

# Konzeption und Realisierung eines Personenzählsystems mit Hilfe eines Radarsensors

## Studienarbeit T3100

für die Prüfung zum

Bachelor of Engineering

Studiengang Elektrotechnik

Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

von

Joshua Rost

23.01.2022

Bearbeitungszeitraum:

27.09.2021 - 23.01.2022

Matrikelnummer, Kurs:

7081869, TEL19GR5

Ausbildungsfirma:

Infineon Technologies AG, München

Betreuer der Hochschule:

Dr. Patrick Köberle

Hinweis zum Urheberrecht:

Dieses Werk einschließlich seiner Teile ist **urheberrechtlich geschützt**. Jede Nutzung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Urhebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

# **Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit T3100 mit dem Thema

*Konzeption und Realisierung eines Personenzählsystems mit Hilfe eines Radar-sensors*

selbstständig 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.\*

*\*falls beide Versionen gefordert sind*

Stuttgart, 23.01.2022

---

Ort, Datum

Unterschrift

---

---

## **Hinweis zur Einschränkung**

Der Inhalt dieser Arbeit darf weder als Ganzes noch in Auszügen Personen außerhalb des Prüfungs- und Evaluationsverfahrens zugänglich gemacht werden, sofern keine anderslau-tende schriftliche Genehmigung des Autors und von Infineon Technologies AG, München vorliegt.

# Kurzreferat

In Anbetracht der pandemischen Lage durch COVID-19 soll die Anzahl der im Raum befindlichen Personen ermittelt werden. Diese Zählung soll anonym, berührungslos und automatisch funktionieren. Hierzu wird am Eingang des Raums ein Radar im 24-GHz ISM-Band platziert, der Personen und deren Bewegungsrichtung im Messbereich erkennt und somit die Anzahl der im Raum befindlichen Personen überwacht.

Es soll ein Algorithmus entwickelt werden, der anhand der vorverarbeiteten Positionsdaten eines Position2Go Radar Demo Kits die Personenzählung durchführt. Dafür muss erkannt werden, ob die jeweilige Person den Raum verlässt oder betritt. Mehrere Personen sollen gleichzeitig erkannt werden können, auch wenn sie beispielsweise aneinander vorbeigehen und kurzzeitig nicht als einzelne Personen erkannt werden können. Das Gesamtsystem soll zu jedem Zeitpunkt Auskunft geben können, wie viele Personen sich im Raum befinden.

Der erste Teil dieser Studienarbeit beschäftigt sich primär mit den theoretischen Grundlagen und der Funktionalität des Position2Go Radar Kits. Diese Studienarbeit wurde im Team mit Thilo Windemuth bearbeitet.

# Abstract

Considering the pandemic situation due to COVID-19, the number of people in the room shall be determined. This count shall be anonymous, contactless and automatic. For this purpose, a radar in the 24-GHz ISM-Band will be placed at the entrance of a room to detect people and their direction of movement in the measurement area and thus monitor the number of people in the room.

An algorithm is to be developed that performs people counting based on the preprocessed position data from a Position2Go radar demo kit. Therefore it must be detected whether the respective person is leaving or entering the room. It should be possible to detect several people at the same time, even if they for example pass each other and cannot be recognized as individual persons for a short time. The overall system should be able to provide information about how many people are in the room at any given time.

The first part of this paper deals primarily with the theoretical basics and the functionality of the Position2Go Radar Kit. This student research project was done in a team with Thilo Windemuth.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Technische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 FMCW-Radar Messung . . . . .	2
2.2 Winkelmessung mittels Phasenvergleich . . . . .	4
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>6</b>
<b>4 Validierung der Genauigkeit der Winkelmessung des Radars</b>	<b>7</b>
4.1 Winkelmessung des Herstellers . . . . .	8
4.2 Winkelmessung im Raum . . . . .	9
4.3 Winkelmessung im Freien . . . . .	11
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>14</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>15</b>

# Abkürzungsverzeichnis

<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform . . . . .	3
<b>FMCW-Radar</b>	Frequency Modulated Continuous Wave Radar . . . . .	2
<b>GUI</b>	Graphical User Interface . . . . .	7
<b>IR-UWB</b>	Impulse-Radio Ultra-Wideband . . . . .	6
<b>ISM-Band</b>	Industrial, Scientific and Medical Band . . . . .	3
<b>MMIC</b>	Monolithic Microwave Integrated Circuit . . . . .	7
<b>RX</b>	Receive Antenna . . . . .	2
<b>TX</b>	Transmit Antenna . . . . .	2
<b>ZF</b>	Zwischenfrequenz . . . . .	3

# Formelverzeichnis

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Blockdiagramm des FMCW-Radar [1] . . . . .	2
2.2	Grundlegendes Arbeitsprinzip des FMCW-Radar nach [1] . . . . .	3
2.3	Dreieckmodulation des FMCW-Radar [1] . . . . .	4
2.4	Arbeitsprinzip der Winkelmessung mittels Phasenvergleich . . . . .	5
4.1	Ausschnitt aus der Radar-GUI . . . . .	7
4.2	Aufbau der Versuchsmessungen des Herstellers . . . . .	8
4.3	Ergebnis der Winkelmessung des Herstellers [2] . . . . .	8
4.4	Schematische Darstellung des Messaufbaus . . . . .	9
4.5	Messplatz im Raum (l. Sensor und r. Messgebiet) . . . . .	10
4.6	Boxplot zur Winkelmessung im Raum . . . . .	10
4.7	Ergebnis der Messabweichung vom wahren Winkel im Raum . . . . .	11
4.8	Messplatz im Freien (l. Sensor und r. Messgebiet) . . . . .	12
4.9	Boxplot zur Winkelmessung im Freien . . . . .	12
4.10	Ergebnis der Messabweichung vom wahren Winkel im Freien . . . . .	13

# 1 Einführung

Radarsysteme sind heutzutage in sehr vielen Bereichen verbreitet. Radar, ein Akronym für „RAdio Detection And Ranging“, steht wörtlich für „Ortung und Abstandsmessung durch elektromagnetische Wellen“. Ursprünglich wurden Radare zur Ortung in der Schifffahrt und später in der Luftfahrt entwickelt. Durch die militärische Nutzung, vor allem im 2. Weltkrieg, ist die Forschung und Entwicklung von Radarsystemen weit fortgeschritten [3].

Heutige moderne Anwendungsbereiche von Radargeräten neben militärischen Zwecken beinhalten unter anderem Lichter im Smart Home, die auf bestimmte Gesten und Bewegungen reagieren, oder die Umgebungsüberwachung von Automobilen, wobei bei diesen Radar meist mit anderen Systemen wie Lidar oder Ultraschall kombiniert wird. Zudem werden Radarsysteme bei der Füllstandsmessung oder beim Wetterradar verwendet [2].

In Anbetracht der pandemischen Lage durch COVID-19 soll die Anzahl der im Raum befindlichen Personen ermittelt werden. Um das Infektionsrisiko zu senken, sollen bei der gleichzeitigen Nutzung eines Raums durch mehrere Personen die Anzahl beschränkt werden, sodass eine gewisse Mindestfläche pro Person gewährleistet ist. Diese Zählung der anwesenden Personen soll anonym, berührungslos und automatisch funktionieren.

Im Folgenden wird die Struktur der Arbeit erläutert. Zuerst werden die technischen Grundlagen der genutzten Radar Messung erklärt. Als nächstes wird der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Personenortung, -aufzeichnung und Datenverarbeitung mit Radar dargelegt. Danach wird im Rahmen einer technischen Machbarkeitsprüfung die Genauigkeit der Winkelmessung des erworbenen Radarsystems überprüft. Zuletzt folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

## 2 Technische Grundlagen

Radargeräte lassen sich in Impulsradargeräte und Dauerstrichradargeräte unterteilen. Beim Impulsradar werden nur einzelne Impulse gesendet und auf das Echo gewartet. Dies gibt dann einen Rückschluss auf die Entfernung des Objekts. In dieser Studienarbeit wird der Fokus auf das Dauerstrichradar gesetzt. In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der Frequency Modulated Continuous Wave Radar (FMCW-Radar) Messung (dt. Moduliertes Dauerstrichradar) und der Winkelmessung mittels Phasenvergleich erklärt.

### 2.1 FMCW-Radar Messung

Beim moduliertem Dauerstrichradar werden frequenzmodulierte sinusförmige Signale (sog. Chirps, siehe Abbildung 2.2) kontinuierlich von der Sendeantenne (engl. Transmit Antenna (TX)) gesendet. In Abbildung 2.1 ist ein Blockdiagramm zum Dauerstrichradar zu sehen. Wird das Signal von einem Objekt reflektiert, kann dieses Signal von der Empfangsantenne (engl. Receive Antenna (RX)) empfangen werden. Das empfangene Signal wird in einem Mixer mit der Referenzfrequenz bearbeitet und anschließend gefiltert und verstärkt.

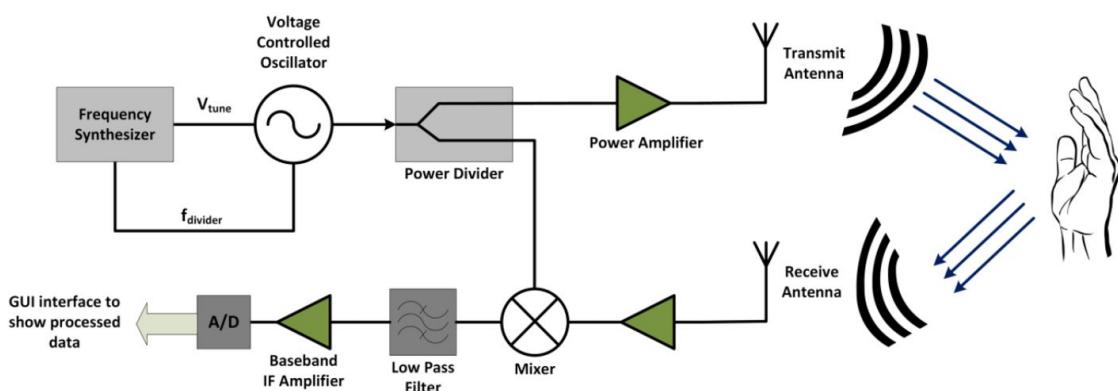


Abbildung 2.1: Blockdiagramm des FMCW-Radar [1]

In Abbildung 2.2 ist das grundlegende Arbeitsprinzip des Dauerstrichradars zu sehen. Mit Hilfe der Zeitverzögerung  $t_d$  zwischen Senden und Empfangen sowie des aktuellen Frequenzunterschieds  $f_{ZF}$  zwischen Sende- und Empfangssignal, der so genannten Zwischenfrequenz (ZF), kann ein Rückschluss auf Geschwindigkeit und Distanz des Objekts gewonnen werden. Durch eine Fast Fourier Transform (FFT) (dt. schnelle Fourier-Transformation) des ZF-Signals erhält man zudem weitere Informationen über den erfassten Bereich. Das ZF-Signal wird hier im I/Q-Datenformat (In-Phase-&-Quadrature) gespeichert, d.h. als jeweiliger cos- und sin-Teil des Signals.

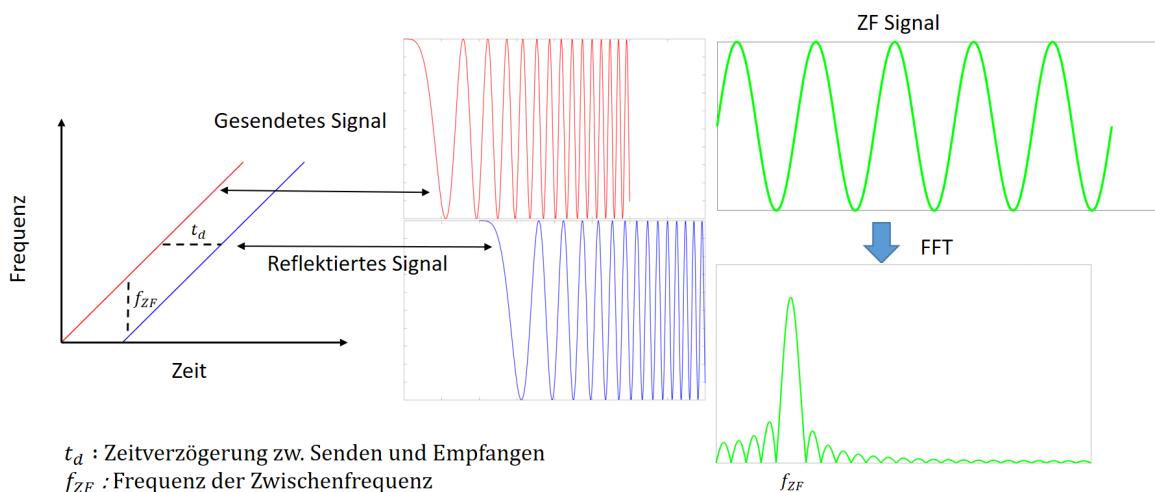


Abbildung 2.2: Grundlegendes Arbeitsprinzip des FMCW-Radar nach [1]

Die periodische Frequenzänderung ist dabei in dieser Studienarbeit linear an- und absteigend. Man spricht dann von einem dreieckförmigen Modulationsmuster. Dies ist in Abbildung 2.3 zu sehen. Bei dem Teil der ansteigenden Frequenz des Chirps handelt es sich um den sog. Up-Chirp, den fallenden Teil nennt man Down-Chirp. In der sog. Stand By Time wird die Frequenz des Signals gehalten. Die Dauer des Up-Chirp  $T_c$  ist in dem erworbenen System veränderlich (Standardwert:  $300 \mu\text{s}$ ), die Dauer des Down-Chirps und der Halte Zeit sind konstant bei jeweils  $100 \mu\text{s}$  [1]. Mehrere Chirps zusammen werden zu einem sogenannten Frame zusammengefügt. Die Frequenzrampen befinden sich im Bereich von 24,025 GHz bis 24,225 GHz. Damit arbeitet das Radarsystem lizenfrei in einem Industrial, Scientific and Medical Band (ISM-Band) [4]. Durch das dreieckförmige Modulationsmuster ist sowohl eine Abstandsmessung als auch eine Geschwindigkeitsmessung möglich.

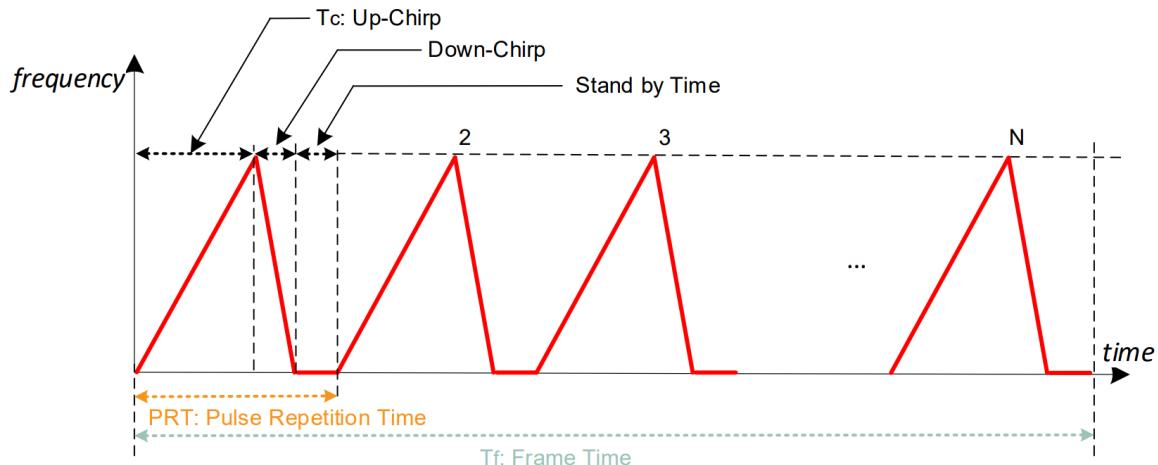


Abbildung 2.3: Dreieckmodulation des FMCW-Radar [1]

## 2.2 Winkelmessung mittels Phasenvergleich

Um den Winkel  $\theta$  zu dem Objekt in dieser Anwendung zu messen, werden mindestens 2 Empfangsantennen benötigt. Der Abstand zwischen den Antennen  $d$ , die aktuelle Wellenlänge  $\lambda$  und die Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen den Antennen sind erforderlich, um den Empfangswinkel zu berechnen. Die genannten Parameter und das vereinfachte Arbeitsprinzip hinter der Winkelmessung sind in Abbildung 2.4 zu sehen.

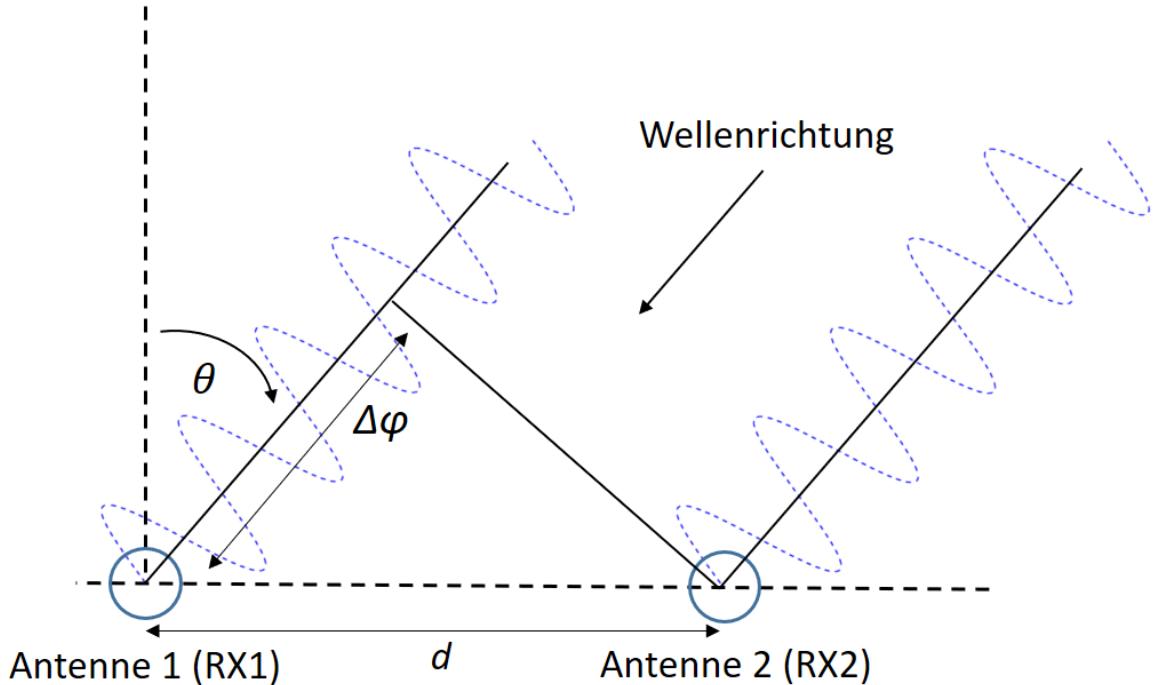


Abbildung 2.4: Arbeitsprinzip der Winkelmessung mittels Phasenvergleich

In Gleichung 2.1 wird der Zusammenhang der Parameter mit dem Winkel dargelegt.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda\Delta\varphi}{2\pi d}\right) \quad (2.1)$$

Die Phasendifferenz wird dabei aus der sogenannten Range-Doppler Map berechnet. Diese erhält man, wenn man sowohl eine FFT auf alle Samples (Abtastungen) eines Chirps (Fast-Time) anwendet sowie eine FFT jedes einzelnen Samples über alle Chirps in einem Frame (Slow-Time) zusammen. Wenn ein Objekt nun aus der Range-Doppler-Map identifiziert wird, wird dann die Differenz der gemessenen Phasen aus den 2 Range-Doppler-Maps der zwei Antennen genommen, um den Winkel zu berechnen.

### 3 Stand der Technik

Es gibt einige Vorteile von Radarsystemen in Gegenüberstellung mit anderen Systemen. Durch die Bedingung der Anonymität werden Systeme mit Kameras ausgeschlossen. Eine weitere Stärke von Radar ist die Robustheit gegenüber sichtbaren Störungen wie Regen, Staub und Nebel im Gegensatz zu optischen Systemen wie Infrarot oder Lidar [2, 3]. Radarsysteme funktionieren auch bei geringem Licht oder schlechten Lichtverhältnissen. Außerdem können sogar mit breitbandigen elektromagnetischen Wellen durch Wände hindurch geortet werden [5, 6]. Diese Messungen ohne direkte Sichtlinie sind mit bspw. Ultraschall- oder Kamerasystemen nicht möglich. Im Folgenden werden aktuelle Radar-Lösungen im Bereich der Personenortung, -aufzeichnung und -zählung präsentiert.

Da das aktuelle kommerzielle Interesse an diesen Anwendungen groß ist, wurde viel zur Personenzählung und -ortung geforscht und viele wissenschaftliche Artikel wurden dazu veröffentlicht. Dabei kann man generell zwischen zwei unterschiedlichen Ansätzen unterteilen: Die Zählung in einem Raum und die Zählung an Übergängen wie Türen oder Gängen [7].

Die Zählung in einem Raum ist verbunden mit Auflösungsschwierigkeiten. Bei zu vielen Menschen oder Störobjekten kann mit elektromagnetischen Wellen nicht viel erkannt werden. Zudem sind normalerweise viele Algorithmen und Nachbearbeitungen wie komplizierte Kalman-Filter und Algorithmen zu Maschinellem Lernen nötig, um nützliche Informationen zur Bewegung und Anwesenheit von mehreren Menschen zu erhalten [8]. Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf die Erkennung einzelner Menschen beim Durchgang von Gängen oder an Türen.

Bei der Erkennung von Personen mit Radarsystem werden meist entweder sogenannte Impulse-Radio Ultra-Wideband (IR-UWB)-Radarsystem, also mit gepulsten breitbandigen elektromagnetische Wellen, [7, 8, 9] verwendet oder Systeme mit FMCW-Radar [2, 10, 11]. Diese IR-UWB-Systeme haben eine höhere Auflösungsgenauigkeit, jedoch geringe Doppler-Informationen [11]. Allerdings können beide Systeme mit einer hohen Genauigkeit bis zu 4 Personen zählen (95,8% bei Choi et al. [9] und 85,4% bei Weiss et al. [11])

## 4 Validierung der Genauigkeit der Winkelmessung des Radars

In diesem Kapitel wird die Genauigkeit der Winkelmessung des Radars validiert. Dazu werden die Ergebnisse des Herstellers (Fa. Infineon Technologies AG) mit den Ergebnissen des Autors verglichen. Das erworbene Radarsystem (Name: Position2Go, zugehöriger Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC): BGT24MTR11) wurde mit einer vollständigen grafischen Benutzeroberfläche (Graphical User Interface (GUI)) geliefert. Mit dieser GUI (siehe Abbildung 4.1) wurden die folgenden Radarmessungen des Autors durchgeführt. Dabei wurden sowohl drinnen als auch draußen Messungen durchgeführt, um zu sehen, ob die Reflexionen der Wände und mögliche Störobjekte einen gravierenden Unterschied machen.

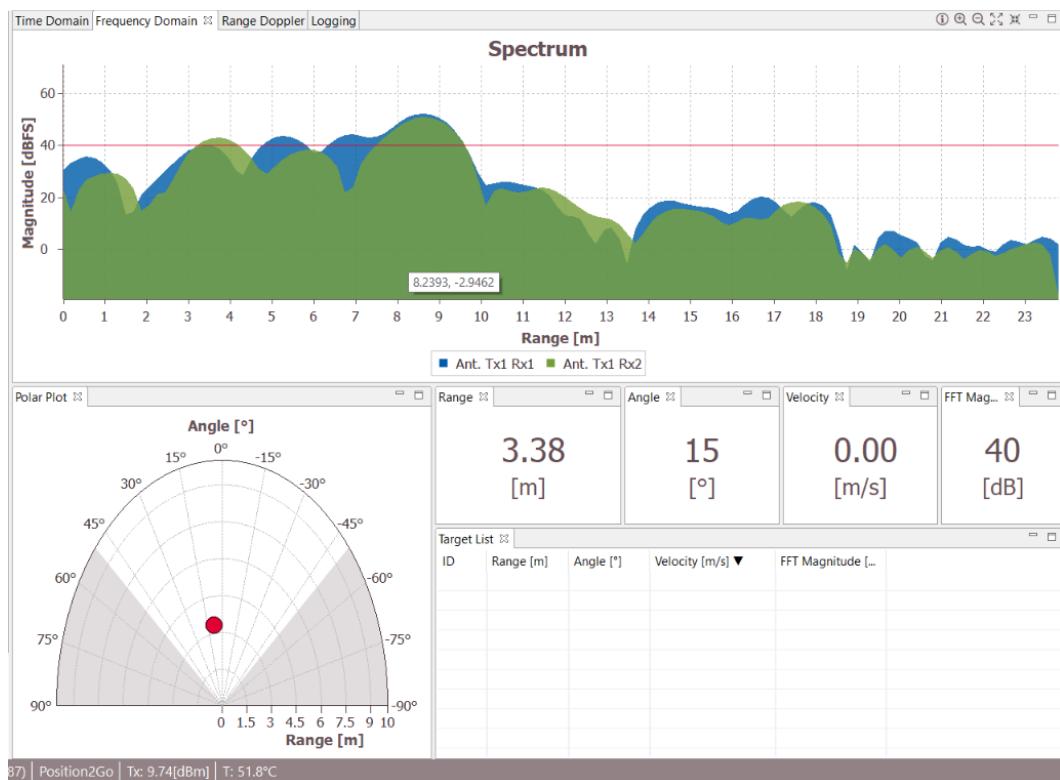
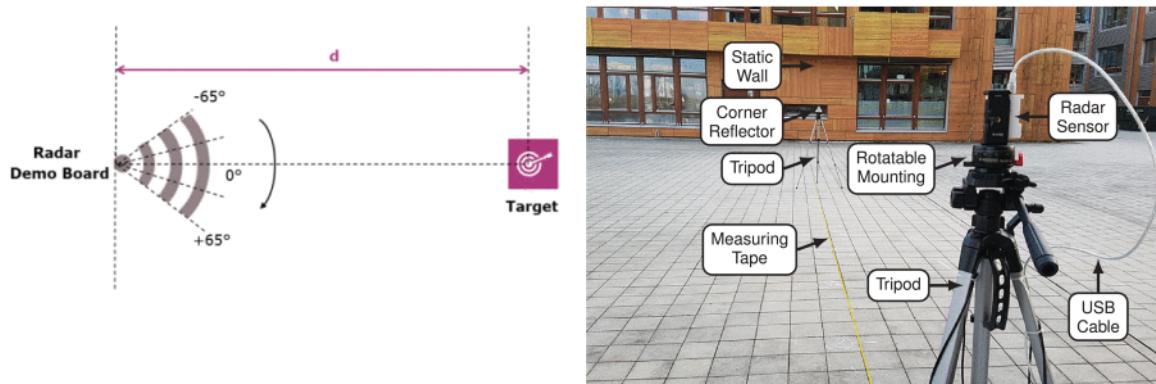


Abbildung 4.1: Ausschnitt aus der Radar-GUI

## 4.1 Winkelmessung des Herstellers

In Abbildung 4.2a wird der Versuchsaufbau des Herstellers schematisch dargestellt. Dazu wird in einem festen Abstand von 3 Metern ein hoch reflektierender Radarreflektor fest aufgestellt, das einer Ecke eines Würfels ähnelt („Corner Reflektor“). Dieses Objekt hat dabei einen Radarquerschnitt von  $1 \text{ m}^2$ . Der Vorteil des Radarreflektors ist die konstruktionsbedingte Rückstrahlung der elektromagnetischen Wellen in Richtung der Quelle. Um die Winkelmessung durchzuführen, wird der Radarsensor auf einem drehbaren Stativ in  $5^\circ$  Abständen zwischen  $-65^\circ$  und  $65^\circ$  rotiert (siehe Abbildung 4.2b). Der Versuchsaufbau steht im Freien und durch eine statische Wand in 20 Metern Entfernung reduzieren sich Interferenzen [2].



(a) Schematische Darstellung der Messung (b) Versuchsaufbau zur Messung des Herstellers im Freien [2]

Abbildung 4.2: Aufbau der Versuchsmessungen des Herstellers

In Abbildung 4.3 wird das Ergebnis der Winkelmessung durch den Hersteller präsentiert. Es wird der wahre Winkel im Vergleich zur Messabweichung zwischen gemessenen und wahren Wert aufgetragen. An den Randbereichen der Messung bei einem größerem Winkel als  $\pm 60^\circ$  beträgt die Abweichung  $10^\circ$ . Der Messbereich zwischen  $\pm 20^\circ$  wird hingegen sehr gut erfasst. Hier beträgt die maximale Abweichung  $4^\circ$  [2].

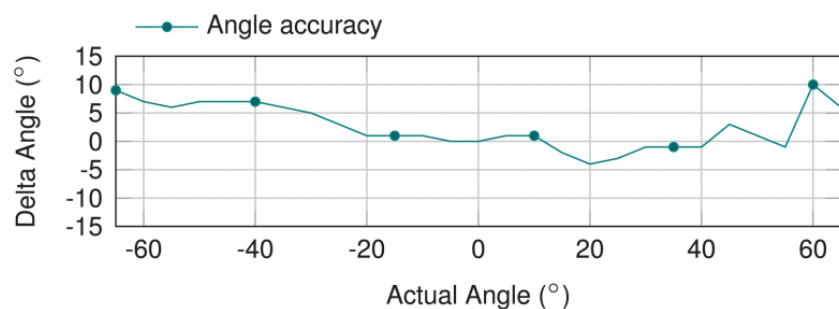


Abbildung 4.3: Ergebnis der Winkelmessung des Herstellers [2]

## 4.2 Winkelmessung im Raum

In Abbildung 4.4 wird der Messaufbau schematisch dargestellt. Im Abstand  $d$  von 3 Metern vom Radarsensor stellt sich ein Mensch hin (gemessen bei  $0^\circ$ ). Es wird dann 30 Mal die Auswertung der Radar-GUI begutachtet und der Winkel notiert. Anschließend wird der Winkel so geändert, dass der vertikale Abstand gleich bleibt. Insgesamt werden jeweils 30 Messungen mit den Winkeln  $-30^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  und  $30^\circ$  durchgeführt. Da die Messungen dynamisch sind, ändert sich der Wert der Winkelmessung kontinuierlich.

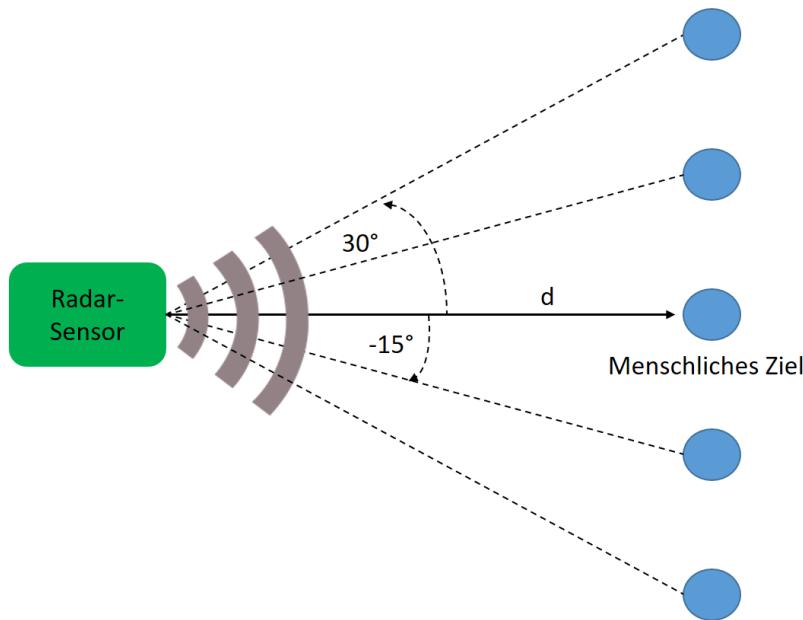


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Auf der linken Seite von Abbildung 4.5 ist die Montierung des Radarsensors zu sehen und auf der rechten Seite sieht man das Messgebiet. Rechts rot markiert sind die Markierungen für die unterschiedlichen Messungen. Die stationären Abstandsmessungen zur Markierung wurden mit Hilfe eines Zollstabs durchgeführt.



Abbildung 4.5: Messplatz im Raum (l. Sensor und r. Messgebiet)

In Abbildung 4.6 ist der Boxplot zu Winkelmessung im Raum dargestellt. Es wird deutlich, dass alle Messungen im Raum außer der  $0^\circ$  Messung eine sehr große Messverteilung und Streuung haben. Die Medianwerte bei allen Messungen sind grob in dem Zielbereich außer bei der  $30^\circ$  Messung. Eine Erklärung für die schlechte Messung im  $30^\circ$  Bereich könnte die nahe dahinterliegende dunkelblaue Wand sein. Da diese sehr stark reflektiert ist es möglich, dass der Mensch im geringen Abstand davor schlecht detektiert werden kann.

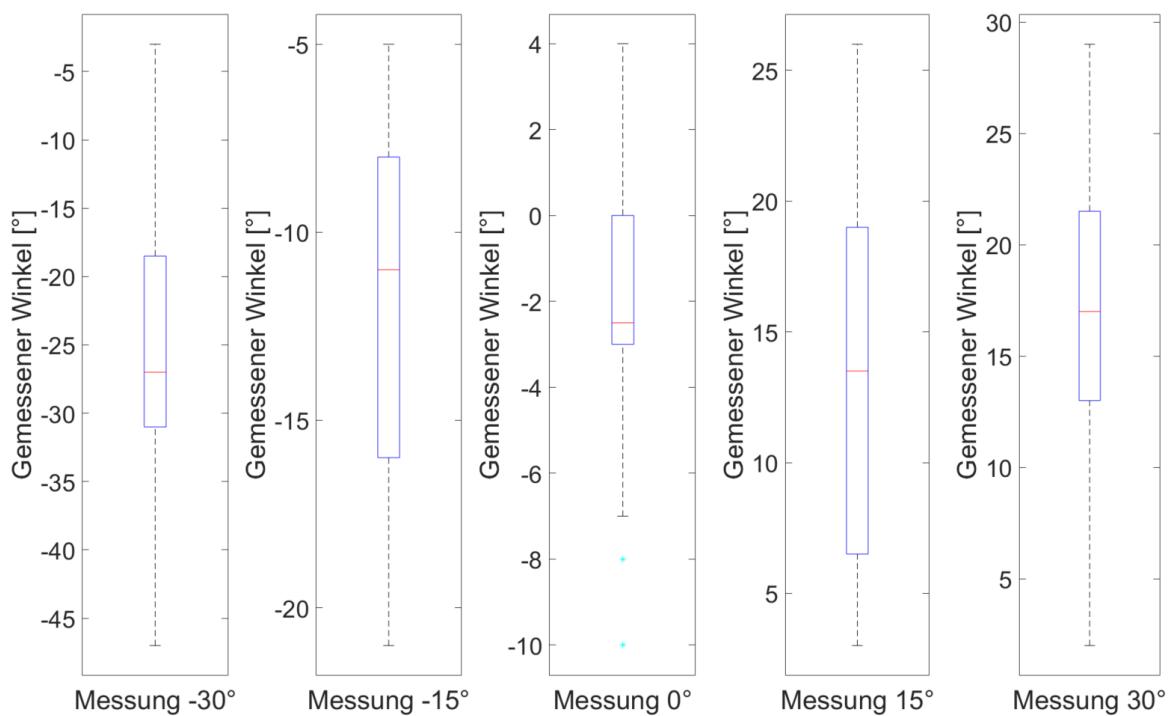


Abbildung 4.6: Boxplot zur Winkelmessung im Raum

Es muss noch erwähnt werden, dass von den insgesamt 150 Messungen im Raum bei 22 Messungen entweder ungültige Werte zurückgegeben wurden oder keine Ziel erkannt wurde, davon 9 bei der  $30^\circ$  Messung. Das heißt, dass 14,7% aller Messungen im Raum nicht korrekt erkannt wurden. Diese Rate gibt einen Rückschluss auf die Zuverlässigkeit des Sensors und könnte durch geeignete Signalverarbeitung und Filterung oder Anpassung der Radarparameter verbessert werden.

In Abbildung 4.7 ist die Abweichung des gemessenen Durchschnittswinkel vom wahren Winkel abgebildet. Von  $-30^\circ$  bis  $15^\circ$  beträgt diese durchschnittliche Abweichung maximal  $6^\circ$ , bei der  $30^\circ$  Messung ist der Durchschnittswert ( $17^\circ$ ) sehr weit ( $13^\circ$ ) entfernt vom wahren Wert. Dies zeigt auch eine Schwäche der Radarmessung auf (Messungen mit nahen Wänden und Störobjekten).

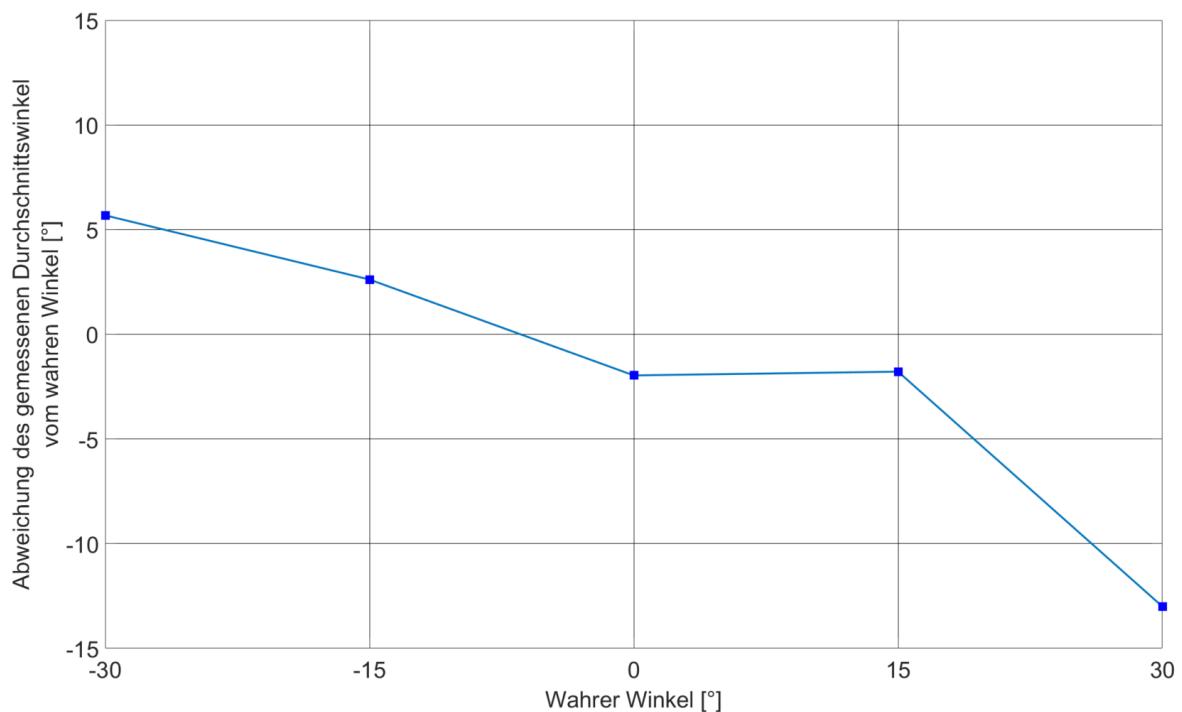


Abbildung 4.7: Ergebnis der Messabweichung vom wahren Winkel im Raum

### 4.3 Winkelmessung im Freien

Dieselben Messungen im Raum wurden nun im Freien durchgeführt. Die Montierung und das Messgebiet sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Ähnliche Markierungen am Boden wie bei der Messung im Raum wurden platziert, sind allerdings kaum sichtbar.

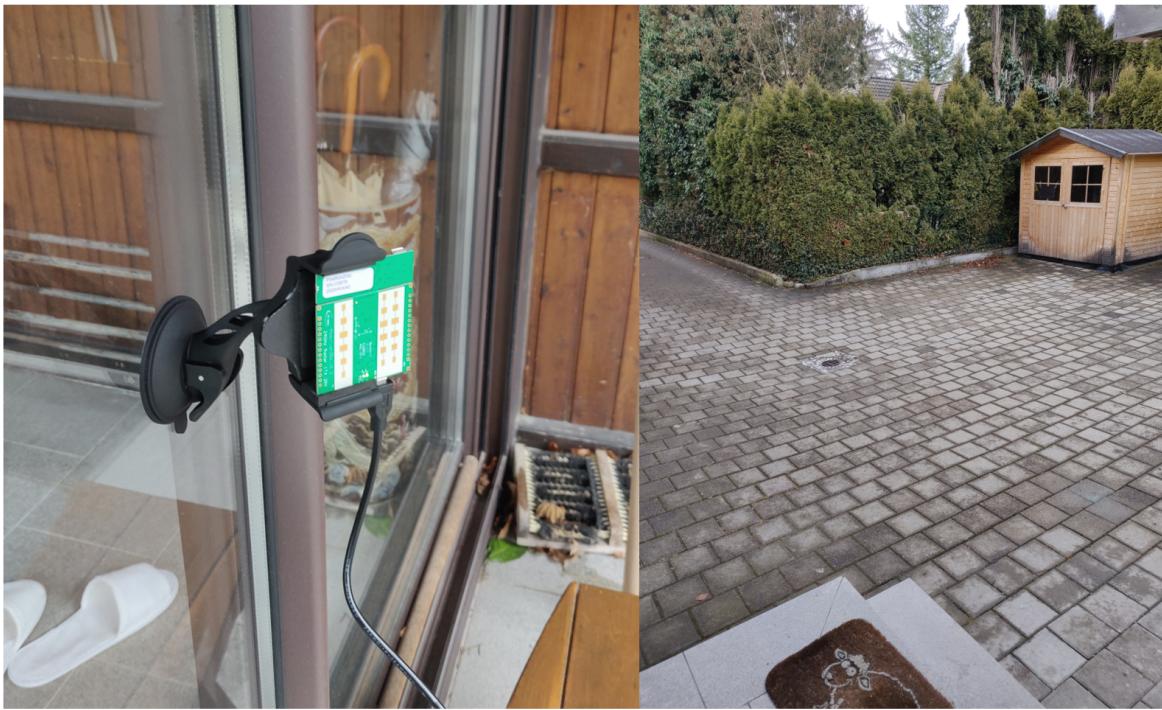


Abbildung 4.8: Messplatz im Freien (l. Sensor und r. Messgebiet)

In Abbildung 4.9 ist der Boxplot zur Winkelmessung im Freien abgebildet. Im Vergleich mit der Messung im Raum sind die Messverteilungen und Streuung (alle Werte in einem  $10^\circ$  Fenster) geringer. Die Medianwerte stimmen bei allen Messungen grob mit dem wahren Wert überein.

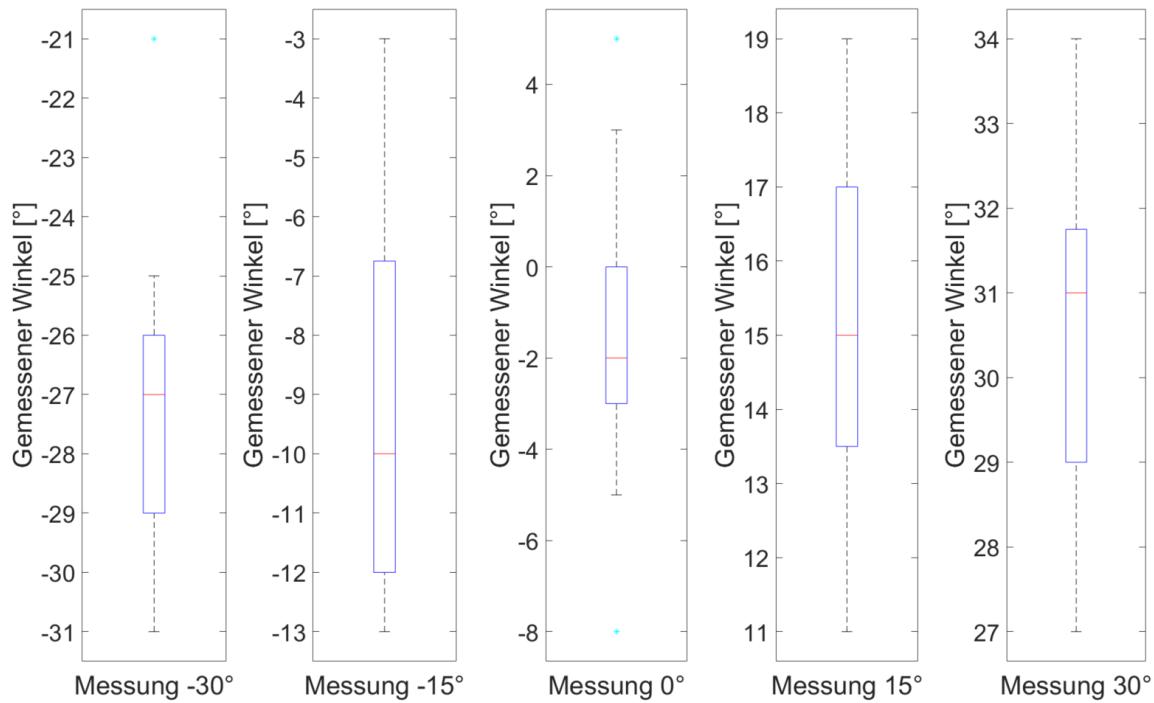


Abbildung 4.9: Boxplot zur Winkelmessung im Freien

Im Freien waren 13 der 150 Winkelmessungen ungültig, bei denen kein Ziel gefunden wurde oder die Signalstärke nicht groß genug war. Das ergibt eine Ausfallrate von 8,7%. Die Verlässlichkeit ist im Freien damit eindeutig besser als in einem geschlossenen Raum. Auch die Messabweichung des gemessenen Durchschnittswinkel vom wahren Winkel ist im Freien kleiner und besser als im geschlossenen Raum. Die maximale Messabweichung beträgt unter  $6^\circ$  und teilweise wird der Winkel genau (Messabweichung unter  $1^\circ$  bei  $15^\circ$  und  $30^\circ$ ) gemessen.

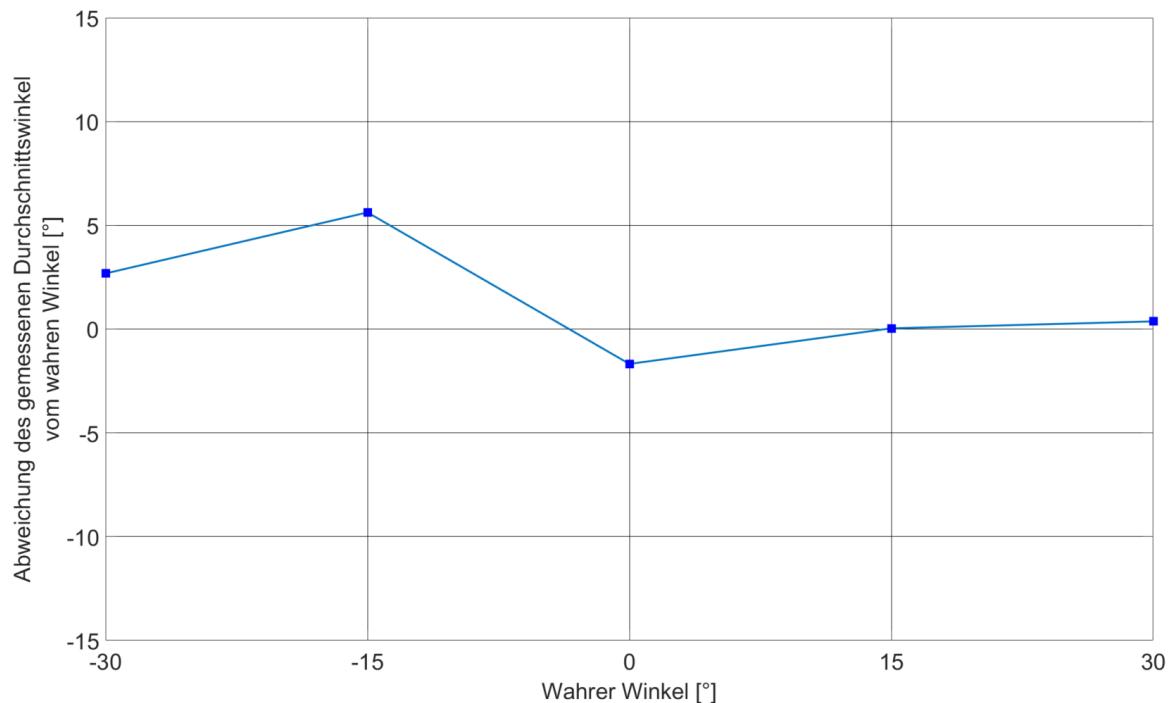


Abbildung 4.10: Ergebnis der Messabweichung vom wahren Winkel im Freien

## 5 Zusammenfassung

In diesem ersten Teil der Studienarbeit wurden die technischen Grundlagen der frequenzmodulierten Dauerstichradarmessung und der Winkelmessung mittels Phasenvergleich dargelegt. Im Stand der Technik wurde begründet, wieso dieses Radar-System speziell für diese Anwendung der Personenzählung geeignet ist. Bei der Validierung der Genauigkeit der Winkelmessung wurde die angegebene Genauigkeit des Herstellers gezeigt: Bei einem größerem Winkel als  $\pm 60^\circ$  beträgt die Messabweichung vom wahren Wert  $10^\circ$  und im Messbereich zwischen  $\pm 20^\circ$  beträgt die maximale Abweichung  $4^\circ$ . Bei diesen Messungen wurde allerdings auch ein hochreflektierenden Radarreflektor mit einem Radarquerschnitt von  $1\text{ m}^2$  verwendet.

Bei den Messungen des Autors mit Winkeln von  $30^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  und  $30^\circ$  wurde sowohl in einem Raum mit wenigen Störobjekten sowie im Freien gemessen. Im Raum ist bei den Messungen von  $-30^\circ$  bis  $15^\circ$  eine durchschnittliche Abweichung von maximal  $6^\circ$  gemessen worden, bei der  $30^\circ$  Messung war der Durchschnittswert ( $17^\circ$ ) sehr weit ( $13^\circ$ ) vom wahren Wert entfernt. Im Freien beträgt die maximale Messabweichung unter  $6^\circ$  und teilweise wurde der Winkel genau (Messabweichung unter  $1^\circ$  bei  $15^\circ$  und  $30^\circ$ ) gemessen. Die Verlässlichkeit der Daten (nicht korrekt erkannte Daten) betrug im Raum 14,7% und im Freien 8,7%.

# Literaturverzeichnis

- [1] Radar Application Engineering Team, Business Line "Radio Frequency and Sensors". *Position2Go software user manual.* [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-P2G\\_Software\\_User\\_Manual-UserManual-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d4627762291e017769040a233324](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-P2G_Software_User_Manual-UserManual-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d4627762291e017769040a233324), 14.06.2019. Online; Zugriff am 12.01.2022.
- [2] Will Christoph, Vaishnav Prachi, Chakraborty Abhiram, und Santra Avik. Human target detection, tracking, and classification using 24-ghz fmcw radar. *IEEE Sensors Journal*, 19(17):7283–7299, 2019.
- [3] Scherr Steffen. *FMCW-Radarsignalverarbeitung zur Entfernungsmessung mit hoher Genauigkeit*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2017.
- [4] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. *Frequenzplan.* [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/20210114\\_Frequenzplan.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/20210114_Frequenzplan.pdf?__blob=publicationFile&v=2), Jan 2021. Online; Zugriff am 20.01.2022.
- [5] Chen Chao, Wu Shiyu, Meng Shengwei, Chen Jie, Fang Guangyou, und Yin Hejun. Application of equivalent-time sampling combined with real-time sampling in uwb through-wall imaging radar. In *2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, Seiten 721–724. IEEE, 21.10.2011 - 23.10.2011.
- [6] Barzegar Alireza Salehi, Cheldavi Ahmad, Sedighy Seyed Hassan, und Nayyeri Vahid. 3-d through-the-wall radar imaging using compressed sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19:1–5, 2022.

- [7] Choi Jeong Woo, Quan Xuanjun, und Cho Sung Ho. Bi-directional passing people counting system based on ir-uwb radar sensors. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2):512–522, 2018.
- [8] Kim Ji-Eun, Choi Jae-Ho, und Kim Kyung-Tae. Robust detection of presence of individuals in an indoor environment using ir-uwb radar. *IEEE Access*, 8:108133–108147, 2020.
- [9] Choi Jeong Woo, Yim Dae Hyeon, und Cho Sung Ho. People counting based on an ir-uwb radar sensor. *IEEE Sensors Journal*, 17(17):5717–5727, 2017.
- [10] Stephan Michael, Hazra Souvik, Santra Avik, Weigel Robert, und Fischer Georg. People counting solution using an fmcw radar with knowledge distillation from camera data. In *2021 IEEE Sensors*, Seiten 1–4. IEEE, 31.10.2021 - 03.11.2021.
- [11] Weiss Jonas, Perez Rodrigo, und Biebl Erwin. Improved people counting algorithm for indoor environments using 60 ghz fmcw radar. In *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)*, Seiten 1–6. IEEE, 21.09.2020 - 25.09.2020.