

Masterarbeit

**DISTANZBESTIMMUNG ZWISCHEN
BELEUCHTUNGSSYSTEMEN ÜBER DIE DÄMPFUNG
VON INFRAROT- UND ULTRASCHALLSIGNALEN**

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Ing. Martin Gaulhofer, BSc

1610322018

betreut und begutachtet von

Reg.-Rat DI Karl Hartinger

Graz, im Jänner 2018

.....
Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Unterschrift

DANKSAGUNG

Der größte Dank gilt meiner Freundin Ines, die mich ununterbrochen unterstützt und motiviert hat. Ich hätte mir keine bessere Partnerin in dieser arbeitsintensiven Zeit vorstellen können. Meinem Betreuer, Herrn Reg.-Rat DI Karl Hartinger, möchte ich ebenfalls einen großen Dank aussprechen, da er mir richtungsweisende und sehr hilfreiche Inputs gab und auch auf kurzfristige Anfragen rasch reagierte. Meiner Familie und meinen Freunden sage ich Danke für deren Unterstützung und Nachsicht bei privaten Angelegenheiten.

KURZFASSUNG

Wenn man abends in einem Großraumbüro im Lichtkegel der Schreibtischlampe arbeitet und rundherum Finsternis herrscht, kann das negative Auswirkungen auf die Psyche des Arbeitenden haben. Um dies zu verhindern, soll mit Hilfe von kabellosen Positionsaustauschs aller Leuchten eines Raumes eine Lichtwolke um den aktiven Arbeitsplatz erzeugt werden. Ein Softwaremodul berechnet über die Dämpfung eines ausgesendeten Signals den Abstand und entscheidet, welche Leuchten eingeschaltet werden. Deshalb werden Übertragungseigenschaften von Ultraschall und Infrarot mit Hilfe von Sender- und Empfängerschaltungen getestet und ausgewertet. Der Signalverlauf wird in halben Meterschritten bis zu einer Distanz von zehn Meter aufgezeichnet und in einem Korrelationsdiagramm visualisiert. Daraus ist erkennbar und wird durch das Ergebnis einer Bewertungsmatrix mit vier Bewertungskriterien unterstrichen, dass der Signaltyp Infrarot die bessere Wahl für diese Anwendung ist.

ABSTRACT

Working alone in an open space office in the light cone of a desk lamp can cause negative effects on the emotional well-being. To create a cloud of light, lamps should be connected to each other wirelessly to get the position information of each lamp in a room. In relation to the distance between active and disabled lamps, a software module regulates which lamps should be turned on based on the attenuation of the wireless signal. Two signal types, ultrasonic and infrared, have been evaluated by testing their transmission characteristics with circuits for transmission and receiving. The decreasing of the amplitude were recorded in 50 cm steps over 10 meters and the collected data were reviewed in a correlation chart. Due to this chart and an evaluation matrix with four assessment criteria infrared has shown as the better choice for such an application.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Signaltypen.....	2
2.1	Ultraschall	2
2.1.1	Eigenschaften und Funktionsweise	2
2.1.2	Aufbau und Einsatzmöglichkeiten.....	4
2.1.3	Berechnungen mit Schall.....	5
2.1.4	Einflussgrößen auf die Signalqualität	7
2.2	Infrarot.....	11
2.2.1	Eigenschaften	11
2.2.2	Funktionsweise	13
2.2.3	Aufbau und Einsatzmöglichkeiten.....	17
2.2.4	Berechnungen.....	19
2.2.5	Einflussgrößen auf die Signalqualität	19
3	Eignungstests.....	21
3.1	Ultraschall	21
3.1.1	Beschreibung.....	21
3.1.2	Auswahl der Bauteile	21
3.1.3	Tests	22
3.1.4	Resultate	35
3.2	Infrarot.....	37
3.2.1	Beschreibung.....	37
3.2.2	Auswahl der Bauteile	37
3.2.3	Tests	38
3.2.4	Resultate.....	45
4	Wahl des geeignetsten Sensortyps.....	47
4.1	Bewertungskriterien	47
4.2	Beurteilung.....	47
4.2.1	Abweichungen bei 0° Verschiebung.....	47
4.2.2	Abweichungen bei 22,5° Verschiebung.....	49
4.2.3	Abweichungen bis 5 Meter	50
4.2.4	Kosten	51
4.3	Bewertungsmatrix	52
4.4	Ergebnis.....	53
5	Resümee	54
6	Ausblick	55
7	Literaturverzeichnis	56
	Abbildungsverzeichnis.....	58
	Tabellenverzeichnis.....	60
	Abkürzungsverzeichnis.....	61

1 EINLEITUNG

Im Zuge des Bachelor- und Masterstudiengangs Automatisierungstechnik an der Fachhochschule Campus 02 in Graz erlangt man vor allem Wissen in den drei technischen Bereichen Elektronik, Informatik und Mechanik. Ersterer schürte von Anfang an meine Motivation für diese intensive und lehrreiche Ausbildung. Da ich jedoch beruflich in der Informatik-Branche tätig bin, kam diese Sparte für mich persönlich etwas zu kurz. Bei der Auswahl meines Masterarbeitsthemas war es der Drang nach mehr Praxiserfahrung in der Elektronikentwicklung, der mich zum angesehenen Beleuchtungsspezialisten XAL GmbH mit Hauptsitz in Graz brachte. Aus einer Liste von Problemstellungen, welche das Team Electronic Engineering auf ihrer nice-to-have Liste hatte, wurde ein Projekt ausgewählt und somit zu meiner Masterarbeit.

Eine gute und ausreichende Beleuchtung gehört zur Grundausstattung eines jeden Büroarbeitsplatzes. In vielen technisch-modernen Büros werden einzelne Stehlampen pro Tischeinheit eingesetzt, da sich individuelle Ansprüche an die Beleuchtung damit einfacher umsetzen lassen. Des Weiteren kann Strom gespart werden, wenn ein Großraumbüro nur teilbesetzt ist und somit nur wenige Lampen aktiv sein müssen. Das kann jedoch den Nebeneffekt mit sich bringen, dass die arbeitende Person in einem kleinen Lichtkegel sitzt und rundherum Dunkelheit herrscht. Solch ein Arbeitsumfeld kann negative Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Psyche des Arbeitenden haben und soll mit Hilfe eines Steuer- und Kommunikationsmoduls verhindert werden. Die Idee ist es, durch die Bestimmung der Distanzen zwischen den Leuchten eines Raumes eine Übersicht zu bekommen, welche umliegenden Beleuchtungskörper einer aktiven Lampe eingeschaltet werden müssen, um eine angenehme „Lichtwolke“ erzeugen zu können. Es gilt im Zuge dieser Arbeit herauszufinden, ob dazu benötigte Entfernungsmessungen mittels Pegelmessung von Ultraschall- oder Infrarotsignalen über eine gewisse Strecke ausreichend genau durchführbar sind. Die beiden Signaltypen wurden bei einem gemeinsamen Brainstorming mit Elektronikentwicklern des Auftraggebers, der XAL GmbH, definiert und somit vorgegeben.

Der Hintergrund, warum die XAL GmbH die Entfernungsmessung über die Dämpfung eines Signals anstrebt, ist jener, dass man nicht in einen Konflikt mit bestehenden Patenten diverser Konkurrenzfirmen kommen möchte. Diese führen die Distanzbestimmung mittels Laufzeitdifferenzmessung durch, einerseits mit Ultraschall- und Infrarotsignalen und andererseits mit Ultraschall- und RF-Signalen.

2 SIGNALTYPEN

2.1 Ultraschall

2.1.1 Eigenschaften und Funktionsweise

In diesem Unterkapitel werden die Eigenschaften und die Funktionsweise von Ultraschall in Anlehnung an das Werk von Georg Sorge beschrieben:¹

Bei Ultraschall handelt es sich um elastische Wellen, deren Frequenzen oberhalb von 20 kHz liegen und sich bis in den Bereich von 10^{12} Hz erstrecken, wobei man den oberen Bereich ab 1 GHz auch Hyperschall nennt. Der Frequenzbereich liegt, wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich, über dem des Hörschalls, wodurch Menschen diesen nicht wahrnehmen können.

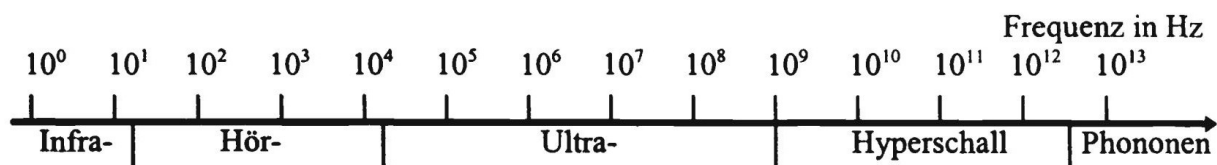


Abb. 1: Frequenzspektralen von Schall, Quelle: Sorge (2013), S. 16.

Die Ausbreitung von Ultraschallwellen findet in elastischen Medien statt, welche die Eigenschaft haben, eine auf sie wirkende Form- oder Volumenänderung durch äußere Einwirkungen nach Beendigung derer wieder rückgängig machen zu können. Bei Gasen bzw. Gasgemischen sowie Flüssigkeiten wird am Ursprungsort der Welle ein Druckstoß ausgelöst, wodurch sich das Volumen ändert. Diese Medien weisen Volumenelastizität auf. In festen Stoffen bewirken äußere Krafteinwirkungen zusätzlich zur Volumenänderung eine Abstandsänderung der Atome und Moleküle, welche nach Ende der Einwirkungen ihre Ausgangslage wieder einnehmen. Diese Eigenschaft nennt man Formelastizität.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Übertragung von Ultraschallwellen in Luft, weshalb sie sich im weiteren Verlauf auf Gase bzw. Gasgemische als Übertragungsmedium beschränkt. Bei der Wellenausbreitung in diesen Medien werden Lageänderungen der Teilchen durch Druck bewirkt. Diese Störungen geben sie an die benachbarten Teilchen weiter und somit entsteht eine Kettenreaktion. Die Lageänderung verläuft dabei in derselben Richtung wie die Schallausbreitung und man spricht dabei von Longitudinalwellen. In der folgenden Abbildung werden die Positionsstörungen der Teilchen eines Mediums bei einer Ausbreitung einer Longitudinalwelle gezeigt. Die Schallwelle breitet sich hierbei in waagrechter Richtung aus. Die zusammengerückten Teilchen zeigen die Wellenberge und die weiter voneinander getrennten Teilchen die Wellentäler.

¹ Vgl. Sorge (2013), S. 9 – 18.

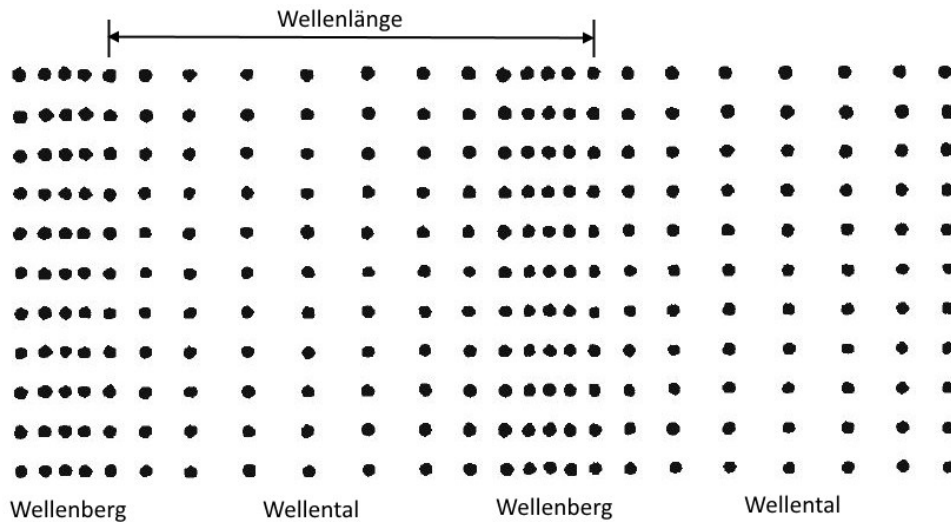


Abb. 2: Momentbild der Teilchen einer Longitudinalwelle, Quelle: Sorge (2013), S. 14. (leicht modifiziert).

Bei der Ausbreitung von periodischen Wellen findet man in bestimmten Abständen immer wieder Punkte mit dem gleichen Schwingungszustand. Diese Punkte schwingen in gleicher Phase und benötigen die Schwingungsdauer T , bis sie eine volle Schwingung hinter sich gebracht und wieder denselben Schwingungszustand eingenommen haben. Den dabei zurückgelegten Weg bezeichnet man als Wellenlänge λ , welche in Abb. 3 in Zusammenhang mit dem Schalldruck gezeigt wird. Darüberliegend ist eine dazugehörige Zeichnung mit den Wellenbergen eines Schallsignals, die hier mit eng aneinander liegenden Linien dargestellt werden, sowie den Wellentälern, welche mit den großen Abständen zwischen den Linien gezeigt werden, abgebildet.

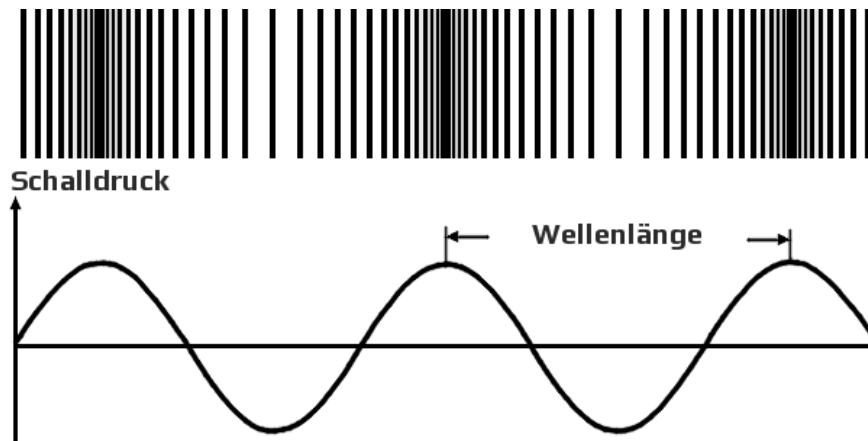


Abb. 3: Zusammenhang von Schalldruck und Wellenlänge, Quelle: IG Nachtflugverbot Leipzig/Halle e.V., Online-Quelle [14.09.2017].

Mit der Schwingungsdauer und der Wellenlänge lässt sich die Phasengeschwindigkeit wie folgt berechnen:

$$c_s = \frac{\lambda}{T} \quad (2.1)$$

$c_s / \text{m s}^{-1}$	Schallgeschwindigkeit, Phasengeschwindigkeit
λ / m	Wellenlänge
T / s	Schwingungsdauer, Periode

Eine weitere wichtige Eigenschaft einer Welle ist die Frequenz f , mit der sie schwingt. Dabei handelt es sich um die Anzahl der Schwingungen, die pro Sekunde ausgeführt werden. Es ist der reziproke Wert zur Schwingungsdauer T und somit besteht der folgende Zusammenhang:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2) \quad f/\text{Hz} \quad \text{Frequenz}$$

Daraus ergibt sich die umgewandelte Formel zur Berechnung der Phasengeschwindigkeit, welche in Luft je nach Temperatur um die 340 m s^{-1} beträgt, wie folgt:

$$c_s = \lambda f \quad (2.3)$$

Bei der Erzeugung von Ultraschallwellen wird darauf Wert gelegt, Signale mit möglichst hoher Schallenergie abzustrahlen. Es gibt Signalgeber mit unterschiedlichsten Resonanzfrequenzen für Ultraschall, dementsprechend ist die Frequenz zu wählen, um eine möglichst hohe Sendeleistung zu erzielen.

2.1.2 Aufbau und Einsatzmöglichkeiten

Dieses Unterkapitel wurde in Anlehnung an die Veröffentlichung von Georg Sorge verfasst:²

Im Laufe der Zeit haben sich immer wieder neue Kategorien von Ultraschallgebern etabliert und ältere haben an Bedeutung verloren. So waren bis Anfang des 20. Jahrhunderts hauptsächlich mechanische Methoden im Einsatz, um Ultraschallsignale zu erzeugen. Dazu gehört die Hunde- bzw. Galtonpfeife, die als eines der letzten Überbleibsel dieser Kategorie auch heute noch im Alltag gebräuchlich ist. Nach dem Ersten Weltkrieg wurden magnetostriktive und piezoelektrische Signalgeber entwickelt, wobei die piezoelektrischen für die Erzeugung und Verarbeitung von Ultraschallwellen heute noch am häufigsten in Verwendung sind. Sie nutzen den direkten piezoelektrischen Effekt, welcher um 1880 von den Gebrütern Curie entdeckt wurde, zum Empfangen und den reziproken piezoelektrischen Effekt zum Senden der Signale. Beide Effekte können durch elektronische Umschaltung mit einem Wandler genutzt werden. Zu den verwendeten Materialien zählten anfangs vor allem natürlich gewonnene Kristalle wie Quarz, dessen chemische Zusammensetzung SiO_2 lautet. Heutzutage werden auf Grund der niedrigen Herstellungskosten und der Möglichkeit, die Form und die piezoelektrischen Eigenschaften bei der Produktion zu beeinflussen, oft Keramiken als Ultraschallwandler eingesetzt.

Das Schallfeld eines Ultraschallgebers hat je nach Bauform und Typ des Wandlers unterschiedliche Dimensionen und Formen, es wird aber immer in Nahfeld und Fernfeld unterteilt. Der Übergang zwischen diesen beiden Zonen liegt im Abstand l_0 , der so genannten Nahfeldlänge. Im Nahfeld treten starke Interferenzen auf, wohingegen sich beim Übergang auf das Fernfeld ein natürlicher Fokus befindet und der Schalldruck am höchsten ist. In der folgenden Abbildung ist der Aufbau eines Ultraschall-Kolbenschwingers mit dem Durchmesser D , der Nahfeldlänge l_0 , des zylinderförmigen Nahfeldes und des konusförmigen Fernfeldes sowie deren Übergang eingezeichnet.

² Vgl. Sorge (2013), S. 18 – 24.

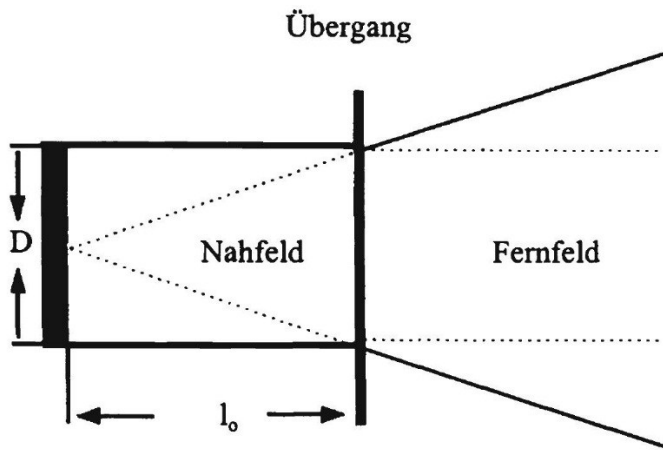


Abb. 4: Schallfeld eines Ultraschall-Kolbenschwingers, Quelle: Sorge (2013), S. 24.

Die Nahfeldlänge eines solchen Ultraschallgebers kann mit dieser Gleichung berechnet werden:

$$l_0 = \frac{(D^2 - \lambda^2)}{4 \lambda} \quad (2.4)$$

l_0/m	Nahfeldlänge
D/m	Durchmesser des Ultraschall-Kolbenschwingers

Wenn man es mit hohen Frequenzen zu tun hat, sodass λ laut der Berechnung mit der umgeformten Formel 2.3 sehr klein wird und der Durchmesser des Kolbenschwingers im Vergleich dazu groß ist, kann die folgende Näherung für die Berechnung der Nahfeldlänge verwendet werden:

$$l_0 \approx \frac{D^2}{4 \lambda} \quad (2.5)$$

2.1.3 Berechnungen mit Schall

Die folgenden Informationen beziehen sich auf das Werk von Lerch/Sessler/Wolf:³

Um ein Schallfeld in Raumlufte zu beschreiben, werden die Zustandsgrößen Druck, Dichte und Geschwindigkeit verwendet. Es handelt sich dabei um die so genannten Schallfeldgrößen, mit denen man alle weiteren Kenngrößen des Schalls berechnet. Nachfolgend die Auflistung inklusive deren Nomenklaturen:

p/Pa	Schalldruck
$\rho/\text{kg m}^{-3}$	Schalldichte
$v/\text{m s}^{-1}$	Schallschnelle

Dabei ist anzumerken, dass dies die Wechselgrößen sind, welche mit den statischen Werten der Luft addiert werden müssen. Ein Beispiel dazu ist der statische Luftdruck mit 101,325 kPa auf Meereshöhe. Die Schallschnelle ist die Geschwindigkeit, mit der sich die durch eine Schallwelle schwingenden Teilchen im Medium bewegen, wohingegen sich ein bestimmter Schwingungszustand einer Welle, wie beispielsweise

³ Vgl. Lerch/Sessler/Wolf (2009), S. 7 – 10.

ein Wellenberg, mit der Schall- bzw. Phasengeschwindigkeit c im Raum fortbewegt.⁴ Zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit benötigt man den Adiabatenexponenten, welcher das Verhältnis zwischen der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck und konstantem Volumen angibt.

$$\kappa = \frac{C_p}{C_V} \quad (2.6)$$

κ Adiabatenexponent

$C_p / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck

$C_V / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen

Typische Werte für den Adiabatenexponenten aus der Theorie können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Temperatur/°C	Gas	κ
20	He	1,66
20	H ₂	1,41
20	trockene Luft	1,40
20	CO ₂	1,30

Tabelle 1: Typische Werte für den Adiabatenexponenten, Quelle: In Anlehnung an LUMITOS GmbH, Online-Quelle [22.01.2018].

Damit kann nun die Schallgeschwindigkeit für ideale Gase errechnet werden, wobei die Dichte des Gases im Raum je nach Zustandseigenschaften des Raums, wie Meereshöhe und Temperatur, variiert.

$$c_S = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}} \quad (2.7)$$

$\rho_0 / \text{kg m}^{-3}$ stationäre Luftdichte im Raum

p_0 / Pa statischer Luftdruck im Raum

Des Weiteren ist es möglich, die Schallgeschwindigkeit mit Hilfe der universellen Gaskonstante, der molaren Masse und der absoluten Temperatur wie folgt zu berechnen:

$$c_S = \sqrt{\kappa \frac{R \vartheta_a}{M}} \quad (2.8)$$

$R / \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ universelle Gaskonstante

$M / \text{g mol}^{-1}$ molare Masse

ϑ_a / K absolute Temperatur

Daraus ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit des Schalls von der Temperatur abhängt, und zwar insofern, als dass sie mit der Wurzel der absoluten Temperatur zunimmt.

Um die Schallenergiemenge anzugeben, die je Flächeneinheit mit der Schallschnelle an einem Ort im Schallfeld durchströmt wird, verwendet man die Schallintensität. Sie berechnet sich wie folgt:

$$I_S = p v \quad (2.9) \quad I_S / \text{W m}^{-2} \quad \text{Schallintensität}$$

Mit Hilfe der Schallintensität kann man wiederum die Leistung einer Schallquelle berechnen, indem man die Intensitätswerte über eine um die Quelle gelegte Fläche integriert.

⁴ Vgl. Murmann/Ryder, Online-Quelle [10.09.2017].

$$P_S = \int_{A_1}^{A_2} I_S \, dA \quad (2.10)$$

P_S/W	Schalleistung
A/m^2	Fläche

Um den großen Wertebereich von Schalldruck, Schallintensität und Schalleistung gut lesbar abbilden zu können, verwendet man logarithmische Pegelwerte, welche sich auf die Referenzwerte p_0 , I_0 und P_0 an der menschlichen Hörschwelle von 1 kHz beziehen.

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (2.11)$$

L_p/dB	Schalldruckpegel
----------	------------------

p_0/Pa	Bezugsschalldruck (20 μPa)
----------	----------------------------------

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I_S}{I_0} \quad (2.12)$$

L_I/dB	Schallintensitätspegel
----------	------------------------

$I_0/W \, m^{-2}$	Bezugsschallintensität (1 $pW \, m^{-2}$)
-------------------	--

$$L_P = 20 \log_{10} \frac{P_S}{P_0} \quad (2.13)$$

L_P/dB	Schalleistungspegel
----------	---------------------

P_0/W	Bezugsschalleistung (10 pW)
---------	--------------------------------

2.1.4 Einflussgrößen auf die Signalqualität

Schallwellen breiten sich in realen Medien und Räumen nicht unendlich weit aus. Der Grund dafür sind Dämpfungseffekte, welche von Lerch/Sessler/Wolf detailliert beschrieben und nachfolgend näher ausgeführt werden:⁵

Innere Reibung, Wärmeleitung und molekulare Absorption sorgen für Schalldämpfung bzw. Schallabsorption, welche besonders bei höheren Frequenzen und längeren Übertragungsweiten eine große Rolle spielen. Bei diesen Effekten wird der Schallwelle Energie entzogen, wodurch die Schallintensität mit größer werdendem Abstand zur Quelle abnimmt. Mithilfe der dynamischen Viskosität η kann man den Einfluss der inneren Reibung auf Schall beschreiben. Dazu verwendet man die Dämpfungskonstante α_R und berechnet diese wie folgt:

$$\alpha_R = \frac{2 \eta \omega^2}{3 \rho_0 c_S^3} \quad (2.14)$$

α_R	Dämpfungskonstante der inneren Reibung
------------	--

$\eta/Pa \, s$	dynamische Viskosität
----------------	-----------------------

ω/Hz	Kreisfrequenz
-------------	---------------

Die darin enthaltene Kreisfrequenz lässt sich bekanntlich wie folgt berechnen:

$$\omega = 2 \pi f \quad (2.15)$$

π	Kreiszahl
-------	-----------

Bei Raumluft und einer Temperatur von 20 °C kann man mit einer dynamischen Viskosität von 18,4 $\mu Pa \, s$ rechnen. Aus der Formel lässt sich herauslesen, dass die Dämpfung durch innere Reibung mit dem Quadrat der Frequenz zunimmt.

Zusätzlich kann α_R mit der Wellenlänge statt der Kreisfrequenz berechnet werden:

⁵ Vgl. Lerch/Sessler/Wolf (2009), S. 35 – 50.

$$\alpha_R = \frac{8 \pi^2 \eta}{3 \rho_0 c_S \lambda^2} \quad (2.16)$$

Damit kann die Reduktion der Amplitude von p auf einer Wegstrecke x berechnet werden, da es den nachfolgenden Zusammenhang zwischen den Dämpfungskonstanten und der Wegstrecke gibt:

$$x = \frac{1}{\alpha_x} \quad (2.17) \quad \begin{array}{ll} x/\text{m} & \text{Wegstrecke} \\ \alpha_x & \text{unterschiedliche Dämpfungskonstanten} \end{array}$$

Wenn ein Medium die Eigenschaft der endlichen Wärmeleitfähigkeit besitzt, wird dem Schallfeld Energie entzogen, indem irreversible Ausgleichsprozesse zwischen Bereichen im Medium mit unterschiedlicher Temperatur auftreten. Um diesen Energieverlust zu beschreiben, verwendet man wiederum eine Dämpfungskonstante, die sich aus der folgenden Formel berechnen lässt:

$$\alpha_L = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\omega^2 k}{2 C_V \rho_0 c_S^3} \quad (2.18) \quad \begin{array}{ll} \alpha_L & \text{Dämpfungskonstante der Wärmeleitung} \\ k/\text{W K}^{-1} \text{ m}^{-1} & \text{Wärmeleitfähigkeit} \end{array}$$

Somit ist nicht nur die Dämpfung durch innere Reibung, sondern auch die Dämpfung auf Grund von Wärmeleitung proportional zum Quadrat der Frequenz. Die beiden Formeln 2.16 und 2.18 können wie folgt zu einer zusammengefasst werden, welche die so genannte klassische Absorption definiert:

$$\alpha_K = \frac{1}{2 \rho_0 c^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{k}{C_V} \right) \quad (2.19) \quad \begin{array}{ll} \alpha_K & \text{Dämpfungskonstante der klassischen Absorption} \end{array}$$

Da eine ausbreitende Schallwelle die Anregung der molekularen Rotations- und Schwingungsfreiheitsgrade der Moleküle im jeweiligen Medium mit sich bringt, tritt ein Verlust der Translationsenergie und somit eine Dämpfung der Schallwelle auf. Der Energieaustausch durch die Rotations- und Schwingungsanregung dauert nur so lange, bis die Relaxationszeit und somit das thermische Gleichgewicht zwischen Schwingungs-, Rotations- und Translationsenergie erreicht ist. Diese so genannte molekulare Absorption tritt in Gasen und Flüssigkeiten bis zur Relaxationsfrequenz auf und ist frequenzabhängig. Ein besonderes Augenmerk auf diesen Dämpfungseffekt muss bei der Schallausbreitung in wasserdampfhaltiger Luft gelegt werden, da sich die Schwingungsrelaxationsfrequenz durch den Wasserdampf entscheidend erhöht und die Relaxationszeit verkürzt. Die gemessene Absorption in feuchter Luft ist dadurch um ein Vielfaches größer als die klassische Absorption. Berechnen lassen sich die Relaxationszeit und der Relaxationsbetrag, der die im Relaxationsprozess ausgetauschte Energie angibt, wie folgt:

$$\varepsilon = \frac{c_1^2 - c_0^2}{c_1^2} \quad (2.20) \quad \begin{array}{ll} \varepsilon & \text{Relaxationsbetrag} \\ c_0/\text{m s}^{-1} & \text{Schallgeschwindigkeit außerhalb des Absorptionsgebiets} \\ c_1/\text{m s}^{-1} & \text{erreichte Schallgeschwindigkeit im Absorptionsgebiet} \end{array}$$

$$\frac{1}{\tau} = 1,92 \cdot 10^5 h \quad (2.21) \quad \begin{array}{l} \tau/s \\ h \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Relaxationszeit} \\ \text{Wasserdampfpartialdruck in feuchter} \\ \text{Luft bezogen auf den Gesamtdruck} \end{array}$$

Die Beziehung zwischen dem Wasserdampfpartialdruck und dem Gesamtdruck sieht folgendermaßen aus:

$$h = \frac{e}{p_G} \quad (2.22) \quad \begin{array}{l} e/\text{Pa} \\ p_G/\text{Pa} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Wasserdampfpartialdruck} \\ \text{Gesamtdruck} \end{array}$$

Den für die Formel 2.22 benötigten Wasserdampfpartialdruck kann man mit der nachfolgenden Multiplikation errechnen, wobei die relative Luftfeuchtigkeit im Raum mit einem dafür ausgelegten Gerät gemessen werden muss.

$$e = \varphi e_{sat} \quad (2.23) \quad \begin{array}{l} \varphi \\ e_{sat}/\text{Pa} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{relative Feuchte} \\ \text{Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf} \end{array}$$

Der Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf kann wiederum mit der folgenden Formel berechnet werden, sofern die Temperatur der jeweiligen Umgebung bekannt ist.

$$e_{sat} = 611,2 e^{\left(\frac{17,62 (\vartheta_t - 273,15)}{243,12 + (\vartheta_t - 273,15)}\right)} \quad (2.24) \quad \begin{array}{l} \vartheta_t/\text{K} \\ \text{thermodynamische Temperatur} \end{array}$$

Der Zusammenhang zwischen Dämpfungskoeffizient und Wasserdampfpartialdruck bezogen auf den Gesamtdruck ist in der Abb. 5 inklusive Beispielwerte dargestellt.

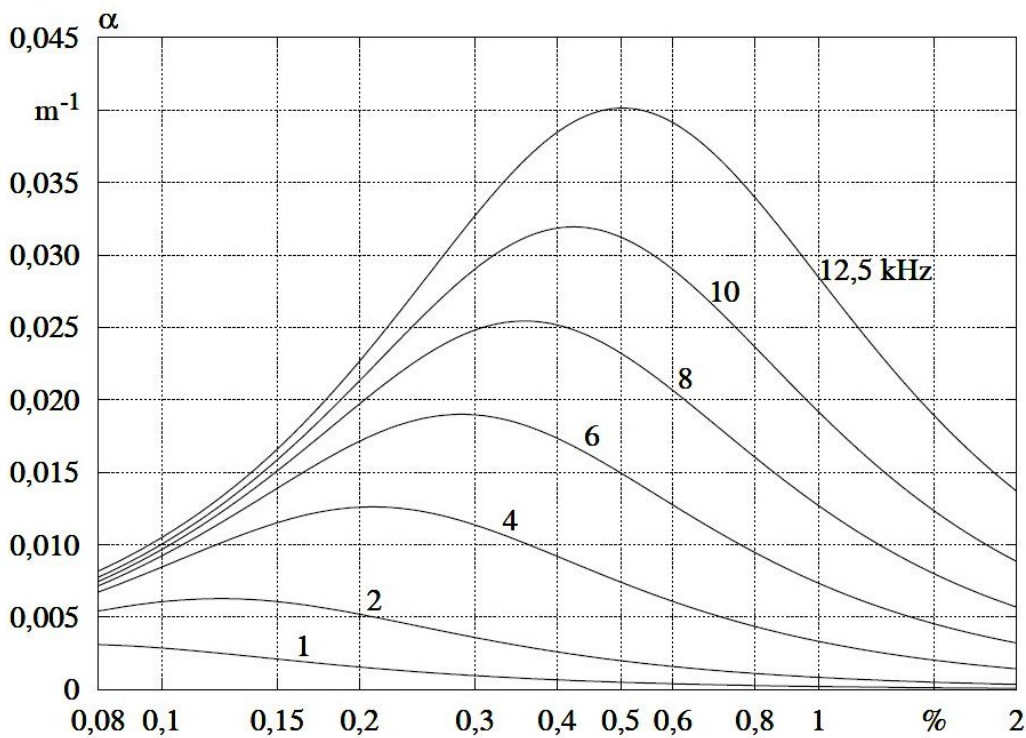


Abb. 5: Dämpfungskoeffizient α im Zusammenhang mit dem Wasserdampfpartialdruck bezogen auf den Gesamtdruck, Quelle: Lerch/Sessler/Wolf (2009), S. 46.

Da mit den Formeln 2.21 bis 2.24 die Relaxationszeit bekannt wird, kann nun der Absorptionsindex, welcher oft als Dämpfungsmaß benutzt wird, für molekulare Absorption errechnet werden. Die durch H. O. Kneser definierte Formel gilt jedoch nur unter der Einschränkung, dass der Relaxationsbetrag ε sehr viel kleiner als 1 ist.

$$\alpha \lambda = \pi \varepsilon \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.25) \quad \alpha \lambda \quad \text{Absorptionsindex}$$

H. O. Kneser hat auch eine Näherungsformel für praktische Anwendungen im Temperaturbereich von 0 °C bis 30 °C und bei Normaldruck von 101,325 kPa festgelegt, mit welcher der totale Dämpfungskoeffizienten α einer ebenen Welle berechnet werden kann.

$$\alpha = \frac{1}{2} (11,7 + 0,1 \vartheta) 10^{-12} f^2 + \frac{\pi 10^{-5} (0,81 + 0,022 \vartheta) \tau f^2}{1 + 4 \pi^2 \tau^2 f^2} \quad (2.26) \quad \alpha \quad \text{Dämpfungskoeffizient}$$

Mit diesen Formeln und Informationen kann berechnet werden, wie stark ein Ultraschallsignal in einem gegebenen Raum gedämpft wird und welche Distanzen es in etwa zurücklegen kann. Berechnungen dazu werden im Praxisteil dieser Arbeit in jenem Fall notwendig sein, wenn sich Ultraschall als der besser geeignete Signaltyp für die Distanzbestimmung zwischen Beleuchtungssystemen über die Signaldämpfung ausweist und eine Systemauslegung durchgeführt wird.

2.2 Infrarot

2.2.1 Eigenschaften

Infrarotstrahlung (IRS) besteht aus elektromagnetischen Wellen, welche sich im Allgemeinen unter den gleichen Bedingungen wie sichtbares Licht ausbreiten.⁶ Der Spektralbereich liegt jedoch nicht in dem für Menschen sichtbaren Lichtspektrum, sondern grenzt an diesen an und erstreckt sich bis zu Mikrowellen. Die Wellenlänge von Infrarotstrahlen liegt somit im Längenbereich von 780 Nanometer bis 1 Millimeter, was in der folgenden Abbildung gezeigt wird.⁷



Abb. 6: Spektrum des sichtbaren und nicht sichtbaren Lichtes, Quelle: Wagner, Online-Quelle [14.09.2017].

Nun zu den Eigenschaften von Licht, welche mit den folgenden Größen laut Kokoschka beschrieben werden:⁸

Betrachtet man die elektromagnetische Lichtstrahlung als Strom von Photonen, ist die im Strom transportierte Energie die Strahlungsenergie. Als Strahlungsfluss oder -leistung wird die pro Zeiteinheit empfangene, gesendete oder gemessene Strahlungsenergie bezeichnet.

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt} \quad (2.27) \quad \begin{array}{ll} \Phi_e/W & \text{Strahlungsleistung / Strahlungsfluss} \\ E/J & \text{Strahlungsenergie} \\ t/s & \text{Zeit} \end{array}$$

Die Bestrahlungsstärke ist ein Maß für die Stärke der Lichteinstrahlung auf eine bestimmte, ebene Fläche, also die Strahlungsleistung pro Quadratmeter.

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A} \quad (2.28) \quad \begin{array}{ll} E_e/W \text{ m}^{-2} & \text{Bestrahlungsstärke} \\ A/\text{m}^2 & \text{Fläche} \end{array}$$

Der Index e beim Formelzeichen der Strahlungsleistung und der Bestrahlungsstärke deutet darauf hin, dass es sich um eine energetische, also objektive Messgröße handelt, in die die Wahrnehmungen des menschlichen Auges nicht miteinfließen. Im Gegensatz dazu weist der Index v auf eine visuelle Messgröße hin, in der die subjektiven Eigenschaften des menschlichen Auges sehr wohl einfließen.

⁶ Vgl. Wohlrabe (2002), S. 11.

⁷ Vgl. Hollandt (2009), Online-Quelle [12.09.2017].

⁸ Vgl. Kokoschka (2003), Online-Quelle [15.09.2017]

Die gesamte, laut der Hellempfindlichkeitskurve bewertete Strahlungsleistung einer Lichtquelle ergibt den Lichtstrom, welcher in der Einheit lumen angegeben wird. Damit kann die Beleuchtungsstärke, die das Maß der Lichteinstrahlung auf einer bestimmten Fläche A in der Einheit lux angibt, wie folgt berechnet werden:

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (2.29) \quad E_v/\text{lx} \quad \text{Beleuchtungsstärke}$$

$$\Phi_v/\text{lm} \quad \text{Lichtstrom}$$

Um den Lichtstrom einer Lichtquelle eingeschränkt auf einen Raumwinkel zu beschreiben, wird die Lichtstärke verwendet. Sie wird mit der Einheit candela angegeben und laut Formel 2.30 berechnet.

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \quad (2.30) \quad I_v/\text{cd} \quad \text{Lichtstärke}$$

$$\Omega/\text{sr} \quad \text{Raumwinkel}$$

Der Raumwinkel Ω ist eine dimensionslose Größe, die meist mit der Einheit steradian bezeichnet wird: Bei einer Kugel mit dem Radius $r = 1 \text{ m}$ umfasst ein vom Mittelpunkt ausgehender Kegel mit dem Raumwinkel von 1 Steradian eine Fläche A von 1 m^2 auf der Kugeloberfläche.⁹ Die Zeichnung in Abb. 7 visualisiert diese Beschreibung und mit der nachfolgenden Formel lässt sich der Raumwinkel berechnen.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.31) \quad \Omega/\text{sr} \quad \text{Raumwinkel}$$

$$A/\text{m}^2 \quad \text{Fläche vom Kugelsegment}$$

$$r/\text{m} \quad \text{Radius der Kugel}$$

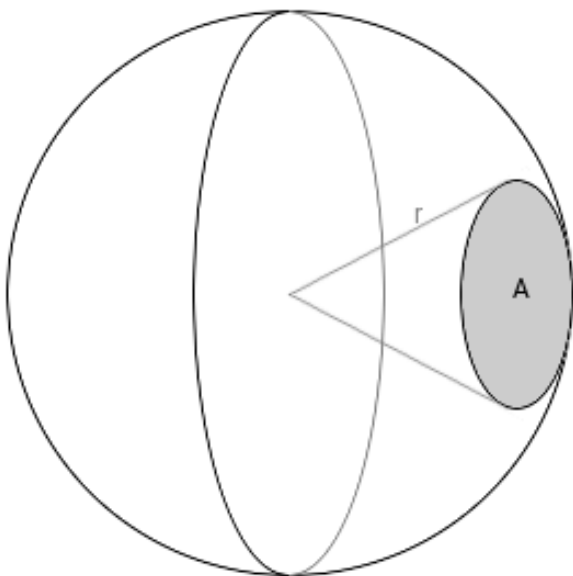


Abb. 7: Zeichnung mit Radius r und Fläche A zur Erklärung von Steradian, Quelle: Internetservice Kummer + Oster GbR, Online-Quelle [13.09.2017].

Eine Lichtwelle bewegt sich mit einer Frequenz f und der Ausbreitungs- bzw. Lichtgeschwindigkeit c_L fort, welche vom Medium abhängt. Die Wellenlänge λ steht mit diesen beiden Größen in folgendem Zusammenhang:

⁹ Vgl. Spektrum Akademischer Verlag (1998), Online-Quelle [13.09.2017].

$c_L = \lambda f$	(2.32)	$c_L/\text{m s}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
		λ/m	Wellenlänge
		f/Hz	Frequenz

2.2.2 Funktionsweise

Ein Mensch kann IRS zwar nicht sehen, aber spüren, da die Strahlung eine wärmende Wirkung auf die Haut hat. Um dies zu messen, können thermische Strahlungsempfänger eingesetzt werden, welche die Stärke der IRS aus der Erwärmung des Empfängers und einer daraus resultierenden elektrischen Signaländerung eruieren. In der Mikroelektronik haben aber photoelektrische Detektoren, bei denen das Halbleitermaterial des Empfängers die elektromagnetische Strahlung absorbiert und die dadurch erzeugten freien Ladungsträger gemessen werden, den höchsten Stellenwert. Dazu gehören beispielsweise Phototransistoren, welche später noch genauer behandelt werden.¹⁰

Sender

Mit optischen Bauelementen wie Sammellinsen und Reflektoren kann IRS gebündelt werden, um das Signal über große Distanzen übertragen und auch mit ausreichend Intensität empfangen zu können. Dabei müssen Sender und Empfänger exakt zueinander positioniert sein, da der Öffnungswinkel der Strahlung sehr klein gehalten wird. Im Gegensatz dazu wird, meist bei großflächigen Anwendungen in Innenräumen, die IRS über einen breiten Öffnungswinkel gestreut bzw. diffus abgestrahlt. Hierbei helfen auch mögliche Wandreflexionen, wenn Sender und Empfänger keinen direkten Sichtkontakt haben. Außerdem können streuende Reflektoren, Linsen und Optiken beim Sender verbaut sein, um den Abstrahlwinkel zu maximieren. Infrarot-Sendediodeen werden zur Übertragung von Infrarot-Signalen seit Jahrzehnten verwendet und waren auch die ersten Leuchtdioden (Light Emitting Diode, LED), noch bevor es LEDs zur Abstrahlung von sichtbarem Licht gab.¹¹ Infrarot-LEDs haben bestimmte Bauteileigenschaften, welche für einen geeigneten Einsatz unbedingt berücksichtigt werden sollten. Der Abstrahlwinkel wird nicht nur in fokussierend und streuend unterteilt, sondern es wird meist der Öffnungswinkel in Graden angegeben. In den Datenblättern und Formeln ist er unter dem griechischen Kleinbuchstaben φ zu finden. Die Wellenlänge der IRS gibt man in der Einheit Meter und mit dem Zeichen λ an, wobei oft der tiefergestellte Zusatz „p“ bzw. „peak“ dabei steht, was für die Wellenlänge bei maximaler Emission steht. Mit Φ_e wird generell der Gesamtstrahlungsfluss in Watt angegeben, also die gesamte Leistung, welche in Form von IRS von der LED abgegeben wird. Vergleichsweise dazu findet man in Datenblättern auch meist die Strahlstärke I_e in Watt pro Raumwinkel. Gerade bei Infrarot-LEDs mit größerem Abstrahlwinkel sollte man ein Augenmerk auf die Strahlstärke legen, da ein hoher Gesamtstrahlungsfluss nicht immer bedeutet, dass dieser gut über den gesamten Öffnungswinkel verteilt ist. Für die Signalübertragung mittels IRS ist der Stoßstrom, welcher in Ampere angegeben und mit I_{FSM} gekennzeichnet wird, ein wichtiger Indikator, um die maximale Reichweite zu schaffen. Die dabei angegebene Stromstärke darf für eine maximale Pulsdauer t_p , welche

¹⁰ Vgl. Hollandt (2009), Online-Quelle [12.09.2017].

¹¹ Vgl. Biard/Okon (2015), Online-Quelle [13.09.2017].

sich normal im Milli- bzw. Mikrosekunden-Bereich befindet, über die LED fließen, ohne dass das Bauteil beschädigt wird. Zusätzlich müssen bei dieser Betriebsart auch die Abkühlzeiten eingehalten werden, welche als Puls-Pause-Verhältnis angegeben werden. Die Datenrate bei Signalübertragung mit IRS wird meistens durch die Bauteileigenschaften begrenzt, hierfür muss man vor allem auf die Schaltzeiten achten, die mindestens für das Erreichen von 10 % bzw. 90 % der Endwerte der Fotoströme benötigt werden. Die Flankenanstiegszeit wird mit t_r und die Abfallzeit mit t_f angegeben. Die Durchlassspannung V_F fällt bei gegebenem Strom $I_{F(SM)}$ an der Diode ab und kann sich je nach Technologieform stark unterscheiden. In der Abb. 8 sieht man den Zusammenhang zwischen Durchlassspannung und Durchlassstrom beim Beispiel einer Infrarot-Diode vom Typ SFH4770S des Herstellers OSRAM.¹²

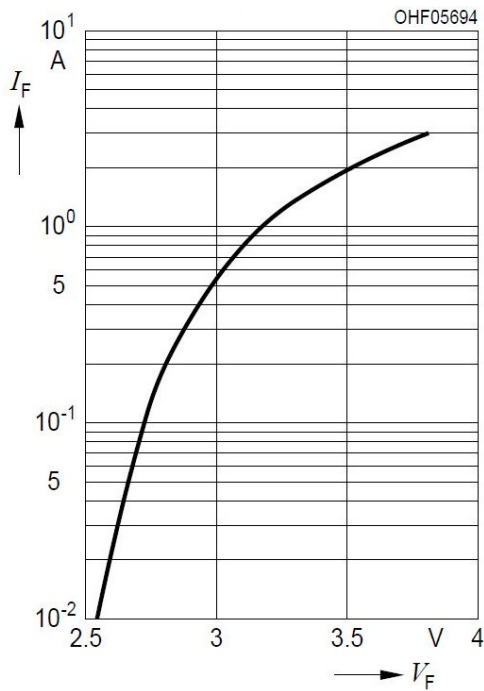


Abb. 8: Kennlinie von Durchlassspannung zu Durchlassstrom der IR-Diode SFH4770S, Quelle: OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Online-Quelle [03.12.2017].

Hier noch einmal die wichtigsten Begriffe mit ihren Nomenklaturen und Einheiten:

$\varphi/^\circ$	Abstrahlwinkel
λ_{peak}/nm	Wellenlänge der IRS
Φ_e/mW	Gesamtstrahlungsfluss
$I_e/W sr^{-1}$	Strahlstärke
V_F/V	Durchlassspannung
I_F/A	Durchlassstrom
I_{FSM}/A	Stoßstrom
t_p/s	Pulsdauer
t_r/s	Flankenanstiegszeit
t_f/s	Flankenabfallzeit

¹² Vgl. Wohlrabe (2002), S. 11 – 13.

Damit der Empfänger das übertragene Signal eindeutig erkennt und von Störsignalen unterscheiden kann, ist eine Signalmodulation notwendig. Dies kann einerseits das Protokoll zur Übertragung von Daten sein oder andererseits lediglich eine Pulsweitenmodulation, um durch Stoßströme kurze Lichtimpulse zu senden, wie es zu Testzwecken bei dieser Arbeit verwendet wird. Die Signalerzeugung kann beispielsweise mit einem Mikrokontroller umgesetzt werden. Die folgende Abb. 9 zeigt eine mögliche Schaltung zur Signalverstärkung für Infrarot-LEDs.

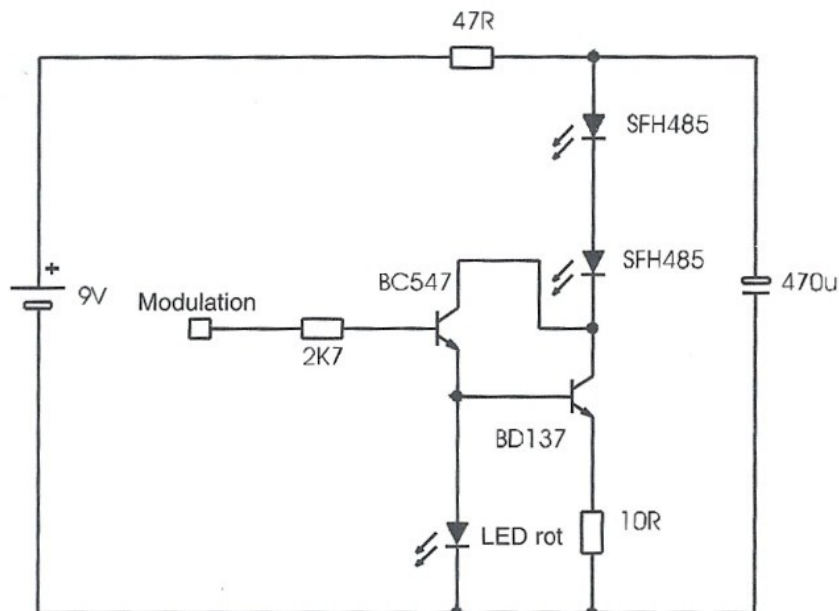


Abb. 9: Darlington-Transistorschaltung zur Stromverstärkung des Signals beim Infrarot-Sender, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 75.

Empfänger

Wenn man IRS zur Datenübertragung nutzen möchte, eignen sich Phototransistoren, Photodioden sowie Photoelemente zum Empfangen der Signale. Die Details dazu werden in Anlehnung an die Veröffentlichung von Frank Wohlrabe nachfolgend beschrieben:¹³

Photodioden können durch mehrere Betriebsmodi und unterschiedliche innere Aufbauarten für verschiedenste Anwendungen eingesetzt werden. Diese Halbleiter-Bauelemente besitzen einen PN-Übergang mit einem Glasfenster, durch das die IRS eindringen kann. Die absorbierten elektromagnetischen Strahlen erzeugen bei ausreichend großer Intensität in der Diode Elektron-Loch-Paare, wodurch der Stromfluss erhöht bzw. überhaupt bewirkt wird. Wenn die Photodiode in Sperrrichtung betrieben wird, erhöht sich durch diesen Effekt der Sperrstrom. Die freigesetzten Ladungsträger haben ein proportionales Verhältnis zur Intensität der IRS, und somit kann man diese über die Differenz des Sperrstromes messen. Zur weiteren Verarbeitung des Signals ist meist eine Verstärkerschaltung notwendig, da es sich nur um sehr kleine Stromänderungen handelt. In der folgenden Abbildung ist die Grundschaltung einer Photodiode mit Verstärker zu sehen:

¹³ Vgl. Wohlrabe (2002), S. 25 – 49.

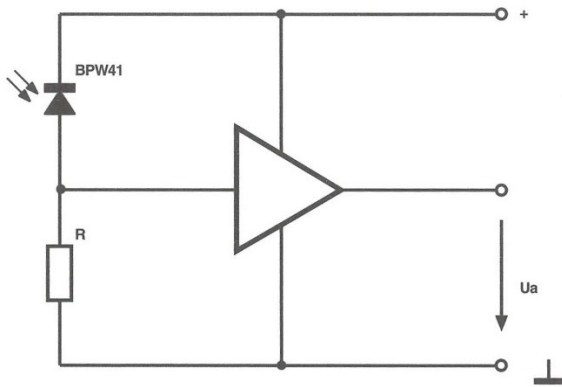


Abb. 10: Grundsaltung einer Photodiode mit Verstärker, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 36.

Ein Phototransistor funktioniert wie eine Photodiode mit nachgeschaltetem Transistor, der als Verstärker dient. Somit erspart man sich im Vergleich zum Einsatz einer Photodiode meist die Verstärkung der zu messenden Stromänderung. Betrieben wird ein Phototransistor vorwiegend in Emitterschaltung und mit offener Basis. Dabei verliert man jedoch die Möglichkeit, über den Basisanschluss die Empfindlichkeit, die Ansprechgeschwindigkeit sowie den Arbeitspunkt einzustellen. Nachfolgend sind zwei Grundsaltungen eines Phototransistors mit offener Basis abgebildet, wobei die linke Schaltung die Ausgangsspannung U_a auf Masse und die rechte auf + 5 V schaltet:

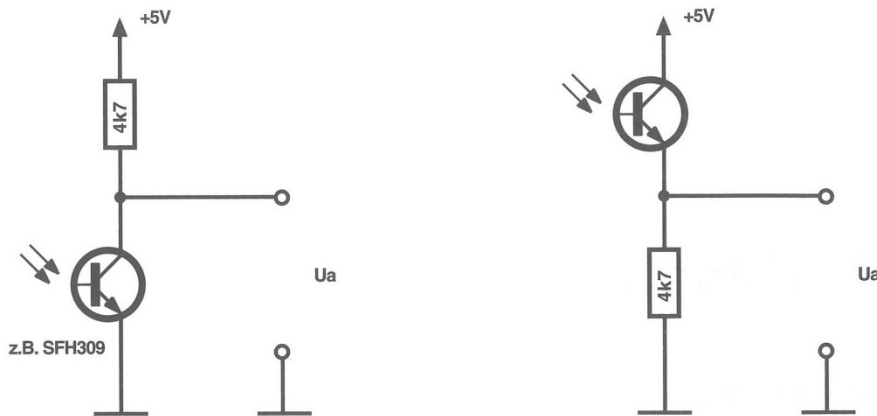


Abb. 11: Grundsaltungen eines Phototransistors, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 26.

Um das empfangene Signal gut weiterverarbeiten zu können, kann eine weitere Verstärkung benötigt werden. Eine gängige Schaltung dafür ist in Abb. 12 abgebildet, welcher eine nichtinvertierende Verstärkerschaltung zu Grunde liegt. Je höher die Intensität der auf den Phototransistor treffenden IRS ist, desto mehr schaltet er durch, und im Zuge dessen erhöht sich der Spannungsabfall über den Widerstand R_3 . Diese Spannung liegt am nichtinvertierenden Eingang des Operationsverstärkers (OPV) und wird gemäß dem Verstärkungsfaktor, welcher sich aus den beiden Widerständen R_1 und R_2 laut der nachfolgenden Formel berechnen lässt, zum Ausgang des OPVs und somit in Richtung des Analog-Digital-Umformers verstärkt.

$$V_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.33) \quad V_U \quad \text{Verstärkungsfaktor}$$

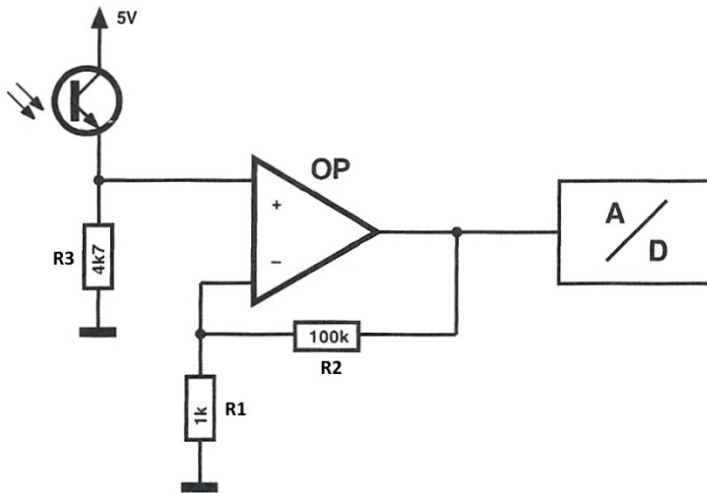


Abb. 12: Verstärkerschaltung für Phototransistor mit OPV, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 288. (leicht modifiziert).

Ein Photoelement ist ein aktiver Zweipol, welcher optische in elektrische Energie nach demselben Prinzip wie eine Photodiode umsetzt, jedoch ohne externer Spannungsquelle. Es wird durch die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom charakterisiert. Wenn der komplette lichtempfindliche Bereich bestrahlt wird, ist der Kurzschlussstrom proportional zu dieser Fläche und steigt mit der Erhöhung der Beleuchtungsstärke linear an. Zusätzlich wird der Kurzschlussstrom durch die Temperatur des Photoelements beeinflusst und steigt um zirka 0,7 % pro Kelvin. Die Leerlaufspannung erhöht sich mit zunehmender Beleuchtungsstärke logarithmisch und erreicht im Durchschnitt bei 1000 lux 0,4 bis 0,6 Volt. In der nachfolgenden Abbildung sind die Zusammenhänge von Beleuchtungsstärke, Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung abgebildet.

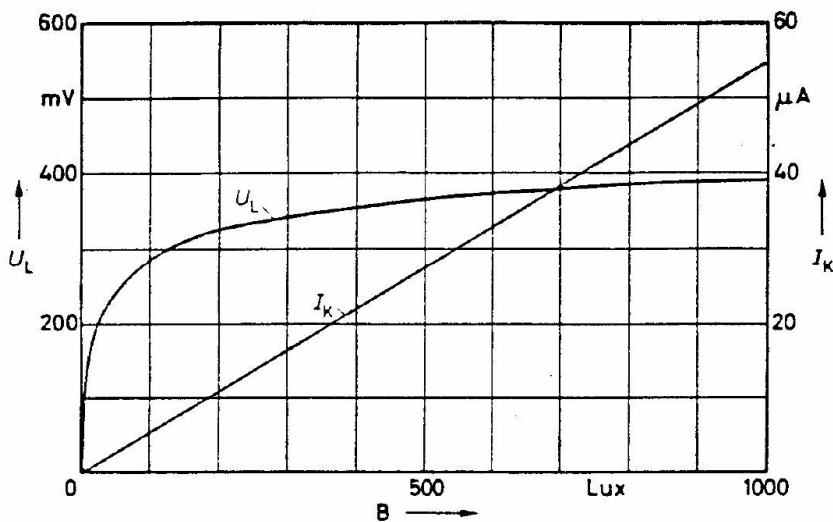


Abb. 13: Kennlinie eines Photoelements, Quelle: Aschenbrenner, Online-Quelle [14.09.2017].

2.2.3 Aufbau und Einsatzmöglichkeiten

Infrarot-Sendediode werden auch heute noch aus Galliumarsenid (GaAs) hergestellt. Es handelt sich um die am weitesten verbreitete Technologieform. Aufbauend auf einer im Verhältnis dicken N-Typ GaAs-Substratschicht kommen zwei Silizium-dotierte Schichten, zuerst die negativ- und dann die positiv-dotierte.

Als niederohmige Kontaktmaterialien für die Anschlüsse werden auf der Seite des Substrats Gold- und gegenüber Aluminiumverbindungen eingesetzt. Die erzeugte IRS verlässt auf der oberen, positiv-dotierten Schicht das Bauelement. Zusätzlich werden Strahlen durch Spiegelung an der Unterseite Richtung Oberseite geleitet und treten dort dann ebenfalls aus. Dieser Aufbau ist in Abb. 14 abgebildet. GaAs-Sendediode sind die preiswertesten ihrer Art und werden für allgemeine Infrarot-Anwendungen eingesetzt. Außerdem wird diese Technologie gerne auf Grund der geringen Durchlassspannung bevorzugt. Das absorbierende und leistungsmindernde Substrat der GaAs-Sendediode wird bei der Technologie mit Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) nicht benötigt. Stattdessen baut diese Infrarot-LED auf einer p-dotierten Epitaxie-Schicht auf, worauf eine n-dotierte Schicht folgt. Für beide Anschlüsse werden hier Goldverbindungen eingesetzt. Diese Technologieform liefert die höchste Ausgangsleistung bei sehr guter Linearität, die bis zu einem Betriebsstrom von 1,5 A reicht. Die Durchlassspannung bleibt jedoch in einem höheren Wertebereich als jene im Vergleich zur GaAs-Technologie. Eine weitere, so genannte AlGaAs „double hetero“-Technologie verbindet die Vorteile der beiden zuvor beschriebenen Formen. Es ist momentan das Optimum, was Infrarot-LEDs an Leistung und Eigenschaften zu bieten haben. Schnelle Schaltzeiten bei relativ niedrigen Durchlassspannungen ergeben eine hohe Effizienz.¹⁴

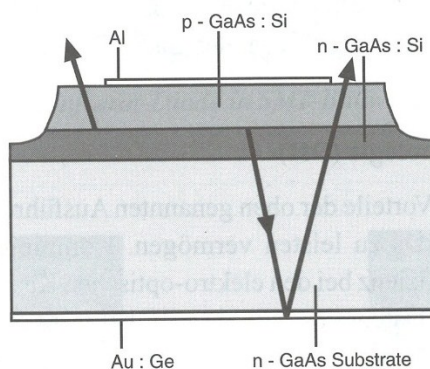


Abb. 14: Aufbau einer Infrarot-Sendediode in GaAs-Technologie, Quelle: Sorge (2013), S. 15.

Die Bauteile zum Empfangen von IRS werden je nach Anwendungsart aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien hergestellt. Am häufigsten verwendet man dafür Silizium, Germanium und Indiumgalliumarsenid. Diese unterscheiden sich in der Empfindlichkeit auf die Wellenlänge der IRS, wobei Silizium nur bis 1100 nm, Germanium bis 1700 nm und Indiumgalliumarsenid ab 800 und bis 2600 nm eingesetzt werden kann. Silizium- und Germanium-Photodioden können auch sichtbares Licht detektieren, diese Eigenschaft wird hier aber nicht näher betrachtet. Um nur die Intensität der IRS zu messen, kann vor dem Glasfenster, durch das die IRS zum PN-Übergang gelangt, ein optischer Filter verbaut werden. Dadurch gelangen weder sichtbare Lichtstrahlen noch andere unerwünschte Strahlen zum Halbleitermaterial, wodurch Signalverfälschungen vermieden werden können.¹⁵

¹⁴ Wohlrabe (2002), S. 15 f.

¹⁵ Vgl. Held (2009), S. 113 – 117.

2.2.4 Berechnungen

In der Literatur findet man eine Vielzahl von Berechnungsformeln, mithilfe derer man die benötigte Beleuchtungsstärke für einen bestimmten Raum errechnen kann. Da die Räume, in denen mittels IRS kommuniziert wird, immer unterschiedlichen Gegebenheiten ausgesetzt sind, wird folgendes Beispiel aus dem Werk von Frank Wohlrabe für weitere Berechnungen herangezogen:¹⁶

Weißer Wände reflektieren IRS gut und erhöhen somit die Reichweite. Um einen Raum mit 30 m² Fläche und 2,5 m Raumhöhe vollständig mit einer Bestrahlungsstärke von 0,5 mW m⁻² auszuleuchten, benötigt man 60 mW Leistung bei einer grob berechneten Raumbofläche von 120 m² und einem Wirkungsgrad von 100 %. Da man auf Grund von Reflexionen und über Fenster austretenden Strahlungen mit einem Verlust von 80 % rechnen kann, würde man für eine ausreichende Bestrahlung des gesamten Raumes eine Sendeleistung von 300 mW benötigen.

2.2.5 Einflussgrößen auf die Signalqualität

Die Strahlstärke von Infrarot-Sendediode, welche als eine von vielen Bauteileigenschaften in den einzelnen Datenblättern vermerkt ist, bestimmt im Wesentlichen die Reichweite von IRS. Je höher der Durchlassstrom gewählt wird, desto weiter kann das Signal übertragen werden, wobei das Maximum nur als Stoßstrom für sehr kurze Signalimpulse angelegt werden darf. Bei der Auswahl der Sendediode sollte das Einsatzgebiet gut bekannt sein, da die Strahlstärke für große Abstrahlwinkel nicht mit der für kleine Abstrahlwinkel mithalten kann. Im mittleren Winkelbereich kann man nämlich bei Verringerung der Abstrahlcharakteristik um 5° eine Erhöhung der Lichtstärke um etwa 50 % erhalten. Daher sollte man bei der Bauteilwahl den Abstrahlwinkel nicht so groß wie möglich, sondern nur so groß wie nötig wählen. Die Abstimmung des gesendeten Signals mit den Eigenschaften des Empfängers trägt auch maßgeblich dazu bei, Daten über eine größtmögliche Reichweite zu übertragen. Dabei ist auf die maximale Datenrate, die Pulsbreite sowie auch das Tastverhältnis zu achten. Pulslängenverfälschungen, also wenn die zeitlichen Abstände zwischen zwei Pulsfenstern vom definierten Zeitwert abdriften, treten vor allem bei langen Übertragungsdistanzen auf. Dieses Problem kann man umgehen, indem man mit Hilfe definierter Testsignale die Toleranzen erkundet und empfangsseitig in der Software darauf Rücksicht nimmt. Die Eigenschaften des Raums, in dem das Infrarotsignal übertragen werden soll, beeinflussen die Signalqualität sowie auch die mögliche Reichweite enorm. Beispielsweise wird IRS in einem komplett leeren Zimmer, dessen Wände weiß sind und in dem kein Fenster verbaut ist, sehr gut reflektiert und somit kann man bei geringer Sendeleistung jede Position des Raums erreichen. Im Gegensatz dazu benötigt man in einem Wohnzimmer mit vielen Pflanzen, Möbeln und Gegenständen, dunklen Wänden und großen Fensterflächen eine viel höhere Strahlstärke, um den gesamten Raum mit IRS zu fluten.¹⁷

Die Störquellen der Umwelt dürfen auch nicht außer Acht gelassen werden, da der Empfänger jegliche IRS verarbeitet, egal woher sie kommt. Des Weiteren können auch elektrische Geräte die Übertragung stören, wenn diese Signale im selben Frequenzspektrum wie dem der IRS liegen. Es ist bekannt, dass die Sonne

¹⁶ Vgl. Wohlrabe (2002), S. 150 f.

¹⁷ Vgl. Wohlrabe (2002), S. 12, 147 – 151.

nicht nur sichtbare Lichtstrahlung emittiert, sondern auch Ultraviolettstrahlung und IRS. Dass die störende Strahlung einer Glühlampe auf einen Infrarot-Empfänger jedoch 3-mal höher ist als jene der Sonne bei gleich empfundener Helligkeit, ist nicht jedem Techniker bewusst. Auch Gasentladungslampen mit elektronischem Vorschaltgerät, besser bekannt als Energiesparlampen, können bei Lichtmodulation in einem Frequenzbereich zwischen 20 und 40 kHz einen starken Empfindlichkeitsverlust des Empfängers und hohe Störsignalspitzen verursachen. Die heute oft noch eingesetzten Leuchtstofflampen senden im zeitlichen Abstand von 10 bzw. 8,33 ms ebenfalls Störsignale im infraroten Frequenzbereich aus, welche den Nutzsignalen von IRS sehr ähnlich sind und von Empfängern auch oft als solche verarbeitet werden. Dieses zeitliche Raster sollte daher bei der Signalübertragung in Räumen mit Leuchtstofflampen vermieden werden, zusätzlich kann in der Software darauf Rücksicht genommen werden. Störspannungen bei der Spannungsversorgung dürfen vor allem bei der empfängerseitigen Schaltung keinesfalls außer Acht gelassen werden, da diese die Empfindlichkeit des Infrarot-Empfängers reduzieren können. Damit keine durch solche Störungen verursachten Pulse am Ausgang entstehen, wird empfohlen, einen passenden Tiefpass oder eine interne Spannungsregelung in die Schaltung zu integrieren.¹⁸

¹⁸ Vgl. Wohlrabe (2002), S. 57 – 60.

3 EIGNUNGSTESTS

3.1 Ultraschall

3.1.1 Beschreibung

Um herauszufinden, ob sich Ultraschallsensoren für die Distanzbestimmung über die Dämpfung der Signale eignen, wird ein so genannter Transceiver gesucht, welcher sowohl als Sender als auch Empfänger fungieren kann. Die Signalfrequenz, auf die der Sensor abgestimmt werden muss, wird zumindest für die Tests dieser Arbeit mit 40 kHz gewählt, was für Ultraschallübertragungen gängig ist. Die Verstärkerschaltung auf der Senderseite, welche für ein leistungsstarkes Ultraschallsignal sorgt, wird in verschiedenen Varianten getestet, um herauszufinden, womit man einen ausreichend hohen Schalldruck erzeugen kann. Am Empfänger reicht es für kleine Distanzen bis zu einem halben Meter aus, das ankommende Signal mit einem Oszilloskop zu lesen und auszuwerten. Für Abstände von mehreren Metern, welche für diese Untersuchung notwendig sind, benötigt man jedoch auch auf der Empfängerseite eine Signalverstärkung.

3.1.2 Auswahl der Bauteile

Vom Auftraggeber dieser Arbeit, der XAL GmbH, gab es die Empfehlung, die benötigten Bauteile über deren Lieferanten Farnell zu bestellen. Auf dessen Homepage wurden unter der Rubrik Sensoren & Wandler mit den Einschränkungen auf die Transceiver-Funktion, eine Resonanzfrequenz von 40 kHz und einem Schalldruckpegel L_p von mindestens 100 dB die beiden Sensoren 400EP14D und 400PT16P vom Hersteller Prowave ausgewählt. Ersterer kann laut Datenblatt einen maximalen Schalldruckpegel L_p von 103 dB bei einem Strahlwinkel im Fernbereich von 135° und im Nahbereich von 85° erzeugen. Im Empfangsmodus weist er eine Empfindlichkeit von -78 dB (re 1 V/ μ bar) auf. Letzterer schafft zwar einen Schalldruckpegel L_p von 117 dB, aber der Strahlwinkel ist auf 55° beschränkt, doch die Empfangsempfindlichkeit liegt mit -65 dB (re 1 V/ μ bar) etwas höher.

Zur Signalerzeugung bietet es sich an, einen Funktionsgenerator zu verwenden, da man schnell und einfach Signale mit unterschiedlichen Frequenzen, Amplituden und Kurvenformen erzeugen kann. Zur Verfügung steht ein Agilent 33500 mit einer maximalen Frequenz von 30 MHz und zwei Signalausgängen sowie einem Synchronisationsanschluss. Da es für manche Tests praktisch wäre, sich zumindest mit der Sendeschaltung im Raum bewegen zu können, wird ein einfacher und gebräuchlicher Timer-IC gesucht, der als Oszillator arbeitet. Auf Grund der leichten Verfügbarkeit und der massenhaften Verwendung als Signalgenerator in den letzten Jahrzehnten, wird der allseits bekannte NE555 von Texas Instruments gewählt. Zusätzlich zum Timer-IC wird eine weitere Option zur Signalerzeugung getestet, und zwar eine Physical-Computing-Plattform. Im Konkreten wird das Arduino UNO Board zur Verfügung gestellt, welches mit dem Mikrocontroller ATmega328 der Firma Atmel bestückt ist und mit einer kostenlos bereitgestellten Software, der integrierten Entwicklungsumgebung (Integrated Development Environment, IDE) von Arduino, programmiert werden kann. Nachdem man diese so genannte Arduino IDE installiert hat, kann der Code per USB-Kabel auf den Mikrocontroller geladen werden.

Die maximale Steuerspannung der beiden ausgewählten Ultraschallsensoren beträgt laut Datenblatt $20 V_{rms}$. Dies bedeutet, dass der Effektivwert des Signals $20 V$ nicht überschreiten darf, was laut der nachfolgenden Formel einem Spitze-Spitze-Wert bei Sinussignalen von ungefähr $56 V$ und bei Rechtecksignalen von $40 V$ entspricht. Dieser Maximalwert soll ausreichend gut ausgenutzt werden, um leistungstechnisch so viel wie möglich aus dem Sensor herauszuholen.

$$V_{PP} = 2 V_{rms} \sqrt{2} \quad (3.1)$$

V_{rms} Effektivwert der sinusförmigen Spannung
 V_{PP} Spitze-Spitze-Spannung

Bei Internetrecherchen zu Verstärkerschaltungen für Ultraschallsensoren stößt man auf die Idee, einen Treiberbaustein für serielle Schnittstellen zu verwenden. Somit wird auch ein MAX232, welcher als Treiberbaustein für RS232-Schnittstellen bekannt ist, als Verstärker für die zu übertragenden Signale getestet. Der Vorteil bei diesem Pegelwandler-IC ist, dass er laut Datenblatt mit einer Versorgungsspannung von $+5 V$ eine Ausgangsspannung von $\pm 7 V$ schafft. Dabei helfen die externen Kondensatoren, welche für die integrierte Ladungspumpen-Schaltung erforderlich sind. Diese können durch Variation eine Anpassung der Verstärkung, aber auch eine Einschränkung der maximal erzielbaren Schaltfrequenz bewirken.

Für die Ansteuerung von Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET) werden in manchen Fällen Treiberbausteine eingesetzt, um den Schaltvorgang des MOSFETs zu beschleunigen. Mit solchen Treiberbausteinen kann nicht nur eine Erhöhung des Stroms, sondern auch der Spannung erzielt werden. Ausgewählt wird ein Treiberbaustein FAN3227 vom Hersteller ON Semiconductor, bei dem ein Arbeitsbereich bis $+18 V$ möglich ist.

Das verwendete Oszilloskop im Labor der XAL GmbH ist vom Typ KEYSIGHT InfiniiVision MSO-X 4154A und besitzt vier Eingänge. Den Ultraschallsensor zum Empfangen des Signals kann man direkt an die Tastköpfe des Oszilloskops hängen. Zur Stromversorgung wird der DC Power Analyzer N6705B von Agilent eingesetzt. Alternativ ist auch die Verwendung eines kostengünstigen Oszilloskops der Marke Owon vom Typ SmartDS 7102 sowie eines digitalen Labornetzgerätes der Marke PeakTech vom Typ 6035D zur Stromversorgung möglich, womit Spannungen bis $+30 V$ ausgegeben werden können.

Im Falle der Signalübertragung über mehrere Meter wird zur Verstärkung des Empfangssignals ein Instrumentenverstärker benötigt. Die Wahl fällt dabei auf den INA128P von Texas Instruments, welcher eine sehr geringe Offset-Spannung von $50 \mu V$ und eine hohe Gleichtaktunterdrückung von $120 dB$ besitzt. Des Weiteren ist mit dem INA128P eine Verstärkung bis zu einem Faktor von 10.000 möglich.

3.1.3 Tests

Test 1

Der erste Messaufbau besteht aus dem Funktionsgenerator Agilent 33500 zur Signalerzeugung, dem MAX232 zur Signalverstärkung, dem Ultraschallsensor 400PT16P in zweifacher Ausführung sowie einem Netzteil DC Power Analyzer N6705B.

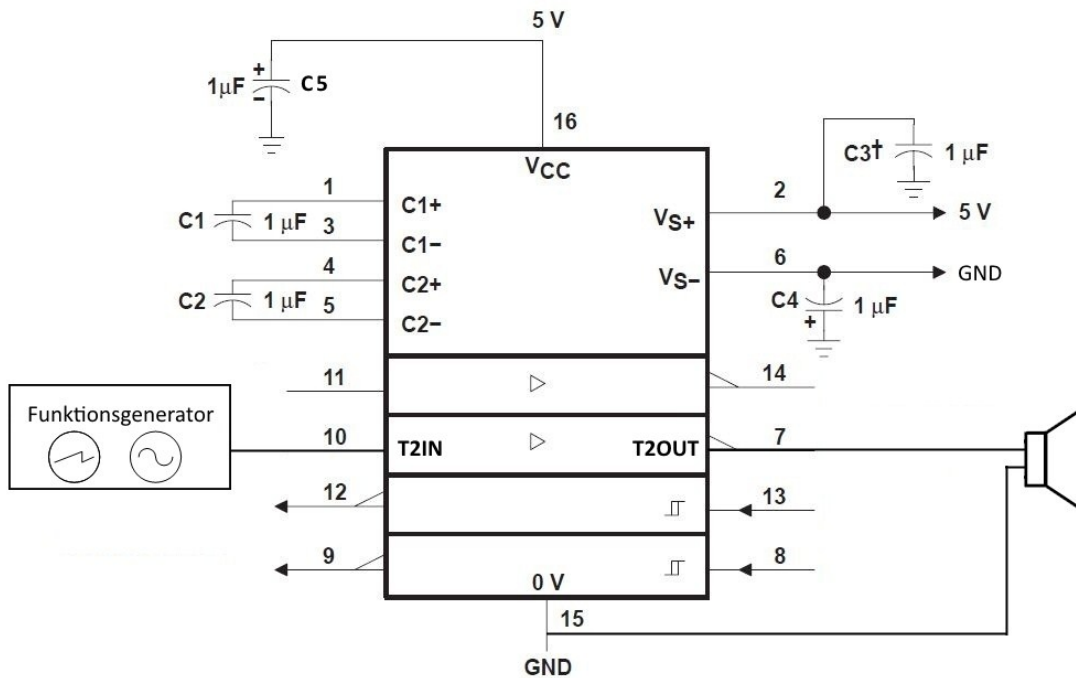


Abb. 15: MAX232-Standardbeschaltung, Quelle: Texas Instruments Incorporated, Online-Quelle [27.09.2017] (leicht modifiziert).

Aus dem Datenblatt des MAX232 wird die Standardbeschaltung, wie in Abb. 15 ersichtlich, entnommen und aufgebaut. Beim Funktionsgenerator wird zu Testzwecken ein 10 kHz Sinussignal angelegt, da diese Frequenz für das menschliche Ohr hörbar ist. Bei der Amplitude wird eine Spitze-Spitze-Spannung von 5 V konfiguriert. Auf der nachfolgenden Abbildung ist am Oszilloskop erkennbar, dass der Treiberbaustein das sinusförmige in ein rechteck-ähnliches Signal umwandelt. Dies resultiert daraus, dass der MAX232 dafür vorgesehen ist, digitale Rechteck-Signale zu verstärken und zu glätten.

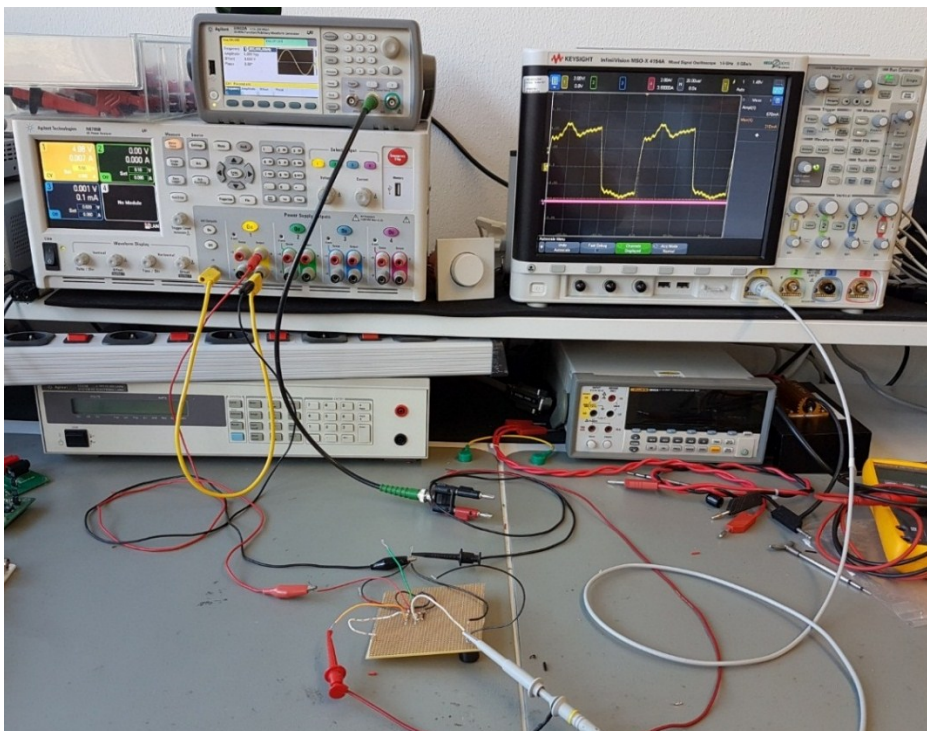


Abb. 16: Messaufbau mit MAX232, Quelle: Eigene Darstellung.

In einem Abstand von zirka 13 cm wird der Empfänger mit einer Halterung auf gleicher Höhe platziert und an das Oszilloskop angeschlossen.

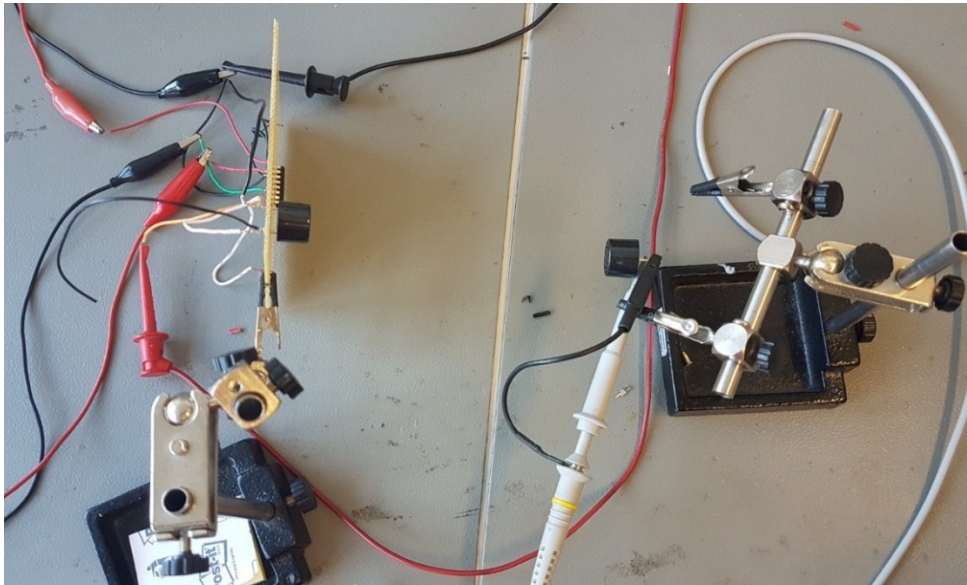


Abb. 17: Aufbau von zwei zueinanderstehenden Ultraschallsensoren vom Typ 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.

Es kommt ein niedriges, aber messbares Signal am zweiten Ultraschallsensor an. Ein interessanter Punkt dabei ist, dass der Sender mit einem hörbaren Signal von 10 kHz angeregt wird und der Empfänger ein 40 kHz Signal ausgibt, welches seiner Resonanzfrequenz entspricht. Dieses sinusförmige Signal mit einer V_{PP} von 200 mV ist auf der folgenden Abbildung zu sehen, welche vom Oszilloskop aufgenommen wurde.

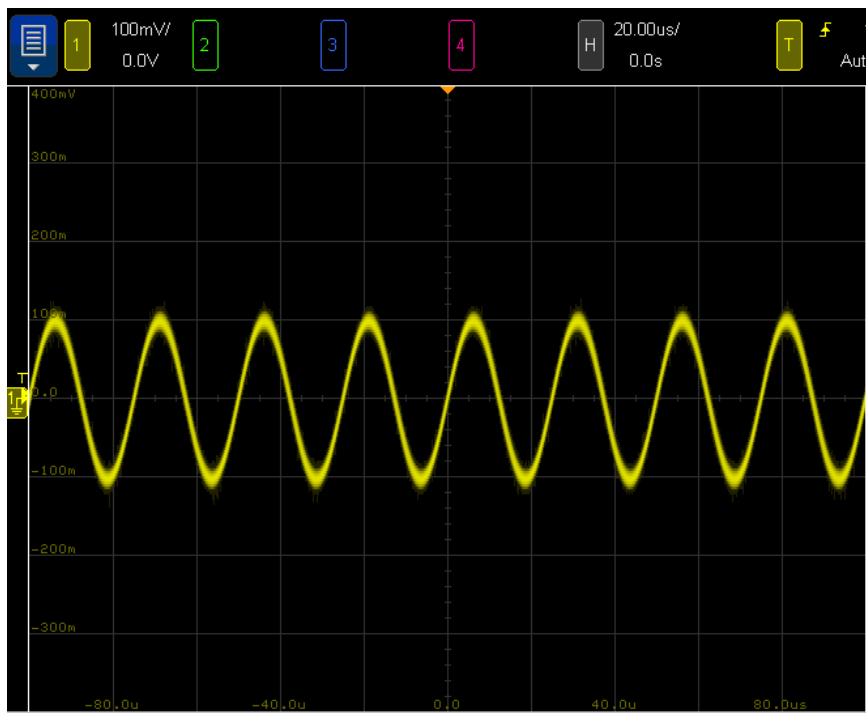


Abb. 18: Empfangssignal der Übertragung zweier Ultraschallsensoren vom Typ 400PT16P mit hörbarem 10 kHz Sendesignal, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei gleichbleibender Amplitude des Eingangssignals am MAX232 wird nun die Frequenz von 10 kHz auf 40 kHz geändert, was eine erhebliche Auswirkung auf die Signalstärke hat, wie auf Abb. 19 im Vergleich

zu Abb. 18 deutlich zu sehen ist. Durch Abstimmung der Sendefrequenz mit der laut Datenblatt vorgegebenen Resonanzfrequenz der Ultraschallsensoren verdreifacht sich die Amplitude des Empfangssignals.



Abb. 19: Empfangssignal der Übertragung zweier Ultraschallsensoren vom Typ 400PT16P mit 40 kHz Sendesignal, Quelle: Eigene Darstellung.

Test 2

Da bei einem Software-Modul, mit Hilfe dessen das Ultraschallsignal gesendet und empfangen werden soll, hauptsächlich mit digitalen Signalen gearbeitet wird, soll nun beim Frequenzgenerator ein Rechteck-Signal statt eines Sinus-Signals erzeugt werden. Um ein möglichst schönes, gleichmäßiges Signal mit einer Amplitude von + 5 V zu erhalten, sollen die konfigurierten Parameter mit dem Oszilloskop kontrolliert werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt die notwendigen Einstellungen, um das Signal laut Abb. 21 zu erzeugen.

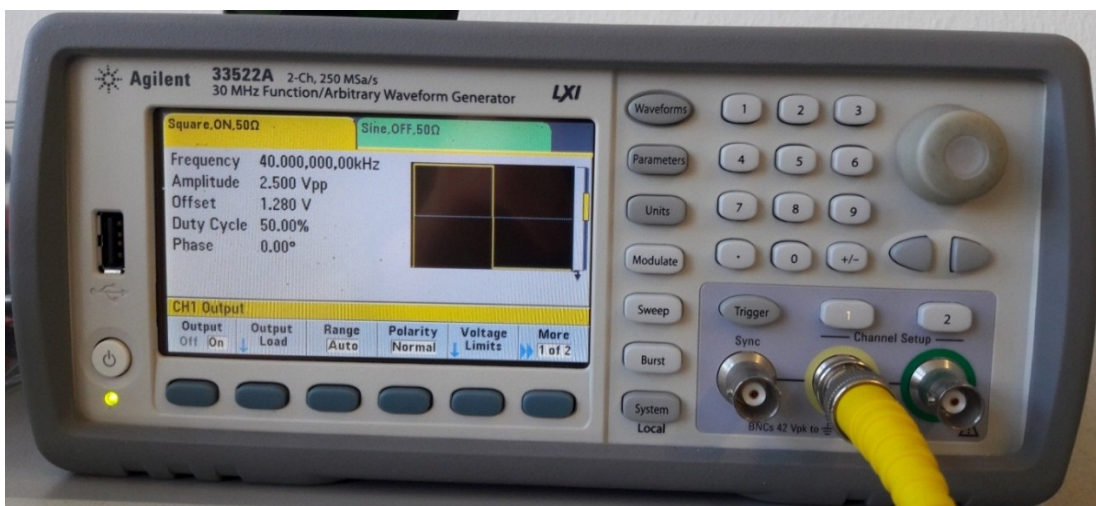


Abb. 20: Einstellungen am Funktionsgenerator für ein rechteckiges 40 kHz Signal, Quelle: Eigene Darstellung.

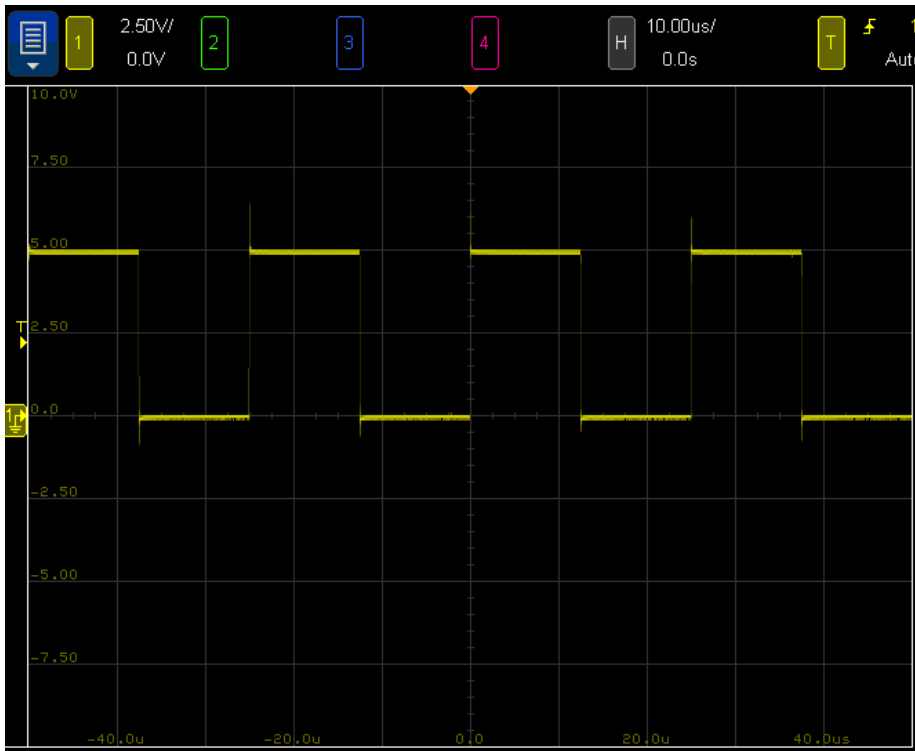


Abb. 21: 40 kHz Rechteck-Signal vom Funktionsgenerator, Quelle: Eigene Darstellung.

Um die Zuverlässigkeit eines stabilen und gleichmäßigen Signals zu erlangen, werden die unterschiedlichen, unter 3.1.2 beschriebenen Möglichkeiten zur Erzeugung eines 40 kHz Signals verglichen. Beim Timer-IC NE555 gilt es, zuerst eine passende Schaltung zu finden sowie die Werte der benötigten Bauteile zu berechnen, um die gewünschte Signalfrequenz am Ausgang zu erhalten. Die nachfolgende Schaltung wird auf der Homepage von elektronik-kompndium.de unter der Beschreibung „NE555 als astabile Kippstufe / astabiler Multivibrator“ vorgeschlagen. Dort findet man auch Formeln zur Berechnung der Widerstands- und Kondensatorwerte.

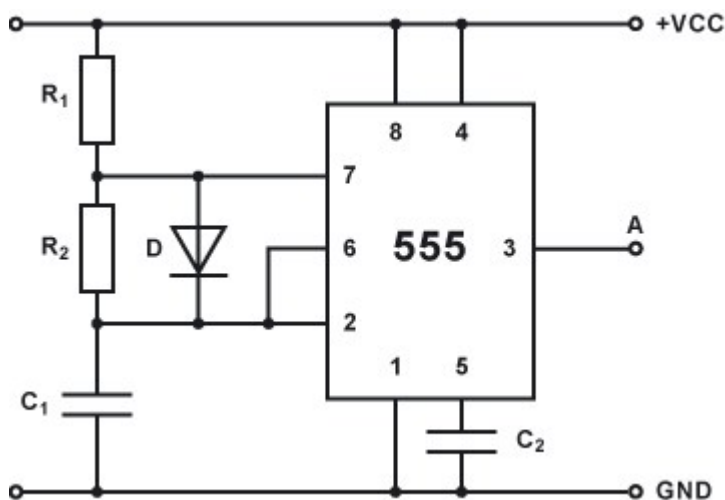


Abb. 22: Beschaltung vom NE555 für 40 kHz Signal, Quelle: Elektronik-Kompndium.de, Online-Quelle [17.11.2017].

Da ein Signal mit einem 1:1 Verhältnis zwischen Impulsdauer und Impulspause benötigt wird, empfiehlt es sich, die Schaltung und somit auch die dazugehörigen Formeln mit Diode zu wählen. Dafür wird eine Halbleiter-Diode vom Typ 1N4148 eingesetzt. Die Periodendauer berechnet sich durch die gewünschte

Frequenz von 40 kHz, für den Kondensator C_2 wird unabhängig davon eine Größe von 10 nF empfohlen. Als Ausgang für die Festlegung der weiteren Werte wird der Kondensator C_1 mit einer Kapazität von 2,2 nF auf Grund der Verfügbarkeit im Labor der Firma XAL GmbH gewählt. Dadurch ergeben sich aus den nachfolgenden Formeln die Widerstandswerte für R_1 und R_2 .

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40000} = 25 \mu\text{s} \quad (3.2)$$

$$t_i = t_p = \frac{T}{2} = \frac{25 \mu\text{s}}{2} = 12,5 \mu\text{s} \quad (3.3)$$

t_i/s Impulsdauer
 t_p/s Impulspause

$$R_1 = \frac{t_i}{0,69 C_1} = \frac{12,5 \mu\text{s}}{0,69 \cdot 2,2 \text{ nF}} = 8234,5 \Omega \quad (3.4)$$

$$R_2 = \frac{t_p}{0,69 C_1} = \frac{12,5 \mu\text{s}}{0,69 \cdot 2,2 \text{ nF}} = 8234,5 \Omega \quad (3.5)$$

Da es den berechneten Widerstandswert so nicht zu kaufen gibt, wird der naheliegende Wert 8200 Ω gewählt, wodurch sich eine auf Grund der Bauteiltoleranzen vernachlässigbare Änderung von t_i und t_p auf 12,45 μs ergibt. Versorgt wird die Schaltung mit 5 V Gleichspannung, am Oszilloskop wird das Ausgangssignal gemessen. Wie in Abb. 23 ersichtlich, erzeugt der NE555 mit der vorhin beschriebenen Beschaltung ein Rechteck-Signal mit einer Periodendauer von 30 μs , was einer Frequenz von 33,33 kHz entspricht. Durch Variation der Widerstandswerte ist somit eine Annäherung von t_i und t_p an 12,5 μs notwendig.

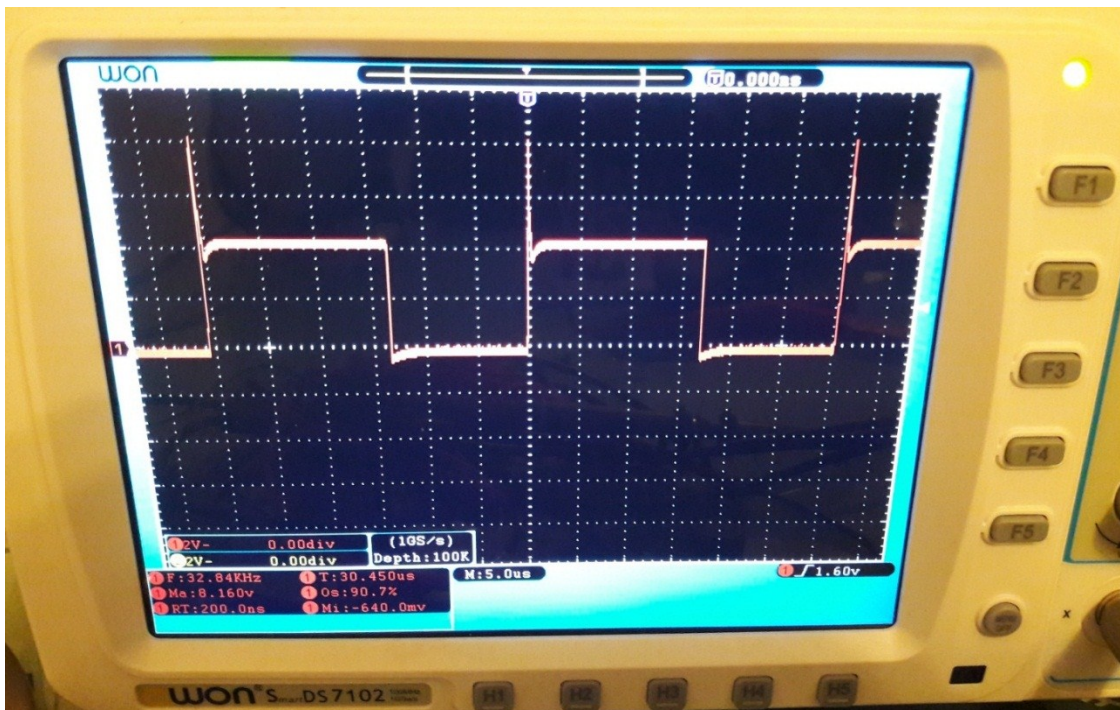
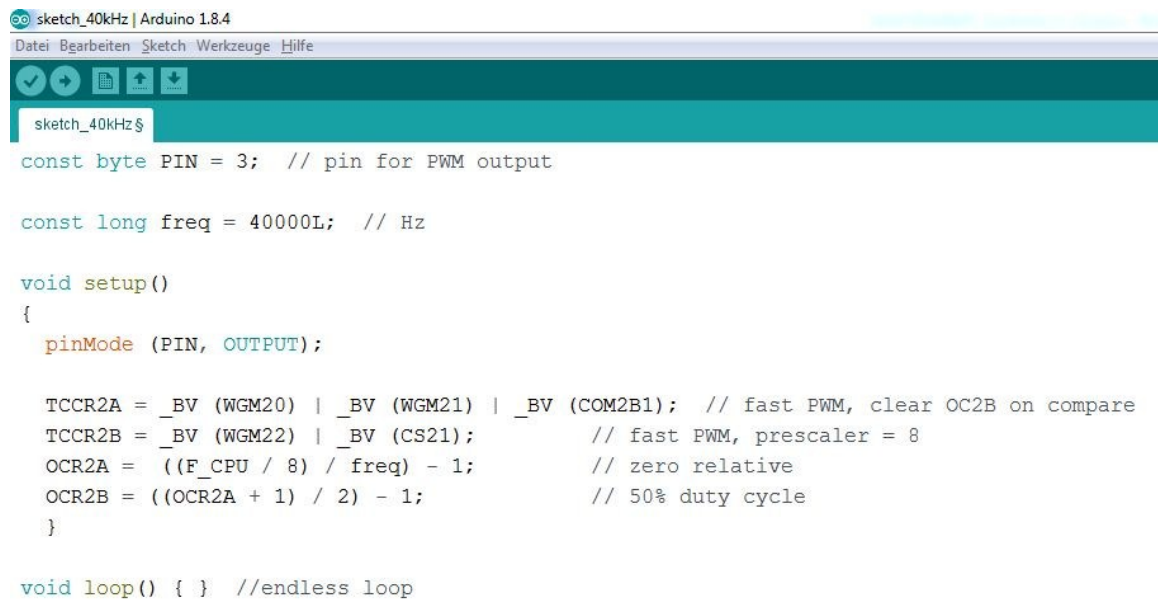


Abb. 23: Ausgangssignal NE555 mit berechneten Bauteilwerten, Quelle: Eigene Darstellung.

R_1 und R_2 werden daher mit Hilfe eines Trimpotentiometers variiert, um ein gleichmäßiges und stabiles 40 kHz Signal zu generieren. Das Endresultat liegt bei einem Widerstandwert des R_1 von 7,2 k Ω und des

R_2 von 8,2 k Ω . Da eine Änderung der Signalfrequenz nur durch Anpassung und Neuberechnung der Widerstandswerte möglich ist, wird die NE555-Schaltung nicht für die weiteren Tests herangezogen.

Eine einfache Möglichkeit, ein Rechteck-Signal zu erzeugen, ergibt sich durch die Verwendung des Arduino UNO Boards. In unzähligen Foren werden Programmcodes für solche Einsätze ausgetauscht, wobei man auch einige zur Erzeugung eines 40 kHz mittels Pulsweitenmodulation (PWM) findet. Mit einem dieser Codebeispiele wird der ATmega328 programmiert und getestet. Im nachfolgenden Screenshot sind die wenigen Zeilen Code aufgezeigt, welche für die Erzeugung eines 40 kHz Signals notwendig sind.



```
sketch_40kHz | Arduino 1.8.4
Datei Bearbeiten Sketch Werkzeuge Hilfe
sketch_40kHz$
const byte PIN = 3; // pin for PWM output

const long freq = 40000L; // Hz

void setup()
{
  pinMode (PIN, OUTPUT);

  TCCR2A = _BV (WGM20) | _BV (WGM21) | _BV (COM2B1); // fast PWM, clear OC2B on compare
  TCCR2B = _BV (WGM22) | _BV (CS21); // fast PWM, prescaler = 8
  OCR2A = ((F_CPU / 8) / freq) - 1; // zero relative
  OCR2B = ((OCR2A + 1) / 2) - 1; // 50% duty cycle
}

void loop() { } //endless loop
```

Abb. 24: Code-Zeilen zur Erzeugung eines 40 kHz Signals mit dem Arduino UNO, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Verifikation des Signals wird eine Messung mit dem Oszilloskop zwischen Pin 3 und Pin GND des Arduino UNO Boards, wie in Abb. 25 ersichtlich, durchgeführt. Die Abb. 26 zeigt das via Oszilloskop gemessene Ausgangssignal mit einer V_{PP} von 5 V und einer exakten Periodendauer von 25 μ s.

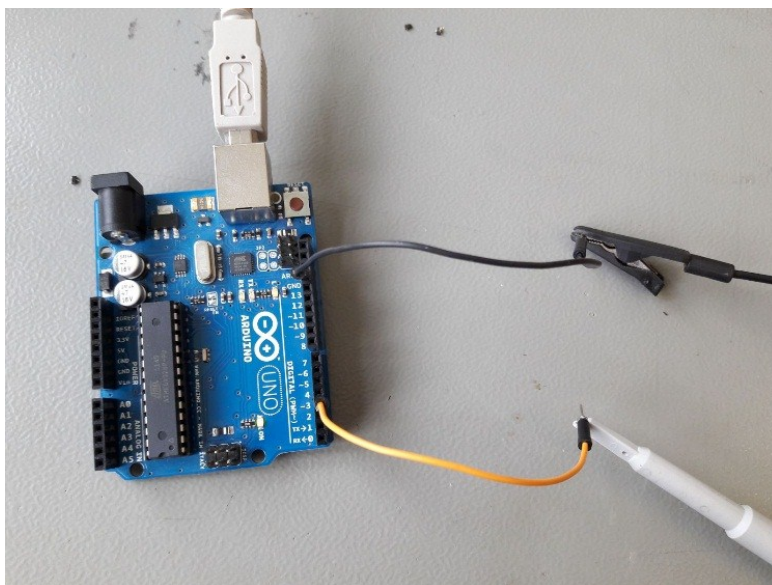


Abb. 25: Messung des Ausgangssignals vom Pin 3 am Arduino UNO Board, Quelle: Eigene Darstellung.

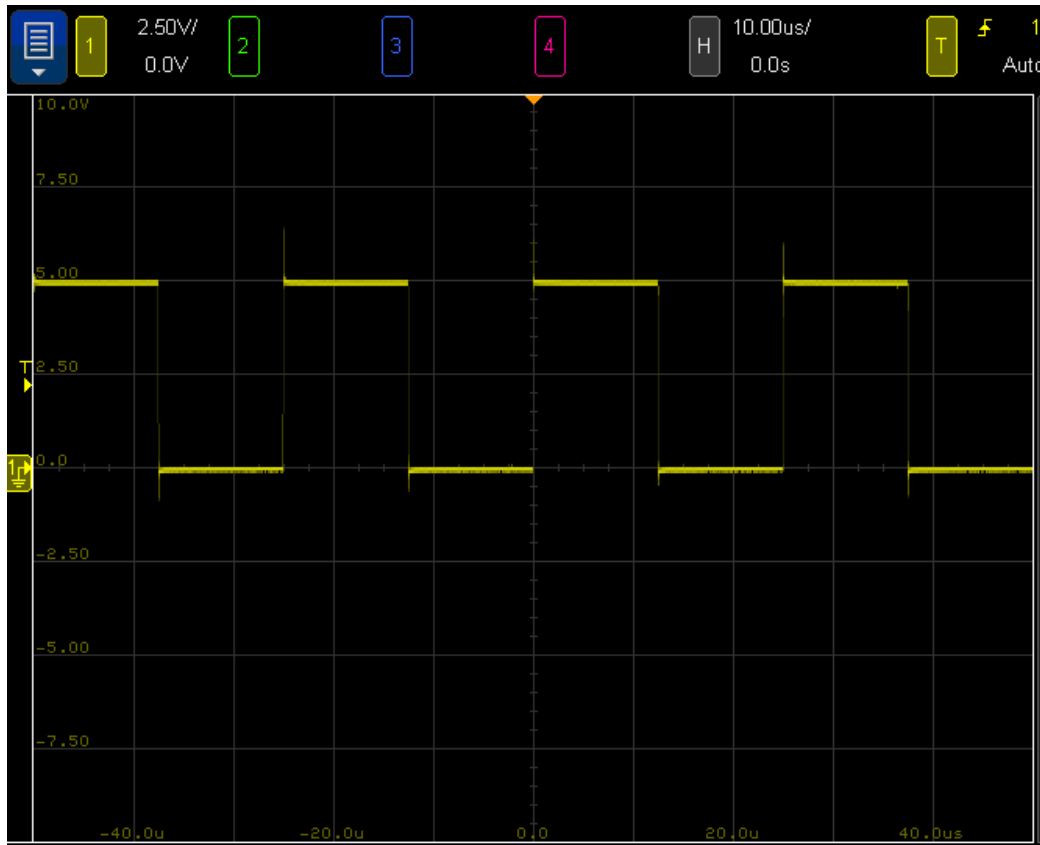


Abb. 26: Ausgabesignal vom Pin 3 am Arduino UNO Board, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf Grund der Signalqualität, der Flexibilität bei der Signalerzeugung und der einfachen Erweiterbarkeit über zusätzlich programmierbare Pins wird für die nachfolgenden Tests das Arduino UNO Board eingesetzt.

Test 3

Die Schaltung von Test 1, welche in Abb. 15 ersichtlich ist, wird nun mit dem Arduino Board statt dem Funktionsgenerator als Signalgeber getestet. In diversen Internet-Foren findet man den zusätzlichen Hinweis, die Kondensatoren C1, C2, C3 und C4 für die Ladungspumpen-Schaltung von 1 μF auf 10 μF zu erhöhen, um ein höheres Ausgangssignal zu erhalten. Damit die beiden Varianten einfach vergleichbar sind, werden sie auf einer Steckplatine aufgebaut, wie in Abb. 27 zu sehen ist.

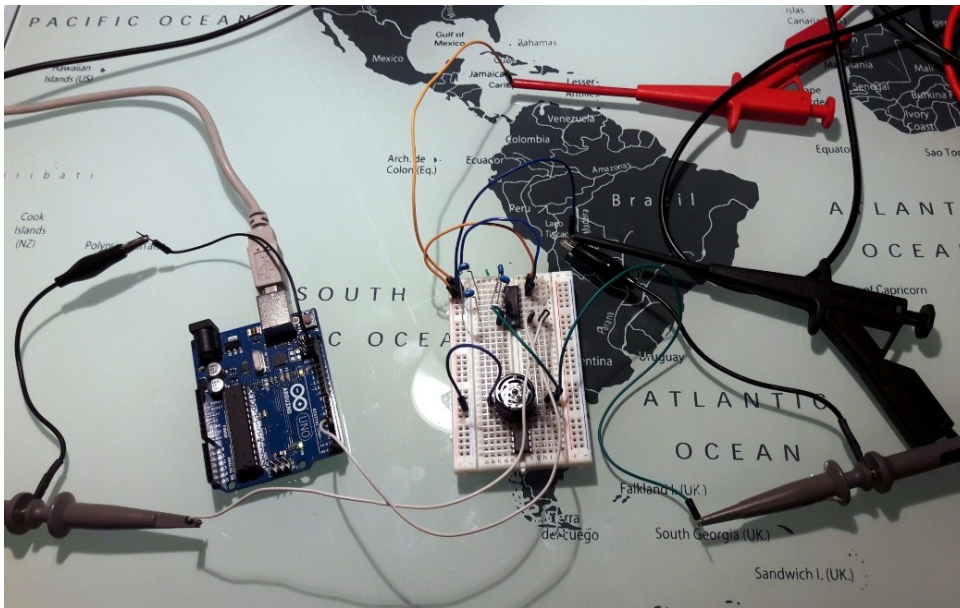


Abb. 27: Messaufbau mit MAX232 und Arduino UNO, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ausgangssignal dieser Schaltung, mit dem der Ultraschallsensor 400PT16P angeregt wird, ist nun laut Funktionsbeschreibung des MAX232 symmetrisch verdoppelt im Vergleich zum Rechteck-Signal vom Arduino Board. Somit ergibt sich eine V_{PP} von zirka 10 V, wie in nachfolgender Abbildung zu erkennen ist.

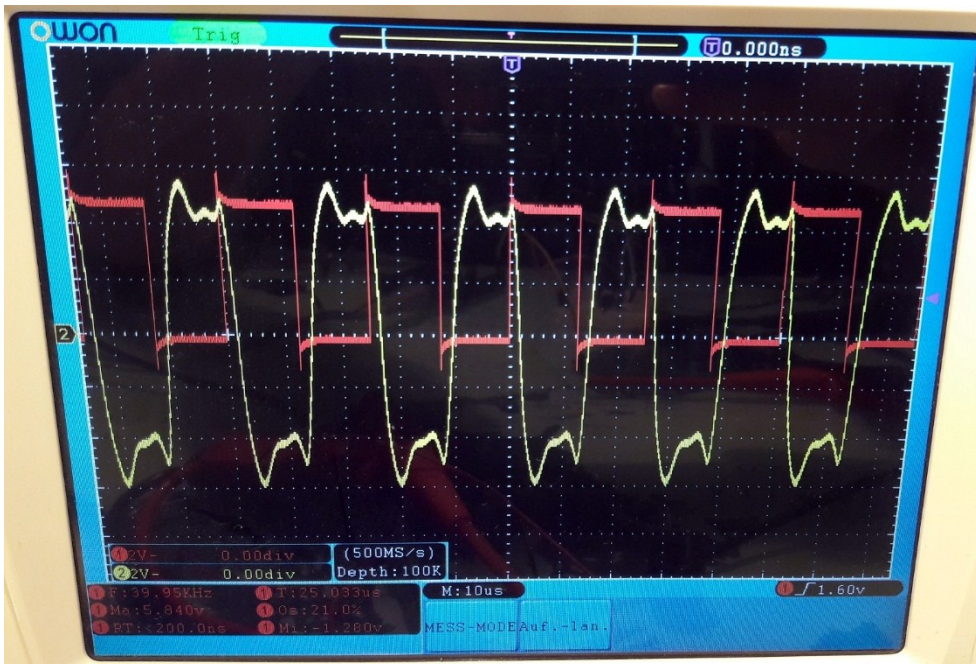


Abb. 28: Ausgangssignal am 400PT16P mit Arduino als Signalgeber und MAX232 zur Verstärkung (+ 5 V), Quelle: Eigene Darstellung.

Nach dem Austausch der vier Kondensatoren C1 bis C4 durch vier andere mit einer Kapazität von 10 μF , hat sich beim Ausgangssignal nichts geändert und es ergibt sich eine nahezu idente Abbildung wie bei der Verwendung der 1 μF Kondensatoren. Somit führt der eingangs erwähnte Foren-Tipp zu keiner Erhöhung der Ausgangsspannung.

An den Eingängen V_{s+} und V_{s-} kann man auch eine eigene symmetrische Spannungsversorgung anschließen, um das Ausgangssignal zu erhöhen. Laut Datenblatt des MAX232 ist der absolute

Maximalwert dafür + 15 V bzw. - 15 V, welche aber im Zuge des Tests nicht vollkommen ausgereizt werden. Gewählt wird eine symmetrische Spannungsversorgung von ± 12 V, wie in Abb. 29 zu sehen ist.

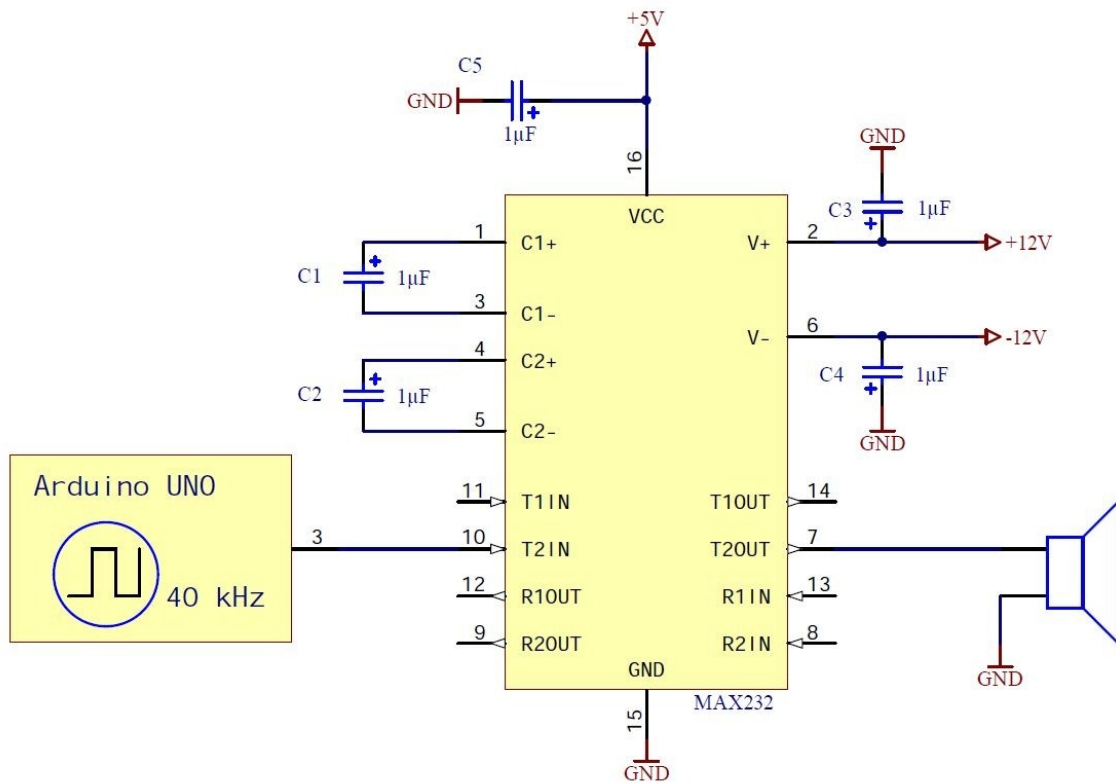


Abb. 29: MAX232 Beschaltung mit Arduino Board und Ultraschallsensor, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ausgangssignal erreicht mit der zusätzlichen Spannungsversorgung um die ± 6 V, wie in der nachfolgende Abbildung zu sehen ist. Dies entspricht einer Erhöhung der V_{PP} um 2 V und somit nicht dem erwarteten Ergebnis von ± 10 V. Aus diesem Grund ist der MAX232 nicht für diese Anwendung geeignet und wird für die folgenden Tests nicht mehr verwendet.

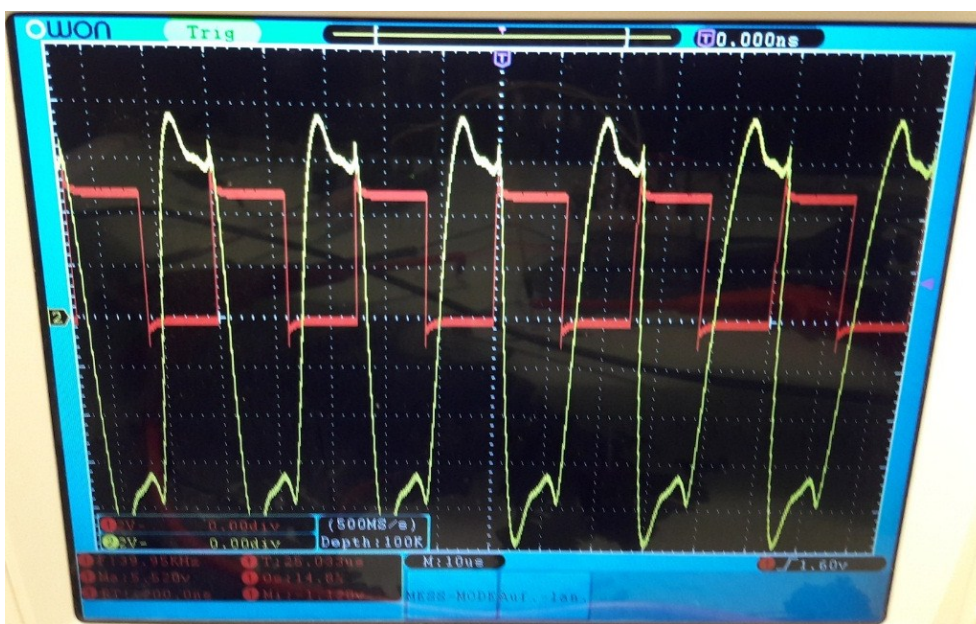


Abb. 30: Ausgangssignal am 400PT16P mit Arduino als Signalgeber und MAX232 zur Verstärkung (± 12 V), Quelle: Eigene Darstellung.

Test 4

Um das 40 kHz Signal vom Arduino UNO mit einem FAN3227 zu verstärken, muss das Signal nur an einem der zwei Eingänge des Gate Drivers angeschlossen, der Baustein mit positiver Spannung versorgt und der Ultraschallsensor am dazu passenden Ausgang angehängt werden. Getestet wird anfangs mit einer Spannungsversorgung von + 5 V, welche langsam auf + 12 V erhöht wird. Im Zuge dessen kommt es zu einer Zerstörung des Treiberbausteins, da weder das Ausgangssignal mit einem Widerstand strombegrenzt, noch zwischen den Versorgungsleitungen ein Stützkondensator eingebaut wurde. Nachdem dies mit einem 10 μF Elektrolyt-Kondensator (ELKO) und einem 47 Ω Metallfilm-Widerstand, seriell zum Ultraschallsensor, nachgeholt wird, kann die Spannungsversorgung problemlos auf + 18 V erhöht werden. Die Abb. 30 zeigt den modifizierten Schaltplan dazu, welcher mit dem Programm Altium Designer gezeichnet wurde.

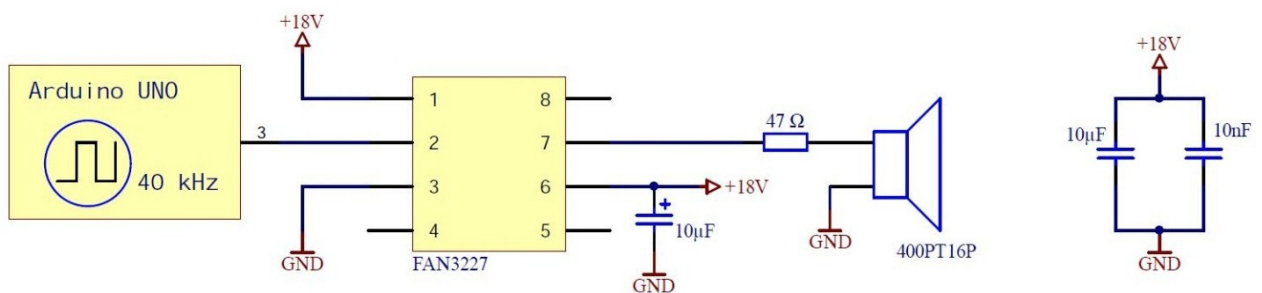


Abb. 31: Schaltplan mit Arduino als Signalgeber, FAN2337 zur Verstärkung und dem Ultraschallsensor 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.

Da der ELKO nahe am FAN3227 platziert ist und ein Anschluss des Ultraschallsensors direkt an Masse liegt, werden mit einem weiteren 10 μF und einem 10 nF Kondensator nahe den Anschlüssen der Versorgung Spannungsspitzen verhindert. Den Aufbau dazu zeigt die nachfolgende Abbildung.

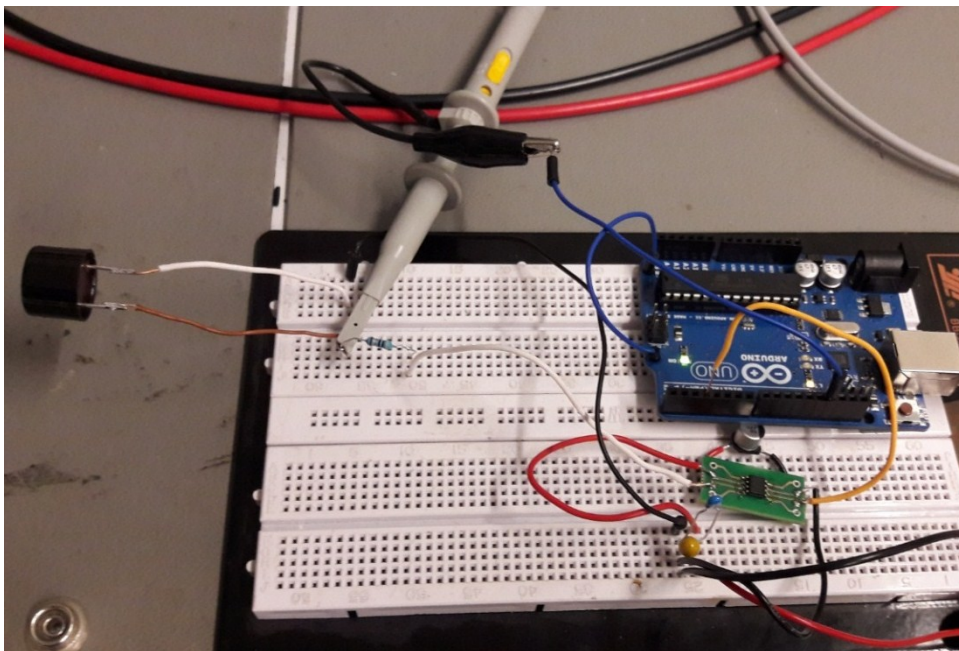


Abb. 32: Messaufbau mit Arduino als Signalgeber, FAN2337 zur Verstärkung und dem Ultraschallsensor 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.

Das damit erzeugte Signal, mit dem der Ultraschallsensor angeregt wird, hat eine V_{PP} von fast + 18 V und entspricht somit der Versorgungsspannung. Daraus folgt, dass mit der Betriebsspannung des FAN3227 das Ausgangssignal 1:1 angepasst werden kann. Dies kann für unterschiedliche Einsatzgebiete sehr nützlich sein. Das Signal am 400PT16P wird in der Abb. 33 gezeigt und in Folge als Ausgang für Übertragungstests verwendet.

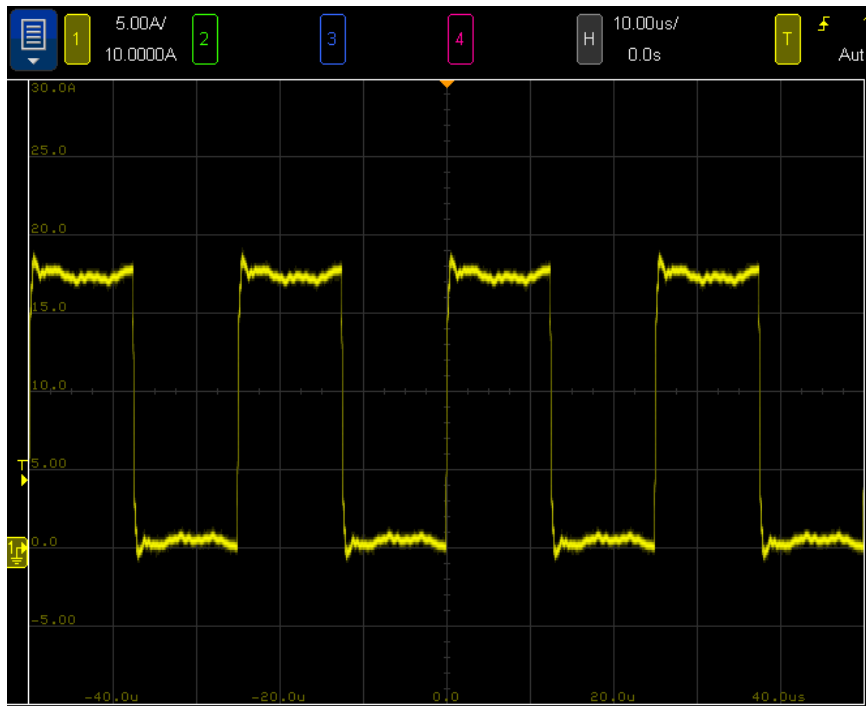


Abb. 33: Ausgangssignal am 400PT16P mit Arduino als Signalgeber und FAN3227 zur Verstärkung, Quelle: Eigene Darstellung.

Test 5

Mit der Schaltung zum Senden des Ultraschallsignals von Test 4 wird nun die Übertragung über unterschiedlichen Distanzen mit den beiden bestellten Ultraschallsensoren getestet. Dazu wird auf Empfangsseite ein Instrumentenverstärker eingesetzt, um auch sehr kleine Signale messen und vergleichen zu können. Der ausgewählte INA128P von Texas Instruments verträgt eine maximale Versorgungsspannung von ± 18 V, mit welcher er auch betrieben wird. Der Faktor für die Verstärkung kann laut Datenblatt mit einem einzigen Widerstand gesetzt und laut der nachfolgenden Formel berechnet werden.

$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (3.6) \quad G \quad \text{Verstärkungsfaktor}$$

Gestartet wird mit dem Sensor 400PT16P, wie in Abb. 34 gezeigt. Laut Datenblatt des Instrumentenverstärkers ist eine Ausgangsspannung zumindest bis 1,4 V unter der Versorgungsspannung bei einem Lastwiderstand von 10 k Ω möglich, dies bedeutet somit einen Bereich von $\pm 16,6$ V. Als Referenz für die Berechnung wird ein am 400PT16P empfangenes Signal nach einer Distanz von 0,5 m vom Sender genommen, da dies die geringste Distanz für den nachfolgenden Test 6 ist. Die mit dem Oszilloskop gemessene Amplitude beträgt dabei ± 110 mV. Die maximale Verstärkung, um das Ausgangssignal im Bereich von $\pm 16,6$ V zu begrenzen, ergibt sich durch die Division der beiden Werte. Das Ergebnis ist eine Verstärkung von rund 151, welche in die Formel 3.6 eingesetzt wird, um den Widerstand R_G zu berechnen.

Dabei ergibt sich ein Wert von 333 Ω . Da es bei den Übertragungen stets Schwankungen der Amplituden gibt und es unbedingt verhindert werden muss, dass die Ausgangsspannung in die Sättigung fällt, wird der nächst größere Drahtwiderstand der verfügbaren Widerstandsreihe gewählt, nämlich 470 Ω . Die daraus resultierende Verstärkung, berechnet mit Hilfe der Formel 3.6, besitzt einen Faktor von rund 107.

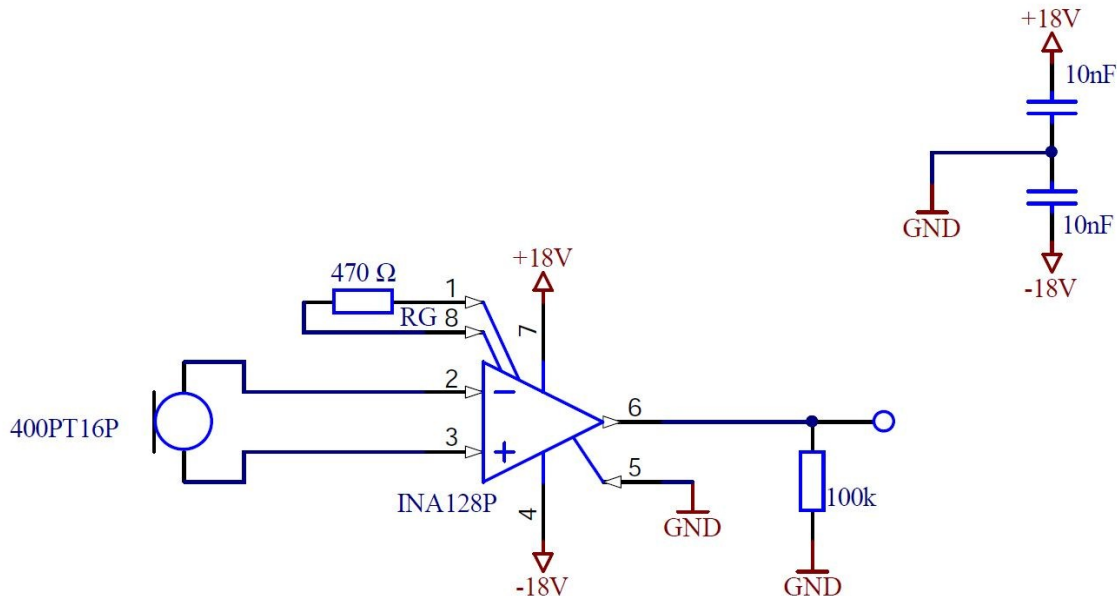


Abb. 34: Schaltplan der empfängerseitigen Ultraschall-Verstärkung mit INA128P, Quelle: Eigene Darstellung.

Gemessen wird das empfangene und verstärkte Signal in den Abständen 1 m, 2 m und 3 m. Danach werden dieselben Messungen mit dem Ultraschall-Transceiver 400EP14 durchgeführt, die Werte am Oszilloskop abgelesen und wie folgt dokumentiert:

Distanz / m	400PT16P	400EP14
	Amplitude/V	Amplitude/V
1	12,3	0,8
2	6,4	0,3
3	3,9	0,0

Tabelle 2: Messungen mit 400PT16P und 400EP14 in den Abständen 1 m, 2 m und 3m, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse zeigen klar, dass der Sensor vom Typ 400PT16P deutlich bessere Übertragungseigenschaften mit sich bringt. Aus diesem Grund werden alle nachfolgenden Tests mit diesem Sensor durchgeführt. Unter Einbeziehung der Datenblätter der Sensoren kann der Rückschluss gezogen werden, dass das Ergebnis auf Grund des um 15 dB höheren Schalldruckpegels vom 400PT16P zustande kommt. Die Empfindlichkeit beim Empfangen der Signale ist zwar beim 400EP14 um 13 dB besser, was sich bei einem Übertragungstest mit dem Sender vom Typ 400PT16P und dem Empfänger vom Typ 400EP14 auch bewiesen hat, jedoch wirkt sich die niedrigere Sendeleistung anscheinend stärker aus.

Test 6

Nun gilt es, eine Reihe von Messungen durchzuführen, mit deren Hilfe man feststellen kann, ob die Distanzmessung bei Ultraschallsignalen in Bezug auf die Signalpegeländerung möglich ist. Dieser Test

wird mit dem zuvor festgelegten Sensortyp, dem 400PT16P, ausgeführt. Das Rechteck-Signal wird mit dem Arduino UNO erzeugt und mit dem FAN3227 verstärkt. Auf Empfängerseite verstärkt der Instrumentenverstärker INA128P das Signal um den Faktor 107. Die Messungen werden in halben Meterschritten aufgezeichnet, zum einen bei geradliniger Zuordnung, zum anderen bei einer Verschiebung des Senders um 22,5° sowie um 45° in Bezug auf den Empfänger. Die nachfolgende Tabelle beinhaltet die gemessenen 20 Spitze-Spitze-Werte.

Distanz/m	Amplitude bei 0°/V	Amplitude bei 22,5°/V	Amplitude bei 45°/V
0,5	28,89	14,02	4,58
1,0	12,37	7,25	2,29
1,5	8,84	5,40	1,64
2,0	6,41	3,50	1,09
2,5	4,91	2,35	0,79
3,0	3,86	1,85	0,57
3,5	2,98	1,53	0,45
4,0	2,65	1,44	0,25
4,5	1,74	1,28	0,05
5,0	1,70	0,88	0,05
5,5	1,50	0,69	0,02
6,0	1,05	0,38	0,02
6,5	1,04	0,65	0,00
7,0	0,87	0,35	0,00
7,5	0,35	0,47	0,00
8,0	0,30	0,09	0,00
8,5	0,66	0,04	0,00
9,0	0,46	0,04	0,00
9,5	0,26	0,07	0,00
10,0	0,44	0,02	0,00

Tabelle 3: Messungen der Signalübertragung des 400PT16P bei 0°, 22,5° und 45° Verschiebung, Quelle: Eigene Darstellung.

3.1.4 Resultate

Die in Tabelle 3 erfassten Messdaten werden nun in ein Korrelationsdiagramm eingetragen, um den Bezug zwischen Distanz und Signalpegel grafisch darzustellen. Dieses Diagramm wurde mit Hilfe des Tabellenverarbeitungsprogramms Microsoft Excel erstellt, wobei die x-Achse die Distanzwerte von 0,5 m bis 10 m und die y-Achse die gemessenen Amplitudenwerte widerspiegelt.

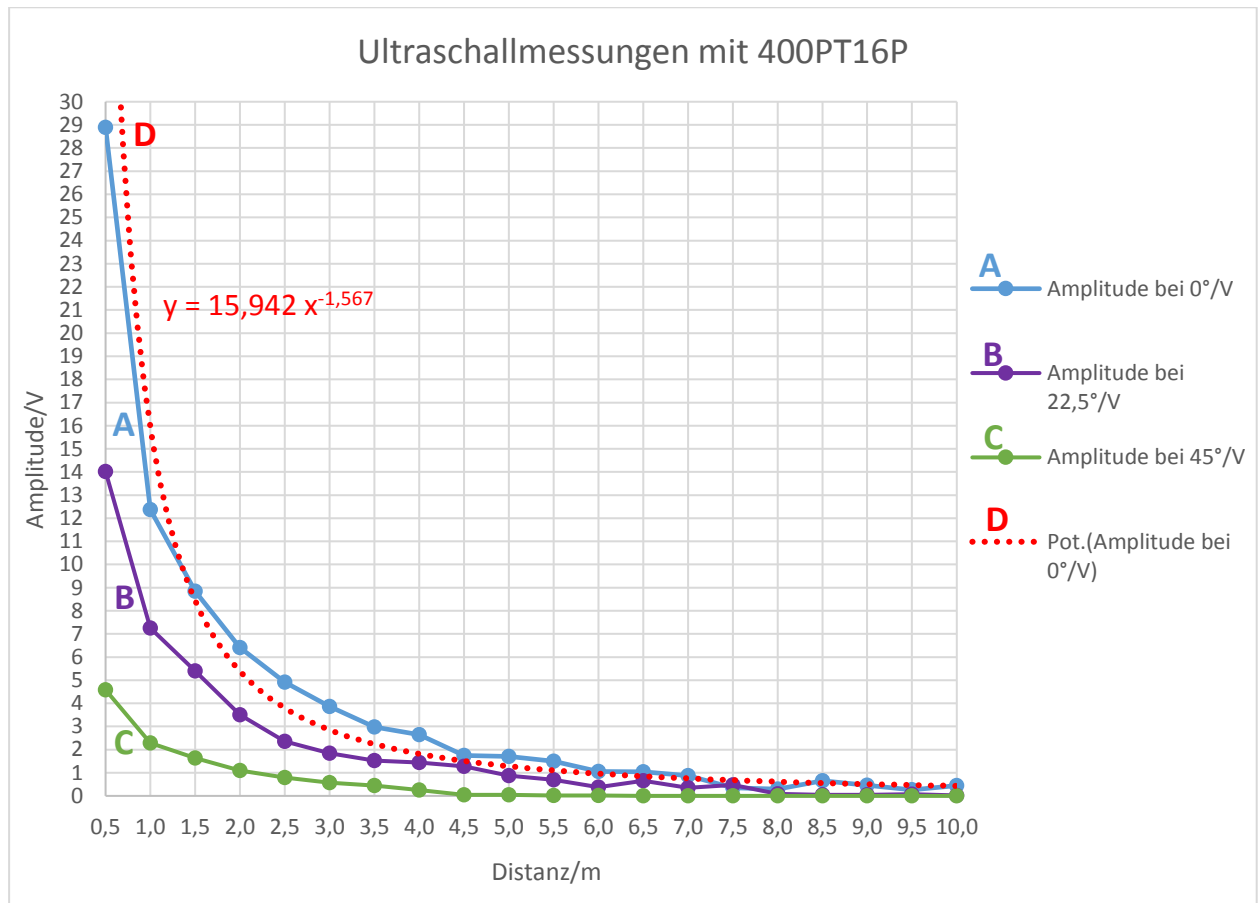


Abb. 35: Diagramm der Ultraschallmessungen mit 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Kurve A zeigt den Verlauf der Messwerte bei einer geradlinigen Zuordnung der beiden Ultraschallsensoren. Die V_{PP} nimmt nach einem halben Meter bereits um mehr als die Hälfte ab in Bezug auf den Startwert bei 0,5 m. Nach 1,5 m beträgt die Amplitude nicht einmal mehr ein Drittel des Startwerts. Das verwendete Tabellenverarbeitungsprogramm ermöglicht es, mit den Messwerten eine dazu passende Potenzfunktion mit negativem Exponenten automatisch berechnen zu lassen und die jeweilige Kurve im Diagramm anzuzeigen, welche in Abb. 35 mit der Beschriftung D und inklusive Formel zu finden ist. Diese gilt als Normkurve für die Distanzbestimmung mit dem hierfür gewählten Schaltungsaufbau. Mit deren Hilfe können die Abweichungen und Unregelmäßigkeiten der Amplitudenwerte aufgezeigt und analysiert werden, wie es im Kapitel 4 ersichtlich ist.

Die Werte der Messungen bei einer Abweichung zwischen Sender und Empfänger um 22,5° sind in Abb. 35 unter der Kurve B zu finden und unterscheiden sich bereits deutlich zur Kurve A. Daraus kann bereits der grobe Rückschluss gezogen werden, dass über die Pegeländerung von Ultraschallsignalen auf Grund von Dämpfung keine zuverlässigen Distanzen bestimmt werden können, wenn sich die Ausrichtung von Sender und Empfänger unbestimmt ändert bzw. variiert.

Bei der Kurve C handelt es sich um die gemessenen Spannungswerte bei einem Sichtwinkel zwischen den beiden Ultraschallsensoren von 45°. Da der verwendete Transceiver 400PT16P laut Datenblatt einen Abstrahlwinkel von 55° besitzt, was einer Ablenkung von 27,5° pro Richtung bedeutet, ist die Differenz der Messwerte zur Kurve A dementsprechend groß. Dennoch geben diese Daten eine wichtige Auskunft darüber, unter welchem Winkel und bis zu welcher Distanz noch Signale ankommen.

3.2 Infrarot

3.2.1 Beschreibung

Zur Überprüfung der Eignung von Infrarot-Datenübertragung zur Distanzmessung über die Signaldämpfung wird ein Schaltaufbau zur Übertragung und einer zum Empfangen der Signale benötigt. Für die Senderseite muss zuallererst eine passende Infrarot-LED ausgewählt werden. Zu Testzwecken wird ein pulswidenmoduliertes Signal durch die Infrarot-LED geleitet, welches der bereits im Kapitel 3.1 verwendete DC Power Analyzer ausgeben kann. Ein Phototransistor, der in Bezug auf die Wellenlänge mit der Infrarot-LED abgestimmt sein muss, wird zum Empfangen der IRS eingesetzt und in eine Verstärkerschaltung integriert. Gemessen wird dann lediglich die Differenz zwischen den Pegeln des empfangenen PWM-Signals, da die Intensität des gesamten Infrarotsignals durch Sonnenlicht, Leuchten und andere Quellen beeinflusst werden kann.

3.2.2 Auswahl der Bauteile

Um mit IRS Daten über Distanzen von bis zu zehn Meter übertragen zu können bzw. eine Übertragung auch ohne direkten Sichtkontakt mit Hilfe von Reflexionen möglich zu machen, sind leistungsstarke Bauteile notwendig. Auf der Homepage von Farnell wird unter der Rubrik Infrarot-Emitter mit Einschränkungen auf einen Abstrahlwinkel von mindestens 90° , einen Durchlassstrom ab 1 A, einen vorrätigen Lagerstand und der Verpackungsoption Gurtabschnitt gesucht. Unter den elf Ergebnissen, laut Stand vom 30.08.2017, gilt es nun, durch Datenblattrecherchen die zwei leistungsstärksten Infrarot-Emitter auszuwählen. Vom Hersteller Vishay Semiconductors wird die LED VSMY98545DS (VSMY) gewählt, da diese bis zu einem gepulsten Strom von 5 A betrieben werden kann und dabei eine Strahlstärke von bis zu 2800 mW sr^{-1} schafft, was unter dieser Vorauswahl die höchste ist. Die Strahlungsleistung gehört mit 1070 mW bei einem gepulsten Strom von 1 A auch zum Spitzenfeld. Die zweite Wahl fällt auf den Typ SFH4770S (SFH4770) vom Hersteller OSRAM, dessen Strahlungsleistung mit 1200 mW bei 1 A und Strahlstärke mit 560 mW sr^{-1} bei 1,5 A gepulsten Strom angegeben ist. Beide ausgewählten Dioden strahlen im Bereich einer Wellenlänge von 850 nm IRS aus.

Auf Grund der hohen Ströme, die durch die Infrarot-LEDs geleitet werden, ist es unbedingt notwendig, die Bauteile auf einem Kühlkörper zu befestigen. Dies ist mit einem doppelseitigen, wärmeleitenden und elektrisch isolierenden Klebeband möglich. Zusätzlich bietet es sich an, die Dioden auf eine Aluplatine zu löten, bei der Temperaturerhöhungen über ein drittes Lötauge auf die Platine und in weiterer Folge auf den Kühlkörper abgeleitet werden.

Für die Auswahl der Phototransistoren werden unter selbiger Rubrikbezeichnung bei Farnell zwei passende Bauteile gesucht, wobei die Filter auf eine Wellenlänge von 850 nm bis 860 nm, für einen Winkel von mindestens 70° , auf eine Verpackung als Gurtabschnitte und auf „Produkt vorrätig“ gesetzt werden. Laut Stand vom 30.08.2017 bleiben acht Phototransistoren übrig, wovon zum einen einer mit der Wellenlänge 860 nm gewählt wird, nämlich der VEMT2023SLX01 (VEMT2023) vom Hersteller Vishay, und zum anderen der VEMT3700-GS08 (VEMT3700) mit 850 nm Wellenlänge, ebenfalls von Vishay.

Für die Verstärkerschaltung auf Empfangsseite wird aus dem lagernden Sortiment der XAL GmbH der Operationsverstärker LM392 bereitgestellt. Dieser kann sowohl mit einer rein positiven Versorgungsspannung von bis zu + 32 V als auch mit einer symmetrischen Versorgung von maximal ± 16 V betrieben werden und verstärkt laut Datenblatt Signale mit Frequenzen bis 1 MHz. Der zusätzlich verbaute Komparator wird nicht benötigt und somit auch nicht beschaltet.

Die Signalerzeugung für den Testbetrieb der Infrarot-LEDs wird mit dem DC Power Analyzer N6705B von Agilent umgesetzt, mit dem man über die Arb-Funktion eine Pulsweitenmodulation konfigurieren kann. In weiterer Folge wird das zu sendende Signal mit einem Arduino UNO Board erzeugt und mit einer Darlington-Transistorschaltung verstärkt. Die Wahl der Transistoren wird laut Schaltplan in Abb. 9 getroffen, womit ein BC547 zur Vorstärkung und ein BD137 zum Schalten der hohen Ströme zum Einsatz kommen. Die Stromversorgung auf Empfängerseite wird vom Labornetzgerät vom Typ VSP 2653 des Herstellers Voltcraft geliefert. Das empfangene und verstärkte Signal wird am Ausgang des OPV mit dem Oszilloskop vom Typ KEYSIGHT InfiniiVision MSO-X 4154A gemessen und aufgezeichnet.

3.2.3 Tests

Test 1

Der erste Test wird zur Überprüfung der Funktion der Sensoren und Bauteile durchgeführt. Die beiden ausgewählten Infrarot-LEDs werden auf eine Aluplatine gelötet und in Serie werden zwei parallel geschaltete 500Ω Metallschicht-Widerstände mit einer maximalen Leistung von jeweils $\frac{1}{4}$ Watt angeschlossen. Am DC Power Analyzer N6705B von Agilent wird ein Gleichspannungssignal von 10 V mit einer Strombegrenzung von 40 mA eingestellt und die Dioden damit betrieben. Der Strom kann berechnet werden, in dem man den Spannungsabfall über den beiden bekannten Widerständen misst. Bei 10 V Versorgung fällt am zusammengefassten Widerstand von 250Ω bei den LEDs eine Spannung von zirka 7,4 V ab. Dadurch ergibt sich mit Hilfe des ohmschen Gesetzes der folgende Strom:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{7,4}{250} = 29,6 \text{ mA}$$

Bei geringeren Strömen ist mit dem menschlichen Auge kein Unterschied zwischen einer durchgeschalteten, aktiven Infrarot-LED und einer sperrenden bzw. deaktivierten zu sehen. Die Kamera eines Smartphones bzw. eine einfache Digitalkamera kann dabei helfen, da deren Sensoren auf IRS reagieren und ein Signal ausgeben, das verarbeitet und am Display bzw. am Foto in einer bestimmten, meist nicht roten Farbe wiedergegeben wird. Die nachfolgende Abbildung zeigt dieses Phänomen bei beiden ausgewählten Infrarot-LEDs, welche zum Zeitpunkt der Aufnahmen noch an keinem Kühlkörper befestigt waren.

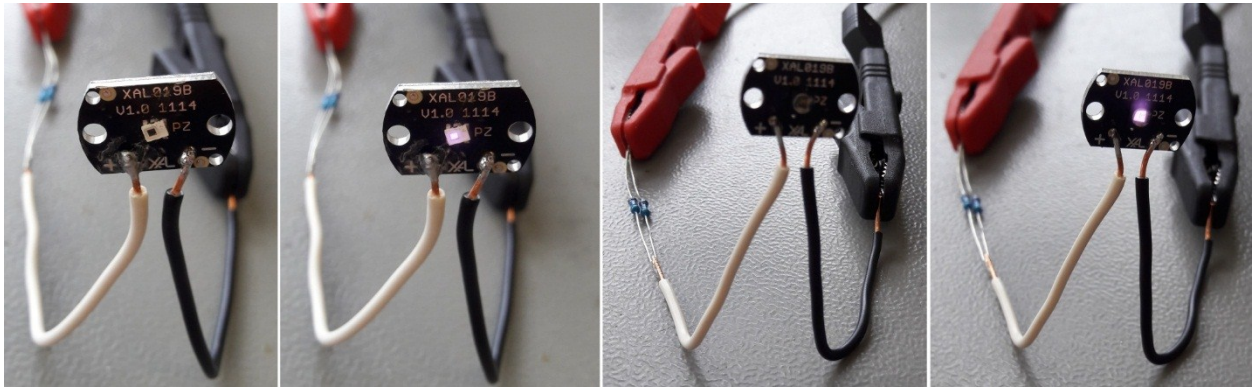


Abb. 36: Infrarot-LEDs aus- und eingeschaltet (links: SFH4770, rechts: VSMY98545), Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Beschaltung mit höheren Strömen sieht man dann bereits mit freiem Auge, dass sich die emittierende Fläche rot färbt. Jedoch sollte man nicht direkt in die Infrarot-LED blicken, ohne sich vorher über die Strahlungscharakteristik informiert zu haben.

Test 2

Nun werden die beiden Infrarot-LEDs und die beiden Phototransistoren auf ihre Übertragungseigenschaften untereinander getestet und eine Auswahl getroffen, mit welcher die weiteren Tests durchgeführt werden. Auf der Senderseite werden, wie in Abb. 37 ersichtlich, die beiden parallel geschalteten 500 Ω Widerstände durch einen 22,36 Ω Hochleistungswiderstand ersetzt, welcher von der XAL GmbH zur Verfügung gestellt wurde und mit einer Leistung bis 100 W betrieben werden darf.

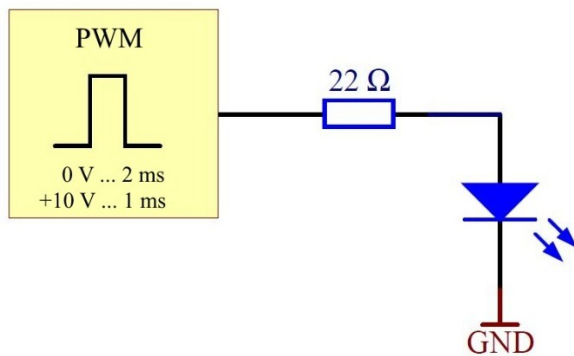


Abb. 37: Schaltplan zum Betreiben der Infrarot-LEDs, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei selber Spannung fließen dadurch höhere Ströme durch die Diode und der Hochleistungswiderstand kann diesen Gegebenheiten auch standhalten. Bei diesem Schaltungsaufbau wird ein Spannungsabfall von 7,13 V über dem Hochleistungswiderstand gemessen. Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes ergibt sich ein Strom von 318,87 mA und damit kann auf eine Leistung am Widerstand (P_R) von 2,27 W und eine Leistung in der Diode (P_D) von 0,92 W rückgeschlossen werden, wie die folgenden Berechnungen zeigen. Der Schaltungsaufbau mit der Infrarot-LED SFH4770 inklusive Kühlkörper und dem in Gelb gehaltenen Hochleistungswiderstand ist in Abb. 38 ersichtlich.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{7,13}{22,36} = 318,87 \text{ mA}$$

$$P_R = U I = 7,13 \cdot 318,87 \cdot 10^{-3} = 2,27 \text{ W}$$

$$P_D = U I = 2,87 \cdot 318,87 \cdot 10^{-3} = 0,92 \text{ W}$$

Unter Bezugnahme auf die Berechnung in der Theorie unter 2.2.4 kommt diese in der Infrarot-LED abgegebene Leistung einer Bestrahlung eines ungefähr 90 m² großen Raumes mit 2,5 m Raumhöhe mit einer Bestrahlungsstärke von 0,5 mW m⁻² gleich.

Der Wirkungsgrad dieser Schaltung kann wie folgt berechnet werden:

$$\eta = \frac{P_{\text{Nutzen}}}{P_{\text{Aufwand}}} = \frac{P_D}{P_D + P_R} = \frac{0,92}{0,92 + 2,27} = 0,288 = 28,8 \%$$

Für eine einfache Schaltung sind 28,8 % Wirkungsgrad sehr verschwenderisch, weswegen ein Umbau dieses Schaltaufbaus in Betracht gezogen werden sollte.

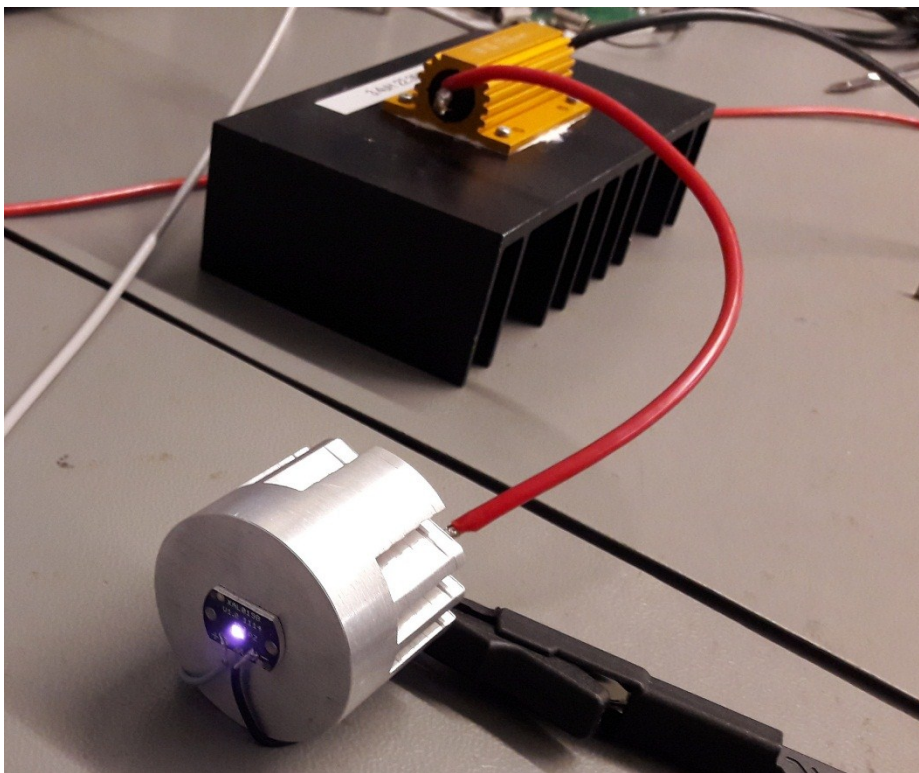


Abb. 38: Senderschaltung mit SFH4770 und Hochleistungswiderstand, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf Empfängerseite wird eine Verstärkerschaltung aus dem in der Theorie verwendeten Werk von Frank Wohlrabe verwendet, welche in der Abb. 12 zu finden ist.

Der für diese Schaltung verwendete OPV vom Typ LM392 des Hersteller Texas Instruments wird mit + 30 V versorgt, was an dessen maximale Versorgungsspannung grenzt. Am Phototransistor wird eine Spannung von + 5 V angelegt, somit ergibt sich eine theoretische, maximale positive Eingangsspannung am OPV von + 5 V, sofern man die Sättigungsspannung des Transistors vernachlässigt. Für eine erste grobe Berechnung wird ein Verstärkungsfaktor von 6 gewählt, wodurch sich eine maximale theoretische Ausgangsspannung von 30 V ergibt. Mit der umgewandelten Formel 2.33 zur Berechnung des Verstärkungsfaktors kann nun das Verhältnis der beiden Widerstände wie folgt kalkuliert werden:

$$\frac{R2}{R1} = V_U - 1 = 6 - 1 = 5$$

Auf Grund der verfügbaren Widerstandsreihe und da man keine großen Ströme für die Messung der Amplitudenwerte auf Empfängerseite benötigt, werden die Widerstände aus dem zweistelligen k Ω -Bereich mit $R1 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R2 = 47 \text{ k}\Omega$ gewählt. Damit ergeben sich ein Verstärkungsfaktor von 5,7 und eine maximale Ausgangsspannung von 28,5 V bei 5 V am positiven Eingang. Unter Berücksichtigung der Sättigungsbereiche von OPV und Phototransistor können diese Werte ohne Weiteres verwendet werden. Am Ausgang des OPVs wird eine rote LED und ein 1,5 k Ω Metallschicht-Widerstand in Serie auf Masse geschaltet, damit jederzeit ersichtlich ist, ob der Phototransistor durchschaltet. Das Signal wird mit dem Oszilloskop am Ausgang des OPVs gemessen und aufgezeichnet. Der nachfolgende Schaltplan zeigt den Aufbau dazu.

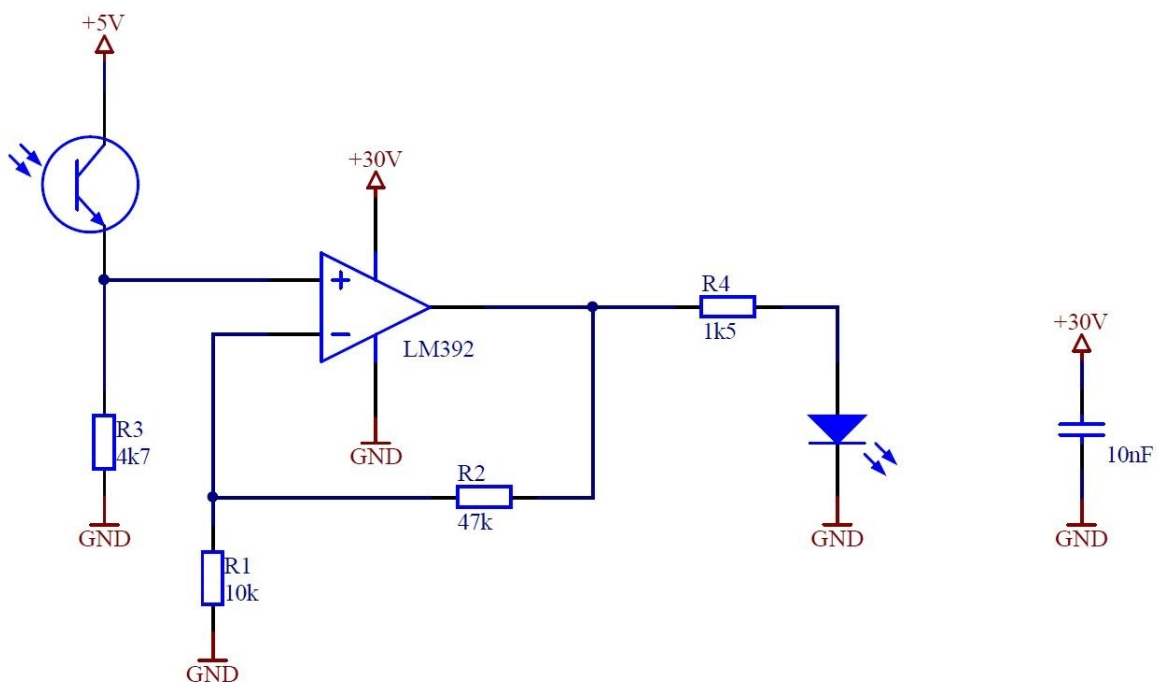


Abb. 39: Schaltplan der Empfängerschaltung des Infrarotsignals mit Phototransistor und OPV, Quelle: Eigene Darstellung.

Damit das gesendete Signal in der IRS von der Umgebung unterschieden werden kann, wird am DC Power Analyzer eine Pulsweitenmodulation für die Versorgungsspannung eingestellt. Dabei wird die Spannung zwischen 0 und 5 V gepulst, um im Vergleich zu den 10 V keine so große Verlustleistung am Vorwiderstand zu produzieren. Die Einstellung für die PWM kann der Abb. 40 entnommen werden. Während der Tests ist das Problem aufgetreten, dass zu Tageszeiten das modulierte Signal am Empfänger nicht ersichtlich war. Der Grund dafür ist die im Sonnenlicht enthaltene IRS, welche sich mit dem ausgesendeten Signal überlagert und dieses nicht mehr messbar macht. Wie im Kapitel 2.2.5 beschrieben, kann dieses Problem auch in Räumen, die mit Glühlampen als Beleuchtungsmittel ausgestattet sind, auftreten. Bei diesem und den nachfolgenden Tests wird daher die Einstrahlung von Sonnen- und Glühlampenlicht im Raum verhindert. Für Tests, welche über diese Arbeit hinausgehen, wird die Verwendung eines Filters und anderer Abschirmungen empfohlen.

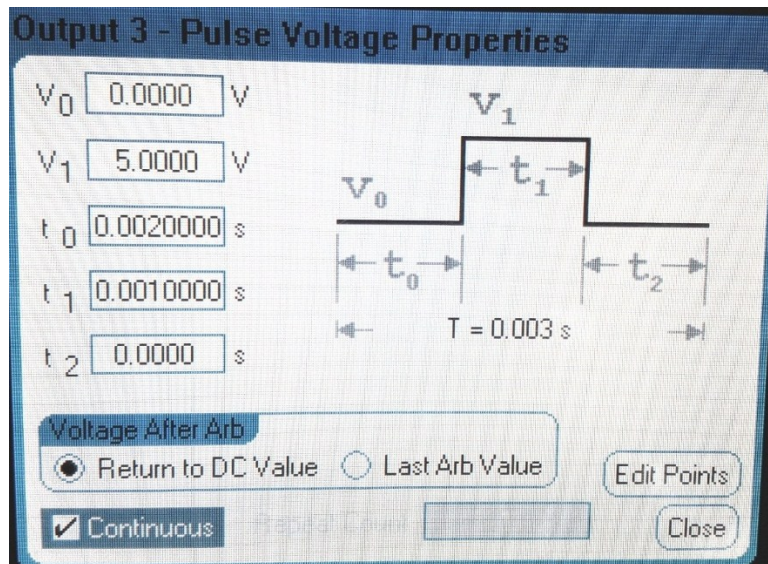


Abb. 40: PWM-Konfiguration am DC Power Analyzer für die Infrarot-Senderschaltung, Quelle: Eigene Darstellung.

Gestartet wird mit Signalübertragungen von der Infrarot-Diode VSMY zu den beiden Phototransistoren VEMT3700 und VEMT2023. Gemessen wird die V_{PP} des übertragenen, verstärkten PWM-Signals am Ausgang des Operationsverstärkers. Versorgt wird der OPV mit derselben Spannung, welche am Kollektoreingang des Phototransistors anliegt und 5 V beträgt. Dies ist für die Übertragungstests ausreichend, kann aber bei Bedarf mit einer eigenen Versorgung erhöht werden.

	VSMY zu VEMT3700	VSMY zu VEMT2023
Distanz / m	Amplitude/V	Amplitude/V
1,0	0,10	1,00
2,0	0,04	0,31
3,0	0,02	0,18

Tabelle 4: Messungen mit VSMY zu VEMT3700 und VEMT2023 in den Abständen 1 m, 2 m und 3 m, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Inhalte der Tabelle 4 zeigen, dass der Phototransistor VEMT3700 um einiges unempfindlicher gegenüber dem VEMT2023 ist und bereits nach 3 Metern so gut wie kein verarbeitbares Signal mehr empfängt. Somit wird der VEMT2023 dem VEMT3700 für die weiteren Tests vorgezogen.

Nun werden noch drei Messungen mit der Infrarot-Diode SFH4770 und dem VEMT2023 unter den gleichen Konditionen wie bei den vorherigen Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse dazu sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

	SFH4770 zu VEMT2023
Distanz / m	Amplitude/V
1,0	0,72
2,0	0,21
3,0	0,10

Tabelle 5: Messungen mit SFH4770 und VEMT2023 in den Abständen 1 m, 2 m und 3 m, Quelle: Eigene Darstellung.

Beim Vergleich der Amplitudenwerte bei der Signalübertragung von VSMY zu VEMT2023 und von SFH4770 zu VEMT2023 lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Somit werden die nachfolgenden Messungen mit beiden Infrarot-LEDs durchgeführt.

Test 3

Beim Test 3 sollen Messungen durchgeführt werden, mit deren Hilfe evaluiert werden kann, ob sich Infrarotsignale zur Bestimmung von Distanzen über den Verlauf der Signaldämpfung eignen. Die Signalübertragung wird von 0,5 m bis 10 m in halben Meterschritten mit dem Oszilloskop aufgezeichnet und in den nachfolgenden Tabellen festgehalten. Diese 20 Messungen werden einmal bei einer Positionierung von Diode und Transistor in direkter Blickrichtung durchgeführt, einmal bei einer Verschiebung um $22,5^\circ$ und ein weiteres Mal bei einem Winkel von 45° . Die Empfängerschaltung wird gleich wie unter Test 2 aufgebaut und versorgt. Statt der Senderschaltung laut Abb. 37 wird eine Transistorschaltung laut dem Beispiel in Abb. 9 aus dem Theorieteil eingesetzt. Damit kann bei einer Versorgungsspannung von 7 V eine Stromverstärkung bis in den Ampere-Bereich erzielt werden. Wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich, werden die Widerstandswerte der Beispielschaltung geändert, um einen Strom von 1,5 A zu erhalten. Dabei muss beachtet werden, dass es sich bei R_v und R_e um Hochleistungswiderstände mit einer maximalen Leistung von 5 W handelt. Die Infrarot-Sendediode ist unter D1 zu finden. Beide Varianten, SFH4770 und VSMY, weisen in dieser Beschaltung eine Durchlassspannung von 3,3 V auf. D2 zeigt eine rote LED mit einer Durchlassspannung von 2,2 V. Am Arduino Board wird ein PWM-Signal mit einer Pulsdauer von 500 μs und einer Spannung von 5 V bei einem Puls-Pause-Verhältnis von 0,33 generiert.

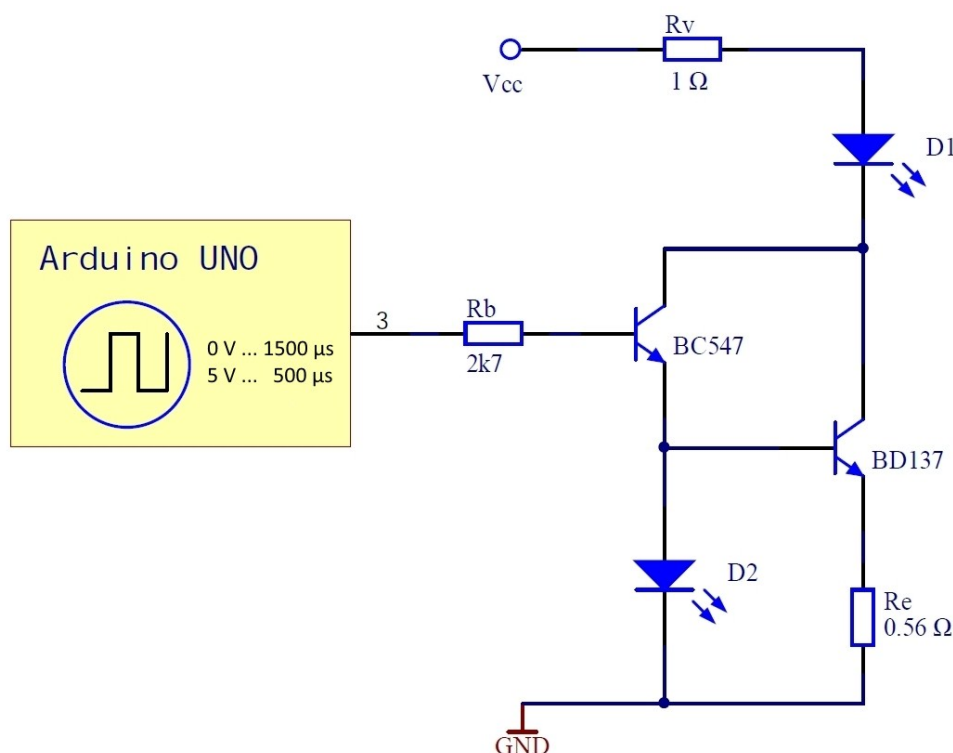


Abb. 41: Schaltplan der Transistorschaltung zum Senden des Infrarotsignals, Quelle: Eigene Darstellung.

Mit dieser Schaltung werden die Übertragungstests der IR-Dioden VSMY und SFH4770 zum Phototransistor VEMT2023 getestet. Die Messwerte vom Signalaustausch zwischen VSMY und VEMT2023 sind in der Tabelle 6 dokumentiert. In der Tabelle 7 findet man die Messergebnisse der Übertragung zwischen SFH4770 und VEMT2023. Die gemessene Amplitude der empfangenen Signale ist als Spitze-Spitze-Wert zu verstehen und wird auf eine Genauigkeit von zwei Kommastellen begrenzt.

Distanz/m	Amplitude bei 0°/V	Amplitude bei 22,5°/V	Amplitude bei 45°/V
0,5	23,68	24,58	17,70
1,0	8,38	7,53	4,97
1,5	3,67	3,26	2,14
2,0	2,23	1,82	1,12
2,5	1,51	1,23	0,75
3,0	1,11	0,75	0,52
3,5	0,79	0,59	0,35
4,0	0,62	0,43	0,27
4,5	0,54	0,37	0,22
5,0	0,43	0,29	0,18
5,5	0,47	0,24	0,14
6,0	0,39	0,22	0,11
6,5	0,30	0,16	0,09
7,0	0,25	0,14	0,09
7,5	0,20	0,11	0,07
8,0	0,17	0,10	0,06
8,5	0,14	0,08	0,06
9,0	0,11	0,08	0,04
9,5	0,09	0,07	0,04
10,0	0,07	0,06	0,03

Tabelle 6: Messungen der Signalübertragung von VSMY zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung.

Distanz/m	Amplitude bei 0°/V	Amplitude bei 22,5°/V	Amplitude bei 45°/V
0,5	18,84	16,77	17,70
1,0	5,67	5,27	4,97
1,5	2,39	2,10	2,14
2,0	1,35	1,26	1,12
2,5	0,86	0,82	0,75
3,0	0,54	0,54	0,52
3,5	0,44	0,40	0,35
4,0	0,33	0,31	0,27
4,5	0,25	0,23	0,22
5,0	0,15	0,18	0,18
5,5	0,13	0,14	0,14
6,0	0,11	0,12	0,11
6,5	0,09	0,10	0,09
7,0	0,08	0,08	0,09
7,5	0,08	0,05	0,07
8,0	0,07	0,04	0,06
8,5	0,04	0,04	0,06
9,0	0,04	0,03	0,04
9,5	0,04	0,03	0,04
10,0	0,03	0,03	0,03

Tabelle 7: Messungen der Signalübertragung von SFH4770 zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.4 Resultate

Die erfassten Messdaten von Tabelle 6 und Tabelle 7 werden nun jeweils in ein Korrelationsdiagramm eingetragen, um den Bezug zwischen Distanz und Signalpegel grafisch darzustellen. Diese Diagramme wurden mit Hilfe des Tabellenverarbeitungsprogramms Microsoft Excel erstellt, wobei die x-Achse die Distanzwerte von 0,5 m bis 10 m und die y-Achse die gemessenen Amplitudenwerte widerspiegelt. Die Software ermöglicht es, eine zusätzliche Kurve mit einer automatisch berechenbaren Potenzfunktion inklusive deren Formel im Diagramm hinzuzufügen. Dies wurde für die Spannungswerte bei 0° Verschiebung bei beiden nachfolgend zu sehenden Diagrammen erstellt.

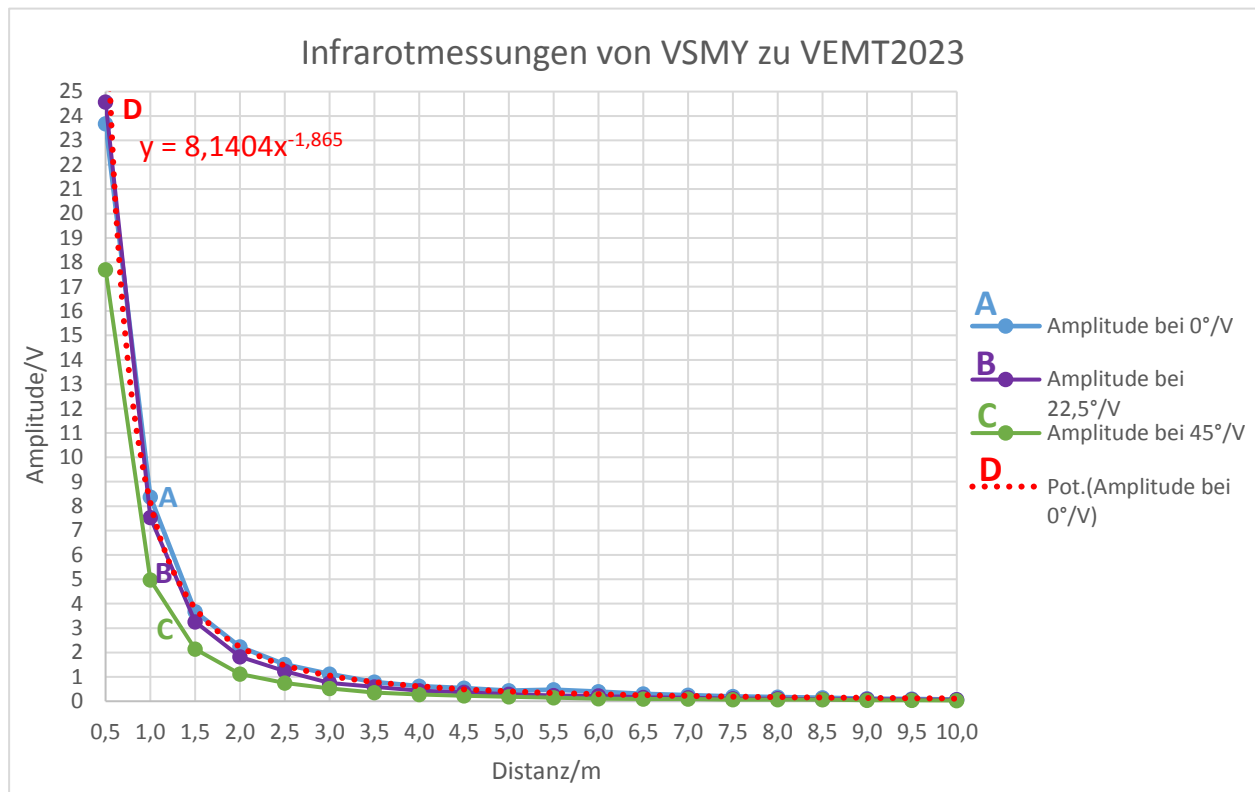


Abb. 42: Diagramm der Infrarotmessungen von VSMY zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung.

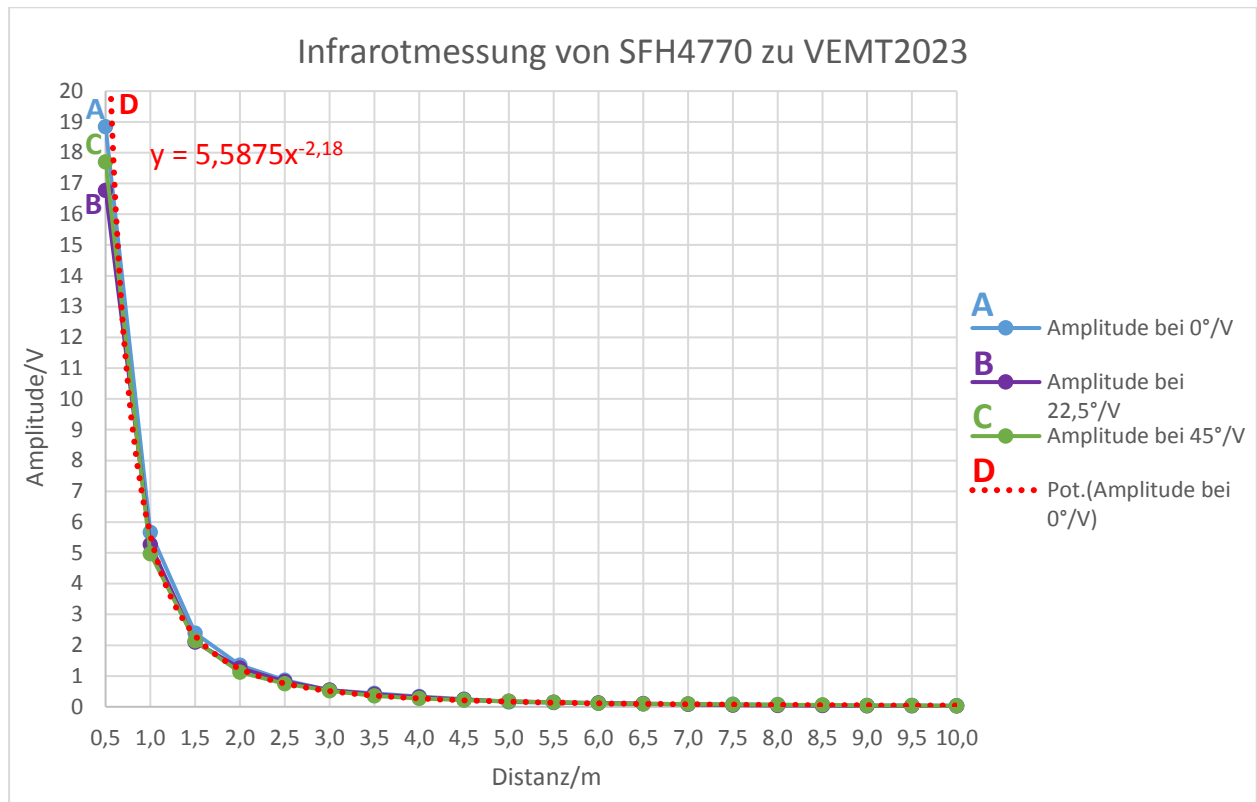


Abb. 43: Diagramm der Infrarotmessungen von SFH4770 zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messungen mit beiden Infrarot-LEDs zeigen, dass eine Verschiebung der Sender zum Empfänger um $22,5^\circ$ keine große Auswirkung auf die Pegelwerte bewirkt, was als sehr positiv anzusehen ist. Die Messwerte der Signalübertragung von SFH4770 zu VEMT2023 sind auch bei einer Abweichung um 45° kaum von denen bei 0 und $22,5^\circ$ zu unterscheiden, wie in Abb. 43 zu sehen ist. Die Kurve C weist bereits einen größeren Abstand zu den Kurven A und B auf, wie in Abb. 42, welche den Messungen der Infrarotübertragung bei einem Winkel von 45° zwischen VMSY und VEMT2023 entspricht, zu sehen ist. Laut den Eigenschaften aus den Datenblättern ist dies nachvollziehbar, da die SFH4770 einen Abstrahlwinkel von $\pm 60^\circ$ schafft und die VSMY hingegen nur $\pm 45^\circ$. Die geringen Abstände zwischen den Kurven und der homogene Verlauf lassen darauf schließen, dass die Infrarot-LED SFH4770 besser für die Distanzbestimmung im Infrarot-Bereich geeignet ist und somit für die Bewertung herangezogen wird. Die Kurve D gilt als Normkurve für die Distanzbestimmung mit dem hierfür gewählten Schaltungsaufbau.

4 WAHL DES GEEIGNETSTEN SENSORTYPS

4.1 Bewertungskriterien

Die Entscheidung, ob einer der beiden behandelten Signaltypen für die Distanzbestimmung verwendet werden kann, soll nicht nur auf Grundlage der beiden Korrelationsdiagramme in Abb. 35 und Abb. 43 getroffen werden. Um herauszufinden, ob die Ultraschallübertragung mit dem gewählten Sensor 400PT16P oder die Infrarotübertragung mit der IR-LED SFH4770 und dem Phototransistor VEMT2023 zuverlässigere und genauere Daten für eine Distanzmessung liefern, werden zuerst die prozentuellen Abweichungen zu den erstellten Normkurven berechnet und deren Mittelwert verglichen. Dies wird einmal für die Messungen bei einer Abneigung zwischen Sender und Empfänger von 0° und ein weiteres Mal für die Werte bei einem Winkel von 22,5° durchgeführt. Die Messwerte bei einer Verschiebung um 45° werden für die Bewertung nicht herangezogen, da dieser Winkel außerhalb der laut Datenblatt angegebenen Abstrahlcharakteristik des Ultraschallsensors liegt. Zusätzlich werden die Abweichungen der Kurven A und B in Bezug auf die Kurve D bis zu einer Übertragungsweite von 5 m gegenübergestellt, da das System nur für kleinere Büroräume vorgesehen werden kann. Da bei etwaiger Gleichwertigkeit der ersten Kriterien dennoch ein Signaltyp dem Auftraggeber empfohlen werden soll, werden auch die Kosten der benötigten Bauteile für die Schaltungen verglichen.

4.2 Beurteilung

Damit die im Kapitel 4.3 dargestellte Bewertungsmatrix für alle Kriterien vergleichbar ist, wird jedes Bewertungskriterium mit einer Wertung von 1, sehr schlecht, bis 10, ausgezeichnet, beurteilt. Dabei werden alle während dieser Arbeit erlangten Wissensstände herangezogen, um eine möglichst objektive Beurteilung zu erhalten.

4.2.1 Abweichungen bei 0° Verschiebung

Mit den Messwerten bei 0° Abneigung zwischen Sender und Empfänger aus Tabelle 3 und Tabelle 7 wird zunächst die Differenz zu den Werten der jeweiligen Kurve D gebildet. Die Abweichung ergibt sich dann aus dem Quotienten zwischen der Differenz und den Werten der Normkurve D. Durch die Multiplikation mit 100 erlangt man die prozentuelle Abweichung. In der Tabelle 8 sind die Abweichungen der Ultraschallsignale und in der Tabelle 9 jene der Infrarotsignale zu finden.

Distanz/m	Amplitude bei 0°/V	Kurve D/V	Differenz/V	Abweichung/%
0,5	28,89	47,23	-18,34	38,83
1,0	12,37	15,94	-3,57	22,40
1,5	8,84	8,45	0,39	4,62
2,0	6,41	5,38	1,03	19,14
2,5	4,91	3,79	1,12	29,55
3,0	3,86	2,85	1,01	35,44
3,5	2,98	2,24	0,74	33,04
4,0	2,65	1,82	0,83	45,60
4,5	1,74	1,51	0,23	15,23
5,0	1,70	1,28	0,42	32,81

Wahl des geeignetsten Sensortyps

5,5	1,50	1,10	0,40	36,36
6,0	1,05	0,96	0,09	9,38
6,5	1,04	0,85	0,19	22,35
7,0	0,87	0,76	0,11	14,47
7,5	0,35	0,68	-0,33	48,53
8,0	0,30	0,61	-0,31	50,82
8,5	0,66	0,56	0,10	17,86
9,0	0,46	0,51	-0,05	9,80
9,5	0,26	0,47	-0,21	44,68
10,0	0,44	0,43	0,01	2,33

Tabelle 8: Abweichungen der Ultraschallmessungen bei 0° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.

Distanz/m	Amplitude bei 0°/V	Kurve D/V	Differenz/V	Abweichung/%
0,5	18,84	25,32	-6,48	25,59
1,0	5,67	5,59	0,08	1,43
1,5	2,39	2,31	0,08	3,46
2,0	1,35	1,23	0,12	9,76
2,5	0,86	0,76	0,10	13,16
3,0	0,54	0,51	0,03	5,88
3,5	0,44	0,36	0,08	22,22
4,0	0,33	0,27	0,06	22,22
4,5	0,25	0,21	0,04	19,05
5,0	0,15	0,17	-0,02	11,76
5,5	0,13	0,14	-0,01	7,14
6,0	0,11	0,11	0,00	0,00
6,5	0,09	0,09	0,00	0,00
7,0	0,08	0,08	0,00	0,00
7,5	0,08	0,07	0,01	14,29
8,0	0,07	0,06	0,01	16,67
8,5	0,04	0,05	-0,01	20,00
9,0	0,04	0,05	-0,01	20,00
9,5	0,04	0,04	0,00	0,00
10,0	0,03	0,04	-0,01	25,00

Tabelle 9: Abweichungen der Infrarotmessungen bei 0° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei den Abweichungen der Ultraschallsignale ergibt sich durch Addition aller Werte und anschließender Division durch die Anzahl der Werte ein Mittelwert von **26,66 %**. Bei den Infrarotsignalen ist dieser Wert um mehr als die Hälfte niedriger und liegt bei **11,88 %**. Da sich die prozentuelle Abweichung bei solchen Messungen im Bereich zwischen 0 und 100 % bewegen kann und man anderenfalls seine Normkurve überarbeiten muss, wird die Wertung auch dementsprechend wie folgt gestaffelt:

Bereich der Abweichung in %			Wertung
0,00	bis	10	10
10,01	bis	20	9
20,01	bis	30	8
30,01	bis	40	7

40,01	bis	50	6
50,01	bis	60	5
60,01	bis	70	4
70,01	bis	80	3
80,01	bis	90	2
90,01	bis	100	1

Tabelle 10: Wertungsschlüssel für Bereiche der Abweichungen bei 0° Verschiebung, Quelle: Eigene Darstellung.

Daraus ergibt sich das Resultat, dass der Signaltyp Infrarot die Punktezahl **9** und Ultraschall die Punktezahl **8** bei der Bewertung der Abweichungen bei 0° Verschiebung bekommt.

4.2.2 Abweichungen bei 22,5° Verschiebung

Die Berechnungen erfolgen hier gleich wie im Kapitel 4.2.1. Nachfolgend sind die beiden Tabellen mit den Abweichungen bei 22,5° zu finden.

Distanz/m	Amplitude bei 22,5°/V	Kurve D/V	Differenz/V	Abweichung/%
0,5	14,02	47,23	-33,21	70,32
1,0	7,25	15,94	-8,69	54,52
1,5	5,40	8,45	-3,05	36,09
2,0	3,50	5,38	-1,88	34,94
2,5	2,35	3,79	-1,44	37,99
3,0	1,85	2,85	-1,00	35,09
3,5	1,53	2,24	-0,71	31,70
4,0	1,44	1,82	-0,38	20,88
4,5	1,28	1,51	-0,23	15,23
5,0	0,88	1,28	-0,40	31,25
5,5	0,69	1,10	-0,41	37,27
6,0	0,38	0,96	-0,58	60,42
6,5	0,65	0,85	-0,20	23,53
7,0	0,35	0,76	-0,41	53,95
7,5	0,47	0,68	-0,21	30,88
8,0	0,09	0,61	-0,52	85,25
8,5	0,04	0,56	-0,52	92,86
9,0	0,04	0,51	-0,47	92,16
9,5	0,07	0,47	-0,40	85,11
10,0	0,02	0,43	-0,41	95,35

Tabelle 11: Abweichungen der Ultraschallmessungen bei 22,5° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.

Distanz/m	Amplitude bei 22,5°/V	Kurve D/V	Differenz/V	Abweichung/%
0,5	16,77	25,32	-8,55	33,77
1,0	5,27	5,59	-0,32	5,72
1,5	2,10	2,31	-0,21	9,09
2,0	1,26	1,23	0,03	2,44
2,5	0,82	0,76	0,06	7,89
3,0	0,54	0,51	0,03	5,88

3,5	0,40	0,36	0,04	11,11
4,0	0,31	0,27	0,04	14,81
4,5	0,23	0,21	0,02	9,52
5,0	0,18	0,17	0,01	5,88
5,5	0,14	0,14	0,00	0,00
6,0	0,12	0,11	0,01	9,09
6,5	0,10	0,09	0,01	11,11
7,0	0,08	0,08	0,00	0,00
7,5	0,05	0,07	-0,02	28,57
8,0	0,04	0,06	-0,02	33,33
8,5	0,04	0,05	-0,01	20,00
9,0	0,03	0,05	-0,02	40,00
9,5	0,03	0,04	-0,01	25,00
10,0	0,03	0,04	-0,01	25,00

Tabelle 12: Abweichungen der Infrarotmessungen bei 22,5° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Mittelwertberechnung der prozentuellen Abweichungen der Ultraschallsignale ergibt einen Wert von **51,24 %**, was einer Verdoppelung in Bezug auf den Wert bei 0° Verschiebung gleich kommt. Bei den Infrarotsignalen wird der Mittelwert mit **14,91 %** lediglich ein paar Prozentpunkte höher.

Die Wertung kann mit Hilfe der Tabelle 10 durchgeführt werden, da die Mittelwerte der prozentuellen Abweichungen im selben Bereich liegen. Daraus ergeben sich abermals **9** Punkte für die Infrarotübertragung und **5** Punkte für die Ultraschallübertragung.

4.2.3 Abweichungen bis 5 Meter

Aus Tabelle 8 und Tabelle 11 können die prozentuellen Abweichungen bei 0° und 22,5° Verschiebung und den Distanzen zwischen 0,5 und 5 m für Ultraschall und aus Tabelle 9 und Tabelle 12 für Infrarot entnommen werden. Pro Entfernung wird eine mittlere Abweichung durch Addition der beiden jeweiligen Abweichungen und anschließender Division durch die Anzahl 2 berechnet. Daraus kann nun der Mittelwert für die Abweichungen bis 5 Meter gebildet werden. In der nachfolgenden Tabelle 13 sind die Abweichungen der Ultraschallübertragungen und in Tabelle 14 jene der Infrarotübertragungen ersichtlich.

Distanz/m	Abweichung bei 0°/%	Abweichung bei 22,5°/%	mittlere Abweichung/%
0,5	38,83	70,32	54,58
1,0	22,40	54,52	38,46
1,5	4,62	36,09	20,36
2,0	19,14	34,94	27,04
2,5	29,55	37,99	33,77
3,0	35,44	35,09	35,27
3,5	33,04	31,70	32,37
4,0	45,60	20,88	33,24
4,5	15,23	15,23	15,23
5,0	32,81	31,25	32,03

Tabelle 13: Abweichungen der Ultraschallmessungen zwischen 0,5 und 5 m, Quelle: Eigene Darstellung.

Distanz/m	Abweichung bei 0°/%	Abweichung bei 22,5°/%	mittlere Abweichung/%
0,5	25,59	33,77	29,68
1,0	1,43	5,72	3,58
1,5	3,46	9,09	6,28
2,0	9,76	2,44	6,10
2,5	13,16	7,89	10,53
3,0	5,88	5,88	5,88
3,5	22,22	11,11	16,67
4,0	22,22	14,81	18,52
4,5	19,05	9,52	14,29
5,0	11,76	5,88	8,82

Tabelle 14: Abweichungen der Infrarotmessungen zwischen 0,5 und 5 m, Quelle: Eigene Darstellung.

Beim Signaltyp Ultraschall lässt sich ein Mittelwert der Abweichungen bei Entfernungen von 0,5 bis 5 m von **32,24 %** errechnen. Auch hier ist der Signaltyp Infrarot mit **12,04 %** deutlich besser, womit dieses Bewertungskriterium den Vorzug von Infrarot weiter stärkt.

Die Tabelle 10 kann auch hier für die Wertung herangezogen werden. Es ergibt sich damit eine Punktwertung für Ultraschall von **7** und für Infrarot eine konstante Wertung von **9**.

4.2.4 Kosten

Das Bewertungskriterium Kosten kann zwar nur in Bezug auf die Bauteile bewertet werden, welche für die Testschaltungen benötigt wurden, aber dennoch ist ein grober Ausblick auf zukünftige Produktionskosten möglich. Das Arduino Board wird in der Praxis durch einen Mikrokontroller ersetzt, welcher noch nicht ausgewählt ist und somit bei den Kosten nicht berücksichtigt wird. Als Preise werden die für Bestellungen von mehr als 100 Stück angegebenen gewählt. Die nachfolgenden beiden Tabellen zeigen die Preislisten für die jeweiligen Schaltungen vom Lieferanten Farnell zum Stichtag 04.11.2017.

Bauteil	Anzahl	Kosten/€
SFH4770S	1	2,400
BC547B	1	0,088
BD13716STU	1	0,201
VEMT2023SLX01	1	0,413
LM392M	1	0,649
Metallschichtwiderstand	5	0,040
Keramikvielschichtkondensator	1	0,096
Hochlast-Widerstand	2	0,502
rote Farb-LED	1	0,267

Tabelle 15: Preisliste der Bauteile für die Infrarotübertragung, Quelle: Eigene Darstellung

Bauteil	Anzahl	Kosten/€
INA128U	1	7,810
400PT100P	2	2,900
FAN3227TMX	1	0,720
Metallschichtwiderstand	3	0,040
Keramikvielschichtkondensator	5	0,095

Tabelle 16: Preisliste der Bauteile für die Ultraschallübertragung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die vier Bauteile für die Ultraschallübertragung ergeben einen Gesamtpreis von **14,93 €** und sind somit teurer als die fünf Komponenten für die Infrarotübertragung, welche bei einer Bestellung von mindestens 100 Stück **5,32 €** pro Schaltungsaufbau betragen.

Für die Kosten eines Schaltungsaufbaus kann man schwer Grenzen setzen, somit wird der höhere Preis als Richtwert für die Wertung verwendet. Daraus ergibt sich die in der folgenden Tabelle ersichtliche Staffelung.

Kostenbereich in €			Wertung
0,00	bis	1,49	10
1,50	bis	2,99	9
3,00	bis	4,48	8
4,49	bis	5,97	7
5,98	bis	7,46	6
7,47	bis	8,96	5
8,97	bis	10,45	4
10,46	bis	11,94	3
11,95	bis	13,43	2
13,44	bis	14,93	1

Tabelle 17: Wertungsschlüssel für Kostenbereiche, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf Grund der höheren Bauteilkosten bekommt der Ultraschallaufbau nur **1** Punkt, wohingegen sich für die vergleichsweise niedrigen Preise der Infrarotschaltungen die Punktzahl **7** ergibt.

4.3 Bewertungsmatrix

Das Kapitel 4.2 enthält vier Bewertungskriterien, bei denen jeweils eine Wertung von 1 bis 10 zu erreichen war. Das ergibt ein Maximum von 40. Das Endresultat dazu ist in der nachfolgenden Tabelle zu finden.

	Ultraschall	Infrarot
Abweichungen bei 0° Verschiebung	8	9
Abweichungen bei 22,5° Verschiebung	5	9
Abweichungen bis 5 Meter	7	9
Kosten	1	7
GESAMTWERTUNG	21	34

Tabelle 18: Bewertungsmatrix, Quelle: Eigene Darstellung.

4.4 Ergebnis

Die Distanzbestimmung über die Dämpfung von Infrarotsignalen kann eindeutig gegenüber der von Ultraschallsignalen bevorzugt werden. Bei drei Bewertungskriterien schafft Infrarot die zweithöchste Wertung, beim Preis die dritthöchste. Bei der Gesamtwertung ist Infrarot mit 34 von 40 Wertungspunkten Ultraschall um 13 Punkte überlegen. Aus diesen Gründen wird dem Auftraggeber dieser Arbeit das Ergebnis überliefert, dass Infrarot laut den durchgeführten Tests und mit Hinblick auf die darauf bezogene Bewertung der geeignetere Signaltyp ist.

5 RESÜMEE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit reflektiert, notwendige Zusatzinformationen zur Umsetzung gegeben und etwaige Rückschlüsse zusammengefasst.

Zuallererst muss festgehalten werden, dass sich die Ergebnisse dieser Arbeit auf Messungen unter Laborbedingungen beschränken. Auch wenn dies keine Garantie für das Bestehen eines solchen Messmoduls in realen Umgebungen mit Störfaktoren wie Personen, Pflanzen, Kästen und ähnliches ist, gibt es eine klare Empfehlung, den Einsatz von Infrarotsignalen zur Distanzbestimmung in Innenräumen zu forcieren.

Die Bewertung der Messergebnisse baut auf einer Formel auf, welche mit Hilfe des Programms Microsoft Excel automatisch aus den Daten der Übertragung bei 0° Verschiebung erstellt wurde. Das Vertrauen in die Richtigkeit dieser Funktion ist ein Grundstein dieser Arbeit, wobei Bauteiltoleranzen vorerst nicht berücksichtigt wurden. Für die Verwendung dieser Formel über Testzwecke hinaus wird empfohlen, die Berechnung der Formel mit unterschiedlicher Software durchzuführen und gegenseitig zu validieren. Bei etwaigen Fehlern der verwendeten Funktion in Microsoft Excel gilt das Ergebnis dieser Arbeit als nichtig.

Die in dieser Arbeit verwendeten Bauteile wurden zwar mit Sorgfalt ausgewählt, jedoch schließt dies nicht aus, dass es besser geeignete Sensoren oder Verstärker am Markt gibt. Beispielsweise stößt man bei der Suche nach geeigneten Verstärkerschaltungen für Ultraschallsignale auch auf eigens dafür entwickelte Verstärker-ICs. Diese bringen die benötigten, aber auch viele zusätzliche Funktionen mit sich, sind jedoch auf Grund des hohen Preises nicht in die Auswahl miteinbezogen worden.

Beide eingesetzten Ultraschallsensoren haben eine Resonanzfrequenz von 40 kHz. Die Tatsache, dass Tiere, wie beispielsweise Hunde und Katzen, Signale mit dieser Frequenz hören können, wurde für die Tests dieser Arbeit außer Betracht gelassen, da nur im Beisein des Autors dieser Arbeit getestet wurde. Auch wenn der Signaltyp Ultraschall für die Distanzbestimmung nicht weiter empfohlen wird, wird dazu geraten, für Ultraschallübertragungen in Bereichen, wo sich Tiere aufhalten können, eine Frequenz außerhalb deren Hörspektrum zu wählen.

Die final verwendeten Sensoren der Infrarotschaltungen funktionieren laut den Tests verlässlich bis zu einem Sichtwinkel von $\pm 45^\circ$. Daraus lässt sich der Rückschluss ziehen, dass man vier Sender und Empfänger pro Leuchte verbauen muss, um eine Kommunikation über volle 360° abdecken zu können. Durch die Verwendung von Bauteilen mit besserer Abstrahlcharakteristik könnte diese Anzahl verringert werden.

6 AUSBLICK

Für die Weiterführung dieser Untersuchung gibt es einige Punkte, die berücksichtigt werden sollten. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen, um eine nahtlose Fortführung gewährleisten zu können.

Da mögliche Einflüsse der Umgebung auf die Messungen unterbunden wurden, wie beispielsweise direkte Sonneneinstrahlung auf den Phototransistor oder akustische Störsignale im Bereich der Resonanzfrequenz des Ultraschallsensors, ist die Bearbeitung von Themen wie Schutzmechanismen oder Störunterdrückung in Bezug auf die Signalübertragung mit Infrarot für die Weiterführung dieser Arbeit unbedingt notwendig. Mit Hilfe von Filtern können beispielsweise Störstrahlungen vom Phototransistor abgehalten und so eine Beeinflussung der Messung verhindert werden.

Übertragungstests sollen daraufhin auch in realen Umgebungen der geplanten Anwendung durchgeführt werden, da erst mit den daraus erlangten Messergebnissen eine vertretbare Aussage bezüglich der Verwendbarkeit von Infrarotsignalen zur Distanzbestimmung über die Signaldämpfung getätigt werden kann.

Bezüglich der Genauigkeit ist anzumerken, dass die mitgebrachte, aber nicht kontrollierbare Verstärkung von Phototransistoren ein kleiner Nachteil dieser Bauteilkategorie ist. Für exakte Distanzbestimmungen wird somit empfohlen, Photodioden für die Messung der IRS auf Empfängerseite einzusetzen. Dabei sind in der Regel jedoch auch aufwändigere Verstärkerschaltungen bzw. bessere Bauteileigenschaften der Verstärker notwendig.

Die Sender- und Empfängerschaltung für die Infrarotübertragung sind Testversionen, welche in Bezug auf den leistungstechnischen Wirkungsgrad sowie den Schaltungsaufbau für weitere Tests und in Hinblick auf einen Prototyp zu optimieren sind. Die XAL GmbH beschäftigt sich intensiv mit Ansteuerungen von LEDs, wodurch das notwendige Know-how für eine Weiterentwicklung jedenfalls vorhanden ist.

7 LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (5)

Held, Gilbert (2009): *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*, Auerbach Publications, Boca Raton

Lerch, Reinhard; Sessler, Gerhard; Wolf, Dietrich (2009): *Technische Akustik - Grundlagen und Anwendungen*, Springer-Verlag, Berlin

Sorge, Georg (2013): *Faszination Ultraschall*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Wohlrabe, Frank (2002): *Infrarot-Datenübertragung*, Elektor-Verlag, Aachen

Wolz, Susanne (2013): *Ultraschall - Aufbau eines Demonstrationsexperiments für den Schuleinsatz*, Freiburg

Online-Quellen (13)

Spektrum Akademischer Verlag (1998): *Lexikon der Physik - Steradian*
<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/steradian/13821> [Stand: 13.09.2017]

Internetservice Kummer + Oster *GbRRaumwinkel in Steradian berechnen*
<https://rechneronline.de/winkel/raumwinkel.php> [Stand: 13.09.2017]

IG Nachtflugverbot Leipzig/Halle e.V. *Kleines Lexikon*
<http://www.nachtflugverbot-leipzig.de/lexikon.php> [Stand: 14.09.2017]

Texas Instruments Incorporated *Schnittstellen-IC - Transceiver Texas Instruments MAX232N RS232 2/2 PDIP-16*
http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/152281-da-01-en-IC_MAX232N__DIP16__TID.pdf [Stand: 27.09.2017]

Elektronik-Kompendium.de *NE555 als astabile Kippstufe / astabiler Multivibrator*
<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0310131.htm> [Stand: 17.11.2017]

OSRAM Opto Semiconductors GmbH *SFH 4770S*
<https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2496364/SFH%204770S.pdf> [Stand: 03.12.2017]

LUMITOS GmbH *sentropenexponent*
<http://www.chemie.de/lexikon/sentropenexponent.html> [Stand: 22.01.2018]

Aschenbrenner, F. *Industrielle Elektronik - Lehrbehelf für die Vorlesungen*
http://institute.unileoben.ac.at/etechnik/Ger/Lehre_G/Skripten_G/Files_G/E2B/E2B_Skriptum.pdf [Stand: 14.09.2017]

Biard, James; Okon, Thomas (2015): *The First Practical LED*
<http://www.edisontechcenter.org/lighting/LED/TheFirstPracticalLED.pdf> [Stand: 13.09.2017]

Hollandt, Jörg (2009): *Infrarotstrahlung*

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/atome/elektromagnetisches-spektrum/infrarotstrahlung/> [Stand: 12.09.2017]

Kokoschka, Siegfried (2003): *Grundlagen der Lichttechnik*

[http://www.lti.kit.edu/rd_download/Grundlagen_der_Lichttechnik\(1\).pdf](http://www.lti.kit.edu/rd_download/Grundlagen_der_Lichttechnik(1).pdf) [Stand: 15.09.2017]

Murmann, Lydia; Ryder, Peter *Größen zur Beschreibung von Schall*

<http://www.idn.uni->

[bremen.de/cvpmm/content/wellen/show.php?modul=3&file=64&right=we_r_schallgroessen3.html](http://www.idn.uni-bremen.de/cvpmm/content/wellen/show.php?modul=3&file=64&right=we_r_schallgroessen3.html) [Stand: 10.09.2017]

Wagner, Patrick *Licht, Farben und Farbmodelle (RGB, HSB, CMYK)*

<http://www.filmscanner.info/Farbmodelle.html> [Stand: 14.09.2017]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Frequenzspektren von Schall, Quelle: Sorge (2013), S. 16.	2
Abb. 2: Momentbild der Teilchen einer Longitudinalwelle, Quelle: Sorge (2013), S. 14. (leicht modifiziert).	3
Abb. 3: Zusammenhang von Schalldruck und Wellenlänge, Quelle: IG Nachtflugverbot Leipzig/Halle e.V., Online-Quelle [14.09.2017].....	3
Abb. 4: Schallfeld eines Ultraschall-Kolbenschwingers, Quelle: Sorge (2013), S. 24.	5
Abb. 5: Dämpfungskoeffizient α im Zusammenhang mit dem Wasserdampfpartialdruck bezogen auf den Gesamtdruck, Quelle: Lerch/Sessler/Wolf (2009), S. 46.	9
Abb. 6: Spektrum des sichtbaren und nicht sichtbaren Lichtes, Quelle: Wagner, Online-Quelle [14.09.2017].....	11
Abb. 7: Zeichnung mit Radius r und Fläche A zur Erklärung von Steradian, Quelle: Internetservice Kummer + Oster GbR, Online-Quelle [13.09.2017].	12
Abb. 8: Kennlinie von Durchlassspannung zu Durchlassstrom der IR-Diode SFH4770S, Quelle: OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Online-Quelle [03.12.2017].	14
Abb. 9: Darlington-Transistorschaltung zur Stromverstärkung des Signals beim Infrarot-Sender, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 75.	15
Abb. 10: Grundschialtung einer Photodiode mit Verstärker, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 36.	16
Abb. 11: Grundschialtungen eines Phototransistors, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 26.	16
Abb. 12: Verstärkerschialtung für Phototransistor mit OPV, Quelle: Wohlrabe (2002), S. 288. (leicht modifiziert).	17
Abb. 13: Kennlinie eines Photoelements, Quelle: Aschenbrenner, Online-Quelle [14.09.2017].	17
Abb. 14: Aufbau einer Infrarot-Sendediode in GaAs-Technologie, Quelle: Sorge (2013), S. 15.	18
Abb. 15: MAX232-Standardbeschialtung, Quelle: Texas Instruments Incorporated, Online-Quelle [27.09.2017] (leicht modifiziert).	23
Abb. 16: Messaufbau mit MAX232, Quelle: Eigene Darstellung.	23
Abb. 17: Aufbau von zwei zueinanderstehenden Ultraschallsensoren vom Typ 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.	24
Abb. 18: Empfangssignal der Übertragung zweier Ultraschallsensoren vom Typ 400PT16P mit hörbarem 10 kHz Sendesignal, Quelle: Eigene Darstellung.	24
Abb. 19: Empfangssignal der Übertragung zweier Ultraschallsensoren vom Typ 400PT16P mit 40 kHz Sendesignal, Quelle: Eigene Darstellung.	25
Abb. 20: Einstellungen am Funktionsgenerator für ein rechteckiges 40 kHz Signal, Quelle: Eigene Darstellung.	25
Abb. 21: 40 kHz Rechteck-Signal vom Funktionsgenerator, Quelle: Eigene Darstellung.	26

Abb. 22: Beschaltung vom NE555 für 40 kHz Signal, Quelle: Elektronik-Kompendium.de, Online-Quelle [17.11.2017].....	26
Abb. 23: Ausgangssignal NE555 mit berechneten Bauteilwerten, Quelle: Eigene Darstellung.....	27
Abb. 24: Code-Zeilen zur Erzeugung eines 40 kHz Signals mit dem Arduino UNO, Quelle: Eigene Darstellung.	28
Abb. 25: Messung des Ausgabesignals vom Pin 3 am Arduino UNO Board, Quelle: Eigene Darstellung.	28
Abb. 26: Ausgabesignal vom Pin 3 am Arduino UNO Board, Quelle: Eigene Darstellung.	29
Abb. 27: Messaufbau mit MAX232 und Arduino UNO, Quelle: Eigene Darstellung.	30
Abb. 28: Ausgangssignal am 400PT16P mit Arduino als Signalgeber und MAX232 zur Verstärkung (+ 5 V), Quelle: Eigene Darstellung.	30
Abb. 29: MAX232 Beschaltung mit Arduino Board und Ultraschallsensor, Quelle: Eigene Darstellung. ...	31
Abb. 30: Ausgangssignal am 400PT16P mit Arduino als Signalgeber und MAX232 zur Verstärkung (\pm 12 V), Quelle: Eigene Darstellung.	31
Abb. 31: Schaltplan mit Arduino als Signalgeber, FAN2337 zur Verstärkung und dem Ultraschallsensor 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Abb. 32: Messaufbau mit Arduino als Signalgeber, FAN2337 zur Verstärkung und dem Ultraschallsensor 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Abb. 33: Ausgangssignal am 400PT16P mit Arduino als Signalgeber und FAN3227 zur Verstärkung, Quelle: Eigene Darstellung.....	33
Abb. 34: Schaltplan der empfängerseitigen Ultraschall-Verstärkung mit INA128P, Quelle: Eigene Darstellung.	34
Abb. 35: Diagramm der Ultraschallmessungen mit 400PT16P, Quelle: Eigene Darstellung.....	36
Abb. 36: Infrarot-LEDs aus- und eingeschaltet (links: SFH4770, rechts: VSMY98545), Quelle: Eigene Darstellung.	39
Abb. 37: Schaltplan zum Betreiben der Infrarot-LEDs, Quelle: Eigene Darstellung.	39
Abb. 38: Senderschaltung mit SFH4770 und Hochleistungswiderstand, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abb. 39: Schaltplan der Empfängerschaltung des Infrarotsignals mit Phototransistor und OPV, Quelle: Eigene Darstellung.	41
Abb. 40: PWM-Konfiguration am DC Power Analyzer für die Infrarot-Senderschaltung, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abb. 41: Schaltplan der Transistorschaltung zum Senden des Infrarotsignals, Quelle: Eigene Darstellung.	43
Abb. 42: Diagramm der Infrarotmessungen von VSMY zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Abb. 43: Diagramm der Infrarotmessungen von SFH4770 zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung. ...	46

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Typische Werte für den Adiabatenexponenten, Quelle: In Anlehnung an LUMITOS GmbH, Online-Quelle [22.01.2018].....	6
Tabelle 2: Messungen mit 400PT16P und 400EP14 in den Abständen 1 m, 2 m und 3m, Quelle: Eigene Darstellung.	34
Tabelle 3: Messungen der Signalübertragung des 400PT16P bei 0°, 22,5° und 45° Verschiebung, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Tabelle 4: Messungen mit YSMY zu VEMT3700 und VEMT2023 in den Abständen 1 m, 2 m und 3 m, Quelle: Eigene Darstellung.....	42
Tabelle 5: Messungen mit SFH4770 und VEMT2023 in den Abständen 1 m, 2 m und 3 m, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Tabelle 6: Messungen der Signalübertragung von VSMY zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung. ...	44
Tabelle 7: Messungen der Signalübertragung von SFH4770 zu VEMT2023, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Tabelle 8: Abweichungen der Ultraschallmessungen bei 0° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.	48
Tabelle 9: Abweichungen der Infrarotmessungen bei 0° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.	48
Tabelle 10: Wertungsschlüssel für Bereiche der Abweichungen bei 0° Verschiebung, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Tabelle 11: Abweichungen der Ultraschallmessungen bei 22,5° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Tabelle 12: Abweichungen der Infrarotmessungen bei 22,5° in Bezug auf die Normkurve, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Tabelle 13: Abweichungen der Ultraschallmessungen zwischen 0,5 und 5 m, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Tabelle 14: Abweichungen der Infrarotmessungen zwischen 0,5 und 5 m, Quelle: Eigene Darstellung...	51
Tabelle 15: Preisliste der Bauteile für die Infrarotübertragung, Quelle: Eigene Darstellung.....	51
Tabelle 16: Preisliste der Bauteile für die Ultraschallübertragung, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Tabelle 17: Wertungsschlüssel für Kostenbereiche, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Tabelle 18: Bewertungsmatrix, Quelle: Eigene Darstellung.....	52

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ELKO	Elektrolyt-Kondensator
IDE	Integrated Development Environment (integrierte Entwicklungsumgebung)
IRS	Infrarotstrahlung
LED	Leuchtdiode
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
OPV	Operationsverstärker
PWM	Pulsweitenmodulation
V _{PP}	Peak-to-Peak Voltage (Spitze-Spitze-Spannung)