



9

Markus Schartel

Signalverarbeitungskonzepte zur
Minendetektion mittels drohnen-
gestütztem Ground Penetrating
Synthetic Aperture Radar



**Signalverarbeitungskonzepte zur Minendetektion
mittels drohnengestütztem Ground Penetrating
Synthetic Aperture Radar**



**Signalverarbeitungskonzepte zur Minendetektion
mittels drohnengestütztem Ground Penetrating
Synthetic Aperture Radar**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS
(Dr.-Ing.)**

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Informatik und Psychologie der Universität Ulm

von

Markus Schartel

aus Lörrach

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Waldschmidt
Dr.-Ing. Jürgen Hasch

Amtierender Dekan: Prof. Dr.-Ing. Maurits Ortmanns

Ulm, 10. Dezember 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Dissertation, Universität Ulm,
Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Informatik und Psychologie, 2021

Impressum

Universität Ulm
Institut für Mikrowellentechnik
Prof. Dr.-Ing. Christian Waldschmidt
Albert-Einstein-Allee 41
89081 Ulm
<https://www.uni-ulm.de/mwt>

Eine Übersicht über alle Bände der Schriftenreihe finden Sie unter
<https://www.uni-ulm.de/mwtschriften>

Diese Veröffentlichung ist im Internet auf dem institutionellen Repositorium der Universität Ulm (<https://oparu.uni-ulm.de>) verfügbar und dort unter der Lizenz CC BY-NC-ND 4.0 publiziert.



Details zur Lizenz finden Sie unter
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ISBN 978-3-948303-19-8

ISBN 978-3-948303-20-4 (E-Book)

Vorwort

Die Arbeit entstand im Rahmen des Projekts FindMine im Zeitraum von Januar 2016 bis Februar 2020, in dem ich als Akademischer Mitarbeiter am Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm angestellt war. Das Ziel des – von der Urs Endress Stiftung ins Leben gerufenen – Projekts ist die Entwicklung einer autonom fliegenden Sensorplattform, die bei der humanitären Minenräumung unterstützend eingesetzt werden soll.

An der Entstehung dieser Arbeit waren viele Personen involviert, die ich an dieser Stelle erwähnen möchte. Mein Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Waldschmidt für die Betreuung, die fachlichen Diskussionen und die angenehme Arbeitsatmosphäre in den vergangenen fünf Jahren. Ein großer Dank auch an die Urs Endress Stiftung für die Möglichkeit, dieses Thema in diesem Umfang zu bearbeiten. Mein besonderer Dank gilt dem Projektteam. Hervorzuheben sind Dr.-Ing. Winfried Mayer für die wertvollen Diskussionen und Beiträge, die in diese Arbeit geflossen sind und Ralf Burr für die tolle Zusammenarbeit, die technische Unterstützung und die gemeinsamen Messkampagnen. Herrn Dr.-Ing. Jürgen Hasch möchte ich für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters danken.

Auch bei all meinen ehemaligen Kollegen bedanke ich mich für die schöne und abwechslungsreiche Zeit am Institut. Nur durch euer Mitwirken konnte ich die Arbeit so realisieren. Für die Unterstützung – sei es bei technischen Fragen und Umsetzungen, in Sachen L^AT_EX, Feedback zu Abbildungen oder der Korrektur – möchte ich Philipp Hügler, Dr.-Ing. Fabian Roos, Martin Geiger und Timo Grebner danken. Ein weiterer Dank geht an Dr.-Ing. Frank Bögelsack und Lukas Häffner für die Korrektur sämtlicher Veröffentlichungen.

Des Weiteren möchte ich mich bei den zahlreichen studentischen Mitarbeitern bedanken. Ohne euch wäre diese Dissertation in diesem Zeitraum nicht möglich gewesen.

Ein großer Dank auch an meine Familie, die mich stets motivierte meinen Weg weiterzugehen. Besonders danke ich meiner Frau Patricia für ihre Geduld

und dass sie mir den Rücken freigehalten hat. Lea und Luca, ich wollte mich dafür bedanken, dass ihr mich immer aufgeheitert und zum Lachen gebracht habt.

Schopfheim, Januar 2021
Markus Schartel

Kurzfassung

Die humanitäre Minenräumung ist langsam, teuer und gefährlich. Das am häufigsten eingesetzte technische Hilfsmittel ist ein Metalldetektor, der in unmittelbarer Nähe der Mine eingesetzt werden muss. Ziel dieser Arbeit war die Erforschung und Entwicklung der Signalverarbeitungskette für ein Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar, das an einer autonom fliegenden Plattform befestigt und zur gefahrlosen Detektion von Stolperdrähten, vergrabenen Antipersonenminen und anderer Sprengkörper eingesetzt werden kann. Das entwickelte Messsystem besteht aus einem Hexacopter, einem 2×2-Radar, das im Frequenzbereich 1 GHz – 4 GHz arbeitet, und einer hochgenauen Lokalisierungseinheit. Für die Detektion von Stolperdrähten wird in dieser Arbeit eine lineare Bewegung mit dem seitlich zur Flugrichtung ausgerichteten Radar genutzt, um einen hohen Flächendurchsatz zu erzielen. Neben dem Einfluss des Einfallswinkels der elektromagnetischen Welle wurde auch der Einfluss der Drahtlänge und Vegetation messtechnisch untersucht. Diese Ergebnisse bildeten den Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Algorithmus auf Basis einer modifizierter Radon-Transformation, der zur automatischen Detektion von Stolperdrähten angewandt werden kann. Zur Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit vergrabener Objekte wird die Flexibilität der Drohne ausgenutzt, beliebige Trajektorien abfliegen zu können. Durch kreisförmige Überflüge in unterschiedlichen Höhen wird die Winkeldiversität und anschließend durch die kohärente Überlagerung der Daten das Signal-zu-Clutter-Verhältnis erhöht, sodass vergrabene Landminen als auch Bestandteile von improvisierten Sprengkörpern detektiert werden können. Die ersten Messergebnisse verifizieren den Systemansatz und demonstrieren, dass Sprengkörper und deren Bestandteile auf und unter der Erdoberfläche detektiert und zentimetergenau lokalisiert werden können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Radargrundlagen	5
2.1	FMCW-Radar	6
2.2	Radar mit synthetischer Apertur (SAR)	8
2.2.1	SAR-Grundlagen	8
2.2.2	SAR-Prozessierung	11
2.2.3	Bewegungskompensation und Positionsgenauigkeit	15
2.2.4	Circular SAR (CSAR)	19
2.3	Ground Penetrating Radar (GPR)	19
2.3.1	Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle im Erdreich	20
2.4	Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar (GPSAR)	24
2.4.1	Erweiterung des Backprojection-Algorithmus	24
2.4.2	Einfluss der relativen Permittivität	26
2.4.3	Multi-Baseline GPSAR	27
3	Messsystem, Datenverarbeitung und Bewertungskriterien	31
3.1	Messsystem	31
3.2	Datenverarbeitung	34
3.2.1	Preprocessing	34
3.2.2	Postprocessing	41
3.3	Bewertungskriterien	42
3.3.1	Histogramme	42
3.3.2	CFAR-Detektor	43
4	Drohngestützte SAR-Prozessierung	47
4.1	Leistungsfähigkeit des SAR	47
4.1.1	Auflösungsvermögen in Cross- und Ground-Range	47
4.1.2	Auflösung in z-Richtung	50

4.2	Detektion von Stolperdrähten	54
4.2.1	Einfluss von Einfallswinkel, Drahtlänge und Vegetation	55
4.2.2	Liniendetektion	62
4.2.3	Radon-Transformation	64
4.2.4	Algorithmus zur Liniendetektion	68
4.2.5	Verifikation und Leistungsfähigkeit des Algorithmus	75
4.3	Zusammenfassung	82
5	Circular Multi-Baseline GPSAR	83
5.1	Leistungssteigerung durch CSAR	83
5.1.1	GPSAR mit linearer und zirkularer Apertur	83
5.1.2	3D-Auflösung	99
5.1.3	Fazit	103
5.2	Detektion von Landminen	104
5.2.1	Messaufbau	105
5.2.2	GPSAR-Messergebnisse	106
5.2.3	Detektionsergebnis	113
5.3	Detektion von Improvised Explosive Devices (IEDs)	117
5.3.1	Messaufbau	117
5.3.2	GPSAR-Messergebnisse	118
5.3.3	Detektionsergebnis	119
5.4	Zusammenfassung	121
6	Zusammenfassung	125
A	Weitere Simulations- und Messergebnisse	129
A.1	Trennfähigkeit in der xy -Ebene	129
A.2	Vergleich von LSAR und CSAR	132
A.3	Detektion von Landminen – Histogramme	134
	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	137
	Literaturverzeichnis	139

1 Einleitung

Weltweit fallen jährlich mehrere tausend Menschen Landminen zum Opfer [1]. Über 87% davon sind Zivilisten, von denen etwa die Hälfte Kinder sind [2]. Mehr als 60 Länder sind mit Landminen, Blindgängern, Streumunition oder [Improvised Explosive Devices \(IEDs\)](#) verseucht. Bei der Minenräumung kam es im Jahr 2017 zu insgesamt 60 dokumentierten Zwischenfällen, von denen 18 tödlich endeten [1]. Aufgrund dieser Sprengkörper wird der Wiederaufbau der Konfliktregionen stark beeinträchtigt. Flächen sind für die rückkehrende Bevölkerung landwirtschaftlich nicht mehr nutzbar, der Zugang zu Wasser wird behindert und Wohnhäuser wurden mit Sprengfallen unbetretbar gemacht [3]. Die Sprengkörper können auf oder neben Straßen, im Wald, entlang von Grenzen, um Häuser oder um Schulen liegen, im Boden vergraben, unter Gegenständen versteckt oder als harmloser Gegenstand, z. B. als Kinderspielzeug, getarnt sein.

Die Abmessungen und Eigenschaften der Sprengkörper variieren stark. Landminen und [IEDs](#) bestehen aus einem Zünder, Sprengstoff, einem Auslösemechanismus und einem Gehäuse [4]. Der Zünder ist meist aus mehreren Metallteilen aufgebaut, die Gehäuse bestehen aus Kunststoff, Holz oder Metall. Als Sprengstoff wird beispielsweise [Trinitrotoluol \(TNT\)](#) oder [Ammonium Nitrate Fuel Oil \(ANFO\)](#) eingesetzt. Der Durchmesser von [Antipersonnel- \(AP\)](#)-Minen liegt im Bereich von 40 mm bis 200 mm bei einer Höhe zwischen 30 mm und 80 mm. [AP](#)-Minen werden oberflächennah, d. h. nur wenige Zentimeter unterhalb der Erdoberfläche bis in eine Tiefe von etwa 25 cm, vergraben [5]. Die Abmessungen von [Antitank- \(AT\)](#)-Minen sind größer, jedoch können sie auch tiefer vergraben werden. [IEDs](#) gibt es, wie ihr Name verrät, in den unterschiedlichsten Formen und Ausführungen. Sie bestehen oft aus Alltagsgegenständen. Der Sprengstoff wird z. B. in eine Plastikkanister oder in metallischen Rohrstücken gefüllt und für die Verbindung vom Auslösemechanismus (Handy bei Fernauslösung, Stolperdraht, Druckplatte) zum Zünder wird meist ein Draht verwendet [6], [7]. Bei [Unexploded Ordnances \(UXOs\)](#) handelt es sich meist um rotationssymmetri-

sche Objekte, die aufgrund der Größe und des hohen Metallgehalts prinzipiell leichter zu detektieren sind als AP-Minen aus Plastik. Beispiele hierfür sind Granaten, Bomben und Projektilen [4].

Die Vielfalt an Sprengkörpern und Umgebungsbedingungen, unter denen sie eingesetzt werden, ist enorm. Dies ist einer der Gründe, warum im Jahresbericht der [Swiss Foundation for Mine Action \(FSD\)](#) von 2018 die humanitäre Minenräumung als eine langsame, teure, technologiearme, arbeitsintensive und gefährliche Tätigkeit beschrieben wird [6]. Die Herausforderung für ein technisches Hilfsmittel, das zur Minensuche eingesetzt werden soll, ist neben der reinen Detektion des gesuchten Objekts die Unterscheidung, ob es sich bei dem detektierten Objekt tatsächlich um einen Sprengkörper oder um einen Falschalarm handelt. Beispielsweise können je nach Sensorprinzip Metallfragmente, Patronenhülsen, Blechdosen und sonstige metallische und nichtmetallische Abfälle sowie die Bodenoberflächen selbst oder Inhomogenitäten wie Wasserpflüzen, Wassereinlagerungen, Höhlen von Kleintieren, Steine, Wurzeln und vieles mehr zu unerwünschten Falschalarmen führen [4].

Das zuverlässigste und meist eingesetzte technische Hilfsmittel in der humanitären Minenräumung ist der Metalldetektor. Aufgrund des geringen Metallgehalts in Minimum-Metal Mines sind [Ground Penetrating Radars \(GPRs\)](#) eine vielversprechende Ergänzung zu Metalldetektoren. In den vergangenen Jahrzehnten wurde unter anderem an der Kombination dieser beiden Systeme gearbeitet [8]–[10]. Der große Nachteil dieser handgetragenen Geräte besteht darin, dass sie in geringem Abstand zum Boden und in unmittelbarer Nähe zur Bedrohung eingesetzt werden müssen.

Eine große technische Verbesserung könnte mit einem Sensorsystem erzielt werden, das Sprengkörper aus der Ferne detektieren kann. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist daher eine autonom fliegende Sensorplattform, die zur Datenerfassung und -analyse eingesetzt werden kann, ohne dass Menschen die Gefahrenzone betreten müssen. Aufgrund des rasanten Fortschritts im Bereich der Multicopter [11], [12] ist es möglich, Sensoren zur Minensuche in kleine und kostengünstige [Unmanned Aerial Systems \(UASs\)](#) zu integrieren. Mit einfachen Kameradrohnen lassen sich wertvolle Informationen über das zu untersuchende Gebiet sammeln. Die optische Erkennung von Minen und Streumunition wird beispielsweise in [13], [14] mittels optischer Kamera und Wärmebildkamera untersucht. Kameras eignen sich gut zur Erkennung von Objekten an der Erdober-

fläche, aber im Falle von vergrabenen oder versteckten Minen versagt diese Art von Sensor. Die Autoren von [15] verwenden Fluxgate-Vektor-Magnetometer, die auf einem UAS montiert sind, um UXOs zu erkennen. Die Herausforderung für Magnetometer und Metalldetektoren ist vor allem die zuverlässige Detektion von Plastikminen mit geringem Metallanteil. In [16]–[19] wird ein nach unten gerichtetes GPR zur Minendetektion untersucht. So kann das Radar die Tiefe eines Ziels direkt messen. Der Flächendurchsatz, also die zu untersuchende Fläche pro Zeit, ist jedoch gering. Das Untersuchungsgebiet muss parallel dazu in geraden Linien (B-Scans) gescannt werden, damit ein hochauflösendes 3D-Bild (C-Scan) erzeugt werden kann. Zudem können aufgrund der starken Bodenreflexion bei senkrechtem Einfall der elektromagnetischen Welle schwache Ziele, die sich auf oder nur wenige Zentimeter unter der Oberfläche befinden, eventuell nicht detektiert werden.

Mit einem Synthetic Aperture Radar (SAR), das seitlich zur Flugrichtung misst, kann ein großer Flächendurchsatz erreicht und die starke Bodenreflexion aufgrund des flachen Einfallswinkels der Welle reduziert werden. Die luftgestützte Detektion von oberflächlich platzierten, mit Laub bedeckten und vergrabenen Minen und UXOs mit einem Ultra-Wideband-SAR (UWB-SAR), das im Frequenzbereich von 200 MHz bis 3 GHz arbeitet, wurde im Mineseeker Airship Project erfolgreich demonstriert [20]. In [21] werden verschiedene für militärische Anwendungen konzipierte UASs mit einem seitlich ausgerichteten GPR für die Minendetektion analysiert. Aufgrund der geringen Höhe, die für die Erkennung von Landminen mit einem Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar (GPSAR) erforderlich ist und des hohen materiellen und finanziellen Risikos, das mit dieser Art von UASs verbunden ist, wurde der Ansatz jedoch als unpraktisch angesehen.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Detektion von Sprengkörpern aus der Luft mit einem GPSAR, das an einer kleinen, kostengünstigen, möglichst autonom fliegenden Plattform, wie beispielsweise einem Multicopter, angebracht ist. Die Kernziele dieser Arbeit sind:

- die Demonstration der Leistungsfähigkeit eines UAS-basierten GPSAR,
- die Ausnutzung der Flexibilität des Systems zur Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit und zur Reduktion von Falschalarmen durch
 - die kohärente Überlagerung mehrerer Radarbilder, die in unterschied-

- lichen Flughöhen aufgezeichnet werden (Multi-Baseline SAR) und
- eine Variation der Flugbahn (Linear SAR (LSAR)/Circular SAR (CSAR)) sowie
- die Detektion von Stolperdrähten und vergrabenen Landminen und IEDs.

Der wissenschaftliche Beitrag und die Innovation dieser Arbeit besteht in der völlig neuen Kombination verschiedener etablierter Techniken zur Erforschung eines technischen Werkzeugs, das bei der humanitären Minenräumung eingesetzt werden kann. Das hierfür eingesetzte Messsystem wurde während der Entstehung dieser Arbeit im Rahmen des Projekts FindMine gemeinsam mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH Zürich) und der Technischen Hochschule Ulm (THU) entwickelt, gefertigt und bei mehreren Messkampagnen erfolgreich erprobt. Für die zuverlässige Detektion von Sprengkörpern werden mehrere unterschiedliche, sich ergänzende Sensorprinzipien und Verfahren benötigt. Das hier vorgestellte SAR eignet sich für schnelle Flächenscans mittels Single-Baseline LSAR und für detaillierte Analysen kleinerer Bereiche mittels Multi-Baseline CSAR.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden die Grundlagen zu den Themen Frequency-Modulated-Continuous-Wave-Radar (FMCW-Radar), SAR und GPR eingeführt und deren Kombination zu einem GPSAR erklärt. Das entwickelte Messsystem wird bereits in Kapitel 3 vorgestellt, da es den Kern der Dissertation darstellt. Zudem werden in diesem Kapitel Histogramme und ein Constant-False-Alarm-Rate-Algorithmus (CFAR-Algorithmus) zur Bewertung der Messergebnisse eingeführt. In Kapitel 4 liegt der Schwerpunkt auf der LSAR-Auswertung der Messdaten. Es wird die Auflösung des Systems untersucht und ein Verfahren zur Bestimmung der Grenzschicht zwischen Luft und Erde auf Basis von Referenzreflektoren vorgestellt. Als Anwendung des Messsystems in der humanitären Minenräumung wird in diesem Kapitel die Detektierbarkeit von Stolperdrähten mittels Single-Baseline LSAR beschrieben. Anschließend wird gezeigt, dass die Stolperdrähte mit einem Algorithmus auf Basis der Radon-Transformation automatisch detektiert werden können. In Kapitel 5 werden zunächst Ground Penetrating LSAR und CSAR miteinander verglichen, bevor die Detektion von vergrabenen Landminen und IEDs mittels Multi-Baseline Ground Penetrating CSAR demonstriert wird. Abschließend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Radargrundlagen

Radare sind aktive Sensoren, die im Gegensatz zu optischen Sensoren weitgehend unabhängig von der Tageszeit und den Witterungsbedingungen eingesetzt werden können [22], [23]. Darüber hinaus sind Radarsensoren je nach Wellenlänge in der Lage, lichtundurchlässige Medien zu penetrieren, sodass sie beispielsweise zur Detektion und Lokalisierung vergrabener Objekte eingesetzt werden können [3].

In diesem Kapitel werden drei Grundlagenthemen vorgestellt, deren Kombination die Basis des **GPSAR** bildet. Zunächst wird die Funktionsweise eines einkanaligen **FMCW**-Radars mit einem mathematischen Modell erklärt. Darauf aufbauend wird das Prinzip des **SAR** zur Erzeugung hoch-aufgelöster Radarbilder durch Ausnutzung der Eigenbewegung des Sensors vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Backprojection-Algorithmus, der unabhängig von der Trajektorie der Trägerplattform verwendet werden kann. Da sich die gesuchten Sprengkörper meist unter der Erdoberfläche befinden [24], beschäftigen sich die folgenden Teile dieses Kapitels mit **GPR** und der Integration des Brechungsgesetzes in den **SAR**-Algorithmus. Durch die Variation der Fokusebene können damit dreidimensionale Radarbilder vom Untergrund erzeugt werden.

Die fundamentale Gleichung aller Radarsysteme ist die Radargleichung [25]

$$P_{\text{Rx}} = P_{\text{Tx}} \frac{G_{\text{Rx}} G_{\text{Tx}} \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \sigma. \quad (2.1)$$

Sie ist unabhängig von der eingesetzten Radarart und wird beispielsweise zur Berechnung der maximalen Reichweite verwendet. Dabei sind P_{Rx} und P_{Tx} die Empfangs- und Sendeleistung, G_{Rx} und G_{Tx} die Gewinne der Empfangs- und Sendeantenne, λ die Wellenlänge, R der Abstand zwischen dem Radar und dem Ziel und σ der **Radarquerschnitt (RCS)**. Mit dem optionalen Faktor L im Nenner dieser Gleichung können Verluste, z. B. die Dämpfung durch das Medium, abgebildet werden. Der **RCS**-Wert beschreibt die Reflektivität

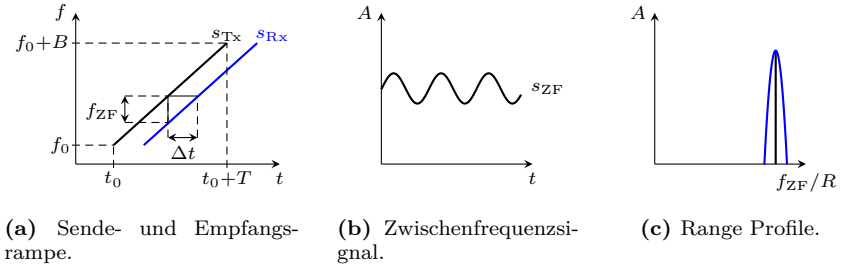


Abbildung 2.1: Darstellung der Signale eines FMCW-Radars.

eines Objektes [25]. Er gibt an, wie viel Energie im Bezug auf einen isotropen Kugelstrahler vom Ziel zurückgestrahlt wird und ist die Messgröße, die in SAR-Bildern üblicherweise dargestellt wird [23].

2.1 FMCW-Radar

Das Prinzip des frequenzmodulierten Radars wurde vermutlich das erste Mal im Jahr 1925 von E. V. Appleton and M. A. F. Barnett bei der Untersuchung von atmosphärische Reflexionen angewandt [26], [27]. Bei dem FMCW-Radar handelt es sich um einen Sensor, der eine frequenzmodulierte elektromagnetische Welle aussendet und die an Objekten reflektierte Welle zeitlich verzögert empfängt. Durch den Vergleich des gesendeten Signals s_{Tx} mit dem empfangenen Signal s_{Rx} kann auf die relative Geschwindigkeit zwischen Ziel und Sensor und deren Abstand geschlossen werden [22]. Da zur Bildgebung ein SAR-Algorithmus verwendet wird, beschränkt sich dieser Abschnitt auf ein Einkanal-Radar und geht nicht auf die Winkelschätzung ein, die mit einem Mehrkanal-Radar möglich ist.

Als Modulationsform wird bei einem FMCW-Radar üblicherweise eine lineare Frequenzrampe mit der Bandbreite B gewählt, die innerhalb der Periodendauer T ausgesendet wird. Die Steigung der Frequenzrampe beträgt $K=B/T$. Die in Bild 2.1 (a) dargestellte Frequenzrampe kann mathematisch mit [28]

$$s_{Tx}(t) \propto A(t)e^{j(2\pi f_0 t + \pi K t^2 + \phi_0)} \quad (2.2)$$

beschrieben werden. Hierbei ist f_0 die Startfrequenz der Rampe, ϕ_0 die Phase und A die Amplitude, die von der Zeit t abhängig ist, um unter anderem die Periodendauer T abzubilden. Die Amplitude wird nachfolgend aus Gründen der Übersichtlichkeit vernachlässigt. Dieses Signal wird von der Sendeantenne des Radars abgestrahlt, an einem Ziel reflektiert und von der Empfangsantenne des Radars empfangen. In einem statischen Szenario und unter der Annahme, dass sich Sende- und Empfangsantenne am gleichen Ort befinden, kann die Laufzeit des Signals im Kanal mit $\tau=2R/c_0$ berechnet werden. Dabei ist R der Abstand und c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. In einem dynamischen Szenario müsste zusätzlich noch die radiale Relativgeschwindigkeit v zwischen Sensor und Ziel berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen Fluggeschwindigkeit des UAS kann der zweite Term, der durch den Dopplereffekt eine Frequenzverschiebung verursachen würde, vernachlässigt werden (Abschnitt 2.2.2) [29]. Das Empfangssignal ist folglich eine zeitlich verzögerte Kopie des Sendesignals und kann mit

$$s_{\text{Rx}}(t) \propto e^{j(2\pi f_0(t-\tau)+\pi K(t-\tau)^2+\phi_0)} \quad (2.3)$$

angegeben werden. Beim FMCW-Radar wird das Empfangssignal typischerweise mit dem Sendesignal gemischt und anschließend tiefpassgefiltert. Mathematisch entspricht dies der Multiplikation des Sendesignals mit dem konjugiert komplexen Empfangssignal. Das Ergebnis

$$s_{\text{ZF}}(t) \propto e^{j(2\pi f_0\tau+2\pi Kt\tau-\pi K\tau^2)} \quad (2.4)$$

wird als Zwischenfrequenzsignal bezeichnet [28]. Im Einzelfall entspricht der Realteil dieses Signals einer Kosinusfunktion, siehe Bild 2.1 (b). Durch eine zeitliche Ableitung der Phase von $s_{\text{ZF}}(t)$ kann die Zwischenfrequenz

$$f_{\text{ZF}} = K\tau = K\frac{2R}{c_0} \quad (2.5)$$

des Signals bestimmt werden. Sie ist proportional zur Laufzeit τ , beziehungsweise zum Abstand R . Das niederfrequente Zwischenfrequenzsignal wird anschließend mit einem Analog-Digital-Wandler diskretisiert. Die Abtastfrequenz muss gemäß dem Abtasttheorem mindestens der doppelten Zwischenfrequenz

entsprechen:

$$f_a = 2f_{ZF}(R_{\max}). \quad (2.6)$$

Mit einer **Fast Fourier Transform (FFT)** kann die Frequenz des Signals und anschließend mit (2.5) der Abstand zwischen Sensor und Ziel berechnet werden. Wie in Bild 2.1 (c) symbolisch dargestellt wird aufgrund des Phasenrauschens und der endlichen Periodendauer T , deren Einfluss durch eine Fensterung verringert wird, die Zielantwort verbreitert. Die Entfernungsauflösung des Radars ist

$$\delta_R = \frac{c_0}{2B} \quad (2.7)$$

und hängt nur von dessen Bandbreite ab.

2.2 Radar mit synthetischer Apertur (SAR)

Im Jahr 1951 wurde das **SAR**-Verfahren von Carl A. Wiley unter dem Begriff Doppler Beam Sharpening erstmals erwähnt [30]. Insbesondere in der Erdbeobachtung wird dieses hochauflösende bildgebende Verfahren seither in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt [31], [32]. Beispiele hierfür sind die 2D- und 3D-Kartierung der Erde, die Überwachung von Vegetation und Bewuchs sowie die Beobachtung von Gletscherbewegungen oder seismischen Verformungen [33]–[36]. Für die unterschiedlichen Anwendungen werden spezielle **SAR**-Techniken verwendet. Beispielsweise wird die Polarimetrie dazu genutzt, die Streueigenschaften von Objekten zu untersuchen, die Interferometrie und Tomographie dienen der Ableitung der Oberflächentopographie und mit der Differentialinterferometrie werden Erdoberflächenverschiebungen erfasst [31].

2.2.1 SAR-Grundlagen

Im Nachfolgenden wird das **SAR**-Prinzip am Beispiel einer linearen Apertur vorgestellt. Bei einem **SAR** wird die Eigenbewegung des Sensors, der seitlich an einem Flugzeug, einem **UAS** oder einem Satelliten, befestigt ist, ausgenutzt, um eine deutlich höhere Auflösung in Flugrichtung zu erhalten, als es mit der realen Apertur des Sensors möglich wäre [22]. Dazu wird entlang der Flugbahn das zu

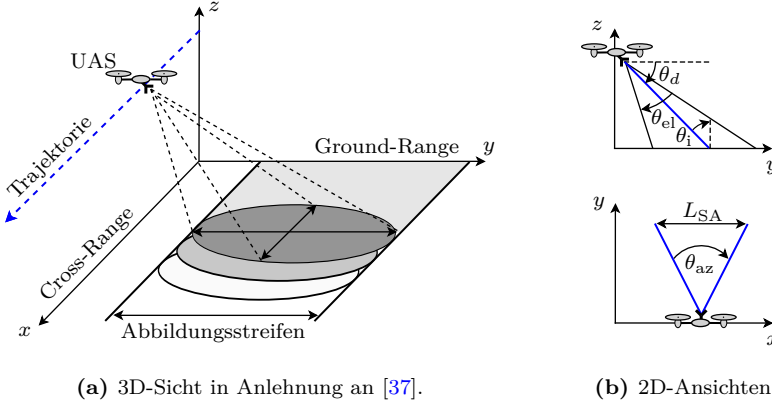


Abbildung 2.2: SAR-Geometrie in der 3D-Ansicht sowie Schnitte in yz - (Seitenansicht) und xy -Ebene (Aufsicht).

untersuchende Areal sequentiell mit dem Radar abgetastet. Anschließend wird durch einen SAR-Algorithmus die Phaseninformation genutzt, um eine lange Apertur zu synthetisieren. Voraussetzung hierfür ist ein kohärent messendes Radar. Die Länge der synthetischen Apertur L_{SA} korrespondiert hierbei mit der Beleuchtungszeit; diese hängt vom Öffnungswinkel der realen Apertur der Antenne in Bewegungsrichtung θ_{az} und der Entfernung R zwischen Sensor und Ziel ab. Die meist eingesetzte Aufnahmegeometrie von SAR ist in Bild 2.2 dargestellt. Das UAS fliegt in diesem Beispiel in einer konstanten Höhe z in x -Richtung. Dieser SAR-Modus, bei dem ein kontinuierlicher Abbildungsstreifen parallel zur Flugbahn erzeugt wird, ist unter den Begriffen Stripmap-SAR oder LSAR bekannt.

Die x -Achse wird mit Azimut oder Cross-Range und die y -Achse mit Ground-Range bezeichnet. Der Winkel des seitlich nach unten ausgerichteten Radars zur Horizontalen ist der Depressionswinkel θ_d . Die Flughöhe z , der Depressionswinkel θ_d und der Öffnungswinkel der Antenne in Elevation θ_{el} definieren die Breite des Abbildungsstreifen. Die Länge der synthetischen Apertur L_{SA} wird durch die Flughöhe z , den Depressionswinkel θ_d und den Öffnungswinkel der Antenne in Azimut θ_{az} bestimmt. Die Auflösung in Cross-Range ist unter

der Annahme, dass die Fernfeldbedingung gilt

$$\delta_{\text{cr}} = \frac{L_A}{2}, \quad (2.8)$$

mit L_A der Abmessung der realen Antenne in Flugrichtung. Im Gegensatz zu einem Radar mit realer Apertur ($\delta_{\text{cr}} = \lambda R / L_A$) ist bei einem SAR die Auflösung unabhängig von der Wellenlänge λ und dem Abstand R . Je kleiner die Antenne ist, desto länger wird das Ziel beleuchtet, wodurch die Auflösung verbessert wird. Bei einer geringen Flughöhe des UAS ist diese Gleichung nicht mehr gültig. Die Auflösung in Cross-Range [38], [39]

$$\delta_{\text{cr}} \approx \frac{\lambda}{4} \sqrt{1 + \frac{4R^2}{L_{\text{SA}}^2}} \quad (2.9)$$

hängt im Gegensatz zur Fernerkundung von der Wellenlänge, dem Abstand und der Länge der synthetischen Apertur ab.

Die Auflösung in Ground-Range beträgt wie beim Radar mit realer Apertur

$$\delta_{\text{gr}} = \frac{c_0}{2B \cos\left(\theta_d \pm \frac{\theta_{\text{el}}}{2}\right)}. \quad (2.10)$$

Wie auch in Entfernungsrichtung R muss in Flugrichtung das Abtasttheorem eingehalten werden. Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Radarmessungen Δs kann mit Hilfe der Gleichung für Grating Lobes [40], mit

$$\Delta s \leq \frac{\lambda}{2\left(1 + \sin \frac{\theta_{\text{az}}}{2}\right)} \quad (2.11)$$

berechnet werden. Aufgrund des doppelten Phasenfehlers bei einem monostatischen synthetischen Antennen-Array, im Vergleich zu einem realen Array [41], wird der Faktor 2 im Nenner eingeführt. Für einen Eindeutigkeitsbereich von $\theta_{\text{az}} = [0, 180^\circ]$ ergibt sich ein Abtastabstand $\Delta s \leq \lambda/4$.

Durch die verlängerte Beobachtungszeit – die bei SAR durch einen kleineren Abtastabstand realisiert werden kann – können zufällige Rauschprozesse herausgemittelt werden, sodass die Leistungsfähigkeit des Systems möglichst nur durch das Signal-to-Clutter Ratio (SCR) und nicht das Signal-to-Noise Ratio (SNR) begrenzt wird. Als Clutter werden in dieser Arbeit alle uner-

wünschten Reflexionen von der Erdoberfläche selbst, dem Untergrund, Steinen, Wurzeln, Wassereinlagerungen, Metallfragmenten usw. verstanden. Da es sich bei Clutter um deterministische Signale handelt, kann dieser weder durch eine räumliche Überabtastung noch durch eine Erhöhung der Sendeleistung reduziert werden. Daher wird in dieser Arbeit eine Variation der Perspektive zur Clutterreduktion herangezogen, siehe Abschnitt 2.2.4 und 2.4.3.

Um die Auflösung zu erhöhen, kann die Antenne auf einen bestimmten Bereich ausgerichtet werden, d. h. die Antenne wird elektronisch oder mechanisch entlang der linearen Flugbahn dem Zielbereich nachgeführt. Dieses Verfahren wird als **Spotlight-SAR** bezeichnet [22], [32] und kann mit dem präsentierten Systemansatz beim Geradeausflug durch eine Drehung um die z -Achse des **UAS** realisiert werden. Alternativ kann sich das Radar auf einer Kreisbahn über dem Zielgebiet bewegen. Dabei ist die Antenne starr auf den Mittelpunkt der auf den Boden projizierten zirkularen Trajektorie ausgerichtet. Dieses Verfahren wird als **CSAR** bezeichnet und wird in dieser Arbeit für die Detektion von Landminen und **IEDs** eingesetzt.

Wie in der Einführung beschrieben empfängt ein Radar die rückgestreute Leistung. Allgemein wird bei größeren Einfallswinkeln θ_i die rückgestreute Leistung geringer (Abschnitt 2.3.1). Zudem hängt, wie im Optischen, die rückgestreute Leistung von dem Verhältnis der Wellenlänge zur Oberflächenrauigkeit ab. Bei glatten Oberflächen, wie einer ruhigen Wasseroberfläche, wird ein Großteil der Leistung gespiegelt (gerichtete Reflexion), wohingegen bei rauen Oberflächen eine diffuse Reflexion stattfindet und die elektromagnetische Welle in alle Richtungen gestreut wird [22].

2.2.2 SAR-Prozessierung

Die Generierung von **SAR**-Bildern erfordert eine zweidimensionale Verarbeitung der Rohdaten, die in zwei eindimensionale Verarbeitungsschritte unterteilt werden kann [22]. Zunächst werden die Daten in Entfernungsrichtung R verarbeitet und anschließend wird in Azimutrichtung die synthetische Apertur gebildet. Die Verarbeitung kann im Zeit- oder im Frequenzbereich erfolgen [32]. Algorithmen, die im Frequenzbereich arbeiten, zeichnen sich vor allem durch eine hohe Recheneffizienz aus [23], die jedoch mit mehreren Annahmen und Restriktionen, beispielsweise an die Trajektorie, einhergehen [42]. Die bekanntes-

ten Vertreter sind der range-Doppler- [43], der ω -k- [44] und der Chirp-Scaling- [45] Algorithmus. Aufgrund der Restriktionen dieser Algorithmen beschränkt sich der folgende Abschnitt auf den Backprojection-Algorithmus, der zu den Zeitbereichsalgorithmen zählt. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, dass beliebige, hochgradig nichtlineare Trajektorien zulässig sind und prozessiert werden können [42] und dass es möglich ist, die Daten auf ein 3D-Grid zu projizieren [46].

Backprojection-Algorithmus

Ausgangspunkt für die Herleitung des Backprojection-Algorithmus ist der **Time-Domain-Correlation-Algorithmus (TDC-Algorithmus)** [23], [32], der ein räumliches Optimalfilter darstellt. Für die Modellierung der sequentiellen beziehungsweise räumlichen Abtastung durch das SAR wird eine zusätzliche Zeitvariable η eingeführt, die die einzelnen Radarmessungen entlang der synthetischen Apertur durchnummeriert. Üblicherweise wird in der Literatur η mit slow-time (Zeit in Azimutrichtung) und t mit fast-time (Zeit in Entfernungsrichtung) bezeichnet [32]. τ ist die Zweizeige-Signallaufzeit vom Phasenzentrum der Radaran-
tenne ($x_a(\eta), y_a(\eta), z_a(\eta)$) zum Zeitpunkt des Radarchirps bis zur Position (x_0, y_0, z_0). x_0, y_0 und z_0 repräsentieren hierbei die Koordinaten eines Bildpunkts (Pixel, Abk. px) des gerasterten zweidimensionalen Radarbilds. Beim **TDC-Algorithmus** wird eine Referenzfunktion $s_{\text{Ref}}(t, \eta, x_0, y_0, z_0)$ mit dem tatsächlichen Empfangssignal $s_{\text{ZF}}(t, \eta)$ korreliert [23], [32], [47]

$$A(x_0, y_0, z_0) = \sum_t \sum_{\eta} s_{\text{ZF}}(t, \eta) s_{\text{Ref}}(t, \eta, \tau). \quad (2.12)$$

Das Ergebnis $A(x_0, y_0, z_0)$ spiegelt den **RCS**-Wert des Pixels an der Position (x_0, y_0, z_0) wider. Die Referenzfunktion [46]–[48]

$$s_{\text{Ref}}(t, \eta) = e^{-j\phi(t, \eta, \tau)} \quad (2.13)$$

entspricht dem konjugiert komplexen Signal eines Punktstreuers, der sich an der Position (x_0, y_0, z_0) befindet. Die Phase des Referenzsignals kann demnach auf Basis von (2.4) mit

$$\phi(t, \eta, \tau) = 2\pi f_0 \tau(t, \eta) + 2\pi K t \tau(t, \eta) - \pi K \tau(t, \eta)^2 \quad (2.14)$$

berechnet werden. Die Bildrekonstruktion basiert ausschließlich auf der Phaseninformation. Wenn sich der Radarsensor während der Messung nicht bewegt (Start-Stopp-Approximation) bzw. bei einer hinreichend geringen Fluggeschwindigkeit, hängt die Laufzeit

$$\tau(\eta) = \frac{2R(\eta)}{c_0} = \frac{2\sqrt{(x_a(\eta) - x_0)^2 + (y_a(\eta) - y_0)^2 + (z_a(\eta) - z_0)^2}}{c_0} \quad (2.15)$$

nur von der slow-time-Variablen η ab. Diese Näherung führt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Plattform v , dem Öffnungswinkel der Antenne in Azimut θ_{az} und der Periode T der linearen Frequenzrampe des **FMCW**-Radars zu einem Fehler [28], [46], der kompensiert werden muss, sofern es zu einer Verschiebung und Verbreiterung der Zielantwort kommt. Nach Anwendung dieser Approximation hängt nur noch der mittlere Term in (2.14) von der fast-time t ab. Durch Umstellen von (2.12) und Einsetzen von (2.14) ergibt sich

$$A(x_0, y_0, z_0) = \sum_{\eta} e^{-j(2\pi f_0 \tau(\eta) - \pi K \tau(\eta)^2)} \underbrace{\sum_t s_{\text{ZF}}(t, \eta) e^{-j2\pi K t \tau(\eta)}}_{=S_{\text{R}}(R, \eta)}, \quad (2.16)$$

wobei der Summenterm über t der diskreten Fourier-Transformation $S_{\text{R}}(R, \eta)$ der Zeitbereichsdaten entspricht. Die Range-Compression, also die Verarbeitung in Entfernungsrichtung, erfolgt bei einem **FMCW**-Radar durch eine **FFT** des Empfangssignals, das durch Zero-Padding interpoliert wird [46], [48]. Damit ergibt sich der Backprojection-Algorithmus zu

$$A(x_0, y_0, z_0) = \sum_{\eta} w(\eta) S_{\text{R}}(R, \eta) e^{-j(2\pi f_0 \tau(\eta) - \pi K \tau(\eta)^2)}, \quad (2.17)$$

wodurch im Vergleich zum **TDC** eine Summe bzw. eine Schleife im Algorithmus eingespart werden kann. Der Rechenaufwand für ein Bild mit $N \times N$ Pixel, N Radarchirps und N Samples pro Chirp reduziert sich im Vergleich zum **TDC**-Algorithmus von $O(N^4)$ zu $O(N^3)$ Rechenoperationen [49], [50]. Der Backprojection-Algorithmus lässt sich sehr gut parallelisieren, wodurch er effizient auf **Graphics Processing Units (GPUs)** oder **Field Programmable Gate Arrays (FPGAs)** implementiert werden kann [51], [52]. Die echtzeitfähige Realisierung der Verarbeitungskette ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.

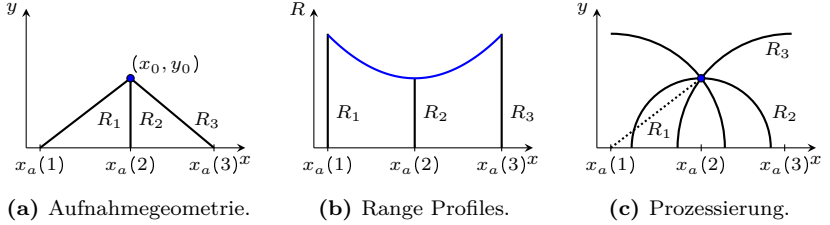


Abbildung 2.3: 2D-Veranschaulichung des Backprojection-Algorithmus in Anlehnung an die Multilateration (lineare Apertur in positive x -Richtung).

Mit dem zusätzlich eingeführten Faktor $w(\eta)$ in (2.17) können die einzelnen Radarmessungen gewichtet werden. Hierdurch lässt sich beispielsweise eine nicht äquidistante Abtastung aufgrund einer variablen Fluggeschwindigkeit v kompensieren.

Kurz zusammengefasst erfolgt die Verarbeitung in Entfernungsrichtung durch eine FFT und die Verarbeitung in Azimutrichtung durch eine Korrelation des Fourier-transformierten Empfangssignals mit einer Referenzfunktion für jedes Pixel des Radarbildes. Das Ergebnis dieser Schritte spiegelt den RCS-Wert für das jeweilige Pixel wider.

Veranschaulichung des Algorithmus

Anschaulich kann SAR und der Backprojection-Algorithmus mit Hilfe von Bild 2.3 erklärt werden. Das Radar bewegt sich in x -Richtung und führt kontinuierlich Radarmessungen durch. An den Positionen $x_a(\eta)$ misst das Radar die Abstände R_η zum Ziel an der Position (x_0, y_0) . Die Abstandsinformation liegt nach der Range-Compression, also der FFT der Zeitbereichsdaten, vor. Da mit dem einkanalen Radar nur der Abstand gemessen werden kann, ist die Richtung, aus der die Reflexion kommt, ohne Betrachtung der Historie als unbekannt anzunehmen. Werden die Abstandsdaten R_η über der Messposition $x_a(\eta)$ dargestellt, ist bei LSAR ein hyperbelförmiges Profil zu erkennen (Bild 2.3(b)). Die Koordinaten des Scheitelpunkts der Hyperbel entsprechen der Position des Ziels (x_0, y_0) . Aufgrund der Überlagerung aller Reflexionen im Sichtfeld des SAR sind solche Hyperbeln und deren Scheitelpunkte nur

bei besonders starken Zielen zu erkennen. Um diese Überlagerungen aufzulösen, erfolgt die Verarbeitung in Azimutrichtung. Bei einer Multilateration (R_η bekannt) kann der Schnittpunkt der Kreise (Radius R_η , Mittelpunkt $x_a(\eta)$) bestimmt und somit auf die Position (x_0, y_0) geschlossen werden (Bild 2.3 (c)). Im Gegensatz dazu werden beim Backprojection-Algorithmus (R_η unbekannt) die Fourier-transformierten Radardaten (Radius $R_{\eta,\min} \dots R_{\eta,\max}$, Mittelpunkt $x_a(\eta)$) auf das Bild projiziert. Durch die konstruktive und destruktive Überlagerungen der komplexen Beiträge spiegelt jedes Pixel den entsprechenden RCS-Wert des SAR-Bildes wider.

2.2.3 Bewegungskompensation und Positionsgenauigkeit

Zur Generierung hochaufgelöster SAR-Bilder ist die genaue Kenntnis der Position des Phasenzentrums der Antenne zum Zeitpunkt der Radarmessung erforderlich. Fehler in der Position können zu geometrischen Verzerrungen, einer Verringerung der räumlichen Auflösung und zur Verminderung des Bildkontrastes führen [22]. Im Gegensatz zu den Algorithmen, die im Frequenzbereich arbeiten, ist beim Backprojection-Algorithmus die Bewegungskompensation bereits Teil des Algorithmus. Die Position des Phasenzentrums der Antenne (x_a, y_a, z_a) ist eine Eingangsgröße, die für die Rekonstruktion des Bildes verwendet wird. Dadurch werden Abweichungen von der geplanten Trajektorie automatisch kompensiert, sofern die tatsächliche Position exakt bekannt ist.

Aufgrund von Positions- und Lagefehlern kann es zudem zu einer Amplitudenmodulation des rückgestreuten Signals in Entfernungs- und Azimutrichtung kommen. Die Amplitudenmodulation in Entfernungsrichtung kann in dieser Arbeit aufgrund des großen Öffnungswinkels der Antenne, der geplanten SAR-Geometrie und den geringen Rollbewegungen des UAS vernachlässigt werden. In Azimutrichtung führt z. B. eine variierende Fluggeschwindigkeit beim manuellen Flug zu einer Amplitudenmodulation. Diese lässt sich durch eine geschwindigkeitsabhängige Gewichtung der Radardaten kompensieren.

Der Einfluss von Positionsfehlern soll durch Simulationen veranschaulicht werden. Hierzu werden die Radardaten für eine synthetische Apertur der Länge $L_{SA}=8\text{ m}$ von $x_1=0\text{ m}$ bis $x_N=8\text{ m}$ in einer Flughöhe $z=1,5\text{ m}$, parallel zur y -Achse ($y=0$) für ein Punktziel an Position $(x, y, z)=(4\text{ m}, 3\text{ m}, 0\text{ mm})$, simuliert. N ist hierbei die Anzahl an Chirps entlang der Apertur. Die Trajektorien und

Tabelle 2.1: Simulationsparameter für lineare und kreisförmige (zirkulare) Aperturen. Bei einer Single-Baseline-SAR-Auswertung wird die Höhe z_1 verwendet.

Radar	LSAR	CSAR
$f_0=1$ GHz	$x=0$ bis 8 m	$x_m=4$ m
$B=3$ GHz	$y=0$ m	$y_m=3$ m
$T=1$ ms		$r=5$ m
$f_a=3,6$ MHz	$z_i=1,5$ m, 2 m, 2,5 m	
	$N=400$	

Radarparameter sind in Tabelle 2.1 festgehalten.

In Bild 2.4 (a) ist das Range-Profil in Abhängigkeit der x -Koordinate und in Bild 2.4 (b) das entsprechende SAR-Bild dargestellt. Bei einem konstanten Fehler in y -Richtung (Verschiebung $\Delta y=50$ mm) wird die Zielantwort in y -Richtung verschoben und die Point Spread Function (PSF) verbreitert, siehe Bild 2.4 (c). Dasselbe Verhalten kann für eine Verschiebung in z -Richtung beobachtet werden. Bei einer linearen Trajektorie, die in x -Richtung verschoben ist, würde sich die Zielantwort lediglich um denselben Betrag in x -Richtung verschieben. Bei einem linearen Skalierungsfehler in x -Richtung ($x_N=8,05$ m statt 8 m) verschmiert die Zielantwort, siehe Bild 2.4 (d).

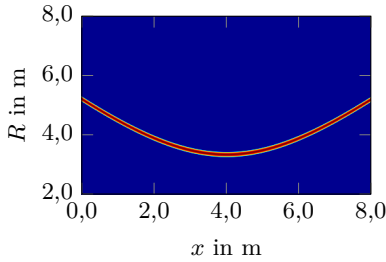
In Bild 2.5 ist das Simulationsergebnis für eine bekannte Abweichung vom idealen Flugpfad (Kosinus mit einer Amplitude von ± 200 mm $\approx 1.67\lambda_c$) und für eine unbekannte Abweichung (Kosinus mit einer Amplitude von ± 20 mm $\approx \lambda_c/6$) in y -Richtung dargestellt. Ist die Abweichung bekannt, kann das Ziel fokussiert werden, jedoch ändert sich aufgrund der starken Abweichung vom idealen Flugpfad die Form der PSF. Bei einer kleinen unbekannten Abweichung vom idealen Flugpfad wird die PSF jedoch verzerrt.

Zusammenfassend führt ein unbekannter Positionsfehler zu einer Reduktion der Amplitude, einer Verbreiterung der PSF und einer Reduktion des Nebenkeulenabstands. Zur Abschätzung der erforderlichen Positionsgenauigkeit in x -, y - und z -Richtung kann der maximal zulässige Fehler $\Delta R_{\max}$ durch eine partielle Ableitung des euklidischen Abstands R in Abhängigkeit einer einzelnen Koordinate angegeben werden [53]. Für die Genauigkeit in x -Richtung ergibt

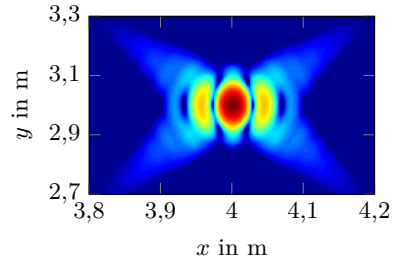
sich beispielsweise

$$\Delta x = \sqrt{\frac{x^2 + y^2 + z^2}{x^2}} \Delta R_{\max} . \quad (2.18)$$

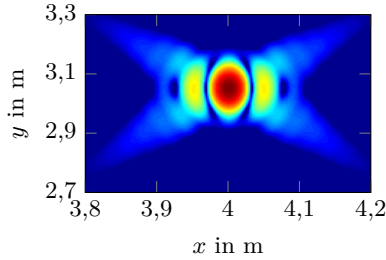
Der zulässige Positionsfehler hängt von der SAR-Geometrie ab und ist für die



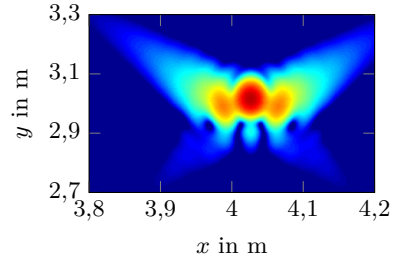
(a) Range-Profil für eine ideale lineare synthetische Apertur.



(b) Rekonstruktion auf Basis der idealen Trajektorie.



(c) Rekonstruktion mit einer Verschiebung in y -Richtung ($\Delta y = 50$ mm).



(d) Rekonstruktion mit einem Skalierungsfehler der x -Achse ($x_N = 8,05$ m).

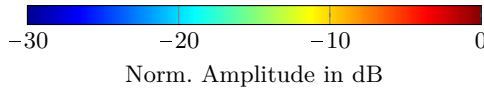
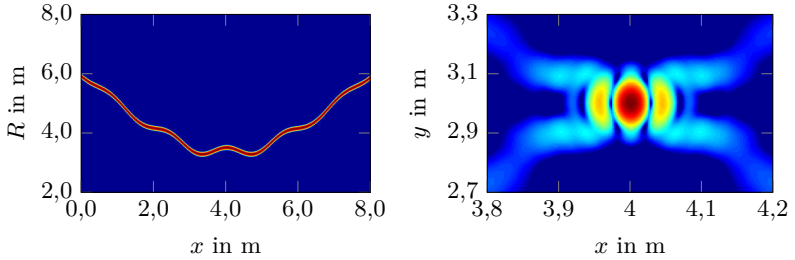
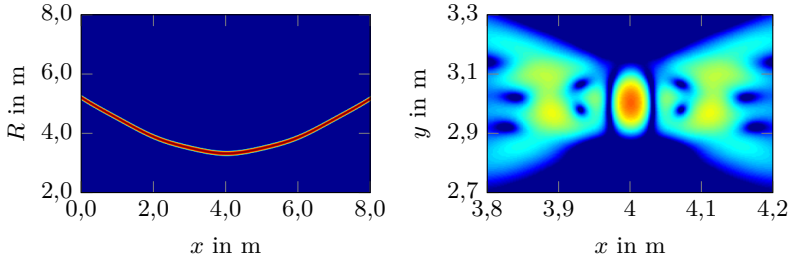


Abbildung 2.4: Range-Profil und Rekonstruktion der Zielantwort für ein Ziel an Position $(x, y, z) = (4 \text{ m}, 3 \text{ m}, 0 \text{ mm})$ befindet.



(a) Bekannter Positionsfehler in y -Richtung (Kosinusfunktion mit der Amplitude von ± 200 mm). Aufgrund der starken Abweichung von der linearen Trajektorie verändert sich die Form der Zielantwort.



(b) Unbekannter Positionsfehler in y -Richtung (Kosinusfunktion mit der Amplitude von ± 20 mm). Die PSF ist stark verschmiert.

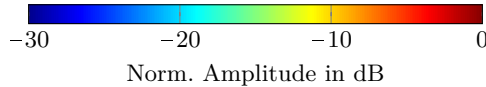


Abbildung 2.5: Range-Profile (links) und Rekonstruktion (rechts) für (a) eine bekannte und (b) eine unbekannte Abweichung von der linearen Trajektorie.

einzelnen Koordinaten größer oder gleich der maximal zulässigen Abweichung in Entfernungsrichtung $\Delta R_{\max}$. $\Delta R_{\max}$ wird üblicherweise als ein Bruchteil der Wellenlänge definiert und beträgt z. B. $\Delta R_{\max} = \lambda/16$. Für eine Mittenfrequenz von $f_c = f_0 + B/2 = 2,5$ GHz ergibt sich demnach ein maximal zulässiger Fehler von $\Delta R_{\max} = \pm 7,5$ mm.

2.2.4 Circular SAR (CSAR)

Bei **CSAR** hängt die Auflösung von dem Winkelbereich ab, in dem das Objekt vom Radar gesehen wird [54]. Der Vorteil im Vergleich zu **LSAR** ist, dass eine höhere Auflösung in Ground-Range erreicht werden kann. Zudem kann aufgrund der nichtlinearen Apertur mit nur einem Überflug (Single-Baseline) ein 3D-Bild (x, y, z) erzeugt werden. Im Falle eines isotropen Ziels, das über die komplette Apertur von 360° sichtbar ist, ergibt sich die maximale erreichbare Auflösung beim **CSAR** zu [55], [56]

$$\delta_{\text{cr}} = \delta_{\text{gr}} = \frac{c_0}{4(f_0 + B) \sin \theta_i} \quad (2.19)$$

und ist im Gegensatz zum **LSAR** sowohl in Cross- als auch in Ground-Range proportional zu $\lambda/4$. Ist das Objekt in einem Winkelbereich größer als $22,5^\circ$ sichtbar, liegt die Auflösung in z -Richtung in der Größenordnung der Entfernungsauflösung des Systems [56]

$$\delta_z = \frac{4}{\sqrt{2\pi} \cos \theta_i} \frac{c_0}{2B} \quad (2.20)$$

und hängt dabei vom Einfallswinkel der Welle ab. Da die meisten Reflektoren nicht über den vollen Winkelbereich von 360° in der horizontalen sichtbar sind, können durch Multi-Baseline **CSAR** weitere Informationen durch Variation des Einfallswinkels θ_i generiert und die 3D-Information verbessert werden [54]. Bei Zielen, die nur in einem kleinen Winkelbereich sichtbar sind, garantiert eine zirkuläre Apertur, dass diese Ziele auch genau aus diesem Winkelbereich beleuchtet werden [57]. Die höhere 3D-Auflösung und die Beleuchtung des Objekts aus allen Richtungen sind zwei Vorteile von **CSAR**, die mit einem geringeren Flächendurchsatz im Vergleich zu **LSAR** einhergehen.

2.3 Ground Penetrating Radar (GPR)

Mit einem **GPR** ist es aufgrund der Wellenlänge möglich, in optisch undurchsichtige Medien, z. B. in das Erdreich, einzudringen und verdeckte oder vergrabene Objekte zu lokalisieren [3]. Erstmals wurden 1910 von H. Löwy und G. Leimbach elektromagnetische Wellen zur Detektion von vergrabenen Objekten eingesetzt [58]. Heutzutage finden **GPRs** unter anderem in der Archäologie,

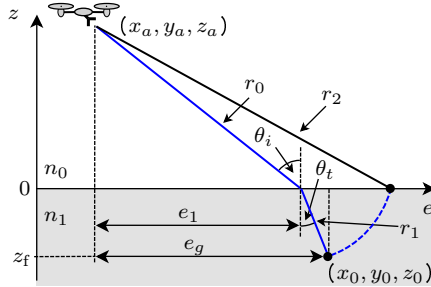


Abbildung 2.6: Geometrie des GPSAR-Ansatzes mit $e = \sqrt{x^2 + y^2}$ in Anlehnung an [59].

im Bauingenieurwesen, in der Geophysik und in der Detektion von Landminen Anwendung [3]. Als Radarsensoren kommen sowohl Pulsradare als auch **FMCW**-Radare zum Einsatz. Abhängig von der Anwendung arbeiten **GPRs** typischerweise in einem Frequenzbereich von wenigen MHz bis in den einstelligen GHz-Bereich. Üblicherweise wird ein **GPR** direkt und nahezu senkrecht auf der Erdoberfläche platziert, sodass die Leistung bestmöglich in den Boden eingekoppelt werden kann. Das Radar wird gleichmäßig entlang einer Geraden über den Boden bewegt und führt sequentiell Messungen durch, sodass ein 2D-Bild in der xz -Ebene (B-Scan) erzeugt werden kann. Im Vergleich dazu ist die Geometrie des **GPSAR**-Ansatzes in Bild 2.6 dargestellt. Hierbei blickt das Radar aus einem großen Abstand seitlich auf die zu untersuchende Fläche. Bei diesem Ansatz kann auf Basis einer Trajektorie ein 2D- bzw. 3D-Bild in der xy -Ebene (C-Scan) erzeugt werden, siehe Abschnitt 2.4 und 5.1.

2.3.1 Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle im Erdreich

Der Erdboden ist ein verlustbehaftetes Dielektrikum, das mit den Parametern Permittivität ε und Leitfähigkeit σ beschrieben werden kann [4]. Für die meisten Böden hat die magnetische Wirkung von Materialien wenig Einfluss auf die Welle, weshalb die relative Permeabilität μ_r gleich 1 gesetzt wird. Die Eindringtiefe einer elektromagnetischen Welle, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium sowie der Transmissions- und der Reflexionsfaktor an der Grenzflä-

Tabelle 2.2: Relative Permittivität ε_r , Leitfähigkeit σ und Dämpfungskoeffizient α für verschiedene Materialien bei 100 MHz [3].

Material	ε_r		σ in S/m		α in dB/m	
	trocken	nass	trocken	nass	trocken	nass
Kalkstein	7	8	10^{-8} – 10^{-6}	10^{-2} – 10^{-1}	0,5–10	1–20
Lehmboden	4–10	10–30	10^{-4} – 10^{-3}	10^{-2} – 10^{-1}	0,5–3	1–6
Sand	2–6	10–30	10^{-7} – 10^{-3}	10^{-3} – 10^{-2}	0,01–1	0,5–5
Sandboden	4–10	10–30	10^{-4} – 10^{-2}	10^{-2} – 10^{-1}	0,1–2	1–5
Tonboden	4–10	10–30	10^{-2} – 10^{-1}	10^{-3} –1	0,3–3	5–50
Luft	1		0		1	
Frischwasser	81		10^{-6} – 10^{-2}		–	

che hängen von den elektromagnetischen Eigenschaften des Bodens und damit von der Frequenz, dem Wassergehalt und dem Typ bzw. der Zusammensetzung des Bodens ab [3], [4], [60].

Permittivität und Leitfähigkeit

Aufgrund der hohen relativen Permittivität von Wasser ($\varepsilon_{r,H_2O}=80$) kann die des Bodens in Abhängigkeit des Wassergehaltes stark variieren. Für geologische Materialien gilt daher im Allgemeinen $1 \leq \varepsilon_r \leq 80$; für die meisten Böden liegt die Größe im Bereich von $2 \leq \varepsilon_r \leq 40$ [3].

Die Leitfähigkeit liegt in Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit im Bereich von $10^{-8} \text{ S/m} \leq \sigma \leq 1 \text{ S/m}$ [3]. In Tabelle 2.2 sind die relative Permittivität, die Leitfähigkeit und der Dämpfungskoeffizient für verschiedene Materialien angegeben. Nachfolgend wird der Einfluss dieser Parameter auf die Dämpfung und die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle kurz erläutert.

Dämpfungskoeffizient und Ausbreitungsgeschwindigkeit

Der Dämpfungskoeffizient α und der Phasenkoeffizient β einer elektromagnetischen Welle sind [3]

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right]}, \quad \beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right]}. \quad (2.21)$$

ω ist die Kreisfrequenz, μ die Permeabilität und ε' und ε'' der Real- und Imaginärteil der Permittivität: $\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$. Mit steigender Frequenz steigt die Dämpfung, wodurch die Eindringtiefe sinkt und die maximale Frequenz und damit die Ortsauflösung von GPRs begrenzt wird.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im homogenen Medium ist ($\mu_r=1$)

$$c_1 = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.22)$$

und der Brechungsindex ergibt sich zu

$$n = \frac{c_0}{c_1} = \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (2.23)$$

Bei der Kombination von SAR und GPR müssen die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der elektromagnetischen Wellen in Luft und im Boden sowie die Brechung an der Bodenoberfläche berücksichtigt werden [61], siehe Abschnitt 2.4.

Reflexion, Transmission und der Einfallswinkel

Eine einfallende elektromagnetische Welle wird an einer ebenen Grenzschicht zwischen zwei homogenen Halbräumen reflektiert und gebrochen. Der Transmissionsfaktor nimmt mit steigendem Einfallswinkel θ_i und steigender Permittivität ab [62], siehe Bild 2.7. Ist das Radar senkrecht zum Boden ausgerichtet, wird am meisten Energie in den Boden eingekoppelt. Dieser Ansatz wird in den aktuellen Forschungsarbeiten, die sich mit der UAS-basierten Detektion von Landminen mit einem GPR beschäftigen, vorzugsweise verfolgt [16]–[19].

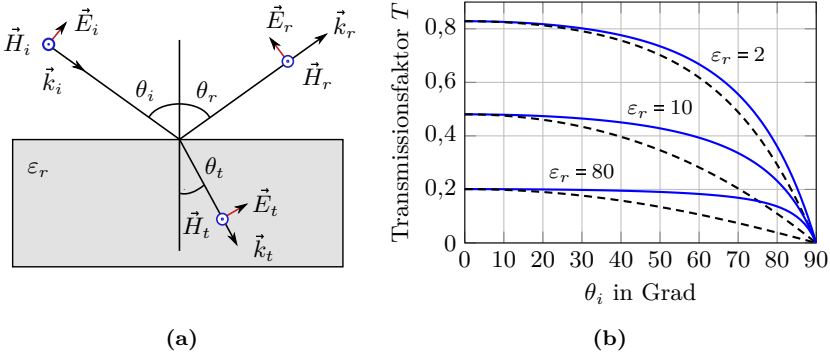


Abbildung 2.7: (a) Reflexion (Index r) und Transmission (Index t) einer einfallenden parallel polarisierten ebenen Welle (Index i) an einer ebenen Grenzfläche zwischen zwei Halbräumen (H magnetischen Feld, k der Wellenzahl). (b) Transmissionsfaktor für eine parallel (T_p , —) und eine senkrecht (T_s , ----) polarisierte Welle.

Durch die SAR-Prozessierung wird, wie bei klassischen GPR-Anwendungen, ein zweidimensionales Bild in der xz -Ebene (B-Scan) prozessiert. Für eine dreidimensionale Abbildung des Untergrunds werden daher viele parallel verlaufende Überflüge benötigt. Ein weiterer Nachteil dieses Ansatzes ist wie folgt: AP-Minen werden typischerweise in geringer Tiefe vergraben. Sie bestehen zum Großteil aus Kunststoff, der dielektrische Kontrast zwischen Mine und Boden ist gering, wodurch nur mit einer schwachen Reflexion zu rechnen ist [63]. Der dielektrische Sprung zwischen Luft und Boden führt hingegen zwangsläufig zu einer verhältnismäßig starken Reflexion. Aufgrund der begrenzten Auflösung des GPR kann die Reflexion der Bodenoberfläche die Reflexion der Mine überlappen oder vollständig überdecken, sodass oberflächennahe Minen mit einem down-looking GPR gegebenenfalls nicht detektiert werden können. Time-Gating und die Subtraktion eines gleitenden Mittelwerts entlang der synthetischen Apertur sind zwei von vielen Verfahren, die zur Reduktion der störenden Reflexion der Bodenoberfläche eingesetzt werden [18], [63]–[65]. Nichtsdestotrotz bleibt die Gefahr bestehen, dass oberflächennahe Ziele nicht detektiert werden.

Mit einem seitlich ausgerichteten Radar (side-looking) kann die starke Bodenreflexion vermieden werden. Durch den größeren Einfallswinkel nimmt zwar der Transmissionsfaktor ab, d. h. es wird prozentual weniger Energie in den Boden eingekoppelt, aber die an der Bodenoberfläche reflektierte Welle wird zum Großteil vom Radar weg gespiegelt anstatt direkt zum Radar zurück reflektiert. Dies hat zur Folge, dass die Bodenreflexion oberflächennahe Ziele nicht überdeckt und diese detektiert werden können. Ein weiterer Vorteil, der sich durch die seitliche Ausrichtung des Radars ergibt, ist der höhere Flächendurchsatz.

2.4 Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar (GPSAR)

Obwohl der Boden inhomogen ist, wird er – wie auch in dieser Arbeit – in der Regel mit einer oder mehreren homogenen Schichten unterschiedlicher Permittivität modelliert [4], [66], [67]. Eine exakte Repräsentation des Untergrunds ist aufgrund der Komplexität des Problems nicht praktikabel. Inhomogenitäten durch Wassereinlagerung, Wurzeln, Steine usw. sind Störstellen im homogenen Halbraum und führen zu Clutter. Die entscheidende Größe für die GPR-Prozessierung ist die relative Permittivität, siehe Abschnitt 2.3.1. Sie kann messtechnisch mit Hohlleiterresonatoren, Koaxial-Sonden oder mittels Zeitbereichsreflektometrie bestimmt werden [3], [68], [69]. Alternativ kann die Permittivität direkt aus der GPSAR-Messung durch wiederholtes Prozessieren der Radardaten mit veränderten Bodenparametern und Maximierung der Schärfe eines zuvor selektierten Ziels extrahiert werden [61], [70]. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es in der gesamten potentiellen Gefahrenzone lokal angewendet werden kann, ohne diese betreten zu müssen, um Bodenproben zu entnehmen.

2.4.1 Erweiterung des Backprojection-Algorithmus

Die Integration der GPR-Prozessierung für zwei homogene Halbräume (Luft und Erde) in den Backprojection-Algorithmus erfolgt über die Laufzeit des Signals

$$\tau(\eta) = 2 \left(\frac{r_0(\eta)}{c_0} + \frac{r_1(\eta)}{c_1} \right) \quad (2.24)$$

wie in Bild 2.6, S. 20 skizziert. Die beiden Längen r_0 und r_1 in der Luft und im Boden können mit dem Snelliusschen Brechungsgesetz $n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_t$ berechnet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nachfolgend die Abhängigkeit von η vernachlässigt. In kartesischen Koordinaten ausgedrückt lautet das Brechungsgesetz [71]–[73]

$$n_0 \frac{e_1}{\sqrt{z_a^2 + e_1^2}} = n_1 \frac{e_g - e_1}{\sqrt{z_0^2 + (e_g - e_1)^2}} \quad (2.25)$$

mit $n_0=1$, $n_1=\sqrt{\varepsilon_r}$ und $e_g=\sqrt{(x_a - x_0)^2 + (y_a - y_0)^2}$. Durch eine Umformung von (2.25) ergibt sich ein Polynom vierter Ordnung, das numerisch gelöst werden kann, um die Unbekannte e_1 und damit die benötigten Längen

$$r_0 = \sqrt{z_a^2 + e_1^2} \quad (2.26)$$

und

$$r_1 = \sqrt{z_0^2 + (e_g - e_1)^2} \quad (2.27)$$

zu berechnen.

Für die nachfolgende Auswertung wird die xy -Ebene ($z=0$) als Referenzebene definiert, in der sich der Übergang von Luft in den Boden befindet, siehe Bild 2.6. Die Prozessierung erfolgt in einer Ebene parallel zur xy -Ebene, die in dieser Arbeit als Fokusebene oder Prozessierungstiefe bezeichnet und mit z_f gekennzeichnet wird. Ein 3D-Geländeprofil wird nicht berücksichtigt, die Oberfläche wird lokal als eben angenommen. Fehler, die sich hieraus ergeben, zeigen sich in einer unscharfen und in z -Richtung verschobenen Zielantwort. Wenn $z_f \geq 0$, wird das Radarbild auf eine Ebene über der Referenzebene mittels SAR-Algorithmus fokussiert, und für $z_f < 0$ wird die GPSAR-Prozessierung durchgeführt. Durch eine Variation von z_f kann die Fokusebene verschoben und ein 3D-Radarbild bestehend aus mehreren Schnittbildern (C-Scans) generiert werden. Die Mehrdeutigkeit ($r_0 + n_1 r_1 = r_2$) in y -Richtung und Tiefe z , die durch die blau gestrichelte Linie in Bild 2.6 angedeutet ist, wird im nachfolgenden Abschnitt untersucht.

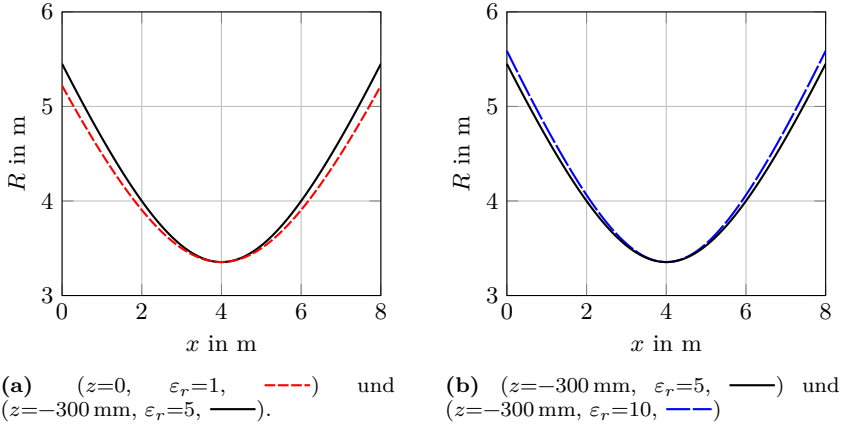


Abbildung 2.8: Einfluss der relativen Permittivität bei einer linearen Apertur.

2.4.2 Einfluss der relativen Permittivität

Zur Erstellung von 3D-SAR-Bildern mit einer linearen Apertur werden mindestens zwei Aufnahmen aus verschiedenen Perspektiven benötigt. Dies kann beispielsweise durch ein Radar mit zwei Antennen (Interferometrie) oder durch mehrere Überflüge mit einem Einkanalradar (Multi-Baseline SAR oder Repeat-Pass SAR) realisiert werden [74], [75]. Sofern die Oberflächentopographie bekannt ist, kann aufgrund der relativen Permittivität, die eine Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Erde und eine Brechung der elektromagnetischen Welle an der Erdoberfläche verursacht, mit einem GPSAR aus einem LSAR-Überflug mit einem Einkanalradar bereits ein 3D-Bild prozessiert werden. Die Permittivität beeinflusst den Öffnungswinkel der LSAR-typischen Hyperbel, wie die Simulation für ein Ziel an der Oberfläche und ein vergrabenes Ziel ($z=-300$ mm) im Abstand $R=3,35$ m zum Radar in Bild 2.8 (a) zeigt. Je tiefer das Objekt vergraben und je höher die Permittivität (siehe Bild 2.8 (b)), desto kleiner ist der Öffnungswinkel der Hyperbel.

Die Auswirkungen einer falschen relativen Permittivität bei der GPSAR-Prozessierung sind in Bild 2.9 für eine lineare und eine zirkuläre Apertur basierend auf den Trajektorien in Tabelle 2.1 dargestellt. Dabei befindet sich das

Punktziel an der Position $(x, y, z) = (4 \text{ m}, 3 \text{ m}, -100 \text{ mm})$ und bei der Simulation der Radardaten wurde die relative Permittivität auf $\varepsilon_r = 5$ gesetzt. Bild 2.9 (a) zeigt das Prozessierungsergebnis für eine lineare Apertur und die Fokustiefe $z_f = -100 \text{ mm}$. Das Ziel ist nicht fokussiert, da zur Rekonstruktion ein falscher Wert für die Permittivität ($\varepsilon_r = 10$) angenommen wurde. Stattdessen wird das Ziel bei der Prozessierungstiefe von $z_f = -65 \text{ mm}$ fokussiert, wie in Bild 2.9 (b) dargestellt. Durch die Wahl einer falschen Dielektrizitätszahl wird das Objekt in z -Richtung verschoben. Dasselbe Verhalten kann für eine zirkuläre Apertur, wie in Bild 2.9 (c) und Bild 2.9 (d) dargestellt, beobachtet werden. Bei einer Abweichung von der tatsächlichen Permittivität – z.B. aufgrund einer Variation von ε_r im Messbereich – wird das Ziel in einer falschen Prozessierungstiefe abgebildet. Da die genaue Kenntnis der Tiefe der Objekte für die Anwendung nicht von entscheidender Rolle ist, sondern die reine Detektion im Vordergrund steht, wird in dieser Arbeit die Permittivität in dem örtlich begrenzten Messbereich auf Kosten der Genauigkeit in z -Richtung als konstant angenommen.

2.4.3 Multi-Baseline GPSAR

Das in [76] vorgestellte, auf einem Fahrzeug montierte, 2×4 [Multiple Input Multiple Output \(MIMO\) GPSAR](#) ist aus technischer Sicht in Bezug auf den Frequenzbereich, die Modulation, die Algorithmik und vor allem die Aufnahmegeometrie dem in dieser Arbeit verwendeten System am nächsten und definiert in Bezug auf die [GPSAR](#)-Bildqualität den aktuellen Stand der Technik. Da das System aus hochwertiger Labormesstechnik besteht, ist es aufgrund der Größe und dem Gewicht nicht für den Betrieb auf einem [UAS](#) geeignet. Auch in diesem Forschungsprojekt soll die Flexibilität eines [UAS](#) in Kombination mit einem bistatischen Radar in Zukunft weiter vorangetrieben werden [77]. Der Vorteil des multistatischen Ansatzes wird in [78] anhand von Messungen mit oberflächlich verlegten Landminen demonstriert. Durch die kohärente Überlagerung von acht [GPSAR](#)-Bildern kann der Betrachtungswinkel-abhängige Clutter und als Folge dessen die Falschalarmrate deutlich reduziert werden. Mit dem [UAS](#)-basierten Ansatz kann diese Clutterreduktion beispielsweise durch mehrere Überflüge in unterschiedlicher Höhe realisiert werden (Multi-Baseline [GPSAR](#)).

Bild 2.10 illustriert die Clutterreduktion durch die kohärente Überlagerung von drei [GPSAR](#)-Bildern am Beispiel eines Bildpixels mittels komplexer Zeiger.

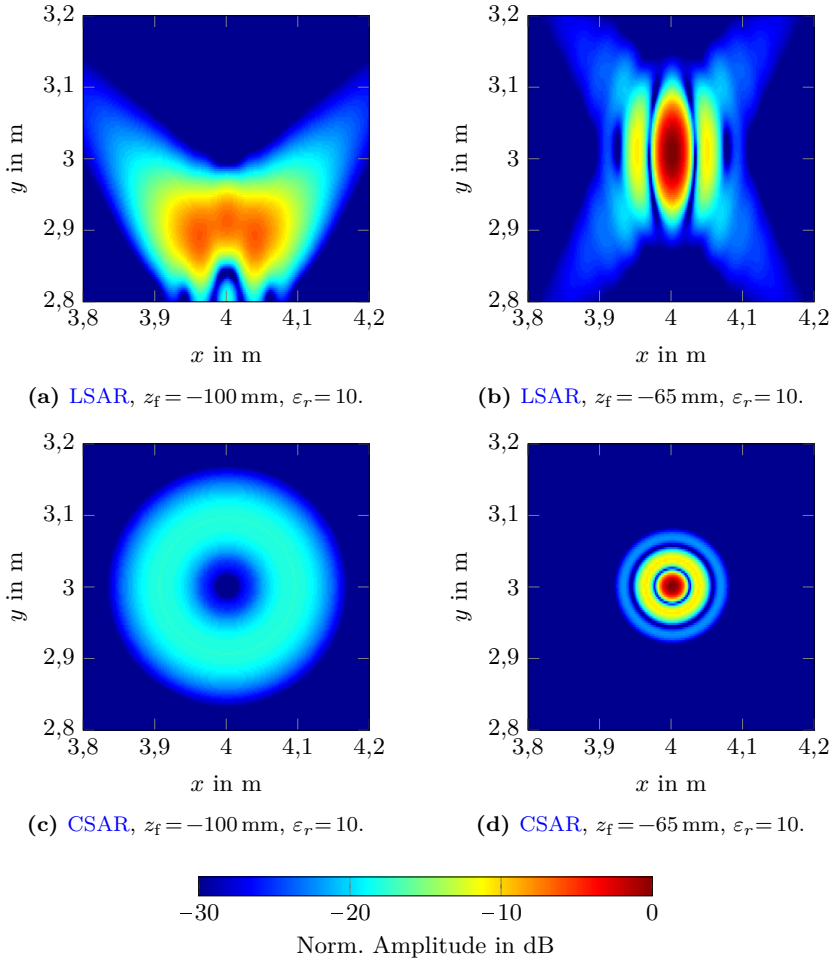


Abbildung 2.9: Einfluss der relativen Permittivität auf die Tiefenprozessierung. Das Punktziel befindet sich an der Position $(x, y, z) = (4 \text{ m}, 3 \text{ m}, -100 \text{ mm})$, simuliert wurden die Radardaten mit einer relativen Permittivität $\varepsilon_r = 5$.

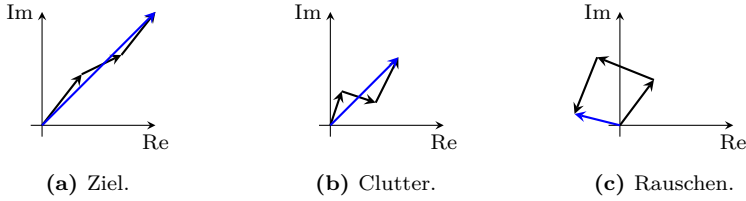


Abbildung 2.10: Zeigerdiagramm zur Illustration der kohärenten Überlagerung mehrerer GPSAR-Bilder für (a) ein Ziel, (b) Clutter oder ein Ziel bei Wahl der falschen Fokusebene z_f und (c) Rauschen.

Die schwarzen Zeiger entsprechen dem komplexen Wert der einzelnen GPSAR-Bilder und der blaue Zeiger repräsentiert deren kohärente Summe. Durch die komplexe Addition kommt es zu einer Verstärkung des Signals, wenn die Zeiger in dieselbe Richtung (Bild 2.10 (a)), und zu einer Abschwächung (Bild 2.10 (c)), wenn die Zeiger in unterschiedliche Richtungen zeigen. Der Absolutwert der kohärenten Addition kann dabei maximal den Wert der inkohärenten Addition erreichen. Wird die Fokusebene gewählt, in der sich das Ziel befindet, d. h. $z_f = z_{\text{Ziel}}$, sind zum einen die Amplituden der einzelnen Zeiger und zum anderen die kohärente Addition maximal. Durch eine Variation der Fokustiefe $z_f \neq z_{\text{Ziel}}$ drehen sich die Zeiger mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten um den Ursprung und die kohärente Summe sowie die Amplitude der einzelnen Zeiger werden reduziert, wie beispielsweise in Bild 2.10 (b). Darüber hinaus kann mit Bild 2.10 (b) erklärt werden, wie der Clutter-Pegel und das Hintergrundrauschen durch Multi-Baseline GPSAR reduziert werden kann [78]. Die Reflexion von Clutter, z. B. Reflexionen von kleinen, beliebig verteilten Objekten oder die Rauigkeit der Oberfläche, hängt stärker vom Betrachtungswinkel ab als die Reflexion einer Landmine. Durch die kohärente Überlagerung mehrerer Bilder kann somit das Verhältnis von Signal (Landmine) zu Clutter erhöht werden. In Bild 2.10 (c) ist die Überlagerung von Rauschsignalen dargestellt. Die Zeiger zeigen in beliebige Richtungen und das Ergebnis der kohärenten Addition ist fast null. Bei der inkohärenten Überlagerung ist nur die Länge der Zeiger entscheidend, was zu einem stärkeren Hintergrundrauschen im überlagerten SAR-Bild führt.

Voraussetzung für die Multi-Baseline-GPSAR-Auswertung ist, dass die ein-

zelenen Single-Baseline-Bilder zueinander nicht verschoben, rotiert oder verzerrt sind, sodass sich die Ziele bei Wahl der richtigen Fokusebene in jedem Bild an exakt der selben Stelle befinden. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass Referenzreflektoren vorhanden sind, ist eine hochgenaue Lokalisierung während der gesamte Messdauer und nicht nur für die Zeitdauer einer einzelnen Apertur erforderlich. Neben der Positionsgenauigkeit ist auch die zeitliche Synchronisation von Positionserfassungseinheit und Radar entscheidend, da ein kleiner, konstanter Zeitversatz bereits zu einer Verschiebung der Ziele führt.

3 Messsystem, Datenverarbeitung und Bewertungskriterien

In diesem Kapitel wird zunächst der gewählte Frequenzbereich des Radarsensors motiviert und das Messsystem vorgestellt. Anschließend wird auf die Vorbereitung der Daten für die [GPSAR](#)-Prozessierung und das Postprocessing der Daten nach der Backprojection eingegangen. Abschließend werden zwei Bewertungskriterien zur Beurteilung der Messergebnisse vorgestellt.

3.1 Messsystem

In der Landminendetektion eingesetzte [GPRs](#), arbeiten typischerweise im Frequenzbereich von 200 MHz bis 3 GHz [4]. Dabei ist die Wahl des Frequenzbereichs ein Kompromiss zwischen der geforderten Eindringtiefe, dem gewünschten Auflösungsvermögen und der Antennengröße. Für eine Auflösung im einstelligen Zentimeterbereich wird eine Bandbreite im GHz-Bereich benötigt (2.7). Böden wirken wie ein Tiefpass (Abschnitt 2.3.1) und bestimmen somit die maximal einsetzbare Frequenz in Abhängigkeit der geforderten Eindringtiefe. Die Antennengröße hängt umgekehrt proportional von der Frequenz ab und bestimmt aufgrund des Betriebs des Radars an einem [UAS](#) die untere Grenze des Frequenzbereichs. Die aktuelle Version des eingesetzten Radarsensors kann in zwei Frequenzbändern betrieben werden. Das untere Frequenzband (Lowband) deckt den Bereich von 0,5 GHz bis 4,5 GHz ab und das obere Frequenzband (Highband) den Bereich von 6 GHz bis 10 GHz [79]. Die Frequenzbänder können aufgrund des Aufbaus mit zwei [Phase-Locked Loops \(PLLs\)](#) zur Signalsynthese nahezu beliebig im Bereich von 0,5 GHz bis 10 GHz bei einer maximalen Bandbreite von $B=4$ GHz verschoben werden.

In Bild 3.1 ist ein Foto des [UAS](#) dargestellt. Es besteht aus einem industriellen Multicopter [80] und dem gemeinsam entwickelten Sensorsystem. Die Kernbestandteile des Sensorsystems sind das vollpolarimetrische 2×2-[FMCW](#)-



Abbildung 3.1: UAS bestehend aus einem industriellen Multicopter und dem Sensorsystem [81], © 2020 IEEE.

Radar [79], [82], mit Kupferfolie beklebte 3D-gedruckte Hornantennen [83], eine Inertial Measurement Unit (IMU) [84], ein Real-Time Kinematic (RTK) Global Navigation Satellite System (GNSS) [85] und ein optisches Prisma [86], das von einem Tachymeter [87] getrackt wird. Darüber hinaus sind ein Radaraltimeter [88], ein Lidaraltimeter [89] und eine Kamera [90] verbaut. Die Sensordaten werden auf einem Einplatinen-Computer [91] mit einem GNSS-Zeitstempel, der auf dem Pulse-Per-Second-Signal (PPS-Signal) basiert, versehen und gespeichert. Die Prozessierung sämtlicher Daten erfolgt offline. Zum Betrieb des UAS wird zusätzlich eine Ground-Station benötigt. Diese besteht aus einem Computer, der zum Programmieren der Flugbahnen und zum Starten, Stoppen und Überwachen der Sensoren verwendet wird, der RTK-GNSS-Basestation und dem Tachymeter. Mit einer Software von der ETH Zürich können beliebige lineare und zirkuläre Aperturen angelegt werden. Dabei können beispielsweise die Länge einer linearen bzw. der Radius einer zirkulären Apertur sowie die Flughöhe und Fluggeschwindigkeit eingestellt werden. Die Daten des Tachy-

meters werden zur späteren Synchronisierung mit den [IMU](#)-Daten von einem weiteren Einplatinen-Computer [\[92\]](#) mit einem [PPS](#)-Zeitstempel versehen. Die systemrelevanten Parameter der Komponenten sind in Tabelle [3.1](#) zusammengestellt. Der Frequenzbereich des Radars wurde bei allen Messungen auf 1 GHz bis 4 GHz begrenzt.

Tabelle 3.1: Parameter des Messsystems.

Radar [\[79\]](#), [\[82\]](#):

Frequenzbereich:	0,5 GHz–4,5 GHz (Lowband) 6 GHz–10 GHz (Highband)
Sendeleistung:	15 dBm
Periodenlänge:	1024 μ s
Abtastfrequenz:	3,6 MHz
Auflösung:	12 Bit
Sendekanäle:	2
Empfangskanäle:	3 (genutzt 2)
Chirp-Wiederholrate:	180 Hz (1 Frequenzband, 4 Kanäle) 85 Hz (2 Frequenzbänder, 4 Kanäle)

Antennen [\[83\]](#):

Frequenzbereich:	700 MHz–10 GHz
Gewinn:	6 dBi
3 dB-Keulenbreite E-Ebene:	60°
3 dB-Keulenbreite H-Ebene:	50°
Depressionswinkel:	45°

Tachymeter [\[87\]](#):

Genauigkeit Entfernungsmessung:	4 mm
Winkelgenauigkeit:	0,56 m°
Messrate:	20 Hz

RTK GNSS [\[85\]](#):

Horizontale Genauigkeit:	10 mm
Vertikale Genauigkeit:	15 mm
Messrate:	10 Hz

Multicopter [\[80\]](#):

Max. Flugzeit mit Nutzlast:	20 min
Gewicht Sensorpod:	3 kg

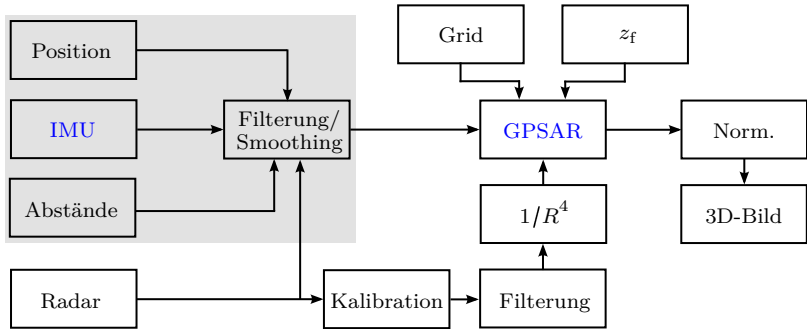


Abbildung 3.2: Verarbeitungskette zur Erzeugung der **GPSAR**-Bilder. Der grau hinterlegte Bereich umfasst die Positionsbestimmung der Antennen und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

3.2 Datenverarbeitung

In Bild 3.2 ist die Verarbeitungskette zur Generierung der **GPSAR**-Bilder grafisch dargestellt. Wie in den Abschnitten 2.2.2 und 2.4 aufgeführt, projiziert der implementierte Backprojection-Algorithmus (**GPSAR**-Block) die Radardaten auf ein horizontales Grid, das durch zwei Vektoren (x - und y -Achse) und die Höhe z_f definiert ist. Für jede Prozessierungstiefe z_f wird ein komplexwertiges 2D-Radarbild erzeugt und aus den 2D-Radarbildern ein 3D-Radarbild erstellt. Das Preprocessing der Position- und Radardaten sowie das Postprocessing der **GPSAR**-Daten wird in den zwei nachfolgenden Abschnitten erläutert.

3.2.1 Preprocessing

Das Preprocessing beschäftigt sich mit der Vorverarbeitung der Positions- und Radardaten, bevor diese dem Backprojection-Algorithmus (Vgl. Bild 3.2) zur Verfügung gestellt werden. Das Preprocessing der Positionsdaten (der grau hinterlegte Bereich in Bild 3.2) erfolgt durch die ETH Zürich [93] und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, wird jedoch zum besseren Verständnis nachfolgend kurz erläutert.

Positionsdaten

Für die SAR-Prozessierung werden die Positionen der Phasenzentren der Radarantennen zum Zeitpunkt der Radarmessungen benötigt. Das RTK GNSS misst jedoch lediglich die Position der RTK-GNSS-Antenne und das Tachymeter die Position des Prismas im dreidimensionalen Raum. Beide Systeme können die Lage (Rotationen) nicht erfassen, weswegen eine separate IMU erforderlich ist, damit von der vom System erfassten Position auf die Positionen der Radarantennen geschlossen werden kann [93]. Hierzu werden die Positionsdaten und die Rotationsdaten der IMU zunächst mit einem Extended-Kalman-Filter (EKF) fusioniert, geglättet [94], [95] und auf die Zeitstempel der Radarmessungen interpoliert. Anschließend werden mittels Koordinatentransformation auf Basis des Computer-Aided-Design-Modells (CAD-Modell) des Messsystems die Positionen der Phasenzentren der vier Radarantennen berechnet, die dem GPSAR-Prozessor ohne weitere Aufbereitung zur Verfügung gestellt werden können.

Im GPSAR-Prozessor erfolgt schlussendlich die Auswahl zwischen RTK GNSS und Tachymeter als Eingangsdaten. Beide Systeme haben gewisse Vor- und Nachteile, die an dieser Stelle, bezogen auf die Anwendung, kurz diskutiert werden sollen. Das Tachymeter war während der Entwicklung des Messsystems als Referenzsystem gedacht, um die Qualität der RTK-GNSS-Position bei dynamischen Flugmanövern im 3D-Raum zu beurteilen. Für den praktischen Einsatz ist die RTK-GNSS-Lösung zu bevorzugen. Die Gründe hierfür sind

- die zentrale Speicherung aller Messdaten auf einem on-board-Einplatinen-Computer,
- die einfache Zeitsynchronisation, da alle Daten von einem Computer zeitgestempelt und abgespeichert werden,
- dass keine Sichtverbindung zwischen dem UAS und der Basisstation notwendig ist,
- die Verwendung eines absoluten Koordinatensystems wodurch keine Koordinatentransformation notwendig ist,
- die kleineren Abmessungen und der leichtere Transport,
- die Benutzerfreundlichkeit,
- die Kosten.

Die Vorteile des Tachymeters sind die höhere Messrate, die höhere Genauigkeit (laut Datenblatt bis zu einem radialen Abstand von etwa 1000 m) und die Unabhängigkeit von dem GNSS. Die beiden Systeme wurden meist redundant betrieben, um mögliche Ausfälle oder Störungen, z. B. Verlust der Sichtverbindung zwischen Tachymeter und Prisma oder Verlust der RTK-Position, kompensieren zu können. Die Qualität der SAR-Bilder ist nahezu identisch. Zum Vergleich ist in Bild 3.3 die Differenz der mit beiden Systemen erfassten Positionen des UAS für die x -, y - und z -Koordinate dargestellt. Das UAS flog hierbei acht Kreise mit einem Radius von etwa 7 m in unterschiedlichen Höhen. In x - und y -Richtung ist eine Abweichung von ± 5 cm zu erkennen. Diese periodische Abweichung kann auf einen Ausrichtungsfehler zurückgeführt werden, der im Folgenden beschrieben werden soll. Zur Transformation des lokalen Koordinatensystems des Tachymeters in das globale Koordinatensystem des RTK

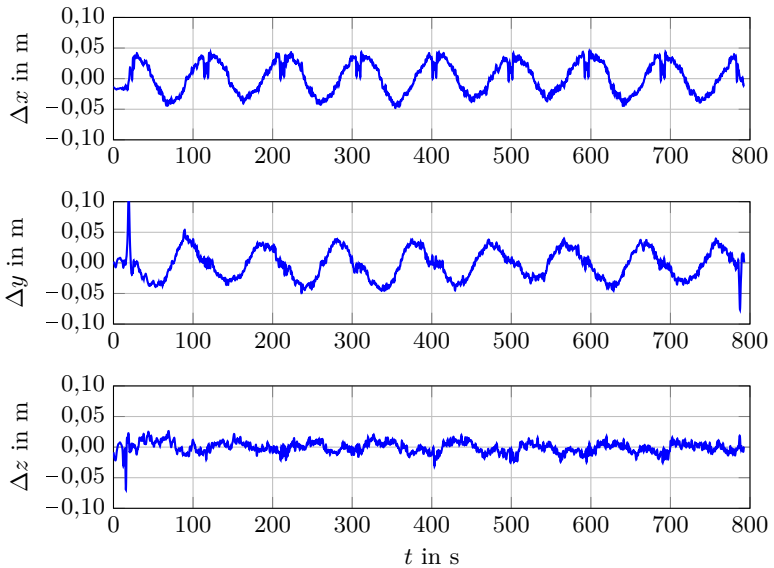


Abbildung 3.3: Differenz der Trajektorie eines Referenzpunkts mit den Tachymeter- und RTK-GNSS-Daten als Eingangsdaten.

GNSS werden mehrere statische Referenzmessungen durchgeführt, die dazu genutzt werden, die Transformations- und Rotationsmatrizen zu berechnen [96]. Die Abweichung von etwa ± 5 cm in der xy -Ebene kann durch einen Fehler bei der Drehung des Koordinatensystems um die z -Achse von etwa $0,36^\circ$ und die Abweichung von etwa ± 2 cm in z -Richtung durch einen Fehler bei der Drehung um die y -Achse von etwa $0,15^\circ$ erklärt werden. Im **SAR**-Bild führt dieser Ausrichtungsfehler zu einer Rotation des Bildes in der xy -Ebene und einer Verschiebung der Zielposition in z -Richtung. Unter besten Bedingungen sind im aktuellen Systemaufbau daher die **RTK-GNSS**-Daten den Tachymeter-Daten vorzuziehen.

Radardaten

Das Tiefpass-gefilterte Zwischenfrequenzsignal des Radarsensors wird mit einem Analog-Digital-Wandler diskretisiert, mit einem Zeitstempel versehen und abgespeichert. Diese Zeitbereichsdaten bilden die Eingangsgröße für die weitere Verarbeitung. Zum Vergleich sind in Bild 3.4 die Radardaten nach der **FFT** ohne und mit der in diesem Abschnitt vorgestellten Vorverarbeitung abgebildet. Die Vorverarbeitung der Radardaten besteht, wie in Bild 3.2 dargestellt, aus den drei Teilschritten Filterung, Kalibration und Kompensation der entfernungsabhängigen Freiraumdämpfung.

In dem Frequenzband des **GPR** liegen verschiedene zivile und militärische Funkdienste [97], die zu Interferenzen führen können. Der Störer mit dem größten negativen Einfluss kommt vom System selbst und ist auf die Funkverbindung zwischen der Fernsteuerung und dem **UAS**, die in dem **Industrial-Scientific-and-Medical-Band (ISM-Band)** von 2,4 GHz bis 2,5 GHz arbeitet, zurückzuführen. In Bild 3.5 (a) ist der Signalpegel einer gestörten Radarmessung über der Sendefrequenz $f(t)=Kt+f_0$ abgebildet. Diese breitbandige Störung führt zu einer starken Anhebung des Rauschpegels im Frequenzbereich, siehe Bild 3.5 (b). Zur Beseitigung dieser Interferenz werden alle Samples im Bereich von 2,4 GHz bis 2,5 GHz zu null gesetzt und anschließend mittels autoregressivem Modell [98] rekonstruiert. Die Auswirkung der breitbandigen Störung, von der im Zeitbereich nur wenige Samples betroffen sind, kann deutlich reduziert werden. Weitere sporadisch auftretende Störer werden aufgrund der vergleichsweise geringen Amplitude nicht gefiltert, da diese durch den Backprojection-Algorithmus automatisch gemittelt werden. Optional kann anschließend der

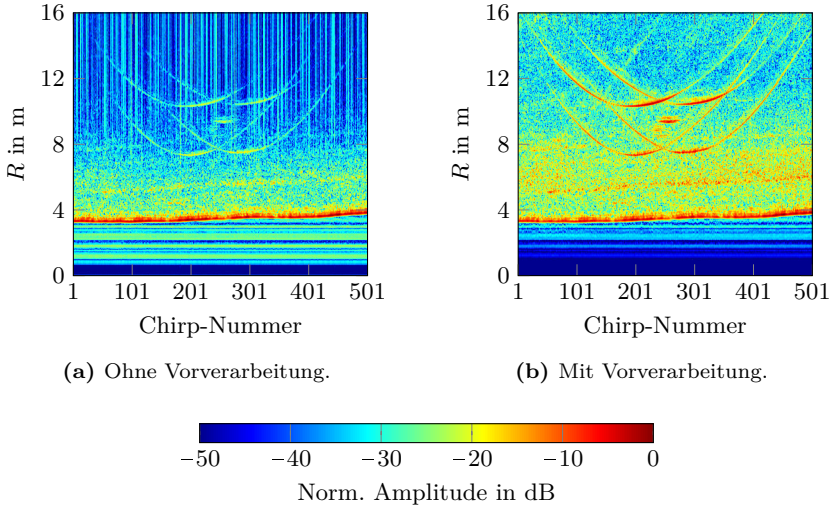
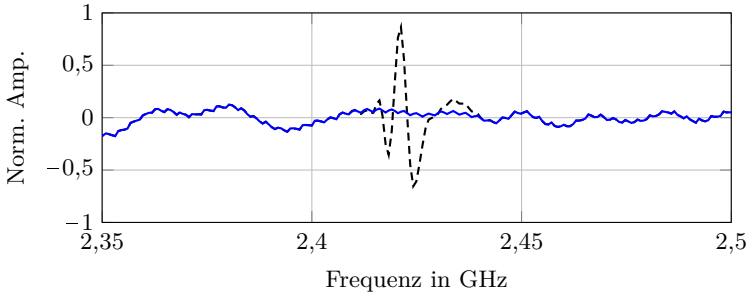
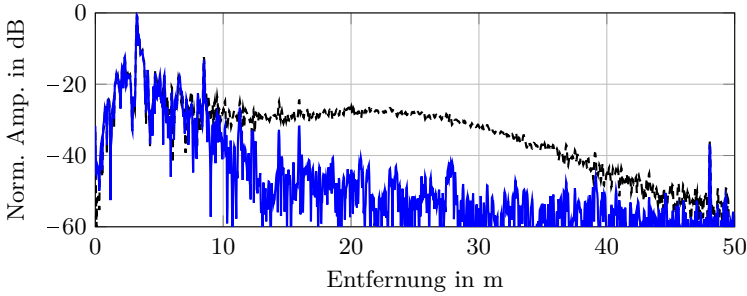


Abbildung 3.4: Radardaten (a) ohne und (b) mit Vorverarbeitung nach der Range Compression mittels FFT (horizontale Polarisation, Chirp Repetition Frequency (CRF)=30 Hz, $v \approx 2$ m/s).

Frequenzbereich, in dem die Daten ausgewertet werden, durch ein Verwerfen der Samples beschränkt werden. Im nächsten Schritt wird der konstante Messfehler des Radars in Entfernungsrichtung kalibriert. Ursache für diesen Entfernungsmessfehler sind die unterschiedlichen Längen der Hochfrequenz-Leitungen im Radar. Ohne der Kalibration würde der gemessene Phasenverlauf nicht dem Phasenverlauf des Referenzsignals entsprechen und zu einer unscharfen Abbildung führen. Zur Unterdrückung des Leakage-Effekts werden die Daten des endlichen Signals mit einem Von-Hann-Fenster gewichtet und zusätzlich wird zur Interpolation 16-faches Zero-Padding durchgeführt, bevor die Daten in den Frequenzbereich transformiert werden.

Nach der FFT, die bereits der erste Verarbeitungsschritt des Backprojection-Algorithmus ist, kann die entfernungsabhängige Freiraumdämpfung kompensiert werden. Hierzu werden die Entfernungsprofile gemäß der Radargleichung (2.1) über dem Abstand R gewichtet.

(a) Signalpegel über der Frequenz ($f=Kt+f_0$).

(b) Radardaten nach der FFT.

Abbildung 3.5: Das gestörte (---) und rekonstruierte (—) Signal (a) über der Frequenz und (b) nach der FFT über der Entfernung.

Aufgrund der geringen Flughöhe des UAS und dem großen Öffnungswinkel der Antenne in Elevation sind weiter entfernte Ziele über einen größeren Teil der synthetischen Apertur sichtbar als Ziele, die sich im Nahbereich befinden. Bei der Fokussierung der Daten mit dem GPSAR-Algorithmus führt das dazu, dass mehr Leistung in die Pixel integriert wird, die sich in einem größeren Abstand in Entfernungsrichtung befinden. Die längere Beleuchtungszeit wirkt der Freiraumdämpfung entgegen, weswegen der Faktor zur Kompensation der Freiraumdämpfung auf Basis empirischer Werte leicht reduziert wurde, um einen möglichst gleichmäßigen Signalpegelverlauf in Ground-Range-Richtung zu er-

zielen. Vorteil dieses Vorgehens im Vergleich zur Amplitudenanpassung des prozessierten **GPSAR**-Bildes ist, dass es unabhängig von der Trajektorie des **UAS** ist und damit auch bei **CSAR** eingesetzt werden kann. Der Amplitudenverlauf in Ground-Range-Richtung nach Durchführung der Kompensation ist für das Multi-Baseline-**SAR**-Bild 3.8, S.44 in Bild 3.6 dargestellt. Die Schwankungen der maximalen Signalpegel von knapp 5 dB sind hauptsächlich durch Ausrichtungsfehler der Reflektoren zu erklären. Aufgrund des größer werdenden Einfallswinkels und der Vernachlässigung der Geländeneigung sinken die Pegel der Reflektoren mit zunehmendem Abstand. Im Gegensatz dazu steigt der Mittelwert in y -Richtung leicht an, eine Erhöhung des Kompensationsfaktors würde somit das Rausch- und Clutterlevel anheben und keine Verbesserung bewirken.

Der Gewinn G der Radarantennen wird aufgrund des großen Öffnungswinkels in Elevation und Azimut als winkelunabhängig approximiert, wodurch die Daten entsprechend dem Antennenpattern gewichtet werden. Die Auswirkungen in Ground-Range-Richtung sind im Vergleich zur Freiraumdämpfung und der unterschiedlichen Integrationslänge der Daten aufgrund der geringen Breite des Abbildungsstreifens vernachlässigbar. In Azimut-Richtung korrespondieren die Auswirkungen mit einer Fensterung, wodurch der Nebenkeulenabstand vergrößert, die Hauptkeule verbreitert und dadurch die Auflösung reduziert wird.

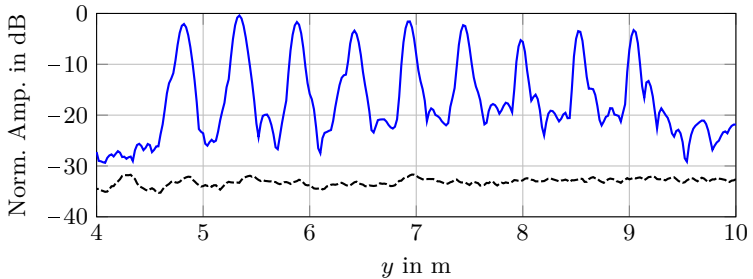


Abbildung 3.6: Amplitudenverlauf in Ground-Range (y -Richtung) für einen Schnitt durch neun gleich große Reflektoren (—) und den Mittelwert des Bildes in x -Richtung (-----).

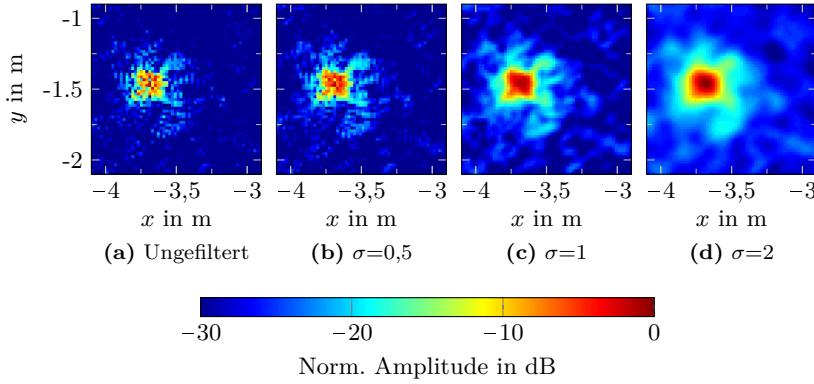


Abbildung 3.7: Einfluss der Weichzeichnung (2D-Gaußscher-Smoothing-Kernel, Standardabweichung σ , Filtergröße 5×5 Pixel).

3.2.2 Postprocessing

Wie in Abschnitt 2.4.3 motiviert, sollen zur Clutterreduktion mehrere GPSAR-Bilder aus unterschiedlicher Flughöhe kohärent überlagert werden. Damit die einzelnen Bilder den selben Beitrag haben, werden sie nach der GPSAR-Prozessierung normiert, sodass die Amplitudenwerte der Fokusebene $z_f=0$ im Bereich $[0, 1]$ liegen. Der Maximalwert ist bei allen Messungen auf einen Reflektor zurückzuführen, dessen RCS-Wert etwa -13 dBsm beträgt. Die für die Normierung entnommenen Minimal- und Maximalwerte, werden zur Normierung aller anderen Fokusebenen ($z_f \neq 0$) verwendet, sodass der Amplitudenverlauf über der Tiefe nicht beeinflusst wird. Nach der Überlagerung der Einzelbilder wird die Summe durch die Anzahl der Bilder geteilt und der Betrag in dB angegeben. Zusätzlich werden die GPSAR-Ergebnisse in Abschnitt 5.2 und 5.3 aufgrund des Interferenzmusters, dass bei zirkularen Aperturen entsteht, mit einem Weichzeichner gefiltert, siehe Bild 3.7. Die Signalstärke zwischen benachbarten Pixeln variiert im ungefilterten Bild stark. Durch die Weichzeichnung kann die optische Wahrnehmung des Ziels – vor allem bei schwachen Zielen – verbessert werden, jedoch wird mit zunehmender Standardabweichung des Filter-Kernels der Signal-zu-Rausch-Abstand reduziert, da die Energie verteilt und gemittelt

wird. Zusätzlich werden hierdurch kleine Rausch- und Interferenzpeaks unterdrückt. Die spezifische Signatur der Reflexion wird durch die Weichzeichnung jedoch entfernt, wodurch eine Klassifikation des Ziels anhand der Reflexion erschwert wird. Daher wird der Weichzeichner nur zur Darstellung und Diskussion der **GPSAR**-Bilder eingesetzt, für die Detektion werden die ungefilterten Daten verwendet.

3.3 Bewertungskriterien

Zur Bewertung der Bildqualität von **SAR**-Bildern wird üblicherweise die **PSF** herangezogen. Anhand des Nebenkeulenabstands, der Keulenbreite oder der geometrischen Verzerrung kann die Qualität des Bildes oder der Bewegungskompensation bewertet werden. Die **PSF** spielt in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle, da sie aufgrund von Positions- und Zeitsynchronisationsfehlern teilweise stark verzerrt ist, die Nebenkeulen vom Bodenclutter überdeckt werden und es sich bei einigen Zielen um ausgedehnte Objekte mit mehreren Streuzentren handelt. Stattdessen werden zur Beurteilung der Messergebnisse neben den **GPSAR**-Bildern Histogramme und das Verhältnis von Signalpegel zum Hintergrundrauschen (**Signal-to-Background Ratio (SBR)**) über der Prozessierungstiefe ausgewertet. Zudem wird zur automatischen Detektion von Zielen ein **CFAR**-Algorithmus vorgestellt, der auf die 3D-**GPSAR**-Bilder angewandt wird.

3.3.1 Histogramme

In dieser Arbeit codiert die Farbe der **GPSAR**-Bilder die rückgestreute Leistung. Damit der Signalpegel leicht entnommen und die Bilder besser interpretiert werden können, wird die im Bild dargestellte Dynamik durch die Wahl eines Minimal- und Maximalwerts künstlich begrenzt. Ergänzend zu den 2D-**GPSAR**-Bildern werden in dieser Arbeit daher Histogramme herangezogen, die den gesamten Dynamikbereich des Bildes darstellen. Diese zeigen die relative Amplitudenverteilung aller Pixel sowie die extrahierte Amplitude der einzelnen Ziele, wodurch die Ergebnisse unabhängig von der dargestellten Dynamik des **GPSAR**-Bildes eingeordnet werden können. Der Signalpegel der Ziele wird durch eine Maximumsuche innerhalb eines vordefinierten Suchbereichs ermit-

telt. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass auf die Zuordnung zwischen Reflexion und Ziel verzichtet werden kann. Zudem werden der Mittelwert, der als **Background Level (BL)** definiert wird und die 99. Perzentile in das Histogramm eingetragen.

Als Beispiel sind in Bild 3.8 ein Foto von einem Messaufbau bestehend aus neun Reflektoren und das zugehörige SAR-Bild und Histogramm dargestellt. Die Suchfenster zur Extraktion des Signalpegels sind in Bild 3.8 (b) mit roten Quadraten, in diesem Beispiel mit einer Kantenlänge von 0,4 m, gekennzeichnet und durchnummeriert. Die extrahierten Amplitudenwerte sind in Bild 3.8 (c) mit einem Marker ($\blacklozenge$), entsprechend der Nummerierung im SAR-Bild, eingetragen. Der Mittelwert (—) und die 99. Perzentile (— —) sind als vertikale Linie eingezeichnet. In diesem Beispiel liegen die Signalpegel mehr als 25 dB über dem BL und mehr als 13 dB über der 99. Perzentile und die Ziele könnten beispielsweise mit einem einfachen Schwellenwertverfahren detektiert werden.

Da die Darstellung der 3D-Bilder in einem Histogramm inklusive der Signalpegel unübersichtlich ist, wird zur Vergleichbarkeit von einzelnen SAR-Bildern oder verschiedener Ziele innerhalb eines Bildes stattdessen das Verhältnis vom Signalpegel zum BL als **SBR** definiert und über der Prozessierungstiefe z_f dargestellt. Da bei der Defokussierung von starken Zielen durch die Variation der Fokusebene deren Leistung auf viele der umliegenden Pixel verteilt wird, variiert die 99. Perzentile stärker als das BL, weswegen letzteres als Bezugsgröße für das SBR gewählt wurde.

3.3.2 CFAR-Detektor

In dieser Arbeit werden das Histogramm, die 99. Perzentile und der Verlauf des SBR über der Tiefe zur Darstellung und Bewertung der Messergebnisse herangezogen. Diese Bewertungskriterien beantworten jedoch nicht die Fragestellung, ob die Ziele auch ohne Vorkenntnis der Position automatisch detektiert werden können. Hierzu wird ein weiteres Verfahren benötigt, das nachfolgend kurz vorgestellt wird.

Ausgangspunkt für diese Betrachtung ist das fokussierte zweidimensionale Radarbild. Bei der Wahl der richtigen Fokusebene manifestieren sich die Ziele im Radarbild als lokales Maximum. Eine lokale Maximumsuche würde jedoch aufgrund von Clutter und Rauschpeaks zu einer hohen Falschalarmrate füh-

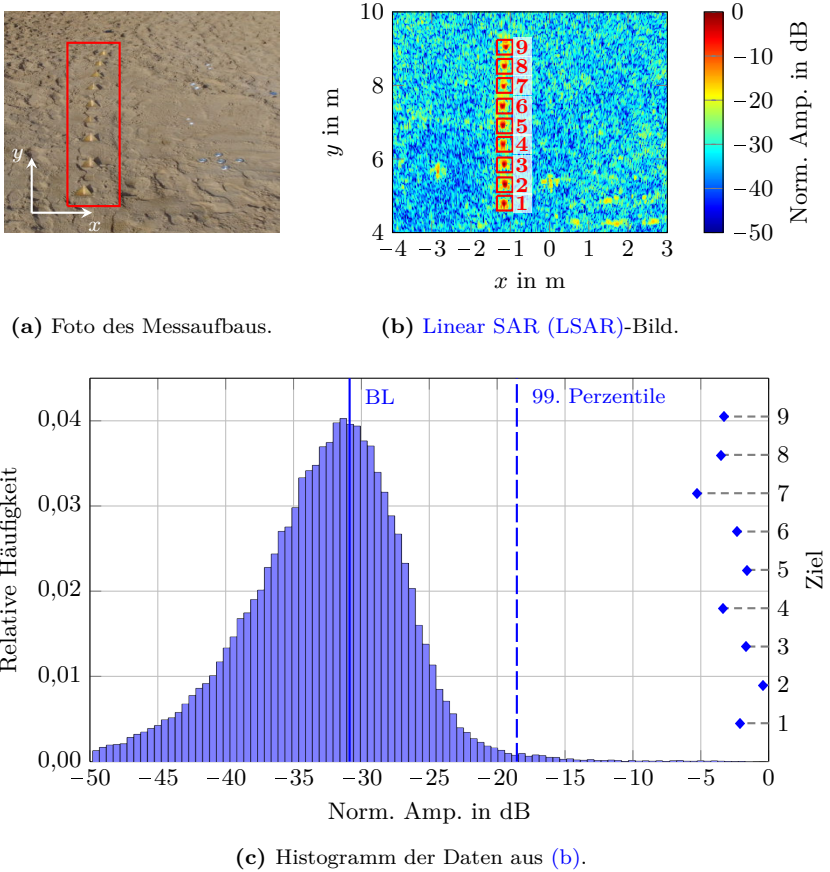


Abbildung 3.8: (a) Messaufbau, (b) SAR-Bild und (c) Histogramm der Daten. Der RCS-Wert der Reflektoren beträgt etwa -13 dBsm und der Abstand in y -Richtung 50 cm (horizontale Polarisation, CRF=200 Hz, $v=0,5$ m/s).

ren. Ein weiterer Detektionsalgorithmus ist das Schwellenwertverfahren. Dabei werden alle Pixel, deren Amplitude über einer Schwelle, z. B. der 99. Perzentile, liegen, als Ziel definiert. Eine Schwellenwertdetektion setzt jedoch voraus,

dass der Störpegel, also das Rausch- und Clutterlevel, im gesamten Bildbereich konstant ist [99]. Diese Bedingung umgeht ein CFAR-Zieldetektor, indem die Schwelle dem lokalen Störpegel adaptiv nachgeführt wird [100], [101]. Zur Bestimmung des Störpegels werden die Pixel in der Umgebung des vermeintlichen Ziels herangezogen [102]. Benachbarte Pixel, die sogenannten Guard Cells, werden jedoch ausgeschlossen, damit das Ziel den Schwellenwert nicht beeinflusst. Die Pixel, in denen sich das potentielle Ziel befindet, werden als Test Cells und die Pixel, die zur Berechnung des Schwellenwerts herangezogen werden, als Reference Cells bezeichnet. Bei dem implementierten Cell-Averaging (CA)-CFAR handelt es sich um einen der schnellsten und einfachsten CFAR-Algorithmen, bei dem der Mittelwert der Amplituden der Reference Cells einen Referenzwert bildet. Dieser Referenzwert wird mit einem konstanten Faktor (Schwellenwertfaktor) multipliziert und ergibt den lokalen Schwellenwert für das Zielpixel. Voraussetzung für eine hohe Detektions- und geringe Falschalarmrate bei diesem Ansatz ist, dass die Amplituden der Ziele deutlich über dem Rauschniveau und dem Clutter liegen. Prinzipiell wäre eine dreidimensionale Implementierung des CFAR möglich, aufgrund der unterschiedlichen SAR-Modi (LSAR und CSAR), die zu einer unterschiedlichen 3D-Form der Zielantwort führen, wurde hierauf verzichtet. Stattdessen wurde der intuitive Ansatz gewählt und ein zweidimensionaler CFAR implementiert, der sukzessive auf alle Fokusebenen des 3D-GPSAR-Bildes angewandt wird. Bei Wahl der richtigen Fokusebene werden die kleinen rotationsymmetrischen AP-Minen als kreisförmige Ziele abgebildet, wodurch der CFAR im zweidimensionalen unabhängig vom SAR-Modus eingesetzt werden kann.

Die Parameter des Detektors sind der Schwellenwertfaktor und die Abmessung bzw. Form des CFAR-Fensters, das mit dem GPSAR-Bild gefaltet wird. Idealerweise würde die Form der Test Cells der Zielantwort von Landminen entsprechen, wodurch ein erster Schritt von der reinen Detektion in Richtung Klassifikation vollzogen wäre. Bei dem GPSAR ist die Auflösung jedoch durch die maximal nutzbare Frequenz bzw. das Tiefpassverhalten des Bodens begrenzt und entspricht in etwa den Abmessungen von AP-Minen. Als Folge kann die Form der Minen nicht erfasst werden, weswegen sich die Form des CFAR-Fensters ausschließlich an den Abmessungen der zu detektierenden Ziele orientiert. Als Startwerte für das CFAR-Fensters wurden 3×3 Pixel als Test Cells, 21×21 Pixel als Guard Cells und 41×41 Pixel als Reference Cells in

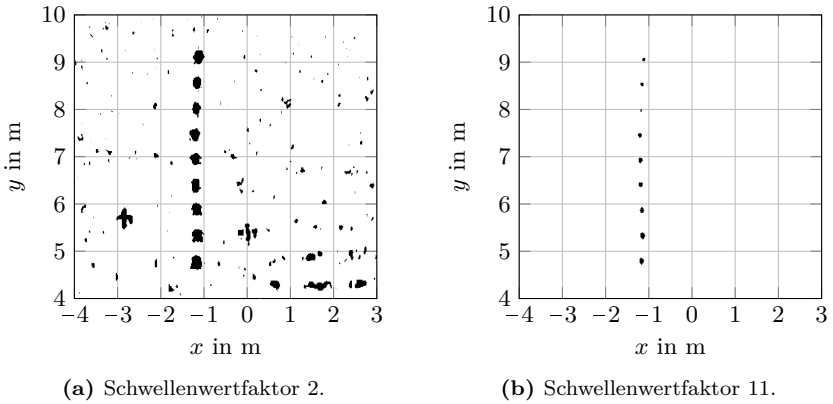


Abbildung 3.9: Einfluss des Schwellenwertfaktors CFAR-Detektor: Test Cells 3×3 Pixel, Guard Cells 21×21 Pixel, Reference Cells 41×41 Pixel).

Abhängigkeit der minimalen und maximalen Zielabmessungen gewählt und gegebenenfalls an das Messszenario angepasst.

Der Einfluss des Schwellenwertfaktors wird exemplarisch in Bild 3.9 dargestellt. Je höher der Faktor, desto stärker die Filterung und desto geringer die Anzahl an Detektionen. In Bild 3.9 (b) wurde der Faktor beispielsweise so hoch gewählt, dass nur die starken Reflexionen der Reflektoren detektiert werden. Die Reflexion von Minen ist jedoch vergleichsweise gering und von Clutter nur schwer zu unterscheiden. Die Senkung des Schwellenwerts führt daher zwangsläufig zu einer hohen Anzahl an Falschalarmen. In der humanitären Minenräumung ist die Vorgabe alle Minen bis zu einer Tiefe von 20 cm zu detektieren [3]. Zur Erzielung einer hohen Detektionsrate bei möglichst geringer Falschalarmrate kann beispielsweise ein zweistufiges Verfahren, bestehend aus einer initialen Detektion und einer anschließenden Klassifikation erfolgen [4]. Das erste Verfahren soll hierbei alle Minen detektieren und mit dem zweiten Verfahren wird die Falschalarmanzahl reduziert. Die Klassifikation ist aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Datenmenge jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Daher wurde der Schwellenwert so eingestellt, dass möglichst viele Ziele bei einer moderaten Falschalarmrate detektiert werden konnten.

4 Drohnengestützte SAR-Prozessierung

Bei der humanitären Minenräumung könnte das Messsystem in einem ersten Schritt dazu eingesetzt werden, einen groben Überblick über das zu untersuchende Gebiet zu erhalten. Hierzu eignet sich besonders [LSAR](#), da in diesem Modus der größte Flächendurchsatz erzielt werden kann. Mit einer einfachen und schnellen Auswertung könnten Objekte über der Erdoberfläche, wie z. B. Stolperdrähte, detektiert werden. Dadurch ließen sich Gefahrenzonen für eine nachfolgende, gezielte Untersuchung, mittels [CSAR](#) oder einem anderen Sensorprinzip, isolieren. Dieses Kapitel beschränkt sich daher auf die reine [SAR](#)-Prozessierung der Radardaten. Zunächst wird die Leistungsfähigkeit des Systems untersucht, bevor auf die Detektion von Stolperdrähten eingegangen wird. Auf Basis von Messergebnissen wird ein Algorithmus zur Detektion von Linien in [SAR](#)-Bildern präsentiert.

4.1 Leistungsfähigkeit des SAR

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit wird in diesem Abschnitt die Auflösung in der xy -Ebene und anschließend in z -Richtung für Multi-Baseline [LSAR](#) untersucht.

4.1.1 Auflösungsvermögen in Cross- und Ground-Range

Die Auflösung in der xy -Ebene beschreibt, bis zu welchem Abstand benachbarte Ziele in Ground- und Cross-Range voneinander getrennt werden können. Je höher die Auflösung, desto feiner sind die Strukturen, die erfasst und gegebenenfalls für eine Klassifikation von unterschiedlichen Objekten verwendet werden können. Bei dem [GPSAR](#) wird die maximal erzielbare Auflösung durch das Tiefpassverhalten des Bodens beschränkt und kann mit [\(2.9\)](#) und [\(2.10\)](#) separat für die Cross- und Ground-Range-Richtung berechnet werden.

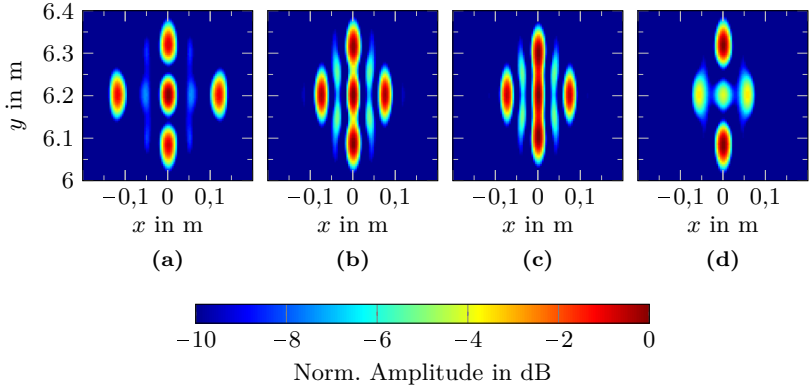


Abbildung 4.1: Simulation der Multi-Baseline-LSAR-Auflösung im Ground-Range-Abstand $y=6,2$ m. (a) $\Delta x=\Delta y=12$ cm, (b) $\Delta x=7$ cm, $\Delta y=11$ cm, (c) $\Delta x=7$ cm $\Delta y=10$ cm und (d) $\Delta x=5$ cm, $\Delta y=11$ cm.

Die Ground-Range-Auflösung ist über die Breite des Abbildungsstreifen (y -Richtung) nicht konstant, sondern hängt vom Einfallswinkel ab und wird bei einem größeren Einfallswinkel, d.h. im Fernbereich, besser. Auch die Auflösung in Cross-Range hängt von der Messgeometrie ab und kann einen minimalen Wert von $\lambda_0/4$ erreichen. Im Gegensatz zur Ground-Range-Auflösung verschlechtert sich die Auflösung in Cross-Range bei konstanter Aperturlänge mit zunehmender Entfernung R .

In Bild 4.1 ist ein Simulationsergebnis für die Multi-Baseline-LSAR-Auflösung dargestellt. Die Simulationsparameter entsprechen den Parametern der nachfolgenden Messung. Insgesamt wurden neun lineare Trajektorien mit einer Länge $L_{SA}=20$ m in x -Richtung bei $y=0$ in den Höhen von 2,4 m bis 4,4 m mit $\Delta z=25$ cm simuliert und die SAR-Bilder kohärent überlagert. Es wurden fünf Punktziele im y -Abstand von etwa 6,2 m auf der Oberfläche $z=0$ platziert. Die theoretisch erzielbare Auflösung ergibt sich mit dieser Geometrie zu etwa 5,8 cm in Ground-Range und zu etwa $\lambda_c/4=3$ cm in Cross-Range. Bild 4.1 (b) zeigt, dass die Ziele bei einem Abstand von $\Delta x=7$ cm und $\Delta y=11$ cm noch eindeutig voneinander getrennt werden können. Eine Reduzierung des Abstands in y -Richtung führt dazu, dass sich die Punktzielantworten überlagern und diese –

gemäß der Definition eines Pegleinbruchs von 3 dB – nicht getrennt werden können, siehe Bild 4.1 (c). Die in x -Richtung verteilten Ziele können bis zu einem Abstand von etwa $\Delta x=5\text{cm}$ getrennt werden, jedoch reduziert sich ihre Amplitude im Vergleich zu den anderen zwei in y -Richtung verteilten Zielen, siehe Bild 4.1 (d).

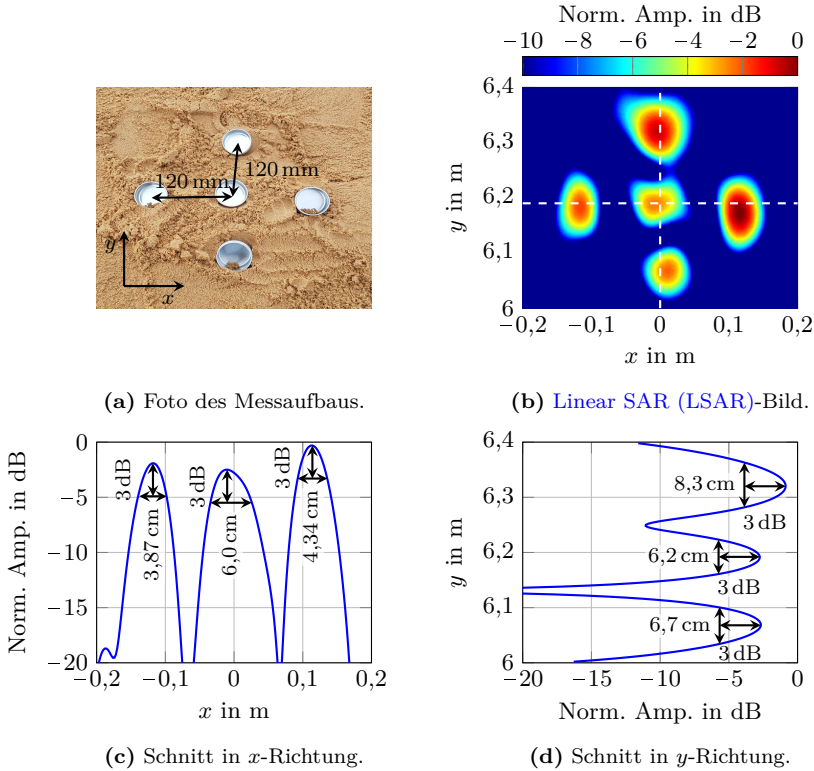


Abbildung 4.2: (a) Foto des Messaufbaus, (b) Multi-Baseline-SAR-Bild und zwei Schnitte durch die Maxima in (c) x - und (d) y -Richtung (horizontale Polarisation, CRF=100 Hz, $v=0,4\text{ m/s}$).

In Bild 4.2 ist ein Foto, das entsprechende SAR-Bild und zwei Schnitte in x - und y -Richtung durch die Maxima zur Demonstration des Auflösungsvermögens des Messsystems in der xy -Ebene dargestellt. Der Messaufbau besteht aus fünf gleich großen offenen Blechdosen mit einem Durchmesser von 65 mm, die ungefähr in einem Abstand von $\Delta x = \Delta y = 120$ mm (Mitte zu Mitte) auf einer Sandfläche platziert wurden. Die Amplitude ist auf das Maximum des Bildausschnittes normiert. Aufgrund der Ausrichtung der Dosen zum Radar variieren deren Amplituden um bis zu 2,5 dB. Die Dosen können in diesem Beispiel eindeutig voneinander getrennt werden. Der Pegel einbruch beträgt für alle Kombinationen mehr als 8 dB. Die 3 dB-Auflösung liegt bei dieser Messung im Bereich von 3,9 cm bis 6,0 cm in Cross-Range und 6,2 cm bis 8,3 cm in Ground-Range, siehe Bild 4.2 (c) und (d), und befindet sich im Bereich der theoretisch zu erreichenden Werten. Bei einer Verringerung des Abstands der Dosen zu $\Delta x = 8$ cm bzw. $\Delta y = 10$ cm können diese jedoch nicht mehr voneinander getrennt werden, der Pegel einbruch ist kleiner als 3 dB. Die entsprechenden Messergebnisse sind im Anhang A auf Seite 130 f. in Bild A.1 und in Bild A.2 abgebildet.

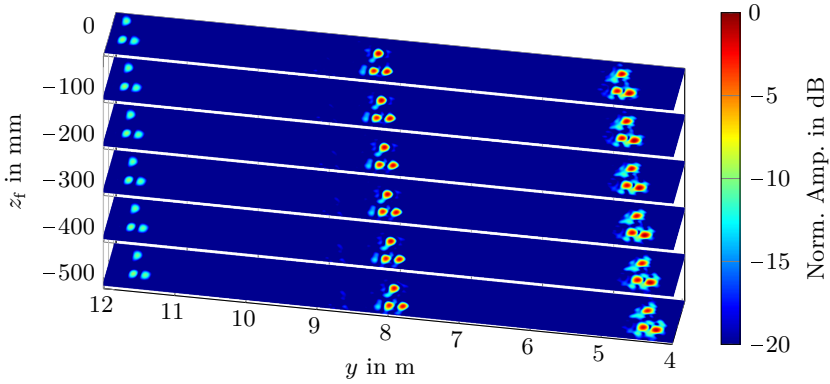
4.1.2 Auflösung in z -Richtung

Wie auch die Auflösung in der xy -Ebene hängt die Auflösung in z -Richtung bei Multi-Baseline LSAR von der Messgeometrie ab. Zur Untersuchung der Tiefenauflösung wurde zunächst eine Messung durchgeführt und anschließend das Messergebnis mittels Simulation verifiziert. Der Messaufbau ist in Bild 4.3 dargestellt. Er besteht aus dreimal drei Reflektoren, die in einer L-Form aufgebaut sind. Der Abstand der Reflektoren beträgt $\Delta x = \Delta y = 20$ cm. Insgesamt wurden

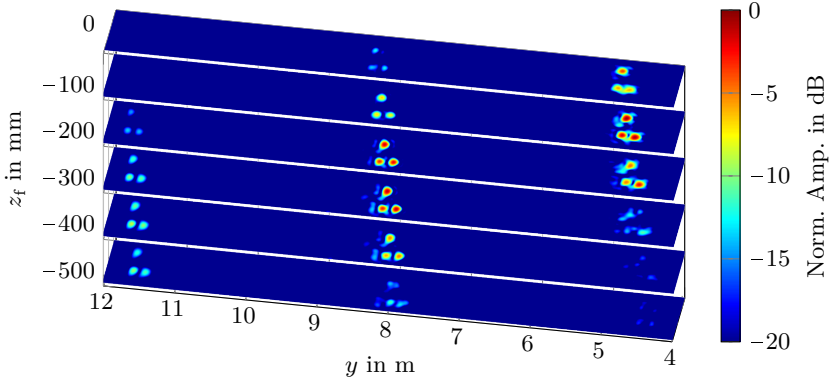


Abbildung 4.3: Foto des Messaufbaus zur Untersuchung der Auflösung in z -Richtung bestehend aus dreimal drei L-förmig angeordneten Reflektoren mit den Abständen $\Delta x = \Delta y = 20$ cm.

fünf Flüge in einer Höhe von etwa 2,5 m bis 4,5 m durchgeführt. Die Länge der synthetischen Apertur betrug etwa 22 m. Das Messergebnis für eine einzelne Baseline bei der Flughöhe von 3,5 m und die kohärente Überlagerung aller fünf



(a) Single-Baseline SAR-Bild für die Flughöhe $z=3.5$ m.



(b) Multi-Baseline SAR-Bild.

Abbildung 4.4: Messergebnis zur Demonstration der Tiefenauflösung bei Multi-Baseline-SAR. Die Abmessung der Bilder in x -Richtung beträgt 0,5 m (horizontale Polarisation, $\text{CRF}=30$ Hz, $v=0.4$ m/s).

Flughöhen prozessiert für unterschiedliche Fokusebenen z_f ist in Bild 4.4 zu sehen. Die Referenzebene ($z=0$) wurde auf Basis der programmierten Flughöhe des **UAS** festgelegt. Trotz der negativen Werte für die Fokusebenen z_f wurde keine **GPSAR**-Prozessierung durchgeführt. Insgesamt werden fünf Schnittbilder in den Tiefen von 0 bis -500 mm dargestellt. Beim Single-Baseline-**SAR**-Bild sind alle Reflektoren in allen Fokusebenen sichtbar. Bei einer linearen Trajektorie kann die Mehrdeutigkeit in y - und z -Richtung nicht aufgelöst werden. Die Reflexion wird bei einer Variation der z_f -Ebene in y -Richtung verschoben. Ohne Kenntnis des Geländemodells kann die Position der Reflektoren nicht eindeutig bestimmt werden. Im Gegensatz dazu ist im Multi-Baseline-**SAR**-Bild eine Variation der Amplitude in Abhängigkeit der Fokusebene ersichtlich. Die 3D-Position der Reflektoren kann also durch die kohärente Überlagerung mehrerer Bilder eindeutig bestimmt werden. Dass die Reflektoren in unterschiedlichen Ebenen fokussiert werden liegt am Gefälle des Geländes.

In Bild 4.5 sind zunächst für die zwei Ebenen $z_f=0$ und $z_f=-250$ mm die komplexen Zeiger desselben Pixels der Single-Baseline-**SAR**-Bilder für einen

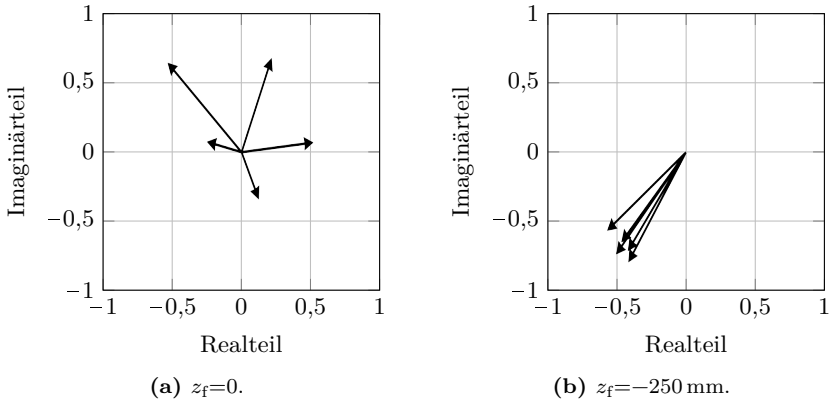


Abbildung 4.5: Komplexe Zeiger des Multi-Baseline-**SAR**-Bildes für einen Reflektor in unterschiedlichen Fokusebenen. Die einzelnen Zeiger repräsentieren den komplexen Wert desselben Pixels aus den fünf **SAR**-Bildern. Die kohärente Summe über z_f ergibt die schwarz gestrichelte Kurve (---) in Bild 4.6.

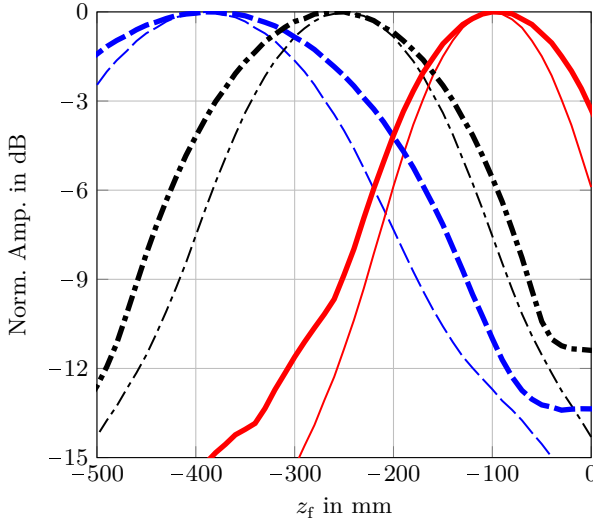


Abbildung 4.6: Extrahierter und jeweils über der Fokusebene z_f auf das Maximum normierter Amplitudenverlauf für drei Ziele aus Bild 4.4 (b) an den y -Positionen 4,5 m (—), 8 m (---) und 11,7 m (—) sowie das entsprechende Simulationsergebnis (—), (---) und (—).

Reflektor bei $y=8$ m abgebildet. Als Pixel wurde hierbei die Position des Maximums der kohärenten Überlagerung ausgewählt. Wie in Abschnitt 2.4.3 erläutert, zeigen die komplexen Zeiger bei Wahl der richtigen Fokusebene, in diesem Fall $z_f=-250$ mm, nahezu in dieselbe Richtung, wodurch folglich die Summe der kohärenten Addition in dieser Ebene maximal wird.

In Bild 4.6 ist der Verlauf der extrahierten und auf das Maximum normierten Amplitude von drei Reflektoren an den y -Positionen 4,5 m, 8 m und 11,7 m über der Fokusebene z_f abgebildet. Zudem wurden die Amplitudenverläufe entsprechend der Aufnahmegeometrie nachsimuliert und ebenfalls in das Bild eingetragen. Die 3 dB-Auflösung für das Ziel an Position $y=4,5$ m beträgt in der Simulation $\delta_z=140$ mm und 180 mm in der Messung, für das Ziel an Position $y=8$ m: $\delta_z=190$ mm und 240 mm und das Ziel an Position $y=11,7$ m: $\delta_z=240$ mm und 320 mm. Trotz der besseren Auflösung in Ground-Range verschlechtert sich

die Auflösung in z -Richtung in zunehmender Entfernung, aufgrund der geringeren Verschiebung der Zielantwort in y -Richtung bei Variation der Fokusebene. Wie auch schon in der xy -Ebene kann die simulierte Auflösung aufgrund von Nichtidealitäten des Messsystems nicht ganz erreicht werden.

Der Höhenunterschied zwischen dem ersten (—) und dem dritten Reflektor (—) beträgt gemäß der SAR-Messung 29 cm. Mit dem Tachymeter wurde ein Höhenunterschied von etwa 30 cm zwischen diesen beiden Reflektoren erfasst. Als Ergebnis kann daher festgehalten werden, dass durch die Multi-Baseline-SAR-Verarbeitung für verschiedene Fokusebenen von am Boden platzierten Reflektoren die Position der Referenzfläche ($z=0$), d. h. der Übergang von Luft in Erde, lokal zentimetergenau bestimmt werden kann. Da kein hochauflösendes Geländemodell zur Verfügung stand, wird dieses Verfahren für die Bestimmung der Lage der Referenzebene in Kapitel 5 verwendet.

4.2 Detektion von Stolperdrähten

In der humanitären Minenräumung sind Drähte sowohl im Bereich der industriell gefertigten AP-Minen als auch im Bereich der IEDs vertreten. Metallische Drähte dienen als elektrische Verbindung zwischen Auslöser und Zünder oder werden als Auslösemechanismus z. B. in Form eines Stolperdrahts verwendet. In den nachfolgenden Abschnitten wird die Detektierbarkeit einer Protupješačka Rasprskavajuća Odskočna Mina-1 (PROM-1) als Stellvertreter für Sprengkörper untersucht, die durch einen in Luft gespannten, metallischen Stolperdraht ausgelöst werden. Bei der PROM-1 handelt es sich um eine AP-Springmine, die in der Sozialistisch Föderativen Republik Jugoslawien hergestellt wurde. Das Gehäuse der Mine besteht aus Metall, sie wiegt etwa 3 kg und hat eine Gesamthöhe von 26 cm [24]. Eine kleine primäre Explosion wirft die Mine in die Luft, bevor die Hauptladung explodiert und sie in alle Richtungen zersplittet. Die Mine ist für gewöhnlich nur teilweise vergraben und steht mehrere Zentimeter aus dem Boden heraus [103]. Die Stolperdrähte sind in der Regel einige Meter lang, haben einen Durchmesser von weniger als einem Millimeter und werden parallel zur Erdoberfläche geführt [104]. Die Mine an sich sollte mit einem Metalldetektor oder einem Radar gut erkennbar sein, die Herausforderung liegt in der Detektion der Drähte, die die Mine auslösen [105]. Bei der humanitären Minenräumung erfolgt die Suche nach den Drähten in der Regel

manuell. Der sogenannten Tripwire Feeler wird dazu wiederholt parallel zum Boden in die Vegetation gesteckt und vorsichtig angehoben. Dieser Prozess ist sehr zeitaufwendig und erfordert maximale Konzentration [106].

Zunächst wird untersucht, ob und wie gut die Stolperdrähte in Abhängigkeit von der Drahtlänge, der Vegetation und dem Einfallswinkel im SAR-Bild sichtbar sind. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird in den darauffolgenden Abschnitten ein Algorithmus zur automatischen Detektion der Drähte hergeleitet.

4.2.1 Einfluss von Einfallswinkel, Drahtlänge und Vegetation

Der RCS-Wert von endlich langen, perfekt leitenden Drähten hängt von der Drahtlänge, deren Dicke, der Frequenz und dem Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle ab und führt bei einer analytischen Betrachtung zu komplexen Gleichungen [107]. Bei einer Drahtlänge, die einem Vielfachen von $\lambda/2$ entspricht, wird der RCS-Wert maximal [107] und ab einer Drahtlänge von $L > 5\lambda/2 = 45 \text{ cm}$ bei $f_c = 1,65 \text{ GHz}$ kann er als annähernd konstant angenommen werden und ist im Vergleich zu an der Oberfläche platzierten AP-Minen verhältnismäßig groß [104]. Simulationen auf Basis von analytischen Gleichungen und entsprechende Messungen zeigen, dass der RCS-Wert von dünnen Drähten stark vom Einfallswinkel abhängt [108]–[110] und im Fall $\theta = 90^\circ$ (siehe Bild 4.7) maximal ist. Zusätzlich spielt der Hintergrundclutter bei der Detektion von Stolperdrähten eine entscheidende Rolle. Aufgrund von Reflexionen an der Vegetation sinkt zum einen die Signalstärke der Reflexion des Drahts, zum anderen wird die Detektion auf Basis eines Schwellenwertverfahrens erschwert [111]. Der Einfluss hängt maßgeblich von der Dichte, Art und Feuchtigkeit der Vegetation ab, sodass im schlimmsten Fall die Reflexion des Drahts aufgrund des hohen Clutterlevels vollständig überdeckt wird.

In [104] und [111] wurde die Detektion von metallischen Stolperdrähten, die quer über einen Schotterweg gespannt wurden, mit einem fahrzeuggestützten

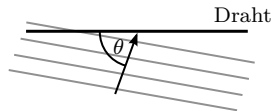


Abbildung 4.7: Einfallswinkel θ der elektromagnetischen Welle.

forward-looking **MIMO-SAR** untersucht, mit dem Ergebnis, dass diese aufgrund des großen Öffnungswinkels der Antennen bis zu einem Winkel von $\theta=20^\circ$ detektiert werden können. In [112] und [113] wurden Drähte mit einem leicht unterschiedlichen Durchmesser auf den Boden (Sand und flaches Gras) gelegt ($\theta=90^\circ$) und konnten mit dem fahrzeuggestützten side-looking **MIMO-SAR** detektiert werden. Wider Erwarten wurde festgestellt, dass die Reflexion im Gras aufgrund von größeren Luftspalten zwischen Draht und Boden und der Interaktion der elektromagnetischen Welle größer ist, als wenn der Draht auf den flachen Sandboden gelegt wird. In einer weiteren Messung wurden die Drähte lose mit mehreren Bögen im Gras platziert und als Fazit wurde festgehalten, dass für diese Anordnung eine kreisförmige Apertur, die mit dem fahrzeugbasierten Ansatz nicht möglich ist, vorteilhaft wäre.

Die Fragestellungen, die sich für das in dieser Arbeit verwendete System ergeben, sind:

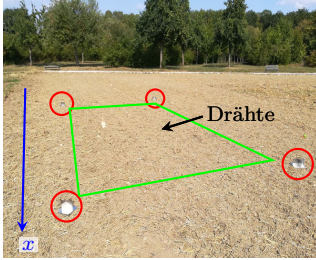
- bis zu welchem Einfallswinkel θ sind die Drähte mit **LSAR** zu erkennen,
- ab welcher Länge kann von der Form der Reflexion auf einen Draht geschlossen werden und
- welchen Einfluss hat die Vegetation auf die Reflexion?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen und als Eingangsdaten für den zu entwickelnden Detektionsalgorithmus, werden in den folgenden Abschnitten die Reflexionen von Stolperdrähten in Abhängigkeit von Einfallswinkel, Drahtlänge und Vegetation messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse sind zum Teil in [114] veröffentlicht, mit dem Unterschied, dass die Radardaten in dieser Arbeit, wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert, in Range-Richtung kompensiert sind.

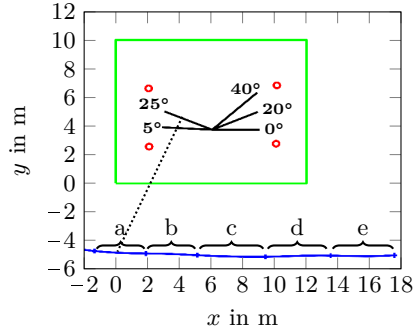
Der Multicopter wurde – wenn nicht anders vermerkt – manuell gesteuert mit dem Ziel, unter Einhaltung des Abtasttheorems den Flächendurchsatz zu maximieren. Da die Signatur der Stolperdrähte ein frequenzabhängiges Verhalten zeigte, wurde im Preprocessing der Radardaten die Frequenz des Chirps auf 1 GHz bis 2,3 GHz begrenzt. Der Durchmesser der Stolperdrähte betrug 0,5 mm.

Einfluss des horizontalen Einfallswinkels

Wie oben erwähnt, ist der **RCS**-Wert von Stolperdrähten abhängig vom Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle und nimmt sehr stark ab, wenn



(a) Foto des Messaufbaus.



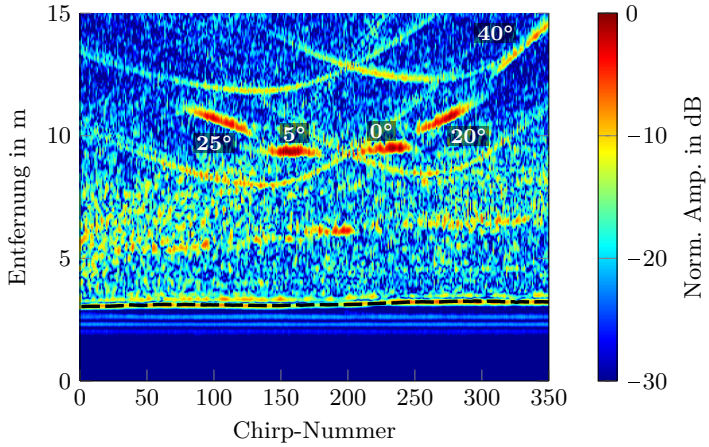
(b) Skizze des Messaufbaus.

Abbildung 4.8: Messaufbau zur Untersuchung der Winkelabhängigkeit bestehend aus Reflektoren (●) und Drähten (—), die unter den Winkeln 0° , 5° , 20° , 25° und 40° zur Trajektorie (—) gespannt sind. a-e kennzeichnen Subaperturen. Das Messfeld ist mit (—) gekennzeichnet [114], © 2019 IEEE.

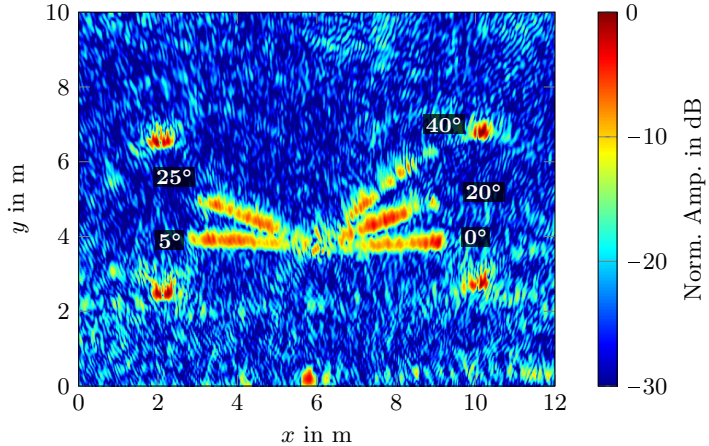
$\theta \neq 90^\circ$. Die Ausrichtung der Stolperdrähte ist im Minenfeld jedoch beliebig, mit der Folge, dass der Draht bei einem einfachen LSAR-Überflug möglicherweise nicht detektiert wird. Um sicherzustellen, dass alle Stolperdrähte erkannt werden, muss das zu untersuchende Gebiet mehrmals in unterschiedlichen Flugrichtungen überflogen werden.

Um den Einfluss des Einfallswinkels zu analysieren und die benötigte Anzahl an Überflügen zu bestimmen, wurden Stolperdrähte mit einer Länge von 3 m in einem Winkel von 0° , 5° , 20° , 25° und 40° zur linearen Trajektorie in einer Höhe von etwa 15 cm parallel zur Erdoberfläche über einem frisch gepflügten Acker ohne Vegetation mit Hilfe von kleinen Holzstäben gespannt. Ein Foto des Setups ist in Bild 4.8 (a) zu sehen, die Geometrie des Messaufbaus und die auf den Boden projizierte Trajektorie in Bild 4.8 (b). Entlang der synthetischen Apertur von $L_{\text{SAR}} = 23 \text{ m}$ wurden insgesamt 351 Chirps aufgenommen. Die vorverarbeiteten Radardaten sind in Bild 4.9 (a) über der Chirp-Nummer dargestellt. Dabei wurde die erste Messung an der Position $(x, y) = (-5,5 \text{ m}, -4 \text{ m})$ und die letzte Messung an der Position $(17,5 \text{ m}, -5 \text{ m})$ durchgeführt.

Die Reflexion bei etwa 3 m entspricht der Flughöhe des UAS und kann bei-



(a) Entfernungprofile und die aus den Radardaten extrahierte Flughöhe des UAS (—). Die fünf Drähte sind als Linien und die Reflektoren als Hyperbeln sichtbar.



(b) SAR-Bild für die komplette synthetische Apertur. Die Drähte werden als Linien und die Reflektoren als Punktziele abgebildet.

Abbildung 4.9: Entfernungprofile und das dazugehörige SAR-Bild (horizontale Polarisation, $\text{CRF}=30$ Hz, $v \approx 2$ m/s), Abbildung nach [114].

spielsweise mit einem CFAR-Algorithmus extrahiert werden. Die Genauigkeit dieser Höheninformation ist für die Bestimmung der Lage der Referenzebene ($z=0$) nicht ausreichend, kann jedoch als Startwert für das in Abschnitt 4.1.2 beschriebene Verfahren verwendet werden. Im Bereich von etwa 5 m bis 7 m ist der Übergang zwischen Wiese und Acker beziehungsweise die Furche dazwischen sichtbar. Die Reflektoren sind über einen großen Winkelbereich, fast über die gesamte Länge der synthetischen Apertur, sichtbar. Ihre Reflexion führt zu den vier stark ausgeprägten Hyperbeln im unfokussierten Radarbild, wohingegen die geradenförmige Reflexion der Drähte nur in wenigen Chirps sichtbar ist. Wie in Bild 4.8 (b) mit einer gepunkteten Linie skizziert, ist die Reflexion des Drahts in dem x -Achsenabschnitt am größten, in dem die Orientierung der linear polarisierten Welle der Orientierung des Drahts entspricht.

Bild 4.9 (b) zeigt das zugehörige SAR-Bild. Die Reflektoren erscheinen als Punktziele und die Drähte weiterhin als Linien. Die Aufteilung der PSF der Reflektoren kann damit begründet werden, dass jeder Reflektor wiederum aus vier Tripelspiegeln besteht, damit eine Sichtbarkeit über einen Winkelbereich von 360° garantiert werden kann. Bis auf den Draht, der sich in einem Winkel von 40° zur Flugbahn des UAS befindet, sind diese eindeutig als Linien zu erkennen. In dem Bereich, in dem die Drähte nahe zusammenliegen, sind sie aufgrund von Interferenzeffekten nicht trennbar.

Wie in Bild 4.8 (b) angedeutet, können die Radardaten in Subaperturen aufgeteilt werden. Diese teilprozessierten SAR-Bilder sind in Bild 4.10 dargestellt. Gemäß der Theorie, dass die Drähte den größten RCS-Wert für $\theta=90^\circ$ besitzen, sind in den einzelnen Subaperturen nur die Drähte sichtbar, die sich nahezu orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der linear polarisierten Welle – also parallel zur Wellenfront – befinden. Diese starke Winkelabhängigkeit ist beispielsweise in Bild 4.10 (a) und (b) zu erkennen. Die beiden Drähte befinden sich im Messaufbau innerhalb des x -Achsenabschnitts von 2,5 m bis 6 m, jedoch ist der obere Draht (25°) in der Subapertur von -2 m bis 2 m und der untere (5°) in der Subapertur von 2 m bis 4 m sichtbar (Vgl. Messaufbau in Bild 4.8 (b), Radardaten in Bild 4.9 (a) und teilprozessierte SAR-Bilder in Bild 4.10 (a) und (b)). Dasselbe Verhalten gilt für die drei Drähte im Bereich von $x=6$ m bis $x=9,5$ m. Die Sichtbarkeit des Stolperdrahts in Bild 4.10 (e) ist aufgrund der zunehmenden Entfernung zwischen Radar und Ziel, der endlichen Länge der Apertur und dem Öffnungswinkel der Antenne in Elevation begrenzt.

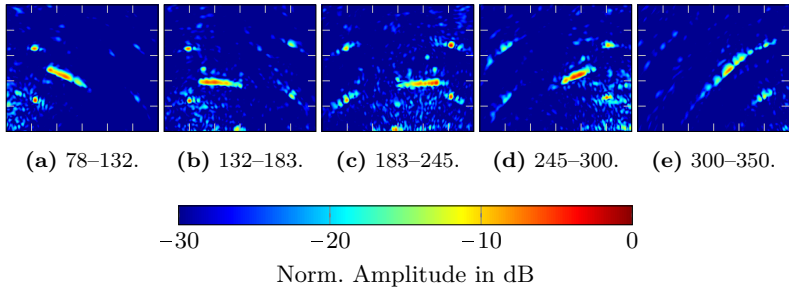


Abbildung 4.10: Einzelne Subaperturen der in Bild 4.9 (a) gezeigten Radar-daten für synthetische Aperturen mit einer Länge zwischen 3,2 m bis 4,2 m. Die Daten wurden gemäß Bild 4.8 (b) in fünf Bereiche aufgeteilt. Die x -Achse des SAR-Bildes geht, wie in Bild 4.9 (b), von 0 m bis 12 m und die y -Achse des Chirp-Nummer (η) der Subaperturen ist in der Bildunterschrift angegeben, Abbildung nach [114].

Für eine zuverlässige Erkennung von beliebig orientierten Stolperdrähten werden folglich mindestens drei Überflüge mit einer Flugrichtung von 0° , 80° und 160° benötigt.

Einfluss der Drahtlänge

Stolperdrähte dienen zur Fernauslösung von Minen und sind daher in der Regel wenige Meter lang. Die Fragestellung ist, ab welcher Länge von der Form der Reflexion auf einen Draht geschlossen und diese Information zur Klassifikation der Reflexion genutzt werden kann. Hierzu wurden vier Drähte mit einer Länge von 25 cm, 50 cm, 1 m und 2 m in einer Höhe von 15 cm parallel zum Boden und parallel zur Flugrichtung gespannt, siehe Bild 4.11. Die Messung wurde an der gleichen Stelle wie in Bild 4.8 (a) aufgezeichnet. Das SAR-Bild zeigt, dass alle Drähte, bis auf den kürzesten, eindeutig detektierbar sind. Durch eine Reduktion der Fluggeschwindigkeit und/oder Multi-Baseline SAR könnte dieser vermutlich auch detektiert werden, im Vordergrund dieser Betrachtung steht jedoch die Klassifikation anhand der Form der Reflexion. Wie das Messergebnis zeigt, ist die Ausdehnung der Reflexion in x -Richtung bei einer Drahtlänge von 0,5 m minimal größer als die Ausdehnung der Reflexion in y -Richtung. Spätes-

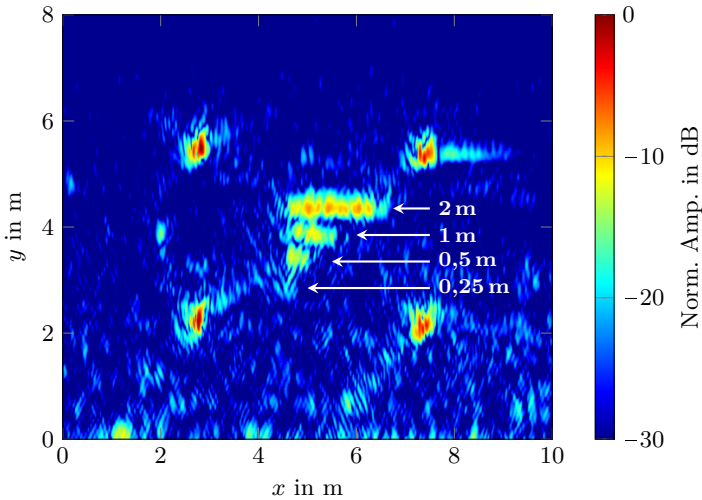


Abbildung 4.11: SAR-Bild eines Messaufbaus zur Untersuchung des Einflusses der Drahtlänge (horizontale Polarisation, $\text{CRF}=30$ Hz, $v \approx 1,8$ m/s), Abbildung nach [114].

tens ab einer Länge von 1 m ist die Form des Drahts als länglich ausgedehntes Objekt eindeutig zu erkennen. Die Grenze zwischen Detektion einer Reflexion und Klassifikation anhand deren Form liegt somit im Bereich zwischen 0,5 m und 1 m.

Einfluss der Vegetation

Der Einfluss der Vegetation auf die Reflexion des Drahts hängt von vielen Parametern, wie beispielsweise der Dichte der Vegetation, der Wuchshöhe, dem Wassergehalt und der Art der Vegetation (z.B. hohes Gras vs. fein verästeltes Buschwerk) ab. Ein Teil der elektromagnetischen Welle penetriert die Vegetation, der andere Teil wird an ihr reflektiert und gestreut, wodurch das Clutterlevel steigt und die Detektion des versteckten Drahts erschwert wird. Je dichter, feuchter, verholzter, höher und inhomogener die Vegetation, desto mehr Clutter wird das Signal überlagern. Nachfolgend werden die Auswirkun-

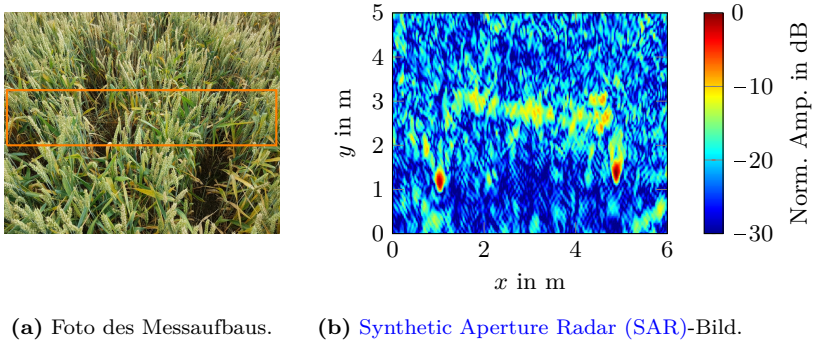
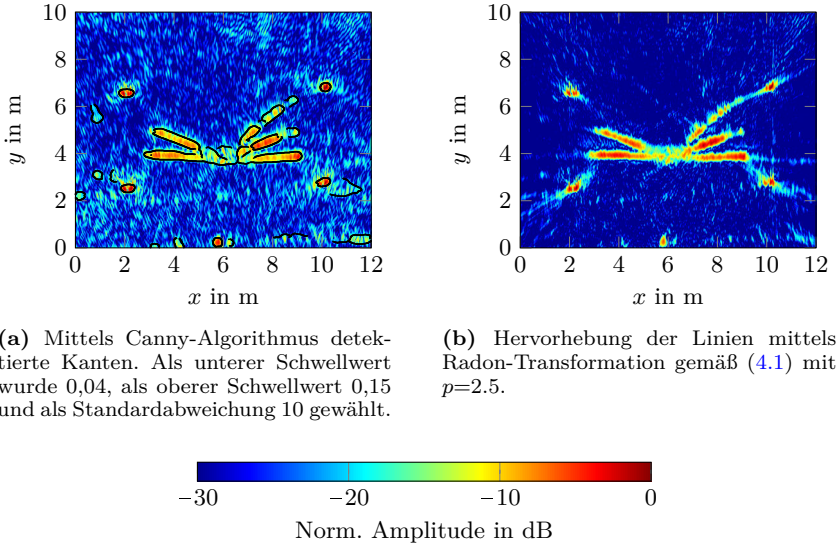


Abbildung 4.12: Einfluss der Vegetation auf die Detektierbarkeit von Drähten. Der Messaufbau besteht aus zwei Reflektoren und einem orangen Draht (innerhalb des orangen Rechtecks), der in einem Weizenfeld gespannt wurde (horizontale Polarisierung, CRF=30 Hz, $v=0,4$ m/s).

gen exemplarisch anhand einer Messung aufgezeigt. In Bild 4.12 ist das Foto des Messaufbaus und das zugehörige Messergebnis für einen Stolperdraht abgebildet, der in einem Weizenfeld in einer Höhe von etwa 15 cm parallel zur Flugrichtung gespannt wurde. Die Wuchshöhe des Weizens betrug etwa 50 cm. Optisch ist der orange Draht nur schwer zu sehen, im Gegensatz dazu ist die Reflexion im Radarbild deutlich zu erkennen. Im Vergleich zu den vorherigen Messungen steigt aufgrund der Streuung an der Vegetation das Clutterlevel. Zudem besteht die Gefahr, dass die Reflexion nicht mehr als ein zusammenhängendes Objekt wahrgenommen wird, was in einer nachfolgenden Klassifikation berücksichtigt werden muss.

4.2.2 Liniendetektion

Im Abschnitt 4.2 wurde gezeigt, dass Stolperdrähte mit dem Messsystem erkannt werden können. Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit der automatischen Detektion von Drähten beziehungsweise allgemeiner mit der Detektion von länglichen, ausgedehnten Objekten in SAR-Bildern. In der Bildverarbeitung werden zur Liniendetektion vorwiegend Kantendetektoren eingesetzt. Eine Kante kann als lokale, unidirektionale, starke Änderung der Intensität de-



(a) Mittels Canny-Algorithmus detektierte Kanten. Als unterer Schwellwert wurde 0,04, als oberer Schwellwert 0,15 und als Standardabweichung 10 gewählt.

(b) Hervorhebung der Linien mittels Radon-Transformation gemäß (4.1) mit $p=2.5$.

Abbildung 4.13: Demonstration des Canny-Algorithmus und der Hervorhebung von Linien mit der Radon-Transformation in Anlehnung an [114].

finiert werden. Gradienten-basierte Verfahren nutzen den Bildgradienten und eine Extremwertsuche zur Bestimmung der Position von Kanten [115]. Hierzu wird das Bild mit einer Filtermaske, z.B. dem Sobel-Operator oder dem Prewitt-Operator, gefaltet. Einer der bekanntesten Algorithmen zur Kantendetektion wurde 1986 von Canny vorgestellt [116]. Dieser wurde auf die drei Ziele optimiert, alle Kanten zu detektieren, diese genau zu lokalisieren und ein und dieselbe Kante nicht mehrmals zu detektieren. In Bild 4.13(a) wurde dieser Algorithmus auf das SAR-Ergebnis aus Bild 4.9(b) angewandt. Sofern die Drähte in den SAR-Bildern als ausgeprägt zusammenhängende Linien erkennbar sind, können sie prinzipiell mit einem Kantendetektor erfasst werden. Jedoch scheitert das Verfahren, wenn das SCR gering ist, und je schwächer und unregelmäßiger die Reflexion des Drahts ist. Zudem arbeitet der Algorithmus auf Grauwertbildern, wodurch die Phaseninformation eines SAR-Bildes aufgrund der Betragsbildung verloren geht.

Alternativ kann zur Detektion von Linien die Radon-Transformation herangezogen werden [117], [118]. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass Linien aus stark verrauschten Bildern extrahiert werden können, da keine Schwellenwertfilterung durchgeführt wird [119]. Das Potential der Radon-Transformation kann am Beispiel der Hervorhebung von Linien demonstriert werden [120]. Der Algorithmus lautet

$$A^*(x, y) = \mathcal{R}^{-1} \left\{ \left| \mathcal{R} \{A(x, y)\} \right|^p \right\}. \quad (4.1)$$

Es wird der Betrag des Radon-transformierten $\mathcal{R}\{\cdot\}$ und normierten [SAR](#)-Bildes $A(x, y)$ mit $p > 1$ potenziert, bevor das Ergebnis dieser Operation wieder in den Ortsbereich rücktransformiert $\mathcal{R}^{-1}\{\cdot\}$ wird. Das Ergebnis in Bild 4.13 (b) zeigt, wie die Linien verstärkt und der Clutter reduziert wurde. Anwendung findet die Radon-Transformation in [SAR](#)-Bildern beispielsweise bei der Detektion von Straßen [121] oder Bugwellen von Schiffen [122]–[124]. In [125] wird die Detektion von Stolperdrähten auf Basis von Kamerabildern mittels Radon-Transformation vorgestellt. Die Ergebnisse der Detektion von Stolperdrähten in [SAR](#)-Bildern mit einer modifizierten Implementierung der Radon-Transformation werden in [111] vorgestellt. Jedoch werden keine Details zur Implementierung des Algorithmus genannt.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Radon-Transformation in ihrer Ursprungsform dargelegt. Darauf aufbauend wird ein Algorithmus zur Detektion von Stolperdrähten durch Ausnutzen der Phasensignatur von Stolperdrähten in [SAR](#)-Bildern vorgestellt und anschließend die Funktionsweise des entwickelten Algorithmus verifiziert.

4.2.3 Radon-Transformation

Das 1917 von Johann Radon entwickelte Verfahren [118] wird vorwiegend in der Computertomographie angewendet, um aus eindimensionalen Projektionen zweidimensionale Bilder zu rekonstruieren [120]. In der Bildverarbeitung eignet sich die Radon-Transformation beispielsweise zum Hervorheben und Detektieren von Linien und kann für beliebig parametrische Kurven verallgemeinert

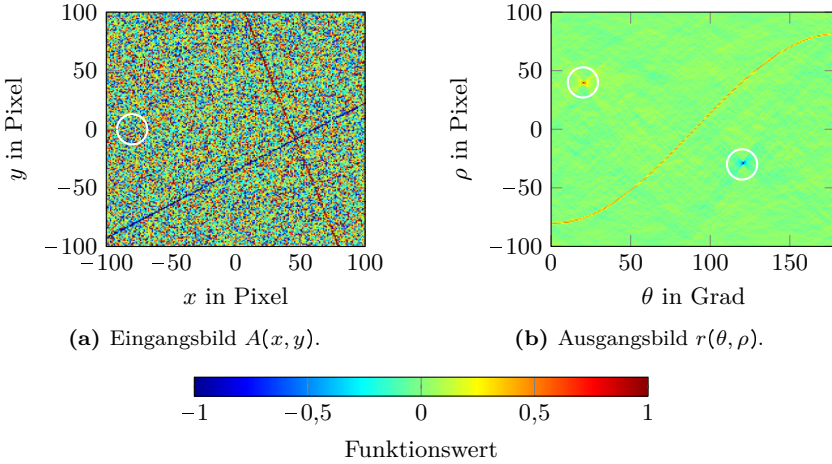


Abbildung 4.14: Demonstration der Radon-Transformation anhand zweier Geraden mit den Parametern $(\theta, \rho) = (20^\circ, 40 \text{ px})$, einem Funktionswert von 1 und $(120^\circ, -30 \text{ px})$ mit einem Funktionswert von -1. Das Bild ist mit Gauß'schem Rauschen mit einer Varianz von 0.5 überlagert. An der (x, y) -Position $(-80 \text{ px}, 0 \text{ px})$ befindet sich ein Punktziel mit dem Funktionswert 100, das sich im transformierten Bild (b) als Sinuskurve zeigt.

werden. Die Radon-Transformation eines Bildes $A(x, y)$ ist definiert als

$$r(\theta, \rho) = \mathcal{R}\{A(x, y)\} := \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (4.2)$$

für $\theta \in [0, 180)$ und $\rho \in \mathbb{R}$ [119], [126]. Dabei ist $\delta(\cdot)$ die Dirac-Funktion und ihr Argument $(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta)$ die Geradengleichung mit den Parametern θ (Winkel) und ρ (Abstand zum Ursprung). Alle Pixel, die auf einer Geraden liegen, d. h. $\rho - x \cos \theta - y \sin \theta = 0$, werden aufgrund der Ausblendeigenschaft der Dirac-Funktion aufintegriert und im Radon-transformierten Bild $r(\theta, \rho)$ in einem Punkt und im Falle von geradenhaften Signalanteilen zu einem lokalen Extremwert konzentriert [120]. Die Radon-Transformation entspricht hierbei einer Transformation von kartesischen Koordinaten in Polarkoordinaten.

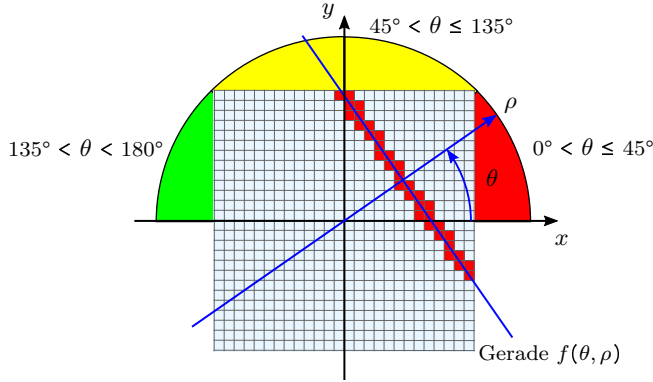


Abbildung 4.15: Prinzip der Radon-Transformation zur Extraktion von Geraden mit den Parametern (θ, ρ) in Anlehnung an [126] und [81].

Der Transformationskern sorgt dafür, dass alle Punkte entlang der mit θ und ρ ausgedrückten Geraden aufsummiert werden [126]. Zur Veranschaulichung sind in Bild 4.14 (a) zwei Geraden mit den Parametern $(\theta, \rho) = (20^\circ, 40 \text{ px})$ und $(120^\circ, -30 \text{ px})$ eingezeichnet. Nach Anwendung der Radon-Transformation sind im transformierten Bild 4.14 (b) zwei Extrema an den entsprechenden Positionen (θ_i, ρ_i) zu erkennen. Das starke Punktziel an der Position $(-80 \text{ px}, 0 \text{ px})$ erscheint im transformierten Bild (b) als Sinuskurve.

Für die Implementierung der Radon-Transformation in einem Datenverarbeitungsprogramm muss (4.2) mit einer Funktion für diskrete Werte von θ und ρ angenähert werden [119], [126]. Das Vorgehen zur Berechnung der diskreten Radon-Transformation ist in Bild 4.15 skizziert. Zunächst wird das Bild zentriert, sodass der Ursprung in der Mitte des Bildes liegt. Für die ausgewählten Werte von θ und ρ können die Geradengleichungen aufgestellt werden. Für x und y ergeben sich zwangsweise Werte, die nicht auf dem ganzzahligen Pixelraster liegen. Zur Lösung dieses Problems kann beispielsweise eine lineare Interpolation verwendet. Dazu werden die Werte der benachbarten Pixel gemäß des Abstands zur berechneten Position gewichtet und addiert. Die Geradengleichung in der Normalform $y = ax + b$ kann mittels trigonometrischer Zusammenhänge ausgedrückt werden. Für die Steigung a und den y -Achsenabschnitt

b ergibt sich $a = -\cos \theta / \sin \theta$ und $b = \rho / \sin \theta$. Die Diagonale des Bildes $A(x, y)$ definiert den maximalen Wertebereich von ρ . θ wird in die vier Bereiche

$$0^\circ < \theta \leq 45^\circ : x = \frac{y - b}{a} \quad (4.3)$$

$$45^\circ < \theta \leq 135^\circ : y = ax + b \quad (4.4)$$

$$135^\circ < \theta < 180^\circ : x = \frac{y - b}{a} \quad (4.5)$$

$$\theta = 180^\circ : y \quad (4.6)$$

unterteilt und gibt vor, ob über die Variable x oder y iteriert wird [126]. In den Bereichen für $0^\circ < \theta \leq 45^\circ$ und $135^\circ < \theta < 180^\circ$ wird die Umkehrfunktion der Geradengleichung herangezogen (Iteration über y) und im Bereich von $45^\circ < \theta \leq 135^\circ$ die Geradengleichung in Normalform (Iteration über x). Für $\theta = 180^\circ$ wird über alle Werte in y -Richtung aufsummiert.

Der Vorteil der Radon-Transformation gegenüber den Gradienten-basierten Verfahren liegt in der Detektion von Linien in stark verrauschten Bildern, wie es bereits in Bild 4.14 demonstriert wurde. Rauschbeiträge entlang von Linien werden durch den Integrationsprozess ausgelöscht, während Beiträge von linearen Merkmalen sich aufsummieren [127]. Dieser Vorteil wurde in [120] quantitativ gezeigt, indem das SNR vor und nach der Radon-Transformation eines mit $n(x, y)$ künstlich verrauschten Bildes verglichen wurde. Das Verhältnis der SNRs vor und nach der Transformation ist

$$\frac{\text{SNR}(r(\theta, \rho))}{\text{SNR}(A(x, y) + n(x, y))} = \frac{L}{\kappa} \quad (4.7)$$

und ergibt eine Verbesserung um den Faktor $\frac{L}{\kappa}$. Dabei ist κ die Korrelationslänge des Rauschens und L die Länge des Integrationsweges. Je länger also die Linie im Verhältnis zur Korrelationslänge des Rauschens ist, desto größer ist das SNR nach der Transformation.

Die Radon-Transformation des SAR-Bildes mit den fünf Stolperdrähten aus Bild 4.9 (b) ist in Bild 4.16 abgebildet. Wider Erwarten sind keine fünf leicht trennbaren Maxima zu erkennen, da auch für Integrationswege, auf denen sich keine Drähte befinden, sich im transformierten Bild hohe Werte ergeben. Ein Grund hierfür ist, dass die Drähte keine idealen Linien sind, sondern eine verbreiterte Form aufweisen. Zudem beeinflussen sich nahe zusammenliegende

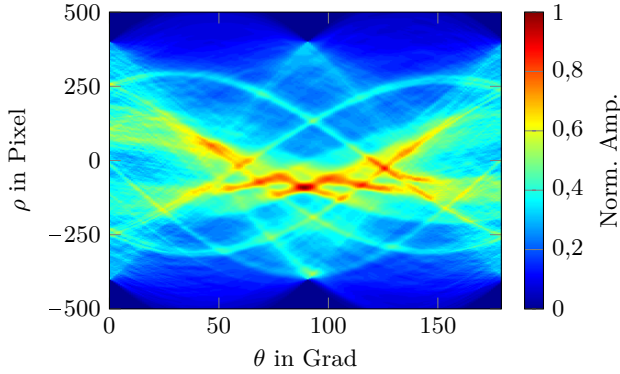


Abbildung 4.16: Radon-Transformation des SAR-Bildes 4.9(b)

Drähte bei der Radon-Transformation gegenseitig und können daher als korreliertes Rauschen mit einer großen Korrelationslänge κ betrachtet werden. Die starken Reflexionen der vier Reflektoren führen nach der Transformation zu den vier Sinuskurven, die die Detektion zudem erschweren, siehe Bild 4.14(b).

In Anlehnung an [128], [129] wird nachfolgend ein Algorithmus vorgestellt, der nicht nur auf dem Betrag der SAR-Bilder basiert, sondern auch die Phaseninformation ausnutzt.

4.2.4 Algorithmus zur Liniendetektion

Bei der Radon-Transformation werden die Amplitudenwerte entlang einer Geraden aufsummiert, wodurch bei einem SAR-Bild die Phaseninformationen nicht berücksichtigt werden. Bereits in [128] wurde ein entfernungsabhängiger Phasenzusammenhang entlang eines langen Drahts in SAR-Bildern festgestellt. Diese regelmäßige Signatur kann zur Detektion von Drähten verwendet werden. Das komplexe Signal $A(x, y)$ eines Ziels kann mit

$$A(x, y) = b(x, y)e^{j2k_0 R} \quad (4.8)$$

beschrieben werden [128]. Die Amplitude wird durch einen komplexen Streufaktor $b(x, y)$ beschrieben und von der Radargleichung und dem Winkel zwi-

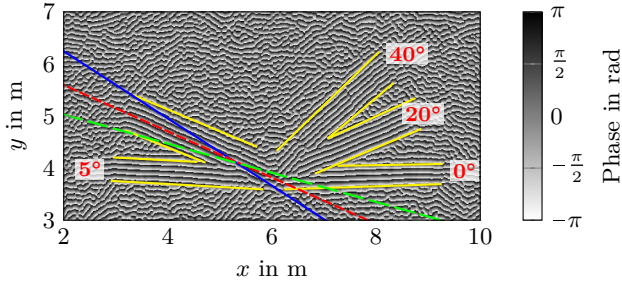


Abbildung 4.17: Ausschnitt des SAR-Bildes 4.9 (b) von fünf Stolperdrähten. Dargestellt wird die Phase des SAR-Bildes und drei Geraden mit den Parametern $(\theta, \rho) = (50^\circ, -82 \text{ px})$ (—), $(60^\circ, -82 \text{ px})$ (---) und $(70^\circ, -82 \text{ px})$ (—), die sich auf dem Draht, der unter einem Winkel von 25° zur Flugbahn gespannt ist, befinden. Zur besseren Visualisierung sind die Signaturen der Drähte mit gelben Linien markiert [81], © 2020 IEEE.

schen dem Draht und der Trajektorie bestimmt [129]. Die Phase kann durch eine Exponentialfunktion mit der Wellenzahl im Freiraum k_0 und dem Abstand R beschrieben werden. In Bild 4.17 ist ein Ausschnitt der Phase des aus Bild 4.9 (b) bekannten SAR-Bildes von fünf Stolperdrähten zu sehen. In den gelb markierten Bereichen ist eine regelmäßige Struktur der Reflexion zu erkennen. Dabei ist die Phase entlang der Drähte annähernd konstant. Zur detaillierten Analyse werden die in Bild 4.17 angedeuteten Geraden durch den Draht, der sich in einem Winkel von 25° zur Flugbahn befindet, extrahiert. Die Phase der drei komplexwertigen Schnitte durch das SAR-Bild sind in Bild 4.18 dargestellt. Im ersten Schnitt (—) ist im Bereich von 240 bis 380 Pixel eine zunehmende Phase zu erkennen. Im zweiten Schnitt (---), der parallel durch den Draht verläuft, ist die Phase annähernd konstant und im dritten Schnitt (—) nimmt die Phase in diesem Bereich ab. Die komplexwertige Pixelfolge lässt sich mit

$$v[k] = A e^{(j \frac{2\pi f}{M} k)} \quad (4.9)$$

ausdrücken. Dabei ist A die Amplitude, f die Frequenz, M die Länge der Folge und k ein Laufindex mit $0 \leq k < M$. Die Frequenz ist die Ableitung der Phase, d. h.

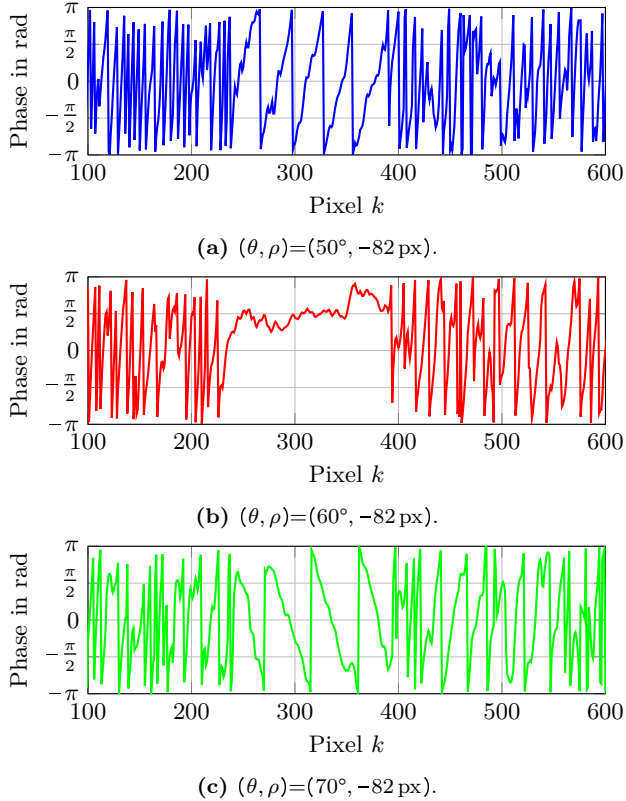


Abbildung 4.18: Phasenverlauf der Schnitte aus Bild 4.17. Beim Schnitt entlang des Stolperdrahts (b) ist die Phase annähernd konstant, wohingegen bei (a) und (c) die Phase zu- bzw. abnimmt [81], © 2020 IEEE.

bei konstanter Phase gilt $f=0$. Anstatt die Absolutwerte entlang dieser Geraden zu integrieren, soll mit dem Algorithmus dieser periodische Phasenverlauf im Frequenzbereich analysiert werden. Dabei kann die Frequenz f der komplexen Folge mittels FFT bestimmt werden.

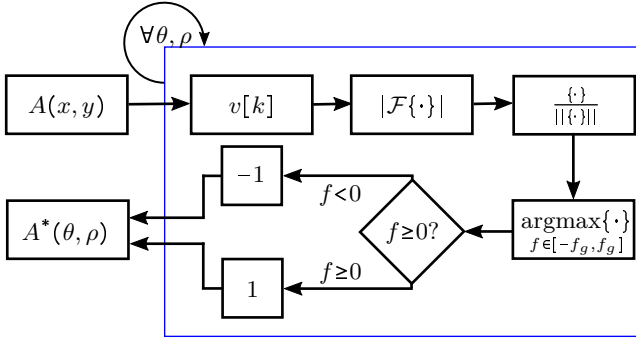


Abbildung 4.19: Verarbeitungskette zur Transformation des SAR-Bildes $A(x, y)$ mittels modifizierter Radon-Transformation [81], © 2020 IEEE.

Transformation des SAR-Bildes

In Bild 4.19 ist der Ablauf der entwickelten Verarbeitungskette schematisch dargestellt. Wie bei der Radon-Transformation erfolgt die Verarbeitung für alle Kombinationen von Winkel θ und Abstand ρ . Anstatt die Betragswerte entlang einer Geraden aufzuintegrieren, soll die komplexe Folge im Frequenzbereich analysiert werden. Falls der extrahierte Vektor v zu wenig Einträge hat, da sich die Gerade in den Ecken des Bildes befindet, wird er verworfen. Kurze Vektoren beinhalten zu wenig Information und besitzen eine geringe Aussagekraft. Empirisch wurde die notwendige Länge des Vektors auf mindestens 100 Einträge festgelegt. Der Vektor $v[k]$ wird mit einem Von-Hann-Fenster gewichtet, mittels FFT in den Frequenzbereich transformiert $\mathcal{F}\{v[k]\}$ und anschließend mit der Länge M des Vektors normiert. Mit dem Eingabeparameter $k_{\max}$ wird die maximal zulässige Periode der Exponentialfunktion ($v[k]$) festgelegt und daraus die Grenzfrequenz $f_g = M/k_{\max}$ berechnet. Nur Frequenzen, die sich im Bereich $[-f_g, f_g]$ befinden, werden im weiteren Algorithmus berücksichtigt. Dies entspricht einer Tiefpassfilterung mit unendlich steiler Flanke. Anschließend wird das Maximum im Bereich $[-f_g, f_g]$ bestimmt und abhängig vom Vorzeichen der Frequenz mit negativem bzw. positivem Vorzeichen in das transformierte Bild $A^*(\theta, \rho)$ eingetragen.

In Bild 4.20 ist das mit dem vorgestellten Algorithmus transformierte Bild

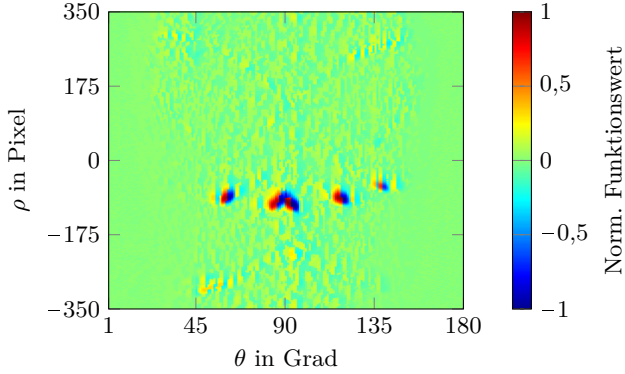


Abbildung 4.20: Ergebnis $A^*(\theta, \rho)$ nach der Transformation des SAR-Bildes 4.9 (b) mit dem in Bild 4.19 vorgestellten Algorithmus [81], © 2020 IEEE.

$A^*(\theta, \rho)$ dargestellt. Die zwei Drähte, die sich im SAR-Bild unter den Winkeln 0° und 5° relativ zur Trajektorie befinden, liegen im transformierten Bereich sehr nahe zusammen ($(\theta, \rho) \approx (90^\circ, -100 \text{ px})$), können aber noch eindeutig voneinander getrennt werden. Durch die Transformation ergibt sich für jeden der fünf Drähte ein lokales Maximum ($f > 0$) und ein lokales Minimum ($f < 0$). Die Nullstelle dazwischen ($f = 0$) repräsentiert die Gerade mit den Parametern (θ, ρ) , auf der sich der Draht befindet.

Bestimmung der Position von Drähten

Anhand des transformierten Bildes $A^*(\theta, \rho)$ wird entschieden, ob es sich im ursprünglichen SAR-Bild um einen Draht handelt und wo er sich befindet. Im ersten Schritt werden hierzu die Positionen der Kanten der Extrema mit einem Sobel-Filter detektiert. Das Ergebnis dieser Filter-Operation $A_{\text{Sobel}}^*(\theta, \rho)$ zeigt Bild 4.21 (a). Anschließend wird mit einem Schwellenwertverfahren entschieden, ob es sich um einen Draht handelt oder nicht. Der Schwellenwert soll sich automatisch an die Gegebenheiten des SAR-Bildes anpassen und wird daher auf Basis der Daten berechnet. Dazu werden die negativen Funktionswerte nach der Kantendetektion zu null gesetzt und das quadratische Mittel der Amplituden A_{rms} aller Pixel ermittelt. Dieser Wert multipliziert mit einem

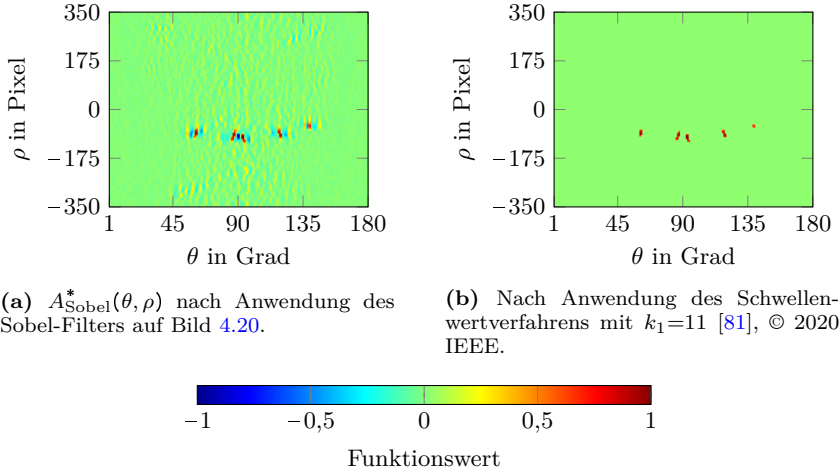


Abbildung 4.21: Bestimmung der Position des Drahts durch Kantendetektion und Schwellenwertverfahren.

Vorfaktor k_1 wird als Schwellenwert verwendet. Durch eine iterative Senkung des Vorfaktors kann die Detektionswahrscheinlichkeit auf Kosten der Falschalarmrate erhöht werden. In Bild 4.21 (b) ist das Ergebnis nach Anwendung des Schwellenwertverfahrens dargestellt.

Zu erkennen sind nur noch die Beiträge der fünf Stolperdrähte, die nachfolgend als Cluster bezeichnet werden. Zur Bestimmung der Drahtposition im (θ, ρ) -Raum werden die Parameter der Cluster extrahiert. Mittels dieser Parameter und der Geradengleichung könnten die detektierten Linien in das ursprüngliche SAR-Bild eingezeichnet werden. Jedoch ist bisher nur die Geradengleichung $y = -\cos \theta / \sin \theta x + \rho / \sin \theta$ bekannt, auf der sich der Draht befindet und nicht der x -Achsenabschnitt, in welchem er sich tatsächlich befindet.

Bestimmung der Drahtlänge

Die Parameter (θ, ρ) , die aus dem transformierten Bild entnommen werden, beschreiben Geraden, auf der sich die Drähte im ursprünglichen SAR-Bild befinden. Mit Kenntnis dieser Parameter können die Pixel $v[k]$ entlang dieser

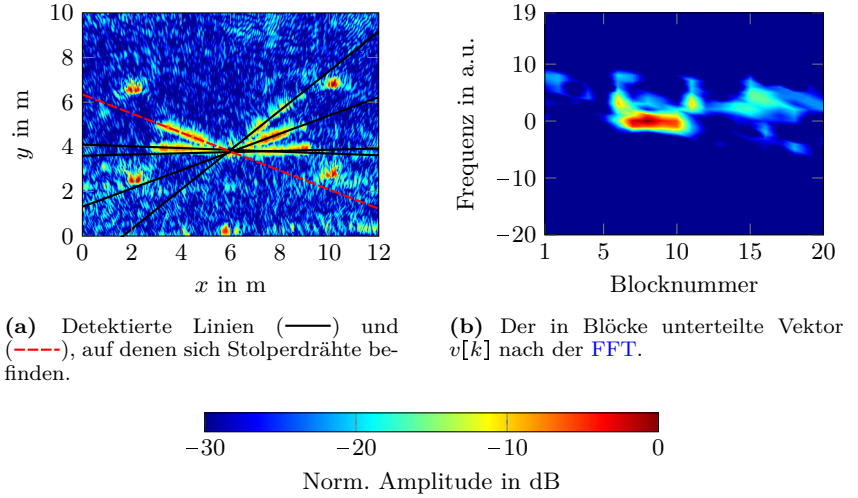


Abbildung 4.22: Bestimmung der Drahtlänge [81], © 2020 IEEE.

Geraden wie zuvor extrahiert werden. Da die Geraden parallel zu den Drähten verlaufen, ist die Phase der Signatur annähernd konstant und die Frequenz beträgt etwa null. Das weitere Vorgehen entspricht einer **Short-Time Fourier Transform (STFT)**. Der Vektor $v[k]$ wird in Blöcke mit einer festen Länge m zerlegt. Diese werden wie zuvor mit einem Von-Hann-Fenster gewichtet und mit einer **FFT** in den Frequenzbereich transformiert. Anschließend wird der Betrag der Blöcke gebildet. Das Ergebnis dieser Operationen ist am Beispiel der roten Gerade (---) aus Bild 4.22 (a) in Bild 4.22 (b) dargestellt.

Der Draht befindet sich bei einer Frequenz von 0 in den Blöcken 5 bis 10. Diese Information wird mittels Schwellenwertverfahren extrahiert. Die Schwelle wird adaptiv aus der Summe von Mittelwert und Standardabweichung, die mit einem konstanten Faktor k_2 multipliziert wird, bestimmt. In Bild 4.23 ist das Endergebnis der gesamten Verarbeitungskette dargestellt. Alle fünf Drähte können von dem Algorithmus detektiert und im **SAR**-Bild markiert werden. Aufgrund der Überlagerung der Signaturen kann in dem Bereich, in dem die Drähte sehr dicht beieinander liegen, die Drahtlänge nicht korrekt bestimmt werden.

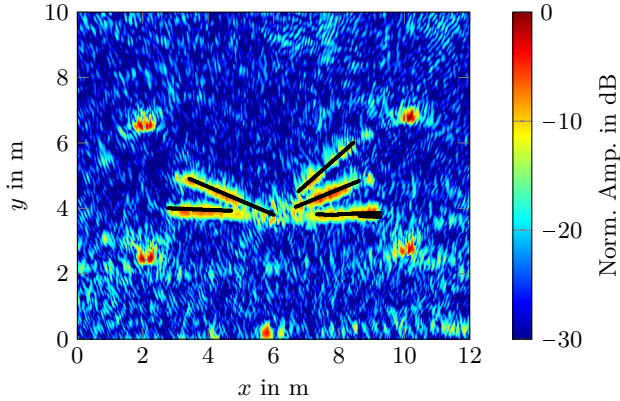


Abbildung 4.23: Detektierte Stolperdrähte mit den Parametern $k_1=11$, $m=40$ px und $k_2=0,8$ [81], © 2020 IEEE.

Allgemein wird die Genauigkeit der Längenbestimmung durch die Blocklänge m definiert und beträgt etwa $\pm m/2$.

4.2.5 Verifikation und Leistungsfähigkeit des Algorithmus

Die Detektionsergebnisse für die in Abschnitt 4.2.1 gezeigten SAR-Bilder von unterschiedlich langen Drähten und dem im Weizenfeld versteckten Draht sind in Bild 4.24 dargestellt. Die Parameter des Algorithmus wurden hierbei so ausgewählt, dass es zu keinem Falschalarm beispielsweise durch die starke Reflexion der Reflektoren kommt. Durch diese Einschränkung sind in dem Messsetup nur die beiden längsten Drähte detektierbar. Zur Verifikation des Algorithmus wird im Folgenden ein SAR-Bild verwendet, in dem die Drähte aufgrund von Clutter nicht so deutlich hervorstechen. In diesem Setup wurde als PROM-1-Dummy eine Metallflasche mit einer Zünder-Attrappe aus Messing und Aluminium teilweise im Erdboden vergraben, siehe Bild 4.25. Die Gesamthöhe des Dummies beträgt etwa 33 cm. An den Zünder wurden vier Drähte mit einer Länge von 3 m in einer Höhe von ungefähr 15 cm gespannt. Der Messaufbau ist mit vier Reflektoren umrandet. Die Messungen wurden am frühen Morgen durchgeführt, als das Gras noch taufeucht war. Insgesamt wurden vier synthetische Apertu-

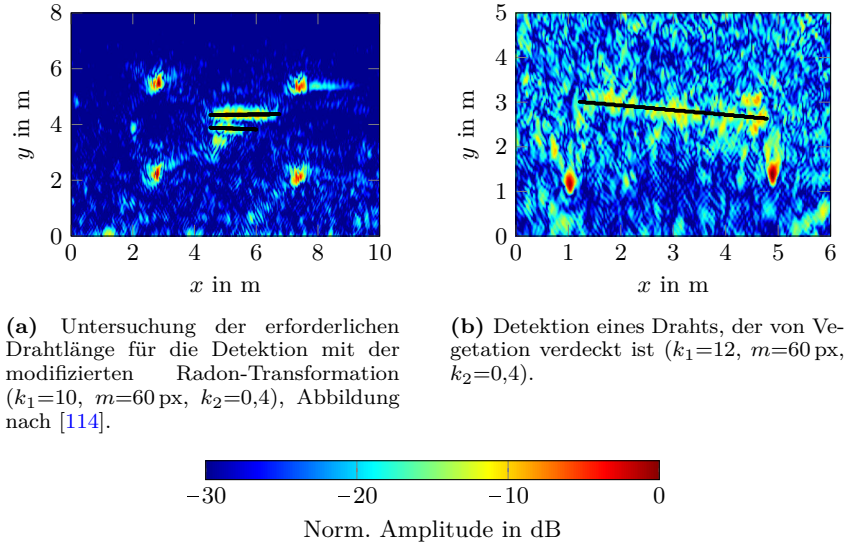
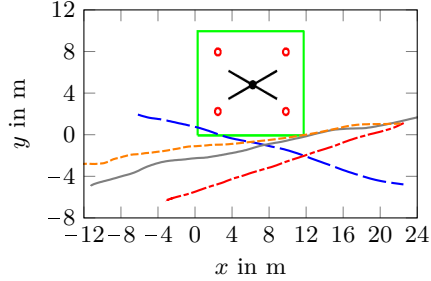


Abbildung 4.24: Detektion von Drähten mit unterschiedlicher Länge und eines von Vegetation verdeckten Drahts (horizontale Polarisation, CRF=30 Hz).

ren in einer Höhe von etwa 3,5 m mit einer Länge von etwa 30 m mit leicht unterschiedlicher Flugrichtung aufgezeichnet.

Die Messergebnisse für die Single-Baseline-SAR-Bilder und eine inkohärente Überlagerung dieser sind in Bild 4.26 und 4.27 (a) dargestellt. In allen vier Single-Baseline-Bildern sowie im Multi-Baseline-Bild sind der PROM-1-Dummy und die vier Reflektoren deutlich zu erkennen. Bei der Reflexion an der Position $(x, y) = (7 \text{ m}, 7 \text{ m})$ handelt es sich um den Eingang eines Höhlensystems einer Maus. In den SAR-Bildern für die Trajektorien (---) und (—) sind nur die Drähte zu erkennen, die annähernd parallel zu diesen verlaufen. Für die anderen beiden Trajektorien (---) und (—) sind die Positionen der vier Drähte lediglich zu erraten. Im Vergleich zu den bisherigen Messungen (vgl. Bild 4.12, S. 62) wird die Stärke der Reflexion der Drähte durch die feuchte Vegetation deutlich reduziert. Eine zuverlässige Erkennung auf Basis der SAR-Bilder beziehungsweise durch einfaches Thresholding kann nicht garantiert werden.



(a) Foto des Messaufbaus [114],
© 2019 IEEE.

(b) Skizze des Messaufbaus.

Abbildung 4.25: Messaufbau mit einem **PROM-1**-Dummy in der Bildmitte (●) und vier metallischen Stolperdrähten (—) im nassen, mit Tau bedeckten Gras. Insgesamt wurden vier synthetische Aperturen (---), (—), (---) und (---) mit leicht unterschiedlicher Flugrichtung aufgezeichnet. Zur Markierung des Messbereichs (—) wurden vier Reflektoren (●) verwendet.

Anhand der Single-Baseline-Auswertung in Bild 4.27 (a) wird der Algorithmus verifiziert. Bild 4.27 (b) zeigt das Ergebnis nach Anwendung der modifizierten Radon-Transformation vor der Schwellenwertbildung. Die drei größten Werte sind mit einem weißen Kreis markiert. Sie repräsentieren die beiden Drähte mit den Parametern $(\theta, \rho) = (58^\circ, -35 \text{ px})$ mit einer Amplitude von $-2,46 \text{ dB}$ und $(129^\circ, 2 \text{ px})$ mit einer Amplitude von 0 dB sowie den größten Clutter-Peak im gesamten Bild mit den Parametern $(99^\circ, -174 \text{ px})$ und einer Amplitude von $-4,28 \text{ dB}$. Das **SCR** beträgt nach der Transformation somit $4,28 \text{ dB}$ bzw. $1,82 \text{ dB}$. Durch die anschließende Schwellenwertbildung kann der Clutterpeak eliminiert und die beiden extrahierten Geraden in das ursprüngliche **SAR**-Bild eingezeichnet werden, siehe Bild 4.27 (c). Bild 4.27 (d) zeigt das Ergebnis nach der Bestimmung der Drahtlänge. Aufgrund der starken Reflexion des Reflektors, der sich genau auf einer der extrahierten Linien befindet, wird er fälschlicherweise als Teil des Drahts erkannt.

In Tabelle 4.1 sind die extrahierten Parameter der detektierten Linien für alle vier Messungen festgehalten. Die Abweichungen der Parameter sind durch die breite Zielantwort und das geringe **SCR** der Stolperdrähte zu erklären. In

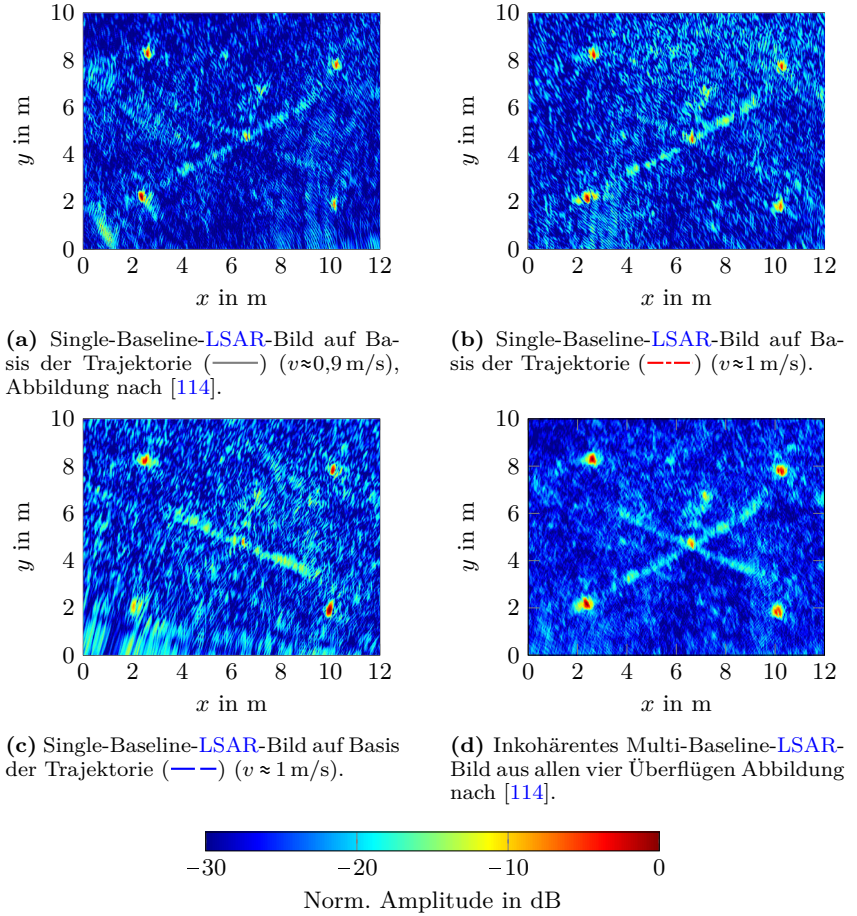


Abbildung 4.26: SAR-Bilder zur Verifikation des Detektionsalgorithmus von Stolperdrähten (horizontale Polarisierung, CRF=30 Hz). Die entsprechenden Trajektorien sind in Bild 4.25 (b) dargestellt.

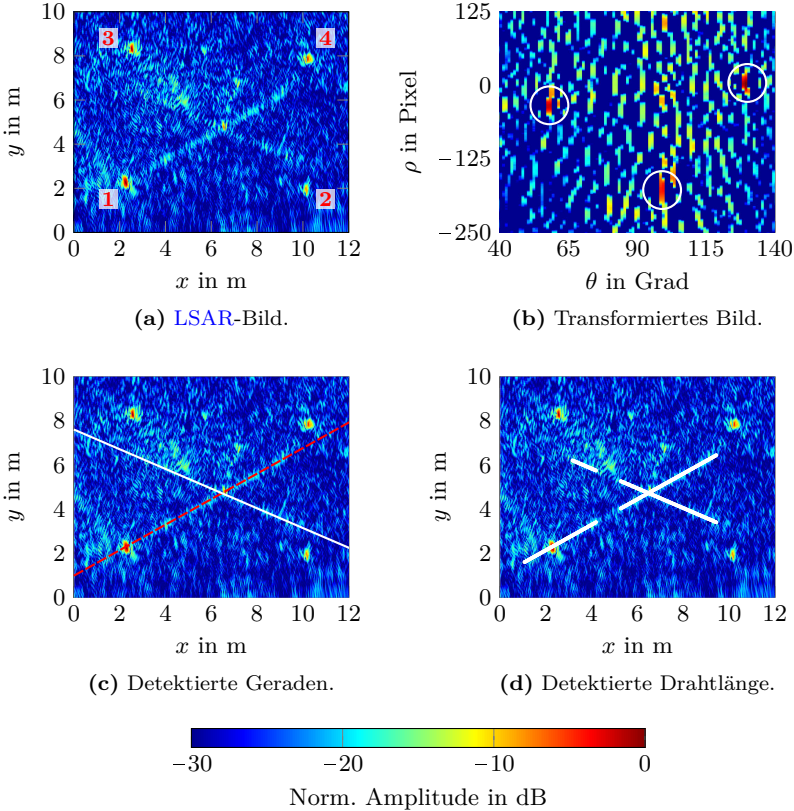


Abbildung 4.27: Single-Baseline-LSAR-Bild auf Basis der Trajektorie (---) aus Bild 4.25 (b). Das transformierte Bild (b) ist das Ergebnis der Verarbeitungskette vor der Schwellenwertbildung ($k_1=10$, $m=60$ px, $k_2=0,1$, horizontale Polarisation, CRF=30 Hz, $v \approx 0,7$ m/s), (a) und (d) aus [81], © 2020 IEEE.

Tabelle 4.1: Extrahierte Geradenparameter.

Bild	Parameter (θ, ρ)	
4.26 (a)	$(129^\circ, -1 \text{ px})$	$(58^\circ, -35 \text{ px})$
4.26 (b)	$(130^\circ, -7 \text{ px})$	—
4.26 (c)	—	$(59^\circ, -38 \text{ px})$
4.27 (a)	$(129^\circ, 2 \text{ px})$	$(58^\circ, -35 \text{ px})$

Bild 4.26 (b) und (c) wird jeweils nur eine Gerade detektiert.

Zum Vergleich der Stärke der Reflexion der Drähte sind in Bild 4.28 die Amplitudenwerte der extrahierten Geraden (----) aus Bild 4.27 (c) und aus Bild 4.22 (a) in zwei Histogrammen dargestellt. Die y -Achse auf der rechten Seite der Abbildung kennzeichnet hierbei die Position in Pixel entlang der extrahierten Geraden. Der Draht in Bild 4.28 (a) befindet sich im Bereich zwischen Pixel 200 und Pixel 600. Das Maximum bei Pixel 125 kennzeichnet die Position eines Reflektors, der sich auf der Geraden befindet, und bei dem Maximum bei Pixel 390 handelt es sich um die Reflexion des PROM-1-Dummys. Der Draht

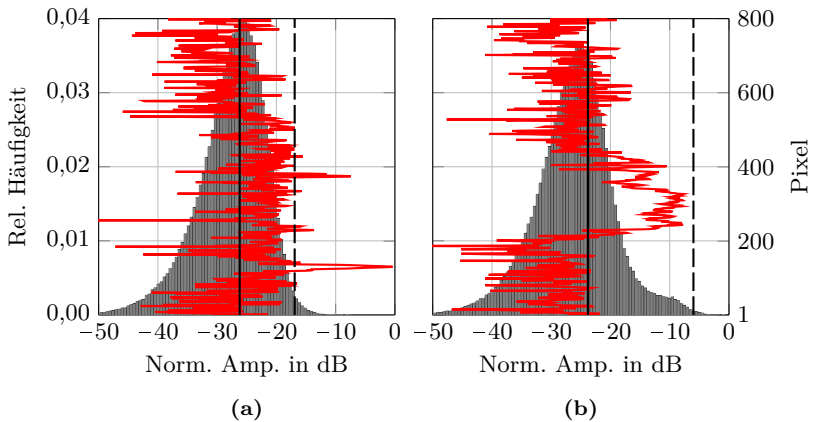


Abbildung 4.28: Histogramme und die extrahierten Amplituden (a) der Geraden (----) aus Bild 4.27 (c) (feuchte Vegetation) und (b) der Geraden (----) aus Bild 4.22 (a) (gepflügter Acker).

selbst geht größtenteils im Hintergrundrauschen unter und ist in dieser Darstellung nicht zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist in Bild 4.28 (b) der Draht im Bereich von Pixel 200 bis Pixel 400 zu erkennen. Der Draht hebt sich deutlich vom Hintergrundrauschen ab und ist daher in dem entsprechenden SAR-Bild gut zu erkennen.

Der Algorithmus ist nicht auf Single-Baseline LSAR beschränkt, sondern kann auch auf kohärent überlagerten Multi-Baseline-CSAR-Bilder angewendet werden, siehe Bild 4.29. Ausgewertet wurden hierbei acht kreisförmige Baselines mit einem Radius von 7 m in den Höhen von 2,5 m bis 4,25 m. Die Signaturen von vier Stolperdrähten, die kreuzförmig im Gras gespannt und in der Mitte an einem PROM-1-Dummy befestigt wurden, sind mit gelben Linien umrandet und können von dem Algorithmus detektiert werden.

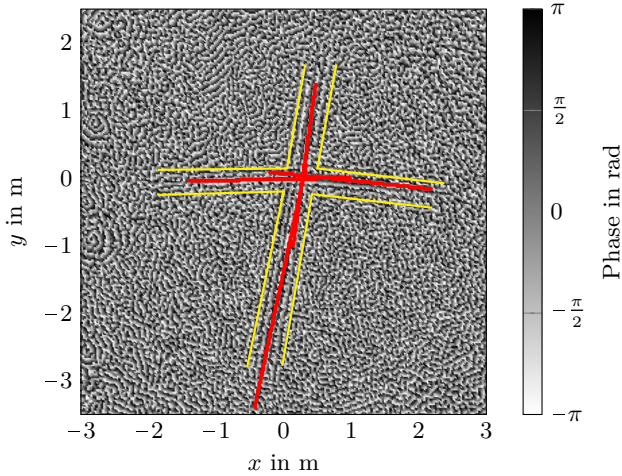


Abbildung 4.29: Detektion von Drähten in einem Multi-Baseline-CSAR-Bild ($k_1=8$, $m=60$ Pixel, $k_2=0,05$, horizontale Polarisation, CRF=180 Hz, $v=0,4$ m/s).

4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Leistungsfähigkeit des UAS-basierten SAR demonstriert. Wie aus (2.9) und (2.10) ersichtlich hängt die Auflösung in der xy -Ebene von der Aufnahmegeometrie, also der relativen Position der Ziele zur Trajektorie, der Wellenlänge und der Bandbreite ab. Messtechnisch konnte eine Multi-Baseline-LSAR-Trennfähigkeit in Ground-Range von $\delta_{\text{gr}}=12$ cm und in Cross-Range von $\delta_{\text{cr}}=8$ cm nachgewiesen werden. Durch Multi-Baseline LSAR konnte die hohe Auflösung in z -Richtung gezeigt und eine Methode zur Bestimmung der Referenzebene ($z=0$) entwickelt werden. Hierzu wurden Reflektoren auf dem Boden um das zu untersuchende Areal verteilt, Multi-Baseline-LSAR-Messungen durchgeführt und die kohärente Überlagerung für unterschiedliche Fokusebenen z_f ohne Tiefenprozessierung berechnet. Durch eine Maximumsuche in z -Richtung kann die Lage der Referenzebene und damit die Höhe $z=0$ lokal zentimetergenau bestimmt werden.

Als Anwendungsbeispiel des UAS-basierten SAR wurde die Detektion von metallischen Stolperdrähten näher untersucht. Der Fokus lag hierbei auf dem maximalen Flächendurchsatz, der durch eine hohe Fluggeschwindigkeit und Single-Baseline LSAR erreicht wird. Hierzu wurde mit Messungen der Einfluss der Orientierung der Drähte, der Drahtlänge und der Vegetation untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass Drähte in einem Winkelbereich bis $\pm 40^\circ$ von dem UAS detektiert werden können. Für eine sichere Detektion beliebig orientierter Drähte sind daher drei Überflüge notwendig. Ab einer Drahtlänge zwischen 0,5 m bis 1 m kann dieser in den SAR-Bildern als ein länglich eindimensional ausgedehntes Objekt erkannt werden. Die Vegetation führt zu Clutter im SAR-Bild, die gegebenenfalls die Reflexion des Drahts überdeckt. Dabei hängt der Clutteranteil von der Dichte der Vegetation und der Feuchtigkeit ab.

Auf Basis dieser Messergebnisse wurde ein Algorithmus zur Detektion der Position von Geraden und die Bestimmung deren Länge entwickelt. In Anlehnung an die Radon-Transformation wurde die Phase des komplexen SAR-Bildes untersucht und die Frequenz von extrahierten Geraden analysiert. Am Beispiel eines Messaufbaus mit einem PROM-1-Dummy im taufeuchten Gras konnte die Funktionsweise dieser Verarbeitungskette erfolgreich nachgewiesen werden.

5 Circular Multi-Baseline GPSAR

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Multi-Baseline-Subsurface-Prozessierung von **CSAR**-Bildern. Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel wird hier bei der **GPSAR**-Auswertung das Brechungsgesetz bei der Prozessierungstiefe $z_f < 0$ berücksichtigt. Zunächst wird auf die Leistungssteigerung des Messsystems durch eine zirkuläre Apertur eingegangen. Die zwei letzten Abschnitte dieser Arbeit beschäftigen sich mit der Detektion von vergrabenen Landminen und **IEDs** und demonstrieren erfolgreich die Funktionalität des Systemansatzes.

5.1 Leistungssteigerung durch CSAR

Bei einigen Objekten, wie Drähten (siehe Kapitel 4) oder verschiedenen Minentypen (z.B. PFM-1, siehe [130], [131]) hängt die Detektierbarkeit sowohl von der Polarisation als auch vom Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle – d. h. von der Aufnahmegeometrie – ab. Da die Ziele im Minenfeld willkürlich ausgerichtet sind, kann durch eine zirkuläre Apertur sichergestellt werden, dass diese aus allen Richtungen beleuchtet werden, wodurch die Detektionswahrscheinlichkeit erhöht wird. Zudem wird, wie im Grundlagenkapitel motiviert, durch eine zirkuläre Apertur die 3D-Auflösung verbessert. In den folgenden Abschnitten werden zur Demonstration der Leistungssteigerung Single-Baseline-**LSAR**- und **CSAR**-Simulationen, Single- und Multi-Baseline-**LSAR**- und **CSAR**-Messungen mit vergrabenen Reflektoren und Blechdosen und anschließend die 3D-**CSAR**-Auflösung auf Basis von Messung und Simulation miteinander verglichen.

5.1.1 GPSAR mit linearer und zirkularer Apertur

Zur Erstellung von 3D-**SAR**-Bildern mit einer linearen Apertur werden mindestens zwei Aufnahmen aus verschiedenen Perspektiven benötigt. Dies kann beispielsweise durch ein Radar mit zwei Antennen (Interferometrie) oder durch

mehrere Überflüge mit einem Einkanalradar (Multi-Baseline SAR oder Repeat-Pass SAR) realisiert werden [74], [75]. Im Gegensatz dazu kann aufgrund der Brechung an der Erdoberfläche mit einem GPSAR mit einer linearen Apertur aus einem Überflug mit einem Einkanalradar ein 3D-Bild prozessiert werden, sofern die Topographie bekannt ist.

Simulation

Bild 5.1 zeigt mehrere 2D-Schnittbilder für ein Single-Baseline GPSAR mit linearer und zirkularer Apertur. Die Radarparameter und Trajektorien sind in Tabelle 2.1 angegeben. Die Punktziele befinden sich an der (x, y, z) -Position $(3,5 \text{ m}, 3 \text{ m}, 0 \text{ mm})$, $(4 \text{ m}, 3 \text{ m}, -100 \text{ mm})$ und $(4,5 \text{ m}, 3 \text{ m}, -200 \text{ mm})$. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass eine zirkuläre Apertur durch mehrere lineare Aperturen (z. B. Quadrat aus vier linearen Aperturen, siehe Bild A.3, Sei-

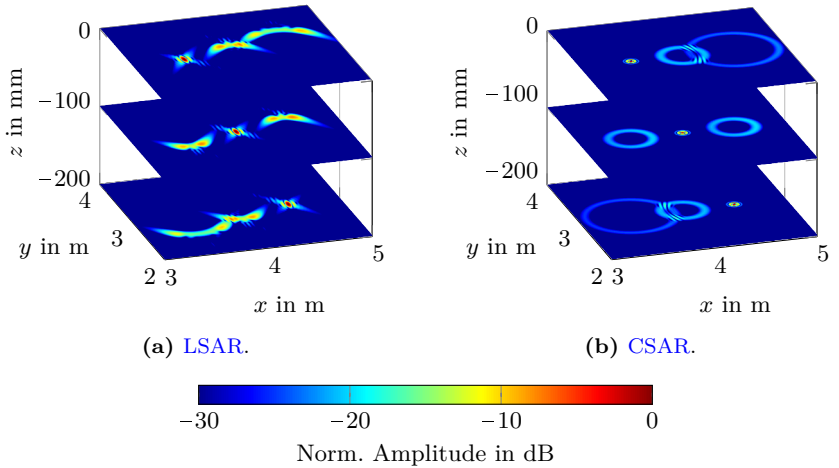


Abbildung 5.1: GPSAR-Simulationsergebnis für drei Ziele an den Positionen $(x, y, z) = (3,5 \text{ m}, 3 \text{ m}, 0 \text{ mm})$, $(4 \text{ m}, 3 \text{ m}, -100 \text{ mm})$ und $(4,5 \text{ m}, 3 \text{ m}, -200 \text{ mm})$. Die Schnittbilder sind für die drei Prozessierungstiefen $z_f = \{0 \text{ mm}, -100 \text{ mm}, -200 \text{ mm}\}$ sowohl für eine (a) lineare und (b) zirkuläre Apertur dargestellt (Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 5$).

te 132) angenähert werden kann, wodurch sich die Effizienz (Fläche pro Zeit) erhöhen lässt, sofern die Kohärenz gewährleistet ist. In dieser Arbeit wird jedoch nur die Methode mit dem größten Flächendurchsatz (LSAR) mit der Methode mit der größten Winkeldiversität (CSAR) verglichen. Entspricht die Tiefe des Ziels z_{Ziel} der Prozessierungstiefe z_f , dann ist das entsprechende Ziel sowohl bei LSAR als auch CSAR fokussiert. Befindet sich das Ziel nicht in der Fokusebene, wird die Zielantwort beim LSAR parabelförmig verzerrt. Beim CSAR wird die Energie bei Defokussierung auf einem Ring verteilt, wodurch eine höhere Auflösung in z -Richtung erzielt wird, siehe Bild 5.2. Durch Bestimmung der Ringdurchmesser, könnte bei CSAR bereits aus einer GPSAR-Prozessierung die Tiefe aller Objekte bestimmt werden, sofern die Defokussierungsringe nicht vom Hintergrundrauschen überdeckt werden. Die 3 dB-Auflösung in z -Richtung beträgt in diesem Simulationsbeispiel 70 mm für die lineare und 35 mm für die zirkuläre Apertur. In Bild 5.3 wird die PSF in der xy -Ebene für ein Ziel in einer Tiefe von $z = -100$ mm und für die Prozessierungstiefe $z_f = -100$ mm zweidimensional sowie im Schnitt dargestellt. Die Auflösung in Cross- und Ground-Range betragen für LSAR etwa 29 mm und etwa 80 mm, wohingegen mit der zirkulären Apertur vor allem in y -Richtung eine deutlich feinere Auflösung erzielt werden kann ($\delta_{\text{cr}} = \delta_{\text{gr}} \approx 22$ mm).

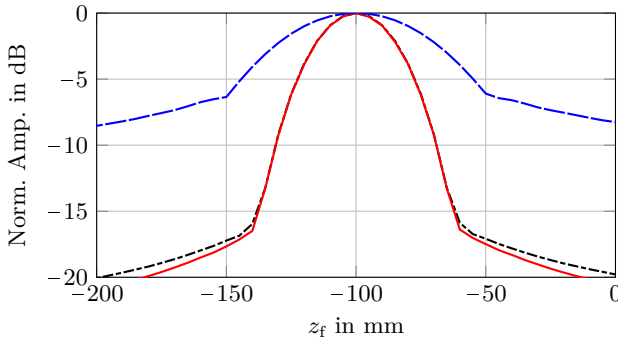


Abbildung 5.2: Simulation zur Demonstration der Auflösung in z -Richtung für eine lineare (—), zirkuläre (—) und quadratische Apertur (----).

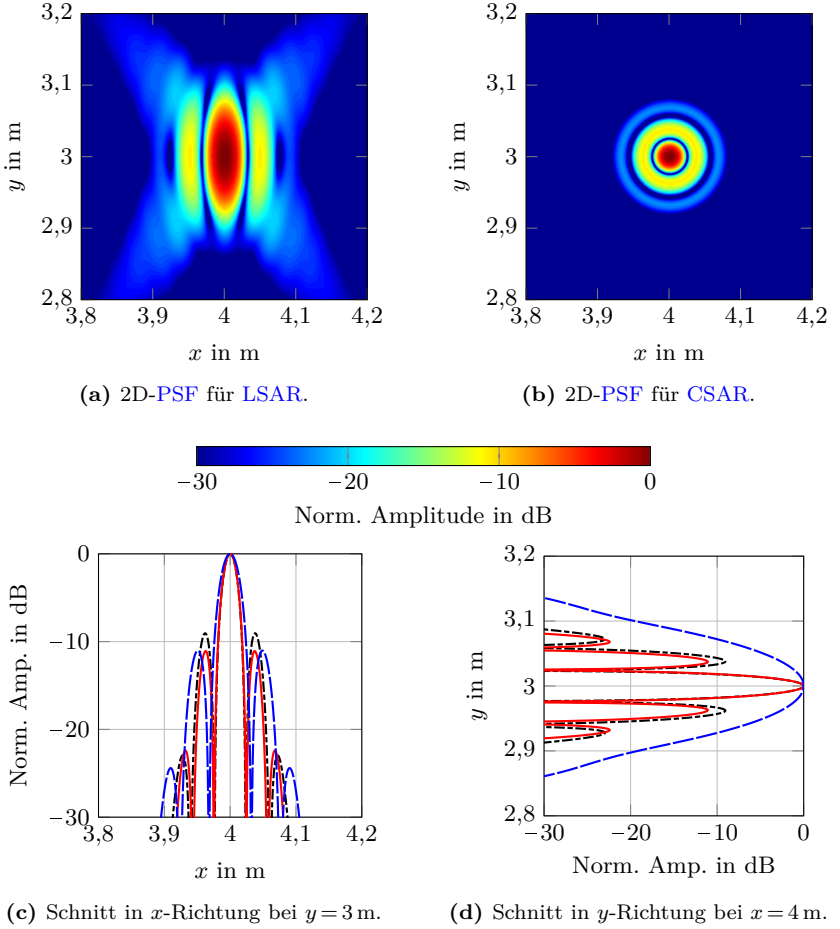


Abbildung 5.3: 2D-PSF für ein vergrabenes Ziel sowie im Schnitt für eine lineare (—), zirkuläre (—) und quadratische Apertur (----). Das Ziel befindet sich an der Position $(x, y, z) = (4 \text{ m}, 3 \text{ m}, -100 \text{ mm})$, die Prozessierungstiefe ist $z_f = -100 \text{ mm}$.

Messaufbau

Das Setup und die Trajektorien für jeweils eine der vier geflogenen Höhen zeigt Bild 5.4. Die Flughöhe wurde in 50 cm-Schritten von 3 m bis 4,5 m erhöht. Die Länge der linearen Apertur beträgt 18,8 m und das Radar wurde mit einer CRF von 30 Hz bei einer konstanten Fluggeschwindigkeit des UAS von $v=0,4$ m/s betrieben. Pro Flughöhe wurden somit etwa 1640 Chirps ausgesendet. Der Radius der zirkularen Trajektorie beträgt 7 m, wodurch sich ein Umfang von 44 m und etwa 3711 Chirps ergeben. Als Ziele wurden Tripelspiegel mit einem RCS-Wert von -13 dBSm und offene und geschlossene Blechdosen mit einem Durchmesser von 65 mm und einer Höhe von 35 mm in unterschiedlichen Tiefen in einem

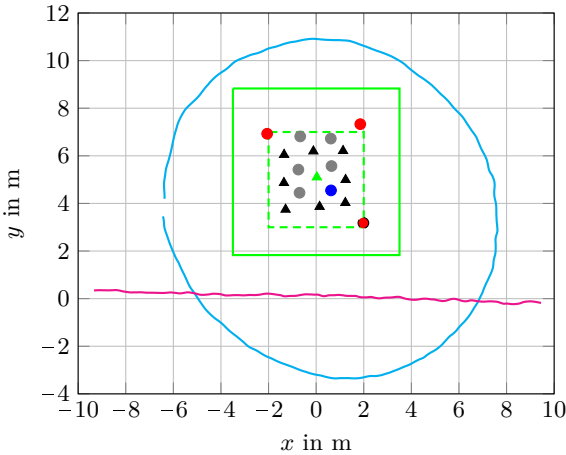


Abbildung 5.4: Messaufbau zum Vergleich von LSAR (—) und CSAR (—). Im Messfeld (—) befindet sich eine Sandfläche (---), in der Blechdosen (●) und Tripelspiegel (▲) in unterschiedlichen Tiefen vergraben sind. Die Tripelspiegel sind zur linearen Trajektorie ausgerichtet. Die Blechdose (●) (Ziel 6) und der Tripelspiegel (▲) (Ziel 8) werden nachfolgend näher betrachtet. Die Sandfläche ist mit drei Reflektoren (●) und (●) (Ziel 16), die über einen Bereich von 360° in der Horizontalen sichtbar sind, markiert. Für die Auswertung der Daten mittels Histogrammen wird lediglich der Bereich innerhalb von (---) berücksichtigt.



Abbildung 5.5: Foto des Messaufbaus zum Vergleich von [LSAR](#) und [CSAR](#). Das Setup besteht aus vergrabenen Tripelspiegeln (1–3, 7–9, 13–15), offenen (4–6) und geschlossenen Blechk Dosen (10–12).

Sandfeld vergraben. Zur Markierung des Messfelds und zur Bestimmung der Höhe der Referenzebene ($z=0$) sind drei Reflektoren, die über einen Bereich von 360° in der Horizontalen sichtbar sind, um das Sandfeld verteilt. In Bild 5.5 ist ein Foto des Messaufbaus abgebildet. Die Tripelspiegel sind im Gegensatz zu den Blechk Dosen nicht senkrecht nach oben, sondern leicht nach vorne orientiert und somit in Richtung der linearen Trajektorie ausgerichtet. Die Tripelspiegel 1 bis 3 befinden sich in einer Tiefe zwischen 100 mm bis 140 mm, die Tripelspiegel 7 bis 9 in einer Tiefe zwischen 80 mm bis 120 mm und die Tripelspiegel 13 bis 15 in einer Tiefe zwischen 60 mm bis 100 mm. Die Blechk Dosen sind in einer Tiefe zwischen 20 mm bis 50 mm vergraben. Dabei sind die Blechk Dosen 4, 5 und 6 nach oben offen, während 10, 11 und 12 mit einem Blechdeckel verschlossen sind.

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert wird kein 3D-Geländeprofil berücksichtigt. Dies hat den Effekt, dass die Fokusebene der Ziele gegebenenfalls von der Ein-

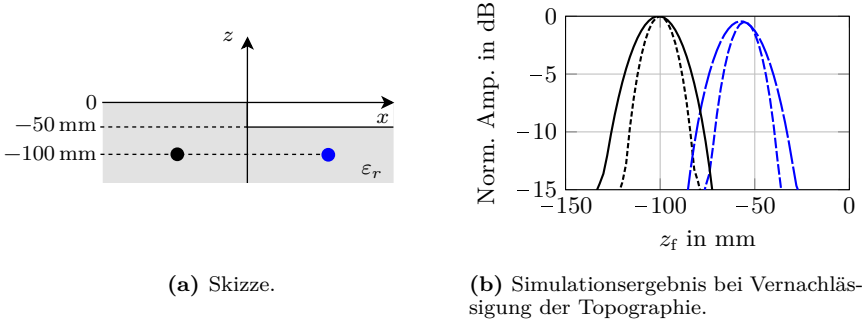


Abbildung 5.6: Zwei Ziele mit selber z -Koordinate, aber – bedingt durch die Topographie – unterschiedlicher Tiefe ($\epsilon_r=5$, —, —) und ($\epsilon_r=10$, - - - - , - - - -) für Multi-Baseline GPSAR.

grabtiefe abweicht, siehe Bild 5.6 ($z_f=-100$ mm und -57 mm bei $\epsilon_r=8$ bzw. -55 mm bei $\epsilon_r=16$). Zudem wird nicht die ganze Leistung der Reflexion in das entsprechende Zielpixel integriert ($-0,45$ dB und $-0,5$ dB). Dieser Fehleinfluss vergrößert sich mit zunehmender Eingrabbtiefe und Permittivität des Bodens.

GPSAR-Bilder

Zur Auswertung wird die horizontale Polarisierung der Single- und Multi-Baseline LSAR- und CSAR-Messungen herangezogen. Die GPSAR-Bilder des gesamten Messfelds sind in Bild 5.7 für die Fokusebene $z_f=-80$ mm dargestellt. Die Sandfläche befindet sich in dem Quadrat, das durch die beiden Eckpunkte $(x,y)=(-2\text{ m},/3\text{ m})$ und $(2\text{ m},7\text{ m})$ aufgespannt wird und ist in den Radarbildern aufgrund des geringeren Hintergrundrauschens deutlich zu erkennen. Durch die Vegetation und die höhere Dielektrizitätszahl des feuchten Erdreichs kommt es außerhalb des Sandfelds zu einer Vielzahl an Reflexionen (Clutter), wodurch sich das BL erhöht. Für die Beurteilung der Signalpegel wird daher lediglich der Bereich innerhalb des Sandfelds, wie in Bild 5.4 eingezeichnet (---), in den Histogrammen dargestellt und für die Berechnung der SBRs herangezogen.

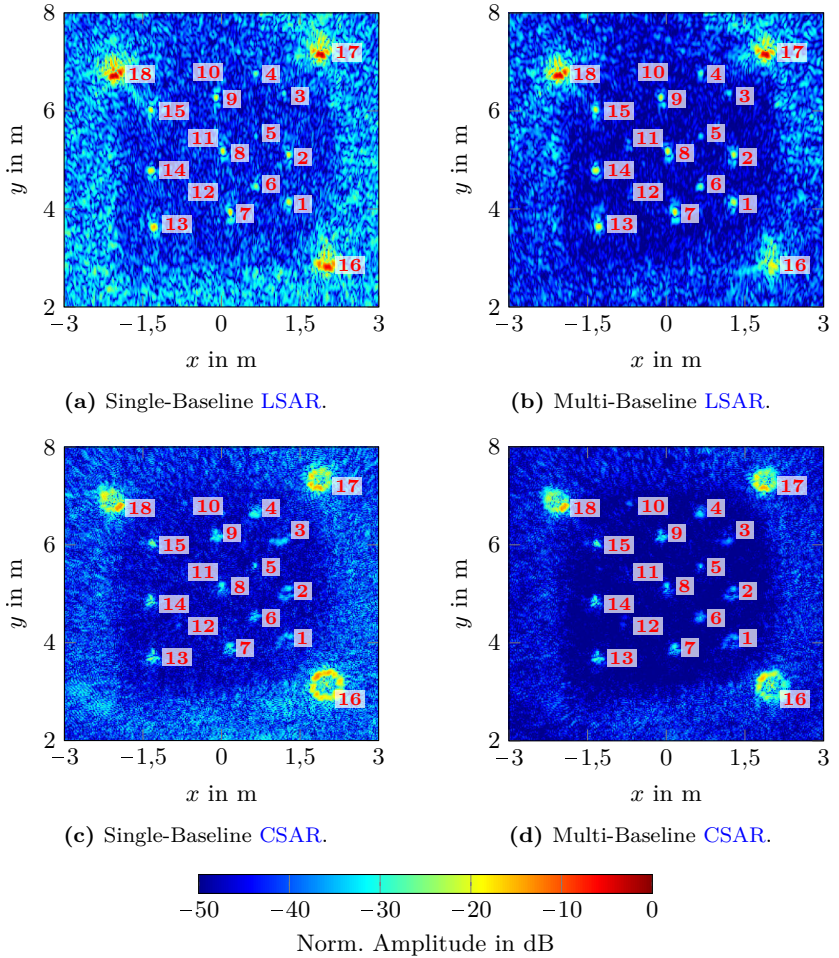


Abbildung 5.7: SAR-Bilder für die Fokusebene $z_f = -80$ mm für Single- und Multi-Baseline **LSAR** und **CSAR** (horizontale Polarisation, $CRF = 30$ Hz, $v = 0,4$ m/s).

In dieser Fokusebene ($z_f = -80$ mm) sind bis auf die geschlossenen Blechdosen (Ziele 10 bis 12) die Reflexionen aller Ziele in allen vier GPSAR-Bildern zu erkennen. Zum Vergleich der Signalstärken zwischen LSAR und CSAR und Single- und Multi-Baseline wird auf die Histogramme und SBRs in den folgenden Abschnitten verwiesen.

Histogramme

In Bild 5.8 sind die Histogramme der vier GPSAR-Bilder aus Bild 5.7 zu sehen. Die Abmessungen der Suchfenster zur Bestimmung der Signalpegel bei der linearen und zirkularen Apertur betragen $0,6 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ und $0,8 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$. Die verschiedenen Fenstergrößen sind durch die unterschiedliche Verzerrung der Zielantwort bei Defokussierung (LSAR: Hyperbel, CSAR: Ring) zu begrün-

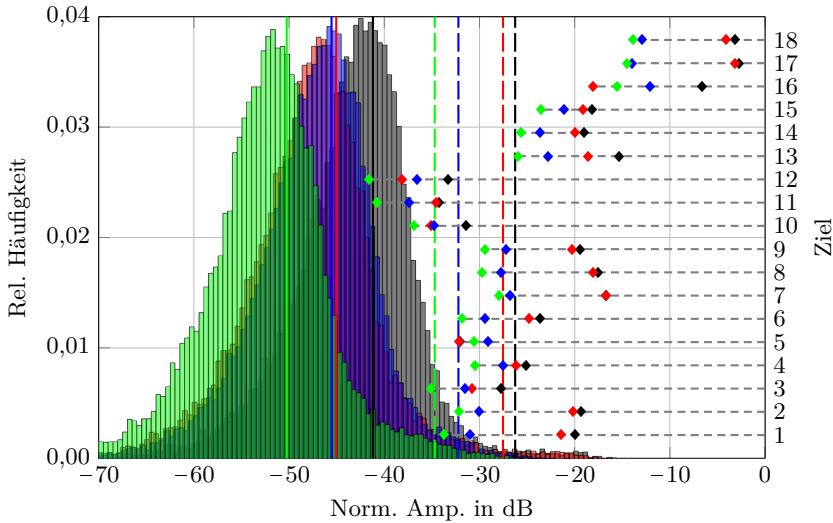


Abbildung 5.8: Histogramm der Daten aus Bild 5.7 zum Vergleich von Single- und Multi-Baseline LSAR und CSAR für die Sandfläche (---) in Bild 5.4 (Fokusebene $z_f = -80$ mm). Single-Baseline LSAR (■/◆), Multi-Baseline LSAR (■/◆), Single-Baseline CSAR (■/◆) und Multi-Baseline CSAR (■/◆).

den. Das **BL** reduziert sich durch die Multi-Baseline-Auswertung um 3,9 dB bei **LSAR** und 4,7 dB bei **CSAR**. Jedoch wird nicht nur das Hintergrundrauschen, sondern auch – vor allem bei Defokussierung – der Signalpegel durch die kohärente Überlagerung reduziert (Signalpegel Single- vs. Multi-Baseline, z. B. die Ziele 7, 8 und 9). Für eine detaillierte Betrachtung erfolgt eine Beschränkung auf zwei Ziele, deren Form und **SBR** in Abhängigkeit der Prozessierungstiefe untersucht werden. Dabei handelt es sich um eine rotationssymmetrische Blechdose (●) (Ziel 6) und einen Tripelspiegel (▲) (Ziel 8) aus Bild 5.4 im Zentrum der zirkularen Apertur.

Form und Pegel der Zielantwort

In den Bildern 5.9 und 5.10 sind die 2D-Zielantworten der vergrabenen Dose und des Tripelspiegels für unterschiedliche Fokusebenen abgebildet. Abhängig von der Fokusebene z_f variiert deren Form und Amplitude. Die Reflexion der Blechdose und des Tripelspiegels verschmiert bei der linearen Apertur 5.9 (a) und (b) und 5.10 (a) und (b) bei Wahl der falschen Fokusebene in x -Richtung. Die Position des Maximums verschiebt sich in y -Richtung. Die Form einer Hyperbel bei Defokussierung – ist im Gegensatz zur Simulation – bei der Messung nicht zu erkennen. Grund hierfür ist, dass das Ziel eine sehr geringe Signalamplitude aufweist und die Hyperbel bis auf den Scheitel bei Defokussierung im Hintergrundrauschen untergeht. Zum Vergleich ist in Bild A.4, S. 133 die Zielantwort für den 360°-Reflektor (●) (Ziel 16) auf der Erdoberfläche für Single- und Multi-Baseline **LSAR** und **CSAR** dargestellt. In diesem Beispiel ist die hyperbelförmige Verzerrung der Zielantwort (**LSAR**) deutlich zu erkennen.

Bei der zirkularen Apertur Bild 5.9 (c) und (d) wird, wie in der Simulation gezeigt, bei Wahl der falschen Fokusebene die Energie auf einem Ring verteilt. Der Mittelpunkt des Rings entspricht hierbei für alle Fokusebenen der Position des Ziels. Aufgrund der Orientierung des Tripelspiegels (Bild 5.10 (c) und (d)) wird die Leistung – im Gegensatz zur Blechdose – bei Defokussierung anstatt auf einem Ring nur auf einem Ringbogen verteilt.

Da bei **LSAR** die Zielantwort lediglich in y -Richtung verschoben wird, nimmt bei Defokussierung der Signalpegel im Vergleich zu **CSAR**, wo die Leistung auf einen Ring verteilt wird, deutlich geringer ab. In den einzelnen Single-Baseline Bildern überlappen sich Zielantworten aufgrund der geringen Verschiebung in y -Richtung über vielen Fokusebenen z_f , wodurch die Auflösungssteigerung in

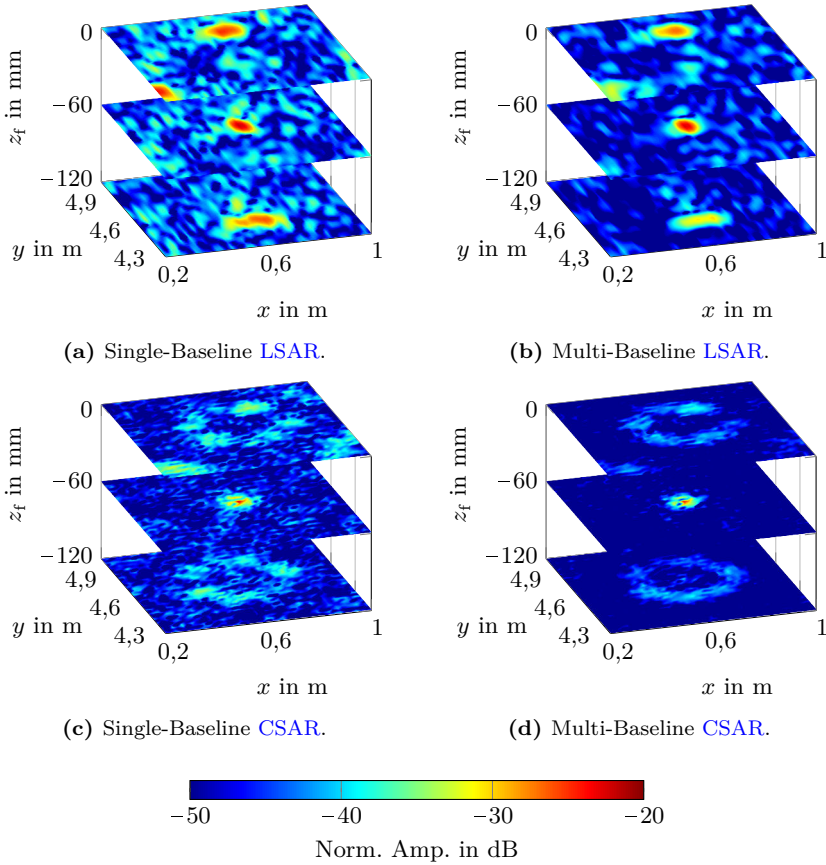


Abbildung 5.9: LSAR- und CSAR-Bilder der Blechdose (●) (Ziel 6) für unterschiedliche Fokusebenen.

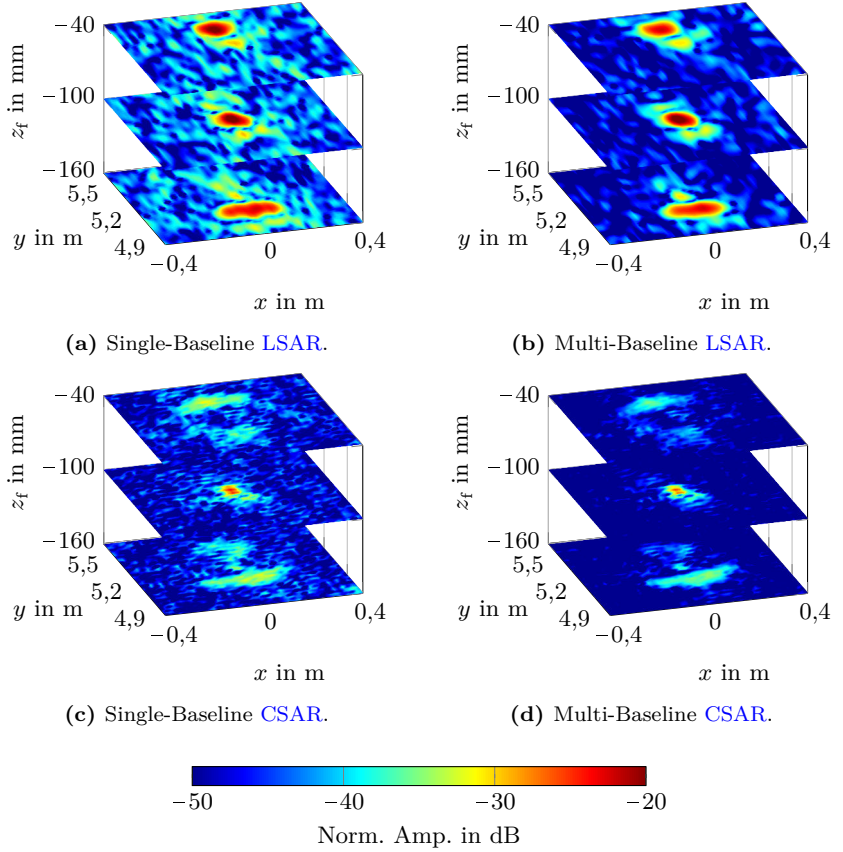
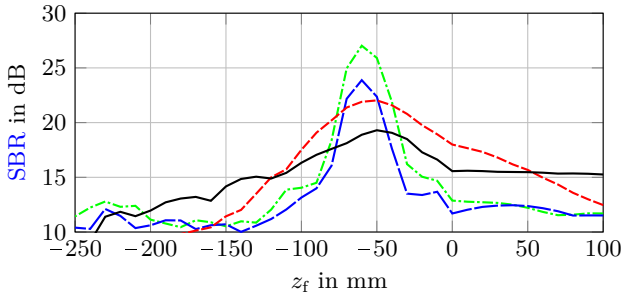


Abbildung 5.10: **LSAR**- und **CSAR**-Bilder des Tripelriegels ($\blacktriangle$) (Ziel 8) für unterschiedliche Fokusebenen.

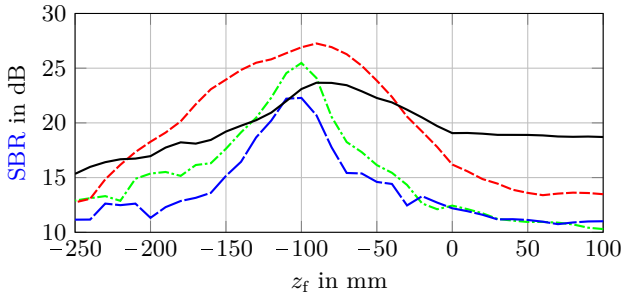
z -Richtung bei **LSAR** im Vergleich zu **CSAR** geringer ausfällt.

SBR

Entscheidend für die Detektion ist der Abstand zwischen Signalpegel und Hintergrundrauschen. Daher ist in Bild 5.11 zur Vergleichbarkeit von **LSAR** und **CSAR** das **SBR** über der Prozessierungstiefe abgebildet. Die Positionen der Maxima kennzeichnen die Fokusebene z_f , in der sich das jeweilige Ziel befindet.



(a) Vergrabene Blechdose (Ziel 6).



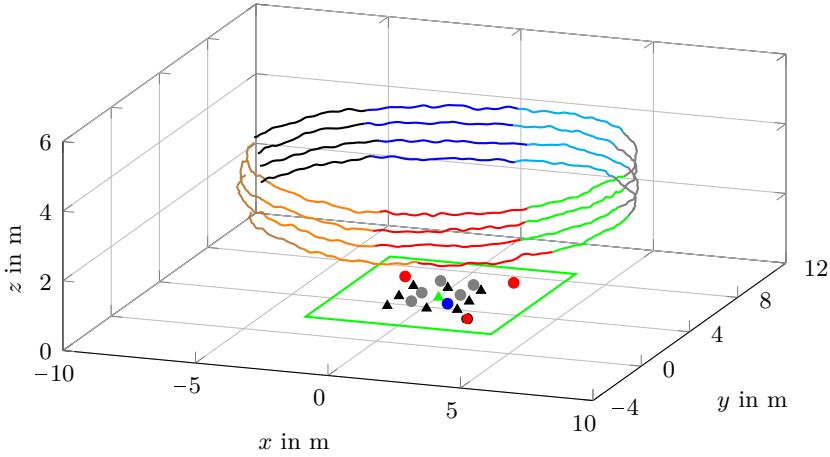
(b) Vergrabener Tripelspiegel (Ziel 8).

Abbildung 5.11: **SBR** für eine vergrabene Blechdose (Ziel 6) und einen vergrabenen Tripelspiegel (Ziel 8). Single-Baseline **LSAR** (—), Multi-Baseline **LSAR** (---), Single-Baseline **CSAR** (—) und Multi-Baseline **CSAR** (---).

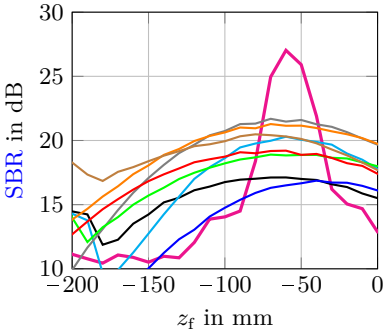
det. Aufgrund der Vernachlässigung der realen Topographie befinden sich die Maxima für **LSAR** und **CSAR** in unterschiedlichen Fokusebenen. Die Abweichung beträgt hierbei ungefähr 10 mm. Der Peak ist für beide Ziele aufgrund der höheren Tiefenauflösung bei der zirkularen Apertur schmaler. Durch die Multi-Baseline-Auswertung kann für die Blechdose (Ziel 6) und den Tripelspiegel (Ziel 8) bei einer linearen Apertur eine **SBR**-Verbesserung von 2,7 dB und 3,6 dB und bei einer zirkularen Apertur von 3,1 dB und 3,2 dB erreicht werden. Wie schon aus den **GPSAR**-Bildern ersichtlich, ist das **SBR** des Tripelspiegels bei der linearen Apertur größer als bei der zirkularen. Dieses Verhalten wird im nachfolgenden Abschnitt anhand von Subaperturen näher untersucht.

Subapertur-Auswertung

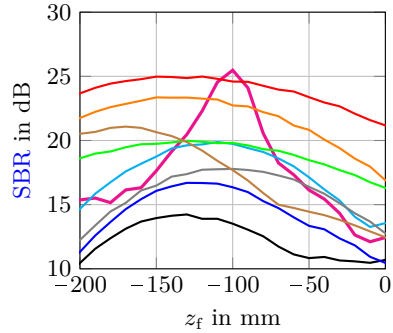
Die Stärke der Reflexion hängt vom Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle und damit von der Aufnahmegeometrie ab. Durch die zirkuläre Apertur kann sichergestellt werden, dass willkürlich orientierten Objekte aus dem günstigsten Einfallswinkel beleuchtet werden. Anstatt die volle synthetische Apertur auf einmal auszuwerten, kann diese in Subaperturen zerlegt werden. Hierbei bietet sich die Chance, anhand der Reflexionsstärke über dem Winkel, das Objekt zu klassifizieren. Wie in Bild 5.12 (a) gezeigt, wurde die zirkuläre Multi-Baseline-Trajektorie in acht Subaperturen von je 45° aufgeteilt. Die entsprechenden **SBR**-Verläufe sind in Bild 5.12 (b) und (c) zu sehen. Für die Fokusebene $z_f = -60$ mm liegen die **SBRs** für die rotationssymmetrische Blechdose im Bereich von 16,5 dB bis 21,5 dB. Die Varianz beträgt 5,4 dB. Im Gegensatz dazu liegt das **SBRs** des Tripelspiegels für die Fokusebene $z_f = -100$ mm im Bereich von 13,5 dB bis 24,6 dB bei einer Varianz von 12,0 dB. Der größere Signalpegelunterschied bei dem Tripelspiegel kann durch dessen Ausrichtung erklärt werden. Er ist zur linearen Apertur bzw. zu dem roten und orangen Kreissegment hin ausgerichtet, weswegen aus diesem Winkelbereich eine stärkere Reflexion empfangen wird. Aufgrund der längeren Beleuchtungszeit bei der linearen Apertur kann für dieses Ziel ein größerer Integrationsgewinn erzielt werden, als mit der zirkularen (vgl. Bild 5.11), jedoch nur, da das Ziel für die lineare Trajektorie vorteilhaft ausgerichtet ist. Wie das Beispiel zeigt, kann bei **CSAR** durch die Subapertur-Auswertung die Ausrichtung des Tripelspiegels erfasst werden. Dies ist bei willkürlich orientierten Objekten ein großer Vorteil und könnte – wie oben bereits erwähnt – zur Klassifikation verwendet werden.



(a) 3D-Darstellung der Subaperturen und der Messaufbau.



(b) Vergrabene Blechdose (Ziel 6).



(c) Vergrabener Tripelspiegel (Ziel 8).

Abbildung 5.12: Unterteilung der zirkularen Aperturen in acht Subaperturen von je 45° und die **SBRs** der kohärenten Überlagerung der Multi-Baseline-Subaperturen für die vergrabene Blechdose (Ziel 6) und den vergrabenen Tripelspiegel (Ziel 8). Die Farben der **SBRs** entsprechen den Farben der Multi-Baseline-Kreissegmenten und (—) ist die kohärente Überlagerung aller Subaperturen aus Bild 5.11.

Ergebnis der CA-CFAR-Detektion

Wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert, wird ein 2D-CFAR auf die einzelnen Schnittbilder angewendet. Durch eine Farbkodierung der Ebenen kann das Detektionsergebnis dreidimensional abgebildet werden, siehe Bilder 5.13 (a) und (b). Die Suchfenster (rote Rechtecke) sind nur zur optischen Markierung der tatsächlichen Zielpositionen in die GPSAR-Bilder eingezeichnet. Der CFAR wurde so ausgelegt, dass möglichst alle Ziele detektiert werden. Eine Erhöhung des Skalierungsfaktors würde in beiden Fällen dazu führen, dass eine der geschlossenen Dosen nicht detektiert wird. Ziel 10 ist unabhängig von den CFAR-Parametern bei der linearen Trajektorie nicht zu detektieren. Im relevanten Messbereich kommt es bei der linearen Apertur zu einem Fehlalarm.

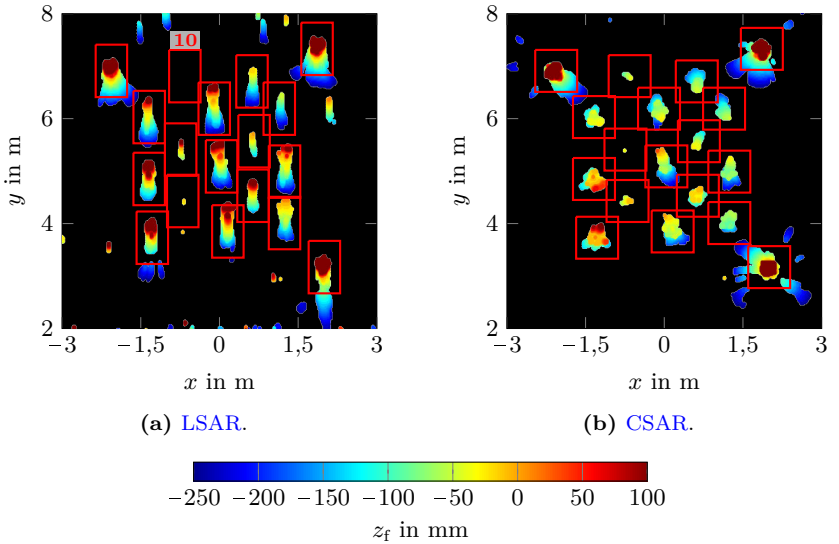


Abbildung 5.13: Ergebnis der CFAR-Filterung. Die roten Rechtecke markieren die Zielpositionen (CFAR-Detektor: Test Cells 3×3 Pixel, Guard Cells 21×21 Pixel, Reference Cells 41×41 Pixel, Schwellenwertfaktor 3,8 (LSAR) und 3,7 (CSAR)).

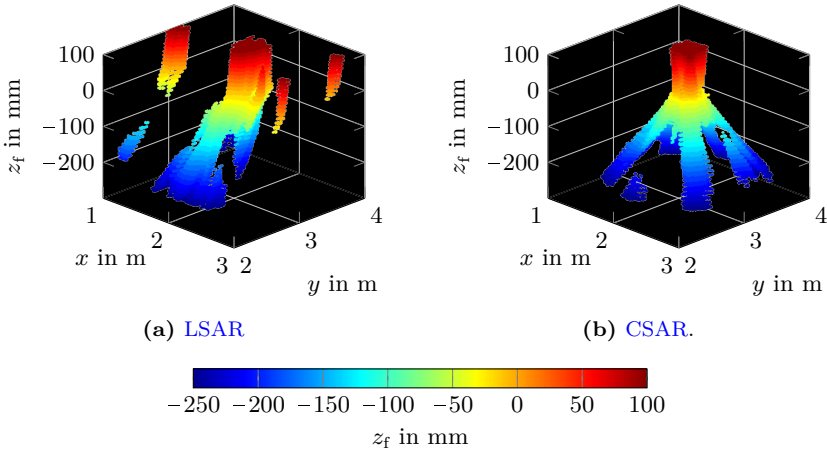


Abbildung 5.14: 3D-Darstellung eines 360°-Reflektors für eine lineare und zirkulare Apertur.

Bei der linearen Apertur werden die vergrabenen Ziele aufgrund der geringen Tiefenauflösung im Vergleich zur zirkularen fast in allen Ebenen detektiert. Wie zuvor in den [GPSAR](#)-Bildern ersichtlich (z. B. Bild [5.10 \(b\)](#)), verschieben sich die Detektionen in y -Richtung und weiten sich mit zunehmender Defokussierung auf. Bei der zirkularen Apertur wird die Energie bei Defokussierung auf eine Ring verteilt, das 3D-Detektionsergebnis hat die Form einer Sanduhr, siehe Bild [5.14](#). Der Öffnungswinkel wird von der Fluggeometrie und der Dielektrizitätszahl vorgegeben. Da der 360°-Reflektor (Ziel 16) aus vier Tripelspiegeln aufgebaut ist, spaltet sich nach der [CFAR](#)-Filterung bei zunehmender Prozessierungstiefe die defokussierte Zielantwort in vier Ringsegmente auf.

5.1.2 3D-Auflösung

Die 3D-Auflösung hängt von der Aufnahmegeometrie und den Radarparametern ab und kann mit [\(2.19\)](#) und [\(2.20\)](#) berechnet werden. Basis für die nachfolgende Betrachtung ist der in Abschnitt [5.3](#) vorgestellte Messaufbau. Mit der entsprechenden Aufnahmegeometrie (Radius $r=7,1$ m, mittlere Flughöhe

$z=3,38$ m) kann mit dem Messsystem für ein Ziel im Bildzentrum theoretisch eine Auflösung von etwa $\delta_x=\delta_y \approx 21$ mm und $\delta_z \approx 186$ mm erzielt werden. Die tatsächlich erreichbare Subsurface-Multi-Baseline-Auflösung wird in den zwei folgenden Abschnitten simulativ und messtechnisch untersucht.

Simulation

Zur Simulation der Multi-Baseline-GPSAR-Auflösung für einen Kreisflug mit Radius $r=7,1$ m um den Mittelpunkt $(0,0)$ in acht Höhen von $z=2,5$ m bis $4,25$ m mit $\Delta z=0,25$ m wurden 15 Punktziele im Abstand von 50 cm zueinander platziert und Eingrabbtiefe sowie Permittivität variiert ($\varepsilon_r=4, 8, 16$ und $z_{\text{Ziel}}=0, -10$ mm, -25 mm, -50 mm, -100 mm), siehe Bild 5.15. Das Ergebnis ist in Bild 5.16 dargestellt. Die Simulation zeigt, dass die 3 dB-Auflösung in Cross- und Ground-Range unabhängig von der Permittivität und der Eingrabbtiefe ist und sich vom Bildzentrum zum Rand des Messbereichs verschlechtert. Der theoretisch berechnete Wert wird aufgrund der Fensterung der Radardaten in Entfernungsrichtung nicht erreicht.

Aufgrund der Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium verbessert sich die Auflösung in z -Richtung mit zunehmender Permittivität und ist deutlich höher als der mit (2.20) berechnete und mit der Permittivität angenäherte Wert $186 \text{ mm}/\sqrt{8}=66$ mm (zum Vergleich: Single- und Multi-Baseline Simulation für ein Ziel in Luft ($\varepsilon_r=1$) $\delta_z=167$ mm bzw. 142 mm). Bei oberflächennahen Zielen ($z_{\text{Ziel}}=-10$ mm) hängt die Auflösung in z -Richtung von der Tiefe ab. Mit steigender Permittivität ($\varepsilon_r=16$) reduziert sich der Übergangsbereich zwischen Auflösung über und im Boden. Bei einer Eingrabbtiefe von ($z_{\text{Ziel}}=-25$ mm) ist die Abhängigkeit zwischen der Eingrabbtiefe und der Auflösung in z -Richtung mit den gegebenen Parametern nicht mehr zu erken-

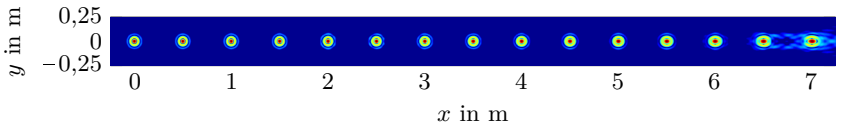


Abbildung 5.15: Zielpositionen zur simulativen Bestimmung der 3D-Auflösung bei Circular Multi-Baseline GPSAR.

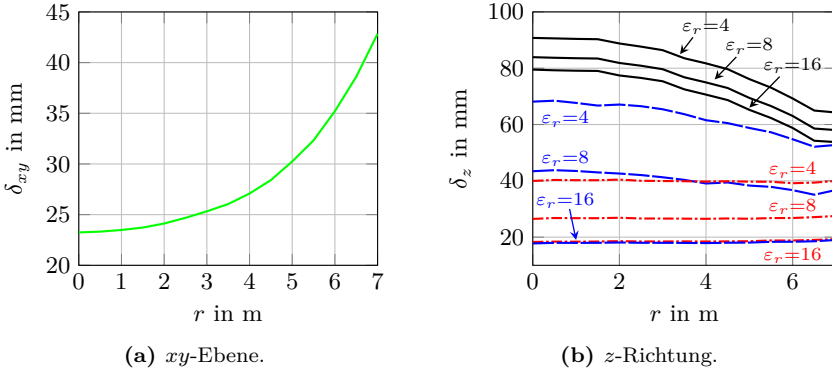


Abbildung 5.16: Simulation der 3 dB-Auflösung in Abhängigkeit der Eingrabetiefe, der Permittivität und dem Abstand zum Kreismittelpunkt ($z_{\text{Ziel}}=0$, —), ($z_{\text{Ziel}}=-10$ mm, —), ($z_{\text{Ziel}}=-25$ mm, —), ($z_{\text{Ziel}}=-50$ mm, —), ($z_{\text{Ziel}}=-100$ mm, —).

nen und entspricht der Auflösung der Ziele in $z_{\text{Ziel}}=-50$ mm und -100 mm. Bei vergrabenen Zielen ist die z -Auflösung im Bildzentrum am feinsten und verschlechtert sich minimal in Richtung Bildrand. Bei Zielen, die sich direkt auf der Oberfläche befinden ($z=0$), verbessert sich die Auflösung aufgrund des steileren Einfallswinkels zum Rand des Messbereichs. Zudem ist sie von der Permittivität abhängig, da bei Defokussierung ($z_f < 0$) der Signalpegel bei höherer Permittivität schneller abnimmt (siehe Bild A.5, S. 134).

Messung

In Bild 5.17 ist ein Messergebnis für sechs im Sand vergrabene Blechdeckel mit einem Durchmesser von 5 cm dargestellt. Die GPSAR-Bilder in 5.17 (a) für die horizontale und (c) vertikale Polarisation sind auf das jeweilige Maximum des Bildausschnitts normiert. Die Fokusebene ist $z_f=-65$ mm. In Bild 5.17 (b) ist ein Schnitt in x -Richtung und in (d) ein Schnitt in y -Richtung für die horizontale (—) und vertikale Polarisation (—), wie in (a) bzw. (c) angedeutet, dargestellt. Zudem wurde die Aufnahmegeometrie nachsimuliert und das entsprechende Ergebnis in die Schnittbilder eingetragen.

Simulation und Messung stimmen gut überein. Die 3 dB-Auflösung beträgt

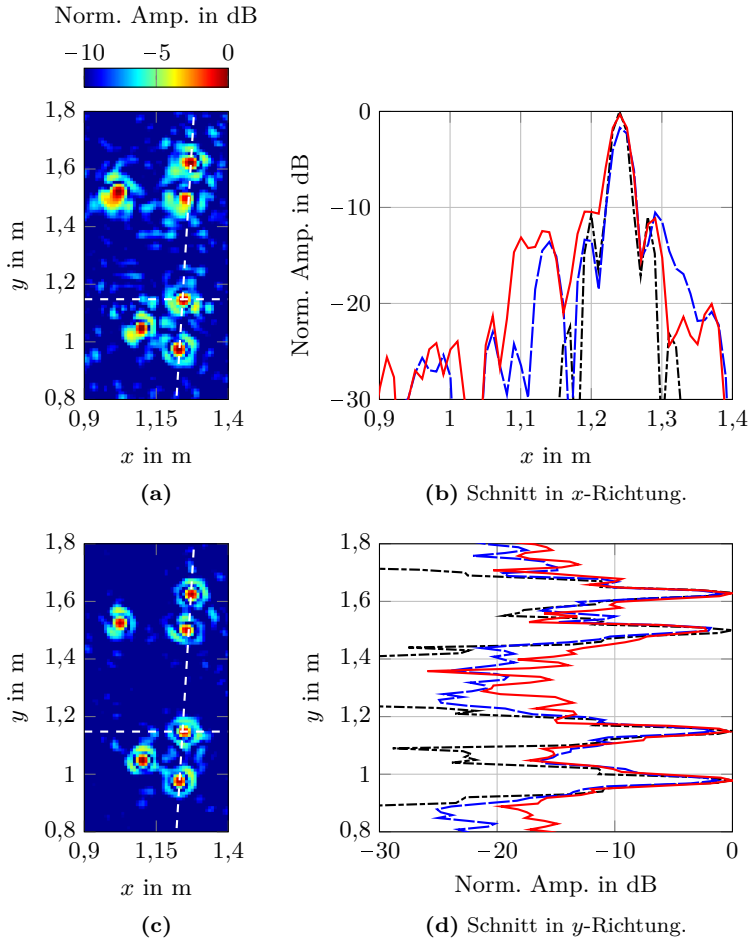


Abbildung 5.17: GPSAR-Ergebnis von vergrabenen Blechdeckeln mit einem Durchmesser von 50 mm für die (a) horizontale (—) und (c) vertikale Polarisation (—) sowie ein Schnitt in (b) x - und (d) y -Richtung ($z_f = -65$ mm) und das Simulationsergebnis (-----).

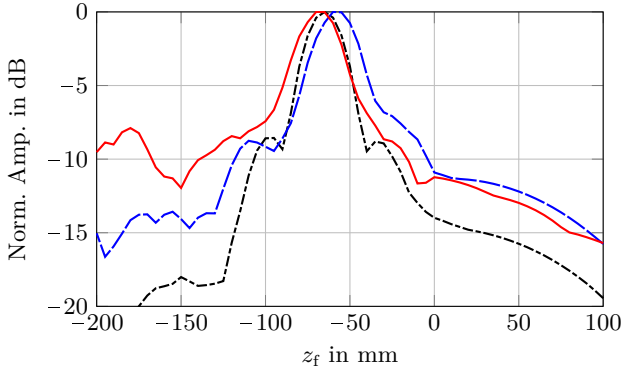


Abbildung 5.18: Normierte Amplitude des Ziels an Position $(x, y) = (1,25 \text{ m}, 1,15 \text{ m})$ über der Fokusebene z_f für die horizontale (—) und vertikale Polarisation (—) sowie das Simulationsergebnis (-----).

etwa $\delta_{\text{cr}} = \delta_{\text{gr}} \approx 30 \text{ mm}$. Der theoretisch erreichbare Wert von 21 mm (2.19) bzw. der simulierte Wert von etwa 24 mm kann aufgrund der Fensterung der Rardaten und Nichtidealitäten des Radars nicht ganz erreicht werden. Im Vergleich zur linearen synthetischen Apertur ($\delta_{\text{cr}} = 3,87 \text{ cm}$ bis 6 cm, $\delta_{\text{gr}} = 6,2 \text{ cm}$ bis 8,3 cm) konnte erwartungsgemäß vor allem in Ground-Range mit der zirkularen Apertur eine deutlich höhere Auflösung erzielt werden.

In Bild 5.18 ist die Amplitude für das Ziel an Position $(x, y) = (1,25 \text{ m}, 1,15 \text{ m})$ über der Fokusebene z_f dargestellt. Der Offset von etwa 10 mm zwischen horizontaler und vertikaler Polarisation deutet auf einen Kalibrationsfehler, d. h. eine Abweichung zwischen CAD-Modell und tatsächlicher Position der Antennen (Phasenzentren) hin. Die 3 dB-Auflösung in z -Richtung beträgt etwa 31 mm und liegt im Bereich des simulierten Werts $\delta_z = 27 \text{ mm}$.

5.1.3 Fazit

Zur Detektion willkürlich orientierter Landminen und IEDs ist CSAR besser geeignet als LSAR. Es kann eine höhere 3D-Auflösung erzielt werden und das Objekt wird aus allen Richtungen (360°) beleuchtet, wodurch deutlich mehr Information gesammelt werden kann. Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn

das zu detektierende Objekt nur in einem kleinen Winkelbereich die elektromagnetische Welle zum Radar reflektiert. Zudem wurde gezeigt, dass durch eine Subapertur-Auswertung die Information winkelahhängig untersucht werden kann, wodurch sich eine anschließende Klassifikation der detektierten Objekte gegebenenfalls verbessern lässt.

5.2 Detektion von Landminen

In diesem Abschnitt wird die Detektion von vergrabenen Landminen mittels UAS-basierten Circular-GPSAR untersucht. Es wird gezeigt, dass sowohl tief vergrabene Panzerabwehrminen als auch Antipersonenminen, die sich nur knapp unter der Oberfläche befinden mit dem seitlich ausgerichteten Radar detektieren lassen.

In 2017 wurden 128 km² Land von Minen geräumt und 168000 AP- und 7500 AT-Minen zerstört [1]. Noch immer sind 60 Länder mit Landminen versucht. Neben der unvorstellbar großen Anzahl an Minen ist auch die Anzahl an verschiedenen Minentypen groß [24]. Der Metallanteil von vielen AP-Minen wird minimal gehalten um eine Detektion mit einem Metalldetektor zu erschweren. Sie bestehen zum Großteil aus Plastik und Sprengstoff, der dielektrische Kontrast zwischen Mine und Boden ist gering. Die einzelnen Typen unterscheiden sich in Form, Abmessung, Materialzusammensetzung usw. und sind folglich auch unterschiedlich gut zu detektieren. Das Ziel nachfolgender Untersuchungen war es, die Grenzen des Systems kennen zu lernen. Daher wurden möglichst viele, kleine und unterschiedliche der zur Verfügung stehenden AP-Minen als Testobjekte verwendet und beispielsweise auf einfach zu detektierende, große Metallobjekte – wie Sprungminen oder UXOs – verzichtet. In einem Minenfeld ist typischerweise bekannt, welche Minentypen in dem Gebiet eingesetzt wurden. Das System könnte daher spezifisch auf diese Minentypen getestet (am besten unter realen Bedingungen (Bodentyp, Vegetation, Feuchtigkeit)) und somit vorab entschieden werden, ob ein Nutzen generiert werden kann oder nicht.

Das Radar wurde mit einer CRF von 30 Hz betrieben. Die GPSAR-Bilder wurden, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, nach der kohärenten Überlagerung mit $\sigma=1$ weich gezeichnet.

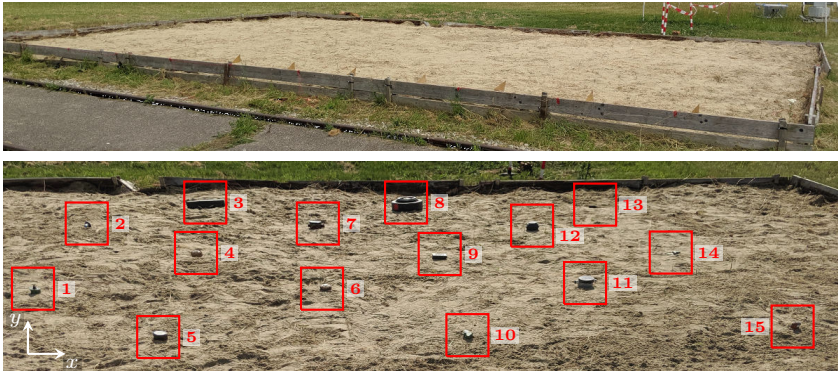


Abbildung 5.19: Das obere Foto zeigt den Messaufbau, bei dem die Ziele bereits vergraben sind. Insgesamt sind 12 **AP**-Minen, eine **AT**-Mine aus Plastik, ein Geschoss und eine Druckplatte aus Holz an den Positionen, wie im unteren Foto gezeigt, vergraben. Eine detaillierte Übersicht über die Ziele ist in Bild 5.21 abgebildet. Die Abmessungen der Sandbox betragen 12 m × 8 m [93].

5.2.1 Messaufbau

In Bild 5.19 sind zwei Fotos des Messaufbaus dargestellt. Insgesamt wurden 15 Testziele in einer Sandkiste vergraben. Dabei handelt es sich um 12 **AP**-Minen, eine **AT**-Mine aus Plastik, ein Geschoss und um eine Druckplatte aus Holz. Die Plastikminen sind mit einem Silikon gefüllt, das eine ähnliche Dielektrizitätszahl wie Sprengstoff besitzt. Die Ziele wurden in einer möglichst realistischen Tiefe eingegraben, d. h. die **AP**-Minen oberflächennah und die **AT**-Mine etwa 15 cm tief. Um das Messfeld sind acht Reflektoren mit einem Radarquerschnitt von -13 dBsm verteilt. Die Feuchtigkeit des Sandes lag zwischen 12% und 18%. Zudem befanden sich feuchte Wurzelstücke und Grashalme im Sand.

Insgesamt wurden sechs zirkuläre Aperturen in einer Höhe von 2,4 m bis 4,4 m mit $\Delta z = 0,4$ m, einem Radius von ungefähr 7,7 m und einer Geschwindigkeit von 0,4 m/s aufgezeichnet. Die Trajektorie und die Position der Ziele in der xy -Ebene sind in Bild 5.20 dargestellt, eine detaillierte Übersicht über die Ziele in Bild 5.21. Die Eingrabetiefe z ist hierbei die gemessene Tiefe von der Sandoberfläche bis zur Mitte des Ziels.

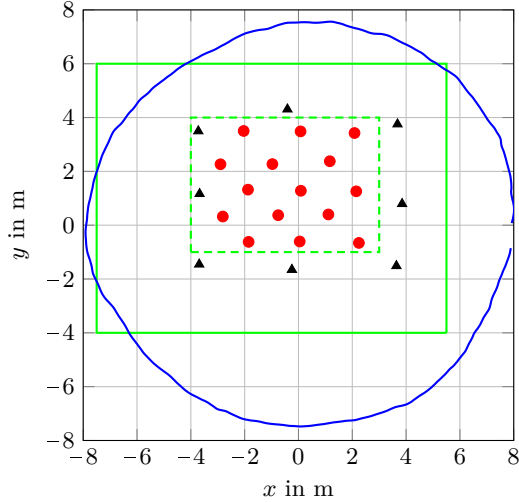


Abbildung 5.20: Geometrie des Messaufbaus. Als Ziele wurden verschiedene Sprengkörper vergraben (●) und mehrere Referenzreflektoren (▲) auf der Sandoberfläche platziert. (—) stellt eine der sechs kreisförmigen Baselines in der xy -Ebene dar. Der prozessierte Messbereich ist mit (—) und der Bereich, der mittels Histogrammen ausgewertet wird, mit (---) gekennzeichnet.

5.2.2 GPSAR-Messergebnisse

Die kohärente Überlagerung des GPSAR-Messergebnisses ist in Bild 5.22 für die horizontale Polarisierung in der Fokusebene $z_f = -30$ mm zu sehen. Der Holzrahmen des Sandkastens, der mit der Sandoberfläche einen starken Reflektor (Dihedral) bildet, ist im SAR-Bild deutlich zu erkennen. Der kreisförmige Streifen im oberen Teil des Bildes wird durch die erste Reflexion bei nahezu senkrechtem Einfall der elektromagnetischen Welle verursacht und begrenzt die nutzbare Fläche. Bei einem Ansatz mit senkrecht nach unten gerichtetem Radar muss diese starke Reflexion durch Signalprozessierung entfernt werden [64], [65], um oberflächennahe Ziele detektieren zu können. In dieser Fokusebene sind nur die Reflexionen von Zielen, die sich auf oder knapp unter der Erdoberfläche befinden, zu erkennen. Wider Erwarten sind die Ziele 2, 6, 9 und 15 nicht sichtbar.

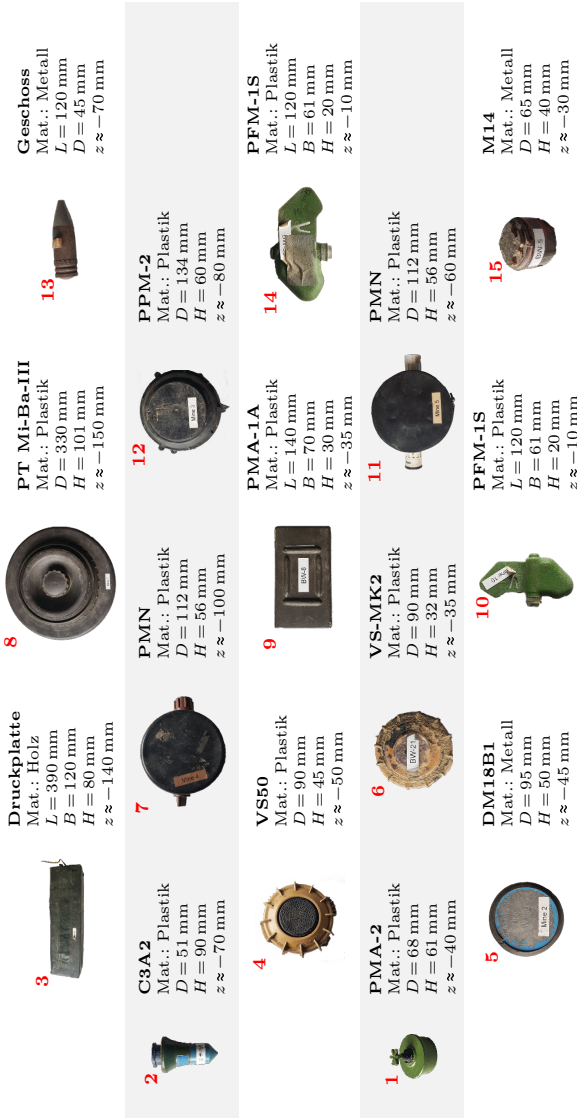


Abbildung 5.21: Überblick über die Ziele, deren Abmessungen [24] und die gemessene Eingrabbtiefen z von der Mitte des Objekts zur Sandoberfläche. Die Anordnung der Ziele entspricht dem Aufbau in Bild 5.19 [93].

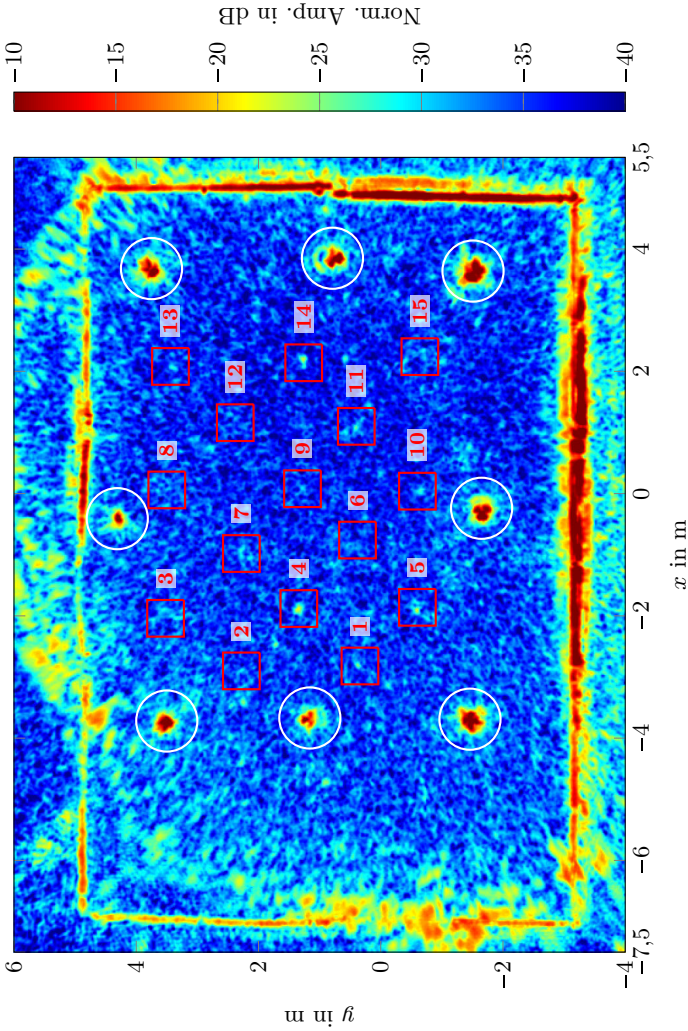


Abbildung 5.22: Kohärente Überlagerung der sechs CSAR-Bilder für die Fokusebene $z_f = -30$ mm (horizontale Polarisation). Die roten Quadrate mit der Kantenlänge von 60 cm entsprechen den Suchfenstern und kennzeichnen die Positionen der vergrabenen Ziele. Die weißen Kreise kennzeichnen die Positionen der Reflektoren auf der Erdoberfläche [93].

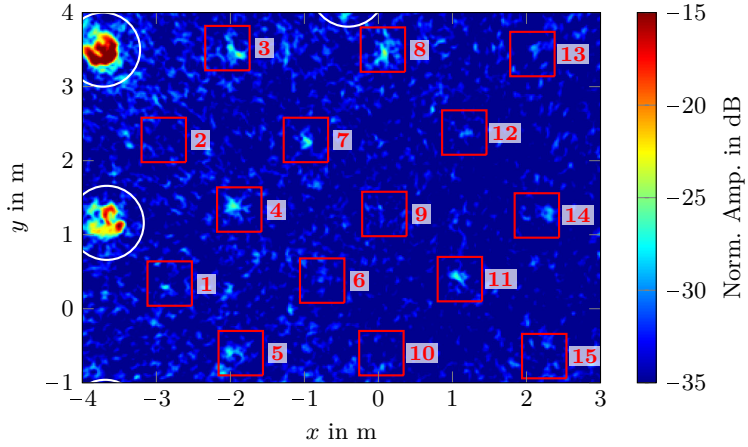
Beim Verschieben des Fokus auf die Ebene $z_f = -70$ mm (Bild 5.23 (a)) verblasen die oberflächennahen Ziele und tiefer vergrabene Ziele werden sichtbar. In der Fokusebene $z_f = -130$ mm (Bild 5.23 (b)) sind nur noch die beiden tief vergrabenen Ziele 3 und 8 zu erkennen. Die Energie wird, wie in Abschnitt 5.1.1 gezeigt, bei Defokussierung auf einem Ring aufgeteilt. Bei den schwachen Reflexionen der Minen werden diese Ringe bzw. Ringbögen vom Hintergrund überdeckt. Die zugehörigen Histogramme sind im Anhang A in den Bildern A.6 bis A.8 dargestellt, S. 135 f.

Aufgrund der Normierung auf die stärkste Reflexion, die sich in den beiden Polarisierungen um etwa 5 dB unterscheidet, weicht auch das BL um etwa 5 dB ab. Dies spielt für die folgende Auswertung jedoch keine Rolle, da das SBR zur Beurteilung der Ergebnisse herangezogen wird und der CFAR-Algorithmus sich adaptiv an den Rauschpegel anpasst.

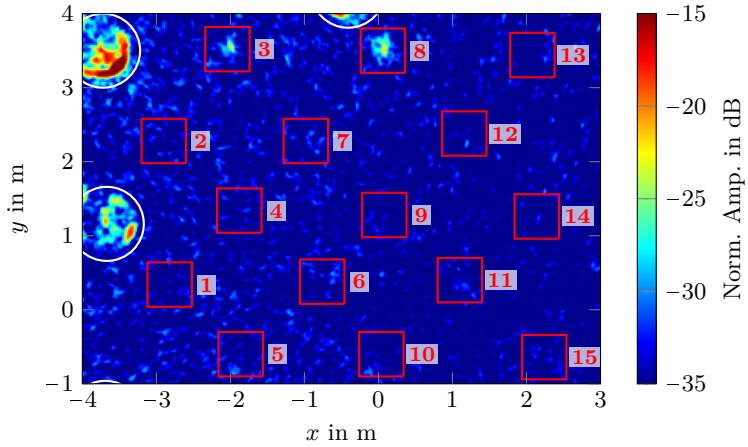
In Bild 5.24 sind die GPSAR-Bilder für alle 15 Ziele für die Fokusebene der maximalen Amplitude abgebildet. Die Abmessungen der einzelnen Bilder betragen $0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$. Die reale Zielposition befindet sich in der Bildmitte der Ausschnitte. Bis auf Ziel 6 sind in den übrigen Bildern mittig lokale Maxima zu erkennen. Die Abweichung zwischen der angegebenen Tiefe und der Fokusebene ist durch die Tatsache, dass es sich bei den Zielen um ausgedehnte Objekte handelt und deren Streuzentren unbekannt sind sowie durch die vernachlässigte Topographie, Messfehler und die Annahme eines konstanten ε_r zu begründen.

In Bild 5.25 sind die entsprechenden Bildausschnitte für die vertikale Polarisation abgebildet. Im Gegensatz zur horizontalen Polarisation ist im Ausschnitt von Ziel 6 ein lokales Maximum zu erkennen. Dieses befindet sich jedoch am oberen Bildrand, und zudem stimmt die Prozessierungstiefe nicht mit der Eingrabetiefe überein. Es handelt sich hierbei um Clutter, die Mine kann nicht detektiert werden. Zudem sind im Ausschnitt von Ziel 15 mehrere, etwa gleich starke Maxima zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Cluttersignale, die die Detektion der kleinen AP-Mine aus Plastik verhindern. Hervorzuheben ist, dass die beiden orthogonal orientierten AP-Minen vom Typ PFM-1S (Ziele 10 und 14) mit einer kreisförmigen Apertur in beiden Polarisierungen zu erkennen sind. Dieser Minentyp ist aufgrund seiner Geometrie mit einer linearen Apertur nur in einer bestimmten Polarisation und Ausrichtung zu erkennen [130], [131].

In Bild 5.26 wird das SBR für vier Ziele und jeweils für beide Polarisierungen dargestellt. Dabei handelt es sich um ein tief vergrabenes (Ziel 3), ein



(a) $z_f = -70$ mm.



(b) $z_f = -130$ mm.

Abbildung 5.23: Multi-Baseline-GPSAR-Bild für die Fokusebene $z_f = -70$ mm bzw. $z_f = -130$ mm und die horizontale Polarisation. Die roten Quadrate entsprechen den Suchfenstern und kennzeichnen die Positionen der vergrabenen Ziele [93].

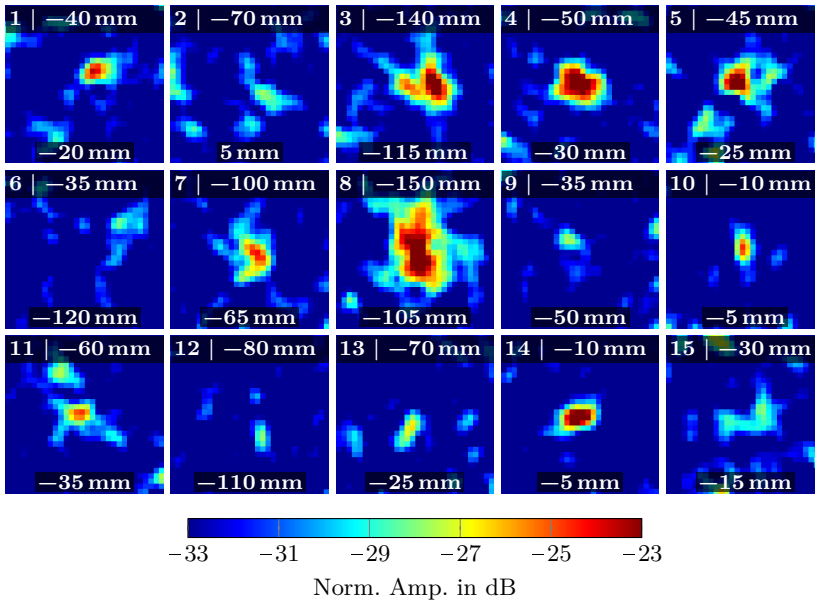


Abbildung 5.24: GPSAR-Bildausschnitte der 15 Ziele für die horizontale Polarisation und jeweils die Fokusebene, in der das Signal die maximale Amplitude aufweist. Die Zielnummer sowie die gemessene Tiefe von der Sandoberfläche bis zur Mitte des Ziels sind oben und die Fokusebene des Bildausschnitts ist unten im jeweiligen Bild angegeben. Die Abmessungen der Bilder betragen 0,6 m × 0,6 m. Die Positionen der Bildausschnitte sind durch die roten Quadrate in Bild 5.22 gekennzeichnet.

oberflächennahes Ziel (Ziel 4), ein Ziel, das nur in einer Polarisation sichtbar ist (Ziel 12) und ein Ziel, das nur leicht mit Sand bedeckt war (Ziel 14). Die Tiefe der vier Ziele kann anhand des Kurvenverlaufs sehr genau bestimmt werden, unabhängig davon, ob sich das Ziel gerade im Übergangsbereich von Luft zu Boden (Ziel 14) oder nur wenige Millimeter unter der Oberfläche (Ziel 4) befindet oder ob es mehrere Zentimeter tief vergraben ist (Ziele 3 und 12). Die Abweichung zwischen gemessener Tiefe und Fokusebene, wie oben bereits erläutert, ist durch die Topographie, die Position der Streuzentren der ausge-

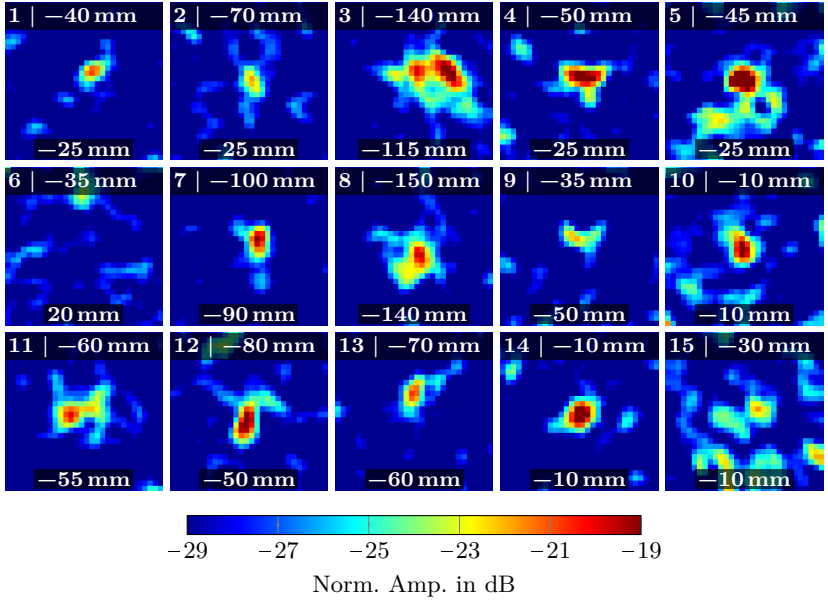


Abbildung 5.25: GPSAR-Bildausschnitte der 15 Ziele für die vertikale Polarisation und jeweils die Fokusebene, in der das Signal die maximale Amplitude aufweist. Die Zielnummer sowie die gemessene Tiefe von der Sandoberfläche bis zur Mitte des Ziels sind oben und die Fokusebene des Bildausschnitts ist unten im jeweiligen Bild angegeben. Die Abmessungen der Bilder betragen $0,6\text{ m} \times 0,6\text{ m}$. Die Positionen der Bildausschnitte sind durch die roten Quadrate in Bild 5.22 gekennzeichnet [93].

dehnten Objekte relativ zu deren Mitte, durch Messfehler und eine Abweichung vom tatsächlichen ε_r zu begründen. Auffällig ist, dass Ziel 12 in der horizontalen Polarisation ein sehr geringes SBR aufweist und kein eindeutiges Maximum, wie in der vertikalen Polarisation zu erkennen ist. Für die anderen drei Ziele liegt die Abweichung zwischen vertikaler und horizontaler Polarisation im Bereich von $\pm 3\text{ dB}$. Dieses Verhalten hängt vermutlich mit der Geometrie des Objektes zusammen und zeigt, dass beide Polarisationen benötigt werden.

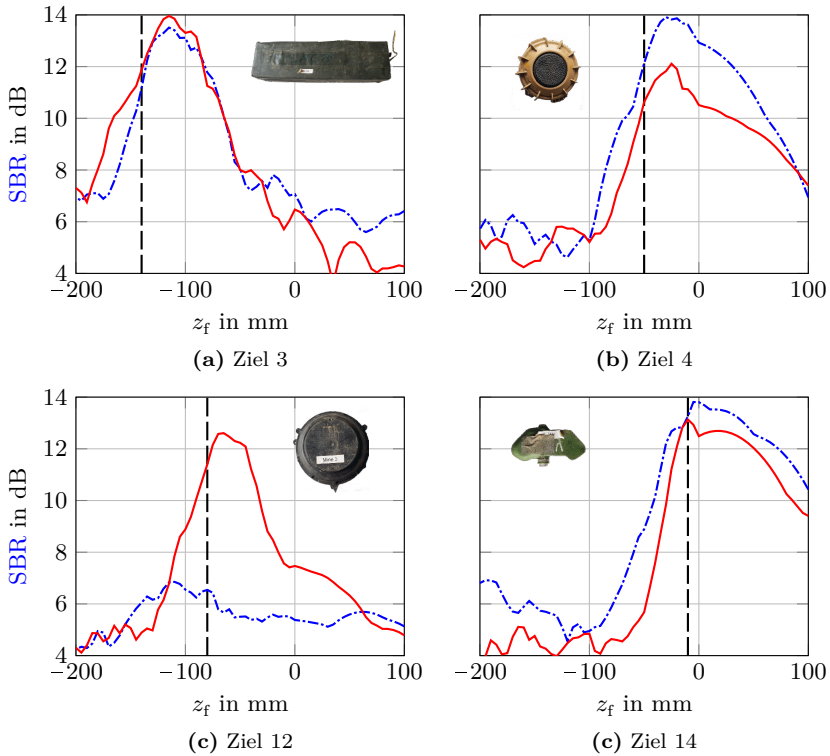


Abbildung 5.26: SBR für (a) die Druckplatte aus Holz ($z \approx -140$ mm), (b) die AP-Mine VS50 ($z \approx -50$ mm), (c) die AP-Mine PPM-2 ($z \approx -80$ mm) und (d) die AP-Mine PFM-1S ($z \approx -10$ mm) für die horizontale (---) und vertikale (—) Polarisation. Die gemessene Tiefe vom Zentrum des Ziels zur Sandoberfläche ist mit (—) gekennzeichnet.

5.2.3 Detektionsergebnis

In den Bild 5.27 sind die 3D-Detektionsergebnisse für beide Polarisierungen und unterschiedliche Schwellenwertfaktoren dargestellt. In einem zusätzlichen Post-

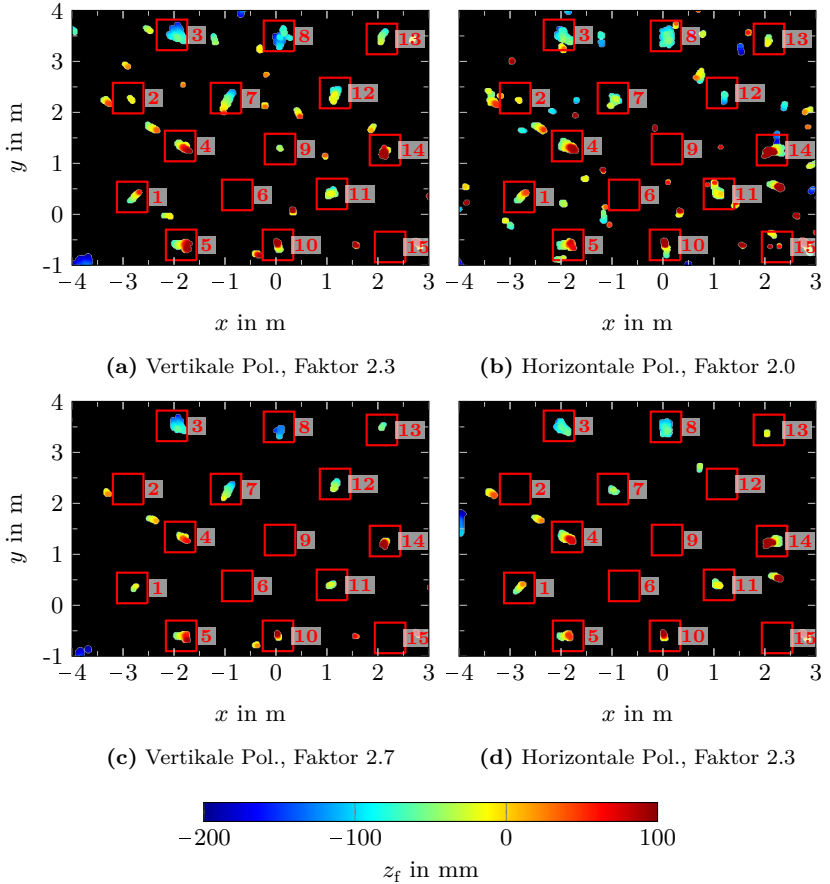


Abbildung 5.27: Detektierte Sprengkörper für beide Polarisationen und unterschiedliche Schwellenwertfaktoren. Die roten Quadrate kennzeichnen die Zielpositionen (CFAR-Detektor: Test Cells 3×3 Pixel, Guard Cells 21×21 Pixel, Reference Cells 41×41 Pixel).

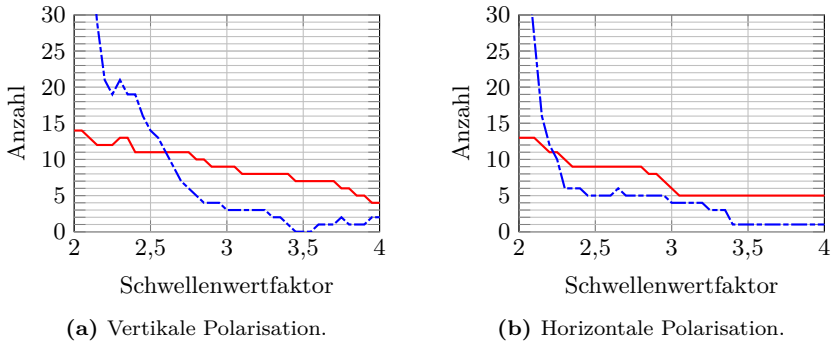


Abbildung 5.28: Anzahl an Falschalarmen (---) und Zieldetektionen (—) über dem Schwellenwertfaktor.

processing-Schritt werden die Detektionen als 3D-Volumen interpretiert und große Objekte (defokussierte Reflektoren und der Holzrahmen der Sandkiste) sowie sehr kleine Objekte (Rauschpeaks, die im Gegensatz zur Mine nur eine geringe Ausdehnung haben) in Anlehnung an [132] entfernt, wodurch die Falschalarmrate reduziert wird.

Anhand der Farbkodierung sind die tiefer eingegrabenen Ziele 3 und 8 deutlich von den oberflächennahen Zielen, z. B. Ziele 10 und 14, zu unterscheiden. Zudem ist zu erkennen, dass die Zielposition über der Fokusebene wie bei einer linearen Apertur in eine bestimmte Richtung verschoben wird. Die Richtung der Verschiebung gibt an, aus welchem Winkelbereich der zirkularen Apertur die stärkste Reflexion des Ziels empfangen wurde. Beispielsweise ist Ziel 7 aus dem Bereich, der sich im Nordosten des GPSAR-Bildes befindet (Kreisbogen von $(x, y) = (4 \text{ m}, 6 \text{ m})$ bis $(0 \text{ m}, 7 \text{ m})$), am besten zu detektieren.

Die Anzahl an Falschalarmen und richtig detektierten Zielen variiert mit dem Skalierungsfaktor, wie in Bild 5.28 dargestellt. Hierfür wurden alle Detektionen außerhalb der roten Rechtecke als Falschalarm und pro Rechteck maximal eine Zieldetektion gezählt. Ob es sich bei dem Ziel tatsächlich um die Reflexion einer Mine oder um Bodenclutter handelt, wird nicht bewertet und ist in dieser Darstellung nicht zu erkennen. Die Zahl der Falschalarme und der Zieldetektionen sinkt mit dem Schwellenwertfaktor, das Optimum, d. h. die Detektion aller 15

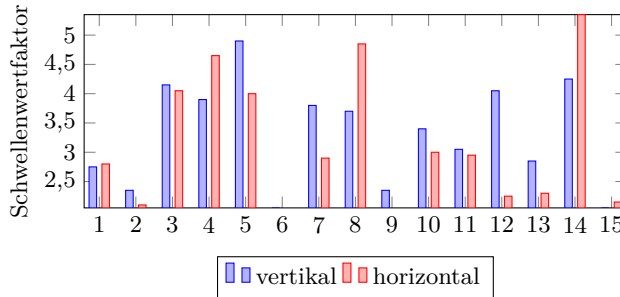


Abbildung 5.29: Schwellenwertfaktor bis zu dem die einzelnen Ziele detektierbar sind.

Ziele bei keinem Falschalarm, wird nicht erreicht. In Bild 5.29 wird gezeigt, bis zu welchem Schwellenwert die einzelnen Ziele detektiert wurden. Die Höhe des Bargraphs gibt eine Auskunft darüber, wie gut die Ziele im Vergleich zueinander detektierbar sind. Die Ziele 2, 6, 9, und 15 sind kaum bzw. gar nicht zu detektieren. Ziel 12 ist, wie bereits in Bild 5.26 (d) zu erkennen, hauptsächlich in der vertikalen Polarisation sichtbar, Ziel 14 im Gegensatz dazu ist deutlich besser mit der horizontalen Polarisation zu erkennen, wodurch die These untermauert wird, dass auch bei CSAR beide Polarisationen benötigt werden. Eine Variation der Abmessungen des CFAR-Fensters führt zu dem selben Ergebnis, dass es keine Parametrierung gibt, mit der alle Ziele detektiert werden können.

Aufgrund des Clutters ist mit diesem einfachen Detektionsansatz für eine sichere Detektion aller Ziele eine hohe Falschalarmrate in Kauf zu nehmen. Diese kann durch eine nachfolgende Klassifikation der Reflexion beispielsweise anhand von Form, Abmessung, Leistungsverteilung oder Tiefenprofil und/oder ein weiteres Sensorprinzip reduziert werden. Eine statistische Aussage in Form von Detektionsrate und Falschalarmrate ist aufgrund der begrenzten Anzahl an Messdaten und der großen Diversität der verwendeten Ziele nicht möglich.

5.3 Detektion von Improvised Explosive Devices (IEDs)

In diesem Abschnitt wird die Detektion verschiedener IEDs untersucht. Die Sprengkörper können aus den unterschiedlichsten (Alltags-) Gegenständen bestehen [6]. Teilweise werden die Sprengkörper in einer Art Serienproduktion gebaut, jedoch können die Formen, Abmessungen und Materialien stark variieren. IEDs bestehen typischerweise aus einem Auslöser (Druckplatte, Stolperdraht, Handy, Funkgerät, Bewegungsmelder, Wäscheklammer mit metallisierten Innenseiten, Wecker usw.), einem Behälter, in dem sich der Sprengstoff befindet und einer elektrischen Verbindung zwischen Auslöser und Sprengstoff [7]. Als Behälter werden beispielsweise Metallrohre oder Plastikkanister verwendet. Wie auch bei den Landminen ist allein die Varianz der IEDs enorm und die Detektion aller Sprengkörper eine große technische Herausforderung. Ziel der nachfolgenden Untersuchung war die Detektion von verschiedenen Komponenten, aus denen ein IED bestehen kann.

Das Radar wurde mit einer $CRF=180$ Hz bei einer Geschwindigkeit von $v=0,4$ m/s betrieben. Ausgewertet werden die Daten von acht zirkularen Aperturen mit einem Radius von 7,1 m in den Höhen von 2,5 m bis 4,25 m mit $\Delta z=25$ cm. Die GPSAR-Bilder wurden nach der kohärenten Überlagerung, wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert, weich gezeichnet.

5.3.1 Messaufbau

Ein Foto vom Messaufbau mit improvisierten Zielen ist in Bild 5.30 gezeigt. Alle Ziele wurden vergraben, die genauen Positionen und Tiefen waren unbekannt, da es sich bei dieser Messung um einen Blindtest handelte.

Der Messaufbau besteht aus einem bis zur Hälfte mit Dünger gefüllten 5l-Plastikkanister (Ziel 1), der mittels metallischen Draht (Ziel 2) mit einem Smartphone als Fernauslöser (Ziel 3) verbunden ist. Dabei wurde der Draht lose verlegt, sodass sich im Bereich der Markierung (2) mehrere Schlingen gebildet hatten. Die Ziele 3 bis 6 sind für die nachfolgende Auswertung im Zusammenhang mit IEDs von geringem Interesse. Hierbei handelt es sich um eine leere Plastikdose (Ziel 3), eine mit Bienenwachs gefüllte Plastikdose mit einer kleinen Metallschraube als Zünder-Attrappe (Ziel 5) und eine mit Bienenwachs gefüllte Plastikdose, die in Alufolie eingewickelt wurde (Ziel 6). Als Füllung wurde Bienenwachs gewählt, da die dielektrische Konstante $\epsilon_r=2,35$ nahe bei



Abbildung 5.30: Foto des Messaufbaus, bevor die Ziele vergraben wurden.

derjenigen von TNT $\varepsilon_r=2,86$ liegt [5]. Ziel 7 ist eine improvisierte Druckplatte aus Holz mit zwei Kontaktflächen aus Aluminiumfolie, eine Zweidrahtleitung (Ziel 8) zur Verbindung des Sprengkörpers, bei dem es sich um einen Metallzylinder (Ziel 9) im Plastikgehäuse gefüllt mit Bienenwachs handelt. Ziel 10 ist eine Metallplatte und Ziel 11 besteht aus zwei mal drei Blechdosendeckeln mit einem Durchmesser von 5 cm, die zur Untersuchung der Auflösung in der xy -Ebene bei einer zirkularen Apertur vergraben wurden. In Bild 5.31 ist die Position der Ziele im Koordinatensystem des UAS dargestellt.

5.3.2 GPSAR-Messergebnisse

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Reflexionen der beiden vergrabenen Drähte und der Blechdosendeckel im Detail betrachtet. Bild 5.32 zeigt die Zweidrahtleitung (Ziel 8), die sich zwischen der Druckplatte (Ziel 7) und dem Sprengkörper-Dummy (Ziel 9) befindet. Im Gegensatz zu den in Luft gespannten Drähten in Abschnitt 4.2 ist die Stärke der Reflexion des vergrabenen Drahtes geringer. Durch eine Variation der Fokusebene wird deutlich, dass der Draht bei horizontaler Polarisation in zwei Kreisabschnitten detektiert werden kann.

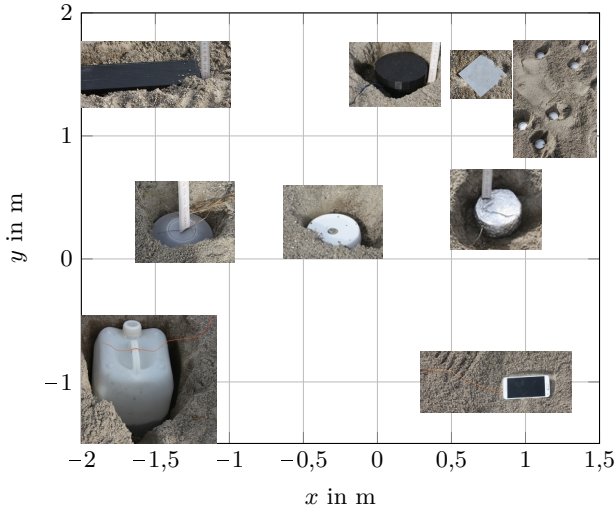


Abbildung 5.31: Position der Ziele im Koordinatensystem des UAS.

Dabei handelt es sich um die zwei Abschnitte, in denen sich das UAS nahezu parallel zum Draht bewegt und der Einfallswinkel θ etwa 90° beträgt. Aufgrund der schwachen Reflexion des vergrabenen Drahts ist in der Phase keine Signatur zu erkennen, wodurch der Draht mit dem in Abschnitt 4.2.4 vorgestellten Algorithmus nicht zu detektieren ist.

Bild 5.33 zeigt den Ausschnitt der GPSAR-Bilder für den Draht (Ziel 2) zwischen Plastikkanister und Smartphone. Aufgrund der Drahtschlingen kommt es im Bereich um $(x, y) = (-0,4 \text{ m}, -0,9 \text{ m})$ zu starken Reflexionen sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Polarisation. Im Bereich links davon ist, wie bereits in Bild 5.32, die Reflexion nur in der horizontalen Polarisation zu erkennen.

5.3.3 Detektionsergebnis

In den Bildern 5.34(a) und 5.34(b) sind die detektierten Ziele für beide Polarisationen zu sehen. Im Randbereich der Bildausschnitte sind die defokus-

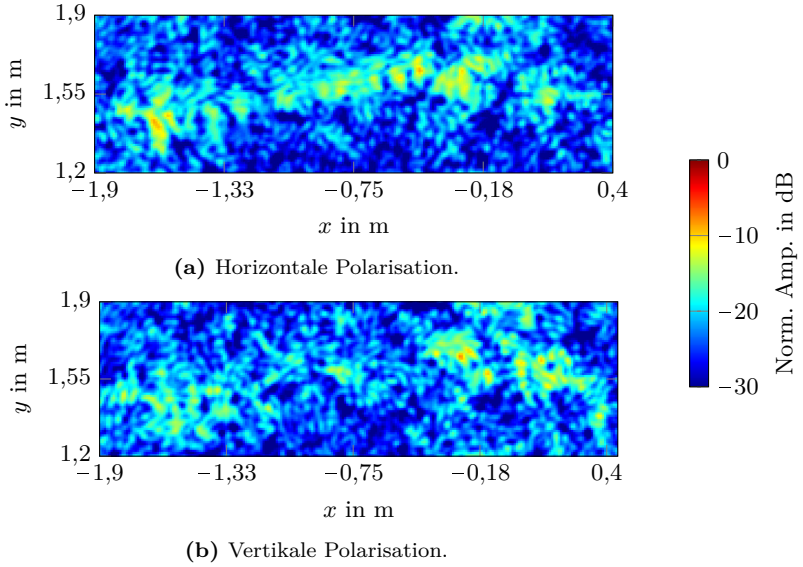


Abbildung 5.32: GPSAR-Bild der Zweidrahtleitung (Ziel 8) für die Fokusebene $z_f = -30$ mm und die (a) horizontale und (b) vertikale Polarisierung.

sierten Reflexionen von Reflektoren, die um das Messfeld angebracht wurden, und Clutter zu erkennen. Bis auf die mit Bienenwachs gefüllte Dose (Ziel 5) können alle Ziele detektiert werden. In beiden Polarisierungen ist ein ausgeprägter Falschalarm an der Position $(x, y) = (-0,34 \text{ m}, 0,84 \text{ m})$ zu erkennen. Hierbei handelt es sich um die Reflexion eines eckigen Steins (Bruchstein mit den Abmessungen $7 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$). Da der Detektionsalgorithmus nur die Amplitude auswertet, wird dieser Stein fälschlicherweise als Ziel erkannt. In der horizontalen Polarisierung ist ein und in der vertikalen Polarisierung sind drei Falschalarme zu erkennen. Im Gegensatz zur vertikalen Polarisierung kann mit der horizontalen Polarisierung die Zweidrahtleitung (Ziel 8) detektiert werden. Aufgrund der Schlingen wird der Draht (Ziel 2) in beiden Polarisierungen detektiert.

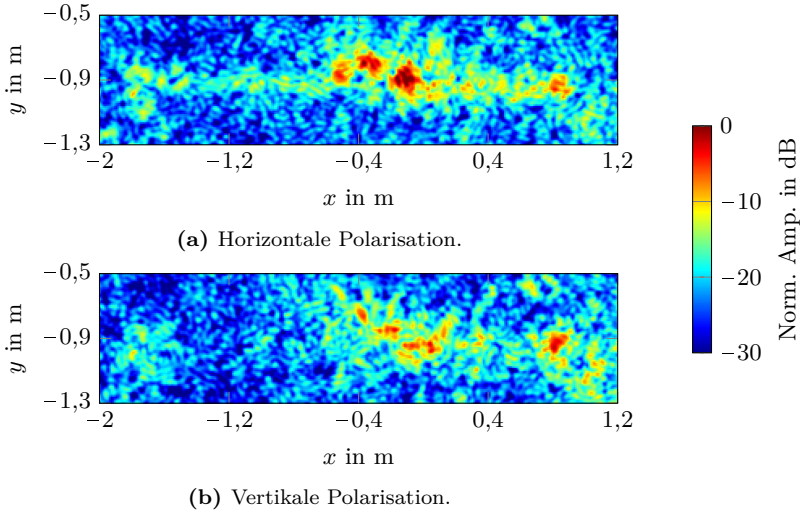
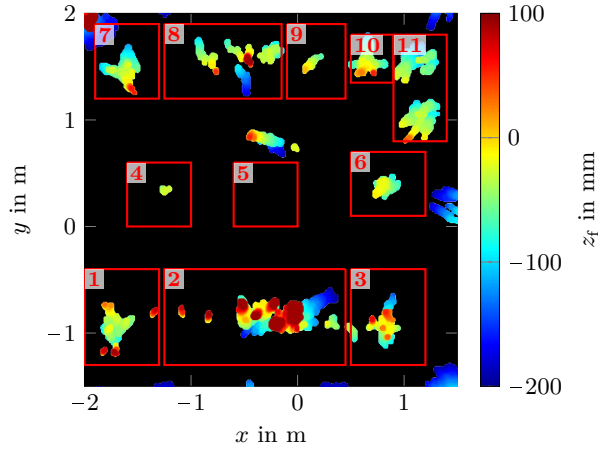


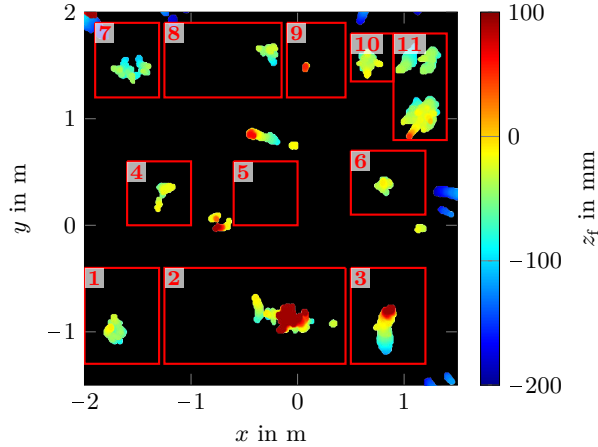
Abbildung 5.33: GPSAR-Bild des Drahts (Ziel 2) für die Fokusebene $z_f = -30$ mm und (a) die horizontale und (b) vertikale Polarisation.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Leistungssteigerung durch Circular Multi-Baseline GPSAR aufgezeigt. Es konnte gezeigt werden, dass mit einer zirkularen Apertur eine höhere Auflösung in alle drei Raumrichtungen erzielt werden kann. Zudem erhöht sich die Detektionswahrscheinlichkeit willkürlich orientierter Objekte, da diese aus allen Richtungen beleuchtet und die Information somit in Abhängigkeit vom Winkel untersucht werden kann. Darüber hinaus kann durch eine Multi-Baseline-Auswertung das SBR vergrößert und damit die Detektionswahrscheinlichkeit erhöht und gleichzeitig die Falschalarmrate reduziert werden. Mittels Messungen wurde die Detektion vergrabener Sprengkörper am Beispiel von verschiedenen Landminen und IEDs erfolgreich demonstriert. Hierzu wurden in einem ersten Messaufbau 15 Landminen-Dummys in einem Sandkasten vergraben. Unabhängig davon, ob sich die Ziele an oder knapp unter der Oberfläche befinden oder gar mehrere Zentimeter tief eingegraben sind,



(a) Horizontalen Polarisierung, Schwellenwertfaktor 2,3.



(b) Vertikale Polarisierung, Schwellenwertfaktor 2,4.

Abbildung 5.34: Detektierte Sprengkörper. Die roten Rechtecke kennzeichnen die Zielpositionen (CFAR-Detektor: Test Cells 3×3 Pixel, Guard Cells 41×41 Pixel, Reference Cells 61×61 Pixel).

konnten fast alle Minen detektiert werden. Dabei ist vor allem die Detektion der Objekte, die sich nur knapp unter der Oberfläche befinden, hervorzuheben, da die Reflexion dieser Ziele bei einem nach unten gerichteten Radar von der starken Bodenreflexion überdeckt wären. Mit einem zweiten Messaufbau konnte die Detektion von IEDs bzw. derer Bestandteile nachgewiesen werden. Unter anderem wurden ein vergrabenes Smartphone, das beispielsweise als Fernauslöser verwendet werden könnte, ein mit Dünger gefüllter Plastikkanister sowie vergrabene Drähte detektiert. Mit diesen Messergebnissen konnte der Systemansatz verifiziert und der Stand der Technik im Bereich der technischen Hilfsmittel für die humanitäre Minenräumung verbessert werden.

6 Zusammenfassung

Noch immer ist die humanitäre Landminenräumung eine langsame, teure, technologiearme, arbeitsintensive und gefährliche Tätigkeit, die zum größten Teil manuell erfolgt. Aufgrund der Komplexität, die sich aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Sprengkörper wie Größe, Form und Material, den Umweltbedingungen und den örtlichen Gegebenheiten wie Vegetation oder Erdbeschaffenheit ergibt, sind die Anforderungen an ein technisches Hilfsmittel, das so zuverlässig arbeitet wie ein geschulter Minenräumer, enorm.

Als Sensor, der aus sicherer Entfernung von einer fliegenden Plattform aus Sprengkörper und deren Auslösemechanismus erkennen kann, wurde in dieser Arbeit die Verarbeitungskette für ein UAS-gestütztes GPSAR systematisch entwickelt und dessen Eignung zur Detektion von vergrabenen Landminen und IEDs erforscht. Der große Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, wertvolle Informationen gefahrlos und schnell zu sammeln und zu analysieren, bevor ein Mensch das potentiell minenverseuchte Gebiet betreten muss.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen zu den drei Radartechniken FMCW, SAR und GPR vorgestellt, deren Kombination in einem fliegenden Messsystem den wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit darstellt und den Stand der Technik im Bereich der humanitären Minenräumung neu definiert.

Das gemeinsam mit der ETH Zürich und TH Ulm entwickelte Messsystem wird in Kapitel 3 beschrieben. Der eingesetzte Multicopter kann beliebige lineare und zirkuläre Trajektorien automatisch abfliegen. Die Position des Multicopters wird durch ein RTK GNSS und ein Tachymeter hochgenau erfasst und mit den Rotationsdaten einer IMU fusioniert, um auf die 3D-Positionen der Phasenzentren der Radarantennen zu schließen. Das FMCW-Radar stellt das Zwischenfrequenzsignal zur Verfügung und wurde in dieser Arbeit im Frequenzbereich von 1 GHz bis 4 GHz betrieben. Bevor ein Backprojection-Algorithmus die Positions- und Radardaten verarbeitet, werden die Auswirkungen eines systemeigenen Störers und die entfernungsabhängige Freiraumdämpfung kompensiert. Der implementierte Backprojection-Algorithmus projiziert die Radarda-

ten auf ein horizontales 2D-Grid, das durch die x - und y -Achse aufgespannt wird. Durch wiederholtes Prozessieren der Daten für unterschiedliche Tiefen z_f wird mit diesem Algorithmus ein 3D-Radarbild (x, y, z_f) erzeugt. Es werden zwei Verfahren zur Beurteilung der Messergebnisse vorgestellt: SAR-Bilder werden in Form von Histogrammen den Signalpegeln der Ziele gegenübergestellt und ein 2D-CA-CFAR-Algorithmus wird auf jede Fokusebene z_f der 3D-Radarbilder angewandt und dreidimensional interpretiert.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit dem Kernziel der Demonstration der Leistungsfähigkeit des UAS-basierten SAR. Zunächst wird das SAR bei einer linearen Bewegung charakterisiert. Hierbei konnte messtechnisch eine Trennfähigkeit von 8 cm in Cross-Range und 12 cm in Ground-Range nachgewiesen werden. Anschließend wird ein Verfahren zur Bestimmung der Referenzebene ($z=0$) vorgestellt, das die Lage der Grenzschicht zwischen Luft und Erde definiert. Hierzu werden mehrere SAR-Bilder aus unterschiedlichen Flughöhen für unterschiedliche Fokusebenen prozessiert und kohärent überlagert. Durch die Bestimmung der maximalen Amplitude von Referenzzielen kann deren 3D-Position hochgenau bestimmt und damit die Lage der Referenzebene festgelegt werden.

Als Anwendung des SAR wird in diesem Kapitel das Kernziel Detektion von metallischen Stolperdrähten in Abhängigkeit des Einfallswinkels, der Drahtlänge und der Vegetation messtechnisch untersucht. Bis zu einem Winkel von $\pm 40^\circ$ in Bezug zur linearen Flugbahn können die Stolperdrähte mit dem System detektiert werden. Für die Detektion beliebig orientierter Drähte werden drei lineare Aperturen (z. B. 0° , 80° und 160°) benötigt. Ab einer Länge von etwa 0,5 m ist die Reflexion der Drähte im SAR-Bild sichtbar und ab einer Länge von zwischen 0,5 m und 1 m kann von der Form der Reflexion auf einen Draht geschlossen werden. Durch Vegetation steigt der Clutteranteil im SAR-Bild, die Detektion mit einer einfachen Schwellenwertfilterung oder Kantendetektion ist nicht möglich. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Algorithmus zur Detektion von Stolperdrähten in SAR-Bildern entwickelt. Hierzu wird eine modifizierte Radon-Transformation eingesetzt, die sich auf die Phaseninformation der SAR-Bilder stützt. Anstatt die Absolutwerte entlang einer Geraden zu integrieren, werden die komplexwertigen Daten im Frequenzbereich analysiert, indem die Amplitude des lokalen Maximums innerhalb eines vordefinierten Frequenzbereichs extrahiert und in das transformierte Bild eingetragen wird. Durch eine

Kantendetektion und anschließende Maximumsuche im transformierten Bild können die Geradenparameter extrahiert und die Drahtlänge mit einer **STFT** bestimmt werden. Mit dem **UAS**-gestützten **GPSAR** lassen sich somit von Vegetation verdeckte Drähte automatisch, zuverlässig und schnell erkennen, was die Vorteile des Systemansatzes im Vergleich zur manuellen Stolperdrahtsuche oder einem Ansatz mit optischen Kameras verdeutlicht.

In Kapitel 5 werden die Kernziele diskutiert: die Ausnutzung der Flexibilität des Systems zur Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit und zur Reduktion von Clutter sowie die Detektion von vergrabenen Landminen und **IEDs**. Zunächst werden Single- und Multi-Baseline-**LSAR** und -**CSAR** anhand von Messungen mit vergrabenen Reflektoren und Blechdosen miteinander verglichen und anschließend wird die Leistungssteigerung durch zirkuläre Aperturen in Bezug auf die Auflösung demonstriert. Es zeigt sich, dass durch die kohärente Multi-Baseline-Auswertung das Clutterlevel und damit die Anzahl an Falschzielen reduziert und zugleich die Detektionswahrscheinlichkeit erhöht werden kann. Da die Ziele beliebig orientiert sind und die Reflexion vom Betrachtungswinkel abhängt, eignet sich eine zirkuläre Apertur zur Detektion von vergrabenen Sprengkörpern besser als eine lineare. Anschließend wird die **UAS**-gestützte Detektion und zentimetergenaue Lokalisierung von vergrabenen Landminen und **IEDs** demonstriert. Unabhängig davon, ob sich die Ziele direkt an der Oberfläche, knapp darunter oder mehrere Zentimeter tief befinden, können sie mit einem 2D-**CA-CFAR**-Algorithmus detektiert werden. Diese ersten vielversprechenden Messergebnisse verifizieren den Systemansatz, dokumentieren den technischen Fortschritt und zeigen den Nutzen dieses Systems für die humanitäre Minenräumung.

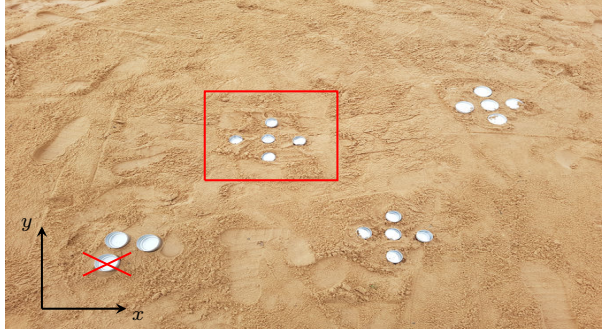
Anhang A Weitere Simulations- und Messergebnisse

In diesem Kapitel sind ergänzende Simulations- und Messergebnisse festgehalten.

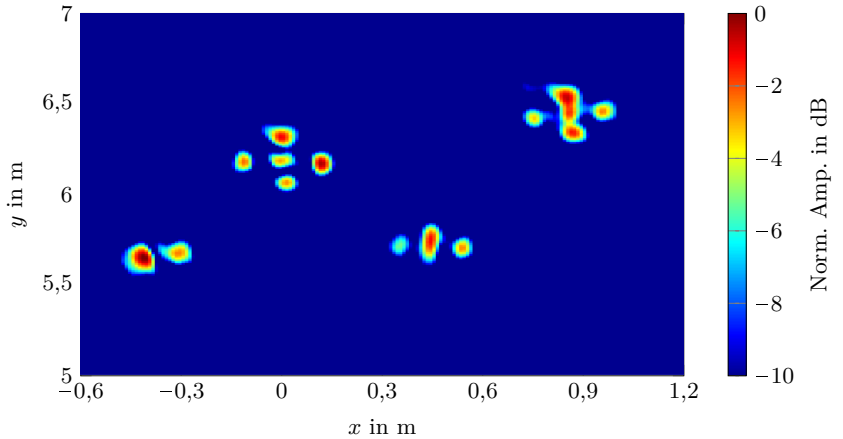
A.1 Trennfähigkeit in der xy -Ebene

In Bild [A.1](#) ist ein Foto des Messaufbaus und das normierte Multi-Baseline-[LSAR](#)-Bild zur Bestimmung der Trennfähigkeit in Cross- und Ground-Range dargestellt. Hierzu wurden mehrere Dosen auf einer Sandfläche platziert. In Cross-Range (x -Richtung) können alle Dosen bei diesem Aufbau getrennt werden. In Ground-Range beträgt die Trennfähigkeit etwa 120 mm.

In Bild [A.2](#) ist ein Multi-Baseline [LSAR](#) und ein Schnitt durch das Bild in x -Richtung zur Untersuchung der Trennfähigkeit in Cross-Range (y -Richtung) dargestellt. Die Trennfähigkeit in Cross-Range beträgt in diesem Beispiel etwa 8 cm.

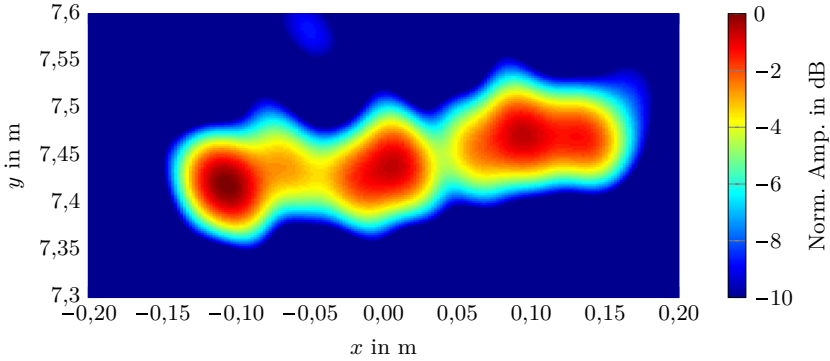


(a) Foto des Messaufbaus bestehend aus offenen Blechdosen.

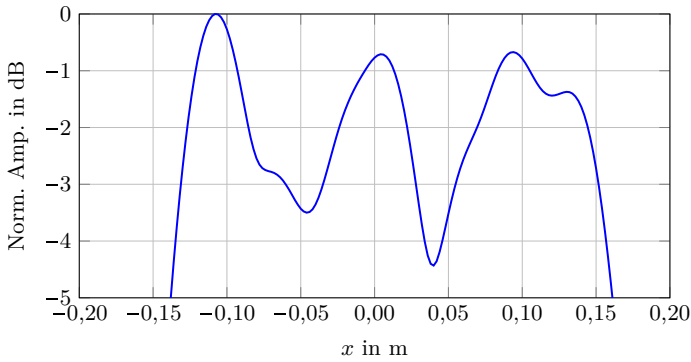


(b) LSAR-Bild.

Abbildung A.1: Untersuchung der Trennfähigkeit in der xy -Ebene. Der Abstand der Dosen im roten Rechteck beträgt $\Delta x = \Delta y = 120$ mm, für alle anderen gilt $\Delta x = \Delta y = 100$ mm (horizontale Polarisation, CRF=100 Hz, $v=0,4$ m/s).



(a) LSAR-Bild.



(b) Schnitt durch die Maxima (x -Richtung).

Abbildung A.2: Untersuchung der Trennfähigkeit in Cross-Range anhand von vier Blechdosen mit einem Durchmesser von 50 cm, die im Abstand von $\Delta x=9$ cm, 8 cm und 7 cm von links nach rechts platziert wurden (horizontale Polarisation, CRF=100 Hz, $v=0,4$ m/s).

A.2 Vergleich von LSAR und CSAR

In Bild A.3 ist das Ergebnis für eine quadratische Apertur, die aus vier linearen Aperturen zusammengesetzt ist, dargestellt.

In Bild A.4 ist die Reflexion eines Reflektors, der über einen Winkelbereich von 360° in der Horizontalen sichtbar ist, für mehrere Fokusebenen und beide Aperturen (LSAR und CSAR) dargestellt.

In Bild A.5 sind die simulierten Tiefenprofile zur Bestimmung der 3 dB-Auflösung in z -Richtung für Multi-Baseline-GPSAR dargestellt.

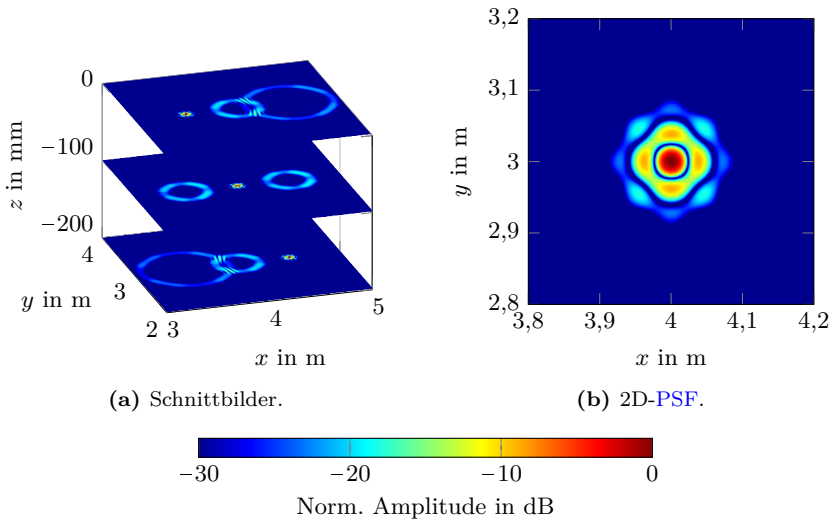


Abbildung A.3: Simulationsergebnis für eine synthetische Apertur bestehend aus vier linearen Trajektorien (quadratische Anordnung) als Näherung einer zirkulären Apertur (a) Schnittbilder für drei Ziele in den drei Prozessierungstiefen $z_f = \{0 \text{ mm}, -100 \text{ mm}, -200 \text{ mm}\}$ und (b) PSF für ein vergrabenes Ziel ($z = -100 \text{ mm}$) in der Fokusebene $z_f = -100 \text{ mm}$ ($\epsilon_r = 5$).

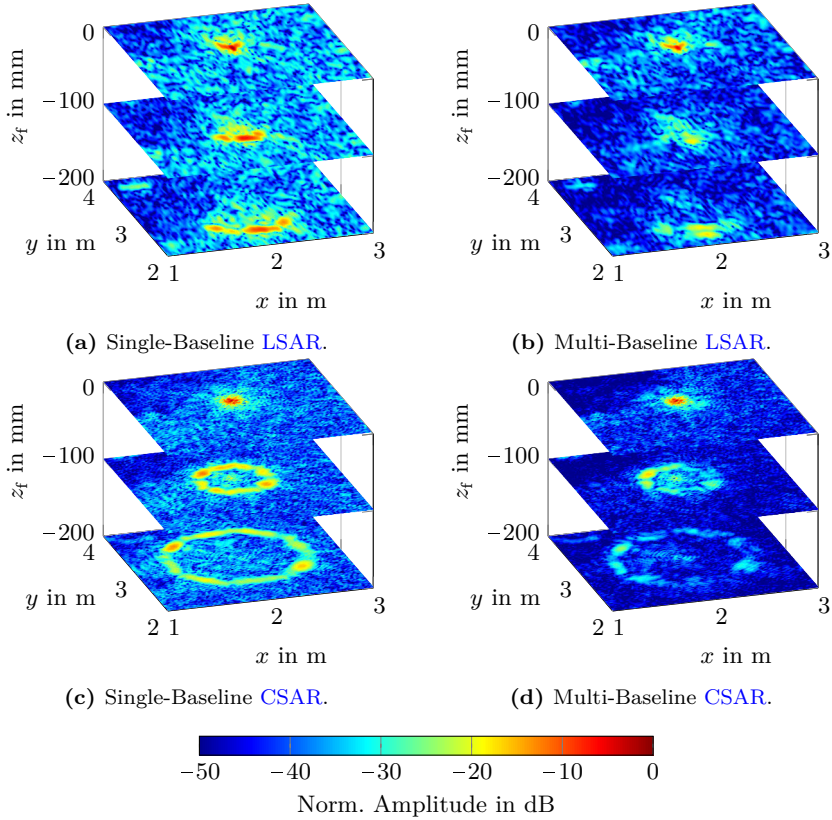


Abbildung A.4: 3D-SAR-Bilder des 360°-Reflektors (●) (Ziel 16). Bei der linearen Apertur ist die verzerrte Hyperbel und bei der zirkularen Apertur der Kreis, auf dem die Energie verteilt wird, deutlich zu erkennen.

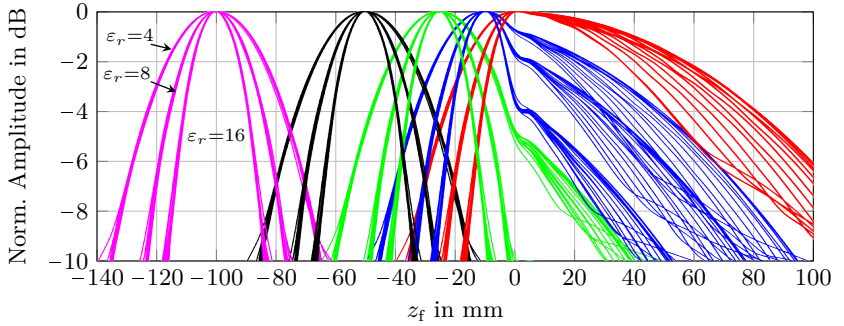


Abbildung A.5: Multi-Baseline-GPSAR-Auflösung (Radius $r=7,1$ m um den Mittelpunkt $(0,0)$ für acht Flughöhen von $z=2,5$ m bis $4,25$ m mit $\Delta z=0,25$ m) für 15 Ziele, die im Abstand von 50 cm radial verteilt sind, bei Variation der Eingrabbtiefe und Permittivität ($\epsilon_r=4, 8, 16$ und $z_{\text{Ziel}}=0, -10$ mm, -25 mm, -50 mm, -100 mm).

A.3 Detektion von Landminen – Histogramme

Die Bilder A.6 bis A.8 zeigen die Histogramme zu den GPSAR-Bildern 5.22 und 5.23 auf Seite 108 und 110. Aufgrund der Normierung auf das globale Maximum unterscheiden sich die Signal- und Rauschpegel zwischen der horizontalen und vertikalen Polarisation um etwa 4 dB. Dieser Unterschied ist für die nachfolgende Auswertung der Daten irrelevant.

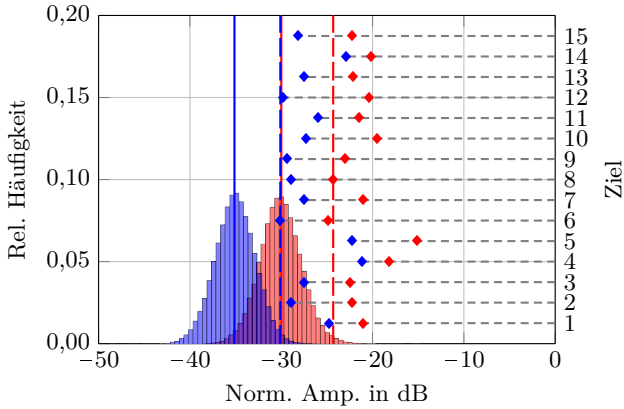


Abbildung A.6: Histogramme zu den GPSAR-Bildern aus Bild 5.22, S.108 für die vertikale (■/♦) und horizontale Polarisation (■/♦) (Fokusebene $z_f = -30$ mm).

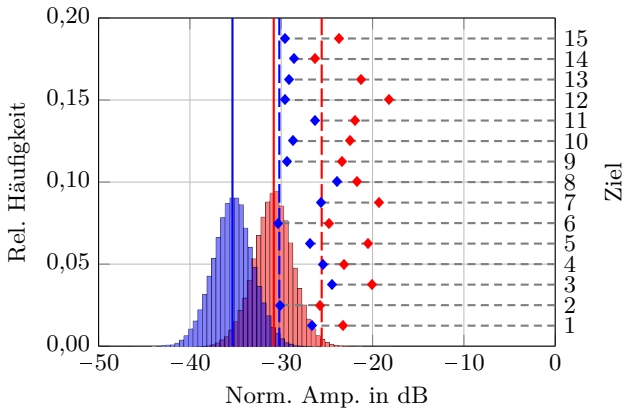


Abbildung A.7: Histogramme zu den GPSAR-Bildern aus Bild 5.23 (a), S.110 für die vertikale (■/♦) und horizontale Polarisation (■/♦) (Fokusebene $z_f = -70$ mm).

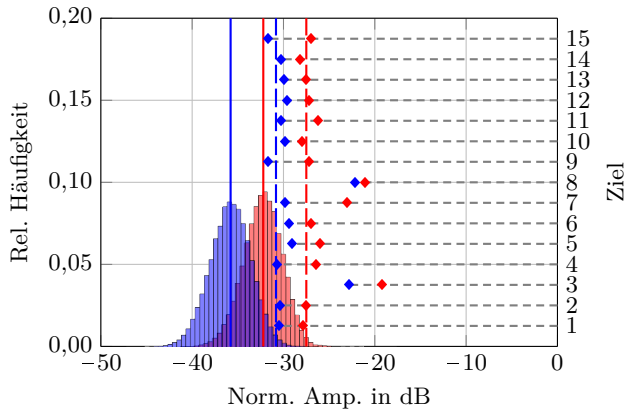


Abbildung A.8: Histogramme zu den [GPSAR](#)-Bildern aus Bild [5.23\(b\)](#), S.[110](#) für die vertikale (■/♦) und horizontale Polarisation (▣/◆) (Fokusebene $z_f = -120$ mm).

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Abkürzungen

ANFO	Ammonium Nitrate Fuel Oil
AP	Antipersonnel
AT	Antitank
BL	Background Level
CA	Cell-Averaging
CAD	Computer-Aided Design
CFAR	Constant False Alarm Rate
CRF	Chirp Repetition Frequency
CSAR	Circular SAR
EKF	Extended-Kalman-Filter
FFT	Fast Fourier Transform
FMCW	Frequency-Modulated Continuous-Wave
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSD	Swiss Foundation for Mine Action
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Ground Penetrating Radar
GPSAR	Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar
GPU	Graphics Processing Unit
IED	Improvised Explosive Device
IMU	Inertial Measurement Unit
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LSAR	Linear SAR
MIMO	Multiple Input Multiple Output
PLL	Phase-Locked Loop
PPS	Pulse-Per-Second

PROM-1	Protupješačka Rasprskavajuća Odskočna Mina-1
PSF	Point Spread Function
RCS	Radarquerschnitt
RTK	Real-Time Kinematic
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBR	Signal-to-Background Ratio
SCR	Signal-to-Clutter Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STFT	Short-Time Fourier Transform
TDC	Time Domain Correlation
TNT	Trinitrotoluol
UAS	Unmanned Aerial System
UWB	Ultra Wideband
UXO	Unexploded Ordnance

Literaturverzeichnis

- [1] International Campaign to Ban Landmines, „Landmine Monitor,“ 2018.
- [2] Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD), „Annual Report,“ 2018.
- [3] D. Daniels, *Ground Penetrating Radar*, Ser. Electromagnetics and Radar Series. Institution of Engineering und Technology, 2004.
- [4] H. M. Jol, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, 2009.
- [5] B. Sai, I. Morrow und P. van Genderen, „Limits of Detection of Buried Landmines Based on Local Echo Contrasts,“ in *Proc. 28th European Microwave Conference (EuMC) Workshop*, Oktober 1998, S. 121–125.
- [6] Fondation Suisse de Déminage (FSD), „Annual Report,“ 2018.
- [7] Defense Intelligence Agency, „Afghanistan IED Identification Guide,“ 2007.
- [8] D. J. Daniels und P. Curtis, „MINETECT,“ in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, Mai 2003, S. 110–114.
- [9] W. J. Steinway, H. A. Duvoisin, M. S. Tomassi, J. E. Thomas, G. Betts, C. Morris, B. Kahn, P. Stern, S. Krywick, K. Johnson, K. Dennis, W. Simoneaux und B. Blood, „Multi-Sensor System for Mine Detection,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), Sensing and Managing the Environment*, Band 1, Juli 1998, S. 228–230.
- [10] M. Sato und K. Takahashi, „ALIS Development for Humanitarian Demining and its Evaluation Tests,“ in *European Radar Conference (EuRAD)*, Oktober 2008, S. 284–287.

- [11] S. Jordan, J. Moore, S. Hovet, J. Box, J. Perry, K. Kirsche, D. Lewis und Z. T. H. Tse, „State-of-the-art technologies for UAV inspections,“ *IET Radar, Sonar & Navigation*, Band 12, S. 151–164, Februar 2018.
- [12] P. Hügler, F. Roos, M. Schartel, M. Geiger und C. Waldschmidt, „Radar Taking Off: New Capabilities for UAVs,“ *IEEE Microwave Magazine*, Band 19, Nr. 7, S. 43–53, November 2018.
- [13] C. Castiblanco, J. Rodriguez, I. Mondragon, C. Parra und J. Colorado, „Air Drones for Explosive Landmines Detection,“ in *ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference*, 2014, S. 107–114.
- [14] T. S. De Smet, A. Nikulin, W. Frazer, J. Baur und J. Abramowitz, „Drones and Butterflies: A Low-Cost UAV System for Rapid Detection and Identification of Unconventional Minefields,“ in *Journal of Conventional Weapons Destruction*, Band 22, 2018.
- [15] B. Gavazzi, P. L. Maire, M. Munschy und A. Dechamp, „Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys,“ *The Leading Edge*, Band 35, S. 795–797, September 2016.
- [16] J. Colorado, M. Perez, I. Mondragon, D. Mendez, C. Parra, C. Devia, J. Martinez-Moritz und L. Neira, „An Integrated Aerial System for Landmine Detection: SDR-based Ground Penetrating Radar onboard an Autonomous Drone,“ *Advanced Robotics*, Band 31, Nr. 15, S. 791–808, 2017.
- [17] G. Fasano, A. Renga, A. R. Vetrella, G. Ludeno, I. Catapano und F. Soldovieri, „Proof of concept of micro-UAV-based radar imaging,“ in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Juni 2017, S. 1316–1323.
- [18] M. G. Fernández, Y. Á. López, A. A. Arboleya, B. G. Valdés, Y. R. Vaquero, F. L.-H. Andrés und A. P. García, „Synthetic Aperture Radar Imaging System for Landmine Detection Using a Ground Penetrating Radar on Board a Unmanned Aerial Vehicle,“ *IEEE Access*, Band 6, S. 45 100–45 112, 2018.

- [19] D. Šipoš und D. Gleich, „A Lightweight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection,“ *Sensors*, Band 20, Nr. 8, 2020.
- [20] Mineseeker Foundation, „Kosovo Trials Report,“ Techn. Ber., 2000.
- [21] A. Goad, D. Schorer, J. Sullenberger, F. Yousuf, A. Yu, G. Donohue und K. Hintz, „Landmine Detection Utilizing an Unmanned Aerial Vehicle,“ in *IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium*, April 2008, S. 231–236.
- [22] H. Klausung und W. Holpp, *Radar mit realer und synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung*. Oldenbourg, 2000.
- [23] J. Curlander und R. McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, Ser. Wiley Series in Remote Sensing and Image Processing. Wiley, 1991.
- [24] C. King, *Jane's Mines & EOD Operational Guide*. IHS Jane's, 2018.
- [25] M. Skolnik, *Radar Handbook, Third Edition*, Ser. Electronics electrical engineering. McGraw-Hill Education, 2008.
- [26] E. V. Appleton und M. A. F. Barnett, „On Some Direct Evidence for Downward Atmospheric Reflection of Electric Rays,“ in *Proceedings of the Royal Society of London (A)*, Dezember 1925, S. 621–641.
- [27] D. Luck, *Frequency Modulated Radar*. McGraw-Hill, 1949.
- [28] A. Meta, P. Hoogeboom und L. P. Ligthart, „Signal Processing for FMCW SAR,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 45, Nr. 11, S. 3519–3532, November 2007.
- [29] A. Meta, P. Hoogeboom und L. P. Ligthart, „Correction of the effects induced by the continuous motion in airborne FMCW SAR,“ in *IEEE Conference on Radar*, April 2006.
- [30] C. A. Wiley, *Pulsed Doppler radar methods and apparatus*, U.S. Patent 3 196 436, August 1954.
- [31] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek und K. Papathanassiou, „A Tutorial on Synthetic Aperture Radar,“ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine (GRSM)*, Band 1, Nr. 1, S. 6–43, März 2013.

- [32] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*. Wiley, 1999.
- [33] G. Fornaro, D. Reale, A. Pauciullo, X. Zhu und R. Bamler, „SAR Tomography: An Advanced Tool for Spaceborne 4D Radar Scanning with Application to Imaging and Monitoring of Cities and Single Buildings,“ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Newsletter*, S. 9–17, Dezember 2012.
- [34] K. P. Papathanassiou und S. R. Cloude, „Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 39, Nr. 11, S. 2352–2363, November 2001.
- [35] J. Sharma, I. Hajnsek, K. Papathanassiou und A. Moreira, „Estimation of Glacier Ice Extinction Using Long-Wavelength Airborne Pol-InSAR,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, August 2013.
- [36] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona-Moreno, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl und T. Rabaute, „The displacement field of the Landers earthquake mapped by Radar interferometry,“ *Nature*, Band 364, S. 138–142, Juli 1993.
- [37] M. Schartel, R. Burr, W. Mayer, N. Docci und C. Waldschmidt, „UAV-Based Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar,“ in *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (IC-MIM)*, 2018.
- [38] H. Rudolf, D. Tarchi und A. J. Sieber, „Combination of Linear and Circular SAR for 3-D Features,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS). Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development*, Band 4, August 1997, S. 1551–1553.
- [39] E. Schreiber, M. Peichl, S. Dill, S. Anger, A. Heinzl, F. Bischeltsrieder, T. Kempf und M. Jirousek, „Theoretical and experimental investigations of a ground-based high-resolution SAR for buried object detection,“ in *European Radar Conference (EuRAD)*, September 2015, S. 229–232.
- [40] R. Johnson und H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, Ser. Electronics Electrical Engineering. McGraw-Hill, 1993.

- [41] G. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, Ser. Aerospace & Radar Systems. SciTech Publishing Inc., 1998.
- [42] O. Frey, C. Magnard, M. Ruegg und E. Meier, „Focusing of Airborne Synthetic Aperture Radar Data From Highly Nonlinear Flight Tracks,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 47, Nr. 6, S. 1844–1858, Juni 2009.
- [43] I. Cumming und J. Bennett, „Digital Processing of Seasat SAR Data,“ in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Band 4, April 1979, S. 710–718.
- [44] M. Y. Jin und C. Wu, „A SAR Correlation Algorithm which Accommodates Large-Range Migration,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band GE-22, Nr. 6, S. 592–597, November 1984.
- [45] H. Runge und R. Bamler, „A Novel High Precision SAR Focussing Algorithm Based On Chirp Scaling,“ in *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Band 1, Mai 1992, S. 372–375.
- [46] E. C. Zaugg und D. G. Long, „Generalized Frequency Scaling and Back-projection for LFM-CW SAR Processing,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 53, Nr. 7, S. 3600–3614, Juli 2015.
- [47] H. Klausning, „Realisierbarkeit eines Radars mit synthetischer Apertur durch rotierende Antennen,“ Dissertation, Universität Karlsruhe, 1989.
- [48] J. Saeedi und K. Faez, „A back-projection autofocus algorithm based on flight trajectory optimization for synthetic aperture radar imaging,“ *Multidimensional Systems and Signal Processing*, Band 27, Nr. 2, S. 411–431, April 2016.
- [49] L. M. H. Ulander, H. Hellsten und G. Stenstrom, „Synthetic-Aperture Radar Processing Using Fast Factorized Back-Projection,“ *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Band 39, Nr. 3, S. 760–776, 2003.
- [50] A. Ribalta, „Time-Domain Reconstruction Algorithms for FMCW-SAR,“ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Band 8, Nr. 3, S. 396–400, 2011.

- [51] C. Stringham und D. G. Long, „GPU Processing for UAS-Based LFM-CW Stripmap SAR,“ *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 80, S. 1107–1115, Dezember 2014.
- [52] A. Haderer, P. Scherz, J. Schrattenecker und A. Stelzer, „Real-time implementation of an FMCW backprojection algorithm for 1D and 2D apertures,“ in *European Radar Conference*, 2011, S. 53–56.
- [53] E. Schreiber, M. Peichl, A. Heinzel, S. Dill, F. Bischeltsrieder, S. Anger, T. Kempf und M. Jirousek, „Challenges for operational use of ground-based high-resolution SAR for landmines and UXO detection,“ in *Proceedings of 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Juni 2016.
- [54] L. J. Moore und L. C. Potter, „Three-dimensional resolution for circular synthetic aperture radar,“ in *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIV*, E. G. Zelnio und F. D. Garber, Hrsg., International Society for Optics und Photonics, Band 6568, SPIE, 2007, S. 30–41.
- [55] E. Ertin, C. Austin, S. Sharma, R. Moses und L. Potter, „GOTCHA Experience Report: Three-Dimensional SAR Imaging with Complete Circular Apertures,“ *Proc. SPIE 6568, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIV*, Mai 2007.
- [56] O. Ponce, P. Prats-Iraola, M. Pinheiro, M. Rodriguez-Cassola, R. Scheiber, A. Reigber und A. Moreira, „Fully Polarimetric High-Resolution 3-D Imaging With Circular SAR at L-Band,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 52, Nr. 6, S. 3074–3090, Juni 2014.
- [57] L. Moore, L. Potter und J. Ash, „Three-Dimensional Position Accuracy in Circular Synthetic Aperture Radar,“ *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Band 29, Nr. 1, S. 29–40, Januar 2014.
- [58] H. Löwy und G. Leimbach, „Eine elektrodynamische Methode zur Erforschung des Erdinnern,“ *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 1911.

- [59] M. Schartel, K. Prakasan, P. Hügler, R. Burr, W. Mayer und C. Waldschmidt, „A Multicopter-Based Focusing Method for Ground Penetrating Synthetic Aperture Radars,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Juli 2018.
- [60] A. Von Hippel, *Dielectric Materials and Applications*, Ser. Artech House microwave library. Artech House, 1954.
- [61] C. Baer, S. Gutierrez, J. Jebramcik, J. Barowski, F. Vega und I. Rolles, „Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar Imaging Providing Soil Permittivity Estimation,“ in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Juni 2017, S. 1367–1370.
- [62] N. Geng und W. Wiesbeck, *Planungsmethoden für die Mobilkommunikation: Funknetzplanung unter realen physikalischen Ausbreitungsbedingungen*, Ser. Information und Kommunikation. Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [63] A. van der Merwe und I. J. Gupta, „A Novel Signal Processing Technique for Clutter Reduction in GPR Measurements of Small, Shallow Land Mines,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 38, Nr. 6, S. 2627–2637, 2000.
- [64] A. M. Zoubir, I. J. Chant, C. L. Brown, B. Barkat und C. Abeynayake, „Signal Processing Techniques for Landmine Detection Using Impulse Ground Penetrating Radar,“ *IEEE Sensors Journal*, Band 2, Nr. 1, S. 41–51, Februar 2002.
- [65] A. M. Mayordomo und A. Yarovoy, „Optimal Background Subtraction in GPR for Humanitarian Demining,“ in *European Radar Conference*, Oktober 2008, S. 48–51.
- [66] S. Lambot, E. C. Slob, I. van den Bosch, B. Stockbroeckx und M. Vanclooster, „Modeling of Ground-Penetrating Radar for Accurate Characterization of Subsurface Electric Properties,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 42, Nr. 11, S. 2555–2568, 2004.
- [67] U. Spagnolini, „Permittivity measurements of multilayered media with monostatic pulse radar,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 35, Nr. 2, S. 454–463, 1997.

- [68] C. Matzler, „Microwave permittivity of dry sand,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 36, Nr. 1, S. 317–319, 1998.
- [69] M. Hitzler, „Breitbandige hochintegrierte FMCW-Radare bei 160 GHz für industrielle Anwendungen,“ Dissertation, Universität Ulm, 2019.
- [70] P. D. Walker und M. R. Bell, „Subsurface Permittivity Estimation from Ground-Penetrating Radar Measurements,“ in *Record of the IEEE 2000 International Radar Conference [Cat. No. 00CH37037]*, 2000, S. 341–346.
- [71] B. Panzer, A. Jöstingmeier und A. Omar, „Synthetic Aperture Radar Focusing Techniques for Ground Penetrating Radar Imaging,“ in *ISAST Transactions on Computers and Intelligent Systems*, 2010, S. 39–45.
- [72] I. Catapano, L. Crocco und F. Soldovieri, „Airborne Ground Penetrating Radar Imaging of Buried Targets: a Tomographic Approach,“ in *6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAG-PR)*, Juni 2011.
- [73] A. Heinzl, M. Peichl, E. Schreiber, F. Bischeltsrieder, S. Dill, S. Anger, T. Kempf und M. Jirousek, „Focusing Methods for Ground Penetrating MIMO SAR Imaging within Half-Spaces of Different Permittivity,“ in *Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Juni 2016.
- [74] O. Ponce, P. Prats, R. Scheiber, A. Reigber und A. Moreira, „First Demonstration of 3-D Holographic Tomography with Fully Polarimetric Multi-Circular SAR at L-Band,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, Juli 2013, S. 1127–1130.
- [75] O. Ponce, P. Prats-Iraola, R. Scheiber, A. Reigber und A. Moreira, „First Airborne Demonstration of Holographic SAR Tomography With Fully Polarimetric Multicircular Acquisitions at L-Band,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 54, Nr. 10, S. 6170–6196, Oktober 2016.
- [76] M. Peichl, E. Schreiber, A. Heinzl und T. Kempf, „TIRAMI-SAR – a synthetic aperture radar approach for efficient detection of landmines and UXO,“ in *EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2014.

- [77] E. Schreiber, A. Heinzl, M. Peichl, M. Engel und W. Wiesbeck, „Advanced Buried Object Detection by Multichannel, UAV/Drone Carried Synthetic Aperture Radar,“ in *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2019.
- [78] E. Schreiber, M. Peichl, S. Dill, A. Heinzl und F. Bischeltsrieder, „Detection of landmines and UXO using advanced synthetic aperture radar technology,“ in *Proc. SPIE 9823, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXI*, Mai 2016.
- [79] R. Burr, M. Schartel, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „A broadband UAV-Based FMCW GPR and the Influence of Vegetation,“ in *12th German Microwave Conference (GeMiC)*, März 2019, S. 210–213.
- [80] *Matrice 600 Pro User Manual*, V1.0 2018.04, DJI, 2018.
- [81] M. Schartel, A. Grathwohl, C. Schmid, R. Burr und C. Waldschmidt, „Tripwire Detection in SAR Images Using a Modified Radon Transform,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, eingereicht, Juli 2020.
- [82] R. Burr, M. Schartel, P. Schmidt, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „Design and Implementation of a FMCW GPR for UAV-based Mine Detection,“ in *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, 2018.
- [83] R. Burr, M. Schartel, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „Lightweight Broadband Antennas for UAV based GPR Sensors,“ in *48th European Microwave Conference (EuMC)*, Oktober 2018.
- [84] *Compact, Precision Ten Degrees of Freedom Inertial Sensor*, ADIS16448, Rev H., Analog Devices, 2019.
- [85] *Piksi Multi*, Version 2.3, Swift Navigation, 2019.
- [86] *Leica Geosystems Original Accessories*, GRZ4, Leica, 2019.
- [87] *Trimble Universale Totalstation*, SPS930, Trimble, 2018.
- [88] *Datasheet μ Landing Lite Altimeter*, Aerotenna, 2017.
- [89] *Lidar Lite v3 Operational Manual and Technical Specification*, Garmin, 2016.

- [90] *Technical Reference FLIR Blackfly Gige Vision*, 14.1, FLIR, 2018.
- [91] *The Next-Gen Intel x86 II Open Hardware SBC*, UDOO X86 II, 8.05.19, UDOO, 2019.
- [92] *Raspberry Pi 3*, Model B, Raspberry Pi Foundation, 2019.
- [93] M. Schartel, R. Burr, R. Bähneemann, W. Mayer und C. Waldschmidt, „An Experimental Study on Airborne Landmine Detection Using a Circular Synthetic Aperture Radar,“ 2020. arXiv: [2005.02600 \[eess.SP\]](#).
- [94] M. Kaess, H. Johannsson, R. Roberts, V. Ila, J. Leonard und F. Dellaert, „iSAM2: Incremental Smoothing and Mapping Using the Bayes Tree,“ *International Journal of Robotic Research – IJRR*, Band 31, S. 216–235, Mai 2012.
- [95] S. Lynen, M. W. Achtelik, S. Weiss, M. Chli und R. Siegwart, „A Robust and Modular Multi-Sensor Fusion Approach Applied to MAV Navigation,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, November 2013, S. 3923–3929.
- [96] M. Schartel, R. Bähneemann, R. Burr, W. Mayer und C. Waldschmidt, „Position Acquisition for a Multicopter-Based Synthetic Aperture Radar,“ in *International Radar Symposium (IRS)*, 2019.
- [97] *Frequenzplan*, Bundesnetzagentur, März 2019.
- [98] J. B. Burg, „Maximum Entropy Spectral Analysis,“ Dissertation, Stanford University, Department of Geophysics, 1975.
- [99] M. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2005.
- [100] M. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, Ser. Electrical engineering series. McGraw-Hill, 2001.
- [101] A. Ludloff, *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [102] H. Rohling, „Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations,“ *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Band AES-19, Nr. 4, S. 608–621, Juli 1983.

- [103] M. Fernandez, A. Lewis und F. Littmann, „PROM 1 Anti-Personnel Landmines; Possibility of Activation by Physical Contact with a Metal Detector,“ Joint Research Centre – European Commission (JRC/EC), Techn. Ber., 2001.
- [104] G. N. Crisp, C. R. Thornhill und G. Gooding-Williams, „Detection of Wires Using UWB Radar,“ in *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 6*, Boston, MA: Springer US, 2003, S. 471–480.
- [105] C. King, „Demining: Enhancing the Process,“ in *Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines*, Oktober 1998.
- [106] J. Storm und T. Geisler, „Trip wire detection using polarimetric IR,“ in *Proc. SPIE 4038, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V*, 2000.
- [107] J. H. Van Vleck, F. Bloch und M. Hamermesh, „Theory of Radar Reflection from Wires or Thin Metallic Strips,“ *Journal of Applied Physics*, Band 18, Nr. 3, S. 274–294, März 1947.
- [108] S. Chang und V. V. Liepa, „Measured Back Scattering Cross Section of Thin Wires,“ University of Michigan Radiation Laboratory Report No.8077-4-T, AF 33 (615)-5170, Techn. Ber., Mai 1967.
- [109] E. Miller, G. Burke, B. Maxum, G. Pjerrov und A. Neureuther, „Radar Cross Section of a Long Wire,“ *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Band 17, Nr. 3, S. 381–384, 1969.
- [110] K. Sarabandi, L. Pierce, Y. Oh und F. T. Ulaby, „Power Lines: Radar Measurements and Detection Algorithm for Polarimetric SAR Images,“ *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Band 30, Nr. 2, S. 632–643, 1994.
- [111] G. N. Crisp, A. J. Hill, J. A. Ratcliffe und C. R. Thornhill, „An algorithm for UWBR detection of tripwires,“ in *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IX*, R. S. Harmon, J. T. Broach und J. H. H. Jr., Hrsg., International Society for Optics und Photonics, Band 5415, SPIE, 2004, S. 763–771.

- [112] A. Heinzl, M. Peichl, E. Schreiber, S. Dill und F. Bischeltsrieder, „Investigations on the detection of thin wires using MIMO SAR,“ in *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII*, S. S. Bishop und J. C. Isaacs, Hrsg., International Society for Optics and Photonics, Band 10182, SPIE, 2017, S. 16–22.
- [113] A. Heinzl, M. Peichl, E. Schreiber, S. Dill und F. Bischeltsrieder, „The Detection Of IEDs Using Ground Based Multi-Static SAR,“ in *20th International Radar Symposium (IRS)*, Juni 2019.
- [114] M. Schartel, R. Burr, W. Mayer und C. Waldschmidt, „Airborne Tripwire Detection Using a Synthetic Aperture Radar,“ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Juni 2019.
- [115] R. Gonzalez und R. Woods, *Digital Image Processing*. Pearson/Prentice Hall, 2008.
- [116] J. Canny, „A Computational Approach to Edge Detection,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Band PAMI-8, Nr. 6, S. 679–698, November 1986.
- [117] P. V. C. Hough, *Method and means for recognizing complex patterns*, U.S. Patent 3069654A, Dev. 1962.
- [118] J. Radon, „Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten,“ in *Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig*, 1917, S. 262–279.
- [119] P. A. Toft und J. A. Sørensen, „The Radon Transform – Theory and Implementation,“ Dissertation, 1996.
- [120] J. Beyerer und F. León, „Die Radontransformation in der digitalen Bildverarbeitung (The Radon Transform in Digital Image Processing),“ *Automatisierungstechnik – AT-AUTOM*, Band 50, Januar 2002.
- [121] I. Couloigner und Q. Zhang, „Iterative and Localized Radon Transform for Road Centerline Detection from Classified Imagery,“ August 2007, S. 1093–1104.

- [122] A. C. Copeland, G. Ravichandran und M. M. Trivedi, „Localized Radon Transform-Based Detection of Ship Wakes in SAR Images,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 33, Nr. 1, S. 35–45, Januar 1995.
- [123] G. Du und T. S. Yeo, „A Novel Radon Transform-Based Method for Ship Wake Detection,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Band 5, September 2004, S. 3069–3072.
- [124] G. Zilman, A. Zapolski und M. Marom, „The Speed and Beam of a Ship From Its Wake’s SAR Images,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 42, Nr. 10, S. 2335–2343, Oktober 2004.
- [125] C. Budd und J. Stockie, „Tripwire Detection for Landmines,“ Techn. Ber., 1998.
- [126] C. Høilund, „The Radon Transform,“ *Aalborg University*, 2007.
- [127] G. Hall, T. J. Terrell, J. M. Senior und L. M. Murphy, „A new fast discrete Radon transform for enhancing linear features in noisy images,“ in *Third International Conference on Image Processing and its Applications*, Juli 1989, S. 187–191.
- [128] J. K. Jao und S. Ayasli, „SAR Detection of Wires Using Image Phase Signatures,“ in *Proceedings International Radar Conference*, Mai 1995, S. 362–368.
- [129] Jen King Jao, C. E. Lee und S. Ayasli, „Coherent Spatial Filtering for SAR Detection of Stationary Targets,“ *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Band 35, Nr. 2, S. 614–626, April 1999.
- [130] A. Heinzl, M. Schartel, R. Burr, R. Bähmann, E. Schreiber, M. Peichl und C. Waldschmidt, „A comparison of ground-based and airborne SAR systems for the detection of landmines, UXO, and IEDs,“ in *Proc. SPIE 11003, Radar Sensor Technology XXIII*, Mai 2019.
- [131] R. Burr, M. Schartel, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „UAV-Based Polarimetric Synthetic Aperture Radar for Mine Detection,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Juli 2019, S. 9208–9211.

- [132] E. E. Ligthart, A. G. Yarovoy, F. Roth und L. P. Ligthart, „Landmine Detection in High Resolution 3D GPR Images,“ in *15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (IEEE Cat. No.04EX824)*, Band 2, 2004, S. 423–426.

Eigene Veröffentlichungen

Teile dieser Dissertation sind bereits in folgenden Fachbeiträgen veröffentlicht.

Veröffentlichungen in Zeitschriften

- [1] M. Schartel, R. Burr, W. Mayer und C. Waldschmidt, „Airborne Tripwire Detection Using a Synthetic Aperture Radar,“ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Juni 2019.

Veröffentlichungen in Konferenzen

- [1] M. Schartel, W. Mayer und C. Waldschmidt, „Digital True Time Delay for Pulse Correlation Radars,“ in *European Radar Conference (EuRAD)*, Oktober 2016, S. 330–333.
- [2] M. Schartel, R. Burr, P. Schoeder, G. Rossi, P. Hügler, W. Mayer und C. Waldschmidt, „Radar-Based Altitude over Ground Estimation of UAVs,“ in *11th German Microwave Conference (GeMiC)*, März 2018, S. 103–106.
- [3] M. Schartel, K. Prakasan, P. Hügler, R. Burr, W. Mayer und C. Waldschmidt, „A Multicopter-Based Focusing Method for Ground Penetrating Synthetic Aperture Radars,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Juli 2018.
- [4] M. Schartel, R. Burr, W. Mayer, N. Docci und C. Waldschmidt, „UAV-Based Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar,“ in *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (IC-MIM)*, 2018.

- [5] R. Burr, M. Schartel, P. Schmidt, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „Design and Implementation of a FMCW GPR for UAV-based Mine Detection,“ in *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, 2018.
- [6] R. Burr, M. Schartel, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „Light-weight Broadband Antennas for UAV based GPR Sensors,“ in *48th European Microwave Conference (EuMC)*, Oktober 2018.
- [7] H. Iqbal, M. Schartel, F. Roos, J. Urban und C. Waldschmidt, „Implementation of a SAR Demonstrator for Automotive Imaging,“ in *18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Oktober 2018, S. 240–243.
- [8] P. Hügler, F. Roos, M. Schartel, M. Geiger und C. Waldschmidt, „Radar Taking Off: New Capabilities for UAVs,“ *IEEE Microwave Magazine*, Band 19, Nr. 7, S. 43–53, November 2018.
- [9] A. Heinzl, M. Schartel, R. Burr, R. Bähnemann, E. Schreiber, M. Peichl und C. Waldschmidt, „A comparison of ground-based and airborne SAR systems for the detection of landmines, UXO, and IEDs,“ in *Proc. SPIE 11003, Radar Sensor Technology XXIII*, Mai 2019.
- [10] R. Burr, M. Schartel, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „A broadband UAV-Based FMCW GPR and the Influence of Vegetation,“ in *12th German Microwave Conference (GeMiC)*, März 2019, S. 210–213.
- [11] R. Burr, M. Schartel, W. Mayer, T. Walter und C. Waldschmidt, „UAV-Based Polarimetric Synthetic Aperture Radar for Mine Detection,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Juli 2019, S. 9208–9211.
- [12] M. Schartel, R. Bähnemann, R. Burr, W. Mayer und C. Waldschmidt, „Position Acquisition for a Multicopter-Based Synthetic Aperture Radar,“ in *International Radar Symposium (IRS)*, 2019.
- [13] M. Schartel, A. Grathwohl, C. Schmid, R. Burr und C. Waldschmidt, „Tripwire Detection in SAR Images Using a Modified Radon Transform,“ in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, eingereicht, Juli 2020.

- [14] M. Schartel, R. Burr, R. Bähneemann, W. Mayer und C. Waldschmidt, „An Experimental Study on Airborne Landmine Detection Using a Circular Synthetic Aperture Radar,“ 2020. arXiv: [2005.02600](#) [[eess.SP](#)].

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Christian Waldschmidt