



# Projektierung eines Visible Light Communication Senders

Bachelorarbeit  
von

**Edmond Krasniqi**

Fakultät für Elektro- und Informationstechnik  
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft

Betreuer: Prof Dr.-Ing. Manfred Litzenburger  
Ko-Betreuer: Prof Dr.-Ing. Klaus Wolfrum

Karlsruhe, April 2021



# **Declaration / Erklärung**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelor-Thesis ohne unzulässige fremde Hilfe selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet zu haben.

Edmond Krasniqi  
Karlsruhe, 31.03.2021



# Acknowledgement / Danksagung

*Die Neugier steht immer an erster Stelle eines Problems, das gelöst werden will. — Galileo Galilei*

Im Studiengang Elektro- und Informationstechnik an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft in Karlsruhe ist für die Beendigung des Bachelorstudiums eine Bachelor Thesis vorgesehen. Großes Interesse und Begeisterung an Elektrischen Schaltungstechnik bewegten mich zu meiner Entscheidung meine Thesis über das Thema Visible light communication (VLC) zu verfassen. Mir wurde die Möglichkeit zu Teil, vier Monate in dem Labor der Hochschule Karlsruhe zu forschen und meinen Lösungsansatz zu realisieren und zu Dokumentieren.

Hierbei konnte ich mein im Studium erlangtes Wissen anwenden, mir neue Fähigkeiten aneignen und auch umfangreiche Einblicke in die Elektrotechnik der aktuellsten Kommunikationstechnischem Modelle bekommen. Deshalb möchte ich an dieser Stelle der Hochschule Karlsruhe für die produktive und intensive Zusammenarbeit danken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof Dr. - Ing. Manfred Litzenburger, der mich während meiner Arbeit sehr engagiert betreut und stets konstruktiv und hilfsbereit unterstützt hat.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. - Ing. Manfred Litzenburger und seinen Professorenkollegen, die mich im Vorfeld in sehr umfangreichen Vorlesungen und Veranstaltungen mit sowohl einem theoretischen als auch einem praktischen Basiswissen ideal auf meine Abschlussarbeit vorbereitet haben.

Ein herzliches Dankeschön an meine Familie und Freunde ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Zur Vereinheitlichung des Sprachgebrauches, verwende ich in diesem Bericht Abkürzungen. Ich verweise diesbezüglich auf das hier gegebene Abkürzungsverzeichnis.



# **Kurzfassung**

Hier steht die Kurzfassung



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	1
1.3 Vorgehensweise . . . . .	1
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Audio . . . . .	3
2.2 Einführung in die Übertragungstechnik . . . . .	6
2.2.1 Übertragungssystem . . . . .	6
2.2.2 Trägermodulation und Konstellationsdiagramm . . . . .	8
2.2.3 OFDM . . . . .	12
2.2.4 DRM . . . . .	12
2.3 Elektrische Bauteile . . . . .	12
2.3.1 Leuchtdiode . . . . .	12
2.3.2 Operationsverstärker . . . . .	15
2.3.3 Feldeffekttransistor . . . . .	19
2.3.4 Digital Potentiometer . . . . .	20
2.3.5 DC/DC Spannungswandler . . . . .	20
2.3.6 Arduino UNO V3 . . . . .	21
2.4 Tools . . . . .	22
2.4.1 LT-Spice . . . . .	22
2.4.2 Eagle . . . . .	22
2.4.3 Arduino IDE . . . . .	22
2.4.4 Dream . . . . .	23
<b>3 System</b>	<b>25</b>
3.1 Analoge Signalverarbeitung . . . . .	25
3.1.1 Simulation in LT-Spice . . . . .	28
3.1.2 Platinenlayout in Eagle . . . . .	29
3.1.3 Thermisches Management . . . . .	30
3.1.4 Planung und Aufbau des Gehäuses . . . . .	32
3.2 Software . . . . .	32
3.2.1 Automatisierte Amplituden-Regelung . . . . .	32
3.2.2 Übertragung mit Dream . . . . .	32
<b>4 Modell</b>	<b>37</b>
4.1 Testaufbau zur Funktionsprüfung . . . . .	37
4.2 Vorzeige Modell . . . . .	37
<b>5 Evaluation</b>	<b>39</b>

<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>41</b>
6.0.1 Abkürzung . . . . .	41
6.0.2 Symbol . . . . .	41
6.0.3 Bild . . . . .	41
6.0.4 Formel . . . . .	42
6.0.5 Tabelle . . . . .	42
6.0.6 Referenz und Zitat . . . . .	42
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>43</b>
<b>Online-Referenzen</b>	<b>45</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>47</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>49</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>51</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>53</b>

# **1. Einleitung**

Hier steht die Einleitung

**1.1 Motivation**

**1.2 Ziel der Arbeit**

**1.3 Vorgehensweise**



## 2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen eines neuartigen Übertragungssystems vorgestellt. Da eine Audioübertragung mittels VLC-Technik implementiert werden soll, wird zunächst auf die Eigenschaften eines zu übertragenden Audiosignals eingegangen. Darauf folgend werden einige Grundlagen zur Übertragungstechnik und der verwendeten elektronischen Bauteile erläutert. Zuletzt setzt sich dieses Kapitel mit Programmen auseinander, welche signifikant für die Realisierung der Übertragung sind. Hier werden grundlegende Funktionsweisen sowie deren Rolle in der analogen und digitalen Signalverarbeitung thematisiert.

### 2.1 Audio

Ziel der vorliegenden Abschlussarbeit ist die Übertragung eines Echtzeit-Audio-Signals mithilfe des projektierten VLC-Senders. Deshalb soll im nachfolgenden Kapitel anfänglich im Allgemeinen auf die Übertragung von Audiosignalen eingegangen werden. Praktische Beispiele zu der Übertragung von Audiosignalen über größere Entfernung ergeben sich bei der Übertragung von Sprache und Musik. Hierbei wird zunächst der Hörschall mit Hilfe eines Mikrofons in ein proportionales elektrisches Signal umgewandelt. Dieses Signal wird anschließend auf drahtlosem Wege dem Empfänger übermittelt. Gängige Beispiele für die drahtlose Übertragung sind Wireless Local Area Network (WLAN) und der klassische Rundfunk. Am Empfangsort wird das elektrische Signal mittels eines Lautsprechers wieder in ein akustisches Signal umgesetzt.[PS16] Der Lautsprecher erzeugt eine mechanische Welle, die in Hörschall resultiert. Hierbei definiert die Frequenz eine Tonlage und die Amplitude, in diesem Fall, die Lautstärke des Audiosignals. Beim Auftreffen dieser mechanischen Welle auf das menschliche Trommelfell wird dieses in Schwingung versetzt und regt somit die menschlichen Nerven an. Das Signal wird im Ohr von einer mechanischen Welle in ein elektrisches Signal umgewandelt, das über die Nervenbahnen zum Gehirn gelangt. Im Gehirn wird das elektrische Signal verarbeitet und mit semantischen Informationen verbunden. Diese ermöglichen das menschliche Hören.[?] Die Wahrnehmung von Tönen bei Menschen hängt jedoch nicht nur von der Amplitude und der Frequenz des Tones ab, sondern auch von der wahrnehmenden Person selbst. Demnach können Menschen nur Töne in einem bestimmten Frequenzbereich wahrnehmen. Frequenzen unterhalb des menschlichen Hörbereichs werden Infraschall genannt, darüber liegende Frequenzen werden als Ultraschall bezeichnet. Dieser Frequenzbereich ist nicht nur von Mensch zu Mensch unterschiedlich, sondern variiert auch mit zunehmendem Alter. Daher kann der Frequenzbereich des menschlichen Hörens nicht pauschal vereinheitlicht werden. Plassmann bringt

den Hörbereich zwischen 16 Hz und 16 kHz vor [PS16], wohingegen Michels ihn zwischen 16 Hz bis 20 kHz ansiedelt [MJ12]. Der hörbare Frequenzbereich variiert auch von Lebewesen zu Lebewesen. Hunde haben zum Beispiel ein erheblich feineres Hörorgan als Menschen. Ihr Frequenzbereich erstreckt sich als Folge dessen von 65 Hz bis 45 kHz.[MJ12]

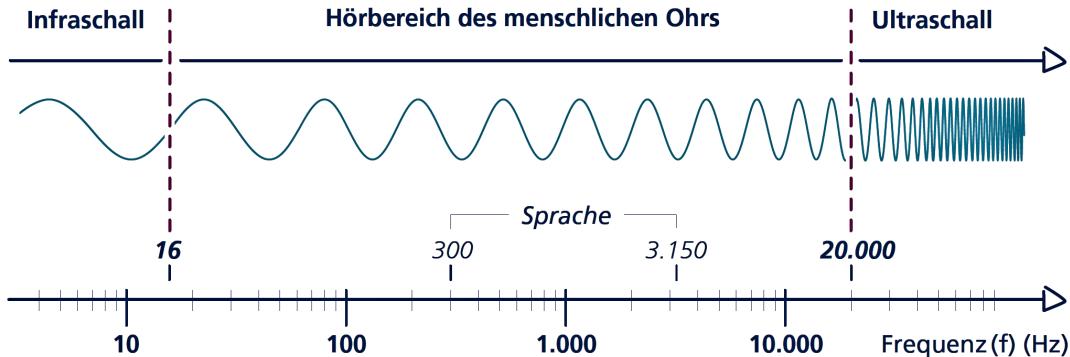


Abbildung 2.1: Hörbereich des menschlichen Ohrs  
[MJ12]

Außerdem verändert der Abstand zu einer Quelle zusätzlich die Wahrnehmung des Signals. Die Amplitude einer sich ausbreitenden Welle verringert sich mit zunehmender Distanz, wodurch die Lautstärke abnimmt. Befindet sich eine Quelle außerhalb der Hörreichweite können diese durch analoge oder digitale Kommunikationssysteme abgefangen werden, um eine Übertragung zu ermöglichen. Zur Übertragung und Weiterverarbeitung der beschriebenen mechanischen Welle muss diese zunächst in eine elektrische Größe verwandelt werden. Bei dieser Wandlung wird für Audiosignale ein Mikrofon verwendet. Ähnlich wie es mit dem Trommelfell im menschlichen Ohr passiert, wird im Inneren des Mikrofons eine Membran in Schwingung versetzt und erzeugt dadurch eine elektrische analoge Spannung. Zur digitalen Verarbeitung des Signals muss dieses mithilfe eines Analog-Digital-Wandlers (AD-Wandler) in digitale Werte verwandelt werden. Hierfür wird die Analogspannung in zeitlich äquidistanten Abständen ausgewertet und abgespeichert. Es wird also ein Signal mit einem Dirac-Kamm gefaltet um dessen Werte zu ermitteln. Dieser Vorgang wird Abtastung genannt und in Darstellung 2.2 illustriert. Diese Abtastung spiegelt einzelne Impulse mit Werten des Signals zu den Abtastzeitpunkten wider. Zwischen den Abtastzeitpunkten wird jedoch keine Information abgefragt, wodurch der Wert an diesen Stellen Null beträgt. Zur Rekonstruktion des Originalsignals müssen durch einen Digital-Analog-Wandler die fehlenden Signalabschnitte interpoliert werden. Um also eine aussagekräftige Abtastung durchzuführen, ist die Korrelation zwischen Abtastfrequenz und Signalfrequenz zu berücksichtigen.

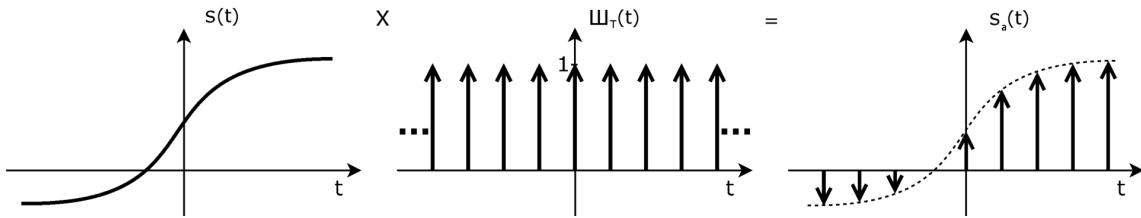


Abbildung 2.2: Abtastung eines Signals  
[14]

In Abbildung 2.2 ist zu erkennen, dass genügend Abtastwerte vorhanden sind, weshalb der Verlauf des Signals im Nachgang detailliert wiedergegeben werden kann. Abtastfrequenz und Signalfrequenz stehen demnach in einem adäquaten Verhältnis zueinander. Je weniger Abtastwerte vorhanden sind, desto größer werden Messabstände. Dies hat zur Folge, dass eine Rekonstruktion des Signales bald nicht mehr möglich ist.[OE08]

Das Abtasttheorem von Shannon besagt, dass für die höchste Signalfrequenz pro Schwingung mindestens zwei mal abgetastet werden muss, um das Signal ausreichend rekonstruieren zu können. Hierbei wird also Formel 2.1 angewendet.

$$F_A \geq 2 \cdot F_S \quad (2.1)$$

Die Variable  $F_A$  bildet hierbei die Abtastfrequenz ab und  $F_S$  steht für die höchste im Signal enthaltende Frequenz. In Abbildung 2.3 wird bei der oberen Abtastung die Regel von Shannon befolgt, wohingegen sie im unteren Teil der Abbildung verletzt wird. An diesem Beispiel ist gut zu erkennen, dass durch die richtige Abtastung eine relativ originalgetreue Rekonstruktion stattfinden kann, während bei einer Unterabtastung das Signal merklich verfälscht rekonstruiert wird. Zuzüglich ist an dieser Darstellung jedoch zu sehen, dass die Abtastung nur den minimalen und den maximalen Wert des Signals abgetastet hat. Dies bedeutet, dass bei einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$  nur Nulldurchgänge des Signals abgetastet worden sind, was eine Rekonstruktion unmöglich gemacht hätte.

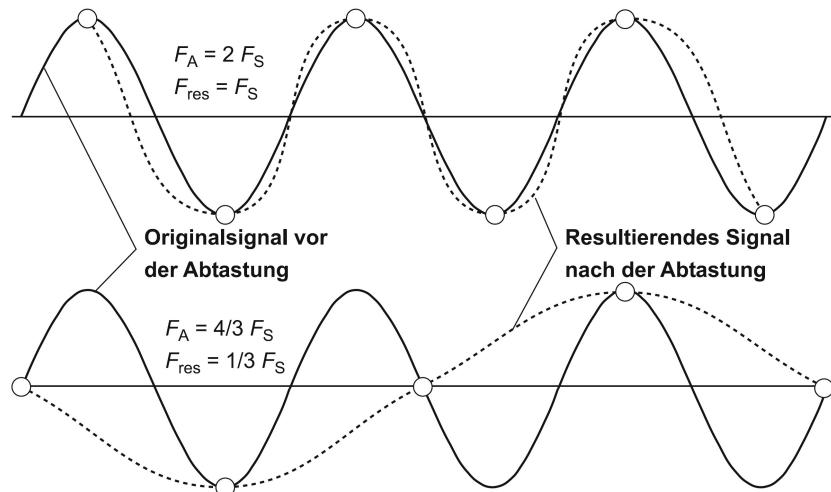


Abbildung 2.3: Vergleich zwischen Abtastung und Unterabtastung eines Signals  
[?]

Empfehlenswert ist es also, das Shannon Theorem nur als absolute Untergrenze zu wählen und dazu zu neigen die Abtastfrequenz noch deutlich höher als das maximale zu messende Signal zu bestimmen.[?] Im Audiobereich wird häufig mit 44,1 kHz oder mit 48 kHz abgetastet und somit das Shannon-Theorem eingehalten, da der Hörbereich des menschlichen Ohrs 2.1 bei 20 kHz endet. [OE08]

## 2.2 Einführung in die Übertragungstechnik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der modernen Übertragungstechnik als Basis für die weiteren Ausführungen erklärt. Zunächst soll der generelle Aufbau eines Übertragungssystems erläutert werden, um anschließend einige gängige digitale Modulationsarten vorzustellen. Hierbei liegt der Fokus besonders auf der Quadratur-Amplitudens-Modulation (QAM)-Modulation, welche in der später diskutierten Dream-Software Verwendung findet. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit den Themen der Bandbreitenutzung und des Mehrkanalzugriffs. Hier werden die aus der Mobilfunktechnik bekannten Begriffe Frequency-Division-Multiple-Access (FDMA), Time-Division-Multiple-Access (TDMA) und Code-Division-Multiple-Access (CDMA) eingeführt und beschrieben.

### 2.2.1 Übertragungssystem

Ein Übertragungssystem ergibt sich vereinfacht dargestellt aus fünf verschiedenen Komponenten. In Abbildung 2.4 ist eine Skizze eines solchen Übertragungssystems zu sehen. Zunächst ist eine Quelle vonnöten, welche ein zeitkontinuierliches Signal (z.B. Sprache, Musik, Bilddaten, analoge Messwerte) oder ein zeitdiskretes Signal (z.B. Buchstaben, Datensequenzen, abgetastete analoge Signale) zur Verfügung stellt. Die Informationsquelle (information source) übergibt die Nachricht (message) dem Sender (transmitter). Der Sender übernimmt im System die Aufgabe, die Informationsquelle in ein für die Übertragung geeignetes Format umzuwandeln. Dieses muss auf den später zur Weiterleitung des Signals genutzten Kanal abgestimmt werden, welcher dann das entsprechende Sendesignal (signal) für den Kanal (channel) generiert. Im Kanal addiert sich das Signal der Störquelle (noise source) hinzu, sodass sich das Empfangssignal (received signal) am Empfänger (receiver) ergibt. Dabei gilt es darauf zu achten, den zur Verfügung stehenden Kanal und seine Eigenschaften möglichst effizient zu nutzen und die Störquelle zu minimieren. Sendekanäle sind physikalischer Natur und allgemein fehlerbehaftet. Es wird zwischen drahtlosen Kanälen (elektromagnetisch, akustisch, Infrarot) und drahtgebundenen Kanälen (Kupferleitungen, Glasfaserkabel) unterschieden. Im Anschluss generiert der Empfänger daraus dann die empfangene Nachricht (received message) und leitet jene schließlich der Informationssenke (destination) weiter. In Anbetracht ihrer Anwendung werden diese einzelnen Blöcke des Kommunikationsmodells in weitere Komponenten zerlegt und somit weiter spezialisiert. [Wer10]

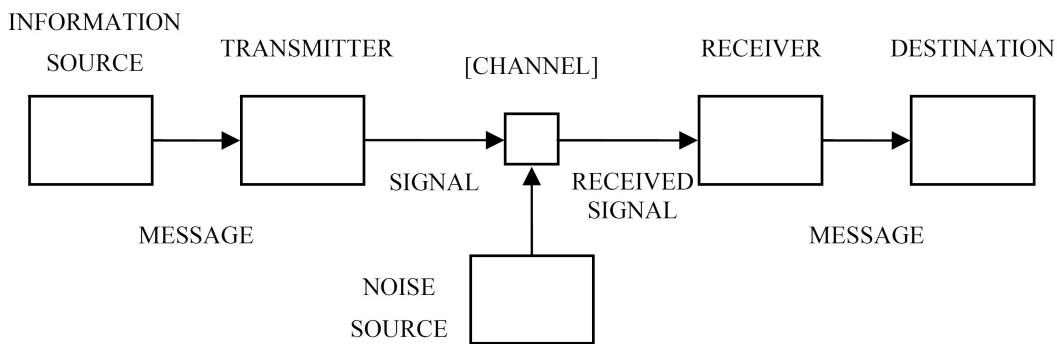


Abbildung 2.4: Nachrichtenübertragung nach Shannon  
[Sha]

Aufgrund der Thematik dieser Abschlussarbeit soll das Augenmerk nun auf ein drahtloses Übertragungssystem gelegt werden. Zur Projektierung eines solchen müssen zunächst der physikalische Kanal und die Signalform festgelegt werden. So verwenden Fernbedienungen beispielsweise als Signalform Licht im Infrarot-Bereich, um Datenbefehle zu übertragen. Nach einem ähnlichen Prinzip funktioniert auch VLC. Die Schwierigkeit ist jedoch, dass der direkte Einfall des Lichts auf den Empfänger gegeben sein muss, weshalb die Reichweite dieser Form der Datenübertragung äußerst begrenzt ist. Daher eignet sie sich beispielsweise nicht für den Mobilfunk. Hier werden üblicherweise elektromagnetische Wellen in Megahertz bis Gigahertz Frequenzbereichen appliziert. Diese Wellen bestehen aus einem magnetischen Feld ( $\vec{B}$ ) und einem elektrischen Feld ( $\vec{E}$ ). Zudem breiten sich jene Felder orthogonal zueinander aus, wie in Abbildung 2.5 veranschaulicht wird.[15]

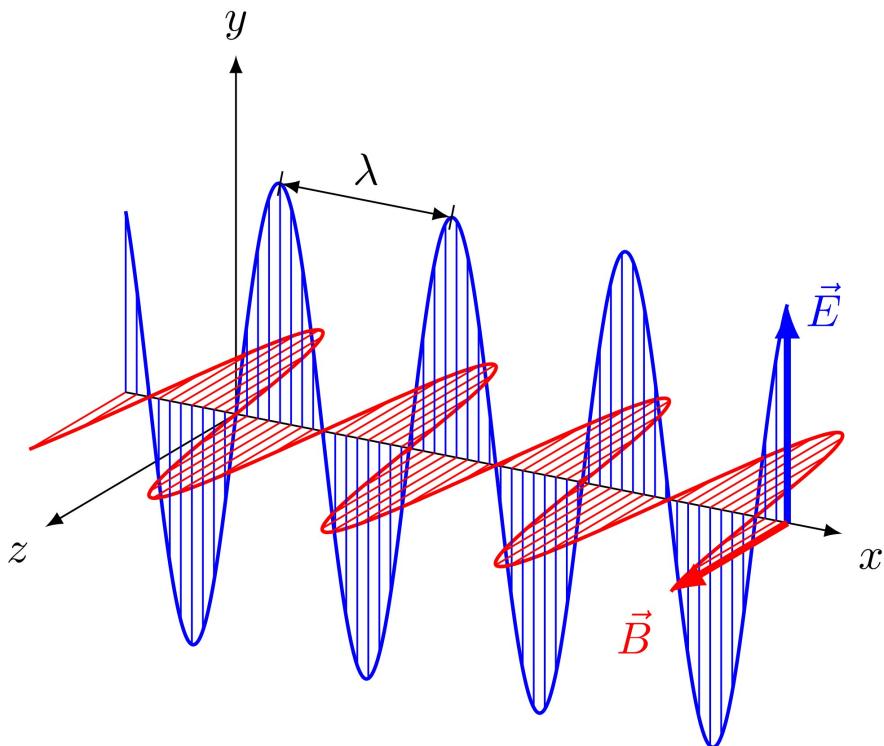


Abbildung 2.5: Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle  
[15]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Eine solche Form von Wellen ist nicht an ein Ausbreitungsmedium gebunden, weshalb es sich auch im Vakuum (z.B. im Weltraum) ausbreiten kann. Diese Eigenschaft ermöglicht beispielsweise eine Satellitenkommunikation. Zur Erzeugung einer elektromagnetischen Welle wird zunächst eine hochfrequente Wechselspannung benötigt. Diese wird meist durch einen Quarzoszillator erzeugt. Damit sich die Welle nun ausbreiten kann, benötigt sie eine Antenne, von welcher sie sich ablösen kann.[WHT<sup>+</sup>][Wer10] Um sich jedoch von einer Antenne zu lösen, muss die Wellenlänge ( $\lambda$ - 2.2) der elektromagnetische Welle in die Größenordnung der Antennenabmessung kommen. Da ein Ton von 300Hz jedoch nach Formel 2.2 eine immens lange Antenne benötigen würde, muss mit Alternativen gearbeitet werden. Hieraus entsteht also die Bedingung, eine geeignete Trägerfrequenz zu bestimmen, um jener dann die zu versendende Information aufzumodulieren.[?][Höh13]

### 2.2.2 Trägermodulation und Konstellationsdiagramm

In Kapitel 2.2.1 wurden die Struktur und die Komponenten näher ausgeführt, welche ein Übertragungssystem besitzt. Zudem wurden elektromagnetische Wellen erklärt und die Bedeutung einer hochfrequenten Trägerfrequenz verdeutlicht. Hier soll nun die Funktionsweise eines solchen Vorhabens ausgeführt werden.

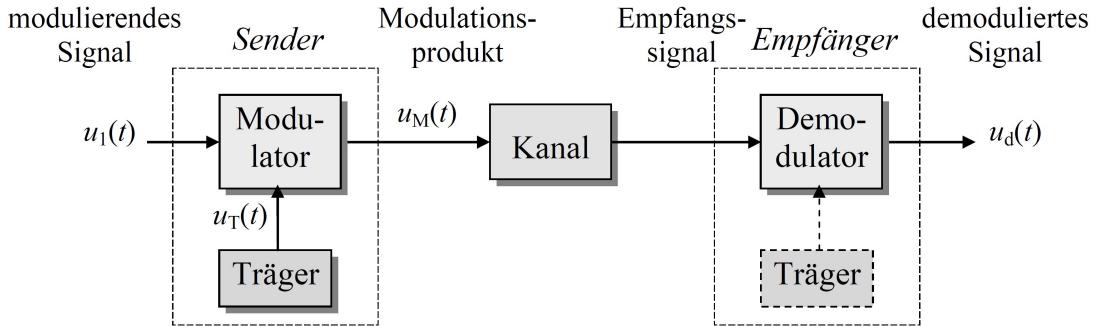


Abbildung 2.6: Blockschaltbild einer Übertragung mit Trägermodulation  
[Wer10]

Liegt nun also ein Signal im Basisband vor, wobei es sich beispielsweise um ein Audiosignal als elektrische Spannung am Ausgang eines Mikrofons handeln könnte, wird es normalerweise in einen höheren Frequenzbereich verschoben um über eine größere Entfernung übertragen zu werden. Radio-Rundfunk liefert ein Beispiel für eine solche Trägermodulation. Hierbei macht man sich die drei variablen Parameter eines sinusförmigen Trägersignals zu eigen. Dabei handelt es sich um die Frequenz, Amplitude und Phase eines jenen. In Abhängigkeit der benutzten Verfahren spricht man von Amplitudenmodulation (AM), Frequenzmodulation (FM) oder Phasenmodulation (PM). [Wer10] Diese Theorie der Trägermodulation soll nun am Beispiel eines AM-Signals und eines FM-Signals veranschaulicht werden.

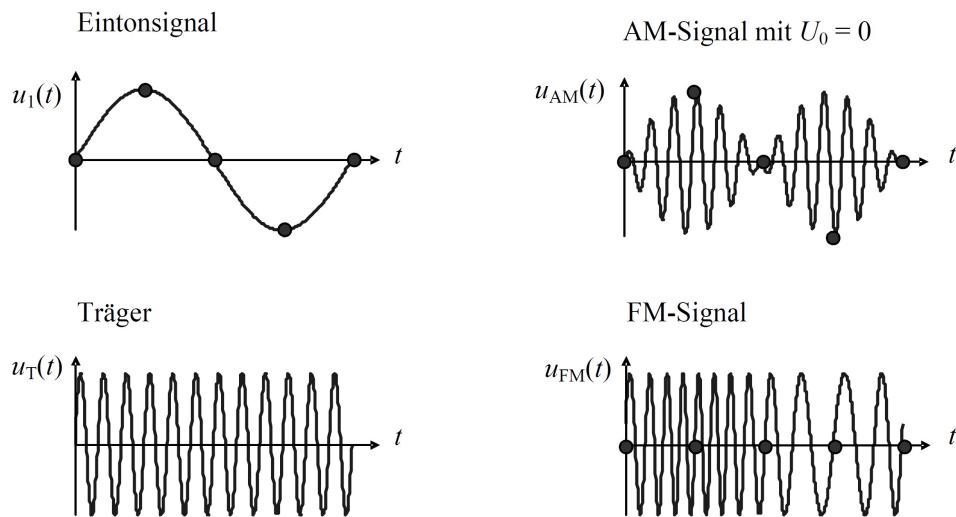


Abbildung 2.7: AM- und FM-Modulation eines Sinusträgers mit einem Eintonsignal  
[Wer10]

Hierbei wird ein analoges Ausgangssignal verwendet. Es findet also keine Wandlung in

ein digitales Signal statt. Bei der AM die sinusförmige Trägerfrequenz mithilfe eines Mixers auf das Signal multipliziert. Dabei gibt das Eintonsignal, wie in Abbildung 2.7 die Amplitude der hochfrequenten Trägerfrequenz vor und bildet somit die Einhüllende Kurve. Durch diesen Vorgang erlangt das Signal eine adäquate Frequenz zur Ablösung einer Antenne.[?][?]

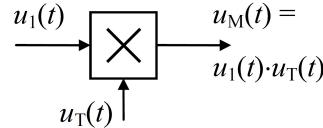


Abbildung 2.8: Trägermultiplikation bei AM  
[Wer10]

Bei Frequenzmodulation wiederum liegt die Information in der Frequenz und nicht in der Amplitude. Abbildung 2.7 illustriert dies. Beim frequenzmodulierten Signal ändert sich nämlich lediglich die Trägerfrequenz, wodurch diese Art von Modulation Störungen gegenüber deutlich resistenter ist, da keine so starke Amplitudenschwankungen auftreten.[Höh13]

Zur Vertiefung des Basiswissen werden nun noch digitale Modulationsarten erläutert. Hierbei wird auch mit der Variation von Frequenz, Amplitude und Phase gearbeitet. Diese drei Grundmodulationsarten sind in ihrer zweiwertigen Form in Darstellung 2.9 veranschaulicht.

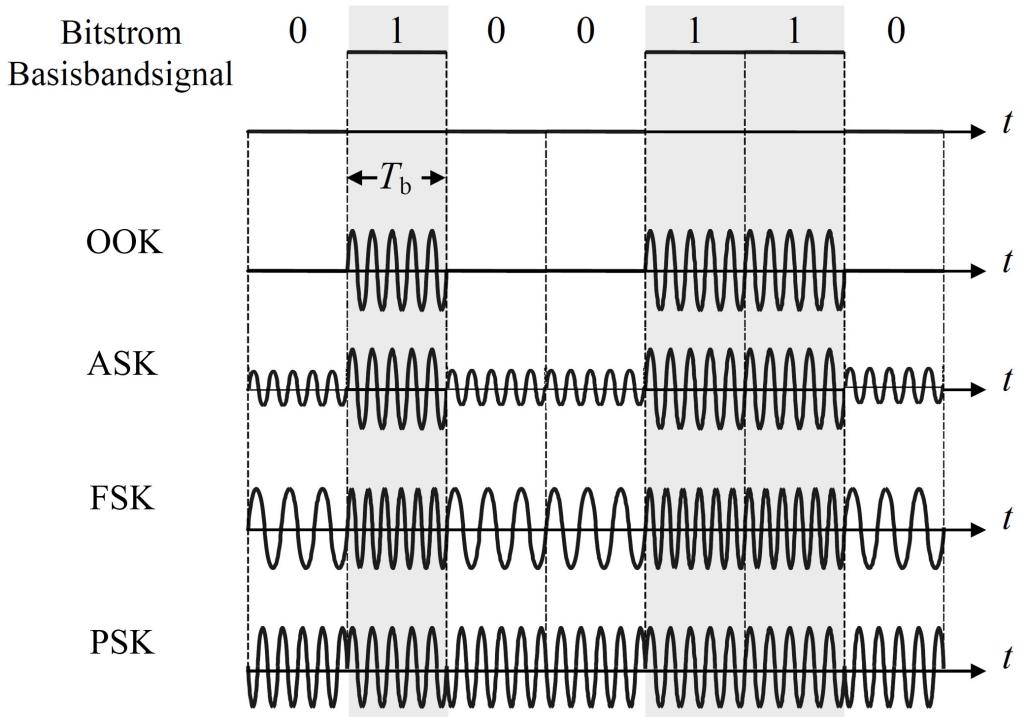


Abbildung 2.9: Binäre Übertragung mit Sinusträger  
[Wer10][01]

Hierbei wurde noch eine weitere Version der AM-Modulation illustriert. Diese nennt sich On-Off-Keying (OOK) und hat bei der Übertragung einer 1 eine Amplitude und wird jedoch bei der Übertragung einer 0 auf Null gesetzt. Da unter diesen Voraussetzungen

nicht ermittelt werden kann wann die Übertragung endet, wird hier ein Zwischenwert mit z.B. halber Amplitude zum Senden einer 0 verwendet. Die übertragenen Bit werden hierbei auch Symbole genannt. Modernere Kommunikationssysteme verwenden mittlerweile jedoch Modulationsarten die es ermöglichen mehrere Bits pro Symbol zu übertragen. Bei zwei Bit werden hierbei vier Zustände benötigt. Daraus entstehen dann Erweiterungen der genannten Modulationsarten, welche 4-Amplitude-Shift Keying (ASK) 4-Frequency-Shift Keying (FSK) und 4-Phase-Shift Keying (PSK) bezeichnet werden. Oft wird die Ziffer Vier auch mit dem Buchstaben Q für Quadratur ersetzt.[WHT<sup>+</sup>][?] Bei einer QAM wird beispielsweise eine Kombination zweier Modulationsarten verwendet. Dabei werden sowohl die Amplituden- als auch Phasenmanipulation benutzt, um Informationen zu modulieren.

Da im Zuge dieser Abschlussarbeit größtenteils mit einer QAM-Modulation gearbeitet wurde, wird diese näher erläutert. Um jedoch ein besseres Verständnis für den Aufbau einer solchen Modulation zu erlangen, muss der Begriff des Konstellationsdiagramms eingeführt werden. Dies soll am Beispiel einer Quadratur-Phase-Shift Keying (QPSK) veranschaulicht werden. Modulierte Wellen, sind sinusförmig und wie folgt definiert.

$$s_i(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0 + \varphi_i) \quad (2.3)$$

Dabei steht die Variable  $A$  für eine, bei der QPSK, konstante Amplitude. Die variable  $\varphi_0$  beschreibt zusätzlich die Phase des Referenzsignals. Zudem ergibt sich die in Formel 2.3 genannte Kreisfrequenz  $\omega$  aus:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.4)$$

Um die Entfernung der Symbole zu maximieren werden diese bei der QPSK um  $90^\circ$  zueinander verschoben. Tabelle 2.1 gibt Information über die verschiedenen Phasenlagen die von  $i$  angenommen werden können.

Funktion	$\varphi_i$	$\varphi_0$
$s_1(t)$	$0^\circ$	$45^\circ$
$s_2(t)$	$90^\circ$	$45^\circ$
$s_3(t)$	$180^\circ$	$45^\circ$
$s_4(t)$	$270^\circ$	$45^\circ$

Tabelle 2.1: Phasenlagen bei der QPSK

Ein Konstellationsdiagramm illustriert die verschiedenen Symbole, mit Betrag und Phasenlage, im komplexen Raum. Zur Verringerung der Bitfehler wird hier der Gray Code für die Zuordnung von Bits gewählt. Dies hat zu Folge, dass wenn ein Symbol fälschlicherweise dem benachbarten Symbol zugeordnet wird, nur ein Bit fehlerhaft ist. Bei einer Binären Codierung könnte beispielsweise die 00 der 11 zugeordnet werden, wodurch zwei Bitfehler in einem Symbol inkorrekt wären. Die Zahl der Bitänderungen von Symbol zum nächstgelegenen Symbol wird auch Hamming Abstand genannt.[17][18]

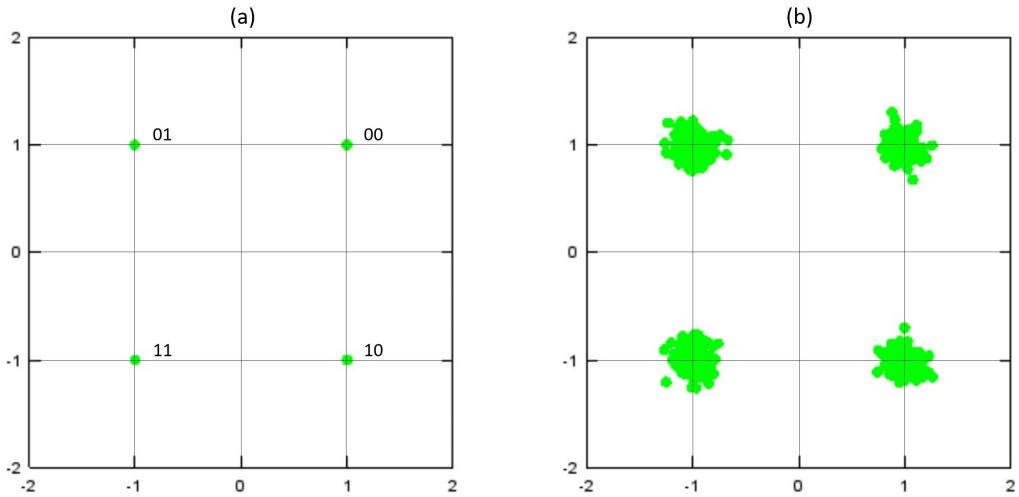


Abbildung 2.10: Konstellationsdiagramm mit  $\varphi_0 = 45^\circ$  im komplexen Raum  
[16]

In Abbildung 2.10 sind zwei Konstellationsdiagramme zu erkennen. Konstellationsdiagramm (a) ist hierbei ein klares rauschfrei empfangenes Signal, (b) hingegen wurde über einen verrauschten Kanal gesendet. Alle empfangenen Symbole häufen sich um die vier Symbolpunkte. Aufgrund des hier nur schwach verrauschten Kanals, können die Symbole noch problemlos zugeordnet werden. Bei einem sehr stark verrauschten Kanal jedoch, wäre diese Entscheidung unmöglich, wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist. Daher werden klare Entscheidungsgrenzen definiert, im gegeben Fall sind das die reelle und die imaginären Achse.

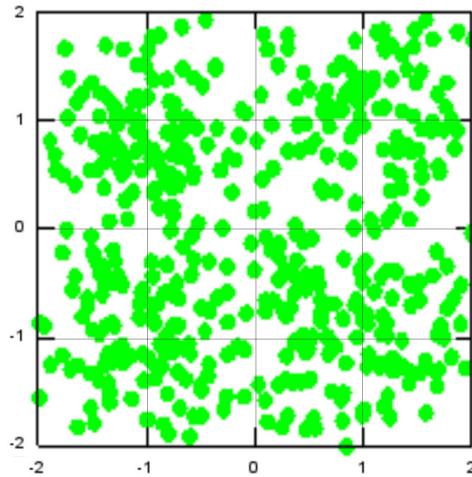


Abbildung 2.11: Konstellationsdiagramm mit  $\varphi_0 = 45^\circ$  mit stark verrauschem Kanal  
[16]

Ein solches Vorgehen ist jedoch bei höherwertigen PSK-Modulationen nicht mehr sinnvoll, da die Symbolabstände immer geringer werden würden und die Übertragung somit störanfälliger wird. Sinnvoller ist es also die QPSK so zu erweitern, dass man in der Wellengleichung nicht nur  $\varphi_i$  variiert, sondern auch die Amplitude  $A$ . Durch diese Erweiterung kann der Bitstrom enorm gesteigert werden. Exemplarisch hierfür sind die in Abbildung 2.12 gezeigten 16-QAM und die 64-QAM welche im Laufe dieser Abschlussarbeit noch Verwendung finden.

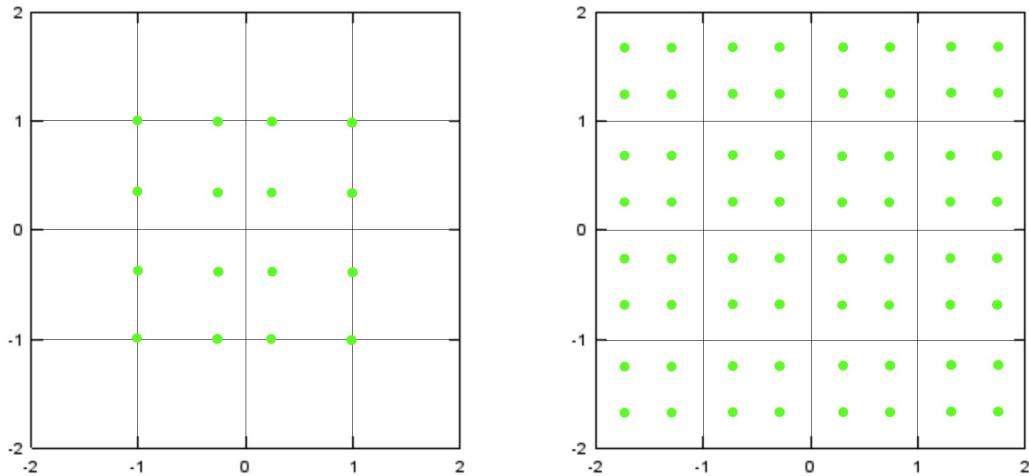


Abbildung 2.12: Konstellationsdiagramme mit 16-QAM und 64-QAM  
[01][16]

### 2.2.3 OFDM

### 2.2.4 DRM

## 2.3 Elektrische Bauteile

In diesem Kapitel werden grundlegende Bauteile eines VLC-Senders dargestellt und näher erläutert. Diese sind essenziell, um die Datenübertragung mittels dem optischen Kanal zu ermöglichen.

### 2.3.1 Leuchtdiode

Eine Light Emitting Diode (LED) ist ein Licht-emittierendes Halbleiter-Bauelement mit einem pn-Übergang. Ihre elektrischen Eigenschaften stimmen mit der einer Standard Diode überein, wodurch sie in nur eine Richtung leitend ist und in die entgegengesetzte Stromrichtung sperrt. Wenn durch einen eingekoppelten elektrischen Strom die LED in Durchlassrichtung betrieben wird, findet eine Lichtemission statt.[Sla]

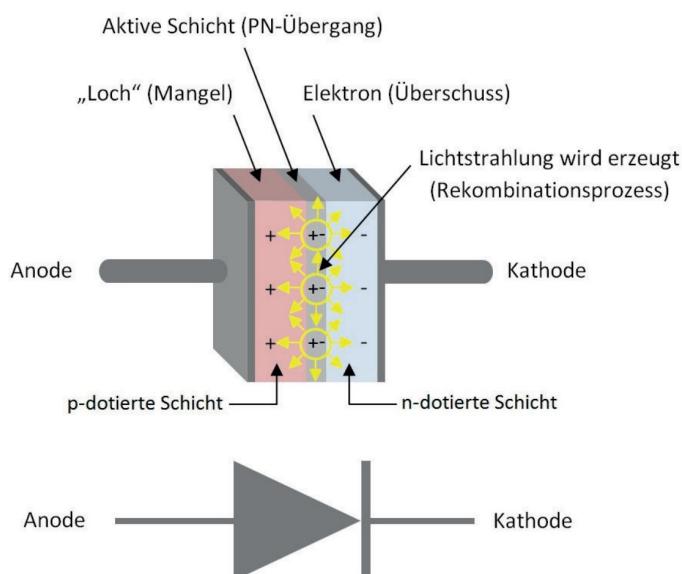


Abbildung 2.13: Strahlungserzeugung in der LED am pn-Übergang  
[Sla]

Der Grundsatz der Lichterzeugung in einer LED beruht auf einem Halbleiterkristall, der durch das Einbringen von Fremdatomen so dotiert ist, dass in der Diode zwei Gebiete entstehen. In einem Gebiet entsteht ein Elektronenüberschuss und in dem anderen Gebiet entstehen Löcher. Durch das Injizieren von Elektronen aus der positiv dotierten Seite in die Sperrsicht rekombinieren sich Löcher und Elektronen, wodurch Energie in Form von Licht abgegeben wird.[Sla] Die Farbe hängt dabei vom Halbleitermaterial und der genauen Dotierung ab. Zudem ist dieser Rekombinationsprozess stark temperaturabhängig. Dies wird in einem noch folgenden Kapitel näher erläutert.

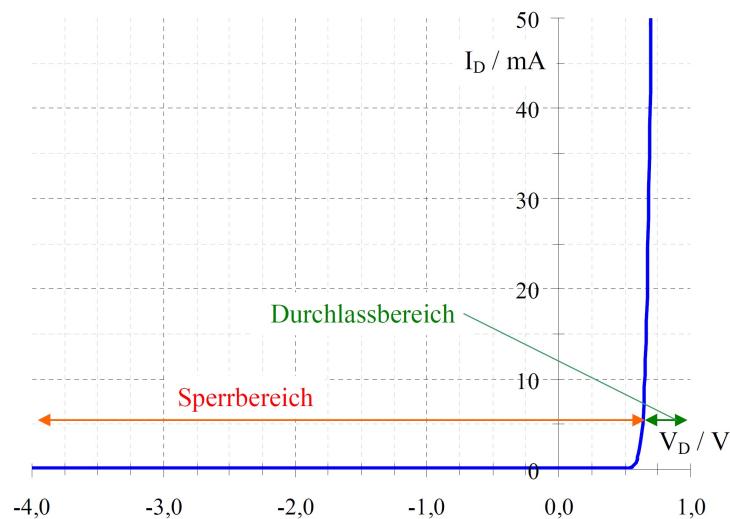


Abbildung 2.14: Diodenkennlinie  
[13]

In der Abbildung 2.14 ist die Strom-/Spannungskennlinie einer Diode in Durchlassrichtung dargestellt. Die Kennlinie einer LED hat den selben Verlauf, jedoch ist die Durchlassspannung je nach gewählter Farbe nicht bei ca. 0.7V sondern bei bis zu 4V bei einer blauen LED.

Farbe	Wellenlänge $\lambda$ in nm	Flussspannung $V_{D0}$ in Volt	Werkstoff
Infrarot	$\lambda > 760$	$V_{D0} < 1,9$	Galliumarsenid (GaAs) Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs)
■ Rot	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < V_{D0} < 2,03$	Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
■ Orange	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < V_{D0} < 2,10$	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
■ Gelb	$570 < \lambda < 590$	$2,1 < V_{D0} < 2,18$	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
■ Grün	$500 < \lambda < 570$	$2,18 < V_{D0} < 2,48$	Indiumgalliumnitrid (InGaN) Galliumnitrid (GaN) Galliumphosphid (GaP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Aluminiumgalliumphosphid (AlGaP)
■ Blau	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < V_{D0} < 3,7$	Zinkselenid (ZnSe) Indiumgalliumnitrid (InGaN) Siliziumkarbid (SiC)
■ Violett	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < V_{D0} < 4,0$	Indiumgalliumnitrid (InGaN)
Ultraviolett	$230 < \lambda < 400$	$3,1 < V_{D0} < 4,4$	Aluminiumnitrid (AlN) Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) Aluminiumgalliumindiumnitrid (AlGaInN)

Abbildung 2.15: Flussspannungen von LEDs verschiedener Farben  
[13]

Wie in Abbildung 2.14 illustriert ist, ändert sich die Spannung in ihrem Verlauf ab einem gewissen Punkt nur noch minimal. Das bedeutet, dass sich ab einer gewissen angelegten Spannung lediglich der Strom noch weiter erhöhen kann. Da die Leuchttintensität der LED von dieser Höhe des Stromdurchflusses abhängt, führt dies zu der Betrachtung, den durchfließenden Strom statt der angelegten Spannung zu regulieren. Stellt man nun den durch die LED fließenden Strom mit der Ausgangsleistung ins Verhältnis, ergibt sich ein Zusammenhang wie ihn Abbildung 2.16 zeigt.

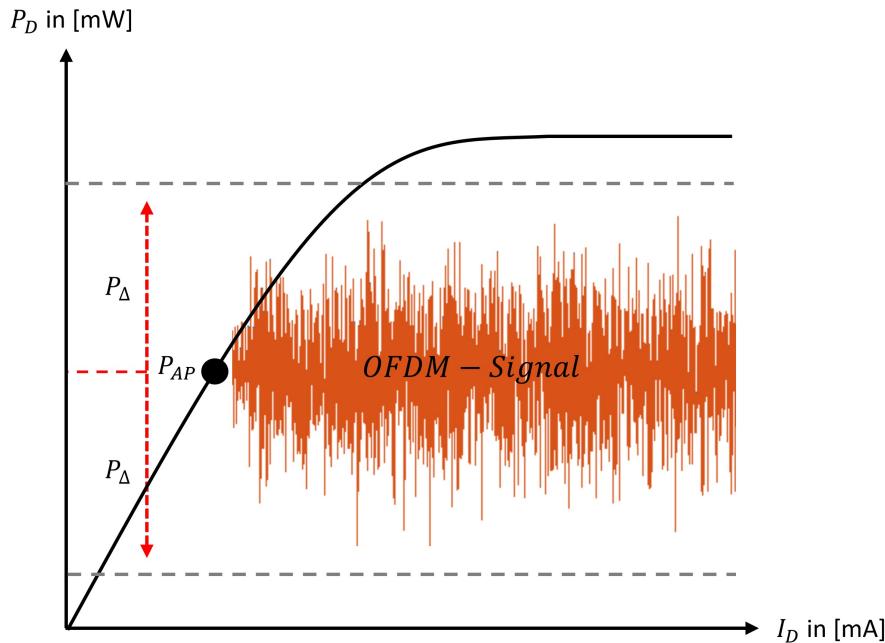


Abbildung 2.16: Kennlinie einer Diode – Lichtleistung zu fließendem Strom [01]

An dieser Stelle wird verdeutlicht, dass es zwei außerordentlich nicht-lineare Abschnitte in der Kennlinie gibt, welche sich durch ihre stark nicht-linearen Eigenschaften keineswegs zur Datenübertragung eignen. Zwischen diesen Bereichen, um die etwa mittlere Lichtleistung, gibt es jedoch einen linearen Bereich, welcher sich ausgezeichnet für die Übertragung von Daten eignet. Dies bedeutet, dass die LED auf einem festen Arbeitspunkt AP betrieben werden muss. Dieser Arbeitspunkt liefert der Diode einen immensen Aktionsradius, wodurch eine maximale Aussteuerung der Amplitude des Signals und somit eine verbesserte Konstellation zur Signalübertragung gewährleistet wird.

### 2.3.2 Operationsverstärker

„Im Grunde besteht kein Unterschied zwischen einem normalen Verstärker und einem Operationsverstärker. Beide dienen dazu, Spannungen bzw. Ströme zu verstärken. Während die Eigenschaften eines normalen Verstärkers jedoch durch seinen inneren Aufbau vorgegeben sind, ist ein Operationsverstärker so beschaffen, dass seine Wirkungsweise überwiegend durch eine äußere Gegenkopplungs-Beschaltung bestimmt werden kann. Um dies zu ermöglichen, werden Operationsverstärker als gleichspannungsgekoppelte Verstärker mit hoher Verstärkung ausgeführt. Damit keine zusätzlichen Maßnahmen zur Arbeitspunkteinstellung erforderlich werden, verlangt man ein Eingangs- und Ausgangsruhpotential von 0V. Deshalb sind in der Regel zwei Betriebsspannungsquellen erforderlich: eine positive und eine negative.“([TSG08],S.491)

Ein Operationsverstärker (OP) kann also mit einem Differenzverstärker von theoretisch unendlicher Verstärkung verglichen werden. Diese bezeichnet man als Leerlaufverstärkung. Schließlich führt das dazu, dass eine Gesamtverstärkung der Schaltung von einer zusätzlichen externen Verdrahtung abhängt. Diese wird von einem rückgekoppelten Netzwerk hergestellt und nennt sich Schleifenverstärkung.[Lut12]

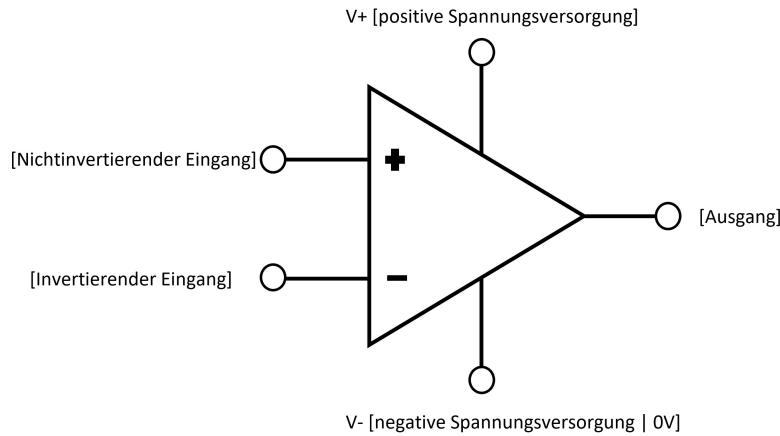


Abbildung 2.17: Operationsverstärker Anschlusschema  
[01]

Sie werden im Allgemeinen in Form einer integrierten Schaltung (Integrated Circuit (IC)) hergestellt, da die in dem Datenblatt eines Operationsverstärkers angegebenen Werte ausreichend beschrieben werden. Zudem verfügt der OP über einen invertierenden (-) und nicht-invertierenden (+) Eingang. Daraus können zwei der OP-Grundschaltungen extrahiert werden. Um das Verhältnis zwischen der Ausgangsspannung  $U_a$  und der Eingangsspannung  $U_e$  zu berechnen werden häufig die Parameter A und G verwendet. [Halbleiter Buch]

$$A = \frac{U_a}{U_e} \quad (2.5)$$

Außerdem haben OPs einen unendlich großen Eingangswiderstand und einen sehr geringen Ausgangswiderstand. Das Ruhepotential zwischen dem invertierenden und nicht-invertierenden Eingang ist beinahe Null, weshalb zwischen beiden Eingängen keine Spannung abfällt. Zudem fließt kein Steuerstrom, d.h. es fließt kein Strom in die Eingänge des OP, da es einen unendlichen Eingangswiderstand besitzt.[Fed17]

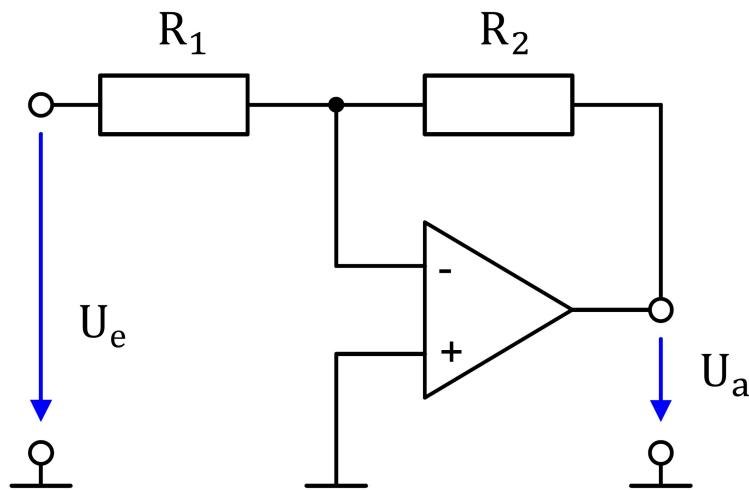


Abbildung 2.18: Invertierender Operationsverstärker  
[01]

Abbildung 2.18 zeigt die klassische Schaltung eines invertierenden Operationsverstärkers

mit Rückkopplungszweig. Dieser definiert über den Widerstand  $R_2$  die Schleifenverstärkung, indem auf den invertierten Eingang ein Teil des Ausgangssignals zurückgeführt wird. Bei einem steigenden Ausgangssignal wird so dem steigenden Eingangssignal entgegengewirkt. Dies gewährleistet, dass das Ausgangssignal nicht unendlich verstärkt werden kann. Der invertierende Eingang wird mit Masse verbunden. Zuletzt wird hier die Spannungsverstärkung  $A$  der invertierenden Grundschaltung über den Rückkopplungspfad bestimmt. Diese ergibt sich hier also zu:

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.6)$$

und das negative Vorzeichen bedeutet, dass hier eine Phasendrehung des Signals um  $180^\circ$  stattgefunden hat. Der invertierende Verstärker besitzt zudem die Fähigkeit Signale zu dämpfen. Daher wird er häufig für Filterschaltungen und messtechnische Zwecke benutzt.

Die folgende Abbildung 2.18 illustriert den nicht-invertierenden Operationsverstärker in seiner Grundschaltung. Die Spannungsverstärkung berechnet sich anhand der Spannungssteiler Beziehung

$$U_a = U_e \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} = U_e \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.7)$$

daraus ergibt sich dann

$$A = \frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.8)$$

Wegen seines kleinen Ausgangs- und großen Eingangswiderstandes eignet sich diese OP-Schaltung sehr gut als Wechselspannungsverstärker und Impedanzwandler. Die Übertaugungskennlinie ist in Abbildung 2.20 dargestellt.

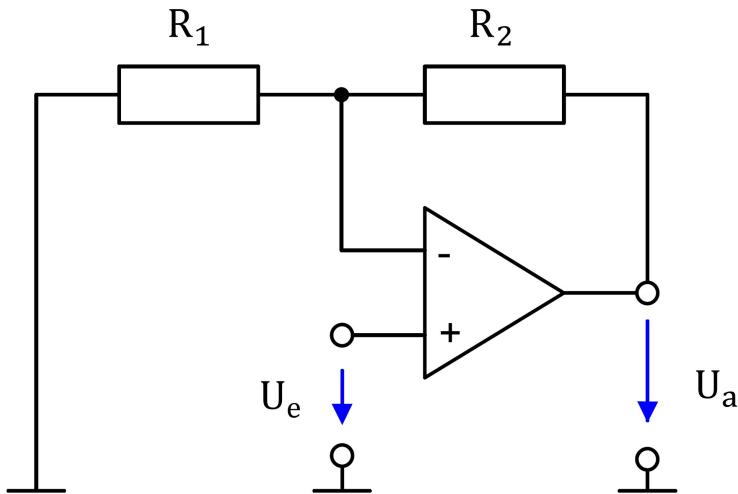


Abbildung 2.19: Nichtinvertierender Operationsverstärker  
[01]

Es zeigt auch die maximale Aussteuerbarkeit am Ausgang der OPs, welche innerhalb  $V_- < U_a < V_+$  liegt. Werden entweder positive oder negative Grenzen erreicht, kann  $U_a$  nicht weiter ansteigen. Dieser Zustand nennt sich Übersteuerung. Die klassischen Aussteuergrenzen liegen in etwa 1V unter der Versorgungsspannung.[Fed17]

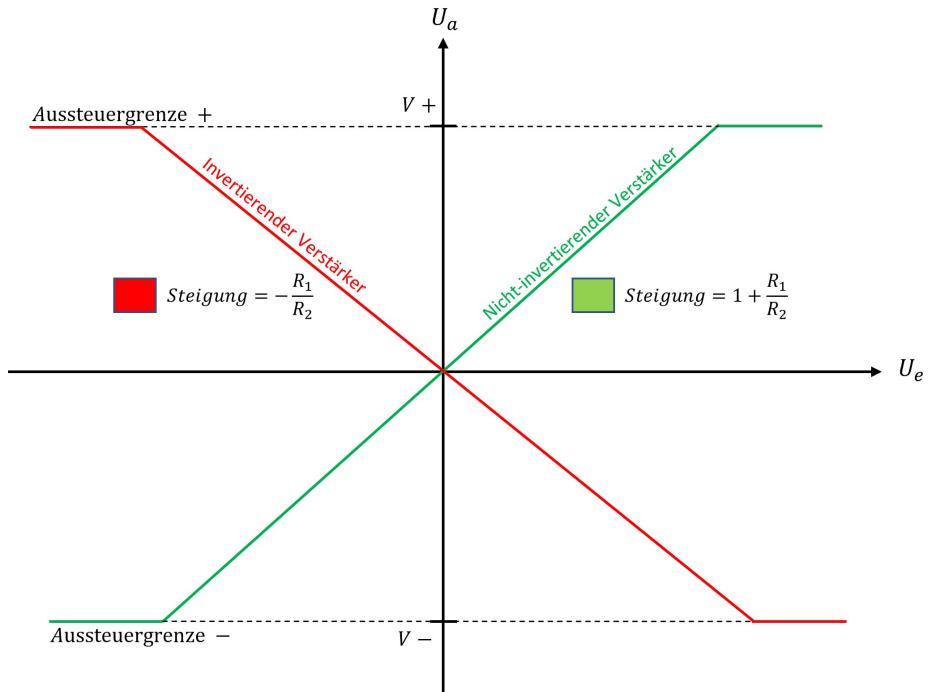


Abbildung 2.20: Operationsverstärker  
[01]

### 2.3.3 Feldeffekttransistor

Die am häufigsten eingesetzten Leistungsschutzschalter im Spannungsbereich von bis etwa 250V sind Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET).[07]

Sie sind eine Sonderform der Transistoren, welche auch unipolare Transistoren genannt werden. Sie besitzen einen Kanal aus Halbleitermaterial, auf dem horizontal zur Stromrichtung ein elektrisches Feld entsteht, welches den Querschnitt des Kanals verändert. Damit wird der Stromfluss durch das Bauteil geregelt. Im Field-Effect Transistor (FET) steuert eine Spannung den Strom. Es gibt vier Grundbauformen von MOSFET. Einen Negativ-Metall-Oxid-Halbleiter (NMOS) und einen Positiv-Metall-Oxid-Halbleiter (PMOS) Typus und davon jeweils eine selbstsperrende und eine selbstleitende Variante. Im Anwendungsfall dieser Thesis wird ein NMOS verwendet. [HMGK18]

### 2.3.4 Digital Potentiometer

Um den Strom durch die LED digital zu regulieren und demgemäß die Helligkeit der LED für die Datenübertragung zu variieren, wird ein Digitalpotentiometer benötigt. Hierfür wurde der IC MCP42010 in der  $10\text{k}\Omega$ -Variante mit 2 Kanälen ausgewählt. Dieses Digitalpotentiometer kann über ein Serial Peripheral Interface (SPI) mittels eines Arduino angesteuert werden, um dessen Widerstandswert in 256 Schritten zu verändern. Dies ermöglicht eine Variation des Widerstandes in einem Bereich zwischen  $52\Omega$  (00h) und  $10\text{k}\Omega$  (FFh) in 39Ω Schritten. Die vom IC vorgeschriebene Versorgungsspannung von 5V stellt der Spannungsversorgungspin des Arduino bereit. Außerdem kann dem Datenblatt des ICs die Information entnommen werden, dass dessen Eingangsspannungsbereich an den Widerstandeingängen maximal zwischen -0.5V und 6V liegen darf. Da der IC in dieser Schaltung mit 5V betrieben wird, dürfen die Widerstandeingänge mit einer Spannung von maximal -0.6V bis 6V belastet werden. Das ist ein äußerst wichtiges Kriterium für die Auslegung der Schaltung, da hier über die Grenzen der maximalen Amplitude entschieden werden muss, um unerwünschten Nebeneffekten vorzubeugen.

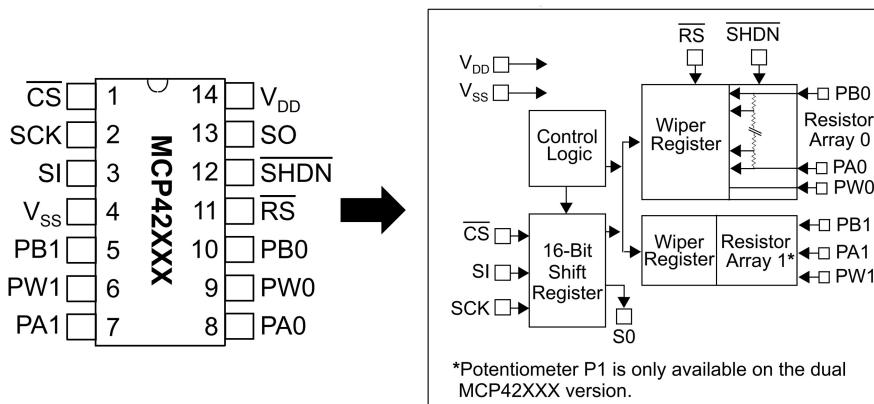


Abbildung 2.21: Aufbau des MCP42010  
[MCP03]

Die Funktion der einzelnen Pins und wie man den IC mit dem Arduino verbindet, wird in nachfolgender Tabelle 2.2 beschrieben. Aufgrund des Anwendungsfalls in dieser Thesis, werden Pin 11 und Pin 12 des MCP42010 nicht benötigt und aus diesem Grund nicht am Arduino angeschlossen.

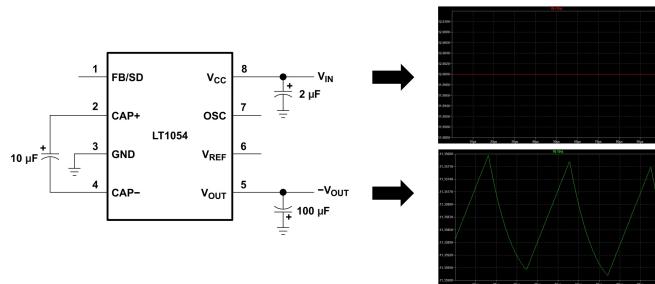
### 2.3.5 DC/DC Spannungswandler

Ein Gleichspannungswandler, oder auch DC-DC-Wandler, wandelt eine der Schaltung zugeführte Eingangsgleichspannung in eine geregelte Ausgangsgleichspannung, welche ein anderes Spannungsniveau als die Eingangsspannung aufweist. Diese kann beispielsweise niedriger, höher oder auch invertiert sein. Da die zu übertragenden Daten am Ausgang der Soundkarte als reine Wechselspannung anliegen, wird eine negative Spannungsquelle für die vorhandenen Operationsverstärker benötigt, um kein Risiko auf Datenverluste einzugehen. Gleichspannungswandler werden grundsätzlich immer dort eingesetzt, wo die zu Verfügung stehende Eingangsspannung nicht zur Versorgung der im Schaltkreis folgenden elektronischen Bauteile passt.[AbcderPowerModuleGrundlagen.pdf] Aufgrund der Unkonventionalität, sowohl eine negative als auch eine positive Spannungsquelle simultan an die Platine anzuschließen, wandelt der DC/DC-Spannungswandler diese negative Spannung direkt auf der Platine um. Der LT1054 wird auch "negative voltage generator" genannt. Das ist ein Bauteil, welches eine negative Ausgangsspannung erzeugt. Diese

Pin Nr.	Name	Funktion	Arduino Pin Nr.
1	$\overline{CS}$	Chip Select	10
2	SCK	Serial Clock	13
3	SI	Serial Data Input	11
4	$V_{SS}$	Ground	Ground
5	PB1	Terminal B Connection For Pot 1	X
6	PW1	Wiper Connection For Pot 1	OP-1 Minus
7	PA1	Terminal A Connection For Pot 1	OP-1 Out
8	PA0	Terminal A Connection For Pot 0	5V
9	PW0	Wiper Connection For Pot 0	OP-2 Offset
10	PB0	Terminal B Connection For Pot 0	Ground
11	$\overline{RS}$	Reset Input	X
12	$\overline{SHDN}$	Shutdown Input	X
13	SO	Data Out for Daisy-Chaining	X
14	$V_{DD}$	Power	5V

Tabelle 2.2: Anschlussinformation und Pinbelegung des MCP42010

ist proportional zur Eingangsspannung  $V_{CC}$ . Zum Nutzen dieses Bauteils als einfachen DC-DC-Wandler mit invertierender Funktion muss es laut Datenblatt an den Ausgängen mit zusätzlichen Kondensatoren beschalten werden. Aufgrund dessen, dass der DC-DC-Wandler mit negativen Spannungen arbeitet, ist es signifikant, im Falle der Nutzung von Elektrolytkondensatoren, auf die Polung der Kondensatoren zu achten. Jene sind unidirektional, was in Abbildung 2.22 illustriert ist. Zusätzlich ist zu erkennen, dass am negativen Ausgang des DC-DC-Wandlers nicht genau -12V anliegen sondern etwa -11.35V. Dies ist auf den Wirkungsgrad des DC-DC-Wandlers zurückzuführen und ist unter - Voltage Loss - im Datenblatt zu finden.

Abbildung 2.22: Beschaltung und erzeugte Spannung des LT1054  
[01]+Datenblatt

Der Spannungswandler arbeitet außerdem intern für die Invertierung mit einer Nennfrequenz von 25kHz. Da die zu übertragenden Daten auch nahe diesem Bereich liegen, empfiehlt es sich, den Pfad der Signalverarbeitung und den der Spannungsinvertierung auf der Platine möglichst weit auseinander zu platzieren, um möglichen parasitären Störungen vorzubeugen.

### 2.3.6 Arduino UNO V3

Die Arduino-Plattform besteht prinzipiell aus der auf C und C++ basierenden Entwicklungsumgebung und der zu programmierenden Hardware[02]. Vorteilhaft ist hier die gute

Dokumentation und eine große Menge an Bibliotheken zum Einbinden externer Hardwaredkomponenten. Ein zusätzlicher Vorteil der Plattform liegt in ihrer Quelloffenheit. Alle zugehörigen Komponenten sind demnach 'Open Source'. Das hat zur Folge, dass Codes der Bibliotheken und des Bootloaders frei zur Verfügung stehen und nach Belieben verändert werden können. Auch die Architektur der Hardware ist offengelegt, weshalb Hersteller eigene kompatible Boards konstruieren und verkaufen können. Durch die Unabhängigkeit von Programmierer und Hersteller entsteht eine erschwingliche Hardware, welche bezüglich der Quelloffenheit ohne Einschränkungen programmiert werden kann.[10 - Evans, Beginning Arduino Programming. Apress, 2011, ISBN: 978-1-4302-3777-8] Diese eignet sich hervorragend zur Funktionsprogrammierung von ansteuerbaren Komponenten im analogen Signalverarbeitungspfad.

## 2.4 Tools

### 2.4.1 LT-Spice

LT-Spice ist eine SPICE-basierte Computersoftware zur Simulation analoger, elektronischer Schaltungen. Diese wurde vom Halbleiterhersteller Analog Devices (ursprünglich von Linear Technology) entwickelt. Es ist die am weitesten verbreitete und verwendete SPICE-Software in der Elektro-Simulationsbranche. Obwohl es sich um freie Software handelt, ist LT-Spice nicht künstlich eingeschränkt, um seine Funktionalität einzuschränken.[03] Diese Simulationssoftware wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Erprobung und Simulation des analogen Signalverarbeitungsschaltkreises verwendet.

### 2.4.2 Eagle

EAGLE ist eine Software zum Designen und Erstellen von Leiterplattenlayouts. Die Software verfügt über einen Schaltplan- und einen Layouteditor, sowie über eine sehr umfassende Bibliothek an Bauteilen, welche sehr unkompliziert und individuell erweiterbar ist.[05][06]

Signifikant für die Dimensionierung des Platinenlayouts ist Tabelle 2.3. Hier werden die verschiedenen Leiterbahnbreiten und Leiterbahnabstände dargestellt, welche für ein funktionierendes Platinenlayout unabdingbar sind.

Spannung [V]	Max. Strombelastung [A]	Leiterbahnbreite [mil]	Leiterbahnabstand[mil]
5	0.6	6	8
10	0.8	8	13
30	2.0	20	30
150	2.7	30	50
230	3.5	50	100

Tabelle 2.3: Richtlinien zu Leiterbahnbreite und Leiterbahnabständen

### 2.4.3 Arduino IDE

Die Sprachen, welche in der Entwicklungsumgebung genutzt werden sind C und in kleineren Umfängen auch C++. In den Standardbibliotheken der Entwicklungsumgebung sind die für die Programmierung erheblichsten Funktionen zusammengefasst. Um weitere Funktionen zu nutzen, können dementsprechend zusätzliche Bibliotheken eingebunden werden. Der Editor mit integriertem Compiler ist ein weiterer Bestandteil des Integrated Developer Environment (IDE). In diesem wird der Code geschrieben, kompiliert und auf das

Board überspielt. User benötigen also nur eine Software, um ihre Mikrocontroller in vollen Umfängen nutzen zu können. Dieses IDE bietet außerdem die Möglichkeit, Bibliotheken oder gar Programmbeispiele herunterzuladen.

[10B. Evans, Beginning Arduino Programming. Apress, 2011, ISBN: 978-1-4302- 3777-8.].

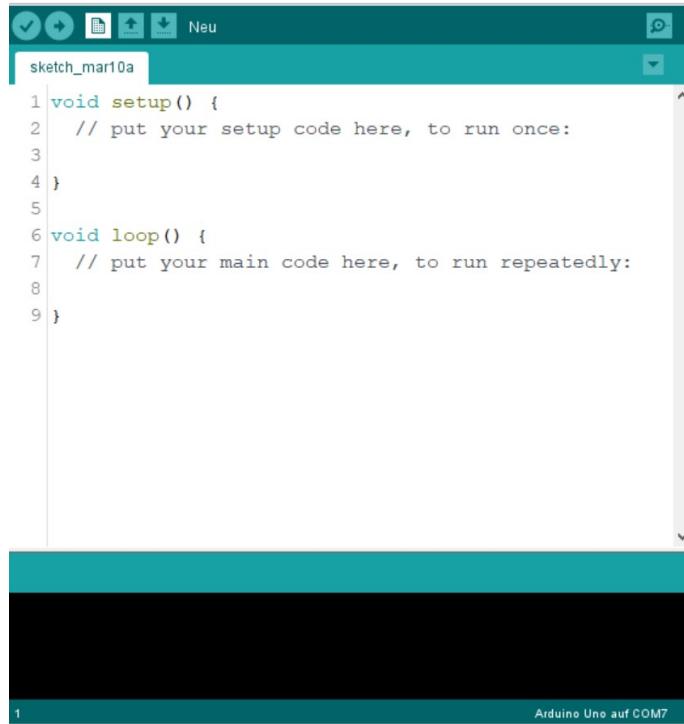


Abbildung 2.23: Arduino IDE  
[01]

Arduino-Programme basieren immer auf einem einheitlichen Grundaufbau. In Abb. ist dieser zu erkennen. Es sind zwei Funktionen namens `setup()` und `loop()` deklariert. `Setup()` wird einmalig zu Beginn des Programms aufgerufen, während `loop()` direkt im Anschluss aufgerufen wird, bis der Mikrocontroller stromlos geschaltet wird. Oberhalb der Funktion `setup()` können außerdem noch Präprozessorbefehle programmiert werden.

#### 2.4.4 Dream

Die Software Dream bietet eine Alternative um Radiosignale auf dem Computer zu empfangen und auch zu senden. Sie war ursprünglich als Forschungsprojekt des Fraunhofer Instituts angesetzt. Signale, welche nicht über den PC empfangen werden können, werden über den Mikrofoneingang der Soundkarte empfangen. Bei alldem benutzt das Konzept internationale Direktiven für Amateurfunk, Radio und Informationsdienste. Diese Eigenschaft ermöglicht es dem User, FM, AM und Digital Radio Mondiale (DRM) zu empfangen. Außerdem visualisiert die Software in Echtzeit zahlreiche Daten, Statistiken und Diagramme des empfangenen Signals. [04] Die Modulation und das Senden des OFDM-Signals über die konstruierte Hardware erfolgt durch diese Software und wird in den folgenden Kapiteln noch weiter intensiviert.



# 3. System

## 3.1 Analoge Signalverarbeitung

Bei der Signalübertragung über den optischen Kanal mit dem in dieser Arbeit gewählten Medium Licht, müssen einige grundlegende Dinge beachtet werden. Im Kapitel 2.3.1 der Leuchtdiode wurden ihre grundlegenden Eigenschaften erklärt, die es sich hier nun zu verwenden gilt. Eine bekannte Schwierigkeit ist die Übertragung von negativen Wellen. Diese können nicht übertragen werden, da Licht keinen negativen Wert annehmen kann. Hinzu ist man bei der Übertragung von Signalen darauf bedacht, nur im linearen Bereich der LED-Kennlinie Daten zu übertragen. Wenn man diese nämlich im nichtlinearen Bereich der LED überträgt, können Verzerrungen auftreten und somit die Übertragung stark gestört werden. Um jenes Problem zu lösen, wird ein Offset verwendet, welcher das Signal so positiv verschiebt, dass dieses keine negativen Anteile mehr besitzt. Zudem wurde ein Spannungspuffer eingerichtet um zusätzlich die Amplitude zu verstärken. Dies liefert Gewissheit, dass nur positive Spannungsanteile übertragen werden und somit kein Signalverlust verzeichnet werden muss.

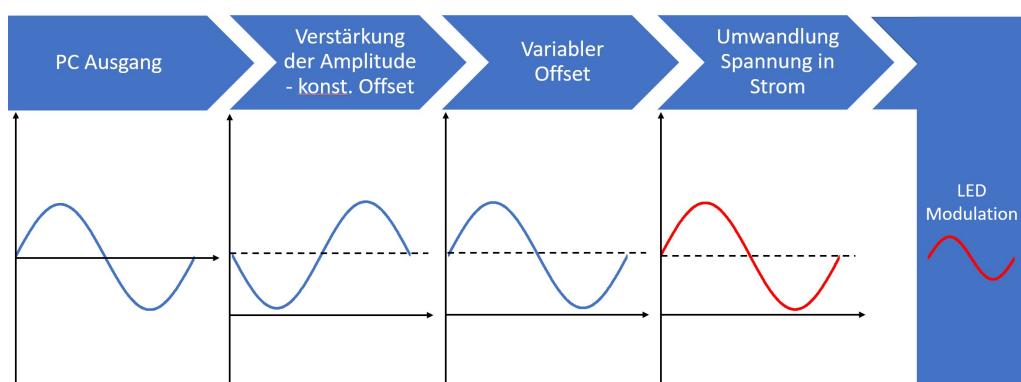


Abbildung 3.1: Signalverarbeitungsschritte  
[01]

In Abbildung 3.1 werden die Verschiedenen Stufen der Signalübertragung veranschaulicht. Da es sich an dieser Stelle um ein nichtlineares System handelt, dürfen die Signalverarbeitungsstufen nicht beliebig vertauscht werden. Eine solche Veränderung der Reihenfolge könnte zur Verfälschung des Signals führen.

Die analoge Signalverarbeitungsschaltung wurde in drei Stufen aufgeteilt. Die OP-Grundschaltungen wurden hierfür so modifiziert, dass Amplitude und Offset variabel einstellbar sind und mögliche auftretende Fehler vermieden werden. In Abbildung 3.2 ist die Eingangssignalverarbeitungsstufe illustriert.

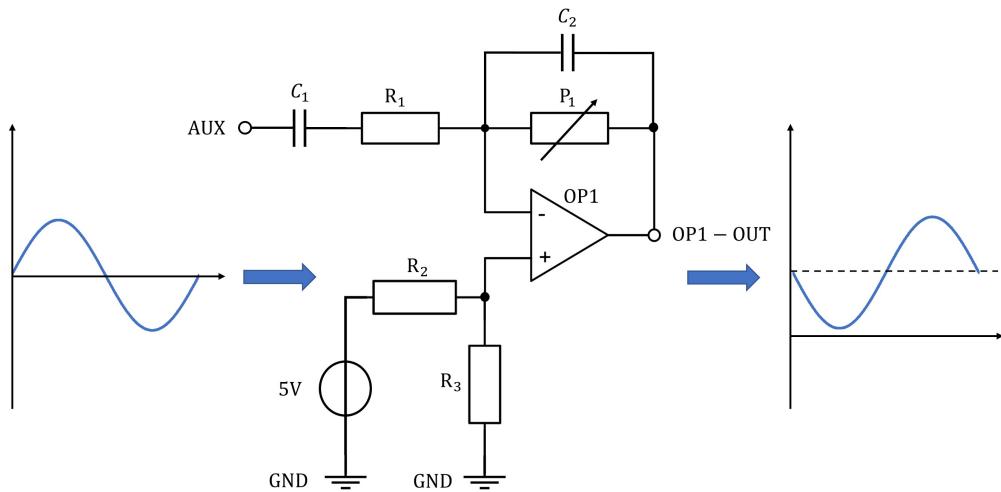


Abbildung 3.2: Eingangssignalverarbeitungsstufe  
[01]

Der Schlüsselfaktor in der Eingangsstufe ist der variable Widerstand im Rückkopplungspfad des OPs. Hierbei handelt es sich um ein Digitales Potentiometer, welches sich über SPI vom Arduino zur Laufzeit beliebig verändern lässt. Die Schwierigkeit in der Implementierung dieses Bauteiles liegt jedoch darin, dass es keine negativen Spannungen verträgt. Aus dem Datenblatt ist ersichtlich, dass es nur mit Spannungen von  $-0,6V < U < 6V$  sorgfältig arbeiten kann. Da es sich bei dem zu verarbeitenden Audiosignal um ein Wechselstromsignal mit einer Amplitude von etwa 1,5V handelt, wurden in dieser Schaltung Vorkehrungen getroffen um die negativen Anteile dieses Signals in positive Anteile zu konvertieren. Um dieses Vorhaben zu realisieren wurde auf den nichtinvertierenden Eingang des OPs mithilfe eines Spannungsteilers  $R_3$  und  $R_2$  eine Spannung angelegt. Diese soll das Potential des OPs so anheben, dass das AC-Signal aus der Soundkarte direkt mit einem Offset addiert wird und somit keine negativen Anteile mehr besitzt. Um die Soundkarte vor der DC-Spannung zu schützen wurde ein DC Abblockkondensator  $C_1$  am Signaleingang vorgesehen. Dieser ist für AC-Signale komplett durchlässig. Aufgrund der Annahme einer maximalen Amplitude von 1,5V muss also ein Mindestoffset von 0,9V auf das Signal addiert werden. Um hier jedoch die Amplitude trotz Verstärkung innerhalb des erlaubten Spannungsbereiches von  $-0,6V < U < 6V$  bleiben wurde ein fester Offset von 2,15V gewählt. Zudem würde eine maximale Verstärkung von  $A = 2$  hinzugezogen wodurch sich der Spannungsbereich, selbst bei einer maximalen Verstärkung, stets in einem Bereich von  $-0,2V < U < 5,7V$  befindet. Dies ist in 3.3 illustriert.

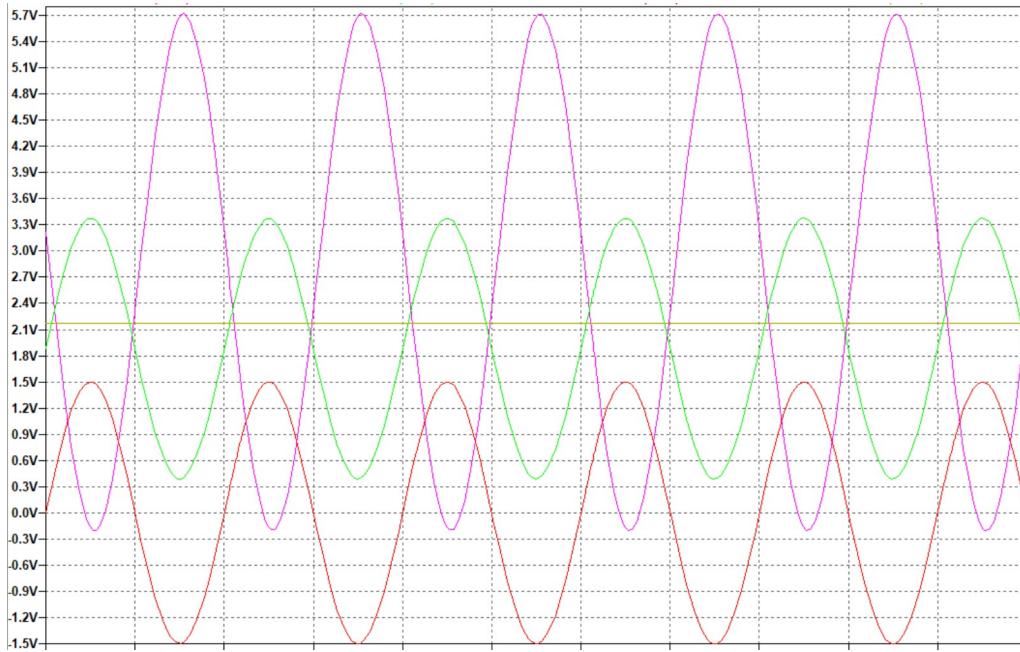


Abbildung 3.3: Simulation von Offset und Verstärkung  
[01]

Somit kann gewährleistet werden, dass das Digitale Potentiometer zunehmend in einem legitimen Spannungsbereich betrieben wird.

Der zweite OP der Schaltung sorgt in der Signalkette für einen weiteren Offset welcher die Grundhelligkeit der LED regelt. Da hier keine negative Spannung auftritt, kann das Digitale Potentiometer direkt angeschlossen werden.

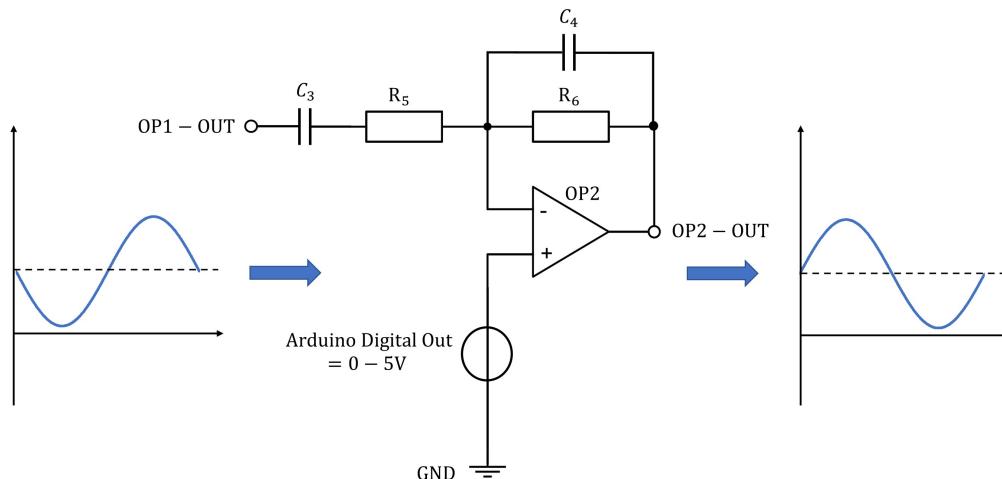


Abbildung 3.4: Zweite Signalverarbeitungsstufe  
[01]

Die sehr hohe Vorwärtsverstärkung und die differentielle Eingangscharakteristik des OPs können genutzt werden, um eine nahezu ideale spannungsgesteuerte Stromquelle oder einen Spannungs-zu-Strom-Wandler zu realisieren. Es ist jedoch zu beachten, dass die umzuwendende Eingangsspannung an den nicht invertierenden Eingang des OPs angelegt wird. Der invertierende Eingang ist in Rückkopplung mit einem Ende des Widerstands  $R_1$  und der

Source des Transistors  $M_1$  verbunden. Dies sorgt dafür, dass zwischen den Eingängen des OPs kein Spannungsunterschied herrscht. Der Ausgang des OPs steuert also das Gate des MOSFETs. Seine hohe Leerlaufverstärkung zwingt das Gate von  $M_1$  auf die erforderliche Spannung. Dadurch wird die Spannung, welche an  $OP2 - OUT = U_{R1}$  anliegt auf die Source des MOSFETs gespiegelt. Draus ergibt sich der Strom zu:

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R_1} \quad (3.1)$$

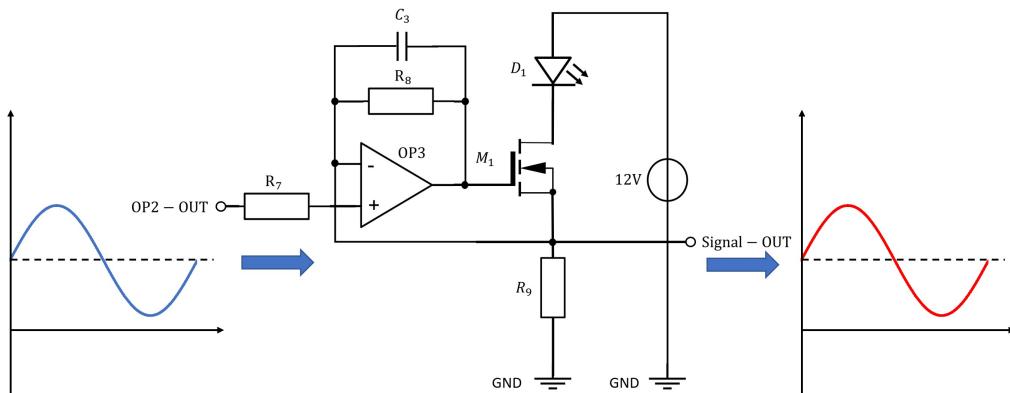


Abbildung 3.5: LED- Treiber als Endstufe  
[01]

Durch die Bekanntheit des Stromflusses durch  $R_1$  kann nun durch kirchhoffssche Regeln auf den Stromfluss in der LED geschlossen werden.[08] Dieser Strom wiederum erzeugt über selbigen Widerstand eine Anhebung des Potentials am - Eingang des OPs. Auf diese Weise versucht der OP seine beiden Eingänge auf das gleiche Potential anzuheben. Beim Leistungswiderstand  $R_9$  handelt es sich um einen sehr kleinen Widerstand, weshalb durch die LED, den MOSFET und den Leistungswiderstand ein sehr hoher Strom fließt. Dieser sorgt für eine hell leuchtende LED zur Übertragung des Signals.

### 3.1.1 Simulation in LT-Spice

Das vorausgegangene theoretische Wissen wurde zudem mit einer LT-Spice Simulation überprüft. So konnten eventuelle Fehler bei der Dimensionierung ermittelt und verbessert werden werden.

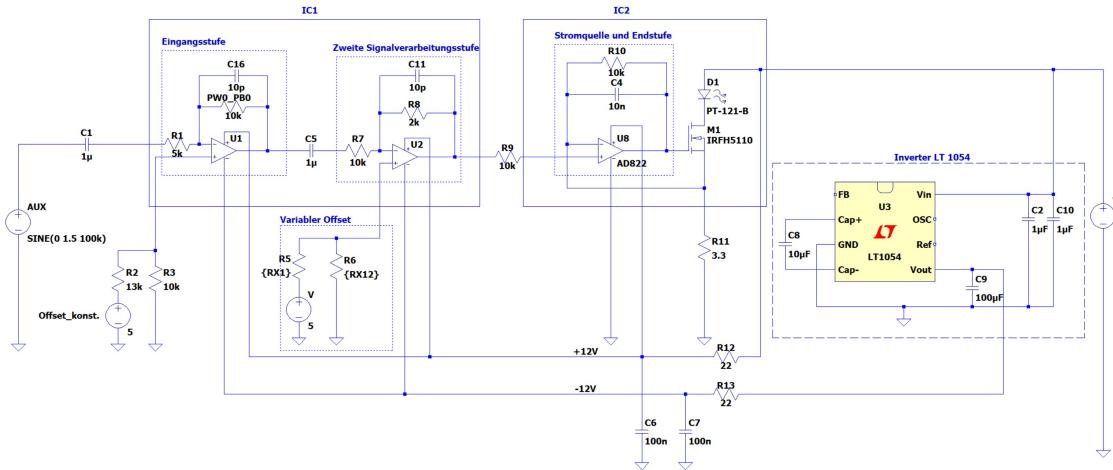


Abbildung 3.6: LT-Spice Simulation der Signalverarbeitung  
[01]

### 3.1.2 Platinenlayout in Eagle

Beim Platinenlayout Entwurf vom Senders wurde ein besonderes Augenmerk auf die Trennung von Signal und Leistungswegen geachtet.

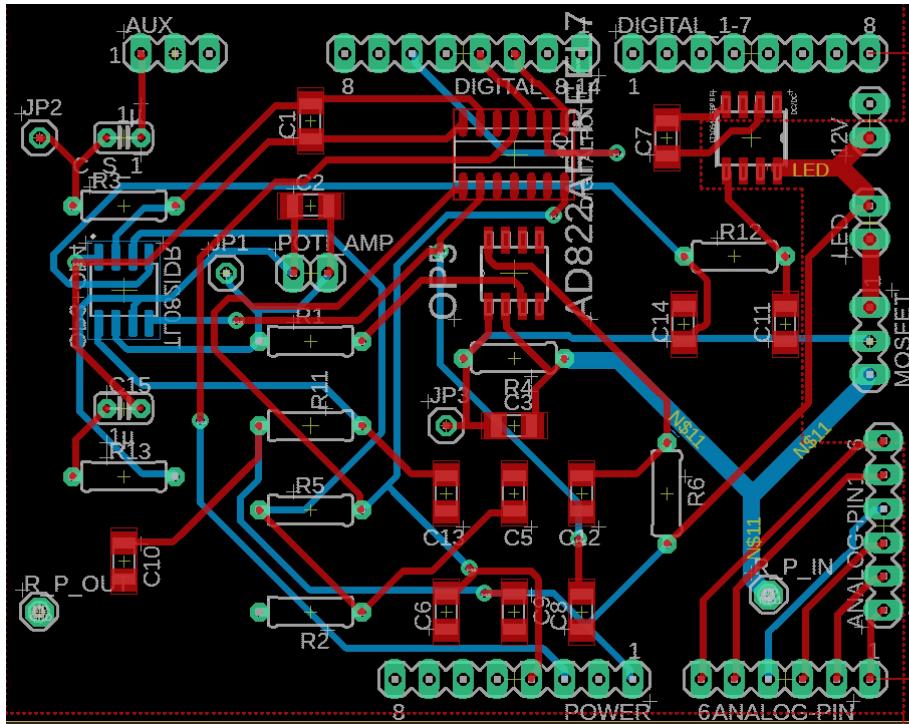


Abbildung 3.7: Eagle Auszug der Platine  
[01]

Im unteren Bereich der Platine befindet sich der Leistungswiderstand, welcher sich von  $R - P - IN$  zu  $R - P - OUT$  erstreckt. Zuzüglich befinden sich der DC/DC Spannungs-wandler, LED und MOSFET, die signifikanten Bauteile der Stromquelle auf des Rechten Seite der Platine und somit möglichst weit vom Signalverarbeitungspfad entfernt. In der Schaltung fließen teilweise Ströme bis 1,35A. Da es bei solch hohen Strömen zu Problemen

mit der Elektro-Magnetische-Verträglichkeit (EMV) kommen kann, wurde der Signalweg linksseitig auf der Platine positioniert. Außerdem wurden die Leiterbahnen im Leistungspfad besonders breit ausgelegt, da hier große Ströme fließen. Genaue Informationen über die Dimensionierung der Leiterbahnen und Abstände ist in Tabelle 2.3 zu finden. Auf der Platine wurden für die Operationsverstärker, das Digitalpotentiometer und den DC/DC Spannungswandler IC-Sockel aufgelötet. Das ermöglicht den schnellen Austausch von defekten Bauteilen. Die komplette Schaltung des VLC-Senders wurde auf die Größe einer kleinen gefrästen Platine untergebracht. Deshalb wurden Leitungen auf der Rückseite der Platine verlegt. Diese sind in Abbildung 3.7 durch die Blauen Leiterbahnen dargestellt. Des weiteren wurden im Signalverarbeitungspfad nach jeder Stufe Pins vorgesehen, um die Fehlersuche zu erleichtern und nachträglich einzelne Funktionsprüfungen durchzuführen. Hinzu ist zu beachten, dass die Bauteile im Leistungspfad durch den hohen Stromfluss eine hohe thermische Abgabe an Energie verzeichnen müssen. Um diese zu reduzieren wurden Kühlkörper vorgesehen. Wie diese Berechnet und Dimensioniert werden wird in Kapitel 3.1.3 näher erläutert. Um die Schaltung zuletzt noch zusätzlich weniger Störanfällig zu gestalten, wurden die gegebenen freien Flächen auf beiden Seiten der Platine mit dem Masse Potential ausgefüllt.

### 3.1.3 Thermisches Management

Wie im vorherigen Kapitel schon erwähnt, fließt durch den Leistungsstrang der Schaltung ein sehr hoher Strom. Durch diesen hohen Stromfluss kommt es zu einer immensen Hitzeentwicklung in den Bauteilen. Um jedoch die einwandfreie Funktion von elektronischen Halbleiterbauelementen zu gewährleisten, ist die Einhaltung der vom Hersteller angegebenen maximalen Sperrsichttemperaturen unerlässlich. Solch eine Sperrsichttemperatur lässt sich nur bei geringer Leistungsanforderung ohne Kühlung einhalten. Zudem sind die Einbaulage, der Einbauort, die Geschwindigkeit und Temperatur der Umgebungsluft variable Größen die miteinzukalkulieren sind.[10]

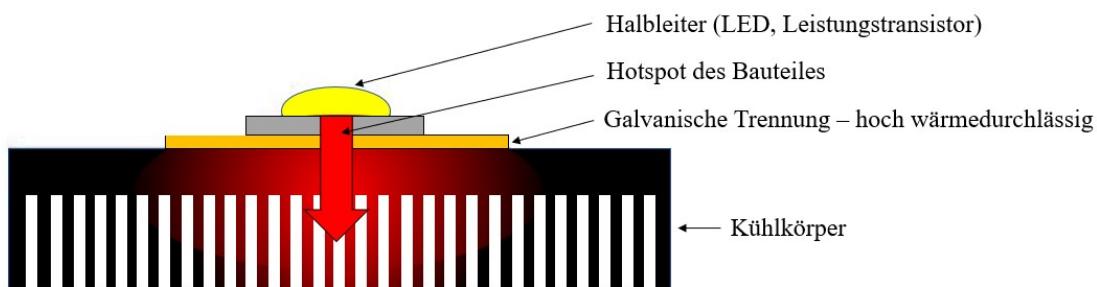


Abbildung 3.8: Montageschema eines Kühlkörpers  
[01][12]

Um gegen diese Hitzeentwicklung vorzugehen wird für die kritischen Bauteile somit ein Kühlkörper vorgesehen. Diese sollen die Wärme vom Bauteil weg und nach außen hin abführen. In dem hier gegebenen elektrischen Stromkreis, werden zwei Halbleiter als kritische und zu kühlende Bauteile betrachtet. Zunächst die LED zum Übertragen des Signals und zum zweiten der MOSFET.[LP14]

Zur Auswahl eines geeigneten Kühlkörpers für ein Halbleiterbauelement ist die Berechnung des Wärmewiderstandes unerlässlich. Dafür werden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Variablen in folgende Gleichung eingesetzt.

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{P} - (R_{thG} + R_{RthM}) \quad (3.2)$$

Faktor	Bedeutung
$\vartheta_i$	Herstellerangabe der Halbleiters zur max. Sperrsichttemperatur
$\vartheta_u$	Umgebungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$
$P$	Die am zu kühlenden Halbleiter maximal anfallende Leistung in Watt
Rth	Wärmewiderstand allgemein in $\frac{K}{W}$
RthG	Herstellerangabe zum innerer Wärmewiderstand des Halbleiters
RthM	Wärmewiderstand der Montagefläche
RthK	Wärmewiderstand des Kühlkörpers

Tabelle 3.1: Variablen zu berechnung des Kühlkörpers  
[11]

Für die Berechnung der Kühlkörper wurden zudem Berechnungen zur Verlustleistung des MOSFETs und der LED vorgenommen. Es wird bewusst überdimensioniert. Dazu wurde beispielsweise für die LED mit einem Wirkungsgrad von 0 % gerechnet. Unter diesen Umständen würde die Verlustleistung 100 % betragen. LEDs haben jedoch tatsächlich einen Wirkungsgrad von ca. 25 - 50 %. Die maximalen Verluste werden natürlich bei voller Helligkeit verzeichnet. Zur Auslegung der Kühlkörper wurden also folgende Berechnungen durchgeführt:

$$P_{LED} = U_{LED} \cdot I_G = 3,12V \cdot 1,42A = 4,43W \quad (3.3)$$

$$P_{MOSFET} = U_{MOSFET} \cdot I_G = 4,1V \cdot 1,42A = 5,86W \quad (3.4)$$

Wodurch sich der Wärmewiderstand der Kühlkörper für die LED zu

$$R_{thK-LED} = \frac{35^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{4,43W} - (1\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W} + 0,1\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W}) = 1,36\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W} \quad (3.5)$$

berechnet und der Wärmewiderstand des MOSFET aus

$$R_{thK-MOSFET} = \frac{50^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{5,86W} - (1,15\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W} + 0,1\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W}) = 3,22\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W} \quad (3.6)$$

ergibt. Gewählt wurde zuletzt für sowohl LED als auch MOSFET ein Kühlkörper in der Größenordnung von  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/W$ .

### 3.1.4 Planung und Aufbau des Gehäuses

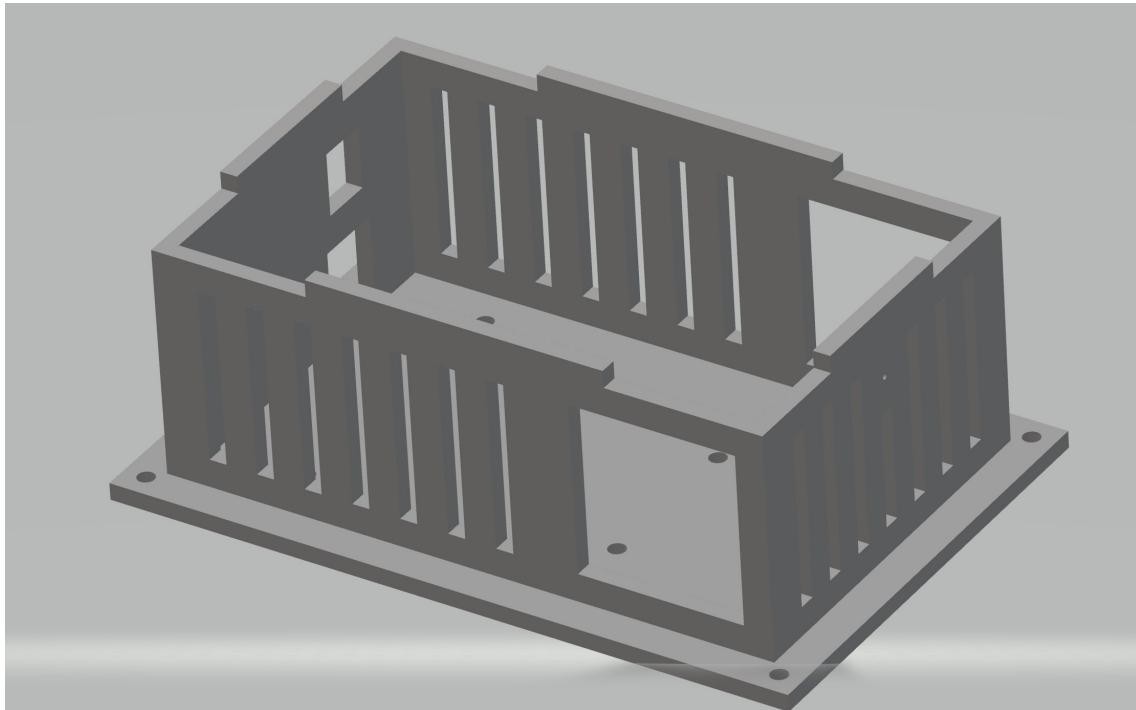


Abbildung 3.9: Boden des 3D-Drucks  
[01]

Beim Entwurf des Gehäuses wurde so Platzsparend wie möglich gearbeitet, weshalb der fest verbaute Arduino zwischen Leiterplatte und Deckel angebracht wurde. Da sich Leistungs-widerstand, Transistor und Leuchtdiode im Betrieb stark erhitzen, wurden die zugehörigen Kühlkörper am Boden mithilfe von Abstandsbolzen befestigt. Zusätzlich wurden im De-ckel Freischnitte über den Kühlkörpern vorgenommen um die nach oben steigende Luft möglichst gut abzuleiten. Für die Versorgungsspannung der Schaltung gibt es zwei 4mm Anschlüsse, die oben am Deckel angebracht wurden. Für die Datenübertragung wurde eine AUX Buchse im Deckel verbaut.

## 3.2 Software

### 3.2.1 Automatisierte Amplituden-Regelung

### 3.2.2 Übertragung mit Dream

Das Programm verfügt auf zwei verschiedene Möglichkeiten aufgerufen werden. Zum ersten im Sendemodus und zum zweiten im Empfangsmodus. Zudem bietet Dream umfangreiche Einstellungsoptionen um sowohl Rauschen oder aber auch andere Störungen zu minimieren. Die wichtigsten Parameter für die Korrekte Benutzung werden in den folgenden zwei Kapiteln näher erläutert.

#### 3.2.2.1 Dream Transmitter

Zum Start der Software "Dream" im Übertragungsmodus muss das Programm mit dem parameter "- t" gestartet werden. Die einfachste Möglichkeit für einen Programmstart mit Parameter bietet eine Verknüpfung, welche wie in Abbildung 15 gezeigt, angepasst wird.

Das Zielverzeichnis darf dabei nicht verändert werden! Dieser Schritt muss nur einmal gemacht werden und man kann jederzeit den Übertragungsmodus starten indem man die Dream software über diese geänderte Verknüpfung startet.

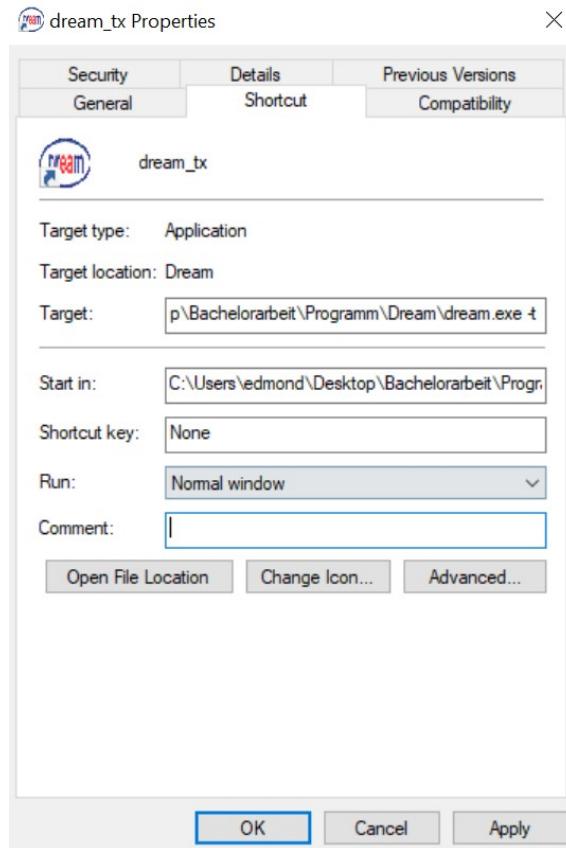


Abbildung 3.10: Modifizierung für den Sendemodus  
[01]



Abbildung 3.11: Internes Audiorouting  
[01]

### 3.2.2.2 Dream Receiver

Der Evaluation Dialog liefert detaillierte Informationen über die empfangenen DRM-Parameter. Hier können Parameter sowie einige Diagramme eingesehen werden. In den folgenden Tabellen, werden für die Übertragung bedeutende Parameter näher erläutert.

---

**Measurements**

**DC Frequency Offset**

Dieser Offset entspricht der resultierenden Soundkarten-Zwischenfrequenz des Frontends. Diese Frequenz ist nicht auf einen bestimmten Wert beschränkt, sondern nur darauf, dass das DRM-Spektrum vollständig innerhalb der Bandbreite der Soundkarte liegen muss.

**Sample Frequency Offset**

Offset der Abtastrate des lokalen Computers zum DA-Wandler im Sender.

**Doppler / Delay**

The Doppler frequency of the channel is estimated for the Wiener filter design of channel estimation in time direction. If linear interpolation is set for channel estimation in time direction, this estimation is not updated. The Doppler frequency is an indication of how fast the channel varies with time. The higher the frequency, the faster the channel changes are. The total delay time of the Power Delay Spectrum (PDS) is estimated from the impulse response estimation derived from the channel estimation. This delay corresponds to the range between the two vertical dashed black lines in the Impulse Response (IR) plot.

**I/O Interface LED**

This LED shows the current status of the sound card interface. The yellow light shows that the audio output was corrected. Since the sample rate of the transmitter and local computer are different, from time to time the audio buffers will overflow or under run and a correction is necessary. When a correction occurs, a "clickbound" can be heard. The red light shows that a buffer was lost in the sound card input stream. This can happen if a thread with a higher priority is at 100 and the Dream software cannot read the provided blocks fast enough. In this case the Dream software will instantly loose the synchronization and has to re-synchronize. Another reason for red light is that the processor is too slow for running the Dream software.

**Time Sync Acq LED**

This LED shows the state of the timing acquisition (search for the beginning of an OFDM symbol). If the acquisition is done, this LED will stay green.

**Frame Sync LED**

The DRM frame synchronization status is shown with this LED. This LED is also only active during acquisition state of the Dream receiver. In tracking mode this LED is always green. This LED shows the Cyclic Redundancy Check (CRC) of the Fast Access Channel (FAC) of DRM. FAC is one of the three logical channels and is always modulated with a 4-QAM. If the FAC CRC check was successful, the receiver changes to tracking mode. The FAC LED is the indication whether the receiver is synchronized to a DRM transmission or not.

**SRC CRC LED**

This LED shows the CRC check result of the Service Description Channel (SDC) which is one logical channel of the DRM stream. This data is transmitted in approx. 1 second intervals and contains information about station label, audio and data format etc. The error protection is normally lower than the protection of the FAC. Therefore this LED will turn to red earlier than the FAC LED in general.

**MSC CRC LED**

This LED shows the status of the Main Service Channel (MSC). This channel contains the actual audio and data bits. The LED shows the CRC check of the AAC core decoder. The SBR has a separate CRC, but this status is not shown with this LED. If SBR CRC is wrong but the AAC CRC is ok one can still hear something (of course, the high frequencies are not there in this case). If this LED turns red, interruptions of the audio are heard. The yellow light shows that only one 40 ms audio frame CRC failed. This can usually only happen if the AAC core decoder fails.

Parameters	
<b>DRM mode/ bandwidth</b>	In a DRM system, four possible robustness modes are defined to adapt the system to different channel conditions. According to the DRM standard: <b>Mode A:</b> Gaussian channels, with minor fading <b>Mode B:</b> Time and frequency selective channels, with longer delay spread <b>Mode C:</b> As robustness mode B, but with higher Doppler spread <b>Mode D:</b> As robustness mode B, but with severe delay and Doppler spread The bandwidth is the gross bandwidth of the current DRM signal.
<b>Interleaver Depth</b>	The symbol interleaver depth can be either short (approx. 400 ms) or long (approx. 2 s). The longer the interleaver the better the channel decoder can correct errors from slow fading signals. But the longer the interleaver length the longer the delay until audio can be heard (after a re-synchronization).
<b>SDC / MSC Mode</b>	Shows the modulation type of the SDC and MSC channel. For the MSC channel, some hierarchical modes are defined which can provide a very strong protected service channel.
<b>Prot. Level (B/A)</b>	The error protection level of the channel coder. For 64-QAM, there are four protection levels defined in the DRM standard. Protection level 0 has the highest protection whereas level 3 has the lowest protection. The letters A and B are the names of the higher and lower protected parts of a DRM block when Unequal Error Protection (UEP) is used. If Equal Error Protection (EEP) is used, only the protection level of part B is valid. This shows the number of audio and data services transmitted in the DRM stream. The maximum number of streams is four.
<b>Number of Services</b>	This label shows the received time and date in UTC. This information is carried in the SDC channel.
<b>Received time - date</b>	

Tabelle 3.3: Unterschrift der Tabelle

Chart	
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio (SNR) estimation is plotted as a bar and as a value.
<b>Main Plot</b>	Graphical display of different vectors of the DRM decoder.

Tabelle 3.4: Unterschrift der Tabelle

<b>Advanced Settings</b>	
<b>Frequency Interpolation</b>	With these settings the channel estimation method in frequency direction can be selected. The default value uses the most powerful algorithm. Wiener (default) - Wiener interpolation uses estimation of the statistics of the channel to design an optimal filter for noise reduction. Linear - Simple linear interpolation method to get the channel estimate. The real and imaginary parts of the estimated channel at the pilot positions are linearly interpolated. This algorithm causes the lowest CPU load but performs much worse than the Wiener interpolation at low SNR's. DFT Zero Pad: - Channel estimation method for the frequency direction using Discrete Fourier Transformation (DFT) to transform the channel estimation at the pilot positions to the time domain. A zero padding is applied to get a higher resolution in the frequency domain -> estimates at the data cells. This algorithm is very speed efficient but has problems at the edges of the OFDM spectrum due to the leakage effect.
<b>Time Interpolation</b>	With these settings the channel estimation method in time direction can be selected. The default value uses the most powerful algorithm. Wiener (default) - Wiener interpolation uses estimation of the statistics of the channel to design an optimal filter for noise reduction. Linear - Simple linear interpolation method to get the channel estimate. The real and imaginary parts of the estimated channel at the pilot positions are interpolated linearly. This algorithm causes the lowest CPU load and the audio is decoded more quickly, but in general it performs worse than the Wiener interpolation especially at low SNR's.
<b>Time Sync Tracking</b>	With these settings the time synchronization tracking methods can be selected. Guard Energy (default) - This algorithm utilizes the estimation of the impulse response and tries to maximize the energy in the guard-interval to set the correct timing. First Peak - This algorithm searches for the first peak in the estimated impulse response and moves this peak to the beginning of the guard-interval (timing tracking algorithm)
<b>Flip Input Spectrum</b>	Checking this box will flip or invert the input spectrum. This is necessary if the mixer in the front-end uses the lower side band.
<b>Mute Audio</b>	The audio can be muted by checking this box. The reaction of checking or unchecking this box is delayed by approx. 1 second due to the audio buffers.
<b>MLC, Number of Iterations</b>	In DRM a multilevel channel coder is used. With this code it is possible to iterate the decoding process in the decoder to improve the decoding result. The more iterations are used the better the result will be. But switching to more iterations will increase the CPU load. Simulations showed that the first iteration (number of iterations = 1) gives the most improvement (approx. 1.5 dB at a BER of 10-4 on a Gaussian channel, Mode A, 10 kHz bandwidth). The improvement of the second iteration (number of iterations = 2) will be as small as 0.3 dB. The recommended number of iterations given in the DRM standard is one iteration (default value: number of iterations = 1). The selection is saved in the Dream.ini file.
<b>Log File</b>	Checking this box causes Dream to write two kinds of log files about the current reception of an audio service using AAC source coding, a standard and a long log file. Both files are written to the directory where the Dream application is located. The standard log file Dream-Log.txt is compatible to the log file created by the "DRM Software Radio". Each minute information about the average SNR, number of correct decoded FAC and number of correct decoded MSC blocks is recorded. The header of each log section also contains frequency, station identifier and channel width. This file format is used

## **4. Modell**

**4.1 Testaufbau zur Funktionsprüfung**

**4.2 Vorzeige Modell**



## **5. Evaluation**



## 6. Zusammenfassung

Hier sind einige Beispiele.

### 6.0.1 Abkürzung

So verwende ich eine Abkürzung IC und so erneut IC.

### 6.0.2 Symbol

So füge ich ein Symbol ein  $h_s$ .

### 6.0.3 Bild

So füge ich ein Bild ein:



Abbildung 6.1: Bild Unterschrift  
[?]



Abbildung 6.2: Bild Unterschrift1 [Sti19]

So beziehe ich mich auf das Bild 6.1

#### 6.0.4 Formel

$$F_A \geq 2 \cdot F_S \quad (6.1)$$

So beziehe ich mich auf die Formel 6.1

#### 6.0.5 Tabelle

Stimmen für SleepyJoe	davon gefaked	Sieger
80000000	80000000	Donald

Tabelle 6.1: Unterschrift der Tabelle

So beziehe ich mich auf die Tabelle 6.1

#### 6.0.6 Referenz und Zitat

Referenzierung auf ein Kapitel 2.22. 5 Zitat einfügen

[Sti19]. So verwende ich eine Online Quelle [01]

# Literaturverzeichnis

- [Fed17] J. Federau, *Operationsverstärker*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [HMGK18] E. Hering, R. Martin, J. Gutekunst, and J. Kempkes, Eds., *Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer*, ser. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [Höh13] P. A. Höher, *Grundlagen der digitalen Informationsübertragung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [LP14] C. J. Lasance and A. Poppe, Eds., *Thermal Management for LED Applications*, ser. Solid State Lighting Technology and Application Series. New York, NY: Springer New York, 2014, vol. 2.
- [Lut12] J. Lutz, *Halbleiter-Leistungsbauelemente*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [MCP03] “Single/Dual Digital Potentiometer with SPI Interface,” p. 32, 2003.
- [MJ12] G. Michels and N. Jaspers, *Sonographie – organ- und leitsymptomorientiert*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [OE08] B. Owsinski and S. Englefried, *The Mastering Engineer’s Handbook: The Audio Mastering Handbook*, 2nd ed., Boston, MA : Thomson Course Technology PTR, 2008.
- [PS16] W. Plaßmann and D. Schulz, Eds., *Handbuch Elektrotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [Sha] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” p. 55.
- [Sla] U. Slabke, *LED-Beleuchtungstechnik*, 1st ed. VDE Verlag.
- [Sti19] L. Stiny, *Aktive elektronische Bauelemente: Aufbau, Struktur, Wirkungsweise, Eigenschaften und praktischer Einsatz diskreter und integrierter Halbleiter-Bauteile*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [TSG08] U. Tietze, C. Schenk, and E. Gamm, *Electronic Circuits*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [Wer10] M. Werner, *Nachrichtentechnik: eine Einführung für alle Studiengänge ; mit 47 Tabellen*, 7th ed., ser. Studium Nachrichtentechnik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [WHT<sup>+</sup>] J. Wheat, R. Hiser, J. Tucker, A. Neely, and A. McCullough, “Understand How Wireless Communication Works,” p. 411.



# Online-Referenzen

- [01] Eigene Darstellung
- [02] What is Arduino?  
<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>  
Abgerufen 2021-02-09
- [03] LT-Spice  
<https://en.wikipedia.org/wiki/LTspice>  
Abgerufen 2021-02-13
- [04] Dream  
<http://www.mynetcologne.de/nc-keilje/drm/dream/index.htm>  
Abgerufen 20201-03-10
- [05] Was ist Eagle?  
<https://www.autodesk.de/products/eagle/overview>  
Abgerufen 2021-03-10
- [06] Eagle  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Eagle\\_\(Software\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Eagle_(Software))  
Abgerufen 2021-03-10
- [07] IGBT or MOSFET: Choose Wisely.  
<https://www.infineon.com/dgdl/choosewisely.pdf?fileId=5546d462533600a40153574048b73edc>  
Abgerufen 2021-03-15
- [08] Precision Voltage to Current Converter  
<https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/chapter-4>  
Abgerufen 2021-03-15
- [10] Berechnung eines Kühlkörpers  
<https://www.fischerelektronik.de/fileadmin/fischertemplates/download/Katalog/technischeerlaeuterungen/>  
Abgerufen 2021-03-16
- [11] Wärmewiderstand beim Kühlkörper  
<https://www.fischerelektronik.de/service/technische-informationen/kuehlkoerper-berechnen/>  
Abgerufen 2021-03-16
- [12] Galvanische Trennung  
<https://www.cmc.de/page/thermal-management/>  
Abgerufen 2021-03-16
- [13] Vorlesungsskript Elektronik  
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Koblitz - Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft

- [14] Abtastfrequenz  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Abtastung\\_\(Signalverarbeitung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Abtastung_(Signalverarbeitung))  
Abgerufen 2021-03-17
- [15] Elektromagnetische Welle  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrromagnetische\\_Welle](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrromagnetische_Welle)  
Abgerufen 2021-03-18

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Hörbereich des menschlichen Ohres . . . . .	4
2.2	Abtastung eines Signals . . . . .	5
2.3	Vergleich zwischen Abtastung und Unterabtastung eines Signals . . . . .	5
2.4	Nachrichtenübertragung nach Shannon . . . . .	6
2.5	Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle . . . . .	7
2.6	Blockschaltbild einer Übertragung mit Trägermodulation . . . . .	8
2.7	AM- und FM-Modulation eines Sinusträgers mit einem Eintonsignal . . . . .	8
2.8	Trägermultiplikation bei AM . . . . .	9
2.9	Binäre Übertragung mit Sinusträger . . . . .	9
2.10	Konstellationsdiagramm mit $\varphi_0 = 45^\circ$ im komplexen Raum . . . . .	11
2.11	Konstellationsdiagramm mit $\varphi_0 = 45^\circ$ mit stark verrauschem Kanal . . . . .	11
2.12	Konstellationsdiagramm 16-QAM und 64-QAM . . . . .	12
2.13	Strahlungserzeugung in der LED am pn-Übergang . . . . .	12
2.14	Diodenkennlinie . . . . .	13
2.15	Flussspannungen von LEDs verschiedener Farben . . . . .	14
2.16	Kennlinie einer Diode – Lichtleistung zu fließendem Strom . . . . .	15
2.17	Operationsverstärker Anschlusschema . . . . .	16
2.18	Invertierender Operationsverstärker . . . . .	16
2.19	Nichtinvertierender Operationsverstärker . . . . .	17
2.20	Operationsverstärker . . . . .	18
2.21	Aufbau des MCP42010 . . . . .	20
2.22	Beschaltung und erzeugte Spannung des LT1054 . . . . .	21
2.23	Arduino IDE . . . . .	23
3.1	Signalverarbeitungsschritte . . . . .	25
3.2	Eingangssignalverarbeitungsstufe . . . . .	26
3.3	Simulation von Offset und Verstärkung . . . . .	27
3.4	Zweite Signalverarbeitungsstufe . . . . .	27
3.5	LED- Treiber als Endstufe . . . . .	28
3.6	LT-Spice Simulation der Signalverarbeitung . . . . .	29
3.7	Eagle Auszug der Platine . . . . .	29
3.8	Montageschema eines Kühlkörpers . . . . .	30
3.9	Boden des 3D-Drucks . . . . .	32
3.10	Modifizierung für den Sendemodus . . . . .	33
3.11	Internes Audiorouting . . . . .	33
6.1	Titel für das Abbildungsverzeichnis . . . . .	41
6.2	Titel für das Abbildungsverzeichnis1 . . . . .	42



# **Tabellenverzeichnis**

2.1	Phasenlagen bei der QPSK . . . . .	10
2.2	Anschlussinformation und Pinbelegung des MCP42010 . . . . .	21
2.3	Richtlinien zu Leiterbahnbreite und Leiterbahnabständen . . . . .	22
3.1	Variablen zu berechnung des Kühlkörpers . . . . .	31
3.2	Unterschrift der Tabelle . . . . .	34
3.3	Unterschrift der Tabelle . . . . .	35
3.4	Unterschrift der Tabelle . . . . .	35
3.5	Unterschrift der Tabelle . . . . .	36
6.1	Unterschrift der Tabelle . . . . .	42



# **Symbolverzeichnis**

$h_s$  Test [s]



# Abkürzungsverzeichnis

CDMA	Code-Division-Multiple-Access
DRM	Digital Radio Mondiale
EMV	Elektro-Magnetische-Verträglichkeit
FDMA	Frequency-Division-Multiple-Access
IC	Integrated Circuit
IDE	Integrated Developer Environment
LED	Light Emitting Diode
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
NMOS	Negativ-Metall-Oxid-Halbleiter
OP	Operationsverstärker
PMOS	Positiv-Metall-Oxid-Halbleiter
QAM	Quadratur-Amplituden-Modulation
SPI	Serial Peripheral Interface
TDMA	Time-Division-Multiple-Access
VLC	Visible light communication
WLAN	Wireless Local Area Network