch bei starken Störungen wie Rauschen und höheren Modulationen die Quadranten unterschieden werden. Es ermöglicht, dass der hoch priorisierte Strom weiterhin so decodiert werden kann, als wäre er mit einer QPSK-Modulation moduliert worden. Dadurch werden auch bei starken Störungen mögliche Abbrüche der Übertragung vermieden.

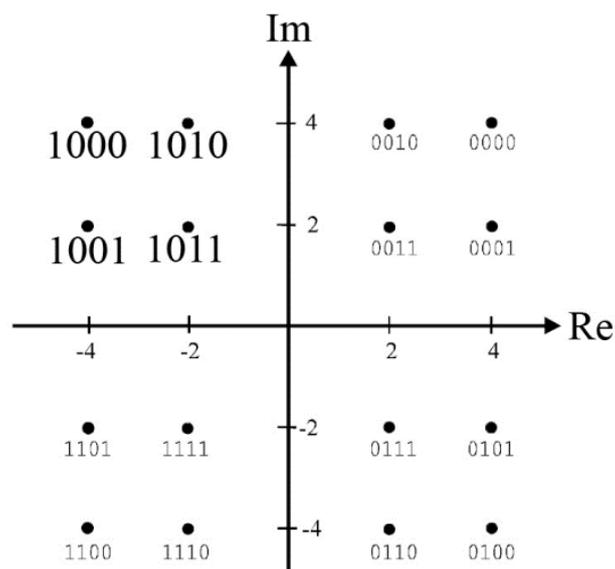


Abbildung 10 16-QAM Konstellation [10]

### 4.3 Experimente zur hierarchischen QAM in VLC-Systemen

Durch ausgiebige Recherche hat sich ergeben, dass es kaum Abhandlungen und Forschungsergebnisse zu dem Thema hierarchische Modulation bei VLC-Anwendungen gibt. Eine der wenigen Abhandlungen zu dem Thema beschäftigt sich mit der Qualitätsverbesserung bei der Übertragung von Multimedia Streams über VLC.

VLC soll als Teil der 5. Generation der mobilen Netzwerke das Internet of Things (IoT) unterstützen. Dabei soll es besonders in Bereichen eingesetzt werden, in denen Radiowellen zu Interferenzen führen könnten. Ein wichtiger Anwendungsbereich dabei ist Echtzeit-Videostreaming in Krankenhäusern und Flughäfen.

In dem folgenden erklärten Paper [11], geht es um die Übertragung von digitalem Video-Broadcasting. Dabei wird dessen Übertragung über VLC untersucht. Dabei wurde nach einem Weg gesucht die Qualität des wahrgenommenen Multimedia Streams zu verbessern.

Der vorgeschlagene Weg ist dabei eine Hierarchische Quadratur Amplituden Modulation (HQAM). Dabei werden die Datenströme priorisiert übermittelt. Relevant dabei ist zu beachten, dass die Priorisierung in Zusammenhang mit den wahrgenommenen Reizen des Endnutzers steht.

In dem vorgestellten Paper wird die hierarchische QAM für diesen Anwendungszweck vorgeschlagen und evaluiert.

Übertragene QAM-Symbole können abhängig von ihrer Modulationsordnung unterschiedliche Mengen an Informationen übertragen. Um die besten Ergebnisse in Bezug auf die Bitfehlerrate zu erzielen, wird ein Gray-Mapping angewandt. Um eine hierarchische QAM zu erreichen kann der folgende im Paper diskutierte Weg gewählt werden.

Im ersten Schritt wird dabei eine 4-QAM Quadrat Konstellation mit einem Hamming Abstand von 1 Bit zwischen den benachbarten Bits erstellt. Die Symbole der ersten Konstellation werden als  $S_1$  bezeichnet. Jede weitere Konstellation wird aus den skalierten und reflektierten Symbolen von  $S_1$  erstellt. Anschließend wird eine Homothetie um den Ursprung angewandt, durch welche sichergestellt wird, dass alle Symbole innerhalb des definierten Quadrats liegen.

Der Begriff Homothetie beschreibt den Zusammenhang zwischen zwei Figuren, die zueinander ähnlich sind und dieselbe Orientierung haben.

Für die Bitpaare in den Codewörtern werden individuelle Positionen mit unterschiedlichen Größen in dem Quadrat Gitter codiert. Die Gitter werden skaliert, um eine gleichmäßige Verteilung der Konstellation zu erhalten. Dabei nimmt die Distanz der einzelnen Symbole zueinander ab. Dadurch entstehen unterschiedliche Verhalten der Bitpaare bei Rauschen. Je größer die Distanz zwischen den Symbolen ist, desto robuster ist das Bitpaar in Bezug auf Rauschen.

Unter Verwendung der vorgestellten hierarchischen Modulation konnte die Datenrate verdoppelt werden, ohne dabei die Qualität des empfangenen Bildes zu beeinflussen.

In der Folgenden Grafik sind die Ergebnisse der übertragenen Bilder zu sehen. Bei der Abbildung 11 handelt es sich um das Originalbild. Die Abbildung 12 ist das empfangene Bild bei der Nutzung einer Standard QAM. In Abbildung 13 ist das Empfangene Bild zu sehen welches mithilfe der vorgeschlagenen hierarchischen QAM übertragen wurde. Dabei lässt sich der unterschied der Bildqualität zwischen Abbildung 12 und 13 deutlich erkennen.



Abbildung 11 Originalbild[11]



Abbildung 12 Empfangenes Bild bei der Nutzung von QAM [11]



Abbildung 13 Empfangenes Bild bei der Nutzung von HQAM [11]

Der Autor schlägt für eine weitere Verbesserung die Verwendung eines Quellcodierungsschemas, wie zum Beispiel JPEG, vor.

## 5 Konzeption des Codes

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung des Codes für die Simulation der hierarchischen Modulation.

Dabei wird zuerst das allgemeine Vorgehen bei der Konzeption erläutert. Anschließend werden einzelne Aspekte, welche wichtige Punkte bei der Entwicklung der hierarchischen Modulation darstellen, erläutert.

Abschließend wird in diesem Kapitel der entstandene Code vorgestellt und erläutert.

### 5.1 Erstellung des Konzepts

Das Ziel der hierarchischen Modulation ist es, mit einem Sendesignal zwei unterschiedliche Signale zu übertragen, sodass verschiedene Arten von Empfängern beachtet werden können. Dafür sollen die Signale jeweils einzeln moduliert werden, bevor diese dann zu einem Sendesignal zusammengefügt werden.

Die unterschiedlichen Signale sind dabei einmal das Signal der Phosphorschicht der LED und zum anderen das Signal der blauen LED. Die Phosphorschicht ist dabei deutlich langsamer als die blaue LED und schafft nur etwa 1MHz. Die Blau LED hingegen schafft 20MHz, wodurch diese in der Lage ist in der gleichen Zeit eine deutlich höhere Datenmenge zu übertragen.

Für die einzelnen Signale werden unterschiedliche Modulationsverfahren angewandt. Da diese Signale anhand der hierarchischen Modulation zu einem Sendesignal zusammengefügt werden, sind sie in der Art der Modulation voneinander abhängig.

Entsprechend muss für das innere Signal ein Modulationsverfahren gewählt werden, welches auf die Eigenschaften des äußeren modulierten Signals angepasst ist.

Das Ziel dieser Simulation ist es festzustellen, ob die angewandte hierarchische Modulation einen Einfluss auf die Übertragungsqualität hat. Dafür ist es zum einen wichtig eine Referenz zu haben. Diese ergibt sich daraus, dass die erstellten Signale jeweils einzeln moduliert werden und den Rest der Übertragungssimulation durchlaufen. Anhand dieses Vorgehens können die einzelnen Bitfehlerkurven der Übertragungen erstellt werden.

Zum anderen muss nun die Übertragungsqualität der entwickelten hierarchischen Modulation ermittelt werden. Da ein zuverlässiger Wert nicht anhand einer einzelnen Übertragung bestimmt werden kann, muss der entwickelte Code eine Wiederholung der Übertragung enthalten.

Für die Simulation der Übertragung wurden zufällig generierte Vektoren als Eingangssignale gewählt. Diese sind einfach zu erzeugen und da für die Simulation keine Kontrolle über den konkreten Inhalt des Signals benötigt wird, ausreichend.

Bei der Wahl der Modulationsverfahren für die beiden Signale müssen verschiedene Aspekte beachtet werden. Ein wichtiger Aspekt dabei sind die Restriktionen, welche sich anhand der Verwendung von LEDs ergeben. Bei der Verwendung von LEDs ist eine Phasenmodulation nicht möglich, da das abgegebene Licht immer inkohärent ist. Somit ist die Auswahl der Verfahren auf Intensität Modulationen eingeschränkt, wobei die Helligkeit immer ein nicht negativer und reeller Wert ist.

Um zu vermeiden das das Übertragungssignal zu einem Zeitpunkt null wird, enthält der Code einen Offset, welcher das Signal entlang der Y-Achse verschiebt. So kann der zu erreichende Minimalwert festgelegt werden. Dieser Offset verhindert, dass die Übertragung von Daten dazu führen kann, dass die Raumbelichtung beeinflusst wird. Diese Beeinflussung entsteht dadurch, dass eine LED für die entsprechenden Werte ausgeschaltet sein muss.

Während der Konzeption der Modulation sind weitere Punkte aufgetreten, welche genauere Überlegungen erforderlich gemacht haben. Dabei handelt es sich um Aspekte wie die Reaktionszeit der Phosphorschicht, die genaue Wahl der Modulationsverfahren und die Erstellung eines geeigneten Rauschens für die Übertragung. Auf diese Aspekte werde ich in den folgenden Unterkapiteln genauer eingehen.

## 5.2 Phosphor Reaktion

Einer der wichtigen Punkte bei der Konzeption der Modulation war es die Geschwindigkeiten der Signalübertragung, der beiden Sendesignal zu vereinen. Dafür war es relevant zu wissen, wie sich die Phosphorschicht der LED bei Anregung verhält. Trotz ausgiebiger Recherche ließ sich dabei keine belastbare Gleichung finden, welche eine Reaktion des Phosphors auf die Änderungen der Anregung beschreibt.

Auf Grundlage der Recherche von LiFi-Systemen wurde für die Erstellung des Konzepts die Annahme getroffen, dass es sich dabei um eine lineare Reaktion handelt. Somit werden Änderungen der Lichtstärke direkt vom Phosphor umgesetzt. Dies bedeutet, dass es keine Einschaltsschwelle gibt.

Somit muss von der blauen LED keine Minimalleistung erbracht werden, bevor die Phosphorschicht aktiviert wird und weißes Licht abgegeben wird. Außerdem kommt es nicht zu einem Nachglühen der Schicht. Somit ist bei Ausschalten der LED ein direktes Erlöschen des weißen Lichts zu erwarten.

Als Grundlage für diese Annahme dienen Aussagen verschiedener Abhandlungen. In [6] schreibt der Autor, dass der gelbe Phosphor die Schaltantwort beeinflusst, also die Zeit, die benötigt wird, um auf das Eingangssignal zu reagieren. Ein anderer Einfluss der Phosphorschicht wird nicht erwähnt.

In der Abhandlung [8] wird die Aussage getroffen, dass es sich bei der Phosphorschicht um eine Bandbreite einschränkende Technik handelt, ohne diese weiter zu erläutern.

Weitere Einflüsse wurden in keiner der in der Recherche genutzten Quellen diskutiert.

Ein anderes Verhalten des Phosphors hätte starke Einflüsse auf die gewählten Modulationsverfahren und Geschwindigkeiten.

Eine Verzögerung in der Reaktion müsste bei der Wahl der Modulation beachtet werden. Dies würde zum Beispiel bedeuten, dass ein Nachglühen zu erwarten ist, was bei der Filterung des Empfangssignals beachtet werden muss, um eine gute Bitfehlerrate zu erzielen. Eine verzögerte Reaktion beim Einschalten der LED hat ähnliche Auswirkungen, da diese Verzögerung für ein trägeres Übertragungssignal sorgen würde.

Ein weiterer Punkt, der bei der Phosphorschicht zu beachten ist, ist die Existenz einer Einschaltsschwelle.

Für die Konzeption des Modulationsverfahrens wird von einem linearen Verlauf der Umsetzung, der auf die Schicht treffenden Photonen ausgegangen. Bei einem nicht linearen Verhalten muss dies bei der Konzeption des Modulationsverfahrens beachtet werden.

In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass es eine Einschaltsschwelle gibt. Das bedeutet, dass der Phosphor erst ab dem Erreichen eines bestimmten Werts reagiert. Aus diesem Grund, muss dafür gesorgt werden, dass keines der beiden Signale zu einem beliebigen Zeitpunkt den entsprechenden Wert unterschreitet. Die Folge des Unterschreitens dieses Werts ist das Ausbleiben des weißen Lichts, wodurch die Raumbelichtung nicht gewährleistet werden kann.

### **5.3 Modulationsverfahren**

Die hierarchische Modulation besteht aus einer inneren und einer Äußeren Modulation.

Bei der Wahl der Modulationsverfahren für die äußere und innere Modulation wurden einige Verfahren in Betrachtung gezogen. Die äußere Modulation sollte dabei möglichst einfach und robust sein, um eine erfolgreiche Übertragung der Daten zu begünstigen.

Für die äußere Modulation wurde eine einfaches On-Off-Keying angewandt. Dies ist besonders durch seine Einfachheit und Robustheit für diesen Anwendungszeck geeignet.

Es ist bei der Verwendung dieses Modulationsverfahrens wichtig, ein komplettes Ausschalten der LED zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde ein nrz-OOK gewählt. Dadurch wird ein Unterschreiten eines gewissen Wertes vermieden.

Für die innere Modulation gab es einige Anforderungen, welche von dem gewählten Modulationsverfahren gewährleistet werden müssen.

Dazu gehört die Tatsache, dass die gewählten Modulationsverfahren in ihrer Anwendung kompatibel sind. Durch das On-Off-Keying ergeben sich Zeitabschnitte, in denen das innere Signal übertragen werden muss. Diese Zeitabschnitte sind durch den Überabtastfaktor von 20 in zehn Abschnitte unterteilt.

Der Faktor für die Überabtastung ist durch die Differenz der Bandbreite der beiden Signale gegeben da die blaue LED die zwanzigfache Datenmenge der Phosphorschicht übertragen kann.

Für die innere Modulation ergeben sich dabei zwei Möglichkeiten. Zum einen kann die Pulsweiten Modulation gewählt werden. Diese nutzt die Länge des Pulses innerhalb eines Zeitabschnitts, um die Information zu modulieren.

Ein anderes Modulationsverfahren, welches mit Zeitabschnitten arbeitet, ist die Pulsphasen Modulation. Hierbei wird die Position des Pulses innerhalb des Zeitabschnitts variiert, Ein wichtiger Punkt dabei ist eine gleichbleibende Signalenergie, da das Signal im inneren des ersten Signals moduliert wird und in seiner Gesamtheit das Rechtecksignal der äußeren Modulation darstellt.

Bei der Beachtung dieses Punktes lässt sich die Pulsweitenmodulation ausschließen, da diese je nach Modulationssymbol eine unterschiedliche Signalenergie besitzt, welche durch die Länge des Pulses bestimmt wird.

Bei der Pulspositionsmodulation hingegen ändert sich nur die Position des Pulses, was zu einer gleichbleibenden gesamten Energie des Signals führt. Aus diesem Grund bietet sich eine Pulspositionsmodulation für die innere Modulation an und wurde bei der Konzeption dieser hierarchischen Modulation verwendet.

## 5.4 Rauschen

Ein wichtiger Faktor der Übertragung ist das Rauschen des Übertragungskanals. Dabei gibt es bei der Verwendung von LEDs einige Punkte zu beachten.

Das Rauschen der Übertragung kann zu keinem Zeitpunkt negativ sein, da es bei einer optischen Übertragung anhand einer LED nicht möglich ist, ein negatives Signal zu übertragen.

Aus diesem Grund kam ein Gaus verteiltes weißes Rauschen nicht in Frage, da dieses auch Werte im negativen Bereich enthält. Um ein weißes Rauschen anwenden zu können, muss ein weiterer Schritt durchlaufen werden, in welchem das Gaus verteilte Signal anhand eines Entscheiders bei negativen Werten auf den Wert „0“ gesetzt wird.

Da diese Option keine Saubere Lösung bietet, habe ich dies schnell wieder verworfen. Stattdessen wurde ein Rauschvektor generiert. Dieser wird von MATLAB generiert und besteht aus zufälligen Werten im natürlichen Bereich. Dieser Vektor hat dieselbe Länge wie das entsprechende Signal, auf welches er angewandt wird.

Da das Rauschen anhand eines SNR-Werts zu Beginn des Codes in der gängigen logarithmischen Einheit dB festgelegt werden soll, ist es wichtig den entsprechenden Wert innerhalb des Codes in ein lineares SNR umzurechnen.

Anschließend wird die Noise Power des Signals bestimmt, welche zur Bestimmung der Signal Power und fortlaufend auch für die Erstellung des skalierten Noise relevant ist.

## 5.5 BER ermitteln

Um in der Lage zu sein, die Ergebnisse des entwickelten Modulationsverfahrens mit den Werten der einzelnen Übertragungen vergleichen zu können, werden die Bitfehlerraten der Übertragung ermittelt. Die Bitfehlerrate wird verwendet, um die Qualität einer Übertragung zu beschreiben.

Dabei wird das Verhältnis der Gesamtanzahl an gesendeten Bits zur Anzahl der bei der Übertragung verfälschten Bits ermittelt. Um dieses Verhältnis zu ermitteln, wird der empfangene Bitstrom Zeichen für Zeichen mit dem Gesendeten Bitstrom verglichen. Dabei wird jedes abweichende Bit gezählt.

Die grafische Darstellung der Bitfehlerrate erfolgt in Bezug auf dem Signal zu Rauschabstand, welcher aufgrund seiner Einheit in Dezibel logarithmisch dargestellt wird.

Um einen aussagekräftigen Vergleich treffen zu können, sollte die Bitfehlerrate bei verschiedenen Signal-Rausch-Abständen ermittelt werden. So lassen sich verschiedene Übertragungswege genauer vergleichen, da verschiedene Stärken von Störfaktoren berücksichtigt werden.

Da die Bitfehlerrate nur einmal pro gewählten SNR ermittelt wird, lassen sich auf diesem Weg nur Momentaufnahmen vergleichen. Um eine qualitative Aussage über die Übertragungsqualität anhand der Bitfehlerrate treffen zu können, müssen mehrere Durchläufe stattfinden. Um dies zu realisieren, wird eine Monte-Carlo-Simulation eingesetzt. Anhand dieser wird die Übertragung tausendmal simuliert. Die gesamte Anzahl der Bitfehler aus allen Simulationen, wird dann ins Verhältnis gesetzt mit der Gesamtanzahl an übertragenen Bits. Daraus lässt sich ein deutlich genauerer Wert für die Bitfehlerrate ermitteln als aus der Auswertung einer einzelnen Übertragung.

## 5.6 Funktionsweise des Codes

Der Code für diese Simulation wurde in der MATLAB Version R2023a entwickelt.

Zu Beginn des Codes werden die Parameter festgelegt, welche für die Simulation benötigt werden.

Im ersten Schritt wird die Anzahl an zu übertragenden Bits für Signal 1 auf 128 festgelegt. Die Anzahl an Bits kann hierbei frei gewählt werden. Allerdings sollte die Anzahl nicht zu klein sein, da das Ziel des Codes ist, Bitfehler festzustellen. Um über diesen Faktor ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, muss eine große Menge an Bits übertragen werden.

Da die Übertragung, bei den angegebenen Parametern, tausendmal simuliert wird, ist die insgesamt Anzahl an übertragenden Bits in jedem Fall größer als der bei diesem Parameter angegebene Wert. Für die Anzahl der zu übertragenden Bits pro Simulation ist es auch möglich einen größeren Wert zu wählen. Die Anzahl von 128 Bits wurde hier gewählt, da durch die Anzahl an Simulationen so 128.000 Bits übertragen werden, was ein aussagekräftiges Ergebnis ermöglicht. Außerdem sorgt die Erhöhung der Anzahl der Bits für eine erheblich längere Simulationslaufzeit.

Zusätzlich wird jeweils ein Faktor für die Überabtastung der Signale festgelegt. Für Signal 1 liegt dieser Faktor bei zwanzig, da Signal 2 eine um diesen Faktor größere Bandbreite besitzt.

Anschließend wird die Anzahl der Bits für Signal 2 berechnet. Die Anzahl der zu übertragenden Bits ergibt sich aus der Anzahl an Bits für Signal 1 multipliziert mit dem Überabtastfaktor von Signal 1 geteilt durch den Überabtastfaktor von Signal 2. Dieser Schritt ist relevant, da Signal 2 innerhalb von Signal 1 übertragen wird und dadurch von der Signallänge abhängt.

Außerdem wird in diesem Teil des Codes auch die Anzahl an Simulationen festgelegt, welche für die Monte-Carlo-Simulation genutzt wird. Die Werte für den Signal-Rausch-Abstand zur Berechnung der Bitfehlerrate werden auf den Bereich von -10dB bis 15dB festgelegt. Dabei werden zweierschritte gewählt, um die Simulation durchzuführen.

Ein Offset von „1“ für die Übertragung wird in diesem Abschnitt des Codes auch festgelegt. Durch den hier festgelegten Faktor bietet sich die Möglichkeit das Signal auf der Y-Achse zu variieren.

Die Simulation an sich startet mit zwei for-Schleifen. Die erste dieser Schleifen wird genutzt, um die verschiedenen Werte für den Signal-Rausch-Abstand zu durchlaufen. Für jeden der SNR-Werte wird erneut der restliche Code durchlaufen.

Die zweite Schleife sorgt dafür, dass die Übertragung für die Anzahl an festgelegten Simulationen wiederholt wird. Somit ist die Funktion dieser beiden Schleifen vereint, sodass für jeden Signal-Rausch-Abstand Wert die Übertragung tausendmal wiederholt wird.

Innerhalb dieser schleifen ist der erste Schritt das Erzeugen des ersten Signals. Dafür wird ein Vektor erstellt. Dieser besteht aus ganzen Zahlen zwischen 0 und 1, und hat eine Länge von 128. Die Länge wurde zu Beginn anhand der Anzahl an zu übertragenen Bits für das Signal festgelegt.

Anschließend wird die Zeitachse für das Signal 1 erstellt. Dafür wird ein Vektor erstellt, welcher anhand von einer Anzahl an schritten, welche sich aus der Anzahl an Bits und dem Überabtastfaktor ergibt, Werte zwischen 0 und 128 generiert.

Im nächsten Schritt wird das überabgetastete Rechtecksignal für Signal 1 erstellt. In diesem Schritt wird auch der Offset dazu addiert.

Für die Simulation der Übertragung wird außerdem ein Rauschvektor benötigt. Das entsprechende Rauschen wird ähnlich wie das Eingangssignal generiert. Auch hier wird ein zufälliger Vektor erstellt, dieser enthält ausschließlich natürliche Werte. Die Länge des Vektors ergibt sich aus der Anzahl an Bits und dem Faktor für die Überabtastung.

Die Erzeugung des zweiten Signals ist in vielen Teilen dem ersten Signal sehr ähnlich. Auch hier wird zuerst ein zufälliger Vektor aus 0 und 1 für das Eingangssignal erstellt, dessen Länge sich aus den zu Anfang festgelegten Parametern ergibt.

Eine Zeitachse muss für dieses Signal nicht gesondert erstellt werden, da es auf derselben Zeitachse dargestellt werden soll wie Signal 1. Der Rauschvektor wird auf dieselbe Weise erstellt, wie bei Signal 1.

Bei der Erzeugung des zweiten Signals gibt es jedoch den Unterschied, dass das generierte, überabgetastete Rechteck Signal zusätzlich noch elementweise mit dem überabgetasteten Rechtecksignal 1 multipliziert wird. Dieser Schritt ermöglicht die Übertragung des zweiten Signals innerhalb des ersten Signals.

Anschließend wird die Rauschleistung der beiden Rauschvektoren bestimmt. Die Rauschleistung wird verwendet, um im nächsten Schritt die Signalleistung zu bestimmen. Dafür wird der in den Parametern angegebene Wert für den Signal-Rausch-Abstand in einen Linearen Wert umgerechnet. Dieser Schritt ist so programmiert, dass bei jedem Durchlauf der ersten Schleife der jeweils nächste SNR-Wert gewählt wird.

Das erstellte Rauschen muss nun noch passend zu der Signalleitung skaliert werden. Nach diesem Schritt werden die skalierten Rauschvektoren mit den überabgetasteten Rechtecksignalen addiert, wodurch sich die Empfangssignale ergeben.

Um das Empfangssignal nun mit dem Eingangssignal vergleichen zu können, müssen die Empfangssignale nun unterabgetastet werden. Dafür wird jeweils eine Matrix aus den veräuschten Empfangssignalen erstellt. Für Signal 1 handelt es sich dabei um eine Matrix mit 20 Zeilen und 128 Spalten. Die Anzahl an Zeilen ergibt sich dabei aus dem Faktor der Überabtastung und die Anzahl der Spalten aus der Anzahl an Bits, welche übertragen werden sollen.

Die Werte der Zeilen werden anschließend aufsummiert, so dass sich ein Vektor mit 128 Elementen ergibt.

Für Signal 2 wird das gleiche Vorgehen gewählt, es werden ausschließlich die Anzahl an Zeilen und Spalten an den Überabtastfaktor und die Anzahl an Bits für das Signal angepasst.

Die entstandenen Vektoren werden nun elementweise darauf geprüft, ob sie sich ober- oder unterhalb der festgelegten Entscheider Schwelle befinden. Die Festlegung der Schwelle bezieht auch das Offset als Variable mit ein, um Änderungen an den Parametern übernehmen zu können.

Für diese Übertragung ist es somit wichtig, dass dem Empfänger das Offset bekannt ist, damit die Übertragenen Daten richtig interpretiert werden können.

In der Praxis müsste somit auch ein Weg gefunden werden das Offset an den Empfänger zu kommunizieren. Dies kann zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass eine Übertragung immer mit einer festgelegten Sequenz beginnt, anhand der man den Offset bestimmen kann.

Werte oberhalb der Schwelle werden nun als „1“ interpretiert und Werte unterhalb der Schwelle als „0“.

Die letzte Aufgabe des Codes innerhalb dieser Schleife ist es nun die Anzahl an Bitfehlern bei dieser Übertragung zu bestimmen. Dafür wird nun anhand eines Vergleiches zwischen Eingangssignal und Empfangssignal die Summe der abweichenden Bits ermittelt. Die Summe wird anschließend in einer Variable abgespeichert.

Mit jedem Durchlauf der Schleife wird die neu ermittelte Anzahl an Bitfehlern zu der bereits abgespeicherten Menge aufaddiert. So ist es möglich am Ende aller Übertragungen eine Angabe zu der insgesamten Menge an abweichenden Bits zu erhalten.

Nach dem Vollständigen durchlaufen beider Schleifen, werden die Variablen mit den Anzahlen an abweichenden Bits ausgelesen und durch die Gesamtanzahl an übertragenen Bits geteilt. Diese Rechnung wird für jedes der beiden Signale einzeln aufgestellt.

Abschließend werden die beiden Bitfehlerkurven und die beiden überabgetasteten Rechtecksignale geplottet.

## 6 Auswertung

Um in der Lage zu sein eine Bewertung der entwickelten hierarchischen Modulation vornehmen zu können, war es wichtig Referenz Signale der Übertragungen der einzelnen Signale zu erfassen. Anhand dieser lässt sich im Verlaufe der Auswertung feststellen, ob die hierarchische Modulation einen Einfluss auf die Übertragungsqualität hat. Dafür wurde jedes Signal einmal grafisch dargestellt. Wichtig dabei ist, dass bei der Simulation ein zufälliger Bitstrom als Eingangssignal genutzt wird. Da dieser bei jeder Simulation neu generiert wird ist ein direkter Vergleich der Signale in dieser Form nicht möglich.

Bei der Simulation der einzelnen Übertragung der Signale wurde eine modifizierte Variante des Originalcodes der hierarchischen Modulation verwendet. So kann gesichert werden, dass das Signal mit der gleichen Modulation und unter den gleichen Umständen, wie Rauschvektor, erstellt wird, wie bei der Hierarchischen Modulation der beiden Signale. So lässt sich sicherstellen das Mögliche Abweichungen zwischen den einzelnen Übertragungen und der gemeinsamen Übertragung der Signale auf die Konzipierte hierarchische Modulation zurückzuführen sind und nicht von anderen Faktoren beeinflusst werden.

In weiteren Verlauf des Texts wird das Signal mit der geringeren Bitrate, als Signal 1 bezeichnet, während das Signal mit der höheren Bitrate Signal 2 darstellt.

Die Abbildung 14 dient der Visualisierung des überabgetasteten Übertragungssignals. Dabei werden 128 Bits übertragen. Für die Übertragung wird ein On-Off-Keying als Modulationsverfahren gewählt. Das Signal hat eine Überabtastung von 20 und wird mit einem Offset der Amplitude addiert. Dieser Offset sorgt dafür das das Übertragungssignal trotz On-Off-Keying den Wert 0 nicht erreicht, um sicherzustellen, dass dieses Signal über LiFi übertragen werden kann, da die verwendete LED zu keinem Zeitpunkt ausgeschaltet sein darf, wie es bei einem Wert von 0 der Fall wäre.

In Abbildung 15 wird die Bitfehlerkurve dieses Signals dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass bis zu einem Signal-Rausch-Abstand von 4dB nur minimale Bitfehler auftauchen. Ab diesem Wert fangen die die Bitfehler langsam an sich zu steigern und zwischen einem Signal-Rausch-Abstand von etwa 4dB bis 2dB ist ein rapider Abfall der Übertragungsqualität zu beobachten. Bei 0dB ist bereits eine maximale Bitfehlerrate erreicht.

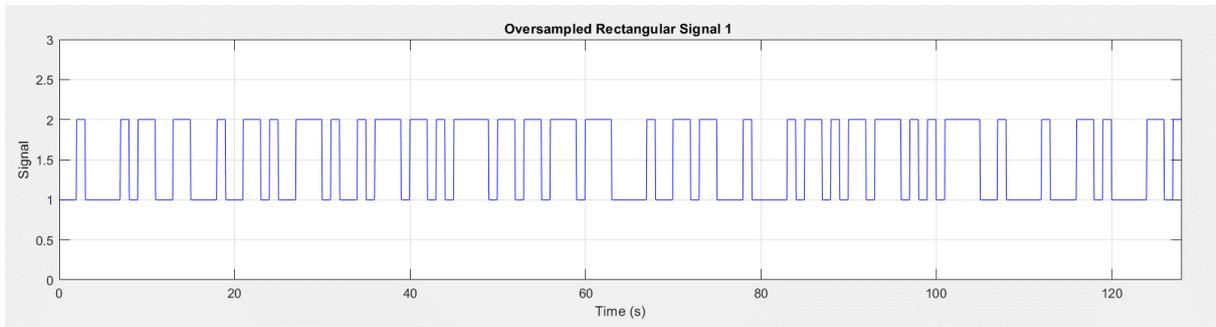


Abbildung 14 Sendesignal 1

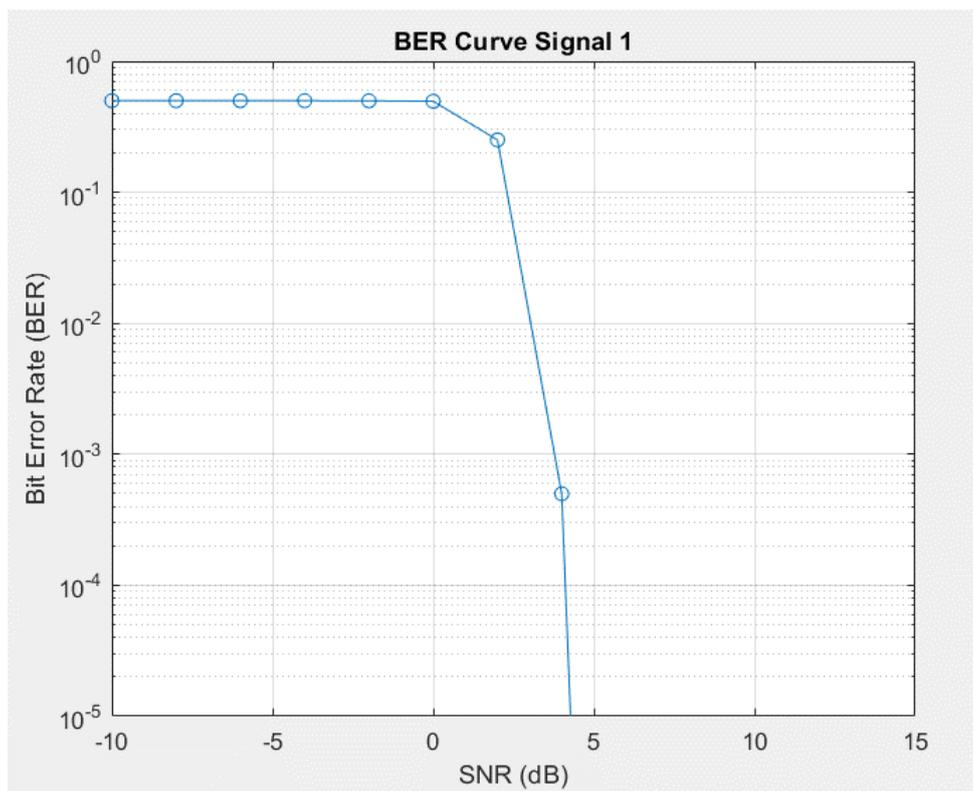


Abbildung 15 Bitfehlerkurve von Signal 1

In Abbildung 16 ist das Signal 2 grafisch dargestellt. Bei diesem Signal wird die zehnfache Bitrate von Signal 1 übertragen. Die Übertragung nutzt eine Pulspositionsmodulation. Um auch hier vermeiden zu können, dass das Übertragungssymbol 0 wird, wird der bereits bei Signal 1 angewandte Offset auch hier mit dem Signal addiert.

In Abbildung 17 ist die Bitfehlerkurve des Signals zu sehen. Dabei wurden tausend Übertragungen simuliert. Im Anschluss wurden dann die Auftretenden Fehler mit den 1.280.000 übertragenen Bits ins Verhältnis gesetzt. Die ersten Verschlechterungen der Übertragungsqualität können hier schon bei einem Signal-Rausch-Abstand von 6dB erkannt werden. Danach ist ein stetiger Abfall in Form eines Wasserfalldiagramms zu erkennen. Im Vergleich zu Abbildung 15 gibt es bei dieser Übertragung keinen spezifischen Bereich, in dem ein besonders starker Abfall der Übertragungsqualität zu beobachten ist.

Eine Annäherung an die maximale Bitfehlerrate ist bei dieser Übertragung erst bei einem Signal-Rausch-Abstand von etwa -5dB zu erkennen.

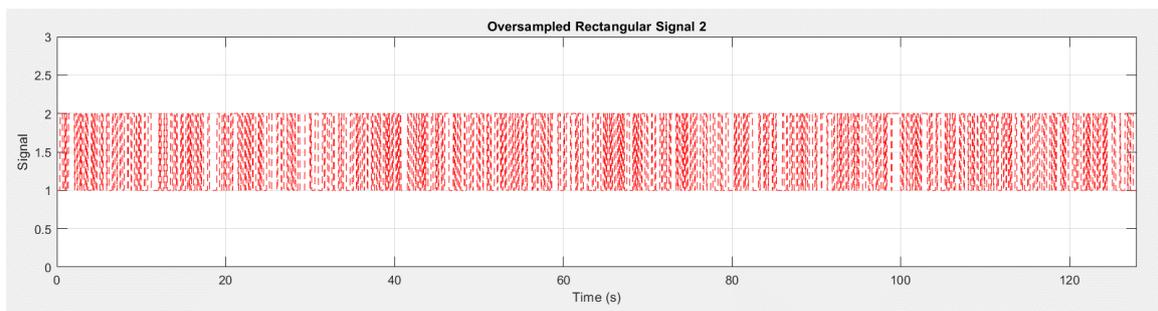


Abbildung 16 Sendesignal 2

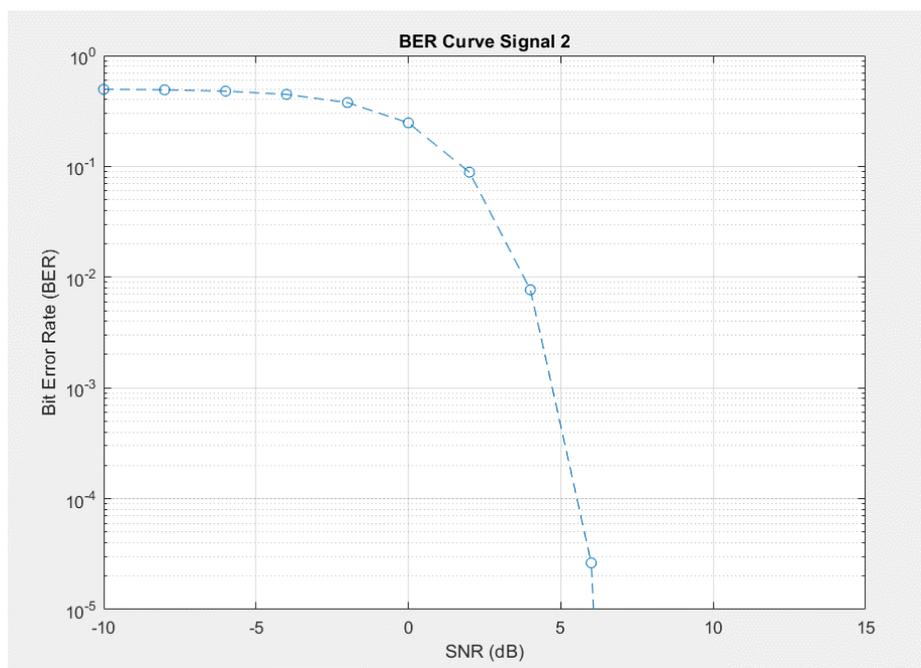


Abbildung 17 Bitfehlerkurve von Signal 2

Die Vorgestellten Signale 1 und 2 wurden nun hierarchisch moduliert. Das entsprechende Vorgehen dabei wurde bereits in Kapitel 5 Abschnitt 5.6 erläutert.

In Abbildung 18 ist zu erkennen, wie sich die hierarchische Modulation anhand des Sendesignals darstellen lässt. Als durchgezogene Linie ist dabei Signal 1 dargestellt, welches eine Art Hülle bildet für das zweite Signal. Das Signal 2 ist als gestrichelte Linie dargestellt. Anhand dieser Abbildung lässt sich erkennen das Signal 2 innerhalb von Signal 1 übertragen wird, wodurch sich ein einzelnen Sendesignal ergibt.

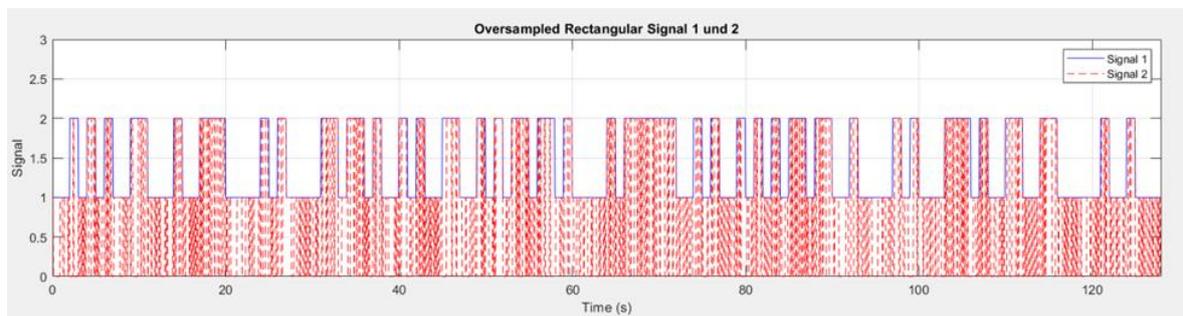


Abbildung 18 Sendesignale 1 und 2 hierarchisch moduliert

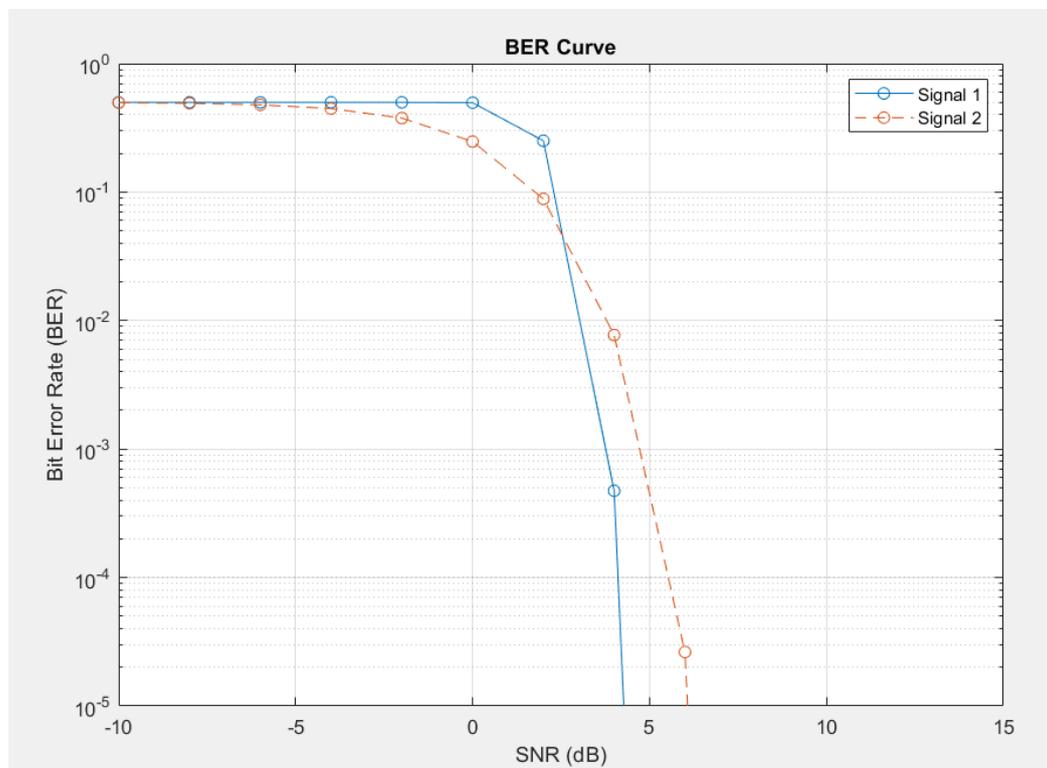


Abbildung 19 Bitfehlerkurven von Signal 1 und 2 bei gemeinsamer Übertragung

Um die Übertragungsqualität der entwickelten hierarchischen Modulation zu bewerten, werden in Abbildung 19 die Bitfehlerkurven der beiden Signale dargestellt.

Bis zu einem Signal-Rausch-Abstand von etwa 2dB hat das Signal 1, mit seiner geringeren Bitrate, eine geringere Bitfehlerrate als Signal 2. Das ist auf die Wahl des Modulationsverfahrens zurückzuführen, da es sich bei dem On-Off-Keying um ein sehr robustes und nicht störanfälliges Verfahren handelt.

Ab diesem Punkt ist bei Signal 1 ein schneller Abfall der Übertragungsqualität zu beobachten, wobei schon bei einem Signal-Rausch-Abstand von 0dB die maximale Bitfehlerrate erreicht ist.

Das Signal 2 hingegen zeigt ab diesem Punkt einen deutlich langsameren Anstieg der Bitfehlerrate. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Bitfehlerrate das Verhältnis von fehlerhaft übertragenen Bits zu der Gesamtanzahl an Bits angibt. Da bei Signal 2 die zwanzigfache Menge an Bits übertragen wird, kann die Bitfehlerrate trotz vieler Fehler besser sein, da diese zu einer deutlich größeren Menge an gesendeten Bits ins Verhältnis gesetzt werden.

Um nun die Frage zu beantworten, ob die hierarchische Modulation einen Einfluss auf die Übertragungsqualität hat, werden die Bitfehlerkurven der einzelnen Übertragungen mit den Kurven der gemeinsamen Übertragung verglichen. Dabei lässt sich schnell feststellen, dass die Kurven identisch sind. Somit lässt sich ein Einfluss der Hierarchischen Modulation auf die Übertragungsqualität ausschließen.

## 7 Anwendungsbeispiel

Die simulierte Übertragung wurde anhand des Anwendungsbeispiels einer Bildübertragung getestet. Dabei wurde ein in MATLAB enthaltenes Beispielbild gewählt. Um eine Übertragung anhand der in Kapitel 5 beschriebenen Sendeweg-Simulation durchführen zu können, musste das Bild entsprechend angepasst werden. Bei dem Beispielbild handelt es sich um das Bild in Abbildung 20 zu sehende Bild mit dem Titel „Cameraman“



Abbildung 20 in MATLAB enthaltenes Beispielbild "cameraman"

Um den in Kapitel 5.1 beschriebenen Code für diese Übertragung verwenden zu können, müssen zwei Eingangssignale existieren.

Im ersten Schritt wird das Bild deshalb als zwei unterschiedliche JPEG-Dateien mit unterschiedlichen Abtastraten gespeichert.

Dafür wird ein Bild mit hoher Qualität und geringen Kompression abgespeichert, und ein zweites Bild mit einem Viertel der Qualität und somit der vierfachen Kompression.

Beide Bilder werden als Matrizen weiterverarbeitet.

Die Matrix des Bildes mit der höheren Auflösung, welches im weiteren als Bild A bezeichnet wird, wird nun in seiner Größe halbiert. Dafür wird die MATLAB interne Funktion „imresize“ genutzt, welche eine Bikubische Interpolation nutzt, um die Pixelmenge anzupassen. Durch diese Funktion ergibt sich eine Matrix mit jeweils 128 Zeilen und Spalten.

Anschließend werden die in der Matrix enthaltenen Werte zeilenweise aneinandergereiht, um einen Vektor zu erzeugen.

Für Bild B, welches das Bild mit der geringeren Auflösung ist, wird die Matrix anhand derselben Funktion auch in der Größe halbiert. Da Bild B mit nur einem Viertel der Qualität und somit einer deutlich höheren Kompression abgespeichert wurde, soll die Pixelmenge nun auch nur ein Viertel der Menge von Bild A entsprechen. Aus diesem Grund wurde die Funktion „imresize“ erneut angewandt mit einem Faktor von 0,25.

Anschließend wird auch diese Matrix anhand der Aneinanderreihung der Werte in einen Vektor gewandelt.

Da in den simulierten Übertragungen keine Graustufen beachtet werden, werden die entsprechenden Graustufen aus den Vektoren für Bild A und Bild B entfernt, sodass es sich für die Übertragung um reine schwarz-weiß Bilder handelt. Um dies zu ermöglichen, wird für jedes Bild individuell jeder Wert des jeweiligen Vektors durch 256 dividiert. Das Ergebnis wird in den Datentyp „double“ konvertiert. Dabei wird der ursprüngliche Wertebereich von 0 bis 255 auf den neuen Wertebereich von 0 bis 1 abgebildet.

Die entstandenen Vektoren werden nun als Eingangssignale der Simulation gesetzt.

Der weitere Verlauf der Simulation ist in allen bis auf einen Punkt identisch der in Kapitel 5 Abschnitt 5.1 beschriebenen Übertragung. Der Unterschied ist hierbei ausschließlich, dass keine Bitfehler Ermittlung stattfindet. Somit enthält dieser Code weder eine Monte-Carlo-Simulation noch die entsprechenden Abschnitte welche ausschließlich zur Bitfehlerermittlung dienen.

Um eine bessere Veranschaulichung der Übertragungsqualität und den Einfluss des Rauschens auf die Empfangssignale gewährleisten zu können, wird jeweils ein Wert für den Signal-Rausch-Abstand gewählt und die Übertragung für diesen simuliert.

In der folgenden Abbildung 21 ist ein Ausschnitt dieser Signale dargestellt. Signal 1 stellt dabei das Signal des Bildes mit der geringen Auflösung dar. Die gestrichelte Linie im inneren dieses Signals bildet Signal 2, also das Bild mit der deutlich höheren Auflösung dar.

Da Bild 1 aufgrund seiner geringen Auflösung viele identische aufeinanderfolgende Pixel enthält, lassen sich in der Abbildung 21 bei Signal 1 längere Zeitabschnitte ohne eine Änderung im Signal feststellen. Besonders an diesen Stellen ist gut zu erkennen wie anhand Signal 2 mit einer PPM Modulation deutlich mehr Bits übertragen werden können.

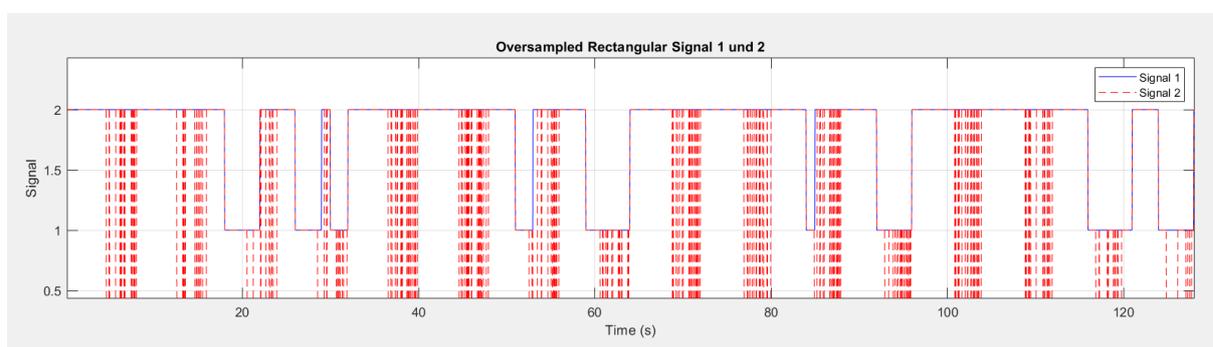


Abbildung 21 Darstellung von Signal 1 und 2 des Anwendungsbeispiels

Auf den folgenden Bildern werden drei Stadien der Übertragung dargestellt.

Zum einen wird als Referenz das schwarz-weiße Bild in der entsprechenden Auflösung auf der linken Seite angezeigt. Des Weiteren betrachten wir das in der Mitte abgebildete ver-rauschte Bild am Empfänger.

Das auf der rechten Seite dargestellte Bild ist das anhand des Schwellwerts gefilterte Bild, bei dem die durch das Rauschen entstandenen Grauwerte entfernt wurden.

Die gewählten Werte für den Signal-Rausch-Abstand ergeben sich aus einer Reihe an Simulationen, in der verschiedene Werte getestet wurden. Im Folgenden werden nur ausgewählte Signifikante Werte dargestellt.

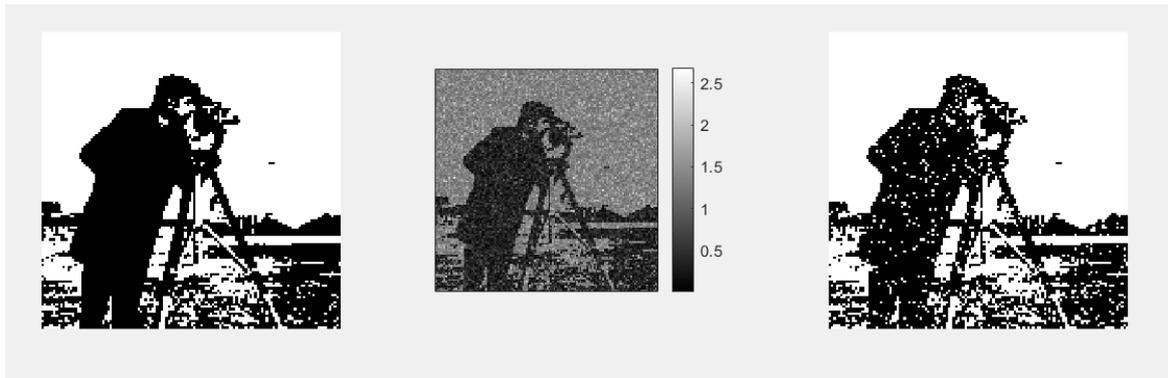


Abbildung 22 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 3dB

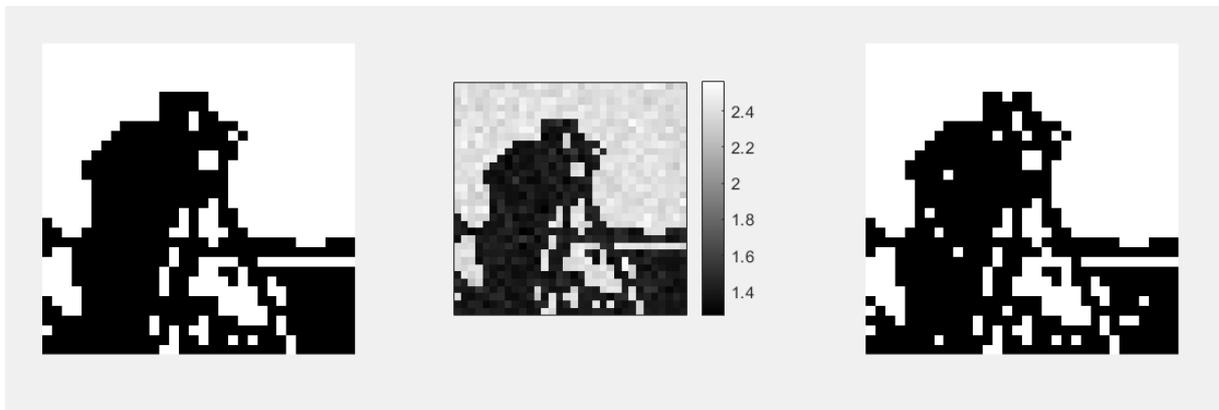


Abbildung 23 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 3dB

Bei einem SNR von 3dB gibt es die ersten Fehler bei der Übertragung des Bildes mit der niedrigeren Bitrate. Jeder niedrigere Signal-Rausch-Abstand weist mehr Fehler auf und das Bild wird schnell nicht identifizierbar.

Bei der Übertragung des Bildes mit der höheren Bitrate ist eine größere Menge an Bitfehlern zu beobachten. Dabei ist zu erkennen, dass es in den Stellen des Bildes, welche oft zwischen Schwarzen und weißen Pixeln wechseln, so wie der untere Teil des Hintergrunds und der Kopf der Person, zu einer deutlichen Häufung dieser Fehler kommt. Durch die häufigen Bitänderungen hat das Rauschen hier einen größeren Einfluss auf die Übertragung.

Eine ähnliche Verteilung der Pixelfehler ist auch bei der Übertragung mit der niedrigeren Bitrate zu beobachten. Hier sind vermehrte Fehler im Bereich des Kopfes des Menschen zu beobachten.

Dabei ist zu beobachten, dass die falschen Pixel ausschließlich in den ursprünglich schwarzen Bereichen des Bildes auftauchen. Keiner der ursprünglich weißen Pixel wird bei dem empfangenen Bild als schwarzer Pixel dargestellt.

Man sieht dabei das die Bitfehler nur bei den schwarzen Pixeln auftauchen und es in den größeren weißen Flächen zu keinen Fehlern kommt. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei der Übertragung mit einem rein positiven Rauschen gearbeitet wird. Da das Rauschen auf niedrige Signale wenig Einfluss hat, sorgt es bei den weißen Pixeln, welche als logische „0“ übertragen werden, dafür das diese helle Grauwerte annehmen. Diese Werte überschreiten jedoch zu keinem Zeitpunkt den Schwellwert des Entscheiders.

Die schwarzen Pixel werden von logischen „1“ dargestellt. Diese haben bei der Übertragung eine deutlich höhere Energie. Bei der Addierung mit dem Rauschen wird das Signal signifikant stärker beeinflusst als das Signal mit der niedrigeren Energie. Das sorgt dafür das es die Möglichkeit gibt das Bits kippen. Dadurch befinden sie sich auf der anderen Seite der Entscheider Schwelle und werden als weiße Pixel interpretiert.

Um diesen Effekt zu vermeiden, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine Möglichkeit, um die Übertragungsqualität zu verbessern, ist die Kanalcodierung. Für diesen Fall ist dabei besonders die Forward Error Correction (FEC) interessant zu betrachten. Bei diesem Verfahren der Fehlerkorrektur kodiert der Sender die zu übertragenden Daten in redundanter Form. Auf diese Weise ist eine Korrektur von Übertragungsfehlern ohne Rückfrage beim Sender möglich.

Eine weitere Möglichkeit die Übertragungsqualität zu verbessern, ist die Anwendung der Interleaver Technik.

Dabei handelt es sich um eine Technik, bei der die Reihenfolge der übertragenen Daten geändert wird, um die Auswirkungen von Burst-Fehlern zu reduzieren. Als Burstfehler bezeichnet man eine blockweise Störung des Signals. Durch die Umsortierung der Bits kann verhindert werden, dass aufeinanderfolgende fehlerhafte Bits im Empfangssignal auftreten. Die dann stattfindende Aufteilung der fehlerhaften Bits ermöglicht eine bessere Fehlerkorrektur und stellt somit sicher, dass die einzelnen Pixel genauer übertragen werden können.

Beide Verfahren verbessern die Fehlerkorrektur des Übertragungssignals. Um eine noch effektivere Verbesserung zu erhalten, können die beiden Verfahren kombiniert werden.

Der Interleaver gleicht dabei zeitliche Cluster von Fehlern aus, während die Kanalcodierung durch Hinzufügen von Redundanz die Fehlererkennungs- und -Korrektur Fähigkeiten des Systems verbessert. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit von Bitfehlern bei den schwarzen Pixeln erheblich verringert.

Es ist jedoch auch wichtig zu beachten, dass diese Techniken die Übertragungseffizienz beeinflussen. Durch die Zugabe von Redundanz müssen entsprechend mehr Daten übertragen werden, um die gewünschte Information zu transportieren. Die Anwendung eines Interleavers sorgt für eine Erhöhung der Latenz des Systems.

Daher muss bei der Auswahl der geeigneten Fehlerkorrekturtechniken ein Kompromiss zwischen Fehlerkorrekturfähigkeit und Übertragungseffizienz gefunden werden.

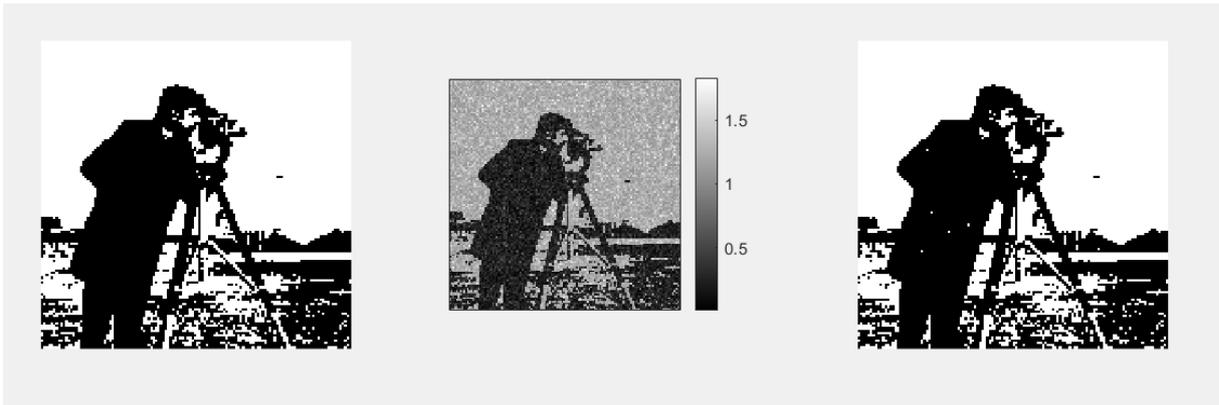


Abbildung 24 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 5dB

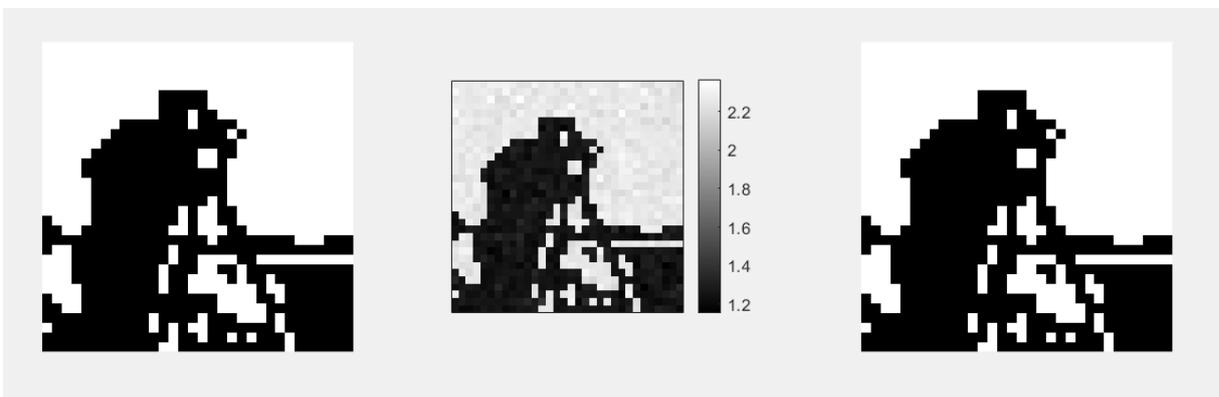


Abbildung 25 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 5dB

Bei einer Übertragung mit einem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von 5 dB treten bei dem Signal mit der höheren Bitrate, welches in Abbildung 24 dargestellt ist, die ersten Bitfehler auf. Diese Bitfehler sind besonders deutlich in der großen schwarzen Fläche der Jacke zu erkennen. Aufgrund der höheren Energie des schnelleren Signals sind die schwarzen Pixel anfälliger für Störungen durch das Rauschen während der Übertragung. Dadurch kann es dazu kommen, dass einige der schwarzen Pixel ihre ursprüngliche Information verlieren und als weiße Pixel interpretiert werden.

In der Abbildung 24 sind auch einige Bitfehler im unteren Bereich des Hintergrunds zu finden. Aufgrund des häufigen Wechsels zwischen schwarzen und weißen Pixeln in diesem Bereich sind die Bitfehler schwerer zu erkennen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeit von Bitfehlern in den schwarzen Bereichen höher ist, da das Rauschen eine stärkere Auswirkung auf Signale mit höherer Energie hat.

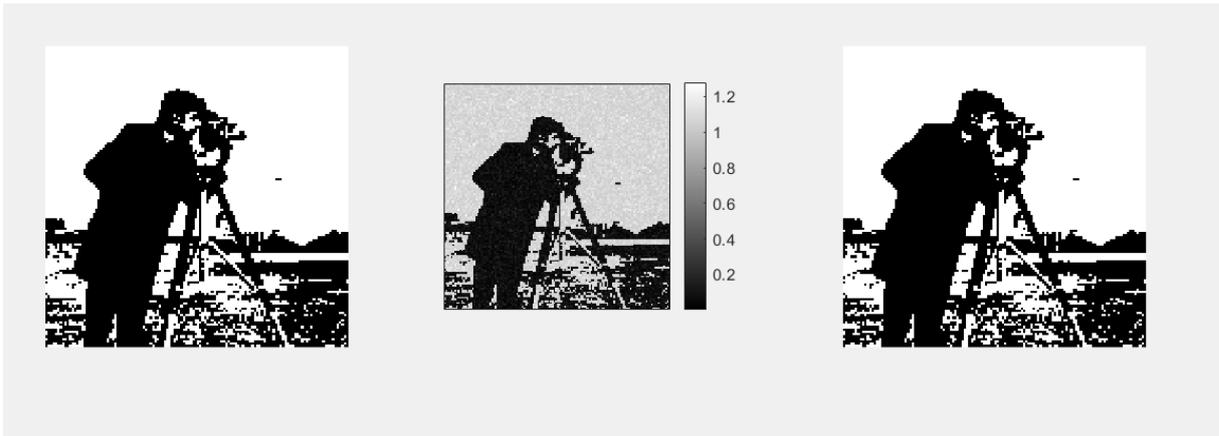


Abbildung 26 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 10dB

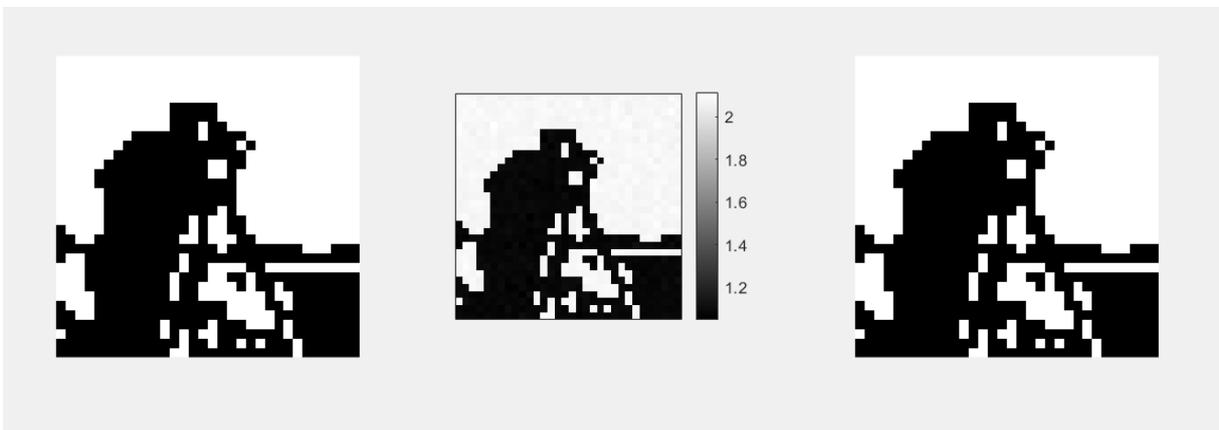


Abbildung 27 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 10dB

Ab einem Signal-Rausch-Abstand von 10dB, sind in den Empfangenen Bildern keine Pixelfehler mehr festzustellen. Trotzdem sind immer noch Auswirkungen des Rauschens im Übertragungsweg zu erkennen, allerdings in einer Größenordnung, die vom Entscheider richtig interpretiert werden kann.

Die verbleibenden Auswirkungen des Rauschens können beispielsweise als geringfügige Fluktuationen in den Grauwerten oder Helligkeitsvariationen in den Bildern auftreten. Diese sind jedoch von geringer Intensität und haben keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität oder Interpretation der übertragenen Bilder. Der Entscheider kann die Signale trotz des vorhandenen Rauschens korrekt decodieren und die richtigen Informationen wiedergeben.

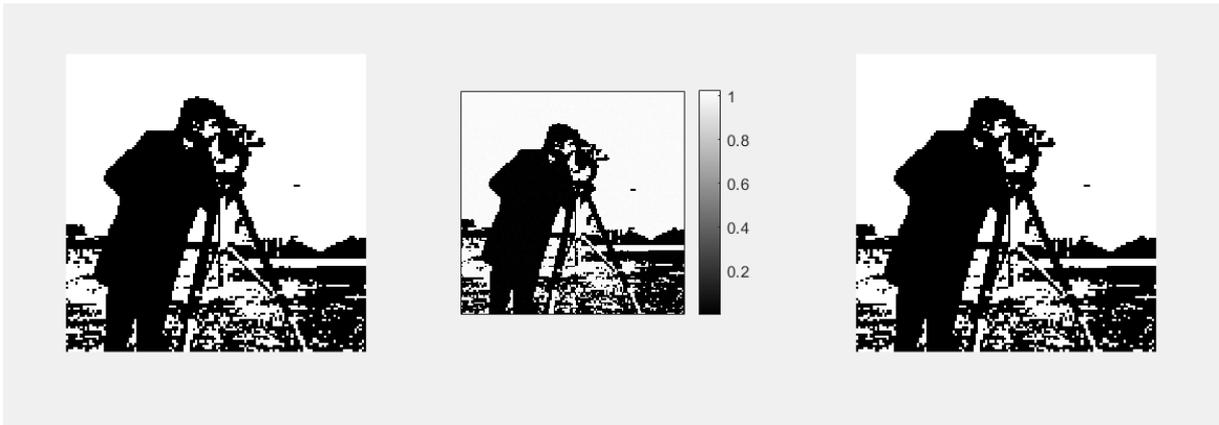


Abbildung 28 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 20dB

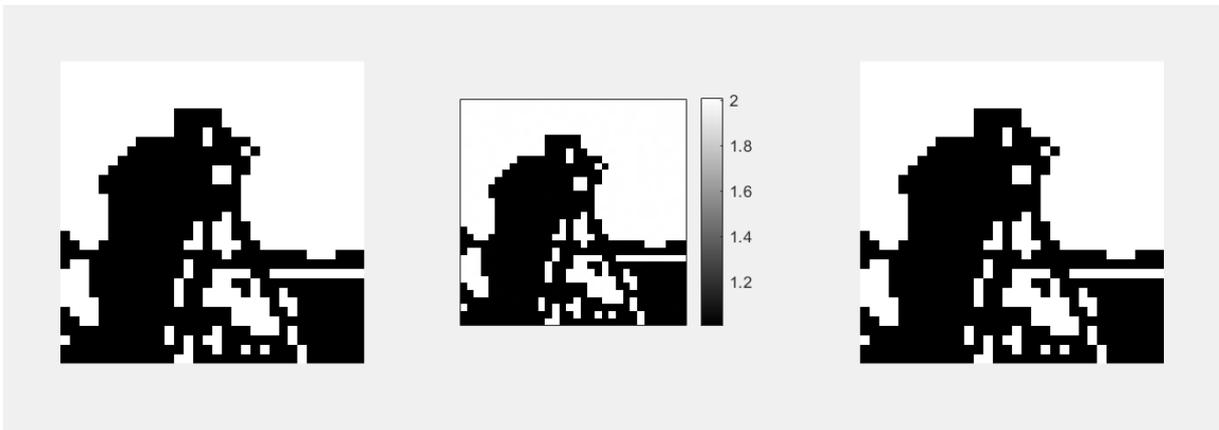


Abbildung 29 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 20dB

Bei den auf den Abbildungen 28 und 29 dargestellten Übertragungen wurde ein SNR von 20dB gewählt, was eine sehr gute Signalqualität und ein geringes Rauschniveau bedeuten. Dabei lässt sich feststellen, dass bei der inneren Modulation, also dem Signal mit einer höheren Bitrate auf dem Übertragungsweg ein leichtes Rauschen zu erkennen ist. Dies zeigt sich anhand des mittleren Bildes in der Abbildung 28. Dort wird das Rauschen anhand der vorhandenen Graustufen dargestellt, welche besonders in dem oberen komplett weißen Bereich der Abbildung zu erkennen sind. Obwohl das Rauschen vorhanden ist, hat es aufgrund des hohen SNR keinen signifikanten Einfluss auf die Übertragung. Der Empfänger kann das Signal immer noch zuverlässig rekonstruieren und die richtigen Informationen wiedergeben.

Im Gegensatz dazu lässt sich bei der Übertragung mit einer geringeren Bitrate, wie in Abbildung 29 dargestellt, keine erkennbare Graustufenvielfalt auf dem Bild des Übertragungswegs feststellen. Das geringe Rauschen hat hierbei keinen Einfluss mehr auf die Übertragung, und das Bild kann entsprechend ohne Pixelfehler übertragen werden.

Es ist wichtig anzumerken, dass ein SNR von 20 dB eine sehr gute Signalqualität repräsentiert und dazu führt, dass das Rauschen auf dem Übertragungsweg vernachlässigbar wird.

Anhand der Abbildungen 22 bis 29 wird der Verlauf des Einflusses des Signal-Rausch-Abstands auf die Bildübertragung mit den beiden unterschiedlichen Bitraten veranschaulicht.

Allgemein betrachtet lässt sich feststellen, dass die Höhe des Signal-Rausch-Abstands einen entscheidenden Einfluss auf die Übertragungsqualität hat. Je höher der SNR ist, desto geringer sind die Auswirkungen des Rauschens und desto zuverlässiger ist die Übertragung.

Dabei ist zu beachten, dass die Abbildungen 22 bis 29 auch deutlich darauf schließen lassen, dass das Rauschen bei einer Übertragung einen deutlich größeren Einfluss auf eine Übertragung mit einer größeren Bitrate hat, wodurch das Signal der inneren Modulation bereits bei einem SNR von 5dB nicht mehr fehlerfrei übertragen werden konnte, während bei dem Signal der äußeren Modulation erst bei einem SNR von 3dB die ersten Fehler im Empfangssignal auftreten.

## 8 Ausblick

Aus den durchgeführten Simulationen lässt sich erkennen, dass das Konzept einer hierarchischen Modulation keinen Einfluss auf die Übertragungsqualität hat. Somit bietet sie einen effektiven Weg übertragene Signale für verschiedene Arten von Empfängern verfügbar zu machen.

Anhand des Anwendungsbeispiels ist die Empfindlichkeit der Übertragung, rauschen gegenüber, deutlich zu erkennen. In Kapitel 7 wurden Wege beschrieben die Übertragungsqualität zu verbessern.

In weiteren Simulationen sollte eine passende Kanalcodierung hinzugefügt werden. Durch die dabei hinzugefügte Redundanz kann eine Fehlerkorrektur ermöglicht werden. Bei ausreichender Redundanzinformation können so Übertragungsfehler korrigiert werden, ohne dass eine erneute Übertragung notwendig ist. Bei einer effizienten Kanalcodierung kann der Signal-Rausch-Abstand um einige dB verbessert werden.

Die Optimierung dieses Übertragungsweges stellt einen interessanten Ausgangspunkt für weitere Arbeiten dar.

## Literaturverzeichnis

- [1] P. A. Hoeher, *Visible Light Communications: Theoretical and Practical Foundations*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019. doi: 10.3139/9783446461727.
- [2] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, und C. Chen, „What is LiFi?“, *J. Light. Technol.*, Bd. 34, Nr. 6, S. 1533–1544, März 2016, doi: 10.1109/JLT.2015.2510021.
- [3] Deutsches Institut für Normung e. V, „DIN EN 12464-1: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2021“. Beuth Verlag GmbH, November 2021.
- [4] „Photodiode - Lexikon der Physik“. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/photodiode/11179> (zugegriffen 11. Juli 2023).
- [5] R. Heilmann, *Rauschen in der Sensorik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-29214-0.
- [6] S. Rajagopal, R. Roberts, und S.-K. Lim, „IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support“, *IEEE Commun. Mag.*, Bd. 50, Nr. 3, S. 72–82, März 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.
- [7] S. Mardani, A. Khalid, F. M. J. Willems, und J.-P. Linnartz, „Effect of Blue Filter on the SNR and Data Rate for Indoor Visible Light Communication System“, in *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Gothenburg: IEEE, Sep. 2017, S. 1–3. doi: 10.1109/ECOC.2017.8346016.
- [8] S. C. Tokgoz, N. Anous, S. Yarkan, A. Boyaci, und K. A. Qaraqe, „Performance Evaluation of White LED-based OFDM-VLC Systems with Blue Filters: Experimental Study“, in *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Istanbul, Turkey: IEEE, März 2019, S. 686–690. doi: 10.1109/SSD.2019.8893211.
- [9] Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen, „ETSI EN 300 744 V1.6.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television“. ETSI, Januar 2009.
- [10] R. Stukavec und T. Kratochvil, „Performance of hierarchical modulation in DVB-T“, in *20th International Conference Radioelektronika 2010*, Brno: IEEE, Apr. 2010, S. 1–4. doi: 10.1109/RADIOELEK.2010.5478593.

- [11]C. Guerra-Yanez, A. Mederos-Barrera, S. Zvanovec, und Z. Ghassemlooy, „Experimental Evaluation of a Hierarchical QAM VLC System“, in *2022 13th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, Porto, Portugal: IEEE, Juli 2022, S. 545–549. doi: 10.1109/CSNDSP54353.2022.9907925.
- [12]J.-R. Ohm und H. D. Lüke, *Signalübertragung: Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme*. in Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-53901-5.
- [13]Y. Ikeda, K. Okuda, und W. Uemura, „The coded hierarchical modulation with amplitude for estimating the position in visible light communications“, in *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Tokyo, Japan: IEEE, Okt. 2014, S. 412–413. doi: 10.1109/GCCE.2014.7031108.
- [14]Jinsoo Ahn und Ronny Yongho Kim, „Hierarchical modulation symbol sharing scheme for multiuser cellular networks“, in *2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, Harbin, China: IEEE, Dez. 2015, S. 1021–1024. doi: 10.1109/ICCSNT.2015.7490910.
- [15]J. Grubor, S. C. J. Lee, K.-D. Langer, und T. Koonen, „Wireless High-Speed Data Transmission with Phosphorescent White- Light LEOs“.
- [16]E. Pikasis und W. O. Popoola, „Understanding LiFi Effect on LED Light Quality“, in *2018 IEEE Photonics Conference (IPC)*, Reston, VA: IEEE, Sep. 2018, S. 1–2. doi: 10.1109/IPCon.2018.8527234.
- [17]Moh. K. Hasan, N. T. Le, Md. Shahjalal, M. Z. Chowdhury, und Y. M. Jang, „Simultaneous Data Transmission Using Multilevel LED in Hybrid OCC/LiFi System: Concept and Demonstration“, *IEEE Commun. Lett.*, Bd. 23, Nr. 12, S. 2296–2300, Dez. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2019.2945758.
- [18]M. S. Islim, H. Haas, und E. Eh, „Modulation Techniques for Li-Fi“.
- [19]K.-D. Langer, J. Vucic, C. Kottke, L. F. Del Rosal, S. Nerreter, und J. Walewski, „Advances and prospects in high-speed information broadcast using phosphorescent white-light LEDs“, in *2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks*, Ponta Delgada, Portugal: IEEE, Juni 2009, S. 1–6. doi: 10.1109/IC-TON.2009.5184994.
- [20]Z. P. Choudhari und S. R. Devane, „High sensitivity universal lifi receiver for enhance data communication“, in *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, Coimbatore, India: IEEE, Nov. 2016, S. 1–5. doi: 10.1109/GET.2016.7916619.

- [21]R. Heilmann, *Rauschen in der Sensorik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-29214-0.
- [22]M. Meyer, *Kommunikationstechnik: Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung ; ... mit 38 Tabellen*, 5., Korrigierte Aufl. in Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [23]„IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications“, IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8697198.
- [24]E. Setiawan, T. Adiono, I. N. O. Osahon, und W. O. Popoola, „Experimental Demonstration of Visible Light Communication using White LED, Blue Filter and SoC based Test-Bed“, in *2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*, Badung-Bali, Indonesia: IEEE, Okt. 2019, S. 1–4. doi: 10.1109/ISESD.2019.8909625.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung des Konzepts von Beamforming [3, S. 8].....	9
Abbildung 2 Tabelle für die Mindestwerte der Beleuchtung in Büros [4, S. 61].....	10
Abbildung 3 Tabelle für die Mindestwerte der Beleuchtung in medizinischen Umgebungen [4, S. 78].....	11
Abbildung 4 Schematischer Aufbau einer Fotodiode[5].....	12
Abbildung 5 Grafische Darstellung von Broadcast und Multicast .....	16
Abbildung 6 Dimmen mit Hilfe von Pulsweitenmodulation [7].....	19
Abbildung 7 Konzept einer 2-PPM [7].....	20
Abbildung 8 Konzept einer VPPM mit 75% Pulsweite [7].....	21
Abbildung 9 Darstellung des Aufbaus eines VLC-Systems mit Bluefiltering [8] .....	23
Abbildung 10 16-QAM Konstellation [11] .....	25
Abbildung 11 Originalbild[12].....	27
Abbildung 12 Empfangenes Bild bei der Nutzung von QAM [12] .....	28
Abbildung 13 Empfangenes Bild bei der Nutzung von HQAM [12].....	28
Abbildung 14 Sendesignal 1 .....	41
Abbildung 15 Bitfehlerkurve von Signal 1.....	41
Abbildung 16 Sendesignal 2 .....	42
Abbildung 17 Bitfehlerkurve von Signal 2.....	42
Abbildung 18 Sendesignale 1 und 2 hierarchisch moduliert.....	43
Abbildung 19 Bitfehlerkurven von Signal 1 und 2 bei gemeinsamer Übertragung .....	43
Abbildung 20 in MATLAB enthaltenes Beispielbild "cameraman".....	45
Abbildung 21 Darstellung von Signal 1 und 2 des Anwendungsbeispiels.....	47
Abbildung 22 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 3dB .....	48
Abbildung 23 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 3dB .....	48
Abbildung 24 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 5dB .....	51
Abbildung 25 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 5dB .....	51
Abbildung 26 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 10dB .....	52
Abbildung 27 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 10dB .....	52
Abbildung 28 Übertragung von Bild A bei einem SNR von 20dB .....	53
Abbildung 29 Übertragung von Bild B bei einem SNR von 20dB .....	53

## Abkürzungsverzeichnis

VLC	Visible Light Communication
OWC	Optical Wireless Communication
LiFi	Light Fidelity
PPM	Pulse Position Modulation
VPPM	Variable Pulse Position Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
HQAM	Hierarchical Quadrature Amplitude Modulation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
OOK	On-Off Keying
NRZ-OOK	Non-Return-to-Zero On-Off Keying
LED	Light Emitting Diode
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
QEF	Quasi Error Free
FEC	Forward Error Correction
SD	Standard Definition
HD	High Definition
TLA	Temporal Light Artefacts
IoT	Internet of Things

## Formelverzeichnis

(3.1) Formel eines linearen Modulationsverfahrens.....	17
--	----

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

„Konzeption und Simulation hierarchischer digitaler Modulationsverfahren für LiFi-Anwendungen mit phosphoreszierenden weißen LEDs“

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.

---

Datum

---

Unterschrift