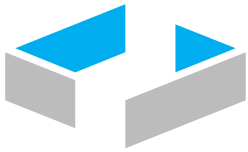


HOCHSCHULE OSNABRÜCK

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät

Ingenieurwissenschaften und Informatik

Projektbericht

mit dem Thema:

Inbetriebnahme des SICK RMS320 Radar-sensors und Messung des Einflusses von Kleidung auf die Erkennungsfähigkeit eines Menschen

Autoren:	Sarah Horstmeyer
	sarah.horstmeyer@hs-osnabrueck.de
	Fabian Thomann
	fabian.thomann@hs-osnabrueck.de
Prüfer:	Arno Ruckelshausen
Abgabedatum:	24.02.2020

I Gliederung des Projektberichtes

Der nachfolgende Projektbericht, welcher im Rahmen des Masterprojektes und des Moduls „Bildgebende Sensortechnik“ erarbeitet wurde, ist wie folgt den beiden Fächern zuzuordnen.

Die Kapitel, welche sich mit der Inbetriebnahme und den Umgang des SICK RMS320 Radarsensors beschäftigen, sind Teil des Masterprojektes. Dies betrifft die Kapitel 2.2, 4.1, 4.3 und in Teilen das Kapitel 4.5.

Dem Modul „Bildgebende Sensortechnik“ sind hingegen die Messung des Einflusses von Kleidung auf die Erkennungsfähigkeit eines Menschen sowie die Radarmessungen der verschiedene Prüfkörper zuzuordnen. Dies wird in den Kapiteln 2.3, 3, 4.2, 4.4 und 4.5 behandelt.

Die „Grundlagen der Radartechnik“ sind für beide Teile gleichbedeutend wichtig.

II Inhaltsverzeichnis

I GLIEDERUNG DES PROJEKTBERICHTES II
II INHALTSVERZEICHNIS III
III ABBILDUNGSVERZEICHNIS IV
IV TABELLENVERZEICHNIS V
1 EINLEITUNG 1
2 RADARTECHNIK 3
2.1 GRUNDLAGEN DER RADARTECHNIK 3
2.2 RADARSENSORSYSTEM SICK 6
2.3 STAND DER TECHNIK 9
3 PRÜFKÖRPER 10
3.1 CUBE CORNER REFLECTOR 10
3.2 PRÜFPUPPE 11
3.3 KLEIDUNG DER PUPPE 12
3.4 MENSCH 14
4 RADARMESSUNG 15
4.1 INBETRIEBNAHME 15
4.2 VERSUCHSSZENARIEN 17
4.3 VERSUCHSAUFBAU 18
4.4 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG 19
4.5 MESSERGEBNISSE 21
5 FAZIT 31
6 LITERATURVERZEICHNIS 33
ANHANG A MESSUNG MIT WINTER-BEKLEIDUNG 34
ANHANG B MESSUNG MIT PULLOVER UND JEANSHOSE 35
ANHANG C MESSUNG MIT ARBEITS-BEKLEIDUNG 36
ANHANG D MESSUNG MIT REGEN-BEKLEIDUNG 37
ANHANG E MESSUNG MIT SOMMER-BEKLEIDUNG 38
ANHANG F MESSUNG „NORMAN“ 39

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SICK Radarsensor RMS3xx [7] 7
Abbildung 2: möglicher Messbereich des Radarsensors 8
Abbildung 3: Geometrie eines dreiseitigen Cube Corner Reflectors 10
Abbildung 4: Dummy „pedestrian static child“ der Firma ‚4activeSystems‘ 11
Abbildung 5: Spektrum elektromagnetischer Wellen [11] 12
Abbildung 6: Remissionsgrad von Textilien im optischen Wellenlängenbereich 14
Abbildung 7: Programm – Ablauf - Plan C#-Anwendung 16
Abbildung 8: Programm - Ablauf - Plan - Senden von Frames 17
Abbildung 9: Aufbau der Messeinrichtung 18
Abbildung 10: Momentaufnahme aus SOPAS ET 20
Abbildung 11: Versuchsszenario mit markierten Gegenständen 20
Abbildung 12: Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - gesamter Messbereich 21
Abbildung 13: Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - ausgewählter Messbereich 22
Abbildung 14: Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - ausgewählter Messbereich 23
Abbildung 15: Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - gesamter Messbereich 23
Abbildung 16: Messung „Norman“ mit Kostüm [4m] – ausgewählter Messbereich 23
Abbildung 17: Messung „Norman“ mit Kostüm [4m] - gesamter Messbereich 23
Abbildung 18: Messung „Cube Corner“ - Mittelwerte und Standardabweichung 25
Abbildung 19: Messung „Cube Corner“ - ausgewählter Messbereich 25
Abbildung 20: Messung „Norman“ [4m] in verschiedenen Winkeln zum Sensor - Mittelwerte und Standartabweichung 26
Abbildung 21: Messung „Norman“ ohne Kostüm - Mittelwerte und Standardabweichung 27
Abbildung 22: Messung „Norman“ mit Kostüm - Mittelwerte und Standardabweichung 28
Abbildung 23: Messung „Norman" - Mittelwerte und Standartabweichung 29
Abbildung 24: Messung Person - Mittelwerte und Standartabweichung 29
Abbildung 25: Messung: Person mit Winter-Bekleidung - ausgewählter Messbereich 34
Abbildung 26: Histogramm: Person mit Winter-Bekleidung - ausgewählter Messbereich 34
Abbildung 27: Person mit Winter-Bekleidung 34
Abbildung 28: Messung: Person mit Pullover und Jeanshose - ausgewählter Messbereich 35
Abbildung 29: Histogramm: Person mit Pullover und Jeanshose - ausgewählter Messbereich 35
Abbildung 30: Person mit Pullover und Jeanshose 35
Abbildung 31: Person mit Arbeits-Bekleidung 36
Abbildung 32: Messung: Person mit Arbeits- Bekleidung - ausgewählter Messbereich 36
Abbildung 33: Histogramm: Person mit Arbeits- Bekleidung - ausgewählter Messbereich 36
Abbildung 34: Person mit Regen-Bekleidung 37
Abbildung 35: Messung: Person mit Regen- Bekleidung - ausgewählter Messbereich 37
Abbildung 36: Histogramm: Person mit Regen- Bekleidung - ausgewählter Messbereich 37
Abbildung 37: Messung: Person mit Sommer- Bekleidung - ausgewählter Messbereich 38
Abbildung 38: Histogramm Person mit Sommer- Bekleidung - ausgewählter Messbereich 38
Abbildung 39: Person mit Sommer-Bekleidung 38
Abbildung 40: „Norman“ ohne Kostüm (I) 39
Abbildung 41: „Norman“ mit Kostüm (I) 39
Abbildung 42: „Norman“ ohne Kostüm (II) 39

ABBILDUNG 43: „NORMAN“ MIT KOSTÜM (II) 39
ABBILDUNG 44: MESSUNG „NORMAN“ ERSTE MESSSERIE 40
ABBILDUNG 45: MESSUNG „NORMAN“ ZWEITE MESSSERIE 40
ABBILDUNG 46: MESSUNG „NORMAN“ OHNE KOSTÜM (GESAMT) 41
ABBILDUNG 47: MESSUNG „NORMAN“ MIT KOSTÜM (GESAMT) 41

IV Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 VERSUCHSSZENARIEN - ERSTE MESSSERIE 17
TABELLE 2 VERSUCHSSZENARIEN - ZWEITE MESSSERIE 18

1 Einleitung

Im Gebiet des autonomen Fahrens ist die Haftungsfrage bei dem Eintreten von Fehlerfällen eines der Kernthemen. Ein wichtiger Ausgangspunkt ist hierbei, dass die selbständig navigierende Maschinerie sicher in allen Situationen funktioniert. Man spricht hierbei von der funktionalen Sicherheit einzelner Systeme. Beispielsweise muss ein elektronisches Bremssystem in jedem Fahrszenario eine Verzögerung des Fahrzeuges gewährleisten. Dieses bereits aus dem nicht autonomen Fahren bekannte Problem stellt heutzutage jedoch eine geringere Herausforderung dar. Im Fokus steht vielmehr die Erkennung der Umgebung mit der damit verbundenen Verarbeitung und der Handlungsentscheidung.

Bei dem Einsatz von optischen Sensoren bedeutet die funktionale Sicherheit, dass Personen aber auch Gegenstände zuverlässig unter jeglichen möglichen Gegebenheiten detektiert werden. Aus diesem Grund bedarf es für die Sensoren ein Zertifikat, beziehungsweise eine Definition des Einsatzgebietes, welche von den Herstellern erstellt wird. Für das autonome Fahren in industriellen Anwendungen sind bereits geeignete Sensoren verfügbar. Bei den dort vorliegenden Umgebungsbedingungen müssen weniger Störgrößen als im öffentlichen Straßenverkehr berücksichtigt werden. So handelt es sich um einen, sowohl im Innen- als auch im Außenbereich, abgesperrten Bereich, zu dem nur autorisierte und unterwiesene Personen Zutritt haben. Man spricht hierbei von einem nicht öffentlichen Raum. Dadurch ist eine der bedeutendsten Störquellen reduziert, da nur eine bestimmte Gruppe von Menschen das System beeinflussen oder durch dieses gefährdet werden können. Des Weiteren sind Störungen, die zum Beispiel von geringer Beleuchtung oder Unebenheiten in den Fahrwegen ausgehen, im industriellen Umfeld nicht anzutreffen. Ein weit verbreiteter Anwendungsfall sind autonom fahrende Flurförderfahrzeuge.

Die Automobilindustrie agiert mit ihren Produkten im öffentlichen Raum, wodurch keine Eingrenzung von Störgrößen möglich ist. Außerdem sind die Einsatzszenarien, hinsichtlich Geschwindigkeit und Fahrmanövern deutlich variabler gegenüber den industriellen Anwendungen. Hierdurch werden die Systemtests sehr komplex, sodass seitens der Sensorhersteller kein Produkt angeboten wird, welches für das Einsatzgebiet definiert ist.

Bei Anwendungen des autonomen Fahrens auf Privatgelände, welches eine Mischung aus dem industriellen und dem automobilen Anwendungsfall darstellt, ist eine Freigabe für das Einsatzgebiet von den Herstellern denkbar. Aus diesem Grund befasst sich das Projekt ‚AgroSafety‘ mit der Erkennung von Personen mittels verschiedenster Messsysteme. Bei landwirtschaftlichen Betrieben spricht man vom halböffentlichen Raum, da es sich um Privatgelände handelt, dieses jedoch nicht wie im industriellen Anwendungsfall von dem Eindringen nicht befugter Personen gesichert ist. Dies führt dazu, dass die Haftungsfrage bei dem Eintreten eines Unfalles komplexer ist als im industriellen Anwendungsfall, jedoch weniger komplex als im öffentlichen Raum.

Das Projekt ‚AgroSafety' führt in Zusammenarbeit mit dem Technischer Überwachungsverein (TÜV) und verschiedenen Sensorherstellern ein Jahr lang Messungen durch, die Rückschlüsse auf die Erkennbarkeit von einer Personen mittels berührungsloser Sensoren geben sollen. Zu diesen berührungslosen Sensoren zählen neben verschiedenen optischen Sensoren, wie Laserscannern, auch Radarsensoren.

Der Vorteil derartiger Systeme ist aus dem industriellen Umfeld bekannt. So ist bei einem autonomen System eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit möglich, falls eine Person den Weg der Arbeitsmaschine kreuzt. Dabei muss es nicht zum vollständigen Stillstand kommen, der im Zweifel eine Freigabe zur Weiterfahrt durch einen Bediener erfordert. Außerdem sind höhere Fahrgeschwindigkeiten möglich, die mit dem ausschließlichen Einsatz von Kontaktschaltern nicht realisierbar wären.

Ein großer Konflikt besteht zwischen der Funktionalität und der Sicherheit. So kann es dazu kommen, dass ein System sehr sicher ist, allerdings seine Funktion nicht ausführen kann oder andersherum. Ist die Funktion eines Sensors nicht unter allen Bedingungen gegeben, so ist der Einsatz weiterer Sensoren sinnvoll, sodass die Kombination aus den Sensoren die gewünschten Kriterien erfüllen.

In dieser Ausarbeitung wird sich mit der Personenerkennung mittels Radarsensoren befasst, da in diesem Gebiet bislang die geringsten Ergebnisse vorliegen. Von der Europäischen Kommission wurde eine Arbeit angefertigt mit dem Titel „Radar Cross Section Measurements of Pedestrian Dummies and Humans in the 24/77 GHz Frequency Bands". Diese befasst sich unter anderem mit dem Einfluss von Kleidung auf die Erkennungsfähigkeit eines Menschen. Da wegen des Fehlens von notwendigen Ressourcen keine gleichwertigen Ergebnisse erzielbar sind, bleibt ein Vergleich der eigenen Messwerte mit denen aus der Veröffentlichung aus.

2 Radartechnik

Im Rahmen dieser Arbeit soll aufgrund von bisher geringen Ergebnissen und Literaturvorgaben eine mögliche Detektion eines Menschen unter dem Einfluss von verschiedenen Kleidungsstücken mit dem Einsatz eines Radarsystems erprobt und bewertet werden. Für das Verständnis des eingesetzten Systems werden als Erstes die Grundlagen der Radartechnik erläutert, wobei das grundsätzliche Funktionsprinzip, allgemeine Begriffe der Radartechnik sowie verschiedene Arten von Messsystemen mit dem Einsatz von Radar beschrieben werden. Anschließend werden das eingesetzte Messsystem des Sensorherstellers ‚SICK AG' vorgestellt und ein kurzer Einblick in den bisherigen Stand der Technik gegeben. Dabei wird deutlich, welche Ergebnisse bezüglich der Detektion eines Menschen mittels Radartechnik bereits erzielt wurden und welche Informationen bei der Durchführung der Messung bekannt sind.

2.1 Grundlagen der Radartechnik

Der Begriff *Radar* ist abgeleitet von der englischen Bezeichnung *„Radio Detection and Ranging"* und beinhaltet somit die Funktion des Radars, die Detektion und die Lokalisierung von Objekten mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen. Beim Einsatz von Radartechnik werden die elektromagnetischen Wellen von dem Sender erzeugt und gegebenenfalls über eine Antenne zum Fokussieren des Signals ausgesendet. Die ausgesendeten elektromagnetischen Wellen treffen nach der gewissen Laufzeit auf das Zielobjekt und werden von diesem zum Teil aufgenommen. Ein weiterer Teil der Welle wird vom Zielobjekt in die Richtung des Radarsystems reflektiert, wodurch elektromagnetische Wellen zurück zum eigentlichen System übertragen und dort vom Empfänger ausgewertet werden. Die Stärke der am Zielobjekt reflektierten Strahlung ist somit ein Faktor, der das am Radarsystem empfangene Echo beeinflusst. Je mehr elektromagnetische Wellen vom Objekt zurückreflektiert werden, desto stärker ist das am Radarsystem empfangene Signal in Bezug auf die Leistungsdichte. Die Reflektionsstärke ist eine Eigenschaft jedes Objektes und wird als „Rückstrahlquerschnitt σ" oder mit der Abkürzung „RCS" (engl. *„Radar Cross Section"*) bezeichnet. Der Rückstrahlquerschnitt ist vor allem abhängig von den Eigenschaften des Zielobjektes, wie zum Beispiel die Form und das Material. Auch die vom Radar ausgesendeten Frequenz und die Wellenlänge des Signals sowie der Winkel, in dem die elektromagnetische Welle auf das Zielobjekt trifft, haben Einfluss auf den Rückstrahlquerschnitt. Der Wert des RCS spielt für die Detektion eines Zielobjektes eine große Rolle, da Objekte mit einem hohen RCS-Wert von einem Radarsystem besser und eindeutiger identifiziert werden als Objekte mit einem niedrigeren Radarquerschnitt.

Bei einem Radarsystem können mit Hilfe der entsendeten Wellenlänge und der Zeit, bis der Empfänger ein Echosignal detektiert, die genaue Entfernung und Richtung des Ziels, aber auch weitergehende Informationen, wie zum Beispiel der Bewegungszustand, die Geschwindigkeit sowie eine Identifikation und Klassifizierung des Ziels ermittelt werden. Die

Eigenschaft, dass das Radarsystem aktiv die elektromagnetischen Wellen erzeugt und aussendet, begründet die Vorteile der Radartechnik zur hauptsächlichen Detektion und Lokalisierung von Zielobjekten. Radarsysteme können durch ihren Einsatz als aktive Systeme und dem Aussenden von elektromagnetischen Wellen auch im Dunkeln, sowie bei schlechten Witterungsbedingungen wie Nebel, Regen oder Schnee die Objekte problemlos detektieren und lokalisieren. Dabei werden die elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung in verschiedenen Frequenzbereichen ausgesendet. Insgesamt gibt es zwölf Radarfrequenzbänder, die von 0,2 GHz bis 220 GHz eingeteilt sind und unterschiedliche Bezeichnung erhalten. Die eingesetzte Sendefrequenz ist im jeweiligen Radarsystem von einigen Aspekten abhängig. Dazu gehört zum Beispiel die geforderte Reichweite, die geforderte Winkelauflösung, die Reflexionseigenschaften der Radarziele und die verfügbare Gerätetechnik. [1]

In der Radartechnik können die angewandten Systeme in verschiedene Kategorien unterschieden und somit klassifiziert werden. Als erstes werden sie aufgrund ihres Prinzips unterteilt, wobei dies durch die örtliche Platzierung von Sender und Empfänger erfolgt. Es gibt das *monostatische Radar* und das *bistatische Radar*. Das *monostatische Radar* ist das meistverbreitete Prinzip in der Radartechnik und dadurch gekennzeichnet, dass sich der Sender und der Empfänger am selben Ort befinden. Beim *bistatischen Radarprinzip* befinden sich Sender und Empfänger nicht am selben Ort, werden also getrennt voneinander platziert. Neben den beiden Radarprinzipien gibt es zusätzlich noch die Unterscheidung des Radartyps. Hierbei liegt der Fokus der Unterscheidung darin, ob das eingesetzte Radargerät mit einem zusätzlich kooperierenden Radarziel kommuniziert oder ob es sich bei dem Ziel um ein passives und damit um kein zusätzliches Radargerät handelt. Es ist die Rede von einem *Primärradar,* wenn die vom Radargerät ausgesendeten Strahlungen aufgrund der Materialien des Zielobjektes reflektiert und direkt vom Empfänger im Radargerät erfasst und ausgewertet werden. Neben dem Primärradar gibt es das sogenannte Sekundärradar. Die Bezeichnung Sekundärradar wird verwendet, wenn ein Radargerät zur Auswertung mit einem kooperativen Radargerät zusammenarbeitet, welches am Zielobjekt lokalisiert ist. Dabei wird ein Radargerät als sogenannter *Interrogator* eingesetzt und das zweite Radargerät am Zielobjekt als Transponder. Der *Interrogator* sendet Strahlungen aus, diese werden vom Transponder empfangen und sorgen dafür, dass dieser durch seinen Sender ebenfalls Strahlungen ausstrahlt, die Informationen über das eigentliche Ziel enthalten. Diese werden abschließend vom Empfänger des *Interrogators* ausgewertet. Beide Radartypen können sowohl nach dem Prinzip des *monostatischen* als auch des *bistatischen* Radars angewendet werden [2].

Ein weiterer Aspekt, der als ein Merkmal eines Radarsystems aufgefasst werden kann, ist das Verfahren, welches beim Aussenden der elektromagnetischen Wellen verwendet wird. Das am häufigsten zur Ortung verwendete Verfahren ist das sogenannte *Pulsradarverfahren*. Dabei wird über die Antenne ein pulsmoduliertes hochfrequentes Trägersignal entsendet und mit Hilfe von weiteren Komponenten im Radarsystem so verarbeitet, dass ein Ziel mit festem Radarquerschnitt unabhängig von seiner Entfernung ein näherungsweises konstantes Signal

im Empfänger hervorruft. Dadurch ergeben sich die Vorteile, dass der Pegel des empfangenen Signals im Dynamikbereich des Empfängers bleibt und, dass der Empfänger aufgrund von weiteren Nahzielen und ihren Echos nicht übersteuert wird. Bei dem Pulsradarverfahren lässt sich die Entfernung des Zielobjektes direkt über die Laufzeit des Signales vom Sender zurück zum Empfänger mit Hilfe der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit für elektromagnetische Wellen berechnen. Das Pulsradarverfahren kann auch eingesetzt werden, wenn sich das Zielobjekt in Bewegung befindet. In diesem Fall kann neben der Entfernung auch die Geschwindigkeit des Ziels bestimmt werden. Die Bestimmung der Geschwindigkeit erfolgt dabei über zwei Entfernungswerte, welche mit dem Radarsystem nacheinander erfasst werden [3]. Die weit verbreitete Verwendung dieses Radarverfahrens ist neben der einfachen Berechnung der Entfernung über die Signallaufzeit zusätzlich darin begründet, dass für den Aufbau des Systems nur eine Antenne nötig ist, die sowohl sendet als auch empfängt [4]. Neben dem Pulsradarverfahren gibt es das sogenannte Dauerstrichradar (CW-Radar), welches den Vorteil bietet, einen geringen technischen Aufwand aufzuweisen. Bei diesem Verfahren wird ein generiertes hochfrequentes Signal abgestrahlt, vom Empfänger reflektiert und über den Empfänger im Radargerät und mit Hilfe von weiteren technischen Komponenten dem Auswertegerät zugeführt. Auch bei diesem Verfahren wird die Entfernung mit Hilfe der Signallaufzeit vom Sender bis zum Empfänger und der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen bestimmt. Dabei eignet sich das Dauerstrichradar-Verfahren vor allem zur reinen Bestimmung der Geschwindigkeit des Zielobjektes. Die Radialgeschwindigkeit ist dabei die Geschwindigkeitskomponente, welche in die Strahlungsrichtung der elektromagnetischen Welle zeigt. In Kombination mit der Information der Bewegungsrichtung kann aus der Radialgeschwindigkeit ebenfalls die Absolutgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Geschwindigkeitsmessung mittels des CW-Radars wird auch als Dopplerradar bezeichnet [5]. Für eine Anwendung des Dauerstrichradars muss das Radarsystem an die Anwendung angepasst werden. Die unterschiedlichen Ziele der Messungen, ob zum Beispiel die Geschwindigkeit oder die Entfernung ermittelt werden sollen, hat Einfluss darauf, wie das Radarsystem aufgebaut sein muss und welche Signalverarbeitung erforderlich ist, um die relevanten Informationen aus den Signalverläufen entnehmen zu können. Die detaillierte Betrachtung der einzelnen Anwendungsfälle soll in diesem Rahmen nicht weiter berücksichtigt werden, da der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Sensor das Radarverfahren FMCW-Radar verwendet. Dieses Verfahren soll dafür etwas näher betrachtet werden. Bei dem FCMW-Radar handelt es sich um ein Dauerstrichradar mit Frequenzmodulation, welches in Bezug auf seine Eigenschaften dem Pulsradar ähnelt. Bei dem Pulsradarverfahren besitzt das Signal eine feste Frequenz und kann aufgrund des zeitweisen Sendens und des Pausierens als amplitudenmoduliert bezeichnet werden. Bei dem FCWM-Radar liegt keine Amplitudenmodulation, sondern eine Modulation der Frequenzen vor, wobei konstante Amplituden anliegen und die Frequenzen variieren. Das Funktionsprinzip des Verfahrens kann so beschrieben werden, als dass ein moduliertes Signal erzeugt und vom Sender über eine Antenne ausgestrahlt wird. Dieses Signal wird am Ziel reflektiert und anschließend an der Empfangsantenne detektiert. Dabei weist dieses Signal die Momentanfrequenz auf, wel-

che das Signal zum Zeitpunkt des Verlassens des Senders hatte. Das empfangene Signal wird so weit verarbeitet, dass als Messergebnis eine Spannung mit der Frequenz erzeugt wird, welche sich aus der Differenz, der Sende- und der Empfangsfrequenz ergibt. Diese Differenzfrequenz ist somit das Maß für die Entfernung des Zielobjektes. Die Frequenz des Sendesignals wird dabei so moduliert, dass diese Sendefrequenz innerhalb einer gewissen Zeitspanne, der sogenannten Modulationsperiode, in Abhängigkeit von der Zeit um einen gewissen Frequenzhub ansteigt. Dabei kann die Änderung der Frequenz nach verschiedenen Zeitfunktionen, zum Beispiel einer linearen, einer sägezahnförmigen oder einer sinusförmigen Modulation erfolgen. Innerhalb der Radargeräte geschieht die Bestimmung der Zwischenfrequenzen über eine Digitalisierung des Signals und einer anschließenden Berechnung des Frequenzspektrums mit Hilfe der Fouriertransformation. Dadurch entsteht der Vorteil, dass mehrere Objekte, die sich zeitgleich in dem vom Radargerät erfassten Bereich in unterschiedlicher Entfernung befinden, unterschieden werden können, da die Überlagerung von Signalen verschiedener Frequenzen das gesamte Empfangssignal ergibt. Die bisherige Betrachtung erfolgt für ruhende Zielobjekte. Bewegt sich das Zielobjekt, so kommt es auch in diesem Verfahren zu einer sogenannten Dopplerfrequenz, welche das Empfangssignal verschiebt. In Abhängigkeit der Modulationsform der Frequenz, gibt es Situationen, in denen aus dem Empfangssignal keine Aussage darüber getroffen werden kann, welcher Anteil der Zwischenfrequenz auf die Entfernung des Zieles und welcher Anteil auf die Geschwindigkeit des Zieles zurückzuführen ist. Bei der sägezahnförmigen Modulation können die Anteile beispielsweise nicht auseinandergehalten werden, bei der dreiecksförmigen Modulation jedoch kann sowohl die Entfernung als auch die Geschwindigkeit des Ziels bestimmt werden. „Die Entfernungsinformation kann durch Bildung der Summe der Zwischenfrequenzen aus zwei aufeinanderfolgenden halben Modulationsperioden aus dem Zwischenfrequenzsignal entnommen werden. Die Radialgeschwindigkeit des Ziels ist als Dopplerfrequenz aus der Differenz der Zwischenfrequenzen aus zwei aufeinanderfolgenden halben Modulationsperioden gegeben.“ [6]

2.2 Radarsensorsystem SICK

Die Aufgabenstellung zur Aufnahme von Kleidungseinflüssen bei der Detektion von Radarsystemen beinhaltet die Durchführung der Messung mit Hilfe eines fest vorgegebenen Radarsystems der Firma ‚SICK AG‘, da dieser auch in den Dauerversuchen eingesetzt werden soll, zu denen diese Projektarbeit beiträgt. Der Aufbau besteht aus einem Radarsensor zur Erfassung von Objekten und einer Software, zur Inbetriebnahme des Sensors sowie der Auswertung der durch ihn bereitgestellten Messergebnisse.

2.2.1 Sensor RMS321

Der Radarsensor ‚RMS320‘ der Firma ‚SICK AG‘ ist Teil der Produktfamilie RMS3xx (siehe Abbildung 1) und kann mittels der von der Firma selbst bereitgestellten Software ‚SOPAS Engineering Tool (SOPAS_ET)‘ betrieben und konfiguriert werden. Die Firma weist dem Sensor die Eigenschaft zu, statische und bewegliche Objekte detektieren zu können. Der

Sensor erfasst dazu sein Umfeld, welches durch den Bediener in sogenannte Interessensbereiche eingeteilt werden kann und gibt ein Schaltsignal aus, sobald ein Objekt in dem betrachteten Bereich detektiert wird. Neben dem reinen Schaltsignal, durch welches deutlich gemacht wird, dass sich ein Objekt im Umfeld befindet, kann der Sensor mit dem Übertragen eines Daten-Telegramms über Ethernet dem Benutzer die genaue Entfernung, die Geschwindigkeit und die Richtung der Bewegung übermitteln. Um die Informationen über die Objekte im Umfeld erfassen zu können, wendet der Sensor das Radarverfahren *FMCW*, also das Dauerradar mit frequenzmoduliertem Signal, an (siehe Radarverfahren FMCW, Kapitel 2.1) und sendet dabei elektromagnetische Wellen mit Frequenzen zwischen 24,05 GHz und 24,25 GHz aus. Das mögliche Detektionsumfeld des Sensors wird dabei von dem Mindestabstand 1 m und dem Maximalabstand 45 m in Bezug auf die mögliche Entfernung zwischen dem Objekt und dem Sensor begrenzt. Dabei handelt es sich bei dem Detektionsfeld nicht um eine reine eindimensionale Entfernungsbetrachtung, sondern zeichnet sich durch einen möglichen Bereich des horizontalen Öffnungswinkels von ± 50º und des vertikalen Öffnungswinkels von ± 8º aus. Der Sensor erfasst demnach einen dreidimensionalen Detektionsbereich, der in Abbildung 2 dargestellt ist. Bei dem angegebenen möglichen Detektionsbereich muss jedoch der individuelle mögliche Radarquerschnitt von verschiedenen Zielobjekten berücksichtigt werden. Die ‚SICK AG' gibt dabei an, dass Messobjekte mit 1m^2 RCS, was dem effektiven Rückstrahlquerschnitt eines Menschen entspricht, bis zu einer maximalen Entfernung von bis zu 20 Metern detektiert werden können. Messobjekte wie zum Beispiel ein Personenkraftwagen besitzt ungefähr 10m^2 RCS und können demnach sogar bei Entfernungen von bis zu 45 Metern detektiert werden [7].

Abbildung 1: SICK Radarsensor RMS3xx [7]

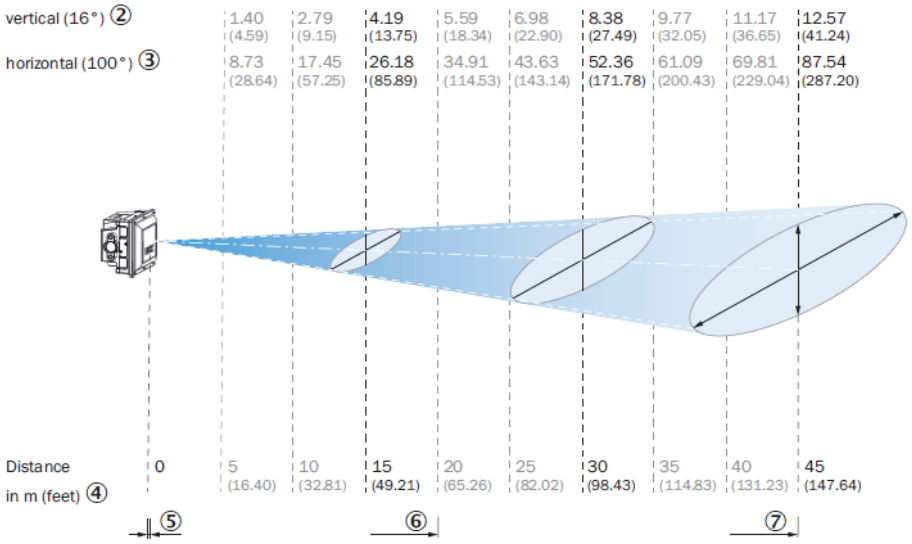


Abbildung 2: Arbeitsbereichsdiagramm RMS3xx, Dezimaltrennzeichen: Punkt

① Abmessung in m (Fuß)
② Vertikal (Öffnungswinkel 16°)
③ Horizontal (Öffnungswinkel 100°)
④ Distanz in m (Fuß)
⑤ bis 1 m: Keine Detektion
⑥ bis 20 m: Arbeitsbereich für Objekte mit 1 m² RCS (typischer Radarquerschnitt für eine Person)
⑦ bis 45 m: Arbeitsbereich für Objekte mit 10 m² RCS (typischer Radarquerschnitt für einen PKW)

Abbildung 2: möglicher Messbereich des Radarsensors

Zusätzlich zu den allgemeinen Informationen, welche über den Sensor bekannt sind, müssen laut eines Mitarbeiters der Firma ‚SICK AG' weitere Aspekte bei dem Umgang mit dem Sensor ‚RMS320' berücksichtigt werden. Zum einen wird darauf hingewiesen, dass von dem Einsatz des Sensors zur Erkennung von statischen Objekten speziell im Innenbereich abgeraten wird, da der Sensor zweikanalig aufgebaut ist und demnach zwei Empfangsantennen einsetzt. Dennoch sollten die Objekte bis zu Entfernungen von 20 Metern sicher erkannt werden, wenn diese sich innerhalb des Erfassungsbereiches des Sensors bewegen. Zum anderen gibt der Mitarbeiter zusätzliche Informationen über die Lokalisierung möglicher Zielobjekte in Bezug auf ihre Entfernung zum Sensor. Die sogenannte Range-Auflösung des Sensors beträgt einen Meter. Diese Information bedeutet, dass mehrere Zielobjekte mindestens um zwei Meter voneinander entfernt sein müssen, damit der Sensor diese als verschiedene Objekte erfassen kann. Sollte diese Distanz von zwei Metern zwischen zwei Objekten nicht eingehalten werden, so kann der Sensor diese nicht unterscheiden und gibt für diese die Information eines Objektes an. Eine weitere Information betrifft die Winkelauflösung des Sensors. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der Sensor bei der Erfassung aufgrund seines horizontalen Öffnungswinkels einen gewissen Bereich betrachten kann, jedoch nicht in diesem Winkelbereichen differenzieren kann. Der Sensor besitzt demnach keine Winkelauflösung. Befinden sich also zum Beispiel zwei Objekte in einem Detektionsbereich bezogen auf die Entfernung, weisen jedoch unterschiedliche Winkel zum Sensor auf, so kann der

Sensor diese Messobjekte nicht differenziert analysieren, sondern erfasst diese Messobjekte als ein Messobjekt und lokalisiert diesen bezogen auf den Winkel in der Mitte der beiden tatsächlichen Messobjekte.

2.3 Stand der Technik

In der Automobilbranche ist die Radartechnik bereits bekannt und wird für das Auslösen einer möglichen Reaktion des Fahrzeuges nach der Detektion eines Menschen im Umfeld des Fahrzeuges getestet. Aus diesem Grund hat die gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission im Rahmen des FP7 ICT-Projekts „More Safety for All by Radar Interference Mitigation“ (MOSARIM) eine umfangreiche Reihe von Labormessungen durchgeführt. Ziel ist es eine umfangreiche Referenzbibliothek mit den Radarsignaturen von Fußgänger-Dummies und einiger erwachsener Menschen in den 24-GHz- und 77-GHz-Frequenzbändern aufzubauen.

Dabei wurde nachgewiesen, dass die beobachteten RCS-Frequenzmittelwerte keine signifikanten Unterschiede in den zwei üblichen Frequenzbändern aufweisen. Die Höhe der Prüfkörper beziehungsweise der Fußgänger zum Sensor jedoch einen deutlichen Einfluss auf die durchschnittlich gemessenen Radarquerschnitte hat.

Ein erster qualitativer Vergleich der gemessenen RCS-Signaturen zwischen Dummies und Menschen zeigt, dass die Radarquerschnitte der verfügbaren Dummies leicht unter denen der Menschen liegen. Außerdem wurde festgestellt, dass die Kleidung in den meisten Fällen keinen signifikanten Einfluss auf die beobachteten RCS-Signaturen hat. Erkennbare Einflüsse sind lediglich im Hochfrequenzbereich von 76-81 GHz zu beobachten, insbesondere, wenn sehr dicke Kleidung getragen wird [8].

3 Prüfkörper

Die in dem vorherigen Kapitel vorgestellte Radartechnik soll mit dem Einsatz des Radarsensorsystems von der Firma ‚SICK AG' verwendet werden, um den Einfluss verschiedener Textilien auf die Messergebnisse und eine mögliche Detektion zu bewerten. Dabei werden verschiedene Prüfkörper verwendet, um verschiedene Versuchsszenarien zu gestalten und vergleichbare Messergebnisse zu erzielen. In diesem Kapitel werden die bei den Messungen verwendeten Prüfkörper und ihre Eigenschaften vorgestellt.

3.1 Cube Corner Reflector

In der Radartechnik gilt der sogenannte „*Cube Corner Reflector*" als der ideale Retroreflektor von Radarstrahlungen. Er besteht aus einer gewissen Anzahl von Dreiecksflächen, welche senkrecht zueinander angeordnet sind. Ein Cube Corner weist bei einer guten Ausrichtung zu den Radarstrahlungen die Eigenschaft auf, dass die eintreffende Strahlung, deren Wellenlänge deutlich kleiner ist als die vorliegenden Abmessungen, in die Aussendungsrichtung des Sensors zurückreflektiert wird. Der allgemeine Aufbau eines Cube Corners ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

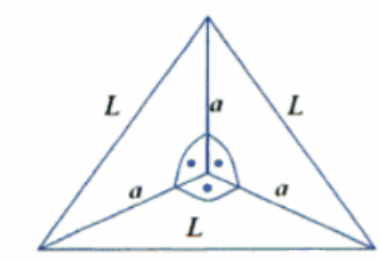


Abbildung 3: Geometrie eines dreiseitigen Cube Corner Reflectors

Für einen dreiseitigen Reflektor in optimaler Ausrichtung zu den Radarstrahlungen kann eine Formel angegeben werden, mit der die effektive Rückstrahlfläche, der sogenannte RCS-Wert, des Cube Corner Reflectors berechnet werden kann:

$$\sigma_{CR} = \frac{\pi * L^4}{3 * \lambda^3} = \frac{\pi * 4 * a^4}{3 * \lambda^3}$$

Dabei gilt $L = \sqrt{2} * a$, wobei a die Kantenlänge der Dreiecke bezeichnet, an denen die Dreiecke aneinander liegen. Die mögliche Berechnung des zugehörigen RCS-Wertes führt dazu, dass der Cube Corner Reflector bei Messungen mit Radarsensoren eingesetzt wird, um einen Referenzwert der Rückstrahlfläche zu ermitteln und die Messergebnisse der eigentlichen Messobjekte in Bezug zu der Rückstrahlfläche des Cube Corner Reflectors auszuwerten [9].

3.2 Prüfpuppe

Für den Einsatz im Rahmen des Dauerversuches unter dem Aspekt ‚AgroSafety' wird eine Prüfpuppe eingesetzt, die den menschlichen Körper repräsentieren soll. Aus diesem Grund wird diese Puppe ebenfalls für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Messungen verwendet. Dabei handelt es sich um den Dummie-Prüfkörper „*pedestrian static child*" der Firma ‚4activeSystems', welche in der Abbildung 4 dargestellt ist. Die Puppe stellt die Statur eines siebenjährigen Kindes dar und ist statisch auf einer Montageplatte fixiert. Die Position jedes Beines kann individuell über drei vorgegebene Montagepunkte festgelegt und verändert werden.

Abbildung 4: Dummy „pedestrian static child" der Firma ‚4activeSystems'

Die Firma ‚4activeSystems' gibt an, dass die Puppe in regnerischen und windigen Testbedingungen eingesetzt werden kann. Außerdem soll diese so robust sein, dass Aufpralltests mit bis zu 60km/h an dieser Puppe durchgeführt werden können. Der Dummy ist außerdem konform zu den Versuchsdummies der Euro NCAP. Die Euro NCAP ist eine Gesellschaft, die Sicherheitstest mit Fahrzeugen durchführt, um Sicherheitssysteme der Fahrzeuge zu bewerten. Die Euro NCAP sagt aus, dass die „pedestrian static child"-Puppe dazu geeignet ist, um bei Sicherheitstests in Bezug auf Fahrzeuge das menschliche Auftreten ausreichend gut darzustellen. Für die Anwendung des Dummies bei Fahrzeugsicherheitstests gibt es eine Spezifikation, welche von „European Automobile Manufacturer's Association" (ACEA) erstellt wurde. Die ACEA ist ein Zusammenschluss von Automobilherstellern, welche den Einsatz von Prüfkörpern in Zusammenhang mit den am Fahrzeug eingesetzten Sensorsystemen spezifiziert haben. In dieser Spezifikation wird festgehalten, welche Eigenschaften der Dummy aufzuweisen hat, um als Repräsentation eines Menschen dienen zu können. In der Spezifikation wird festgelegt, dass der eingesetzte Dummy die Eigenschaften eines Menschen, bezogen auf das bei dem Test verwendete Sensorsystem, aufweisen und somit von der eingesetzten Technik detektiert werden muss. In dem vorliegenden Anwendungsfall ist der Dummy also so auszulegen, dass dieser von dem Radarsystem erkannt wird und die radarspezifischen Eigenschaften, welche ebenfalls in der Spezifikation erfasst werden, eingehal-

ten werden. Der Hauptaspekt dabei ist, dass der Dummy die Charakteristik der Radarreflektion aufweist, wie sie durch einen menschlichen Körper hervorgerufen wird. Außerdem wird im Rahmen der Spezifikation gefordert, dass der Rückstrahlquerschnitt über den gesamten Körper des Dummys eine homogene Verteilung besitzt. Die homogene RCS-Verteilung gibt die Firma ‚4activeSystem' bei dem Dummy „*pedestrian static child*" als eine Eigenschaft an und erfüllt somit den Aspekt der Spezifikation für den Einsatz in Testszenarien. [10]

3.3 Kleidung der Puppe

Die Aufgabenstellung beinhaltet eine messtechnische Untersuchung, welche Art von Kleidung die Detektion der Prüfpuppe durch den Einsatz eines Radarsensors beeinflussen kann. Dabei ist eine mögliche Detektion durch den Radarsensor abhängig von der Reflektionseigenschaft des Messobjektes und seiner Materialien. Der Radarsensor ‚RMS320' strahlt zur Detektion von Objekten elektromagnetische Wellen im Bereich von 24,05 GHz bis 24,25 GHz aus und stellt somit einen möglichen Wellenlängenbereich von $\lambda = 12{,}37\,mm$ bis $\lambda = 12{,}47\,mm$ bereit. Dieser Wellenlängenbereich kann, mit Bezug zu dem in der Abbildung 5 dargestelltem Spektrum elektromagnetischer Wellen, den sogenannten Mikrowellen zugeordnet werden.

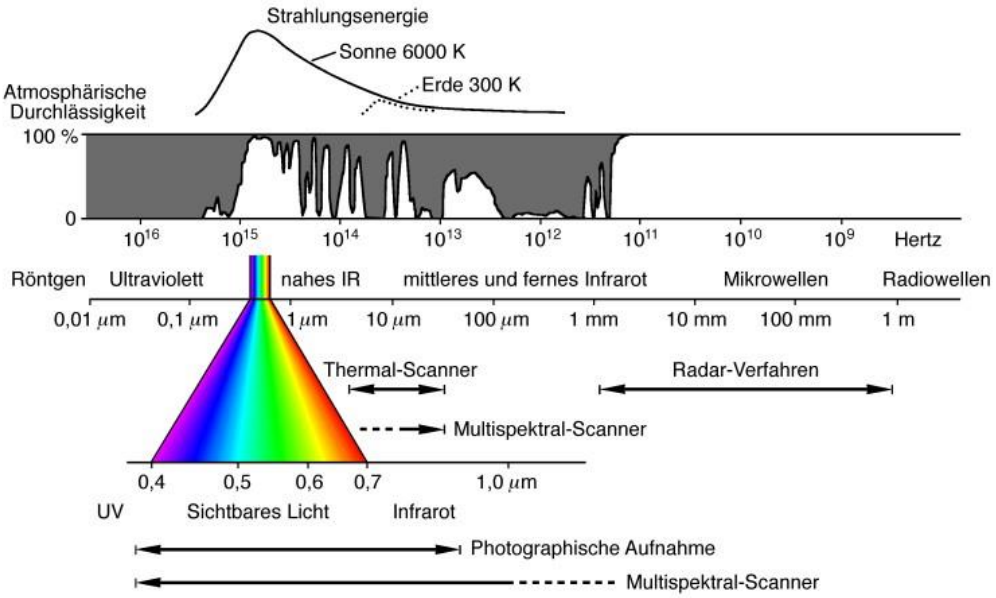


Abbildung 5: Spektrum elektromagnetischer Wellen [11]

Für die Durchführung einiger Messungen mit einem Radarsystem ist es also interessant, welche Materialien von den sogenannten Mikrowellen reflektiert werden.

Eine von der Firma ‚InnoSent' veröffentlichte Applikationsschrift gibt Auskunft darüber, dass Mikrowellen viele Materien durchstrahlen. Ebenfalls werden Aussagen über die verschiedenen Stärken der Durchstrahlung für allgemein zusammengefasste Objekte getroffen. Kleidung wird in dieser Applikationsschrift als eine Materie beschrieben, welche in ihrem eigentlichen Zustand detaillierter betrachtet werden muss. Zum Beispiel sollen trockene Kleidungs-

stücke von Mikrowellen gut durchdrungen werden können, dem gegenüber soll nasse Kleidung einen Verlust von bis zu 20 dB der Transmissionsstärke verursachen. Dieses ist aufgrund einer starken Reflektion von Mikrowellen durch die Materie Wasser gegeben [12].

Für die Anwendung eines Radarsystems zur Detektion von Objekten und Menschen bedeutet dies, dass das Tragen von trockener Kleidung für das Radarsystem „unentdeckt“ bleibt und dieses das Objekt genauso erkennen sollte, wie es ohne das Tragen von Kleidung möglich ist. In dem Fall, dass nasse Kleidungsstücke die Mikrowellen aufgrund des Wassergehaltes stärker reflektieren, müsste das eingesetzte Sensorsystem das Zielobjekt sogar deutlicher detektieren können, da zusätzlich zu dem eigentlichen Messobjekt mehr Strahlung von der Oberfläche der Kleidung reflektiert wird.

Da die Messergebnisse dieser Arbeit aufzeigen sollen, welche Kleidung dazu führt, dass ein Mensch oder ein Objekt weniger gut erkannt wird, kann mit Hilfe von Literatur keine möglichen Textilien herausgearbeitet werden, die die Detektionsfähigkeit verringern. Für alle möglichen Stoffe, die in Kleidungen eingesetzt werden, wird angegeben, dass diese die Mikrowellen sehr gut durchlassen oder diese verstärkt reflektieren. In dem Fall, dass die Mikrowellen das Textilgewebe durchstrahlen, treffen diese Strahlungen auf das eigentliche Messobjekt und zeigen eine ähnliche Detektionsfähigkeit wie ein Objekt ohne Kleidung. Für alle Materialien, welche die Wellen reflektieren, ist eine bessere Erkennungsfähigkeit vom Sensor gegeben, sodass diese für die Betrachtung des möglichst schlecht detektierbaren Falls auszuschließen sind. Dennoch sollen im Rahmen dieser Arbeit Messungen mit den Zielobjekten, sowie mit verschiedenen Kleidungsstücken durchgeführt werden, um deren Einfluss auf die Detektierbarkeit zu untersuchen. Für die Messungen mit der Puppe soll aus diesem Grund ein Kostüm angefertigt werden. Für die Beurteilung, welche Material für die Untersuchung mit dem Radarsensor verwendet und woraus somit das Kostüm der Puppe angefertigt werden soll, wurden bereits im Vorfeld durchgeführte Versuchsreihen als Grundlage herangezogen. Ziel dieser Versuchsreihen war es, eine Aussage darüber treffen zu können, welcher Stoff bei dem Einsatz von optischen Sensorsystemen zu der schlechtesten Detektierbarkeit führt. Der Fokus auf optische Sensorsysteme begründet sich dadurch, dass in dem geplanten Dauerversuch des Projektes ‚AgroSafety‘ neben dem in dieser Arbeit getestetem Radarsensorsystem weitere optische Sensorsysteme zum Einsatz kommen. Es wird demnach ein Stoff festgelegt, welcher schlecht von den optischen Sensoren erkannt wird. Zur Feststellung, wie gut die einzelnen Textilien von optischen Sensoren erkannt werden, wurden die beiden Materialien Baumwolle und „Kote“ mit elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Wellenlängen im Bereich von 334nm bis 1100nm bestrahlt und der Remissionsgrad des Materials, also das Verhältnis der reflektierten Strahlung im Verhältnis zu der reflektierten Strahlung eines Referenzobjektes, für die jeweilige Wellenlänge erfasst. Die Messergebnisse sind graphisch für jedes Material in der folgenden Abbildung dargestellt.

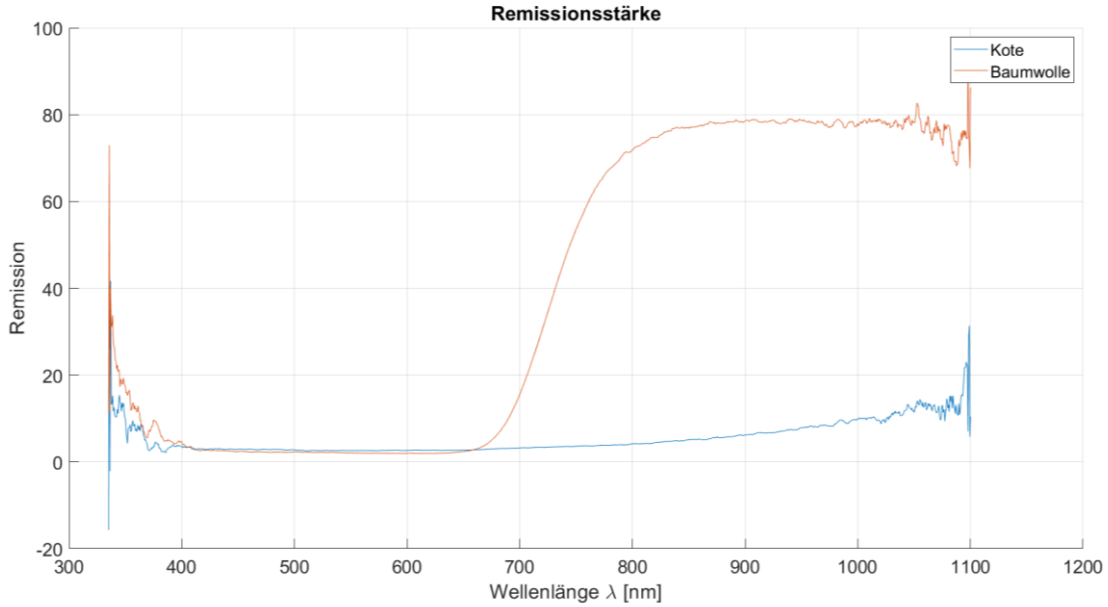


Abbildung 6: Remissionsgrad von Textilien im optischen Wellenlängenbereich

Es ist zu erkennen, dass der Remissionsgrad des textilen Stoffes „Kote“ in den gemessenen Wellenlängenbereichen mit Ausnahmen der jeweiligen Grenzwellenlängen zwischen 0% und 20% liegt, während der von Baumwolle ab einer Wellenlänge von 700nm bis zu der Wellenlänge von 850nm kontinuierlich auf einen Wert von fast 80% ansteigt und dann bei höheren Wellenlängen bis zu 1100nm diesen hohen Wert beibehält. Baumwolle weist somit eine viel stärkere Reflektion im oberen Wellenlängenbereich von 700nm bis 1100nm auf. Dies lässt darauf schließen, dass Baumwolle von optischen Sensorsystemen besser detektiert werden kann als „Kote“ und führt zu der Entscheidung, diesen im Rahmen des Dauerversuches zu verwenden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird auch in dieser Arbeit der Stoff „Kote“ in Bezug auf die Detektion mit einem Radarsensor untersucht. Dabei soll festgestellt werden, ob das Kostüm Einfluss auf eine mögliche Detektion der Puppe hat.

3.4 Mensch

Zusätzlich zu den bisher genannten Objekten wird die Erkennbarkeit eines Menschen durch den Radarsensor getestet. Dafür stellt sich eine männliche Person mit einer Größe von circa 1,90 Metern vor den Radarsensor auf, um die Ergebnisse eines realen Menschen mit den Ergebnissen der Puppe zu vergleichen. Zur Variation zieht die Person unterschiedliche Kleidungsstücke an, um den Einfluss von Kleidung direkt erkennen zu können. Die unterschiedliche Kleidung soll verschiedene Bereiche des Alltags abdecken. Die einbezogene Kleidung der Person setzt sich aus unterschiedlichen Materialien zusammen, eine Aufzählung dieser Materialen kann jeweils im Anhang passend zu der Kleidung entnommen werden.

4 Radarmessung

Die Inbetriebnahme des ‚SICK RMS320' Radarsensors sowie das systematische Vorgehen der Messungen mit anschließender Auswertung der Messergebnisse sind in den folgenden Kapiteln beschrieben. Detailliertere Ergebnisse aus einzelnen Messungen sind im Anhang angefügt.

4.1 Inbetriebnahme

Die Bedienung des Sensors erfolgt, wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, mittels der von der ‚SICK AG' bereitgestellten Software ‚SOPAS Engineering Tool'. Die Software bietet die Möglichkeiten verschiedene Einstellungen am ‚RMS320' vorzunehmen. So können beispielsweise Feldauswertungen definiert werden. Befindet sich ein Objekt in den definierten Anwendungsbereichen wird ein I/O-Signal geschaltet. Des Weiteren werden die aktuellen Messwerte der erkannten Objekte in einer bildlichen Darstellung direkt übertragen. Dies ist in Abbildung 10 exemplarisch ersichtlich.

Um den Einfluss von Kleidung auf die Erkennungsfähigkeit eines Menschen auswerten und beurteilen zu können, reicht diese Darstellung jedoch nicht aus. Informationen bezüglich der empfangenden Leistung, der Entfernung des Objektes sowie der Winkel, in dem sich das Objekt zum Sensor befindet, sind notwendig. Diese Informationen stellt der ‚RMS320' über eine Ethernet-Verbindung bereit. Die Kommunikation mittels der Ethernet-Frames ist durch das von der ‚SICK AG' entworfenen ‚CoLa A-Protokolls' definiert. Die verschiedenen Telegramme sind in einem Dokument der ‚SICK AG' aufgelistet und beschrieben.

Zur automatisierten Auslesung der Daten wird eine C#-Anwendung geschrieben, welche den Verbindungsaufbau mit dem Sensor realisiert, notwendige Einstellungen am Sensor vornimmt, die relevanten Daten aus den Ethernet-Frames herausliest und schließlich in einer CSV-Datei abspeichert. Das Verfahren ist in dem Programm-Ablauf-Plan in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Der Aufbau der Socket-Verbindung sowie das Umformen der zu sendenden Nachrichten konnten aus einem vorhergehenden Projekt übernommen werden.

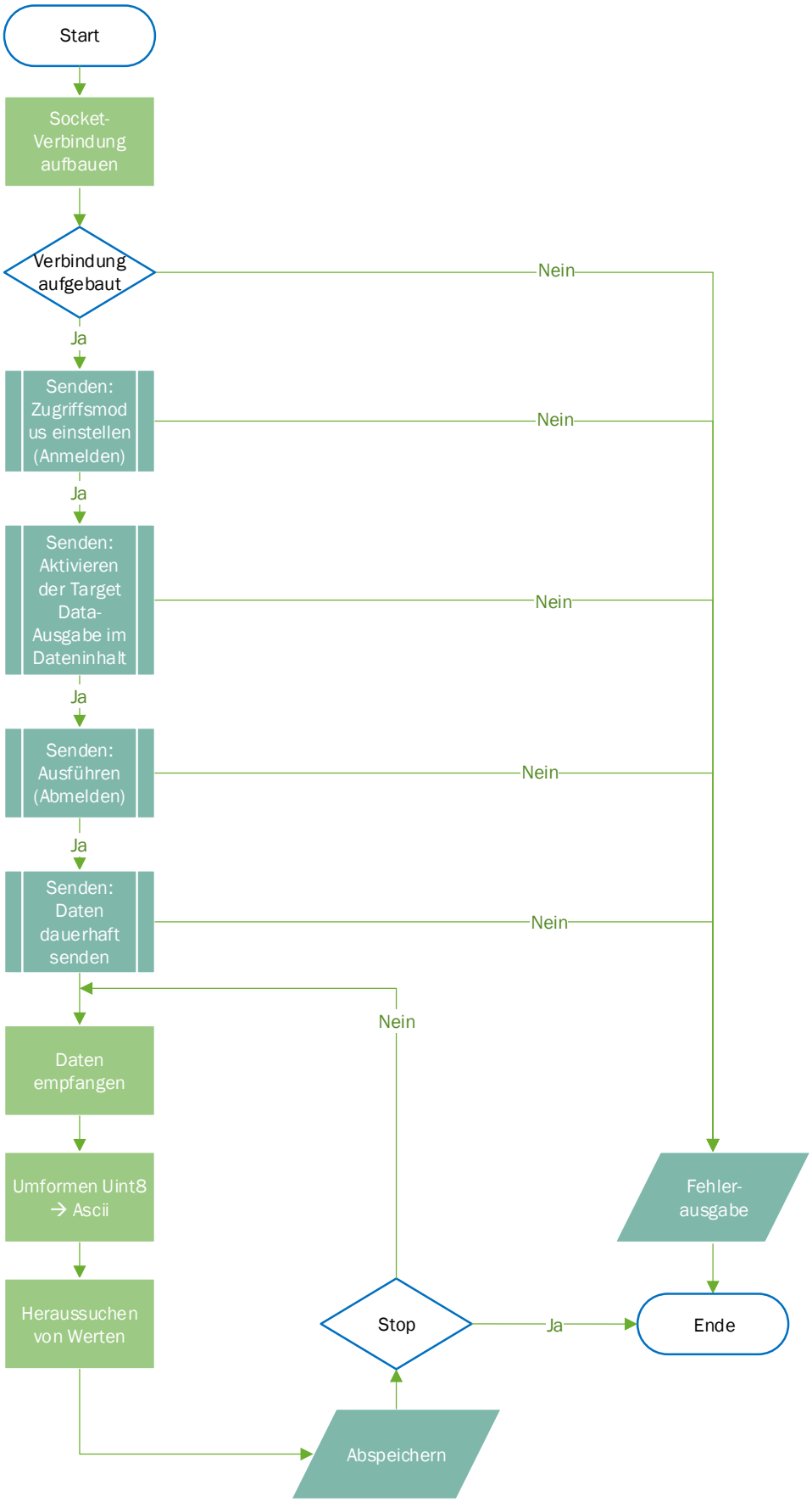


Abbildung 7: Programm – Ablauf - Plan C#-Anwendung

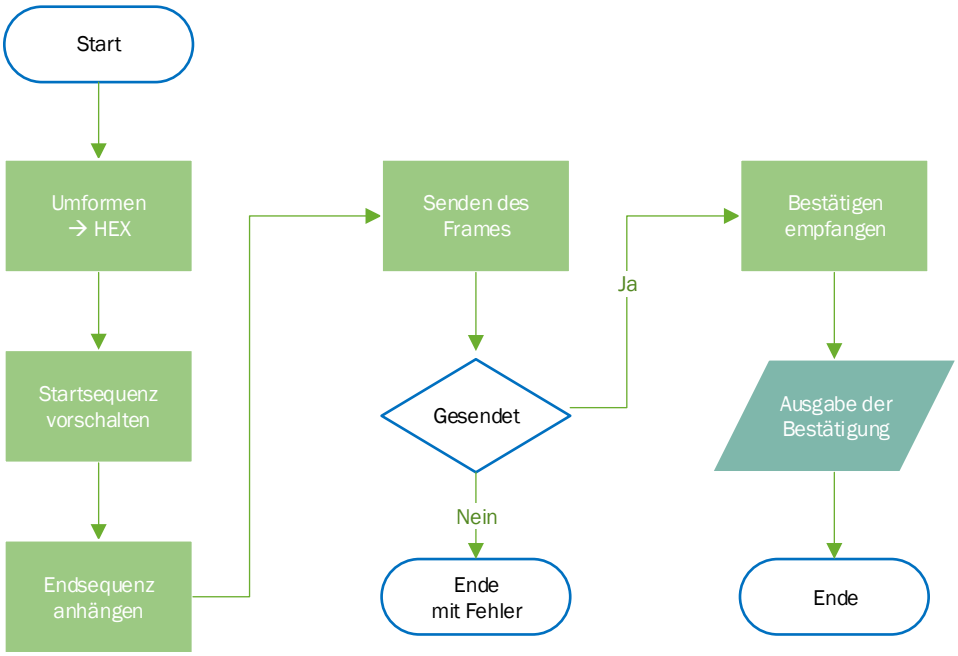


Abbildung 8: Programm - Ablauf - Plan - Senden von Frames

4.2 Versuchsszenarien

Die Messungen werden in mehrere Teile gegliedert. Nach dem Durchführen einer ersten Messserie werden die Ergebnisse gesichtet und auf ihre Plausibilität geprüft. Anschließend werden weitere Messungen durchgeführt. Da noch keine Erfahrungen mit dem Messsystem bestehen soll so vermieden werden, dass durch Fehler in der Durchführung alle Messungen unbrauchbar sind. Des Weiteren sollen bestimmte Messungen mehrfach durchgeführt werden, um die Kontinuität der Messwerte zu überprüfen.

Wenn keine expliziten Informationen angegeben sind, werden alle Messungen so durchgeführt, dass die Puppe im Winkel von 90° zum Sensor steht. Dadurch wird die Puppe seitlich gemessen (vgl. Anhang F, Abbildung 40 bis Abbildung 43). Für diese Ausrichtung wird sich entschieden, da so die Positionierung ohne Messinstrumente am zuverlässigsten möglich ist und die Puppe im späteren Dauerversuch in gleicher Weise positioniert ist.

Tabelle 1 Versuchsszenarien - erste Messserie

Erste Messserie	Entfernung zum Sensor [m]						
Messobjekte:	2	3	4	5	6	7	8
Cube Corner	X		X		X		X
Prüfpuppe ohne Kostüm		X	X	X	X	X	X
Prüfpuppe mit Kostüm		X	X	X	X	X	X
Person mit Winter-Bekleidung		X	X	X	X	X	X
Prüfpuppe ohne Kostüm (0° zum Sensor)			X				
Prüfpuppe ohne Kostüm (45° zum Sensor)			X				

Tabelle 2 Versuchsszenarien - zweite Messserie

Zweite Messserie	Entfernung zum Sensor [m]					
Messobjekte:	3	4	5	6	7	8
Prüfpuppe ohne Kostüm	X	X	X	X	X	X
Prüfpuppe mit Kostüm	X	X	X	X	X	X
Person mit Winter-Bekleidung	X	X	X	X	X	X
Person mit Pullover und Jeans	X	X	X	X	X	X
Person mit Arbeits-Bekleidung	X	X	X	X	X	X
Person mit Regen-Bekleidung	X	X	X	X	X	X
Person mit Sommer-Bekleidung	X	X	X	X	X	X
Prüfpuppe ohne Kostüm (0° zum Sensor)			X			

Bei allen Messungen wird der jeweilige Prüfkörper mittig vor dem Sensor positioniert, da so eine weitere Auswertung der Messergebnisse mit einer Formel erfolgen kann, welche von dem Hersteller als Zusatzinformation gegeben ist. Diese gilt jedoch nur für Targets in Hauptstrahlrichtung des Sensors. Die Antennencharakteristik ist unter anderem dafür verantwortlich, dass Signale zu den Seiten hin schwächer werden und somit die Formel nicht mehr anwendbar ist.

Ebenfalls bei allen Messungen wird der Sensor in einer Höhe von 0,77 Metern positioniert. Dies gewährleistet, dass die Puppe sich auch bei geringen Entfernungen zu einem möglichst großen Teil im Arbeitsbereich des Sensors befindet. Um eine größere Stichprobe und fundiertere Messergebnisse zu erhalten sind weitere Messungen denkbar.

4.3 Versuchsaufbau

Der Radarsensor wird in der genannten Höhe, senkrecht an einem angefertigten Stativ befestigt und mittels eines Labor-Netzteils mit 24V DC versorgt.

Abbildung 9: Aufbau der Messeinrichtung

Die Messungen erfolgen im Außenbereich auf dem Gelände der Hochschule Osnabrück. Dabei wird aufgrund der Range-Auflösung von 1m darauf geachtet, dass sich hinter den Prüfkörpern keine unmittelbaren Gegenstände befinden. Die Messumgebung ist an die Situation angelehnt, dass ein Fahrzeug entlang einer Straße fährt und eine Person den Weg kreuzt beziehungsweise auf der Straße steht. (vgl. Abbildung 11)

4.4 Durchführung der Messung

Die Messungen werden wie im Kapitel 4.2 und 4.3 beschrieben durchgeführt. Dabei werden für je eine Minute Messwerte aufgenommen, sodass circa 550 Werte für den ausgewählten Messbereich, der „*Region of Interest* (RoI)“, für die Auswertung bereitstehen.

Das Wetter am ersten Messtag war bedeckt, teils nebelig, die Temperaturen lagen bei circa 1°C und die Luftfeuchtigkeit bei circa 98%. Am zweiten Tag war es sonnig bei Temperaturen um 6°C und einer Luftfeuchtigkeit von circa 67%. Es besteht keine Möglichkeit eigene Wetterdaten aufzunehmen, aus diesem Grund werden verschiedene Wetteraufzeichnungen verglichen. Dabei können keine gravierenden Unterschiede festgestellt werden und es resultieren die angegebenen Wetterdaten an den jeweiligen Messtagen.

Am ersten Messtag fällt auf, dass die Puppe, im Folgenden mit „Norman“ benannt, ab einer Distanz von fünf bis sechs Metern nicht mehr erkannt wird. Aus diesem Grund wird auf die Versuchsszenarien mit Messungen von über fünf Metern verzichtet. Die anfänglichen Vermutungen bestehen darin, dass die Reflektion der Puppe und somit die empfangende Leistung nicht ausreichend ist. Erst nach der zweiten Messung, im Verlauf der Auswertung fällt auf, dass bei der Entfernung von acht Metern ein Geländer mit einer höheren Amplitude detektiert wird (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11). Aufgrund der Range-Auflösung und der nicht vorhandenen Winkelauflösung wird angenommen, dass das reflektierte Signal des Geländers deutlich stärker ist als das Signal der Puppe und diese deshalb nicht von dem Sensor als eigenständiges Messobjekt erkannt wird.

Im Verlauf der Messungen kommt es wiederholt dazu, dass nach einer Positionsänderung die Prüfpuppe von dem Radarsensor nicht mehr erkannt wird. In den meisten Fällen reicht es aus, das Stativ, an dem sich der Sensor befindet, leicht zu bewegen. Der Sensorhersteller bestätigt auf Nachfrage bezüglich dieses Effektes, dass Objekte, bei denen eine Relativgeschwindigkeit zum Sensor vorliegt, besser detektiert werden können. Ist ein Objekt erkannt, kommt es zu keinen weiteren Problemen.

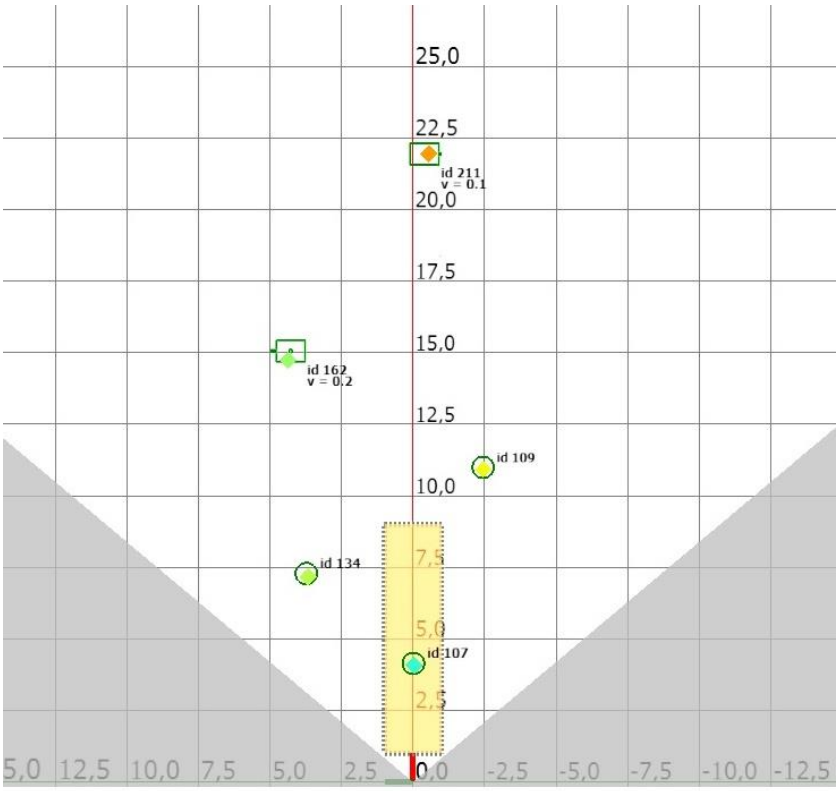
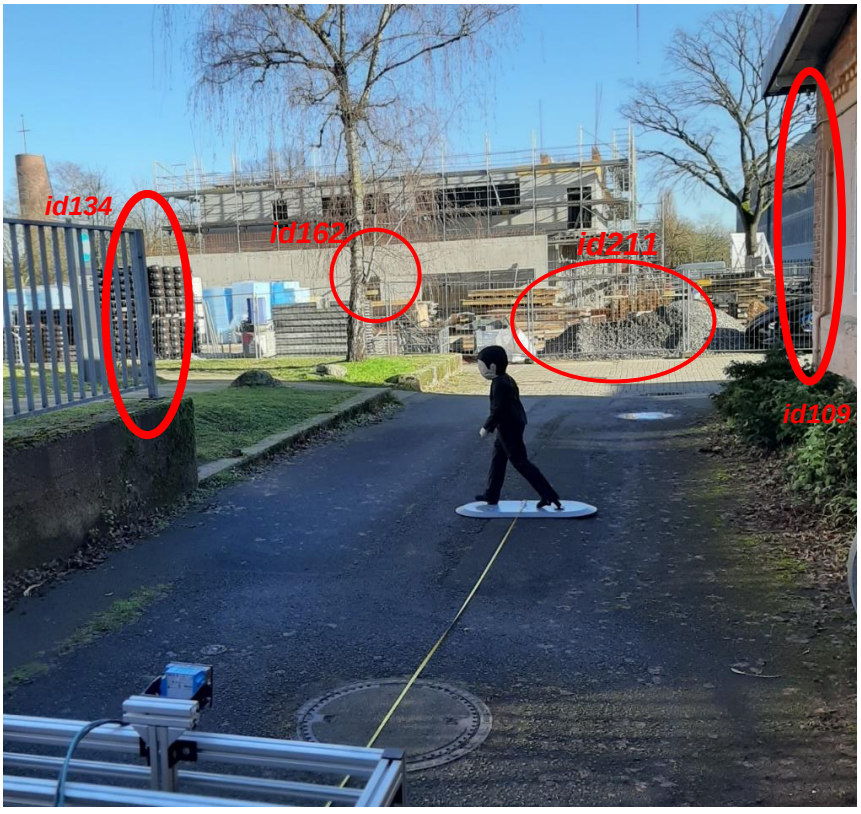


Abbildung 10: Momentaufnahme aus SOPAS ET



,

Abbildung 11: Versuchsszenario mit markierten Gegenständen

4.5 Messergebnisse

Die bei den Messungen erzeugten csv-Dateien werden für die Auswertung der Messergebnisse zunächst in ‚Matlab' eingelesen und die einzelnen Werte, entsprechend der Angaben von der ‚SICK AG', umgeformt. Im nächsten Schritt werden für jede Messung Diagramme angefertigt, in denen zum einen die Amplitudenwerte über die Messdistanz aufgetragen werden und zum anderen die prozentuale Häufigkeit des jeweilige Amplitudenwertes über den Amplitudenwert. Damit wird ein erster Überblick über die einzelnen Messungen gewonnen und sowohl für den gesamten Messbereich, „*Measurement Area*" (MA), als auch für einen ausgewählten Messbereich, „*Region of Interest*" (RoI), erzeugt. Die RoI wird so definiert, dass sie einen Meter vor dem positionierten Messobjekt beginnt und einen Meter dahinter endet.

Der Bezugswert der Amplituden ist nicht bekannt, da die ‚SICK AG' die dB-Werte von dem zugekauften Radar-Frontend ohne detaillierte Kenntnis ihrer Berechnung erhält. Es wurde jedoch bestätigt, dass es sich nicht um dBm-Werte, also mit Bezug auf 1mW, handelt. Eine Vermutung wäre der Bezug von einer Leistung im Bereich von Pikowatt, zum Beispiel die kleinste empfangbare Leistung mit dem Frontend, aber dies wird von der ‚SICK AG' bisher nicht näher definiert.

Abbildung 12 zeigt eines der genannten Amplituden-Distanz-Diagramme für einen gesamten Messbereich. Die Winkel werden bei diesen Abbildungen nicht berücksichtigt, dies ist aber auch nicht notwendig da die Prüfkörper sich mittig vor dem Sensor befinden. Ebenfalls sollte erwähnt werden, dass jedes Wertepaar aus Distanz und Amplitude nur einmal abgebildet wird, ungeachtet der Anzahl der tatsächlichen Vorkommnisse des Wertes. Besonders gut an dieser Abbildung ist die zuvor erwähnten Range-Auflösung des Radarsensors erkennbar.

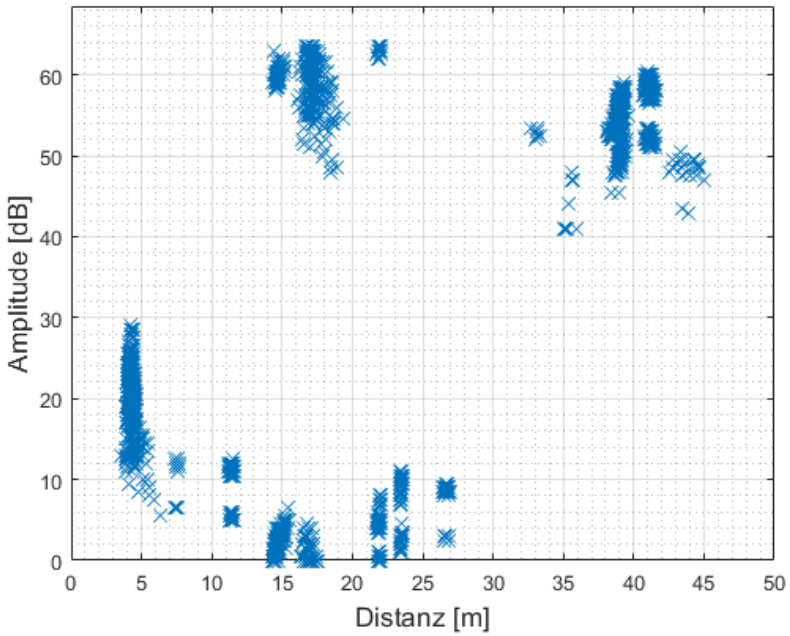


Abbildung 12: Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - gesamter Messbereich

In Abbildung 13 wird der ausgewählte Messbereich detaillierter dargestellt, sodass erkennbar ist, dass die gemessenen Distanzwerte um bis zu 0,6 Meter schwanken.

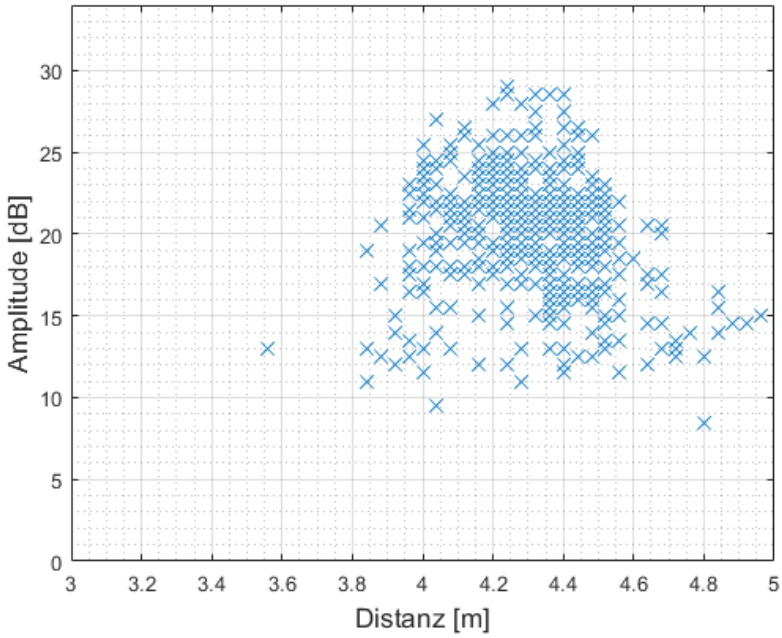


Abbildung 13: Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - ausgewählter Messbereich

In den Abbildung 14 bis Abbildung 17 sind Histogramme aus zwei Messungen dargestellt. Die Amplitudenwerte bei der Messung am Menschen sind in allen Messungen gegenüber den der Puppe, bei dem sie sehr zentriert sind, breit gestreut. Die Streuung, die auch gut in Abbildung 13 erkennbar ist, wird maßgeblich auf Bewegungen der Person während der Messungen zurückgeführt. Diese treten bei der statischen Puppe nicht auf.

Die Messwerte aus dem ausgewählten Messbereich sind in beiden Fällen eindeutig in den Histogrammen für den gesamten Messbereich wiederzufinden. Die unterschiedlichen Prozentangaben der Histogramme begründen sich durch die verschiedene Anzahl an einbezogenen Messwerten. Während im gesamten Messbereich alle Werte mit einbezogen werden, werden im ausgewählten Bereich nur die circa 550 Messwerte berücksichtigt, die tatsächlich mit den Distanzwerten in dem festgelegten Gebiet liegen.

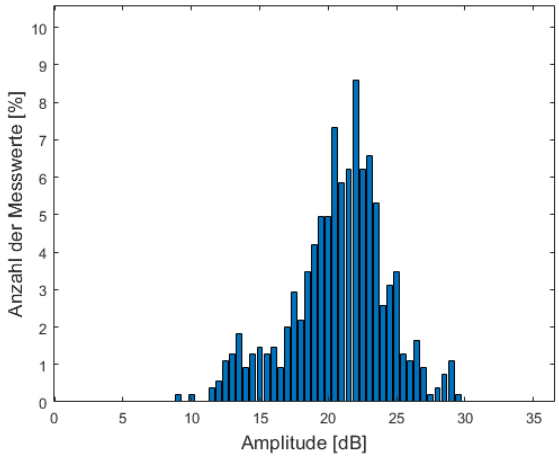


Abbildung 14:
Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - ausgewählter Messbereich

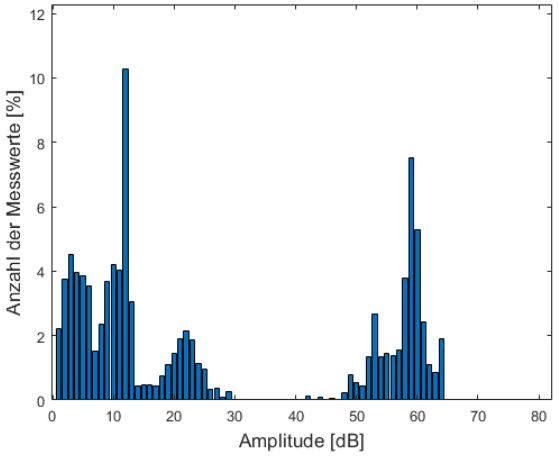


Abbildung 15:
Messung Person mit Regenbekleidung [4m] - gesamter Messbereich

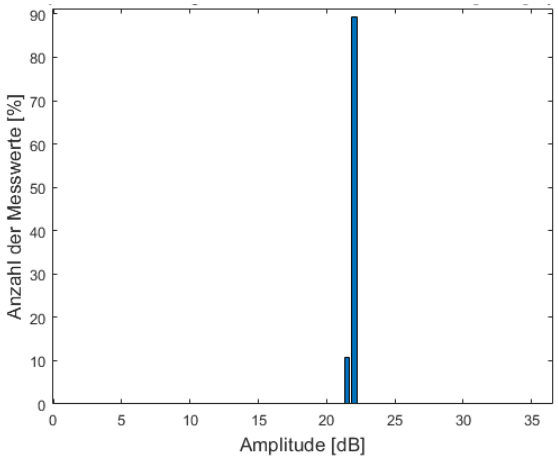


Abbildung 16:
Messung „Norman“ mit Kostüm [4m] – ausgewählter Messbereich

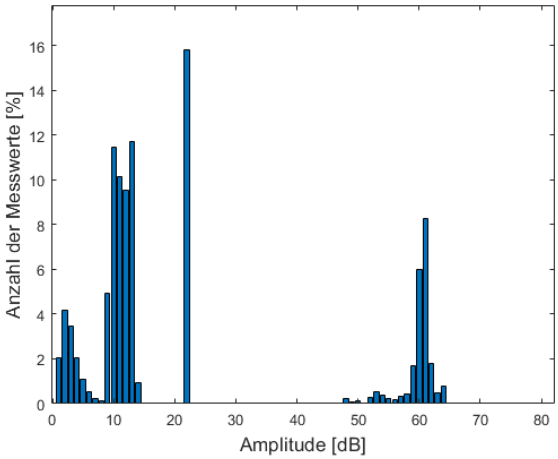


Abbildung 17:
Messung „Norman“ mit Kostüm [4m] - gesamter Messbereich

Zusätzlich zu den Diagrammen werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Distanz-, Amplituden-, Geschwindigkeitswerte und dem Messwinkel bestimmt. Diese Kennzahlen erlauben im späteren Verlauf weitere Aussagen zu den Messungen.

Als weitere Kenngröße soll näherungsweise der RCS-Wert für die Prüfkörper errechnet werden. Da für die Errechnung des Radarquerschnittes unter anderem nähere Informationen zu dem sensorspezifischem Wertebereich der Messwerte notwendig ist wird dies bei der ‚SICK AG' erfragt worauf eine Formel zur Berechnung eines nicht normierten RCS-Wertes bereitgestellt wird:

*rcsDbWithUnknownNorm=AMPL1+MeasurementParam1Block.uiNoiseLevel+40*log10(DIST1)*

Die Formel setzt sich zusammen aus dem Amplitudenmesswert, dem Sensor-Noise-Wert und dem direkten Messwert der Distanz. Aus diesem Grund wird der zu den Messpunkten zugehörige Sensor-Noise-Wert in den csv-Dateien zusätzlich mit abgespeichert. Der Sensor-Noise-Wert ist ein Wert, der während der Messung ständig dynamisch ermittelt wird. Dieser repräsentiert die Stärke des Grundrauschens der Messtechnik, aus dem die Peaks der Amplituden herausragen.

Zur Kalibrierung des nicht normierten RCS-Wertes wird der im Kapitel 3.1 beschriebene Cube Corner vermessen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen aus Amplituden- und Distanzwerten werden gegeneinander in Abbildung 18 aufgetragen. Hierbei fallen besonders die Abweichungen der Amplitude bei sechs und acht Metern auf. Bei einem Blick in Abbildung 19 fällt auf, dass ein Teil der Messwerte mit einer deutlich geringeren Amplitude 20cm hinter den anderen Messwerten liegen. Aus diesem Grund wird in der zweiten Messserie der Tisch einzeln vermessen, auf dem der Cube Corner zur Ermittlung der Amplitude positioniert ist. Die dabei gemessenen Werte liegen genau in dem Bereich, in dem auch die Ausreißer bei der Messung des Cube Corners liegen. Diese Messpunktwanderung ist auch in weiteren Messungen erkennbar.

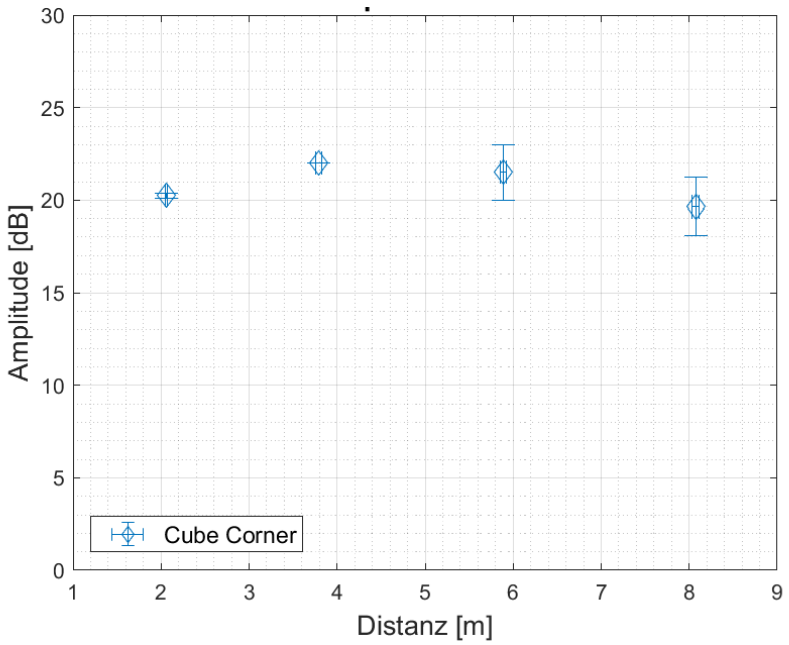


Abbildung 18: Messung „Cube Corner“ - Mittelwerte und Standardabweichung

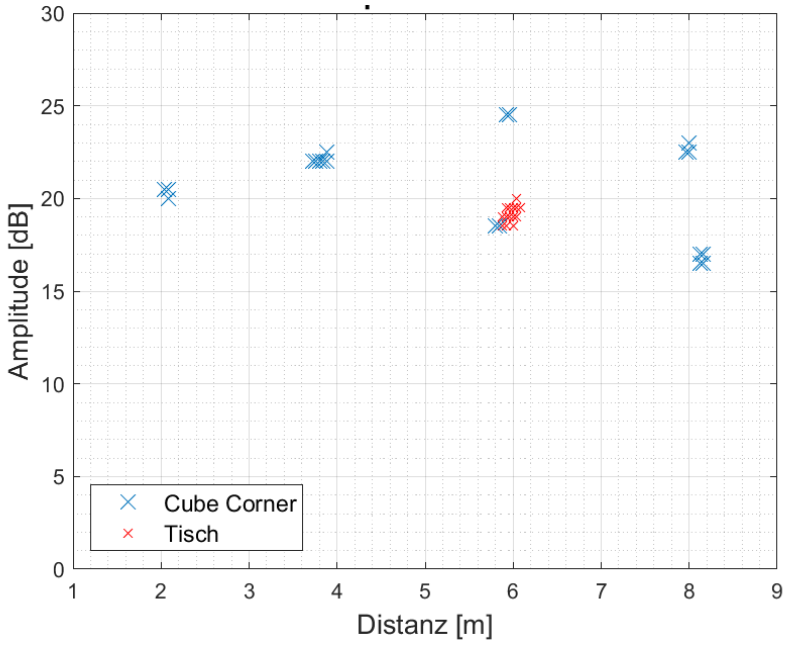


Abbildung 19: Messung „Cube Corner“ - ausgewählter Messbereich

Die Werte des Noise-Level-Wertes liegen bei der Vermessung des Cube Corner im Bereich von 20db bis 30dB. Auch in allen weiteren Messungen liegt das Noise-Level in diesem Bereich.

Bei der von der ‚SICK AG‘ genannten Formel zu Berechnung des nicht normierten RCS-Wertes werden die Amplitudenwerte mit dem Noise-Level und der logarithmierten Distanz

addiert. Nimmt man die Werte, so wie es anhand der Aussage von der ‚SICK AG' verstanden wird, zur Berechnung des RCS-Wertes, so hat der Term:

*[…] +40*log10(DIST1)*

den größten Einfluss auf den RCS-Wert. Die Amplitudenwerte liegen bei allen Messungen in dem Bereich von 10dB bis 30dB und die des Noise-Levels, wie beschrieben, im Bereich von 20dB bis 30dB. Bei dem oben genannten Term wird die unskalierte Distanz in Millimetern logarithmiert und mit dem Faktor 40 skaliert, sodass die Werte bei unseren Messungen oberhalb von 75dB liegen. Dies hat zur Folge, dass nach einer Normierung durch die Messung mit dem Cube Corner alle Prüfkörper einen sehr ähnlichen Radarquerschnitt aufweisen. Da dies nicht plausibel erscheint und der Einfluss der unterschiedlichen Kleidungen durch den Einfluss der Distanz nur schwerer zu erkennen wäre, wird der Ansatz zur Berechnung des RCS-Wertes verworfen.

Versuchsweise wird der Einfluss der Positionierung der Puppe ermittelt. Dabei wird die Prüfpuppe „Norman" in vier Metern Abstand zum Sensor in drei verschiedenen Winkeln gemessen. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 20 ersichtlich. Da es keine Möglichkeit gibt die genaue Winkelposition zu bestimmen und der Fokus dieser Arbeit ein anderer ist, wird diese Untersuchung nicht weiter vertieft. Wie aber zu erwarten ist, weisen die Werte, bei denen die Puppe frontal zum Radarsensor ausgereicht ist (0°) die höchsten Amplituden auf.

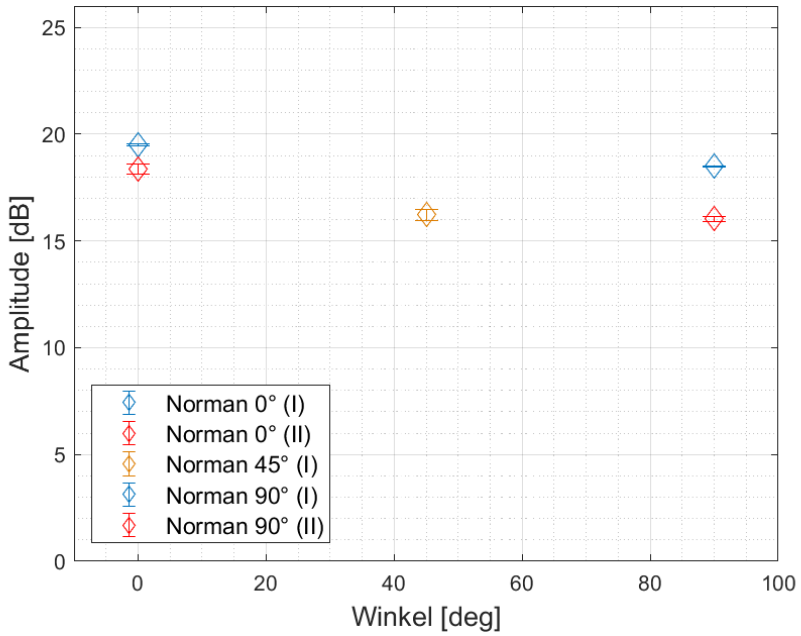


Abbildung 20: Messung „Norman" [4m] in verschiedenen Winkeln zum Sensor - Mittelwerte und Standartabweichung

Bei der Ermittlung der Amplitudenwerte der Puppe mit dem angefertigten Kostüm entsprechen die Messwerte (Abbildung 22) den Erwartungen. Die Ergebnisse der ersten Messserie liegen in allen Distanzen unterhalb der Ergebnisse der zweiten Messserie. Dies ist plausibel, da die Luftfeuchtigkeit bei den ersten Messungen deutlich höhere Werte gegenüber den der

zweiten Messungen aufweist. Die höhere Luftfeuchtigkeit führt zu einer größeren Dämpfung des Empfangspegels. Dieses Verhalten ist leider in den Messungen mit der Puppe ohne Kostüm nicht wiederzufinden (Abbildung 21), weshalb keine qualitative Aussage über den direkten Einfluss des Kostüms auf die Erkennungsfähigkeit der Puppe getroffen werden kann.

Die zwei Messungen der Puppe ohne Kostüm liegen bei drei Metern sehr nah beieinander. Bei der Entfernung von vier Metern liegt der Mittelwert der Amplitude aus der zweiten Messserie unterhalb der ersten Messserie. Dieses Verhalten ist auch bei den Messungen zu beobachten, bei denen „Norman“ unterschiedliche Winkel zum Sensor hat (vgl. Abbildung 20). Bei der Entfernung von fünf Metern ist ein genau gegenteiliges Verhalten zu erkennen.

Dabei treten keine besonderen Ungewöhnlichkeiten in den Messwerten auf. Lediglich bei der ersten Messung von „Norman“ in vier Metern Entfernung ist eine besonders große Messpunktwanderung bei den Distanzen feststellbar. Innerhalb des Zeitraums der Datenaufnahme werden die Distanzwerte von 3,8 Metern bis 4,8 Metern größer (siehe Abbildung 44). Dieses Verhalten tritt jedoch bei mehreren Messungen auf, die plausible Ergebnisse liefern.

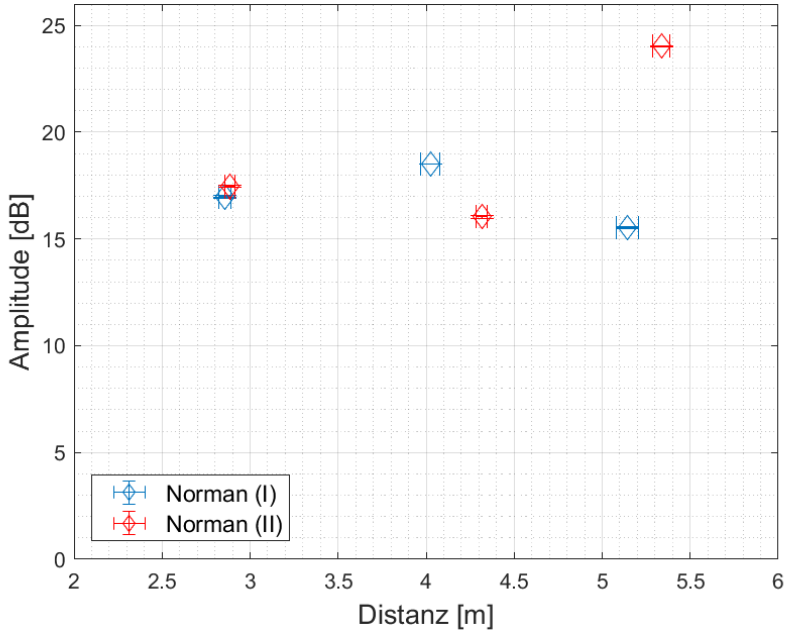


Abbildung 21: Messung „Norman“ ohne Kostüm - Mittelwerte und Standardabweichung

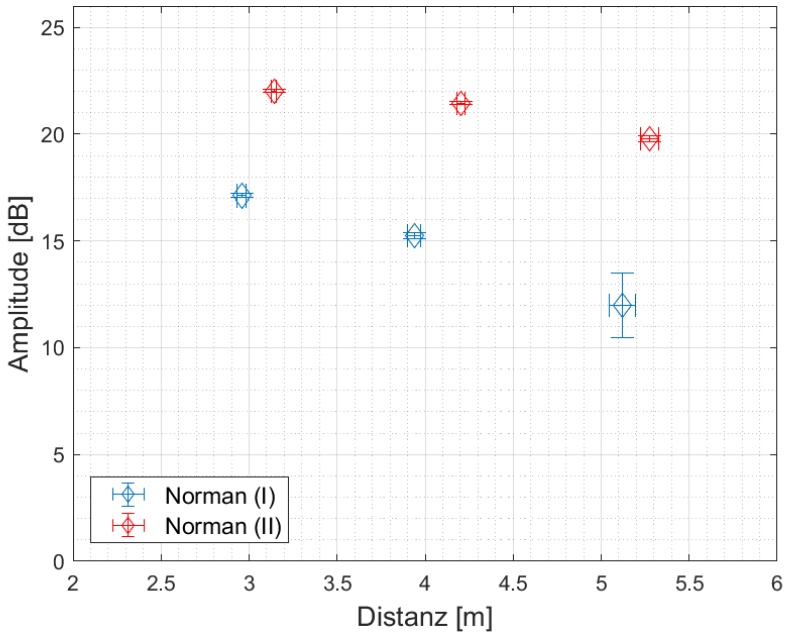


Abbildung 22: Messung „Norman“ mit Kostüm - Mittelwerte und Standardabweichung

Die in Abbildung 22 erkennbare erhöhte Standardabweichung, die in der zweiten Messserie von „Norman“ mit Kostüm bei fünf Metern auftritt, liegt wiederholt an einer Messpunktwanderung. Während der Messung werden abwechselnd eine Amplitude von 9dB in 4,96 Metern Entfernung und eine Amplitude von 15dB in 5,28 Metern Entfernung detektiert. Hierbei ist unklar was den Empfangspegel von 9dB verursacht. Da von dem Sensor keine Informationen bezüglich des vertikalen Detektionswinkels ausgegeben werden kann nur vermutet werden, dass der Standfuß der Puppe Grund für diese Amplitudenwerte ist, da der horizontale Detektionswinkel sich nicht ausschlaggebend verändert. Die abwechselnden Messpunkte sind somit Grund für die erhöhte Standardabweichung und haben einen niedrigeren Mittelwert der Amplitude zur Folge. Betrachtet man nur die Amplitude in 5,28 Metern Entfernung liegt diese bei 15dB.

In Abbildung 23 sind für einen Gesamtüberblick alle Messungen von der Puppe in einem Diagramm abgebildet. Hier ist erkennbar, dass die Streuung der Amplituden mit höherer Distanz zunimmt.

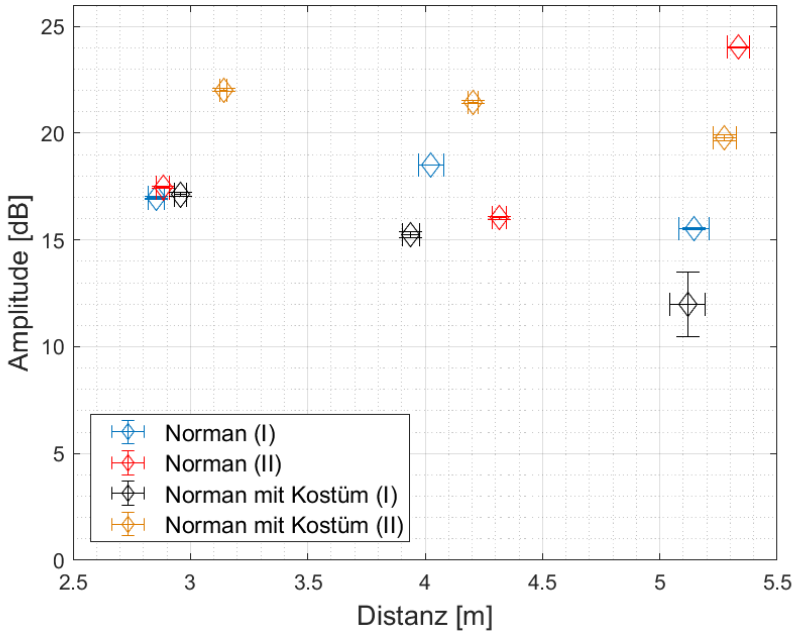


Abbildung 23: Messung „Norman" - Mittelwerte und Standartabweichung

Die Messung des Einflusses von Kleidung auf die Erkennungsfähigkeit eines Menschen wurde in der zweiten Messserie durchgeführt. Betrachtet man Abbildung 24 sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Kleidungen mit dem ‚RMS320' Radarsensor messbar.

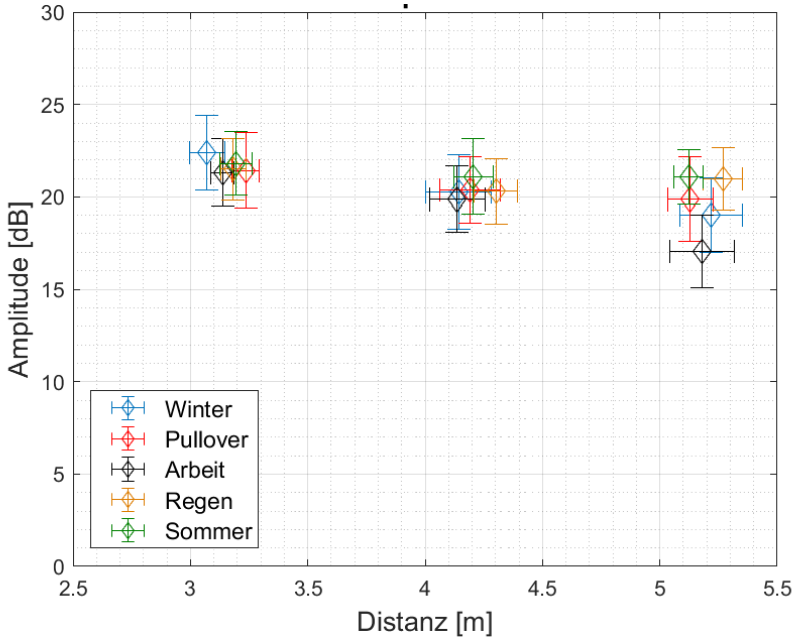


Abbildung 24: Messung Person - Mittelwerte und Standartabweichung

Wie auch bei den Messungen der Puppe weisen bei einer Entfernung von fünf Metern die Amplitudenwerte Unterschiede auf. Da aufgrund der anfänglichen Fehleinschätzung keine Messungen mit größeren Entfernungen durchgeführt werden lässt sich keine eindeutige Aussage zu diesem Verhalten treffen. Da es jedoch sowohl bei „Norman" als auch bei der

Person mit unterschiedlichen Kleidungen in ähnlicher Form auftritt, ist davon auszugehen, dass die unterschiedlichen Bekleidungen nicht der Grund für die Streuung der Amplitudenwerte sind.

5 Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Inbetriebnahme des Radarsensor ‚RMS320'der Firma ‚SICK AG' zeigt, dass die vom Sensor gelieferten Daten mit Hilfe einer eigenen Applikation ausgelesen, umgeformt und anschließend ausgewertet werden müssen, um detaillierte Aussagen über die erfassten Objekte treffen zu können. Die sensoreigene Software ‚SOPAS ET' lässt, anders als zuvor erhofft, keine Rückschlüsse auf den Einfluss von Kleidung auf die Erkennungsfähigkeit eines Menschen zu.

Die bei der Messung des Cube Corner Reflectors auftretenden Abweichungen der Refelktionswerte lassen sich durch eine Messung des einzelnen Tisches, auf dem zuvor der Cube Corner Reflector positioniert war, erklären. In den ausgewerteten Daten kann klar zwischen den Reflektionswerten, die die zwei Objekte hervorrufen unterschieden werden. Dies zeigt jedoch, dass es während einer Messung zu sprunghaften Änderungen des Messpunktes kommen kann. Diese Messpunktwanderung erfolgt aufgrund der vorgeschalteten Auswertelogik des Sensorherstellers.

Bei den Messergebnissen bzgl. der Puppe und des Menschen ist in allen Fällen erkennbar, dass die Entfernungsmessung der statischen Puppe geringere Schwankungen gegenüber den Messungen eines Menschen aufweisen. Dieses ist auf die leichten Bewegungen des Menschen im Stand zurückzuführen.

Die Messungen der Prüfpuppe an zwei verschiedenen Tagen lassen darauf schließen, dass die gemessenen Empfangsleistungen des Sensors abhängig von der Wetterlage des jeweiligen Messtages sind. Dies wird deutlich, da bei den Messungen der Puppe jeweils der gleiche Messaufbau verwendet wird, der Sensor dennoch deutlich unterschiedliche Empfangsleistungswerte in dB ausgibt. Aufgrund der geringen Variationen an den Messtagen kann keine allgemein gültige Aussage über den Einfluss des Wetters auf das Verhalten der empfangenen Leistungswerte getroffen werden.

Die Auswertung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Messungen mit der Prüfpuppe, weist in Bezug auf die jeweilige Messentfernung und der Variation zwischen dem Tragen des Kostüms oder dem Tragen keines Kostüms einige Schwankungen, vor allem bei der Messentfernung von fünf Metern, auf. In den Messergebnissen des Menschen als Prüfkörper wird ersichtlich, dass es durch das Tragen von verschiedenen Kleidungsstücken zu keinen relevanten Unterschieden der empfangenen Leistungswerte kommt. Die Mittelwerte und ihre Standardabweichungen liegen bei den kurzen Entfernungen nah beieinander. Auch diese Ergebnisse weisen bei fünf Metern eine etwas stärkere Streuung der empfangenen Werte der Leistungsamplituden auf. Diese Streuung, vor allem ab einer Entfernung von fünf Metern können jedoch nicht auf eine feste Größe zurückgeführt werden und folgen keiner erkennbaren Regel. Da die Streuungen des Messwertes bei der Puppe und dem Menschen auftreten wird angenommen, dass diese nicht auf die unterschiedlichen Kleidungsmaterialien zurückzuführen sind.

Bei dem Vergleich der Empfangsleistungen zwischen der Puppe und dem Menschen liegen alle Mittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen in einem Amplitudenbereich von 15 dB bis 25 dB. Somit können keine relevanten Unterschiede zwischen den Detektionen in Bezug auf die Höhe der empfangenen Leistungen festgestellt werden. Eine eindeutige Unterscheidung zwischen Mensch und Prüfpuppe ist dadurch nicht möglich.

Aufgrund der zeitlichen Begrenzung dieser Arbeit können keine weiteren Messungen durchgeführt werden. Um eine größere Stichprobe und fundierte Ergebnisse zu erhalten sind jedoch weitere Messungen notwendig. Dabei könnten ausgewählte Versuche dieser Arbeit wiederholt werden, um die bisher getroffenen Aussagen zu validieren. Außerdem wäre eine Wiederholung der Messungen auf einer freien Fläche sehr interessant, um Störfaktoren besser ausgrenzen und die Ergebnisse so konkreter auf das Messobjekt beziehen zu können.

6 Literaturverzeichnis

[1] B. Huder, „Einführung in die Radartechnik," Teubner Verlag, 1999, p. 8 ff..

[2] B. Huder, „Einführung in die Radartechnik," Teubner Verlag, 1999, pp. 5-8.

[3] B. Huder, „Einführung in die Radartechnik," Teubner Verlag, 1999, pp. 63-66.

[4] A. Ludloff, „Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung," Vieweg+Teubner, 2008, p. 21 Kap.2.

[5] B. Huder, „Einführung in die Radartechnik," Teubner Verlag, 1999, pp. 41-44.

[6] B. Huder, „Einführung in die Radartechnik," Teubner Verlag, 1999, p. 77 ff..

[7] „SICK - Radarsensoren RMS3xx," [Online]. Available: https://www.sick.com/de/de/mess-und-detektionsloesungen/radarsensoren/rms3xx/c/g448551. [Zugriff am 27 Januar 2020].

[8] J.-M. C. Joaquim Fortuny-Guasch, „Radar Cross Section Measurements of Pedestrian Dummies and Humans in the 24/77 GHz Frequency Bands," Publications office of the European Union, 2013.

[9] S. H. F. L. C. S. Hermann Winner, „Handbuch Fahrerassistenzsysteme," Springer Vieweg, 2015, p. 124.

[10] „Articulated pedestrian target ACEA specifications," [Online]. Available: https://www.acea.be/publications/article/articulated-pedestrian-target-specifications. [Zugriff am 12 Februar 2020].

[11] „Elektromagnetisches Spektrum und Interaktion mit der Atmosphäre," [Online]. Available: http://www.demarine.de/lr/web/guest/em-spektrum . [Zugriff am 22 Januar 2020].

[12] „Radarsensorik zur Erfassung bewegter und stationärer Objekte," [Online]. Available: https://www.innosent.de/fileadmin/media/dokumente/Downloads/InnoSenT_Applikationsschrift_1_-_web.pdf. [Zugriff am 12 Februar 2020].

Anhang A Messung mit Winter-Bekleidung

Messentfernung:	4m
Bekleidung:	• Jacke: 100% Polyamid • Hose: 98% Baumwolle 2% Elasthan

Abbildung 27: Person mit Winter-Bekleidung

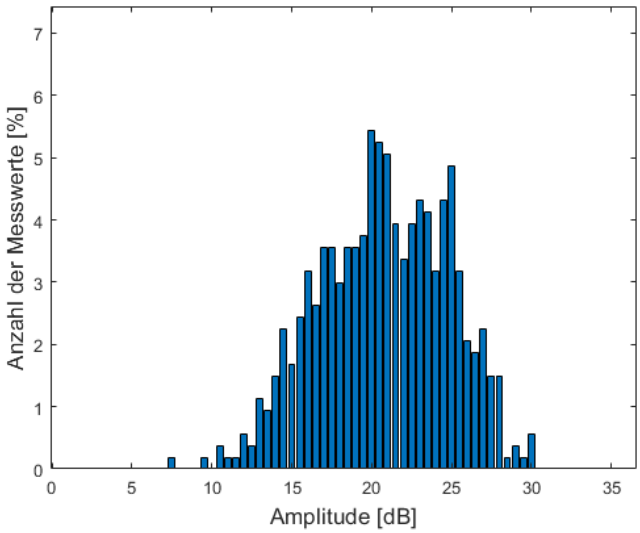


Abbildung 26: Histogramm: Person mit Winter-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

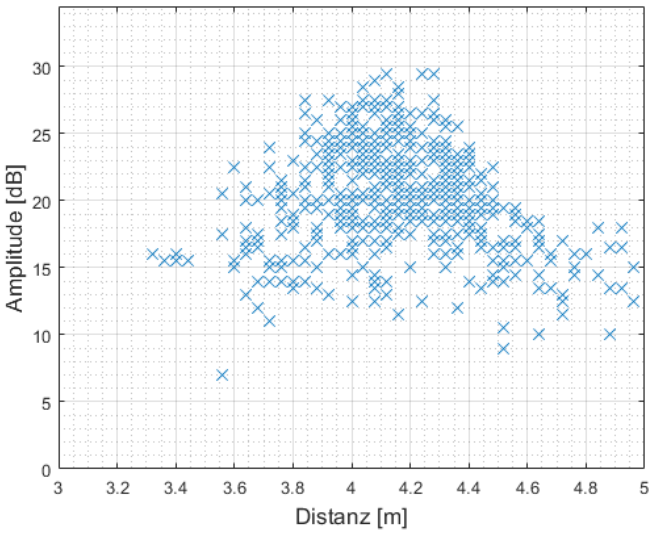


Abbildung 25: Messung: Person mit Winter-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

Anhang B Messung mit Pullover und Jeanshose

Messentfernung:	4m
Bekleidung:	• Pullover: 80% Baumwolle 20% Polyester • Hose: 98% Baumwolle 2% Elasthan

Abbildung 30: Person mit Pullover und Jeanshose

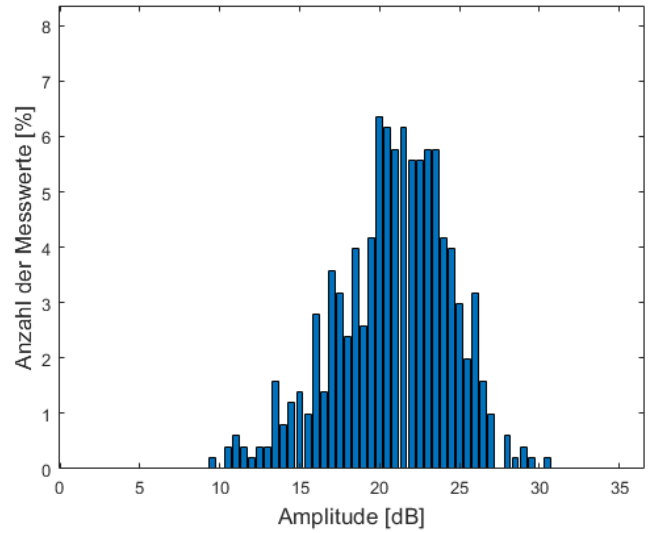


Abbildung 29: Histogramm: Person mit Pullover und Jeanshose - ausgewählter Messbereich

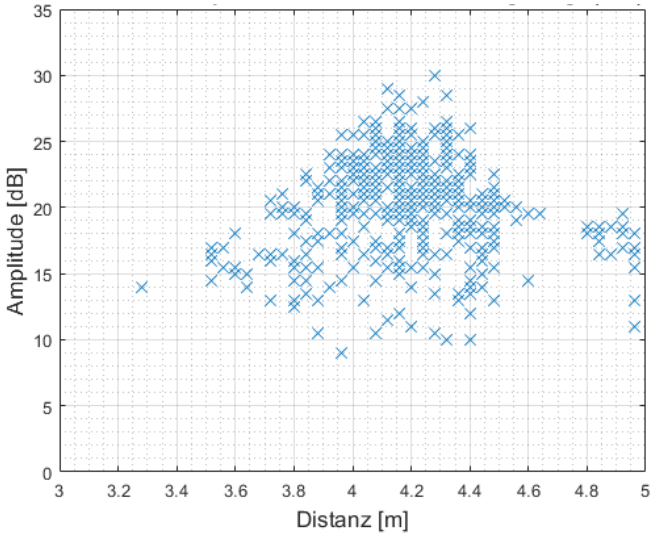


Abbildung 28: Messung: Person mit Pullover und Jeanshose - ausgewählter Messbereich

Anhang C Messung mit Arbeits-Bekleidung

Messentfernung:	4m
Bekleidung:	• Jacke: 100% Polyester Twill + Polyester Fleece • Hose: 65% Polyester 35% Baumwolle

Abbildung 31: Person mit Arbeits-Bekleidung

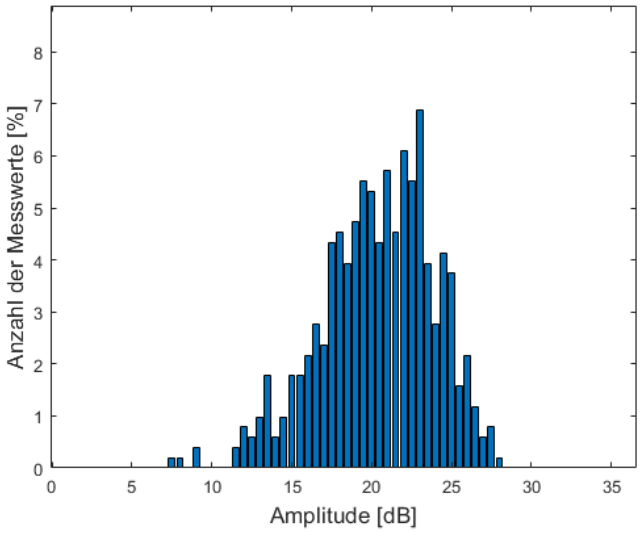


Abbildung 33: Histogramm: Person mit Arbeits-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

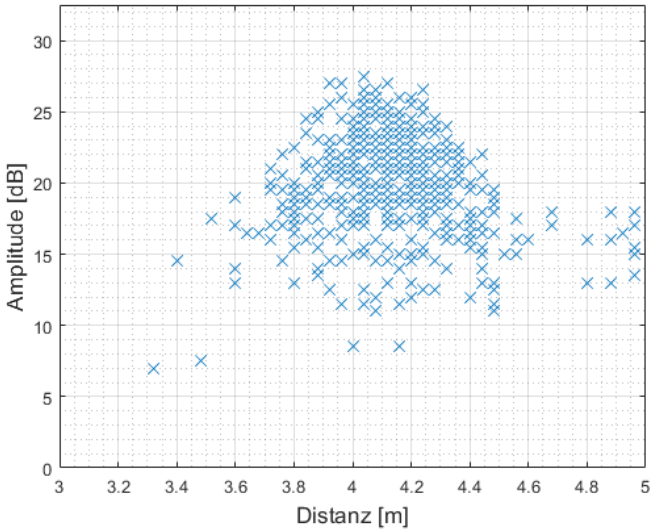


Abbildung 32: Messung: Person mit Arbeits-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

Anhang D Messung mit Regen-Bekleidung

Messentfernung:	4m
Bekleidung:	• Jacke: 100% Polyester mit PU-Beschichtung • Hose: 65% Polyester 35% Baumwolle

Abbildung 34: Person mit Regen-Bekleidung

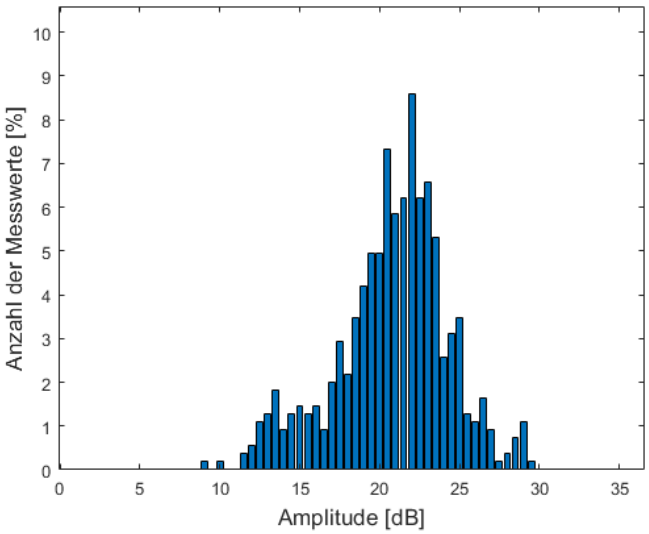


Abbildung 36: Histogramm: Person mit Regen-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

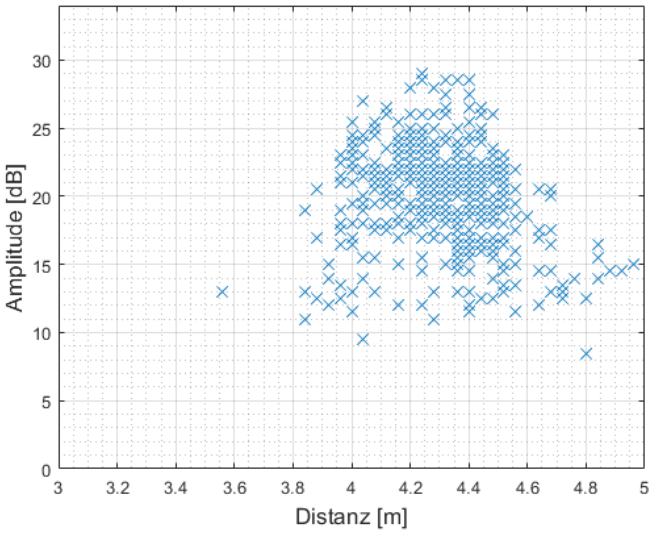


Abbildung 35: Messung: Person mit Regen-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

Anhang E Messung mit Sommer-Bekleidung

Messentfernung:	4m
Bekleidung:	• T-Shirt: 100% Baumwolle • Hose: 100% Baumwolle

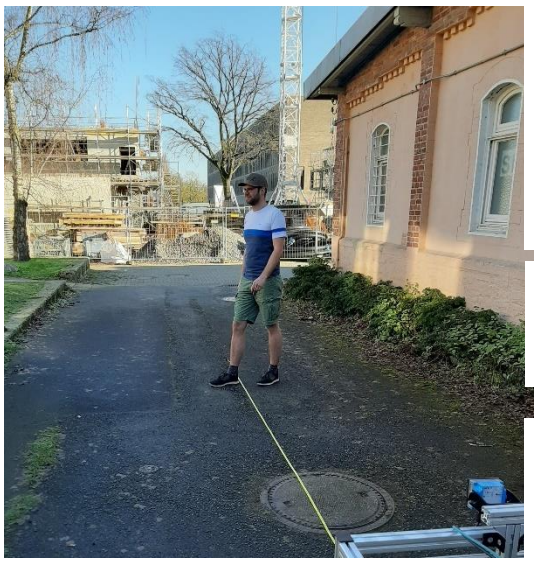


Abbildung 39: Person mit Sommer-Bekleidung

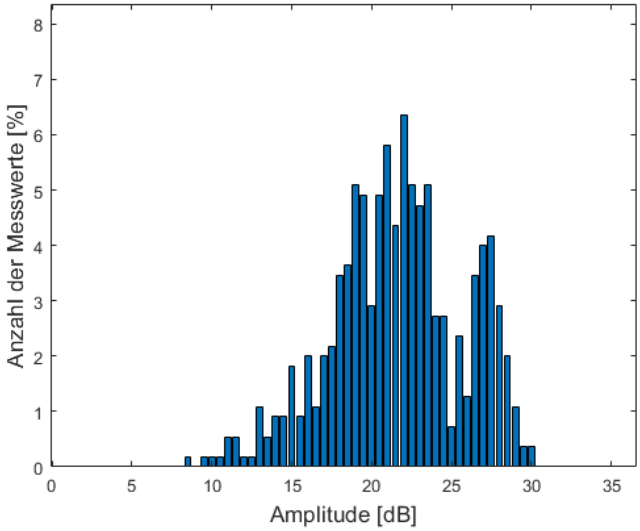


Abbildung 38: Histogramm Person mit Sommer-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

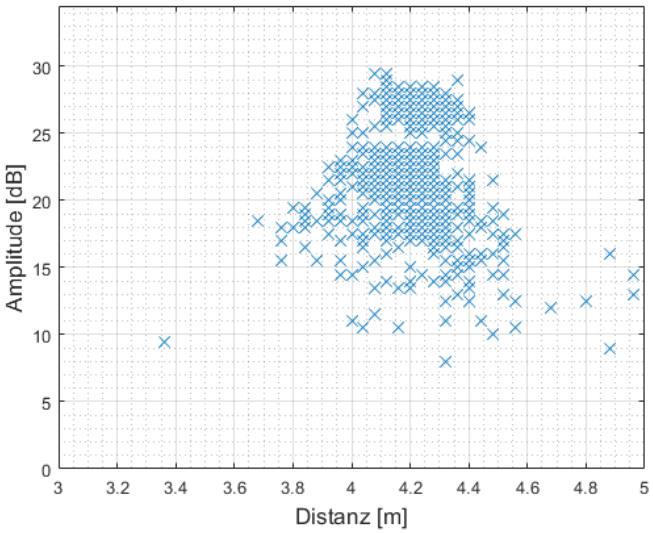


Abbildung 37: Messung: Person mit Sommer-Bekleidung - ausgewählter Messbereich

Anhang F Messung „Norman“

Abbildung 40: „Norman“ ohne Kostüm (I)

Abbildung 42: „Norman“ ohne Kostüm (II)

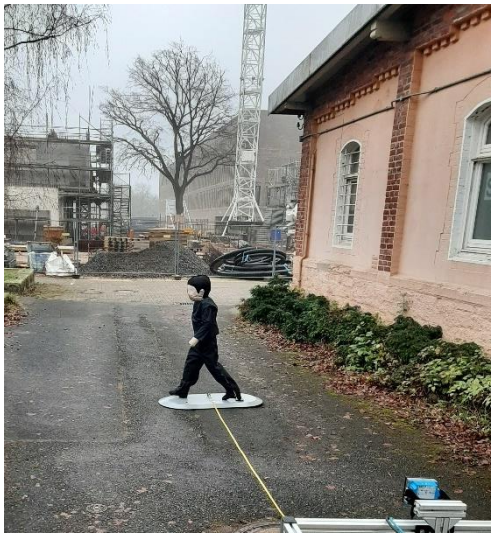


Abbildung 41: „Norman“ mit Kostüm (I)

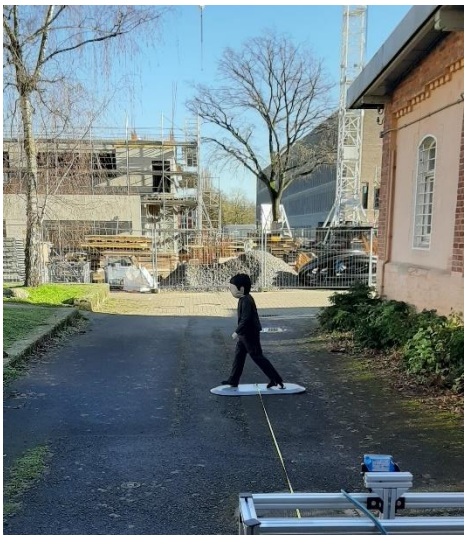


Abbildung 43: „Norman“ mit Kostüm (II)

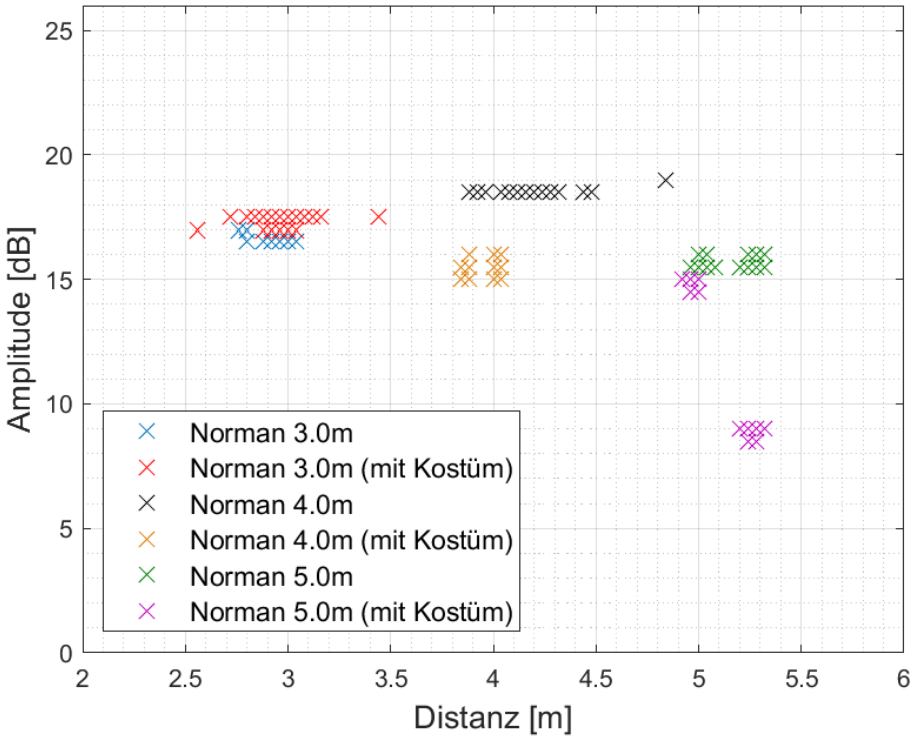


Abbildung 44: Messung „Norman“ erste Messserie

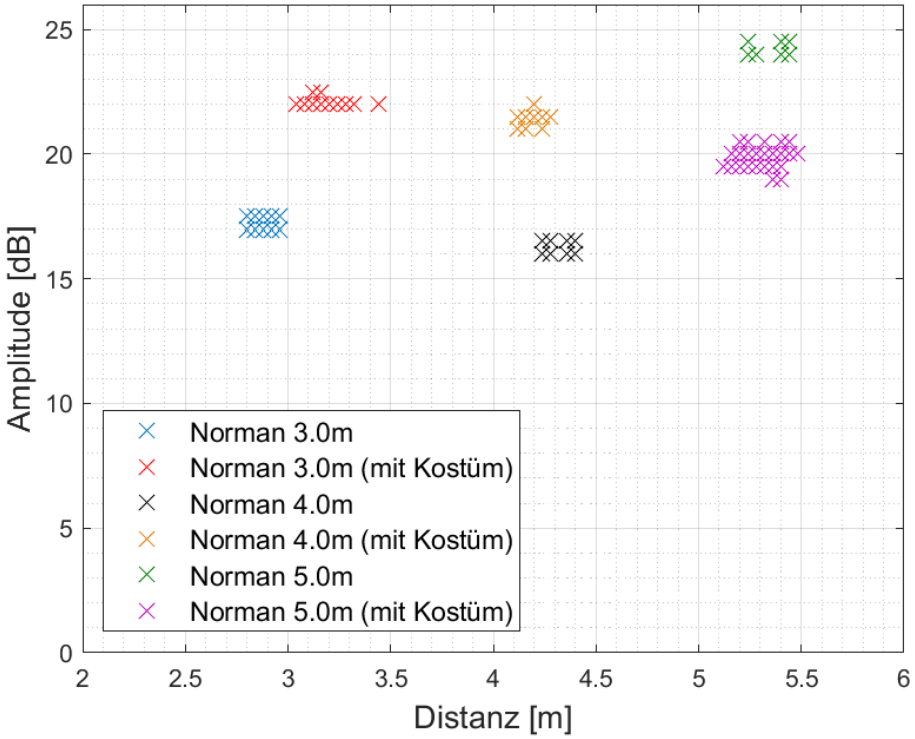


Abbildung 45: Messung „Norman“ zweite Messserie

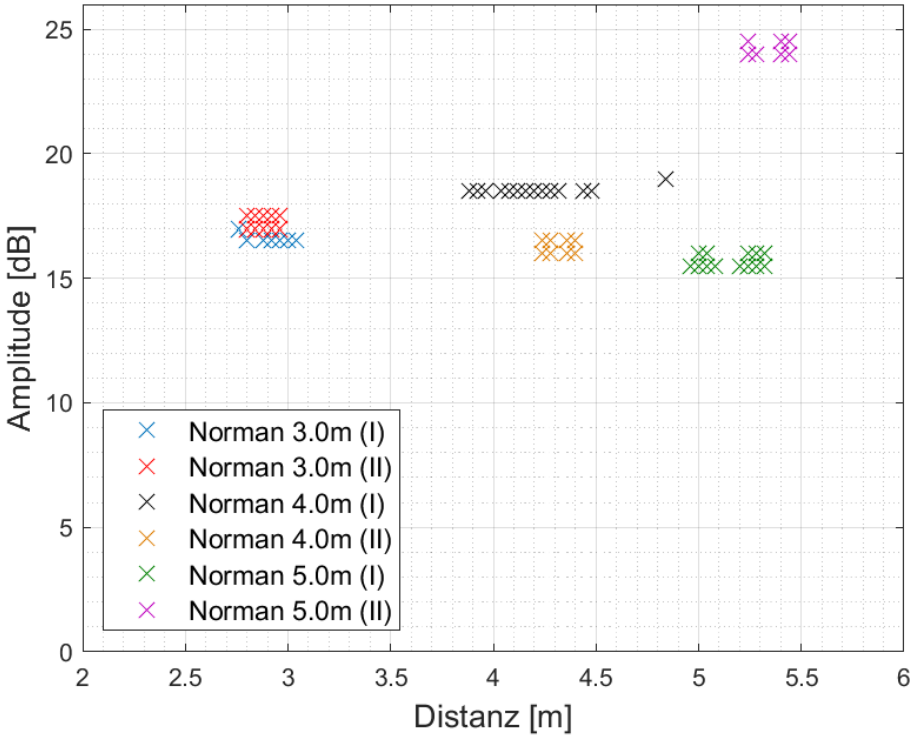


Abbildung 46: Messung „Norman“ ohne Kostüm (gesamt)

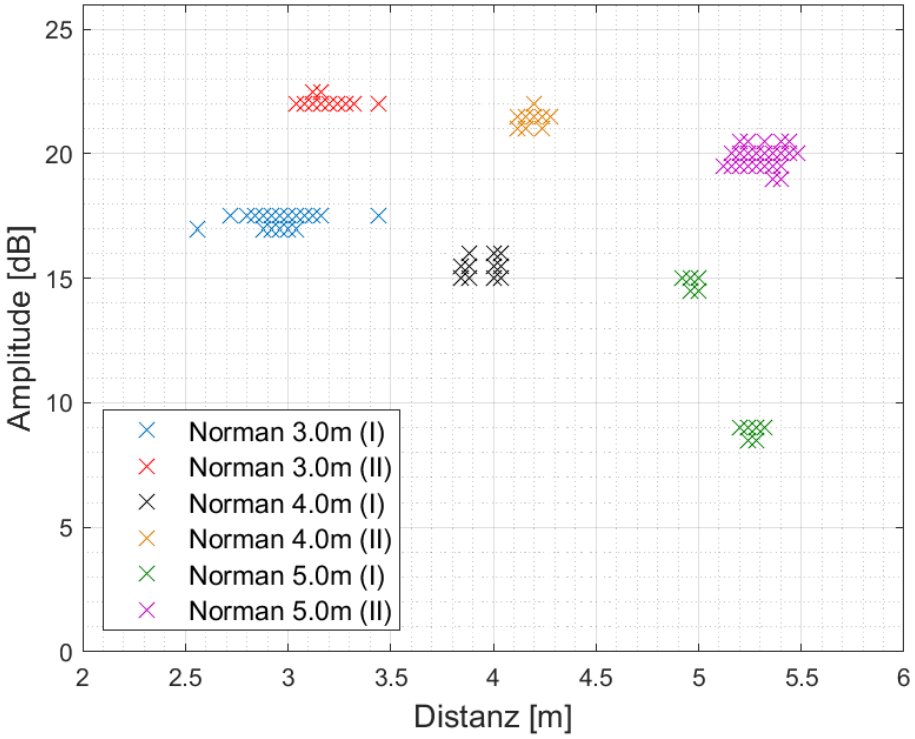


Abbildung 47: Messung „Norman“ mit Kostüm (gesamt)