

Konzeption und Realisierung eines Personenzählsystems mit Hilfe eines
Radarsensors

T3100

des Studiengangs Elektrotechnik
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

von

Thilo Windemuth

Abgabedatum: 23.01.2022

Bearbeitungszeitraum	27.09.21 – 19.12.21
Matrikelnummer, Kurs	3873765
Ausbildungsfirma	Infineon Technologies AG, Neubiberg
Gutachter der Dualen Hochschule	Dr. Ing, Patrick Köberle

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine T3100 mit dem Thema Konzeption und Realisierung eines Personenzählsystems mit Hilfe eines Radarsensors selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Neubiberg

23.01.2022

T. Windemuth

Ort

Datum

Unterschrift

Abstract

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die technischen Grundlagen des Projektes „Konzeption und Realisierung eines Personenzählsystems mit Hilfe eines Radarsensors“ zu analysieren. Hierzu gehört die Testung des verwendeten „Position2Go Kits“, welches von der Infineon Technologies AG hergestellt wird. Es soll herausgefunden werden, ob sich das Projekt mit diesen Materialien umsetzen lässt. Außerdem sollen die physikalischen und messtechnischen Grundlagen, mit denen die Distanzmessung und das Personen lokalisieren funktioniert, erläutert werden.

Inhalt

Abstract	3
Inhalt.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellen.....	VI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
3 Technische Analyse der Distanzmessung.....	6
3.1 Komponenten.....	6
3.2 Test	7
3.2.1 Vorgehen	7
3.2.2 Innenraumtest.....	8
3.2.3 Freilufttest	11
3.3 FMCW-Radar	14
4 Fazit	18
Literaturverzeichnis	19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einweglichtschranke	3
Abbildung 2: Reflektionslichtschranke	3
Abbildung 3: Personenerkennungssystem mit Kamera	4
Abbildung 4: Rückseite mit Antennen	6
Abbildung 5: Abbildung 5: Radar GUI.....	7
Abbildung 6: Befestigung Sensor	8
Abbildung 7: Innenraum	8
Abbildung 8: Ergebnisse Messung Zuverlässigkeit	9
Abbildung 9: Ort der Freiluftmessung	11
Abbildung 10: Befestigung Sensor	11
Abbildung 11: Ergebnisse Messung Zuverlässigkeit	12
Abbildung 12: Linearer Chirp	14
Abbildung 13: FMCW-Radar Übersicht	15
Abbildung 14: Übersicht FMCW-Radar Aufbau	15
Abbildung 15: Frequenzspektrum	16
Abbildung 16: Dreieckförmige Frequenzänderung mit Dopplereffekt	17

Tabellen

Tabelle 1: Messergebnisse Innenraum Genauigkeit.....	10
Tabelle 2: Messergebnis Freiluftmessung Genauigkeit	13

1 Einleitung

Das 21. Jahrhundert steht ganz unter dem Zeichen der Digitalisierung. Sensoren und Mikrocontroller finden Einzug in das tägliche Leben. Die smarten Unterstützer mit ihren digitalen Sinnen finden sich fast überall. Temperatursensoren regeln die Heizungen, Smartwatches erfassen den Puls und Bewegungssensoren schalten das Licht an. Und dieser Trend ist noch lange nicht vorbei, im Gegenteil er scheint gerade erst richtig anzulaufen. In einer Zukunft mit einem Internet der Dinge (IoT), werden wohl noch viel mehr Alltagsgegenstände ihre Umgebung wahrnehmen und die Daten weitervermitteln können [1].

Die Realität konfrontiert die Menschheit allerdings mit immer neuen, ganz analogen, Herausforderungen. So erschien im Dezember 2019 das Coronavirus auf der Bildfläche und machte einschlägige Änderungen im Alltag notwendig. Eine der geläufigsten und erfolgreichsten Maßnahmen gegen die Krankheit ist die Beschränkung der Personenzahl in Innenräumen. Je nach Größe des Raumes ist nur eine bestimmte maximale Anzahl an Personen erlaubt. Die Schwierigkeit ist hierbei, diese Regel auch zu kontrollieren [2].

Ein zeitweise verbreitetes Vorgehen war es, diese Regel manuell umzusetzen. Hierzu muss jede Person in einem Innenraum einen bestimmten Gegenstand bei sich tragen. Hierbei ist es egal, um welchen Gegenstand es sich handelt, solange er einzigartig und erkennbar ist. Diese Gegenstände werden dann am Eingang bereitgestellt und müssen beim Verlassen wieder abgegeben werden. Die Anzahl der Gegenstände ist auf die maximal im Innenraum erlaubte Personenanzahl beschränkt. Wenn am Eingang kein solcher Gegenstand mehr vorhanden ist, muss die Person, die eintreten will, warten bis eine Person den Raum verlässt und so wieder ein Gegenstand und ein Platz im Innenraum frei wird.

Dieses Prozedere birgt allerdings viele Nachteile. Es ist aufwendig, teuer und fehleranfällig. Ein Mitarbeiter muss immer bereitstehen und die richtige Umsetzung kontrollieren. Die Gegenstände müssen bei jeder Weitergabe desinfiziert werden. Nicht selten kommt es außerdem vor, dass ein Kunde vergisst den Gegenstand abzugeben und somit die maximal mögliche Kapazität des Raumes nicht ausgenutzt werden kann.

Mithilfe der heutigen Technik und der Vielzahl an zur Verfügung stehender Sensoren, lässt sich dieses Problem auch kontaktlos und ohne Personalaufwand lösen. Dies ist das Ziel der Studienarbeit „Konzeption und Realisierung eines Personenzählsystems mit Hilfe eines Radarsensors“ dessen technische Grundlagen im Folgenden analysiert werden.

2 Stand der Technik

Es ist eine Methode gefordert, mit der mehrere Menschen also solche erkannt und gezählt werden können. Außerdem muss die Bewegungsrichtung erfasst werden. Dies soll mit Sensoren geschehen. Schon heute gibt es zahlreiche Personenzählsysteme.

Das wohl verbreitetste und einfachste Vorgehen ist der Einsatz von Lichtschranken.

Meist wird eine Einweglichtschranke verwendet (Abbildung 2). Ein Sender emittiert Licht mittels einer LED. Bei sichtbarem Licht beträgt die Wellenlänge dabei 660 nm. Häufig wird auf Infrarot Strahlung zurückgegriffen, welche für das

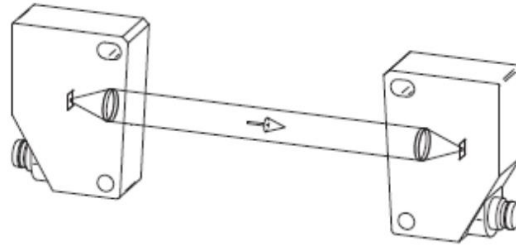


Abbildung 1: Einweglichtschranke

menschliche Auge nicht sichtbar ist. Hier beträgt die Wellenlänge dann 880 – 940 nm. Für hochgenaue Messungen werden Laserdioden verwendet. Der Sender kann dieses Licht mithilfe einer Photodiode oder eines Phototransistors detektieren. Wenn sich nun ein Objekt zwischen Sender und Empfänger befindet, ist die Lichtverbindung zwischen den beiden unterbrochen und der Empfänger detektiert kein Licht mehr.

Alternativ gibt es auch die Reflexionslichtschranke (Abbildung 1). Bei dieser befinden sich Empfänger und Sender im selben Gehäuse. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein Reflektor, welcher das Licht zurück wirft [3].

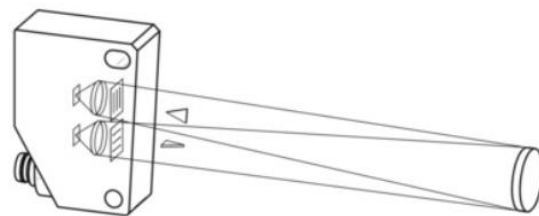


Abbildung 2: Reflexionslichtschranke

Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, mit Hilfe von Lichtschranken ein Personenzählsystem zu realisieren. Eine ist es, einen festen Ausgang und einen festen Eingang zu definieren und an beiden eine Lichtschranke zu positionieren. Jede Unterbrechung der Lichtschranke kann dann als eintretender oder austretender Mensch gewertet werden. Es kann zu Fehlern kommen, wenn Menschen nebeneinander gehen, oder sich nicht an Eingang und Ausgang halten.

Eine andere Möglichkeit ist es, ein Lichtgitter zu errichten. Dies sind mehrere Lichtschranken hintereinander. Wenn ein Mensch dieses Lichtgitter durchquert, unterbricht er nacheinander die verschiedenen Lichtschranken. So kann die Laufrichtung bestimmt werden, und es sind keine getrennten Ein- und Ausgänge mehr notwendig. Allerdings ist die Installation aufwendig und nebeneinander eintretende Menschen können zu Fehlern führen [4].

Eine andere häufig eingesetzte Technologie sind Kameras. Der schematische Aufbau eines solchen Personenzählsystems ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Kamera befindet sich überhalb des Eingangs und filmt die Menschen von oben.

Ein Bildverarbeitungsalgorithmus, welcher Menschen erkennen kann, wird nun auf die einzelnen

Bilder angewandt. Die den Kamerabereich durchquerende Person ist also auf mehreren aufeinanderfolgenden Bildern an ihrer jeweiligen Position detektierbar. Über diese Bilderstrecke lässt sich herausfinden, in welche Richtung die Person sich bewegt. Mit Hilfe dieser Daten kann ein Personenzählalgorithmus realisiert werden. Mehrere Personen können gleichzeitig erfasst werden [5, 6].

Auch beim autonomen Fahren müssen Menschen zuverlässig erkannt, lokalisiert und ihre Bewegungsrichtung erfasst werden. Hier konkurrieren zwei Technologien miteinander. LiDAR (Light Detection and Range) und RADAR (Radio Detection and Ranging). Die Funktionsweise der beiden Technologien ist sehr ähnlich. Strahlung wird emittiert und die Reflektion gemessen. Mit diesen Daten lassen sich Objekte erkennen, lokalisieren und die Geschwindigkeit bestimmen.

Der Unterschied ist, dass beim Radar elektromagnetische Wellen emittiert werden während LiDAR mit Licht arbeitet [7].

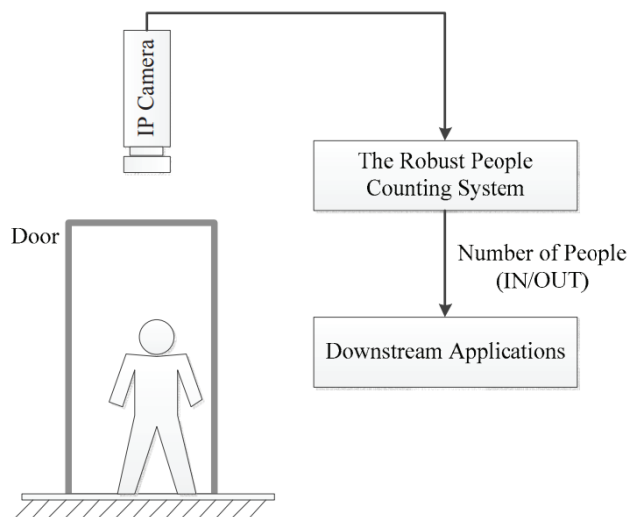


Abbildung 3: Personenerkennungssystem mit Kamera

LiDAR Sensoren, wie sie von vielen großen Autobauern, wie zum Beispiel Volkswagen oder Toyota, eingesetzt werden, sind sehr genau. Sie können die Umgebung bis auf wenige Zentimeter genau erfassen. Dafür ist ihre Reichweite vergleichsweise gering und der Preis sehr hoch. Bei schwieriger Witterung, wie zum Beispiel bei Nebel haben LiDAR Sensoren allerdings Schwierigkeiten [8].

RADAR-Sensor sind deutlich billiger als LiDAR Sensoren. Außerdem sind sie unempfindlich gegenüber dem Wetter. Elektromagnetische Strahlung wird von Schnee und Regen kaum beeinflusst. Die Technologie birgt außerdem den Vorteil, die Radialgeschwindigkeit eines Objektes mithilfe des Dopplereffektes bestimmen zu können. Der wohl bekannteste Elektroautohersteller Tesla, setzt aus diesen Gründen bei der Erkennung des Straßenverkehrs für Fahrerassistenzsysteme, auf Radar. Auch in dieser Studienarbeit wird das Problem mit Radarsensoren angesprochen [9].

3 Technische Analyse der Distanzmessung

Für diese Arbeit wurde das „Position2Go Development Kit“ von Infineon gewählt. Dieses basiert auf der Radartechnologie. Hiermit lassen sich mehrere Objekte gleichzeitig erkennen. Die Objekte können lokalisiert werden, indem die Distanz und der Winkel zum Sensor bestimmt wird. Außerdem lässt sich die Radialgeschwindigkeit der Objekte ermitteln. Der Radar funktioniert bei Distanzen zwischen 60 cm und 15 m [10].

3.1 Komponenten

Das „Position2Go Development Kit“ besteht aus einem Board, auf dem folgende Komponenten aufgelötet sind:

- BGT24MTR12:

Der 24GHz Radarchip besitzt eine sendende und zwei empfangende Antennen.

In Abbildung 4 ist die Rückseite des Sensor abgebildet. Auf der linken Seite befindet sich die sendende Antenne und auf der rechten die beiden empfangenden Antennen.



Abbildung 4: Rückseite mit Antennen

- XMC4700 Cortex-M4:

Dieser Mikrocontroller kann genutzt werden, um die Rohdaten direkt zu verarbeiten

- XMC4200:

Dies ist ein onboard Debugger mit einer UART Schnittstelle. Der Debugger lässt sich bei Bedarf abbrechen [10].

3.2 Test

Um zu kontrollieren wie gut die Distanzmessung funktioniert, wurde der Sensor zunächst auf Zuverlässigkeit und Genauigkeit getestet.

3.2.1 Vorgehen

Die Tests wurden sowohl im Innenraum als auch draußen durchgeführt. Hintergrund ist, dass in Innenräume die Radarstrahlung, von den Wänden und der Decke, massiv reflektiert wird und es so zu mehr Störungen kommt. Es wurde jeweils bei 3, 5 und 7 Metern gemessen. Hierzu wurde die jeweilige Distanz abgemessen und eine Person hat sich in der gewünschten Distanz hingestellt. Jede Messung wurde mindestens 25 Mal wiederholt. Außerdem wurde auch ohne Person gemessen, um aufzuzeichnen, was der Sensor sonst noch so erfasst (zb. Wände, Baum).

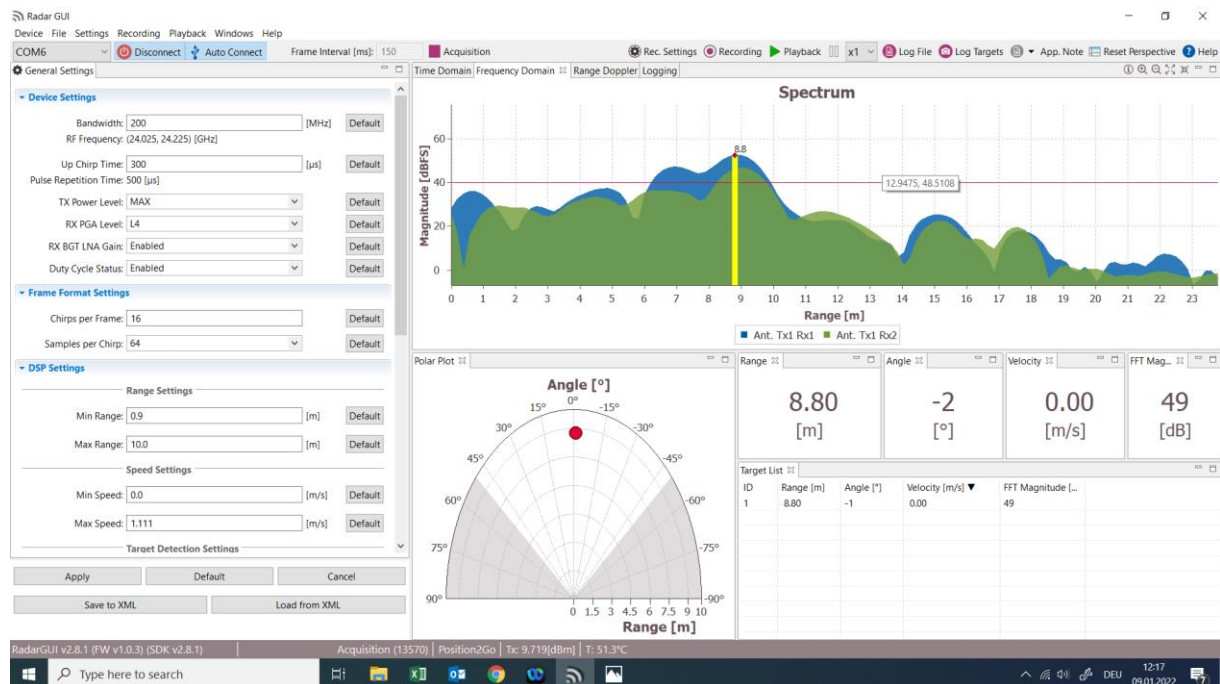


Abbildung 5: Abbildung 5: Radar GUI

Für die Tests wurde eine GUI verwendet, welche vom Hersteller zur Verfügung gestellt wird (Abbildung 5). Die Einstellungen wurden auf die standardmäßig im Datenblatt empfohlenen Werte gesetzt. Die GUI ist in der Lage selbstständig Objekt zu erkennen

und deren Distanz zu messen. In dem in Abbildung 5 dargestellten Beispiel wird ein Objekt in einer Distanz von 8.8 Metern erkannt.

3.2.2 Innenraumtest

Messaufbau:

Die Messung wurde in dem in Abbildung 7 dargestellten Raum durchgeführt. Die verschiedenen Distanzen wurden abgemessen und mit Klebestreifen markiert. An diesen Markierung hat sich die Testperson dann aufgestellt. Die hintere Wand befindet sich in einem Abstand von 8.8 Metern zum Sensor.

Der Sensor wurde wie in Abbildung 6 gezeigt befestigt. Er ist gerade in den Raum ausgerichtet und wurde zwischen den Messungen nicht bewegt.



Abbildung 7: Innenraum



Abbildung 6: Befestigung Sensor

Zuverlässigkeit:

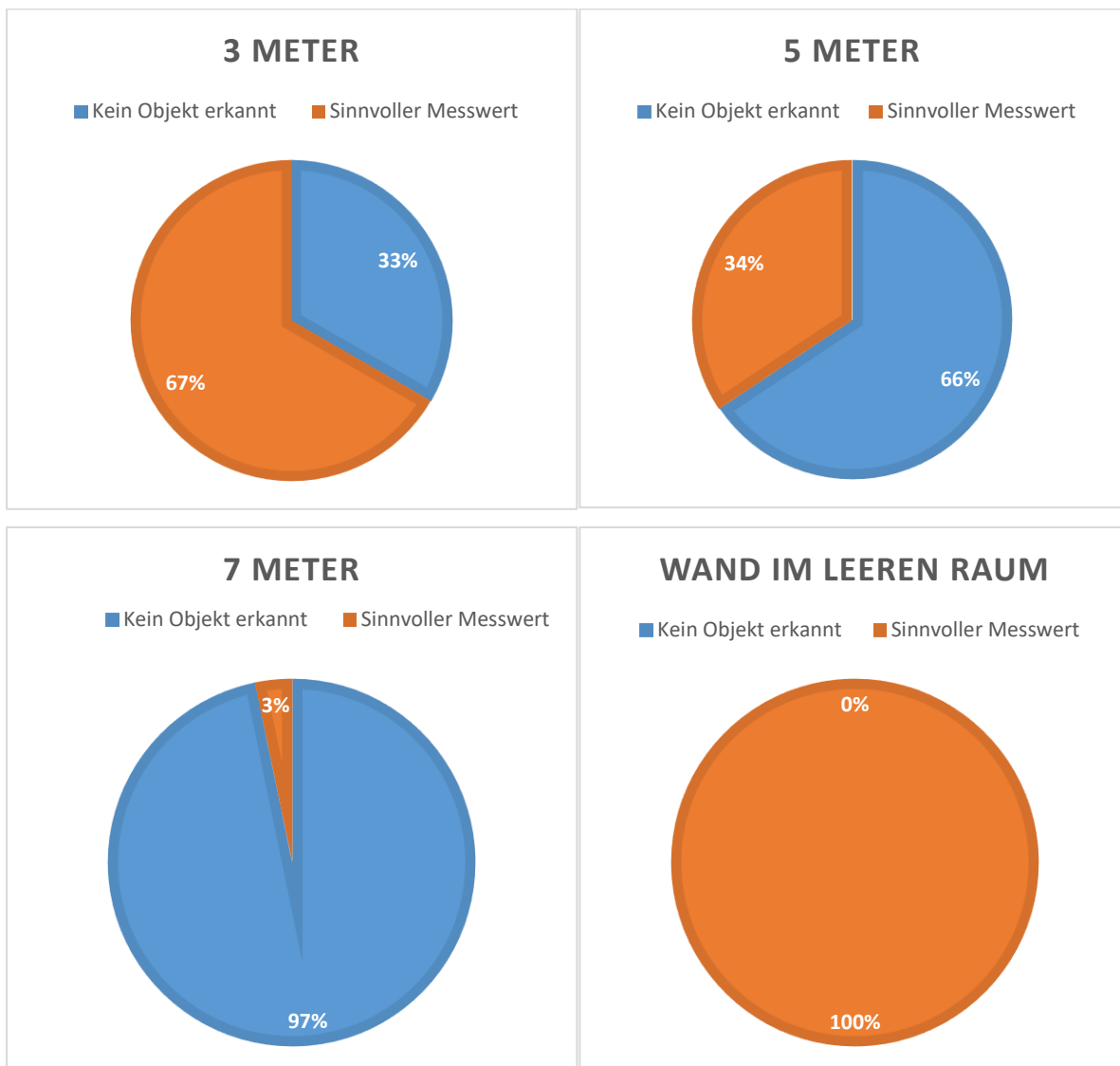


Abbildung 8: Ergebnisse Messung Zuverlässigkeit

Es lässt sich erkennen, dass die Zuverlässigkeit mit steigender Distanz abnimmt. Am zuverlässigsten funktioniert der Sensor bei 3 Metern Abstand. Allerdings wird auch hier bei 1 Drittel der Messungen die Person nicht erkannt. Dieses Problem muss gelöst werden, indem ein besserer Algorithmus entwickelt wird, welcher die Position einer Person auch dann nicht verliert, wenn einige Messungen lang keine Person erkannt wird.

Bei einer Distanz von 7 Metern wird nur bei 3 Prozent der Messungen eine Person erkannt. Grund dafür ist die nahe Wand, welche sich in 8.8 Metern Distanz befindet. Dies hängt mit der Methode zusammen, mit welcher Personen lokalisiert werden. Die

starke Reflektion der Wand überlagert die schwache Reflektion der Person. Auch hier müssen softwareseitig Verbesserungen durchgeführt werden.

Die Wand wird aufgrund der starken Reflektion sehr zuverlässig erkannt.

Genauigkeit:

Wahrer Wert	Durchschnitt	Standartabweichung von Mittelwert	Durchschnittliche Abweichung von realem Wert
3 m	3.19 m	0.097 m	0.06 m
5 m	5.29 m	0.77 m	0.30 m
7 m	7.31 m	0.00 m	0.31 m
8.80 m (Wand)	8.80 m	0.00 m	0.00 m

Tabelle 1: Messergebnisse Innenraum Genauigkeit

Die durchschnittliche Abweichung vom realen Wert ist bei einer Distanz von 3 Metern sehr gering. Bei 5 und 7 Metern ist sie etwas höher aber noch in einem verwendbaren Bereich. Die durchschnittliche Abweichung vom realen Wert ist bei den Distanzen 3 und 5 Meter niedriger als die Standardabweichung vom Mittelwert. Dies zeigt, dass der verschobene Mittelwert auf einige wenige Werte zurückzuführen ist, die sehr stark daneben liegen. Die Erfassung der Wand erfolgt perfekt.

3.2.3 Freilufttest

Messaufbau:

Die Freiluftmessung wurde in der in Abbildung 9 abgebildeten Einfahrt durchgeführt. Die Hecke befindet sich in einem Abstand von 8.25 Metern. Abbildung 10 zeigt die Befestigung des Sensors. Dieser ist in Richtung des Gullies ausgerichtet.



Abbildung 9: Ort der Freiluftmessung

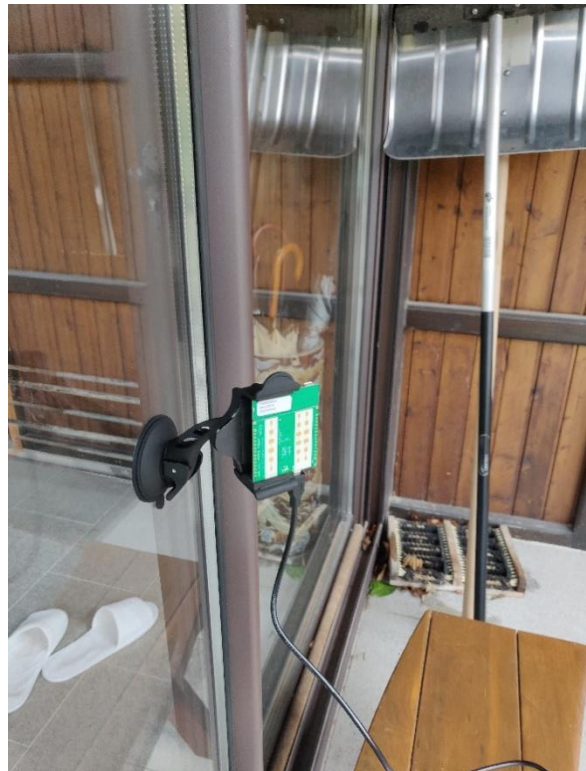


Abbildung 10: Befestigung Sensor

Zuverlässigkeit:

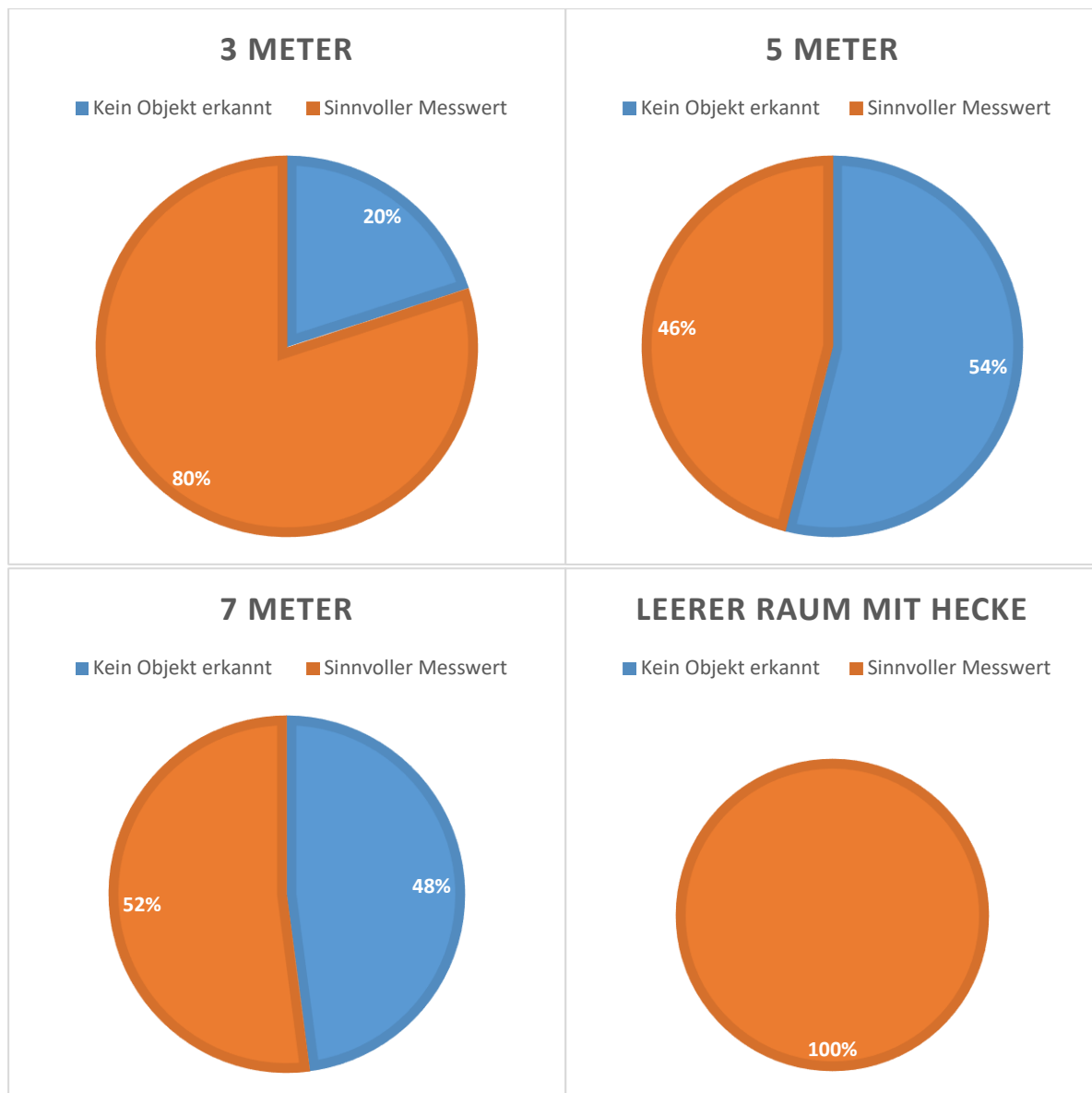


Abbildung 11: Ergebnisse Messung Zuverlässigkeit

Wie schon bei der Messung in Innenraum lässt sich beobachten, dass bei einem geringeren Abstand die Person deutlich zuverlässiger erkannt wird. Im Vergleich zum Innenraum, wird außerdem auch auf größere Distanzen, deutlich zuverlässiger eine Person erkannt.

Genauigkeit:

Wahrer Wert	Durchschnitt	Standardabweichung von Mittelwert	Durchschnittliche Abweichung von realem Wert
3 m	3.12 m	0.09 m	0.12 m
5 m	5.17 m	0.09 m	0.18 m
7 m	6.6 m	0.2 m	-0.39 m
8.25 m (Hecke)	8.25 m	0.00 m	0.00 m

Tabelle 2: Messergebnis Freiluftmessung Genauigkeit

Die durchschnittliche Abweichung vom realen Wert ist bei den Distanzen von 3 und 5 Metern sehr gering. Mit steigender Distanz werden die Messungen ungenauer. So ist die Abweichung bei 7 Metern schon deutlich größer.

3.3 FMCW-Radar

Um Objekte zu erkennen und die Distanz zu bestimmen, wird ein FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) Radar genutzt. Wie bei Radaren üblich, wird ein Signal gesendet und die Reflektion des Signales gemessen.

Beim FMCW Radar wird ein frequenzmoduliertes Signal, ein sogenannter Chirp, über eine Antenne versendet. Abbildung 12 zeigt einen Chirp mit einer linear ansteigenden Frequenz. Die beiden einstellbaren Parameter sind hierbei die Dauer des Chirps (T_c) und das Frequenzband (B), in dem sich der Chirp befindet.

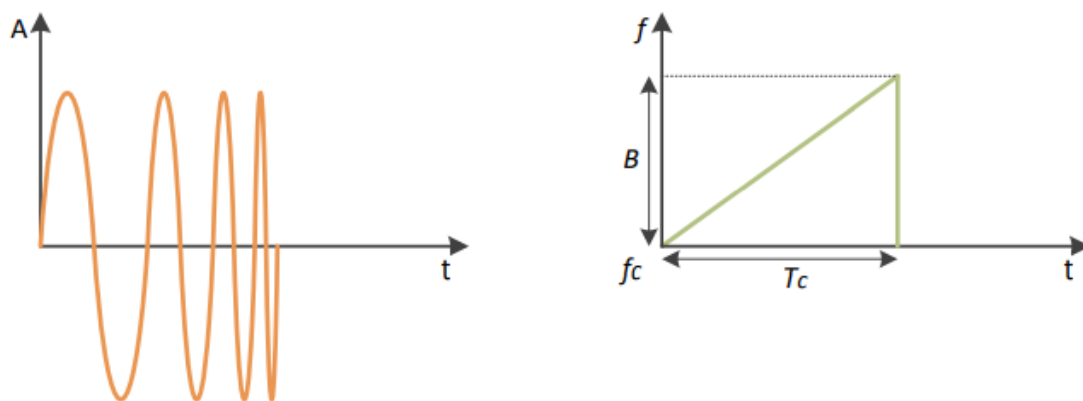


Abbildung 12: Linearer Chirp

Wenn das Signal empfangen wird, lässt sich außerdem einstellen wie oft ein solcher Chirp abgetastet werden soll.

Wenn nun ein Chirp gesendet wird, breitet er sich im Raum aus, wird reflektiert und wieder vom Sensor gemessen. Die Zeit, die das Signal unterwegs ist, ist dabei deutlich kleiner als die Dauer des Chirps. Der gesendete Chirp wird also zeitlich verschoben wieder empfangen. Dies ist in Abbildung 13 als t_d dargestellt. Da die Frequenz sich kontinuierlich ändert, besteht ein Frequenzunterschied zwischen dem gesendeten und dem empfangenen Signal (f_b). Aus diesem Frequenzunterschied lässt sich dann der Abstand des Objektes bestimmen, welches die Strahlung reflektiert hat. Dies geschieht über folgende Formel bestimmen:

$$R = \frac{C \cdot T_c \cdot f_b}{2 \cdot B}$$

R: Abstand C: Lichtgeschwindigkeit T_c : Chirpdauer f_b : Frequenzunterschied

B: Bandweite des Frequenzbandes

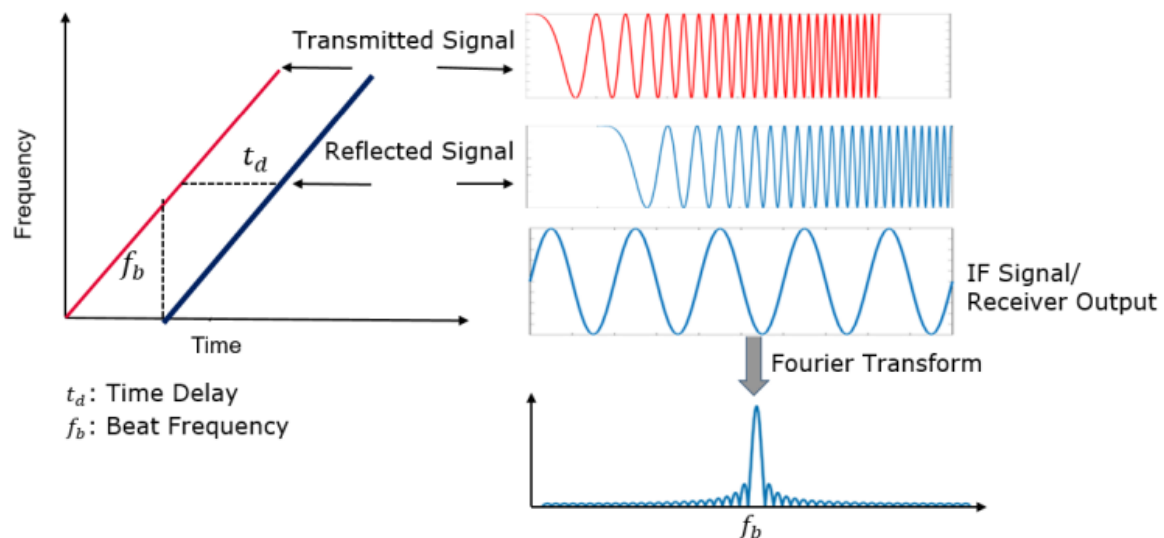


Abbildung 13: FMCW-Radar Übersicht

Um den Frequenzunterschied herauszufinden, müssen das gesendete und das empfangene Signal erst zu einem IF-Signal (intermediate frequency) verarbeitet werden. Hierzu wird ein multiplikativer Mixer genutzt. Das IF Signal schwingt mit der gesuchten Frequenz. Um diese nun noch herausfinden zu können, muss ein FFT (Fast Fourier Transformation) durchgeführt werden [11].

Abbildung 14 zeigt, wie ein FMCW-Radar aufgebaut ist. Zunächst wird der Chirp moduliert, verstärkt und mit der Antenne versendet. Das empfangene Signal wird ebenfalls verstärkt und dann im Mixer mit dem Signal verrechnet, welches momentan gesendet wird. Das IF-Signal wird gefiltert sodass nur der verwendete Frequenzbereich übrig bleibt und dann in digitale Daten umgewandelt. Diese können nun weiter verarbeitet werden.

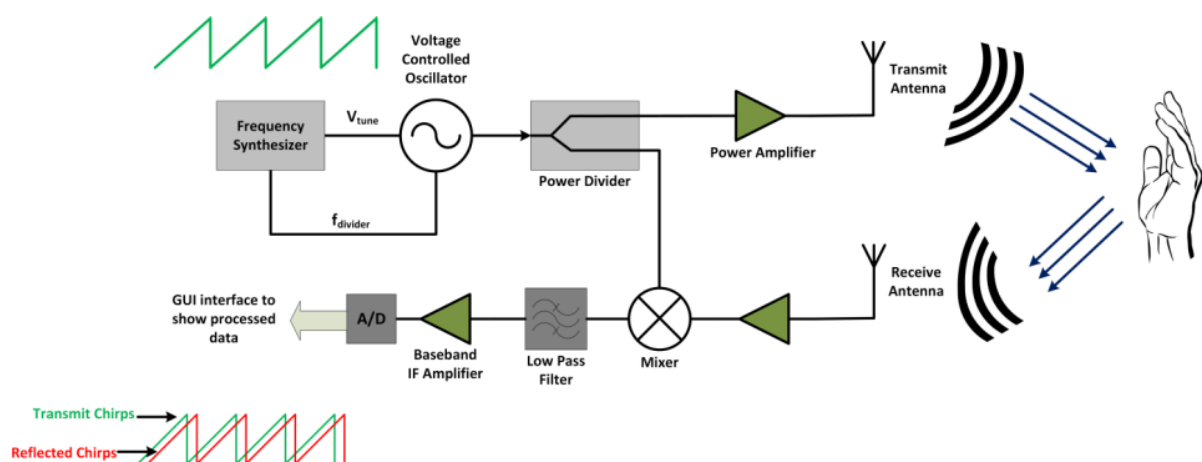


Abbildung 14: Übersicht FMCW-Radar Aufbau

In der Realität, reflektiert natürlich nicht nur ein Objekt, sondern viele Objekte gleichzeitig. Desto stärker die Reflektion, desto größer ist auch der Frequenzanteil im IF-Signal bei dieser Distanz. So ist es möglich zum Beispiel Menschen zu detektieren. Es wird eine Grenze definiert ab welcher ein Signalanteil so groß ist, dass sich dort wahrscheinlich ein Mensch befindet [11].

Abbildung 15 zeigt beispielhaft wie dies funktioniert. In diesem Fall gibt es zwei Empfangsantennen. Auf der X-Achse ist die jeweilige Frequenz direkt in Meter umgerechnet. Bei 3 und 8.8 Metern empfangen beide Antennen einen Signalanteil der über dem kritischen Wert (rote Linie) liegt. Hier wird dann das Maximum gesucht und dort das Objekt lokalisiert.

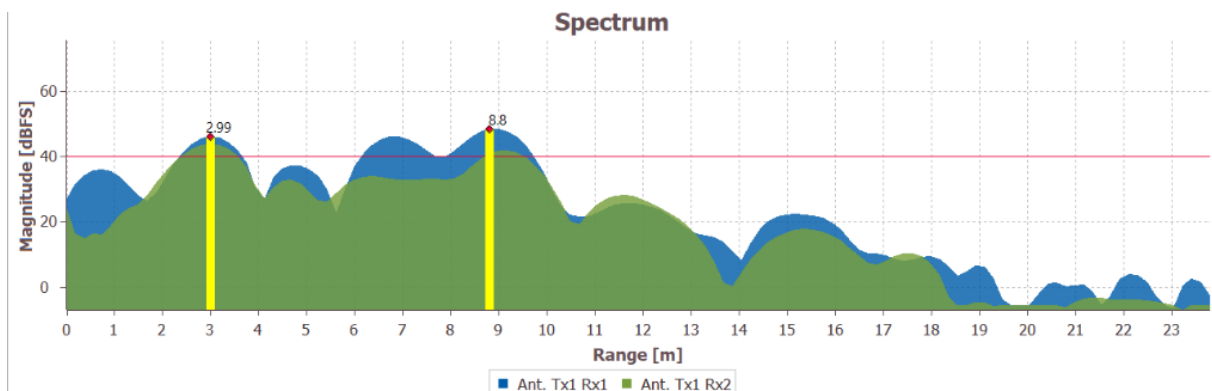


Abbildung 15: Frequenzspektrum

Ein Problem kann hierbei der Dopplereffekt werden. Wenn sich ein Objekt bewegt, ändert sich die Frequenz des reflektierten Signals. Beim FMCW-Radar bedeutet das, dass wenn sich ein Objekt beispielsweise in Radialrichtung auf den Sensor zubewegt die Frequenz ansteigt. Der ganze Chirp wird also bei konstanter Geschwindigkeit, des Objektes, nach oben verschoben. Dies würde zu einem Fehler bei der Distanzberechnung führen, da dadurch die Frequenzänderung zwischen den Signalen kleiner wird.

Die Lösung ist, die Frequenz des Chirps nicht nur linear steigen, sondern danach auch wieder linear fallen zu lassen. Die entspricht einer dreieckförmigen Frequenzänderung. In Abbildung 16 wird ein solches Signal dargestellt (rot).

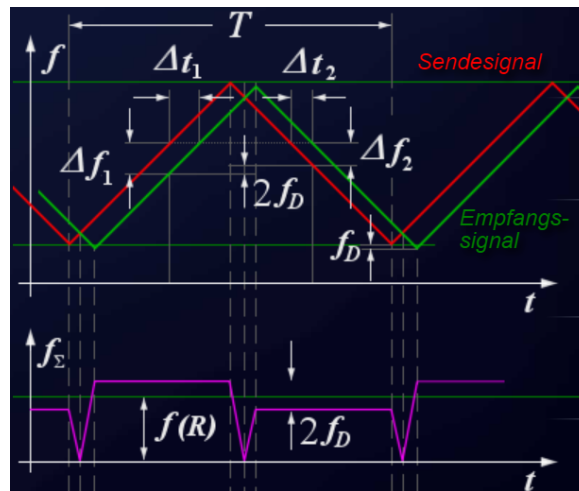


Abbildung 16: Dreieckförmige Frequenzänderung mit Dopplereffekt

Nun wird das Signal zeitversetzt wieder empfangen (grün). Es ist allerdings wegen dem Dopplereffekt nach unten verschoben (f_D). Der untere Graph (lila) zeigt nun den Frequenzunterschied der beiden Signale. Durch den Dopplereffekt, wird dieser während der steigenden Flanke um die Dopplerfrequenz f_D , größer als er eigentlich, aufgrund der Distanz, wäre. Bei der fallenden Flanke allerdings, dreht sich der Fehler um. Hier ist der Frequenzunterschied um f_D kleiner, als er eigentlich wäre. Somit kann man erkennen, dass es eine Dopplerfrequenz gibt und diese rausrechnen [12].

4 Fazit

In dieser Arbeit wurde untersucht ob sich ein das Thema „Konzeption und Realisierung eines Personenzählsystems mit Hilfe eines Radarsensors“ mit den technischen Möglichkeiten eines „Position2Go development Kit“ realisieren lässt. Beim Testen der des Sensors stellte sich heraus, das die Zuverlässigkeit der Personenerkennung relativ niedrig ist. Die Genauigkeit, der Abstandsmessung des Sensors hingegen, ist ausreichend gut für das Projekt. Die Mechanismen die hinter der Distanzmessung stecken wurden nachvollzogen. Hierdurch wurde klar, dass einige Schwächen des Sensors, beispielsweise bei der Personenerkennung, sich womöglich durch eigene Software beheben lassen. Dies lässt sich mit dem Kit, welches über einen Mikrocontroller verfügt, realisieren. Ein Personenzählsystem ist also realisierbar. Einige Grundfunktionen des Sensors reichen allerdings noch nicht aus und müssen durch eigene Software verbessert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] D. L., „Wie die Digitalisierung unseren Alltag verändert,“ 20 April 2020. [Online]. Available: <https://www.forschung-und-wissen.de/nachrichten/technik/wie-die-digitalisierung-unseren-alltag-veraendert-13373812>. [Zugriff am 23 Januar 2022].
- [2] „Pandemie der Coronavirus-Krankheit,“ United Nations, [Online]. Available: <https://www.euro.who.int/de/health-topics/health-emergencies/coronavirus-covid-19#:~:text=Am%2031.,2019%2DnCoV%E2%80%9C%20bezeichnet%20wurde..> [Zugriff am 23 Januar 2022].
- [3] „Funktionsweise und Technologie von Lichtschranken und Lichttastern,“ 23 January 2021. [Online]. Available: https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-und-technologie-von-lichtschranken-und-lichttastern/a/Know-how_Function_Lichtschranken-Lichttaster.
- [4] „Lichtschranke: Funktion, Arten,“ [Online]. Available: <https://wiki.induux.de/Lichtschranken#:~:text=%F0%9F%8E%93%20Die%20Lichtschranke%20ist%20ein,durch%20eine%20elektrisches%20Signal%20aufgezeigt.&text=Der%20Sender%20stellt%20die%20Lichstrahlenquelle,die%20Strahlung%20der%20Lichtquelle%20aufnimmt..>
- [5] E. P. Myint, „People Detecting and Counting System,“ in *2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies*, 2021.
- [6] P. Bamrungthai und S. Puengsawad, „Robust People Counting Using a Region-Based Approach for a Monoculat Vision System,“ in *International Conference on Science and Technology*, Samutprakarn, 2015.

- [7] A. Neal, „Fierce Electronics,“ 24 April 2018. [Online]. Available: <https://www.fierceelectronics.com/components/lidar-vs-radar>.
- [8] E. Voigt und M. Kremsreiter, *LiDAR in Anwendung*, Chemnitz: TU-Chemnitz, 2020.
- [9] „Radar - technische Erläuterung,“ [Online]. Available: <https://www.ramom.de/rechtsthemen/radarfalle/radar-technische-erlaeuterung.html>.
- [10] *24 GHz transceiver - BGT24MTR12*, München: Infineon Technologies AG, 2020.
- [11] *Position2Go software user manual*, München: Infineon Technologies AG, 2019.
- [12] C. Wolff, „Frequenzmoduliertes Dauerstrichradar (FMCW Radar),“ [Online]. Available: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequenzmodulierte%20Dauerstrichradar%C3%A4te.de.html>. [Zugriff am 23 Januar 2022].