

## Studiengang Informationstechnik

### Bericht zum Modul Praxis II

Praxisphase 1: 23. Dezember 2013 - 28. März 2014

Praxisphase 2: 23. Juni 2014 - 28. September 2014

### Implementierung der SAR-Rohdatenanalyse als Teil einer Transkriptionssoftware für Flugzeug-SAR-Rohdaten

von **Benjamin Ditton**

- *Matrikelnr.: 7978631* -

- *Kurs: TINF12/ITIN* -



Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft  
Standort: Oberpfaffenhofen

Institut für Hochfrequenztechnik  
und Radarsysteme  
Abteilung: SAR-Technologie  
Betreuer: Jens Fischer

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich  
die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter  
Verwendung der angegebenen Quellen und  
Hilfsmittel angefertigt habe.

---

Oberpfaffenhofen, der 26. August 2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1 Arbeitsumfeld . . . . .	1
1.2 Ziele der Arbeit . . . . .	2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Grundlagen des SAR-Abbildungsprinzip</b>	<b>4</b>
2.1 Vom Radar zum SAR-System . . . . .	4
2.2 Das F-SAR-System des DLR . . . . .	5
2.3 Vorgehensweise bei Radaraufzeichnungen . . . . .	6
2.4 Beispielhafte Erklärung von Radaraufnahmen . . . . .	11
<b>3 Funktionsweise der bestehenden Transkriptionssoftware</b>	<b>15</b>
3.1 Sortierung und Vorverarbeitung der binären Rohdaten . . . . .	15
3.2 Kanalweise Aufbereitung . . . . .	16
3.3 Passweise Verarbeitung . . . . .	16
<b>4 Die neuen Module zur Daten-Analyse</b>	<b>18</b>
4.1 Analyse der Navigationsdaten . . . . .	18
4.2 Analyse der SAR-Rohdaten . . . . .	20
4.2.1 Daten-Vorverarbeitung . . . . .	20
4.2.2 Übersicht der Diagramme . . . . .	23
4.2.3 Das Azimut-Spektrum . . . . .	24
4.2.4 Die Doppler-Schwerpunkt Abschätzung . . . . .	25
4.2.5 Die gemittelte Energieverteilung über die Entfernungsrichtung (Range Envelope) . . . . .	26
4.2.6 Das Entfernungs-Spektrum . . . . .	26
4.2.7 Die Jitter-Analyse . . . . .	27
4.2.8 Das Intensitäts-Histogramm . . . . .	28

<b>5 Modul zur Replica-Verarbeitung</b>	<b>30</b>
5.1 Funktion von Replica-Aufnahmen . . . . .	30
5.2 Vorgehensweise bei der Replica-Verarbeitung . . . . .	30
<b>6 3D-Antennen-Tool</b>	<b>33</b>
6.1 Hintergrundinformation zum Antennen-Tool . . . . .	33
6.2 Wie soll das Antennen-Tool aufgebaut sein? . . . . .	33
6.3 Aufbau und Funktion des Antennen-Tools . . . . .	34
6.3.1 Das Hauptfenster . . . . .	35
6.3.2 Antennenübersichts-Anzeige . . . . .	36
6.3.3 Detaillierte Anzeige der transformierten Antennendaten . . . . .	38
6.3.4 Ansicht zur Eingabe der Metadaten . . . . .	40
6.4 Funktionsweise der Berechnungen im Hintergrund . . . . .	42
<b>7 Schlussbemerkung</b>	<b>45</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Schemazeichnung des F-SAR-Systems [3] . . . . .	5
2	Simulierter komplexer Chirp im Zeit- und Frequenzbereich (Realteil bzw. Amplitude) . . . . .	7
3	Simulierte Erdoberfläche mit zwei Punktreflektoren . . . . .	8
4	Simulierte SAR-Rohdaten: Zu sehen sind zwei sich überlagernde Chirp-Signale im Zeitbereich und deren Spektrum im Frequenzbereich. . . . .	8
5	Simulierte Bildzeile in Entfernungsrichtung mit zwei fokussierten Punktzielen . . . . .	9
6	Logarithmische Darstellung der simulierten Bildzeile . . . . .	10
7	Vergrößerte logarithmische Darstellung der simulierten Bildzeile . . . . .	11
8	SAR-Bild eines Gletschers, X-Band, VV-Polarisation [5] . . . . .	12
9	Multipolarimetrische Radaraufnahme eines Waldes [6] . . . . .	13
10	Optische Aufnahme des selben Gebietes wie Abbildung 9, dient dem Vergleich zwischen optischem und SAR-Bild [7]. . . . .	14
11	Diagramme zur Analyse der Navigationsdaten . . . . .	19
12	Reelle Rohdaten im Frequenzbereich, die Information ist stets redundant.	21
13	Geschnittene Rohdaten im Frequenzbereich (oberes Seitenband). . . . .	22
14	Komplexe Rohdaten im Frequenzbereich nach Verschiebung auf Mittelpunkt. . . . .	22
15	Ausgabe der SAR-Rohdatenanalyse . . . . .	23
16	Analyse Diagramme der reellen Replica-Daten . . . . .	31
17	Analyse Diagramme der komplexen Replica-Daten . . . . .	32
18	Ablauf der Aufbereitung eines Antennendiagramms . . . . .	34
19	Hauptfenster des Antennen-Tools, zum Laden von Antennen-Dateien .	35
20	Erste Arbeitsansicht des Antennen-Tools mit Diagramm und Auswahl der Richtungsvektoren . . . . .	36
21	SAR-Fluggeometrie mit Azimut- und Off-Nadir-Winkel . . . . .	37

## *ABBILDUNGSVERZEICHNIS*

---

22	Zweite Arbeitsansicht des Antennen-Tools mit transformiertem Antennen-Diagramm und Analyse-Funktionen . . . . .	38
23	Dritte Arbeitsansicht des Antennen-Tools zur Eingabe der Metadaten .	40
24	Technischer Aufbau des F-SAR mit Antennen, IMU und Hebelarmen . .	41

## **Abkürzungsverzeichnis**

<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für <b>Luft-</b> und <b>Raumfahrt</b>
<b>SAR</b>	<b>Synthetic Aperture Radar</b> - Radar mit synthetischer Apertur
<b>F-SAR</b>	<b>Flugzeug-SAR</b>
<b>GPS</b>	<b>Global Positioning System</b>
<b>IDE</b>	<b>Integrated Development Environment</b> - Integrierte Entwicklungsumgebung
<b>SSH</b>	<b>Secure Shell</b>
<b>XML</b>	<b>Extensible Markup Language</b>
<b>DIMS</b>	<b>Data Information Management System</b>
<b>DFD</b>	Deutsches <b>Fernerkundungsdatenzentrum</b> - Fernerkundungsdaten-Archiv des DLR
<b>HDF5</b>	<b>Hierarchical Data Format 5</b>
<b>CTR</b>	<b>Compact Test Range</b> - Antennenmesskammer des DLR

# 1 Einleitung und Motivation

In einer Zeit des Klimawandels mit schweren Naturkatastrophen, raschen Umweltveränderungen und einer Tendenz zu immer größeren Menschenansammlungen in Megastädten und auf Großveranstaltungen werden Verfahren zur Echtzeitüberwachung aus der Luft immer wichtiger. Dabei spielt neben optischen Verfahren, im für Menschen sichtbaren wie auch im infraroten Bereich, vor allem die Fernerkundung mittels Mikrowellen, zum Beispiel mittels Radar, eine immer größere Rolle. Zu Beginn des letzten Jahrhunderts erkannte man zunächst die Reflexion von Mikrowellen an metallischen Gegenständen, was man sich zuerst für die Detektion von Schiffen, bald auch für Flugzeuge zunutze machte. Später gelang es dann mittels spezieller Verfahren Bilder von der Erdoberfläche erzeugen (siehe [1] S. 14). Mit der Zeit wurde die Technik immer weiter verbessert, sodass man heute in der Lage ist, vergleichsweise kleine Objekte wie Autos zu erkennen und sogar deren Geschwindigkeit zu messen. Um die Bildqualität zu steigern werden Radarsensoren und deren Verarbeitungsverfahren stetig weiterentwickelt. Für die Verarbeitung der Radarrohdaten sind viele Schritte notwendig, so auch die im folgenden beschriebenen Werkzeuge zur Rohdatenanalyse und -aufbereitung.

## 1.1 Arbeitsumfeld

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist Teil der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und betreibt deutschlandweit an 16 Standorten Forschung auf den Gebieten Luft- und Raumfahrt, Verkehr, Energie und Sicherheit. Im Auftrag der Bundesregierung ist es für die Planung und Durchführung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Am Standort in Oberpfaffenhofen befinden sich drei Institute, die bereits mehrfach als „DLR SAR Center of Excellence“ ausgezeichnet wurden: Das Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, das Institut für Methodik der Fernerkundung, sowie das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum. Erstgenanntes betreibt Forschung im Bereich passiver und aktiver Mikrowellensysteme und nutzt seine große Expertise zur Weiterentwicklung von Sensoren und Verarbeitungsalgorithmen. Das Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme ist maßgeblich an den deutschen Satelliten-Missionen TerraSAR-X und TanDEM-X beteiligt.

Die Abteilung SAR-Technologie des Instituts entwickelte und betreibt ein flugzeug-

getragenes SAR-System (F-SAR), führt damit Datenakquisitionen durch und nimmt die operationelle Prozessierung dieser Daten vor. F-SAR ist ein experimentelles System und sowohl die Hardware, als auch die Prozessierungssoftware werden von der Abteilung ständig weiterentwickelt. Ziel des Ganzen ist es, neue Verfahren zu erproben und Erfahrungen für zukünftige Satellitenmissionen zu sammeln. Die Fachgruppe Signalprozessierung kümmert sich hierbei um die Datenverarbeitung und -archivierung, sowie um die Weiterentwicklung des SAR-Bildprozessors und die Implementierung fortschrittlicher Algorithmen.

### 1.2 Ziele der Arbeit

Während der Aufnahme empfangen die Antennen des F-SAR-Systems die vom SAR-System ausgesandten und von der Erdoberfläche zurückgestreuten Mikrowellenimpulse. Diese werden durch hochgenaue und sehr schnell arbeitende Analog-Digital-Converter gewandelt und anschließend auf Festplattenrekordern gespeichert. Die Daten müssen vor der Prozessierung von einer sogenannten Transkriptionssoftware aufbereitet werden. Einen ersten Teil dieser habe ich im ersten Studienjahr in der Programmiersprache Python neu implementiert. Dieser Teil wurde bereits in die bestehende Transkription eingebettet und ist operationell im Einsatz. Er stellt die Funktionalität zum Auftrennen und Sortieren der einzelnen Empfangskanäle und zur Generierung von XML-Metadaten-Dateien aus binären Metadaten zur Verfügung. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es nun weitere Module, die der Analyse von Rohdaten dienen, zu entwickeln und zur Transkription hinzuzufügen. Insgesamt handelt es sich dabei um drei Programme. Das erste soll die Radarrohdaten nach dem kanalweisen Auftrennen analysieren und Auswertungs-Diagramme erzeugen. Dies ist sehr wichtig, da aus diesen für den Anwender ersichtlich wird, ob der Sensor korrekt gearbeitet hat und in der Prozessierung eventuell besondere Einstellungen vorzunehmen sind. Außerdem lassen sich daraus Aussagen über die Qualität der Aufnahmen ableiten. Handelt es sich bei den Daten um sogenannte *Replica-Daten*, ist eine davon abweichende Behandlung nötig. Hierfür wird das zweite neue Modul, die sogenannte *Replica-Aufbereitung* eingesetzt. Rohdatenanalyse und Replica-Aufbereitung werden direkt im Arbeitsablauf der Transkription eingebunden und sollen dazu als reine Kommandozeilenprogramme umgesetzt werden. Für die Erzeugung von qualitativ hochwertigen Bildern aus den Radardaten spielen auch die eingesetzten

Antennen eine große Rolle. Diese werden im Institut entwickelt und regelmäßig in einem aufwendigen Verfahren vermessen. Die äußert umfangreichen Antennen-Rohdaten dieser Messungen müssen für die Verwendung im SAR-Prozessor aufbereitet werden. Hierbei werden viele Einstellungen des Nutzers benötigt, weshalb das dritte neue Modul ein intuitives, graphisches Nutzer Interface (GUI) bieten soll.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Nach dieser Übersicht zu den Hintergründen der Arbeit folgt eine kurze Einführung in das SAR-Abbildungsprinzip. In dieser werden sowohl die Entwicklung dieser Technik als auch die grundlegenden Verarbeitungs-Verfahren beschrieben. Das dritte Kapitel erläutert die neue Transkriptionssoftware in Python, zu der die neuen Module zur Datenanalyse hinzugefügt werden. Das vierte Kapitel gibt einen Überblick über die Funktionen und Arbeitsweise der neuen Module. Dabei wird für jedes der Programme erklärt, was es leisten soll und wozu es genutzt wird. So werden vor allem die technischen Hintergründe und die Umsetzung genau beschrieben. Begonnen wird dabei mit der Radarrohdaten-Analyse, darauf folgt die Replica-Aufbereitung und zuletzt das Antennen-Tool. Abschließend werden die erreichten Ziele und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt und ein Ausblick auf den künftigen Einsatz der Software gegeben.

## 2 Grundlagen des SAR-Abbildungsprinzip

Für die Analyse der Radarrohdaten ist ein grundlegendes Verständnis des SAR-Abbildungsprinzips vonnöten. Daher folgt nun eine kurze Zusammenfassung der Entwicklungsgeschichte des Radars und eine Beschreibung des SAR-Verfahrens am Beispiel des F-SAR-Systems des DLR.

### 2.1 Vom Radar zum SAR-System

Klassische Radarsysteme wurden in der Zeit vor dem zweiten Weltkrieg entwickelt und dienten anfangs vor allem der Detektion heranfliegender, feindlicher Flugzeuge. Heute werden Rundumsichtradare hauptsächlich zur Überwachung des Luftraums, beispielsweise an Flughäfen oder als Wetterradare eingesetzt. Ein solches Radar kann mehrere Parameter eines detektierten Objektes erfassen. So kann die Richtung des Objekts, die Entfernung, berechnet aus der Laufzeit des reflektierten Signals, sowie die Geschwindigkeit unter Berücksichtigung des Doppler-Effekts gemessen werden. Die erzielbare Winkelauflösung ist dabei durch die Größe der Antenne begrenzt (siehe [1] S. XI).

Um Radarsysteme zur Erdbeobachtung nutzen zu können, musste die Auflösung weiter gesteigert werden, was auf einem Flugzeug oder Satellit als Trägerplattform aufgrund des begrenzten Platzangebots nicht über eine größere Antenne geschehen konnte. Daher wurde in den 1950er Jahren das Radar mit synthetischer Apertur (SAR) entwickelt, wobei sich die Apertur (Öffnungswinkel) hierbei aus der Aneinanderreihung vieler Aufnahmen, innerhalb kurzer Zeitintervalle und gleichmäßiger räumlicher Verschiebung, ergibt. Dies ist konzeptbedingt nur auf sich bewegenden Plattformen möglich. Außerdem sollte eine äußerst genaue Erfassung der Eigenbewegung möglich sein [2]. Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, erfolgt die Aufnahme in Schrägsichtgeometrie.

Im Gegensatz zu optischen Aufnahmen müssen aufgenommene Radarrohdaten erst mittels komplexer Algorithmen zu für Menschen visuell interpretierbaren Bildern verrechnet werden. Dies stellt einen großen Nachteil der Fernerkundung mittels Radarsensoren gegenüber optischen Sensoren dar. Jedoch bietet die Radartechnik den Vorteil, dass aktuelle Bilder auch bei Nacht, sowie bei nahezu beliebig schlechtem Wetter aufgezeichnet werden können. Dies ist insbesondere bei Naturkatastrophen sehr wichtig,

um Rettungskräfte unabhängig von Tageszeit und Wetterlage, zeitnah mit dringend benötigten Informationen zu versorgen.

## 2.2 Das F-SAR-System des DLR

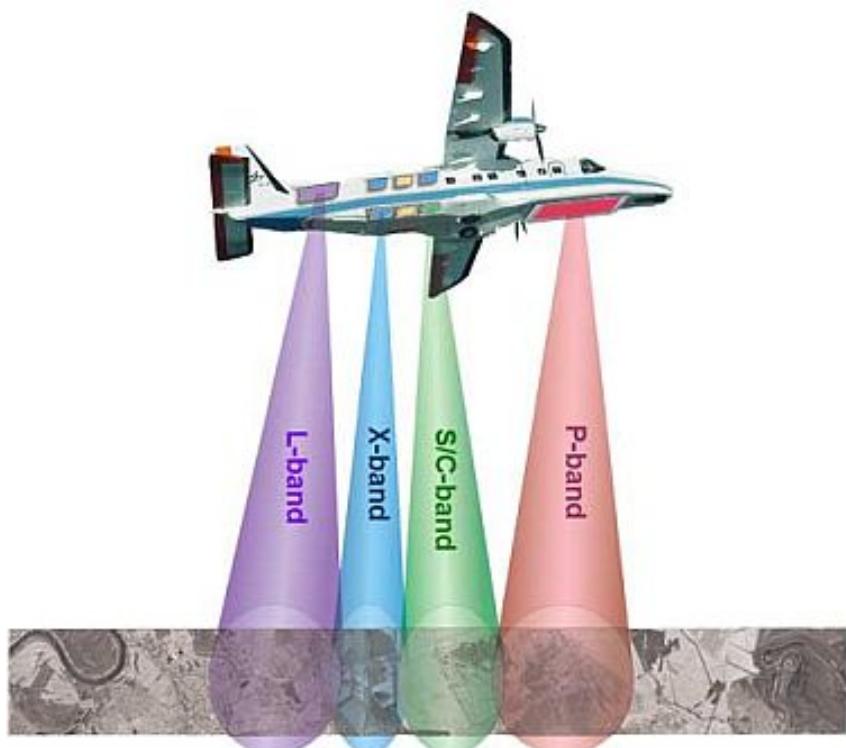


Abbildung 1: Schemazeichnung des F-SAR-Systems [3]

Das Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme unterhält unter anderem das flugzeuggetragene (airborne) Radarsystem F-SAR. Es ist der Nachfolger des E-SAR-Systems und dient dazu, neue Verfahren für zukünftige satellitengestützte (spaceborne) Missionen zu erproben, sowie SAR-Rohdaten für diverse Forschungsprojekte aufzuzeichnen. Um eine möglichst einfache Modifizierbarkeit zu erreichen, ist F-SAR modular aufgebaut und kann vollpolarimetrisch in den Frequenzbändern X, C, S, L und P arbeiten (siehe Abbildung 1). Außerdem sind mehrkanalige Modi, wie die „Single-Pass Interferometrie“ im X- und S-Band möglich [4].

## 2.3 Vorgehensweise bei Radaraufzeichnungen

Ein SAR ist ein gepulstes Radarsystem, sowie ein bildgebendes Primärradar. Während des Fluges werden in kurzen zeitlichen Abständen impulsweise elektromagnetische Wellen einer bestimmten Trägerfrequenz ausgesandt und, da es sich um ein Primärradar handelt, die reflektierten Pulse, also keine aktiv ausgesandten Antworten, aufgezeichnet. Auf die Trägerfrequenz wird im Falle eines Chirp-Signals außerdem eine weitere, sich linear verändernde Frequenz aufmoduliert. Dieses Verfahren nennt sich Impulsmodulation. Die hinzugefügte Frequenzmodulation verfügt über eine bestimmte Bandbreite von der die Auflösung in Entferungsrichtung (Range), d.h. Blickrichtung orthogonal zur Flugrichtung, nach folgender Formel abhängt:

$$\delta_R = 0.89 * \frac{c_0}{2*B_R} \quad [1]$$

Die Auflösung in Entferungsrichtung ergibt sich also aus dem Quotienten der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$ , der doppelten Bandbreite  $B_R$  des Signals und einem weiteren Skalierungsfaktor von 0,89. Beispielsweise erhält man bei einer Bandbreite von 50MHz eine Auflösung von 2,67m. Ein solcher frequenzmodulierter Puls wird im Allgemeinen als Chirp bezeichnet. Der Einfachheit halber betrachten wir im Folgenden simulierte SAR-Daten, die sich jedoch prinzipiell wie echte SAR-Daten verhalten. Zuerst erzeugen wir in Abbildung 2 einen komplexwertigen Chirp.

In Abbildung 2 ist die Variation der Frequenz zu erkennen. Es wirkt als würde die Frequenz erst ab- und dann wieder zunehmen. Jedoch steigt die Frequenz kontinuierlich an, beginnt bei einer theoretischen negativen Frequenz von -25MHz und geht über 0MHz zu +25MHz. Das untere Diagramm ist eine Darstellung im Frequenzbereich und zeigt damit die Absolutwerte der vorhandenen Frequenzen. Man erhält es indem man auf die Daten im Zeitbereich eine FFT (Fast-Fourier-Transformation) anwendet und deren Beträge betrachtet. Hierbei beschreibt die Ausdehnung der X-Achse die verwendete Samplingrate von 250MHz. Der Verlauf zeigt am linken Rand die positiven Frequenzen und am rechten die negativen, sie sind an das Ende der Darstellung verschoben, befinden sich aber auch links der Null, da der rechte und linke Rand nach der Theorie identisch sind (werden miteinander identifiziert). Bei Abtastung eines Signals mit maximaler Frequenz ist das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem zu beachten, das für reell-wertige Daten besagt:

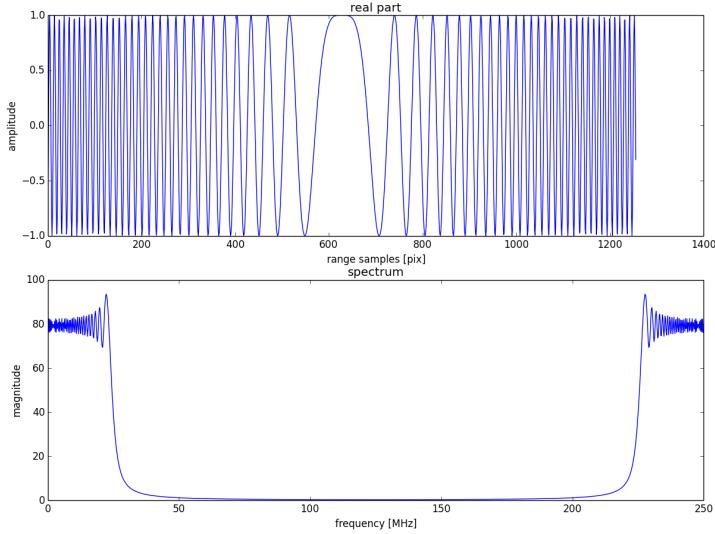


Abbildung 2: Simulierter komplexer Chirp im Zeit- und Frequenzbereich (Realteil bzw. Amplitude)

$$f_{abtast} \geq 2 * (f_{max} - f_{min})$$

Das heißt die Abtastfrequenz muss mindestens doppelt so groß sein, wie die Differenz aus größter und kleinster auftretender Frequenz. Dies ist in unserem Beispiel gegeben, da wir 50MHz Bandbreite und eine Samplingrate von 250MHz nutzen. Das Verhältnis von Bandbreite zu Samplingrate ist also 1:5.

Dieser Chirp wird nun von der Sendeantenne des Radarsystems ausgesandt und breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. An der Erdoberfläche bzw. an sich dort befindenden Objekten wie Bäumen oder Häusern, wird die Welle reflektiert und dabei, mathematisch betrachtet, im Zeitbereich mit dem Signal der Oberfläche gefaltet, was einer Multiplikation im Frequenzbereich entspricht.

In Abbildung 3 wird der Zeitbereich einer simulierten Erdoberfläche dargestellt, wobei hier große Teile keinerlei Reflexion aufweisen, was in der Realität am ehesten mit einer Wasseroberfläche zu vergleichen ist. Darauf befinden sich zwei Punktreflektoren, die man sich als auf dem Wasser schwimmende, unterschiedlich große, Winkelreflektoren vorstellen kann. Im Frequenzbereich wird aus den beiden Dirac-Impulsen des Zeitbereiches die Überlagerung zweier Schwingungen von 1000 und 2000 Hertz (also den

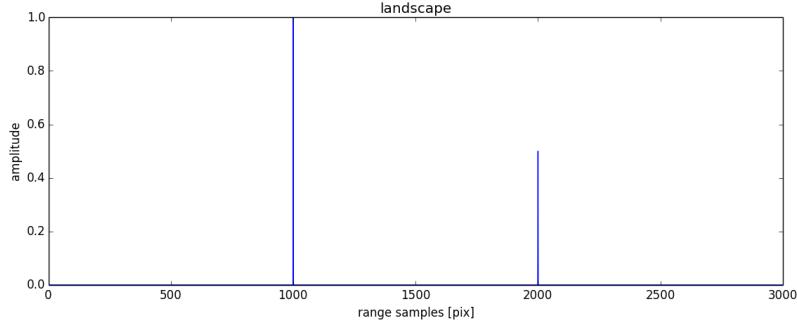


Abbildung 3: Simulierte Erdoberfläche mit zwei Punktreflektoren

Position der Reflektoren). Sie wären aufgrund der hohen Frequenz im Diagramm nicht zu erkennen und sind deshalb nicht dargestellt.

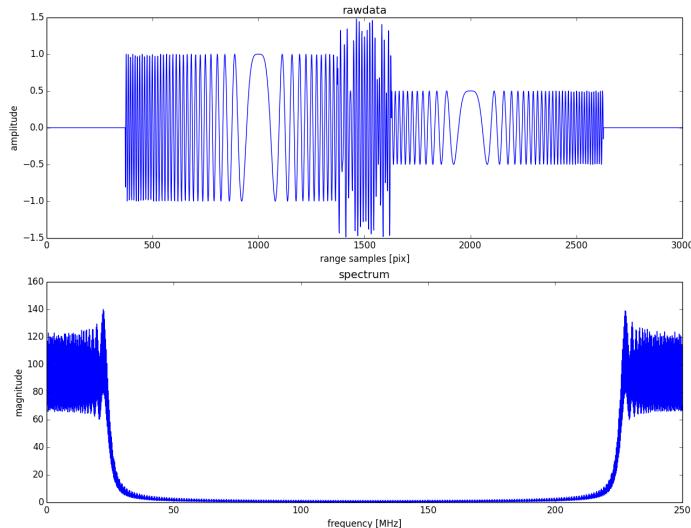


Abbildung 4: Simulierte SAR-Rohdaten: Zu sehen sind zwei sich überlagernde Chirp-Signale im Zeitbereich und deren Spektrum im Frequenzbereich.

Die ausgesandten elektromagnetischen Wellen werden mit einer Bildzeile der Erdoberfläche gefaltet, zurückgeworfen und von der Empfangsantenne des Radarsystems wieder empfangen. Sie werden elektrisch verstärkt und das Signal von der Trägerfrequenz demoduliert, d.h. das Signal und Trägerfrequenz werden voneinander getrennt, anschließend

wird das Signal mit Analog-Digital-Wandlern digitalisiert und auf Festplattenrecordern aufgezeichnet. Diese gespeicherten Daten sind die sogenannten Rohdaten aus denen im Nachhinein die Radarbilder berechnet werden. Die Rohdaten sind ein defokussiertes Bild, in dem eine Zeile (Rangeline) je einem empfangenen Echopuls entspricht. Eine zu Abbildung 3 entsprechende Zeile des SAR-Rohdatenbildes ist in Abbildung 4 dargestellt, in der sich nun zwei sich überlagernde Chirpsignale anstelle der zuvor noch fokussierten Punkte befinden. Im Frequenzbereich wird das für eine Superposition von Chirpsignalen typische Spektrum angezeigt (vgl. Abbildung 2).

Während der Prozessierung werden die Rohdaten zunächst in Entfernungs-Richtung fokussiert, d.h. sie werden mit dem Konjugiert-Komplexen des Sendechirps gefaltet um die fokussierten Bilddaten zu erhalten[1].

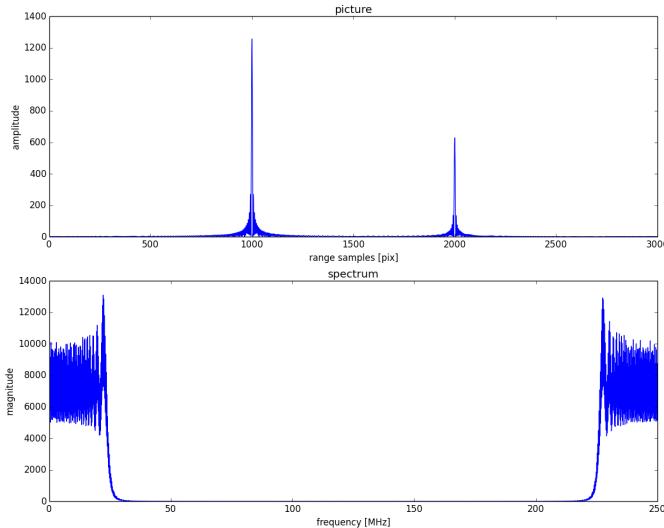


Abbildung 5: Simulierte Bildzeile in Entfernungsrichtung mit zwei fokussierten Punktzielen

Nun sind in der in Entfernungsrichtung fokussierten Bildzeile, die auf der abgebildeten Oberfläche befindlichen Reflektoren zu erkennen. Jedoch werden diese aufgrund der begrenzten Bandbreite des SAR-Systems nicht mehr wie ursprünglich durch Dirac-Impulse, sondern durch Sinc-Funktionen dargestellt. Abbildung 5 zeigt eine Absolutdarstellung der beiden Sinc-Funktionen.

Um die erzielte Auflösung der Aufnahme bewerten zu können, betrachtet man die Bildzeile in Abbildung 6 in logarithmischer Darstellung mit der Einheit *Dezibel*.

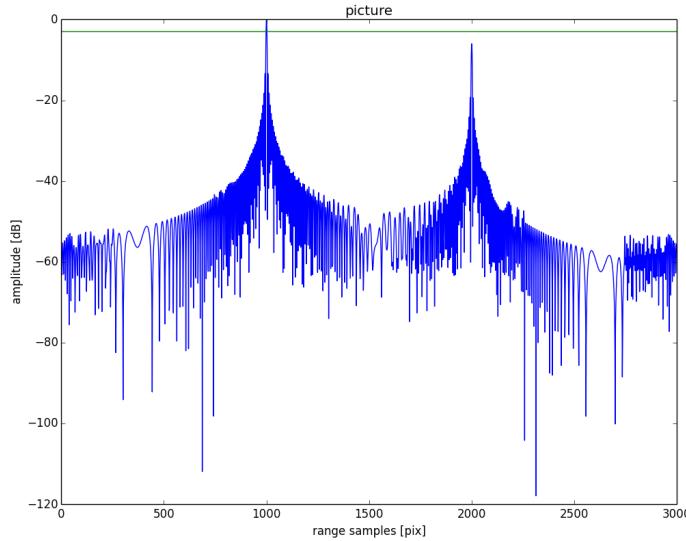


Abbildung 6: Logarithmische Darstellung der simulierten Bildzeile

Die in Abbildung 6 eingezeichnete grüne Linie bei -3dB entspricht der halben Leistung in linearer Darstellung. An den Schnittpunkten einer Sinc-Funktion mit der -3dB Linie lässt sich die reale Entfernungsauflösung des fertigen Bildes ablesen. Dies geschieht als Qualitäts-Analyse nach der Prozessierung eines Bildes. Beispielhaft kann man die Darstellung stark vergrößern und in Abbildung 7 die Pixel abzählen:

Wir zählen in Abbildung 7 etwas mehr als vier Pixel Breite. Hieraus kann man mittels des Abtastintervalls von 0,6 Metern die Auflösung von 2,58 Meter berechnen:

$$\delta_P = \frac{c_0}{2*f_{sampl}}$$

$$\frac{300*10^6 \frac{m}{s}}{2*250*10^6 MHz} = 0,6m$$

$$\delta_R = 4,3 * 0,6m = 2,58m$$

Die kleine Abweichung zu den oben berechneten 2,67m entsteht durch die einfache lineare Interpolation der Kurve, wodurch die Schnittpunkte mit der -3dB Linie nicht ganz exakt sind. In der Praxis wird eine bessere Interpolation verwendet.

Die Verarbeitung in Azimut-Richtung (Flugrichtung) wird hier nicht weiter beschrieben.

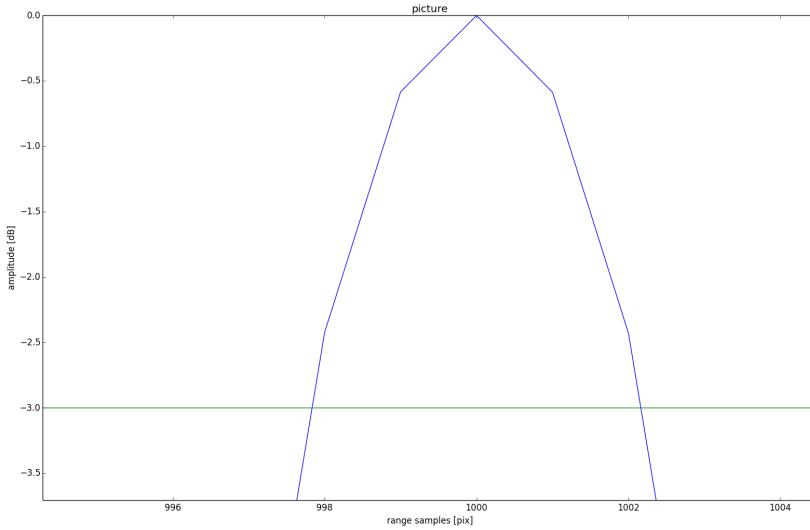


Abbildung 7: Vergrößerte logarithmische Darstellung der simulierten Bildzeile

Sehr stark vereinfacht lässt sich jedoch sagen: Jedes Punktziel erscheint in mehreren Rohdatenzeilen, aufgrund des sich verändernden Winkels zur Antenne jedoch in unterschiedlicher Entfernung. Wenn die Trägerplattform sich auf Höhe des Punktziels befindet ist der Winkel gleich  $0^\circ$ , die Signallaufzeit am kürzesten und das Ziel befindet sich in der Bildzeile am nächsten zur Antenne. Davor und danach ist es weiter entfernt und somit als vom Träger weg-gebogener Halbkreis in den Daten zu erkennen. Bei der Prozessierung wird das Punktziel auf den tatsächlichen Punkt fokussiert, indem die Daten mit dem inversen eines, durch die Bewegung der Trägerplattform entstehenden, Azimut-Chirps gefaltet werden. Im Gegensatz zur Faltung in Entfernungsrichtung ist diese zweidimensional und entfernungsabhängig [1].

## 2.4 Beispielhafte Erklärung von Radaraufnahmen

Bei fokussierten Radarbildern gibt es einige Besonderheiten, die hier mittels zweier anschaulicher Beispiele beschrieben werden sollen.

Abbildung 8 zeigt das fokussierte Bild der Radaraufnahme eines Gletschers. Dabei handelt es sich um ein Graustufenbild, wobei die Helligkeit die vom jeweiligen Punkt

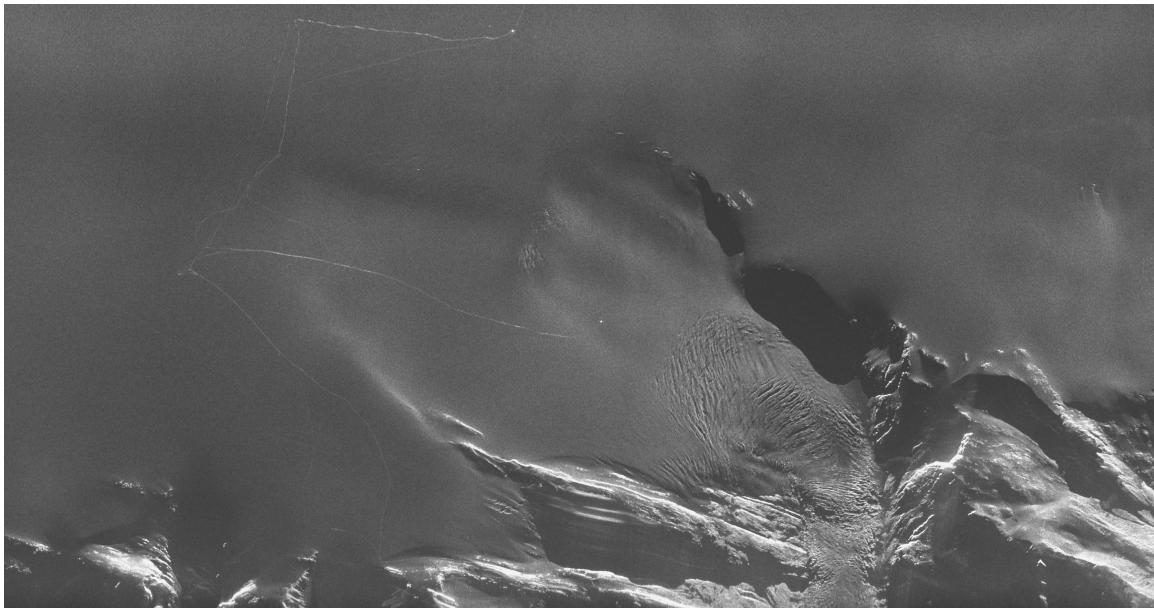


Abbildung 8: SAR-Bild eines Gletschers, X-Band, VV-Polarisation [5]

zurückgestreute Energie darstellt. Folglich kann man feststellen, dass der Schnee eher weniger und die Felsen eher mehr Energie reflektieren. Außerdem gibt es noch dunkle, schattengleiche Bereiche. Dabei handelt es sich tatsächlich um sogenannte Radarschatten, die auftreten, wenn die jeweiligen Flächen durch Hindernisse wie Erhebungen, aber auch Bäume oder Gebäude, verdeckt werden. Daraus lässt sich folgern, dass das Aufnahmesystem am oberen Rand des Bildes geflogen ist, da die Schatten jeweils unterhalb der Felsen auftreten. Weiterhin lassen sich kleine weiße Punkte und Spuren im Schnee erkennen. Bei den Punkten handelt es sich um vor der Aufnahme platzierte Winkelreflektoren, die dazu dienen, die Aufnahme zu kalibrieren. Dies wird durch die Kenntnis der exakten Position und des genauen Rückstreuverhaltens ermöglicht. Die weißen Spuren im Schnee stammen von den Menschen, die mittels Schlitten die Reflektoren zu ihren Standpunkten gebracht haben. Dabei wurden natürlich Spuren hinterlassen, deren Kanten im Schnee auf der Radaraufzeichnung (Abbildung 8) zu erkennen sind.

Im Gegensatz zum ersten Bild ist das zweite (Abbildung 9), welches einen Wald zeigt, mehrfarbig. Dies wird dadurch erreicht, dass drei getrennte Aufnahmen mit unterschiedlichen Polarisationen je einem Farbkanal zugeordnet und kombiniert werden.

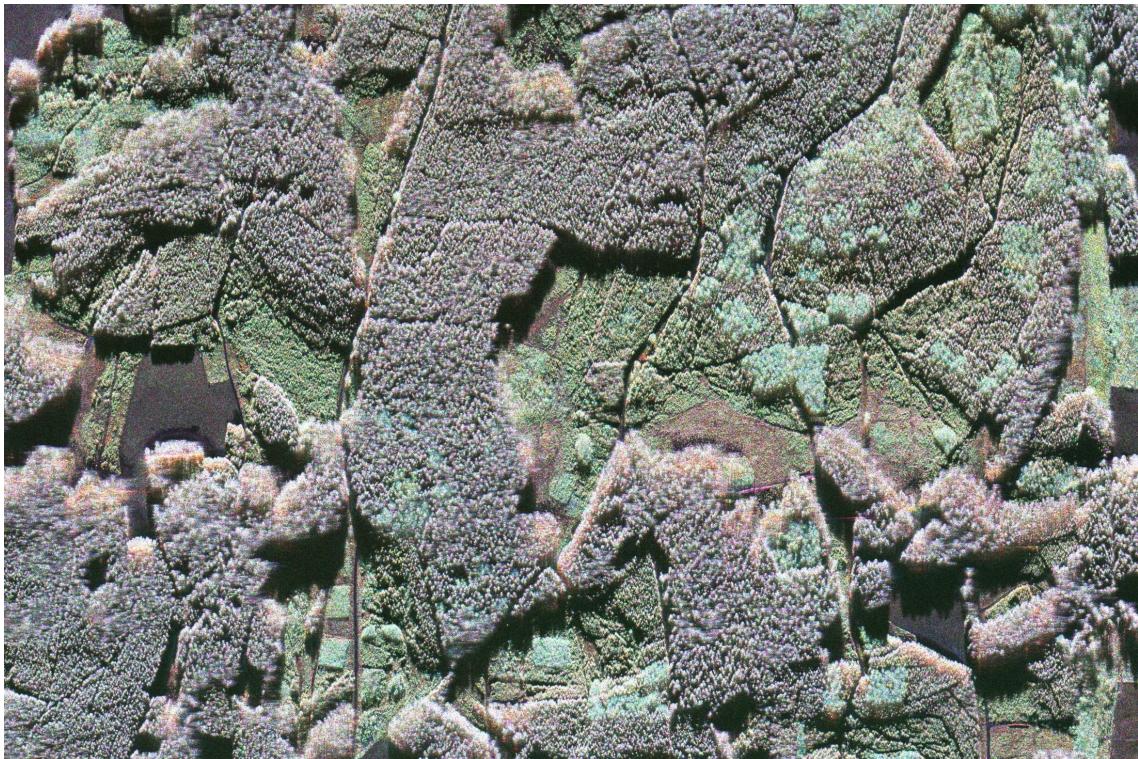


Abbildung 9: Multipolarimetrische Radaraufnahme eines Waldes [6]

Dabei werden horizontal (H) und vertikal (V) polarisierte Wellen verwendet, was durch eine entsprechend modifizierte Antenne erreicht wird. Durch das Kombinieren von Sende- und Empfangsantenne gibt es im Polarisationskürzel daher eine Stelle für jede Antenne. In unserem Fall sind die Polarisierungen HH, HV und VV den Farben rot, grün und blau zugeordnet. Auch in Abbildung 9 sind wieder die Radarschatten, dieses Mal unterhalb der Bäume, zu erkennen. Sie geben dem Bild einen plastischen Eindruck und lassen es, zusammen mit den fast realistischen Farben, dem Bild einer optischen Aufnahme, wie Abbildung 10, die dem Vergleich dient, ähneln. Zusätzlich gibt es noch kleine dunkle Gebiete oberhalb von Waldgebieten an der Grenze zu Wiesen. Dort befindet sich wahrscheinlich Schnee, der nur an der Nord-Seite der Bäume, also im Sonnenschatten, noch vorhanden ist. Als weitere radarspezifische Besonderheiten sind die verschwommenen Wipfel hoher Bäume, sowie rote Streifen im Bild zu erkennen. Ersteres resultiert aus der Wind bedingten Bewegung der Baumgipfel, sodass sie in jeder Bildzeile an einer leicht anderen Stelle auftauchen und so nicht korrekt fokussiert

werden können. Die roten Streifen stammen von Zäunen oder anderen metallischen Gegenständen, die aufgrund ihres Materials, sowie ihrer Form und Oberfläche die Signale besonders stark reflektieren. Dieser Effekt lässt sich auch an Hausdächern oder Bahnschienen beobachten. Das Bild wurde im C-Band mit einer Wellenlänge von 5,65cm und einer Auflösung von 60cm, sowohl in Azimut- als auch in Entfernungsrichtung prozessiert.

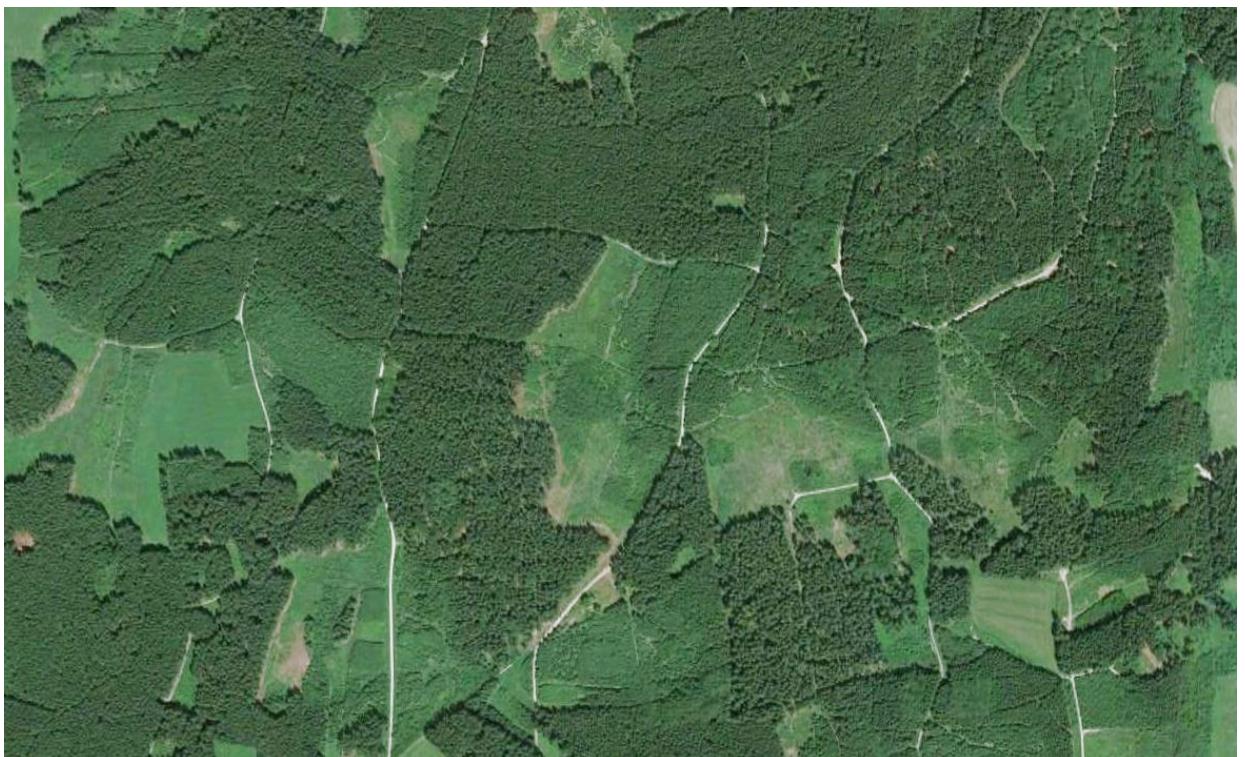


Abbildung 10: Optische Aufnahme des selben Gebietes wie Abbildung 9, dient dem Vergleich zwischen optischem und SAR-Bild [7].

## 3 Funktionsweise der bestehenden Transkriptionssoftware

Nach der Datenakquisition werden die Rohdaten aus dem Flugzeug auf die Server der Abteilung kopiert und anschließend mittels der Transkriptionssoftware für die Prozessierung aufbereitet. Die Daten einer Mission sind nach Flügen, also dem Zeitraum zwischen einem Start und der darauf folgenden Landung des Trägerflugzeugs und darunter nach Überflügen über das Aufzeichnungsgebiet, im weiteren als Pässe bezeichnet, sortiert. Die Verarbeitung erfolgt passweise und ist in mehrere Schritte gegliedert. Dabei wird aus den großteils binären Rohdaten das sogenannte Rohdatenprodukt erstellt. Dieses enthält alle für die Prozessierung benötigten Daten (Radar-, Navigations- und Antennen-daten). Intern besteht die Transkriptionssoftware aus mehreren Modulen, die bestimmte Teilaufgaben durchführen. Darüber hinaus, gibt es Routinen, welche die Module in der für die jeweiligen Daten passenden Reihenfolge aufrufen und somit einen ganzen Pass abarbeiten. Die komplette Transkription ist in der Programmiersprache Python geschrieben. Die Module lassen sich dabei grob in drei Kategorien zusammenfassen: dem Auftrennen der binären Rohdaten, der kanalweisen Aufbereitung und der passweisen Verarbeitung.

### 3.1 Sortierung und Vorverarbeitung der binären Rohdaten

Im ersten Schritt (Prozedurname: fsar\_transcription\_split.py) werden die binären Rohdaten verarbeitet. Hierbei wird mit den Metadaten begonnen, da diese für die weiteren Schritte benötigt werden. Sie werden entsprechend einer vorgegebenen Reihenfolge aus den binären Daten ausgelesen und in XML-Dateien gespeichert. Dabei gibt es übergreifende Parameter für den gesamten Pass und spezifische für jeden Aufzeichnungskanal. Nach den Metadaten werden, entsprechend der darin enthaltenen Informationen, die Rohdatenkanäle sortiert und kanalweise in Binärdateien gespeichert. Anschließend folgt ein sogenannter Update-Schritt, bei dem die Metadaten um zusätzliche Informationen ergänzt werden. Diese werden aus speziellen missionsspezifischen Dateien gelesen und entsprechend ergänzt oder korrigiert.

## 3.2 Kanalweise Aufbereitung

In der darauf folgenden Kanalverarbeitung wird zwischen regulären Bildpässen und virtuellen Pässen, den speziellen „Replica“-Pässen, unterschieden. Letztere enthalten als Rohdaten eine Aufzeichnung des ausgesendeten Signals. Dieses wird während der Prozessierung für die Verarbeitung in Entfernungsrichtung benötigt. Dabei werden die Bildrohdaten mit der konjugiert komplexen, zeitlich invertierten Replica gefaltet um entfernungs-komprimierte Daten zu erhalten. Bei den Bildpässen erfolgt zusätzlich das Auslesen von Dateien, die dynamische Daten wie die Temperatur während des Flugverlaufs enthalten (Prozedurname: fsar\_transcription\_splitd.py). Anschließend werden die Daten, die für die Aufzeichnung genutzten Antenne aus einem Archiv geladen, angepasst und in einen dafür vorgesehenen Ordner im Rohdatenprodukt gespeichert (Prozedurname: import\_antennaruntime.py). Außerdem erfolgt die in Kapitel 4 noch genau beschriebene Rohdatenanalyse des Kanals, bei der mittels bestimmter Algorithmen erste Aussagen über Besonderheiten und Qualität der Daten gewonnen werden können. Im Gegensatz dazu müssen die Replica-Daten auf spezielle Weise aufbereitet werden. Was dabei genau geschieht, wird in Kapitel 5 ausführlich beschrieben, da es sich dabei um ein neues Modul handelt (Prozedurname: fsar\_transcription\_replica\_processing.py).

## 3.3 Passweise Verarbeitung

Anschließend werden noch einige Schritte zur Vervollständigung des Rohdatenprodukts für den gesamten Pass durchgeführt. Dies ist zum einen die Analyse der Navigationsdaten, bei der die GPS-Daten aus dem Flugzeug ausgewertet und deren Verlauf bildlich dargestellt werden. Die genaue Funktionsweise wird ebenfalls in Kapitel 4 erläutert. Außerdem wird mittels spezieller Berechnungen aus den Metadaten das sogenannte „Bounding-Polygon“ erzeugt. Es enthält genaue geographische Angaben über die Lage des aufgezeichneten Radarbildes auf der Erdoberfläche. Dazu müssen die geographischen Koordinaten des GPS-Moduls im Flugzeug in ein kartesisches Koordinatensystem umgewandelt und aus den Parametern der SAR-Geometrie die abgebildete Fläche berechnet werden. Diese wird dann zurück in geographische Koordinaten konvertiert und aus einem digitalen Höhenmodell (DEM) die Meereshöhe der einzelnen Eckpunkte abgeleitet. Dieses Rechteck wird insbesondere für die korrekte Speicherung der fertigen Bilddaten

### *3 FUNKTIONSWEISE DER BESTEHENDEN TRANSKRIPTIONSSOFTWARE*

---

in das Archiv des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) benötigt, da die Nutzer auch mittels dieser Information (Suche nach geografischer Lage) Radardaten finden können. Zuletzt erfolgt noch die Zuordnung des zugehörigen Replica-Passes auf zu prozessierende Pässe. Dazu wird mittels einer Tabelle die Zuordnung herausgefunden und die zuvor aufbereiteten Replica-Daten in das Rohdatenprodukt des Bildpasses kopiert.

## 4 Die neuen Module zur Daten-Analyse

Nachdem die Rohdaten von den Rekordern im Flugzeug auf die Prozessierungsserver kopiert und mit den zuvor beschriebenen Modulen der Transkription für die Prozessierung aufbereitet wurden, erfolgt noch eine Analyse der Daten. Dazu wurden die noch fehlenden Analyse-Werkzeuge der Transkription in Python implementiert und um zusätzliche Funktionen ergänzt. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die Navigationsdatenanalyse, die Rohdatenanalyse, eine statistische Auswertung der aufgenommenen Daten, sowie die Replica-Aufbereitung. Letztere ist nicht nur eine reine Analyse, sondern auch eine Bearbeitung der Daten, um diese auf möglichst einfache Weise bei der nachfolgenden Prozessierung nutzen zu können.

### 4.1 Analyse der Navigationsdaten

Zur Erzeugung und Kalibrierung hochauflösender und exakter Bilder aus den SAR-Rohdaten ist eine möglichst genaue Kenntnis der Position und Ausrichtung der Radarantenne notwendig. Dazu werden Navigationsdaten während des Fluges mittels Sensoren aufgezeichnet und im Falle der GPS-Daten anschließend mit Referenzwerten abgeglichen, um die Präzision weiter zu erhöhen. Diese Lage- und Positions-Daten liegen in Form einer CSV-Datei jeweils für einen kompletten Flug vor. Aus dieser müssen die Abschnitte für jeden Überflug über das Aufzeichnungsgebiet (Pass) herausgeschnitten und für die weitere Verarbeitung im SAR-Prozessor in ein XML-File geschrieben werden. Außerdem werden die Daten in Form eines Diagramms ausgewertet und gespeichert. Dieses kann zur nachträglichen Inspektion des Flugverlaufs genutzt werden, was insbesondere bei nicht vorhergesehenen Abweichungen von Interesse ist, um mögliche Fehlerquellen aufzudecken.

Alle Diagramme in Abbildung 11 basieren auf den einzelnen Daten-Werten, die während des Fluges mit 50 bzw. 64 Werten pro Sekunde aufgezeichnet werden. Oben links ist die Höhe des Flugzeugs über dem **WGS84-Referenzellipsoid** im Verlauf des Fluges zu sehen. Hierbei ist zu erkennen, dass die Abweichung zum idealen, komplett linearen Flug, bei einer zurückgelegten Strecke von mehreren Kilometern, im Bereich von plusminus sechs Metern liegt. Die beiden Darstellungen darunter zeigen die Flugkoordinaten im

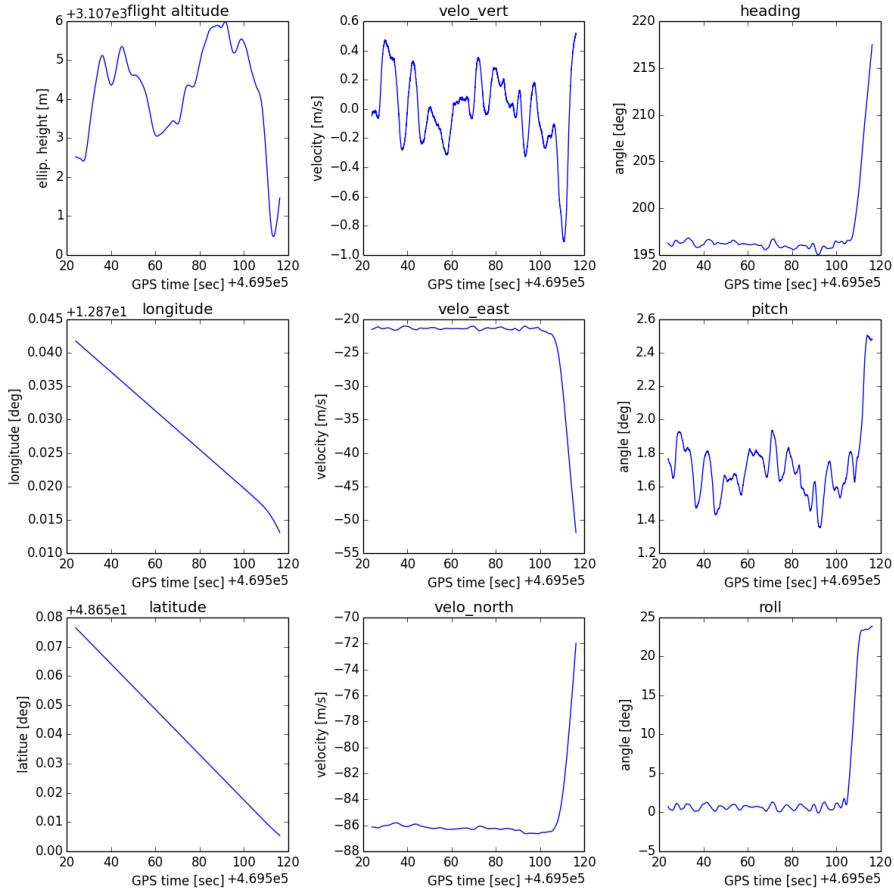


Abbildung 11: Diagramme zur Analyse der Navigationsdaten

Bezug auf die Längen-, beziehungsweise Breitengrade. Zu erkennen ist, dass der Flug weitgehend geradlinig verlief und nur am Ende der Aufzeichnung eine leichte Kurve zu erkennen ist. Sollte der Flug nicht solch einen linearen Verlauf genommen haben, wäre die Verarbeitung mit einer Standardprozessierung nur schwer möglich. Allerdings kann man mit Hilfe des Diagramms, Abschnitte herausfinden, die der Norm entsprechen und so zumindest Teile der Daten zu Bildern verarbeiten. Für Kreis- oder Kurvenflüge sind jedoch andere Verfahren, wie Zeitbereichsprozessierungen der SAR-Daten, anwendbar.

In der zweiten Spalte sind die Geschwindigkeitskomponenten in den drei Achsen vertikal (also in der Flughöhe) und nach Osten und Norden dargestellt. Bei der vertikalen Komponente scheint es relativ große Variationen zu geben, was jedoch der Skalierung der Achsen geschuldet ist, da die absoluten Abweichungen recht gering ausfallen.

Änderungen in dieser Größenordnung kann der Prozessor problemlos ausgleichen und es ist ein positives Zeichen, dass dabei keine dauerhaften Trends zu erkennen sind, da diese auf einen systematischen Fehler hindeuten würden (Beschleunigung). In den beiden anderen Diagrammen gibt es während des Fluges nur eine leichte Welligkeit und erst gegen Ende der Aufnahme eine größere Abweichung.

Die dritte Spalte zeigt die Lagewinkel des Flugzeugs um seine drei Achsen. Das obere Diagramm enthält die Flugrichtung des Flugzeuges, aus der mit Hilfe der nominellen Flugrichtung der Gier-Winkel (yaw) errechnet werden kann. Darunter befindet sich die Darstellung des Nick-Winkels (pitch). Dieser beschreibt die Neigung des Flugzeugs an der Achse, die horizontal durch das Flugzeug und orthogonal zur Flugrichtung, also parallel zu den Flügeln, verläuft. Zuletzt folgt der Roll-Winkel (roll), zugehörig zur horizontalen Achse parallel zur Flugrichtung. Auch hier ist jeweils zum Ende der Aufnahme eine größere Abweichung zu erkennen. Diese zeigt, dass das Flugzeug am Ende der Aufnahme bereits begonnen hat, von seinem linearen Kurs abzudrehen. Möglicherweise ist die Qualität der SAR-Rohdaten daher am Ende geringer als in der restlichen Aufzeichnung und diese können bei Bedarf abgeschnitten werden.

## 4.2 Analyse der SAR-Rohdaten

Die SAR-Rohdaten sind zum Zeitpunkt der Auswertung von der Transkription bereits nach Kanälen sortiert und die Analyse findet kanalweise statt. Sie sind in Form einer zweidimensionalen Matrix (digitales Bild) angeordnet. Dabei stellen die Zeilen sogenannte Bildzeilen (Rangelines, wie in Abbildung 4) dar, die einem aufgezeichneten Radarecho entsprechen und in Azimutrichtung nacheinander angeordnet sind. Letztendlich sind die Rohdaten ein Abbild der aufgezeichneten Oberfläche, die in Entfernungsrichtung mit dem Sende-Chirp gefaltet und in Azimut aufgrund des SAR-Verfahrens ebenfalls defokussiert sind.

### 4.2.1 Daten-Vorverarbeitung

Aus technischen Gründen werden die Daten heute im F-SAR-System nicht mehr komplex, wie es noch beim Vorgängersystem der Fall war, sondern reell aufgezeichnet. Dies ist erst durch die fortgeschrittene Technik möglich geworden, da dabei die Analog-zu-

Digital-Konverter (ADCs) mit der doppelten Abtastfrequenz arbeiten müssen. Vor der Weiterverarbeitung müssen die Daten daher zuerst von reellen zu komplexen Werten gewandelt werden. Dies kann sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich geschehen.

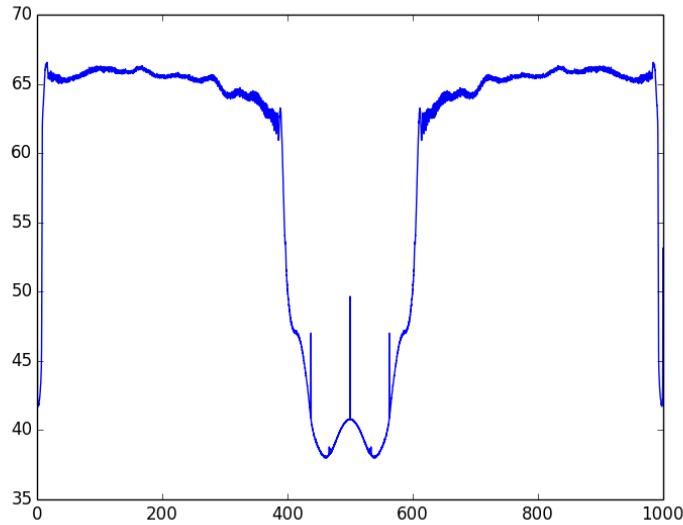


Abbildung 12: Reelle Rohdaten im Frequenzbereich, die Information ist stets redundant.

Für die Reell-zu-Komplex-Wandlung werden die zu verarbeitenden Daten mittels FFT in den Frequenzbereich transformiert. Im ausgegebenen Spektrum in Abbildung 12 sieht man die zwei Spektren der verwendeten Frequenzen, welche genau spiegelbildlich sind. Für die komplexen Daten wird nur das obere Seitenband benötigt. Das rechte wird, wie in Abbildung 13 zu sehen, abgetrennt. Das Spektrum hat eine Bandbreite von 384 MHz, die Abtastrate betrug 500 MHz. Anschließend muss das Spektrum noch soweit geschoben werden, dass sich sein Mittelpunkt genau auf der Frequenz Null befindet, wie in Abbildung 14 zu sehen. Hierzu wird jede Datenzeile um die Hälfte der verwendeten Bandbreite nach links geschoben. Dazu muss diese über einen Dreisatz mit der verwendeten Abtastrate auf PixelEbene umgerechnet werden. Außerdem muss noch um zusätzliche zehn Megahertz geschoben werden, da systembedingt eine so große Verschiebung (Offset) in den Daten vorhanden ist. Diese zeigt sich in einer entsprechend großen Verschiebung des Spektrums zur Null. Nach diesem Ausschneiden und Verschieben werden die Daten wieder mittels einer durch die Bibliothek *numpy.fft*

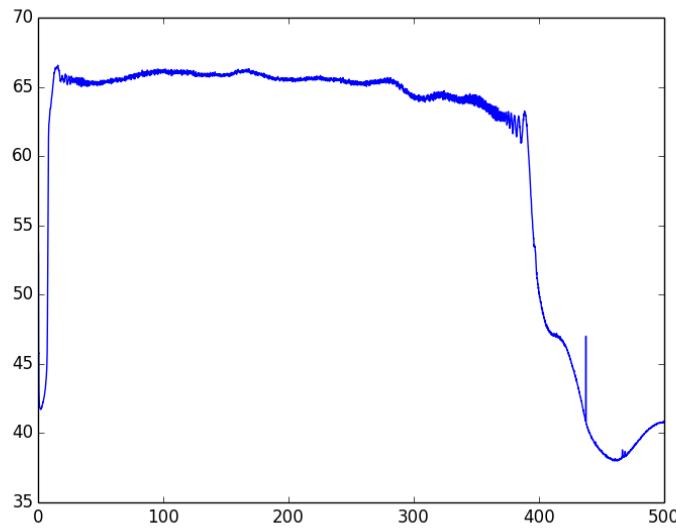


Abbildung 13: Geschnittene Rohdaten im Frequenzbereich (oberes Seitenband).

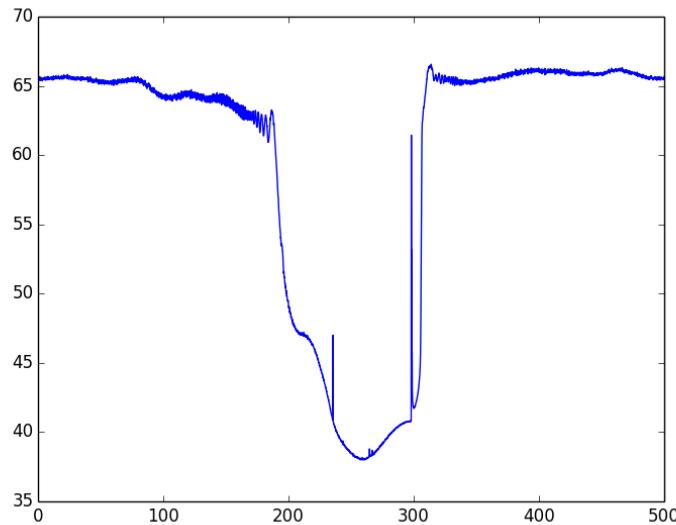


Abbildung 14: Komplexe Rohdaten im Frequenzbereich nach Verschiebung auf Mittelpunkt.

zur Verfügung gestellte inverse FFT (IFFT) zurück in den Zeitbereich transformiert.

Für manche der Analysen sind, für aussagekräftigere Ergebnisse, entfernungskom-

primierte, d.h. mit dem inversen Chirp gefaltete, Daten vorteilhaft. Für diese Entfernungsverarbeitung, die einer Fokussierung entspricht, werden die Daten wieder in den Frequenzbereich transformiert und dort mit einem synthetisch aus den Metadaten erzeugten Chirp multipliziert. Dies entspricht einer Faltung im Zeitbereich, benötigt aber weniger Rechenleistung. Jedoch kommt es aufgrund der zusätzlichen FFTs zu langer Rechenzeit, weshalb wir auf diese zusätzliche Verbesserung im Moment verzichten und die Analyse auf nicht komprimierten Rohdaten durchführen.

#### 4.2.2 Übersicht der Diagramme

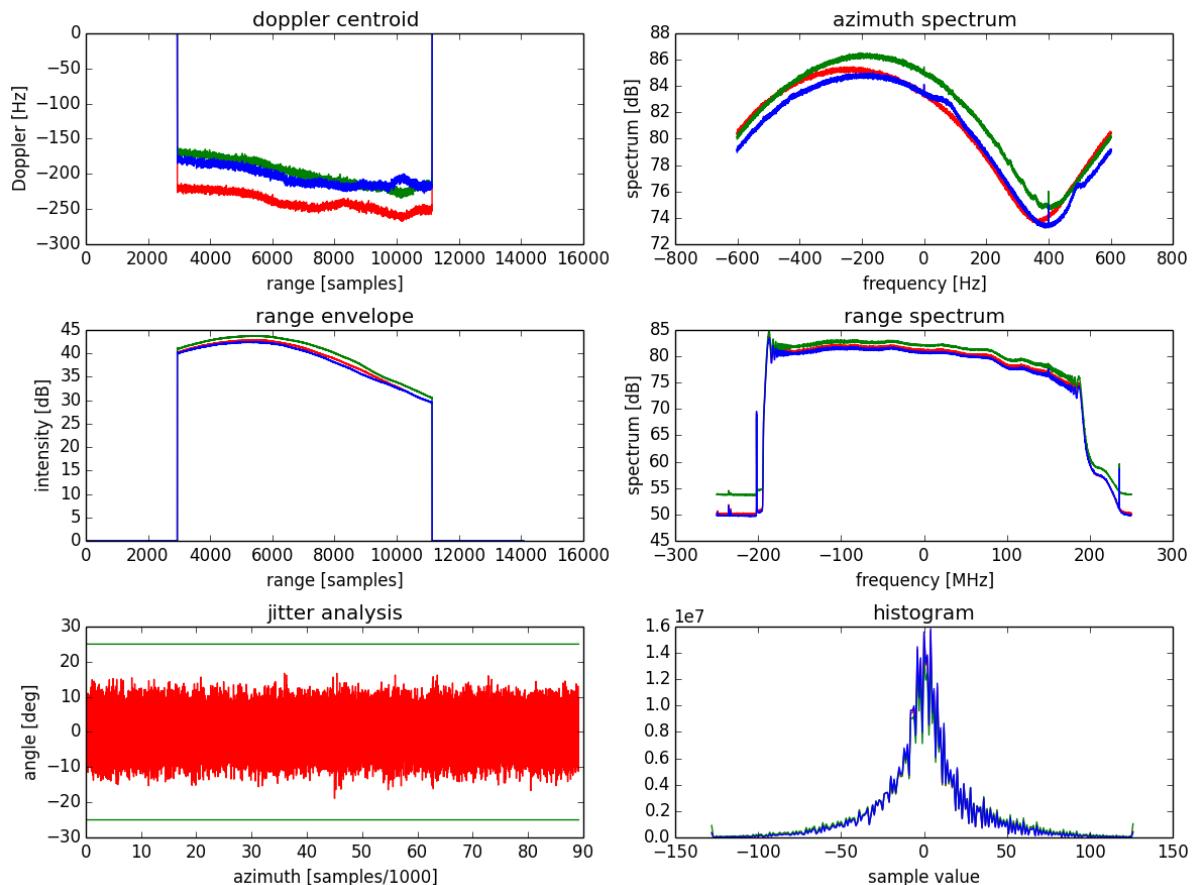


Abbildung 15: Ausgabe der SAR-Rohdatenanalyse

Die Diagramme der Rohdatenanalyse werden mit der Python Bibliothek *Matplotlib*,

welche einen Teil des Pakets *Pylab* darstellt, in einer PNG-Datei ausgegeben. Alle Achsen passen sich hierbei automatisch den auftretenden Werten an, was zwar die Vergleichbarkeit auf den ersten Blick etwas schmälert, jedoch aufgrund der Varianz der Daten die Interpretierbarkeit sicherstellt. In den Diagrammen, bis auf das der Jitter-Analyse, werden jeweils drei Graphen zusammen dargestellt. Dabei entsprechen die Farben Rot, Blau und Grün jeweils 16384 Bildzeilen vom Anfang, der Mitte und dem Ende der Daten. Dies stellt einen Kompromiss dar, der es ermöglicht, in den Daten auftretende Tendenzen zu erkennen, ohne dazu eine zeitaufwändige Analyse der kompletten Daten durchführen zu müssen.

Das Ergebnis der Rohdatenanalyse in Form der Bilddatei mit den später im Detail beschriebenen Diagrammen hilft bei der schnellen, qualitativen Kontrolle neuer Daten und dabei, mögliche Fehler oder Besonderheiten früh zu erkennen und die Prozessierung gegebenenfalls daran anzupassen.

### 4.2.3 Das Azimut-Spektrum

„Wegen der linearen Frequenzmodulation in Azimutrichtung besitzt das Leistungsspektrum eines einzelnen abgebildeten Punktziels die Form des Azimut-Antennendiagramms. Für homogene Gebiete erhält man durch ausreichende Mittelung der Spektren auch eine Abschätzung des Azimut-Antennendiagramms.“<sup>1</sup>

Daher führen wir über die komplexen Daten eine FFT in Azimutrichtung durch, um das Azimutspektrum (Azimuth Spectrum) der Daten zu erhalten. Die Absolutwerte des Ergebnisses quadrieren wir, um die Intensität zu erhalten und mitteln über alle Entfernungs-Bildzeilen. Das Spektrum verschieben wir dann noch um die Hälfte der Azimutlänge des Datenblocks, um die Null-Frequenz in der Mitte der Darstellung zu sehen. Oft, wie auch in Abbildung 15, befindet sich der Maximalwert des Azimut-Spektrums jedoch nicht über der Null. Diese Verschiebung des Antennendiagramms resultiert aus der Lage des Flugzeuges (Gier- bzw. Nickwinkel). Der Grund dafür ist meist ein Seitenwind, den der Pilot durch Entgegensteuern ausgleichen muss, um auf dem exakten Kurs zu bleiben. Der Schwerpunkt des Spektrums bezeichnet den sogenannten Doppler-Schwerpunkt, welche in unserem Beispiel bei ungefähr -200 Hz liegt.

---

<sup>1</sup> siehe [1] S. 256 - Kapitel 8.4.3

#### 4.2.4 Die Doppler-Schwerpunkt Abschätzung

Für eine korrekte Azimutverarbeitung der Daten ist es wichtig den *Doppler-Schwerpunkt* (Doppler-Centroid) möglichst exakt zu kennen. Wird er falsch geschätzt, kann es bei einer Reduktion der Azimutbandbreite zu Problemen kommen, da der dazu genutzte Bandpassfilter falsch platziert wird und es somit zu einer Beeinträchtigung des Signal/Rausch-Verhältnisses kommt. Außerdem wird die Azimutreferenzfunktion, mit der in der Azimutverarbeitung gefaltet wird, abhängig vom Doppler-Schwerpunkt angepasst. Auch hier resultiert ein falscher Wert in einer Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses. Letztendlich führt ein falsch oder ungenau berechneter Doppler-Schwerpunkt auch zu einer Steigerung der Mehrdeutigkeiten im fokussierten Bild, da die Nebenkeulen der Antenne und Frequenzen außerhalb der Nutzbandbreite dann stärker in das Gewicht fallen. Die Verschiebung des Doppler-Schwerpunktes wird durch eine veränderte Fluggeometrie, insbesondere durch einen veränderten Squint-Winkel verursacht [1].

Der Doppler-Schwerpunkt kann mittels einer passenden Gewichtungsfunktion im Frequenzbereich berechnet werden. Dabei wird, unter Annahme einer Symmetrie des Antennendiagramms in Azimut, der Schwerpunkt des Spektrums gesucht, indem die Energien über und unter dem Doppler-Schwerpunkt ausgeglichen werden [8].

Da die dazu notwendigen FFTs aber viel Rechenaufwand bedeuten wird der Doppler-Schwerpunkt in der Rohdatenanalyse mittels eines Korrelationsverfahren im Zeitbereich bestimmt. Der Idee nach bewirkt eine Multiplikation im Zeitbereich mit einer linearen Phase eine Verschiebung des Spektrums im Frequenzbereich. Daraus ergibt sich, dass die Phase der Autokorrelationsfunktion eine Information über den Doppler-Schwerpunkt enthält. Liegt keine Doppler-Schwerpunkt-Verschiebung vor, beträgt die Phase null. Da für benachbarte Werte die Korrelation am größten ist, hat sich die Phase des ersten Koeffizienten der Autokorrelationsfunktion als ideal herausgestellt [8].

Deshalb multiplizieren wir im Zeitbereich die komplexen Daten mit dem Komplex-Konjugierten, der um eine Rangeline verschobenen Daten. Aus der Phase dieser Autokorrelationsfunktion ergeben sich die Werte für die Verschiebung des Doppler-Schwerpunktes. Diese Werte berechnen wir für alle Azimut-Zeilen des ausgewählten Datenblocks. Aus dem Diagramm wird die Änderung des Doppler-Centroids über die Entfernung sichtbar. Diese sollte nahezu linear sein, wobei sowohl ein leichtes Rauschen als auch Variationen aufgrund des Bildinhaltes normal sind. Insbesondere Höhenunter-

schiede oder Wasserflächen können hier zu Abweichungen führen.

Im Gegensatz zu einem Verfahren im Frequenzbereich arbeitet dieser Doppler-Schwerpunkt-Schätzer sehr schnell, jedoch bleibt der auch dort bestehende Nachteil, von möglicherweise unbrauchbaren Ergebnissen bei sehr wechselhaftem Gelände, wie Wasser-Land Übergängen, bestehen [8].

Im Beispieldiagramm erkennen wir hier Werte der Kurven zwischen ungefähr -150Hz und -250Hz, was gut zum benachbarten Azimut-Antennendiagramm passt.

### 4.2.5 Die gemittelte Energieverteilung über die Entfernungsrichtung (Range Envelope)

Um die durchschnittliche Energieverteilung über die Entfernung zu erhalten, mitteln wir die Intensitätswerte aller Bildzeilen über die Flugrichtung. Anschließend rechnen wir das Ergebnis mit:

$$I_{dB} = 10 * \log_{10}(I)$$

in logarithmische Dezibel-Werte um. Dabei ergibt sich eine charakteristische Form, die die Energieverteilung über die Entfernung angibt. Sie wird zum einen durch die schräg auf die Erdoberfläche auftreffende Antennenkeule (Krümmung im vorderen Bereich), als auch durch die aufgrund der steigenden Entfernung geringer werdende rückgestreute Energie (Abnahme im hinteren Bereich) verursacht. Weicht die Form stark von diesem Schema ab, gab es einen Fehler bei der Aufnahme. Auch hier muss man natürlich beachten, dass bei realen Daten immer Abweichungen aufgrund der Topografie und Beschaffenheit der Erdoberfläche auftreten können. Die Verteilung in Abbildung 15 entspricht ziemlich genau der erwarteten Form. Der Bereich an den Rändern ist von geringer Relevanz und wird daher und um die Rechenzeit zu verkürzen nicht berechnet. Im Diagramm wird er mit dem Wert Null dargestellt.

### 4.2.6 Das Entfernungs-Spektrum

Für die grafische Aufbereitung des Spektrums über die Entfernungsrichtung (range spectrum) werden die komplexen Daten mittels FFT in den Frequenzbereich transformiert. Dort werden sie um die halbe Länge der Rangeline verschoben, so dass sich die Null-Frequenz in der Mitte befindet. Zur besseren Übersicht wird für die Ausgabe links

und rechts der Mitte nur die halbe Bandbreite und zusätzliche 10 Megaherz verwendet. Um die Interpretierbarkeit zu verbessern, wird mit der oben beschriebenen Formel das Spektrum in Dezibel umgerechnet. Aufgrund der logarithmischen Darstellung wird der Pegelunterschied zwischen den Signalen und dem Systemrauschen vergleichbar. Der Verlauf des Spektrums sollte näherungsweise einer Rechteckfunktion entsprechen, wobei das genaue Aussehen, wenn kein besonderer Fehler aufgetreten ist, ein Charakteristikum des verwendeten Aufzeichnungskanals mit dessen Hochfrequenz-Komponenten inklusive der Antennen darstellt. Die übrigen Werte sollten möglichst gering sein, um ein gutes Signal-zu-Rausch Verhältnis zu erhalten. Eine Differenz von mehr als 30 dB ist hierbei die Regel. Hat das Spektrum eine andere Form, gab es einen Fehler während der Aufnahme oder der vorangegangenen Transkription und das Diagramm kann zur Fehlerfindung beitragen. Das Beispieldiagramm zeigt eine gute Rechteck-Charakteristik und hat ein Signal/Rausch-Verhältnis von ungefähr 30 dB, was ausreichend viel ist. Die Daten scheinen korrekt zu sein.

### 4.2.7 Die Jitter-Analyse

Schon öfter war nach der Prozessierung (X-Band) aufgefallen, dass manche Daten, insbesondere in den höherfrequenten Bändern, Jitter aufweisen und daher eine schlechte Qualität liefern beziehungsweise ohne zusätzliche Maßnahmen kaum zu gebrauchen sind. Jitter äußert sich als Phasensprünge zwischen den einzelnen Bildzeilen und entsteht wenn die Chirp-Generatoren oder die Analog-Digital-Konverter (ADCs) während der Aufnahme den Takt nicht mit ausreichender Genauigkeit halten können und sich der aufgezeichnete Chirp dabei im Bereich von Nanosekunden verschiebt. Einzelne Punktziele liegen dann in den Daten nicht mehr auf einer gleichmäßigen Kurve, über die sie fokussiert werden können, sondern weisen kleine Sprünge auf, was zu einer Unschärfe im fertigen Bild führt. Daher sollte nun eine Jitter-Analyse nach einem bekannten Algorithmus als Teil der Rohdaten-Analyse umgesetzt werden. Dieser Schritt muss über die kompletten Daten durchgeführt werden, da es von Interesse ist, wo der Jitter auftritt. Hierbei gab es zunächst ein Problem, da es bei dem Versuch die kompletten, viele Gigabyte großen, Rohdaten auf einmal in den Speicher zu laden und zu analysieren, je nach Auslastung des Servers zu einem unvorhergesehenen Verhalten (swapping) kam. Da unter Umständen nicht mehr genug freier Arbeitsspeicher für den Prozess

zur Verfügung stand, wurden die Daten teilweise in die Swap-Datei des Systems, also auf die Festplatte, ausgelagert. Da diese im Gegensatz zum Arbeitsspeicher jedoch viel zu langsam für die ständigen Zugriffe der Berechnungen ist, gerät der Prozess ins Stocken und benötigt eine sehr lange Zeit. Erschwerend kam noch hinzu das sich der Prozess nicht mehr, oder nur noch mit sehr großer Verzögerung, abbrechen ließ. Da ein solcher Zustand zwingend zu vermeiden ist, wurde die Jitter-Analyse schließlich mit einer block-weisen Verarbeitung realisiert.

Dabei werden jeweils Blöcke von 1024 Zeilen verarbeitet. Da das ganze sehr lange dauert, wird zudem nur ein Achtel der Daten, jeweils aus der Mitte der Zeile, genutzt. Sie werden aus der SAR-Rohdatendatei gelesen, mit dem bekannten Verfahren von reellen zu komplexen Werten gewandelt und analog zur Abschätzung des Doppler-Centroids mit dem Konjugiert-Komplexen der um eine Zeile verschobenen Daten multipliziert. Dann werden die Zeilen aufsummiert und die Phase daraus berechnet. Gab es keinen Phasensprung ergibt dies immer einen konstanten Wert. Ansonsten erhält man als Ergebnis zusätzlich den Wert des Phasensprungs. Konstante Trends werden daher herausgefiltert. Dazu werden die Werte geglättet, damit nur noch diese langfristigen Trends darin enthalten sind und die eigentlichen Ergebnisse dadurch dividiert, so dass die Trends nicht mehr enthalten sind. Gibt es keinen Jitter, erhält man lediglich ein leichtes Rauschen um die Null, ansonsten gibt es starke Sprünge. Bei der Betrachtung von Testdaten stellte sich heraus, dass es auch in den niederfrequenten Bändern (L-Band) Jitter gibt, dieser jedoch in den Bildern nicht zu erkennen ist. Wird Jitter bei der Analyse erkannt, sind die Daten in der Regeln unbrauchbar. In Abbildung 15 bewegt sich der Jitter mit einem Rauschen zwischen ungefähr +10 und -10 Grad. Er befindet sich damit im Bereich der grünen Linien, die sich bei 25 Grad befinden und das maximal Tolerierbare darstellen.

### 4.2.8 Das Intensitäts-Histogramm

Die Auswertung der Rohdaten in einem Histogramm wird noch auf den reellen Daten durchgeführt. Diese können Werte zwischen -128 und +127 annehmen, da sie als 8-bit "signed byte" gespeichert werden. Für die Berechnung wurde die Funktion `numpy.histogram()` verwendet, welche die komplette benötigte Funktionalität zur Verfügung stellt.

Das Histogramm zeigt die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Werte, wobei Werte um die Null stets am häufigsten vorkommen (Gaußverteilung der Rückstreuung bei natürlichen Oberflächen). Befindet sich der Mittelwert nicht bei Null gibt es möglicherweise eine Fehlfunktion des Analog-Digital-Konverters (ADC). Werte bei -128 und +127 sind durch das Vorhandensein von Werten außerhalb des durch die ADCs abgetasteten Bereichs bedingt (Sättigung). Diese Werte häufen sich daher am kleinsten und größten möglichen Wert an. Sind diese Randwerte zu groß, könnte während der Datenakquisition ein zu großer Verstärkungsfaktor in der Aufnahmeelektronik eingestellt gewesen beziehungsweise ein zu kleiner Bereich abgetastet worden sein. Dies resultiert in einer Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses. Gibt es gar keine erhöhten Randwerte und die Histogramme sind sehr spitz, war die Empfangsverstärkung zu gering und der maximal mögliche Dynamikumfang wurde nicht ausgeschöpft.

## 5 Modul zur Replica-Verarbeitung

### 5.1 Funktion von Replica-Aufnahmen

Zwischen mehreren Aufnahmen werden während eines F-SAR-Fluges immer wieder sogenannte Replica-Datensätze aufgezeichnet. Diese entsprechen von der Dateizusammensetzung weitgehend regulären Aufnahmen. Allerdings werden hierbei keine Radarechos für Bilder, sondern die reinen Sendesignale aufgezeichnet. Dazu wird wie bei regulären Aufnahmen der Chirp erzeugt, allerdings systemintern direkt zur Empfangseinheit weitergeleitet und anschließend wie ein reguläres Signal in Rangelines aufgezeichnet. Der in den Daten enthaltene Sende-Chirp, wird in der Prozessierung invertiert und als Faltungskern benutzt, um aus den SAR-Rohdaten Bilddaten zu erzeugen. Dies wäre auch mit einem synthetisch erzeugten Chirp möglich, da dessen Erzeugefunktion ohnehin bekannt sein muss, jedoch können mit der Replica-Aufnahme auch die Übertragungsfunktionen in der Hochfrequenzelektronik wieder herausgerechnet werden.

### 5.2 Vorgehensweise bei der Replica-Verarbeitung

Wird während der Transkription von der Software anhand der Metadaten erkannt, dass es sich beim aktuellen Datensatz um einen Replica-Pass handelt, wird automatisch der dazu passende Arbeitsablauf aktiviert. Hierbei werden die Rohdaten geöffnet und alle darin enthaltenen Rangelines aufsummiert, um über diese zu mitteln. Die Rohdaten liegen als reelle Zahlen vor, jedoch werden für die Prozessierung komplexe Werte benötigt. Dazu wird an dieser Stelle eine Reell-zu-Komplex-Wandlung vorgenommen.

In Abbildung 16 kann man erkennen, dass der Chirp reell ist, da der Imaginärteil überall null ist. Die reellen Daten werden dazu mit der in `numpy` vorhandenen FFT-Funktion in den Frequenzbereich gewandelt. Lässt man sich diese Daten als Funktion ausgeben, sieht man die beiden Rechteck-Spektren für das obere und untere Seitenband. Für die komplexen Daten wird nur das obere davon (im rechten unteren Diagramm), mit den positiven Frequenzen, benötigt. Der linke Teil wird einfach abgeschnitten. Anfangs versuchten wir auch hier die Verschiebung des Spektrums im Frequenzbereich mit der Funktion `numpy.roll()` umzusetzen, wobei es allerdings zu einer leichten

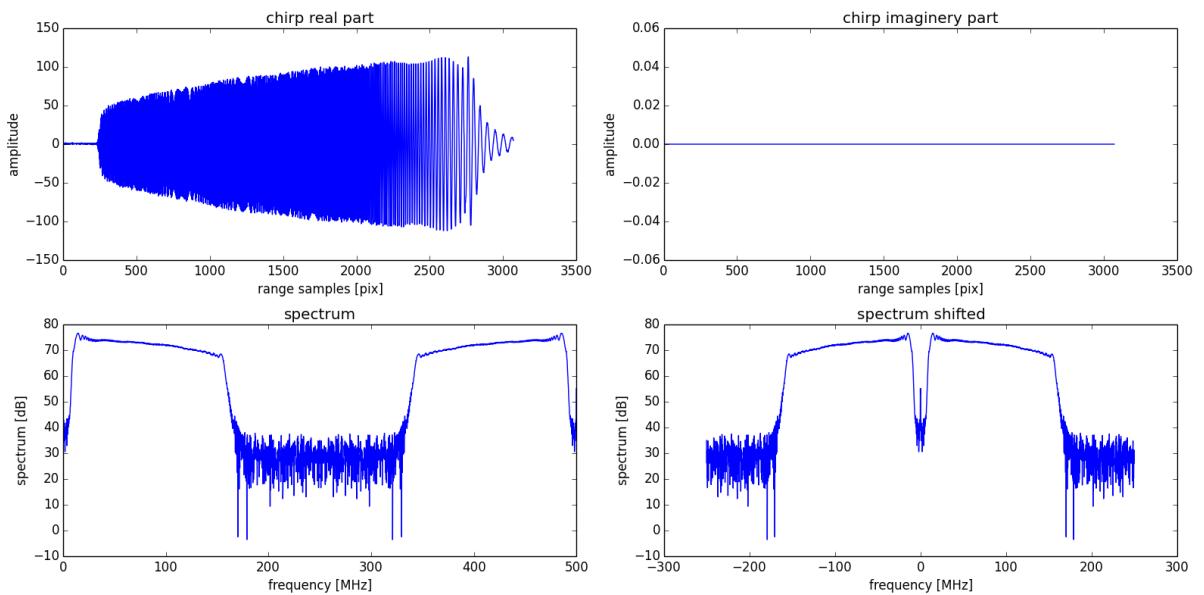


Abbildung 16: Analyse Diagramme der reellen Replica-Daten

Phasenverschiebung im Vergleich zu Daten, die mit der alten Version der Transkription erzeugt worden waren, kam. Der Grund dafür war, dass es zu Ungenauigkeiten im Subpixelbereich kam, da für die Schiebungsfunktion auf Integerwerte gerundet werden musste. Auch wenn es sich dabei um Abweichungen im Nanosekundenbereich handelte, sind diese für eine bestmögliche SAR-Prozessierung problematisch. Daher wird hier die Verschiebung der Frequenz nun im Zeitbereich mittels Multiplikation mit einer Phasenrampe durchgeführt. Diese wird wie folgt erzeugt:

$$\text{Rampe}[i] = \text{numpy.arange}(\text{complexSamples}) * \text{shiftRange} * 2 * \pi * i$$

Das Ergebnis ist bei Betrachtung im Frequenzbereich für den Menschen nicht zu unterscheiden, jedoch im Gegensatz zur vorherigen Version auch im Subpixelbereich genau. In der Formel wird mit der Numpyfunktion `numpy.arange()` eine Phase erzeugt und mit der Schiebung, sowie zweimal Pi multipliziert. Daraus ergibt sich eine Phasenrampe, die mit den Daten multipliziert wird und einer Schiebung des Spektrums im Frequenzbereich entspricht.

Die komplexen Daten in Abbildung 17 enthalten nur noch ein Rechteckspektrum und der Chirp besteht im Zeitbereich aus komplexen Werten.

Die so gewandelten Daten werden als Replica-Daten gespeichert. Während der Tran-

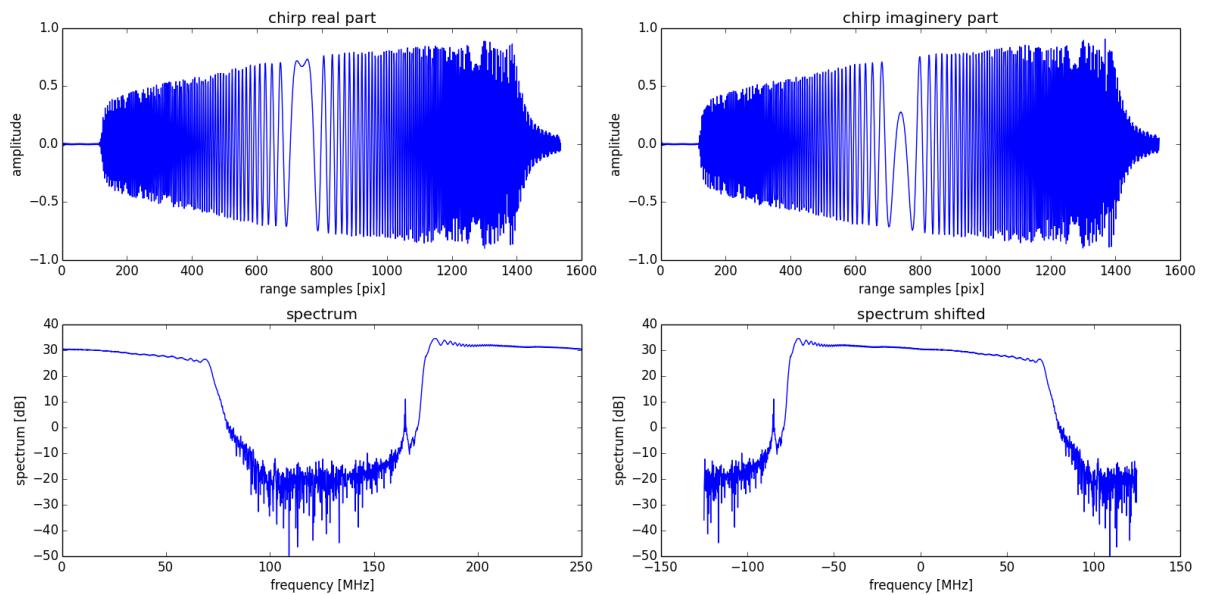


Abbildung 17: Analyse Diagramme der komplexen Replica-Daten

skription von regulären SAR-Rohdatensätzen werden diese, abhängig vom jeweiligen Flug und Modus, zu den SAR-Rohdatensätzen hinzukopiert. Dabei wird überprüft, ob gewisse Werte in den Metadaten übereinstimmen, da nur passende Replica-Daten in der Prozessierung verwendet werden dürfen.

## 6 3D-Antennen-Tool

### 6.1 Hintergrundinformation zum Antennen-Tool

Die F-SAR-Verarbeitung erhält regelmäßig die Ergebnisse der Antennenmessungen aus der Compact Test Range [9]. Dies ist eine spezielle Messkammer in einem Gebäude des Institutes, die der Vermessung von Antennen dient. Sie ist durch Klimatisierung, Abschirmung und Auskleidung mit Mikrowellenabsorbern gegen äußere Einflüsse geschützt und es wird dort durch gekrümmte Parabolspiegel ein für die Antennenmessung nötiges Fernfeld auf kleiner Distanz erzeugt. Antennen können bei Frequenzen von 1GHz bis 100GHz und durch einen Sechsachsen-Positioner dreidimensional vermessen werden [9]. Die Kenntnis über das genaue Abstrahlverhalten der Antenne ist für die Prozessierung sehr wichtig, um vor allem systematische Variationen in der Bildintensität bei der Verarbeitung kompensieren zu können. Die Ergebnisse der Antennenmessungen liegen als umfangreiche CSV-Dateien vor, welche die Abstrahlcharakteristik der Antenne in jede Raumrichtung bei jeder gemessenen Frequenz durch eine komplexe Zahl beschreiben. Die Abstrahlrichtung ist dabei durch zwei Winkel gegeben, off-nadir und azimut, sodass inklusive der Frequenz das Antennendiagramm ein dreidimensionaler Datensatz ist. Um diese Daten in der F-SAR-Prozessierung nutzen zu können, sollen sie in Zukunft mit dem Antennen-Tool aufbereitet, geometrisch in das für die Prozessierung benötigte Koordinatensystem transformiert und in einem einfach zu nutzenden Dateiformat gespeichert werden. Außerdem ist das Tool auch zur Visualisierung der Antennendiagramme gedacht, damit sich Nutzer schnell und auf einfache Art und Weise ein Bild der Abstrahlcharakteristik machen können.

### 6.2 Wie soll das Antennen-Tool aufgebaut sein?

Das Antennen-Tool soll über ein mit PyQt erstelltes **Graphisches User Interface (GUI)** verfügen; dabei sollen Oberfläche und Funktionalität komplett voneinander getrennt sein. Die Oberfläche programmierte ich zuerst vollständig von Hand, um mich mit der genauen Funktionalität von PyQt vertraut zu machen. Später baute ich die GUI mit dem **Qt Designer** nach. Dabei handelt es sich um eine spezielle grafische Entwicklungsumgebung für Qt-Oberflächen. Diese können dann direkt im

Python-Programmcode eingebunden werden. Daraus resultiert ein übersichtlicherer Code, da somit statischer Aufbau und Layout komplett vom restlichen Code getrennt sind. Außerdem wird es zukünftige Änderungen, auch für Personen, die nicht mit dem Code vertraut sind, vereinfachen. Die dynamisch in die PyQt Oberfläche eingebetteten Diagramme werden über die Python Bibliothek **Matplotlib** gerendert.

### 6.3 Aufbau und Funktion des Antennen-Tools

Intern besteht das Tool aus mehreren Python-Modulen. In der Implementierung erfolgt eine klare Trennung von statischen Oberflächenbestandteilen und deren Anordnung, Funktionen der Anzeige und letztlich den Daten und den dazugehörigen Berechnungsroutinen. Der letztgenannte Teil könnte prinzipiell auch alleinstehend über die Kommandozeile, ohne die GUI, verwendet werden, was während der Entwicklung für das Testen einzelner Funktionen hilfreich war. Die Aufbereitung eines Antennendiagramms ist, wie in Abbildung 18 zu sehen, im Wesentlichen ein linearer Ablauf.

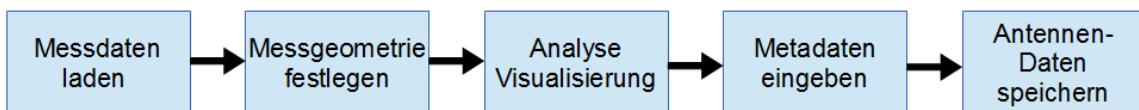


Abbildung 18: Ablauf der Aufbereitung eines Antennendiagramms

Dabei wird im ersten Schritt der Pfad zu den Antennen-Daten eingegeben und diese geladen. Als nächstes wird die Messgeometrie festgelegt. Nach der Koordinatentransformation stehen Diagramme und Analysemöglichkeiten für die Daten zur Verfügung. Danach können noch Metadaten der Antenne eingegeben werden, bevor als letzter Schritt die aufbereiteten Daten an einem gewählten Ort gespeichert werden.

Die Arbeitsschritte entsprechen jeweils einem Modul im Programm: Hauptfenster, Antennenübersichts-Anzeige, Detail-Anzeige, Metadaten-Eingabemaske und Berechnungsfunktionen. Diese werden im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

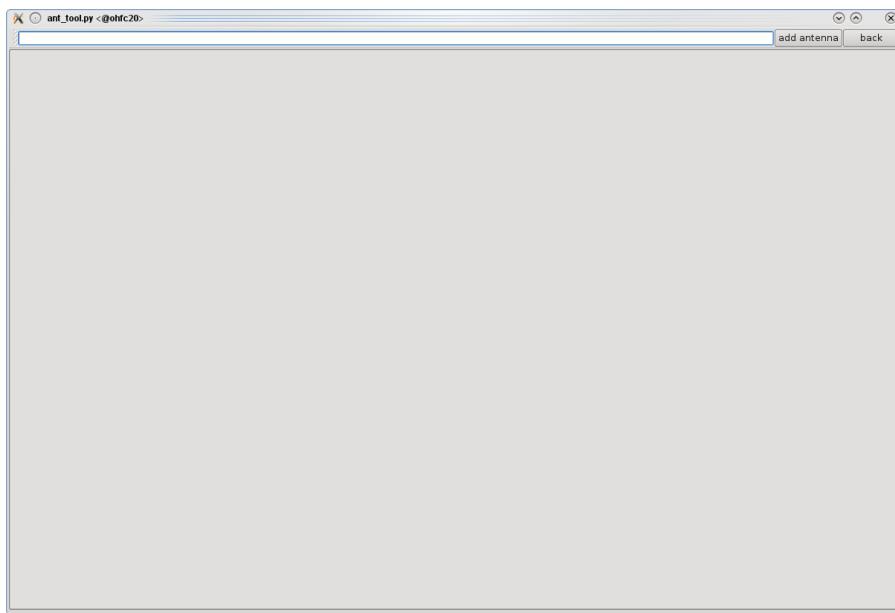


Abbildung 19: Hauptfenster des Antennen-Tools, zum Laden von Antennen-Dateien

### 6.3.1 Das Hauptfenster

Das gesamte Antennen-Tool besitzt nur das in Abbildung 19 zu sehende Fenster. Jedoch wird in diesem für jede neu zu untersuchende Antenne dynamisch ein neuer Tab hinzugefügt. Das Hauptfenster selbst stellt dem Nutzer nur eine Eingabemaske für den Pfad zur Antennen-Datei, einen Lade-Knopf und einen Zurück-Knopf zur Verfügung. Bei Klick auf den Lade-Knopf wird das in der Eingabemaske angegebene Antennen-File geladen. Während diesem Vorgang wird die Eingabezeile dynamisch gegen einen pulsierenden Ladebalken ausgetauscht. Dieser verdeutlicht dem Nutzer den laufenden Vorgang und zeigt, dass das Programm arbeitet und nicht stehen geblieben ist. Die Entscheidung für einen pulsierenden, anstatt einem prozentualen Ladebalken, fiel aufgrund der dadurch gegebenen Trennung von Funktionalität und Oberfläche, da ansonsten erstere immer Rückmeldung an die GUI geben muss. Dabei gibt es einen eigenen Thread für den Ladevorgang, sodass die Oberfläche während diesem nicht blockiert wird und der Nutzer dort weiterarbeiten kann. Der Zurück-Button dient dazu, in einem geöffneten Tab wieder zurück zum vorherigen Verarbeitungsschritt, also auch zur vorherigen Ansicht, zu gelangen.

### 6.3.2 Antennenübersichts-Anzeige

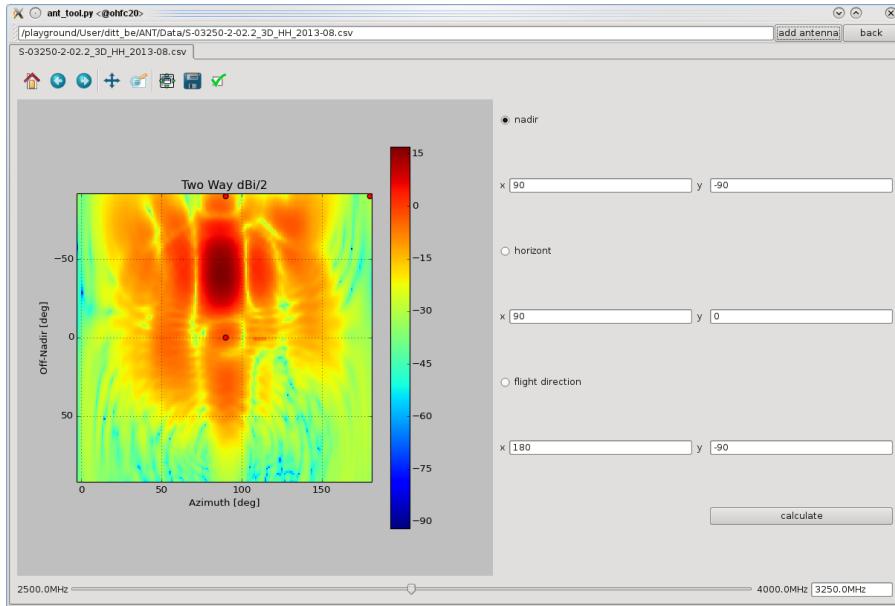


Abbildung 20: Erste Arbeitsansicht des Antennen-Tools mit Diagramm und Auswahl der Richtungsvektoren

Beim Laden einer Antenne wird ein neuer Tab eingeblendet, der die Funktionen des ersten Arbeitsschrittes zur Verfügung stellt. Die Benennung des Tabs erfolgt aus dem eingegebenen Dateinamen. In diesem Tab, zu sehen in Abbildung 20, sind die Elemente Grafik-Werkzeugeiste, die Grafik selbst inklusive einer zugehörigen Farbleiste, ein Schieberegler für die Frequenz mit Anzeigefeld, drei Optionsschaltflächen (Radio-Buttons) mit zugehörigen Ein- und Ausgabefeldern, sowie der „calculate“-Knopf zu sehen. Die Grafik visualisiert die Abstrahlcharakteristik der Antenne als Funktion der Abstrahlrichtung im dreidimensionalen Raum bei einer gewählten Frequenz. Diese kann mittels des unten im Tab befindlichen Schieberegler festgelegt werden, wobei der gültige Frequenzbereich aus den Eingangsdaten übernommen wird. Der genaue, aktuell gewählte Wert wird im weißen Feld rechts des Schiebereglers angezeigt. Alternativ kann der gewünschte Wert auch in dieses Feld eingegeben werden, dieser wird dann auf seine Gültigkeit überprüft. Ist diese gegeben wird der Regler automatisch verschoben und die Anzeige angepasst. Die grafische Ausgabe zeigt den gesamten vermessenen Winkelbereich der Antenne, auf den Achsen sind die Winkelskalen in beide Richtungen

aufgetragen. Für die Anzeige werden die Werte zur besseren Beurteilbarkeit logarithmiert und farbig dargestellt. Die rechts von der Anzeige befindliche Farbskala passt sich dynamisch den vorhandenen Werten an.

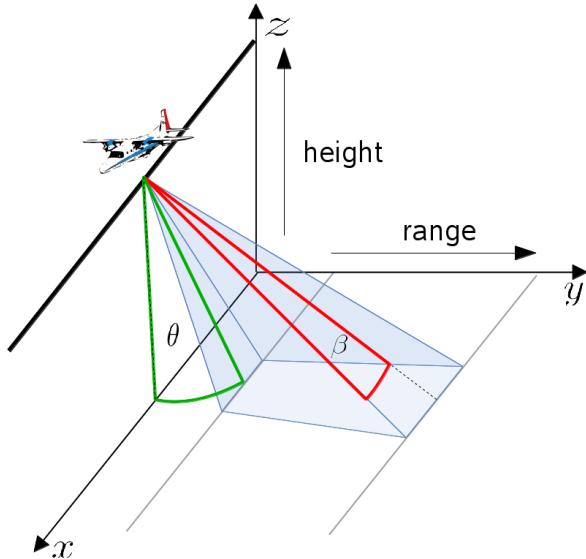


Abbildung 21: SAR-Fluggeometrie mit Azimut- und Off-Nadir-Winkel

Da die Aufnahmen aus der CTR nicht immer gleich ausgerichtet sind, was messtechnische Gründe hat, muss der Anwender eine geometrische Korrektur veranlassen, um in das für die Prozessierung benötigte Koordinatensystem zu gelangen. Dies geschieht über drei auf der Fläche zu positionierende Punkte. Diese werden rot dargestellt und können per Mausklick an gewünschte Koordinaten gesetzt werden. Dabei verändert sich immer der Punkt, dessen Auswahlfeld rechts markiert ist. Unter diesem werden immer die aktuellen Koordinaten des Punktes angezeigt. Alternativ können diese auch dort per Texteingabe geändert werden. Die drei Punkte entsprechen drei Richtungen, da die Messung dreidimensional auf einer imaginären Kugeloberfläche erfolgt und dienen dazu, einen Bezug zwischen dem Koordinatensystem der Messung und der Abstrahlrichtung im physikalischen Raum herzustellen. In Abbildung 21 ist die SAR-Fluggeometrie dargestellt, dabei ist der rote der Azimut-Winkel ( $\beta$ ) und der grüne der Off-Nadir-Winkel ( $\theta$ ). Das für die Prozessierung gewünschte Koordinatensystem bezieht sich auf diese beiden Winkel. Die drei Richtungen der Punkte sind **Nadir** (nadir), die Richtung

senkrecht nach unten, **Horizont** (horizont), die Richtung quer zur Flugrichtung zum Horizont und **Flugrichtung** (flight direction). Diese drei Richtungsvektoren stehen im Raum orthogonal zueinander. Über dem Antennendiagramm befindet sich eine von der Matplotlib zur Verfügung gestellte Werkzeugeiste, mit der die angezeigte Grafik verändert (Ausschnitt vergrößern oder verschieben) oder auch gespeichert werden kann. Dies sind allerdings nur Funktionen zur genaueren Betrachtung der Grafik, die auf den weiteren Programmablauf keinen Einfluss haben. Sind die Raumrichtungen gewählt, die Voreinstellung ist die in Abbildung 20 dargestellte, so wird mit Klick auf den „calculate“-Knopf das Antennendiagramm, unter Berücksichtigung der drei definierten Raumrichtungen, in das für die Prozessierung gewünschte Koordinatensystem überführt und der nächste Verarbeitungsschritt beginnt.

### 6.3.3 Detaillierte Anzeige der transformierten Antennendaten

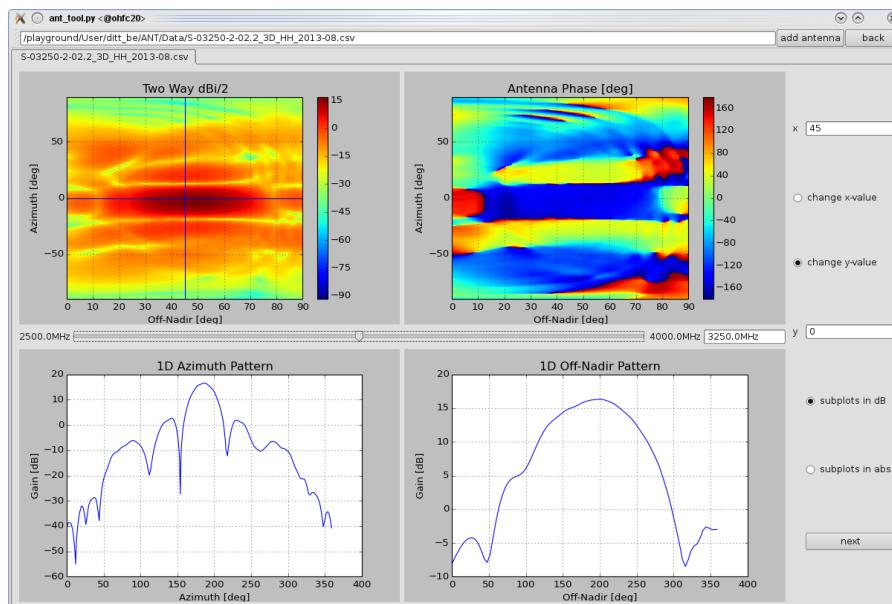


Abbildung 22: Zweite Arbeitsansicht des Antennen-Tools mit transformiertem Antennendiagramm und Analyse-Funktionen

Die Abbildung 22 enthält vier, mit Matplotlib gerenderte Diagramme und einige Steuerelemente für diese. In der Mitte befindet sich wieder der Schieberegler, der wie auch in der ersten Ansicht, zur Änderung der Frequenz genutzt wird. Da sich alle

vier Diagramme auf die Daten der gewählten Frequenz beziehen, werden sie alle beim Ändern der Frequenz aktualisiert. Das erste Diagramm zeigt einen Ausschnitt der Ansicht im vorherigen Arbeitsschritt, wobei dieser abhängig von der gewählten Position der Richtungspunkte mittels einer Koordinatentransformation verändert wurde.

Die dazu nötige Transformationsmatrix wird nur einmal zwischen den Ansichten eins und zwei berechnet. Die eigentliche Transformation wird jedes Mal für die Daten der gewählten Frequenz durchgeführt. Dies führt bei einer Veränderung der angezeigten Frequenz zu einer kurzen Verzögerung, erspart jedoch eine längere Wartepause zwischen den Arbeitsschritten. Außerdem wird hierbei noch eine Interpolation und Skalierung auf die festgelegte Größe von 360 mal 360 Pixel durchgeführt. Dies geschieht mit einer angepassten Transformationsmatrix und der dafür geeigneten Funktion `Scipy.ndimage.map_coordinates`, die eine zweidimensionale Interpolation mit wählbarem Interpolationsverfahren zur Verfügung stellt.

Die Grafik ist wieder logarithmisch dargestellt, auf den beiden Achsen sind Azimut und Off-Nadir jeweils in Grad aufgetragen. Dabei reicht Azimut von +90 bis -90 Grad, also von der Flugzeugnase bis zum Heck und Off-nadir von 0 bis 90 Grad, also vom Nadir-Punkt bis zum Horizont. Dieser Ausschnitt entspricht dem Viertel einer Kugeloberfläche und repräsentiert den für die Prozessierung ausschlaggebenden Teil des Diagramms: Den in welchem der im Flug abzubildende Streifen am Boden enthalten ist. Die daneben angeordnete Farbleiste passt sich auch hier wieder dynamisch den vorhandenen Werten an.

Rechts davon findet sich die zweite Darstellung der Antennenwerte. Auch sie ist zweidimensional und die Werte sind punktentsprechend zur ersten Darstellung. Allerdings wird hier nicht der Absolutwert der komplexen Werte sondern die Richtung (die Phase) der komplexen Zahlen in der komplexen Ebene dargestellt. Auch hier sind die Werte wieder farbcodiert und es existiert eine dynamische Farbleiste, wobei die Werte normalerweise zwischen -180 und +180 Grad verteilt sind.

In der Reihe darunter befinden sich eindimensionale Darstellungen für je einen vertikalen und einen horizontalen Querschnitt durch die Absolutwerte der Daten. Die Lage der Querschnitte lässt sich durch das Versetzen von zwei blauen Linien im ersten Diagramm bestimmen. Dies kann entweder durch einen Klick, wobei hier die zu versetzende Linie durch zwei Auswahlknöpfe am rechten Rand gewählt werden kann oder durch das

Eintragen der Winkel in die jeweiligen Eingabefelder am Rand erfolgen. Dabei geschieht die Synchronisation beinahe instantan, sodass die Anzeigefelder, die blauen Linien und die unteren Diagramme immer die passenden Werte zeigen beziehungsweise sich an der richtigen Position befinden. In der unteren Reihe zeigt die linke Grafik den vertikalen (über Azimut) und die rechte den horizontalen Schnitt (über Off-Nadir) durch die zweidimensionale Darstellung. Ebenfalls durch zwei Auswahlknöpfe am rechten Rand kann ausgewählt werden, ob diese Anzeigen die absoluten oder logarithmische Werte darstellen. In der rechten unteren Ecke befindet sich ein „next“-Knopf, um zum dritten Arbeitsschritt zu gelangen.

#### 6.3.4 Ansicht zur Eingabe der Metadaten

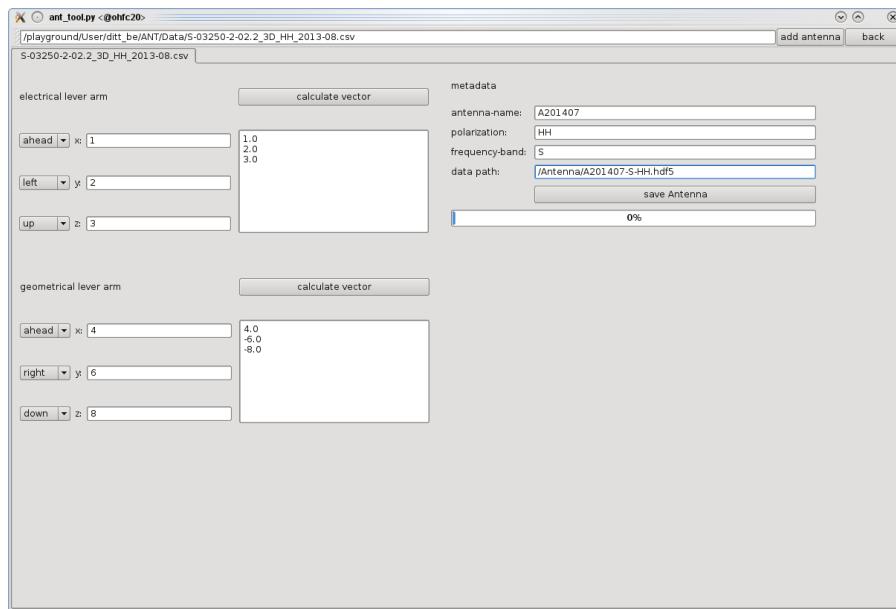


Abbildung 23: Dritte Arbeitsansicht des Antennen-Tools zur Eingabe der Metadaten

Die dritte Ansicht, zu sehen in Abbildung 23, dient der Eingabe der Metadaten der Antenne. Dazu gibt es zwei identische Masken zur Eingabe der Werte für den geometrischen und den elektrischen Hebelarm (lever arm). Dies sind jeweils Vektoren, welche den räumlichen Versatz der Lageerfassungseinheit (IMU - Inertial Measurement Unit) des Flugzeuges zur Antenne angeben. In der IMU wird mittels GPS- sowie Lage-,

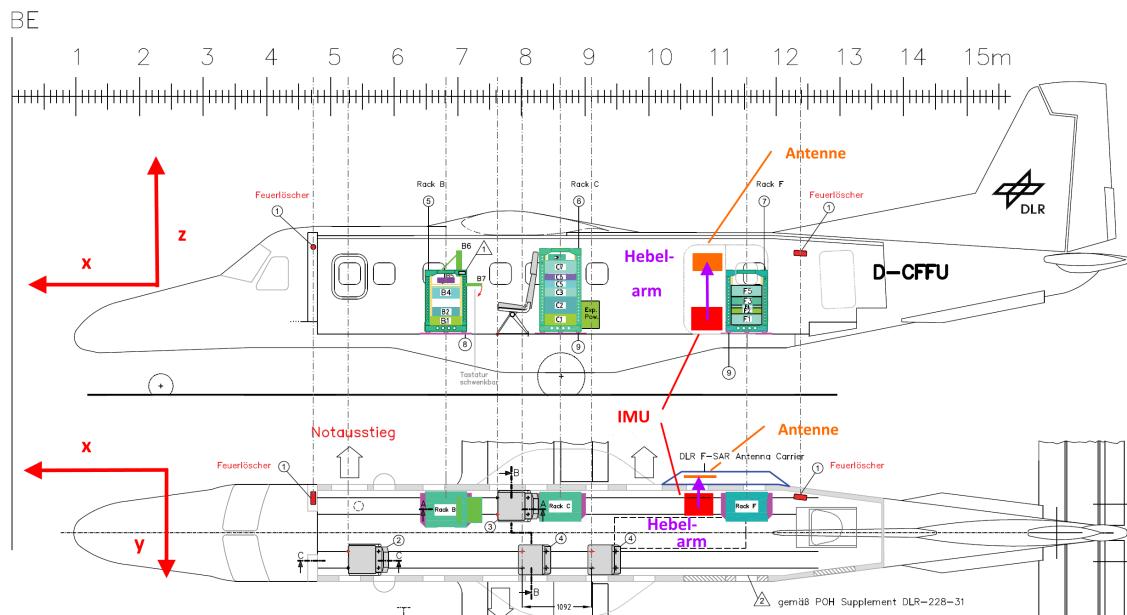


Abbildung 24: Technischer Aufbau des F-SAR mit Antennen, IMU und Hebelarmen

Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren die aktuelle Position des Flugzeuges erfasst. Der GPS-Sensor befindet sich zwar an einer anderen Position, jedoch wird dieser Versatz schon in den Daten korrigiert. Die IMU ist in Abbildung 24 als rotes Rechteck dargestellt. Dabei bezeichnet der geometrische Hebelarm den Vektor zum geometrischen Zentrum und der elektrische Hebelarm zum sogenannten Phasenzentrum der Antenne. Das Phasenzentrum ist der Punkt relativ zu dem das Radar Distanzen misst und auch der Hebelarm, der für die Prozessierung relevant ist. Der elektrische Hebelarm kann allerdings nicht direkt gemessen werden. Die Antennen sind in Abbildung 24 orange dargestellt, der Hebelarm violett.

Im Antennenhalter des F-SAR-Systems können von manchen Antennen-Typen mehrere gleichzeitig genutzt werden. Werden diese parallel, für sogenannte mehrfrequente oder interferometrische Aufnahmen eingesetzt, ist es wichtig den Abstand der Phasenzentren der Antennen zueinander zu kennen. Hierbei ist die CTR-Messung von großer Bedeutung: Obwohl sie nicht in der Lage ist, absolute Messungen des elektrischen Hebelarms zu liefern, kann sie sehr wohl den genauen Abstand zwischen unterschiedlichen Antennen messen. Mit dieser Information können die geometrischen Hebelarme relativ zu einer vom Nutzer bestimmten Referenzantenne korrigiert werden.

Die beiden Eingabemasken besitzen je drei Eingabefelder für die drei Raumrichtungen und jeweils ein Auswahlmenü, welches angibt, welche der sechs möglichen Richtungen im Flugzeug (vorn, hinten, rechts, links, oben und unten) gemeint ist. Dadurch können Diskrepanzen zwischen dem Messkoordinatensystem und dem der Prozessierung ausgeglichen werden. Mit einem Klick auf den „calculate vector“- Knopf wird der eingegebene Vektor in das für die Prozessierung genutzte Koordinatensystem, vorn (x) - links (y) - unten (z) umgerechnet und im darunterliegenden Ausgabefenster angezeigt. War die Eingabe oder Richtungsauswahl fehlerhaft, erscheint eine entsprechende Meldung.

Rechts unten gibt es drei weitere Eingabefelder für den Namen der Antenne, die vermessene Polarisation und das genutzte Frequenzband. Aus diesen drei Eingaben wird automatisch ein Vorschlag für einen Dateiname erzeugt, der jedoch noch geändert werden kann und um den gewünschten Speicherpfad für die Datei ergänzt werden sollte. Mit Klick auf den „save“-Knopf in der rechten unteren Ecke wird eine Antennendatei im hdf5-Format [10] und eine PNG-Datei mit den Diagrammen aus Arbeitsschritt zwei an den gewünschten Speicherort geschrieben. Dies dauert einige Sekunden, da dabei die Koordinatentransformation und Interpolation für alle enthaltenen Frequenzen durchgeführt wird. Während dieser Zeit erscheint links unten ein pulsierender Ladebalken. Auch das Speichern wird wieder in einem eigenen Thread durchgeführt, sodass die Oberfläche weiterhin benutzbar bleibt. Dadurch lässt sich gleichzeitig eine neue Antenne laden, mehrere speichern und für eine weitere Metadaten eingeben, Raumpunkte wählen oder die Messungen begutachten.

## 6.4 Funktionsweise der Berechnungen im Hintergrund

Die erste Funktion des Berechnungsmoduls dient dem Einlesen der Antennendaten aus der CTR. Diese liegen in Form einer mehrere Gigabyte großen CSV-Datei vor. In den ersten zehn Zeilen befinden sich Metadaten wie Antennenname, Ausdehnung der Achsen und Intervalle der Frequenzachse. Die Zeilen danach sind alle gleich lang und beinhalten jeweils die gemessenen Werte für einen Messpunkt über alle Frequenzen. Sie müssen zeilenweise ausgelesen und entsprechend der Metainformationen in ein dreidimensionales Array geschrieben werden. Dabei ist außerdem noch zu beachten, dass immer zwei aufeinanderfolgende Zahlen zu einem komplexen Wert zusammengefasst werden müssen und diese in einem speziellen Format vorliegen, das erst umgerechnet werden muss.

Dieses Umrechnen, aber auch insbesondere das Lesen der ASCII-Werte geschieht sequenziell und benötigt bei einer 1,5GB großen Ausgangsdatei ungefähr eine Minute. Versuche mit anderen Verfahren, beispielsweise den Numpy-Funktionen `loadtxt()` oder `genfromtxt()`, sowie einer ähnlichen Funktion der Pandas-Bibliothek ergaben, dass diese nicht schneller, aber umständlicher zu benutzen sind als eine eigens implementierte Schleife und in manchen Fällen gar nicht für solch große Dateien geeignet sind. Daher blieb es bei dem zeilenweisen Texteinlesen, zu Listen konvertieren, umrechnen und im Array einsortieren. Zu Testzwecken wurde eine Antennendatei als binäres Numpy-Array gespeichert und von dort eingelesen, was die Ladezeit während der Entwicklung deutlich verkürzt hat.

Eine weitere Funktion der Antennen-Objekt-Klasse berechnet die Transformationsmatrix für die Koordinatentransformation der Daten, abhängig von den gewählten Richtungspunkten. Die 2x2 Transformationsmatrix zwischen dem Messkoordinaten-system und dem in der Prozessierung gewünschten enthält vier Unbekannte, weitere zwei kommen für eine mögliche Verschiebung (Translation) dazu. Da wir jedoch die X- sowie die Y-Koordinaten der drei Punkte vor, als auch nach der Transformation kennen, erhalten wir ein lineares Gleichungssystem mit sechs Unbekannten. Dieses lösen wir abhängig von den gewählten Punkten auf und berechnen anhand der nun bekannten Rotation und Translation eine Transformationsmatrix für die Daten. Es entsteht dabei je eine Art Lookup-Matrix für alle X- und Y-Koordinaten, aus der man ablesen kann, auf welchen Punkt in den ursprünglichen Daten zurückgegriffen werden soll, um den Wert für die neue Matrix im Koordinatensystem der Prozessierung zu erhalten. Da darin auch nicht ganzzahlige Werte vorkommen, wird eine zweidimensionale Interpolationsfunktion benötigt, um die Zwischenwerte zu berechnen. Die Lookup-Matrizen werden im Objekt zur späteren Nutzung als Objektvariablen gespeichert.

Außerdem gibt es noch kleinere Funktionen, die die Transformation für die ganzen Daten letztendlich durchführen, in der GUI eingegebene Metadaten im Objekt speichern, sowie je eine zum Speichern der erzeugten Daten und zum Erstellen eines PNG-Bildes mit den Diagrammen der GUI. Diese werden analog zu den jeweiligen GUI-Funktionen mittels Matplotlib erzeugt und gespeichert. Die eigentlichen Daten werden zur unkomplizierten Nutzung von anderen Programmen als `hdf5`-Datei gespeichert. Dieses für Supercomputer und zum Speichern großer Datenmengen entwickelte Dateiformat

bietet eine hierarchische Datenstruktur und die Möglichkeit sowohl Metadaten als auch komplexe Datenprodukte zusammen zu speichern. Weiterhin ist das Format darauf optimiert, beliebig große, mehrdimensionale Tabellen schnell zu lesen, insbesondere da es sich dabei komplett um binäre Daten handelt. Intern bestehen die hdf5-Dateien aus einem Wurzelverzeichnis, in dem sich Unterordner mit Daten oder weiteren Ordnern befinden. Daten werden darin immer in Form von beliebig dimensionalen Arrays abgelegt. Metadaten können sowohl den Ordnern als auch einzelnen Datensätzen zugewiesen werden. In der Datei werden aktuell die transformierten Daten, sowie Metadaten wie Achsenausdehnungen, die beiden Hebelarme, der Antennenname, die Polarisierung und das Frequenzband gespeichert. Dabei ist die Datei beliebig erweiterbar.

## 7 Schlussbemerkung

Im Rahmen der vergangenen zwei Praxisphasen wurde die Neuentwicklung der Transkriptionssoftware für F-SAR unter Python fertig gestellt. Dies sind insbesondere die Module zur Analyse der SAR-Rohdaten und der Navigationsdaten, die Replica-Aufbereitung mit Verarbeitungs- und Analyse-Funktion, sowie das Antennen-Tool zur Analyse und Aufbereitung von Antennendaten. Alle vier Programme können in Zukunft operativ eingesetzt werden und verfügen über alle geforderten Funktionen. SAR-Rohdatenanalyse, Navigationsdatenanalyse und Replica-Aufbereitung werden bereits operationell im Rahmen der Kampagnendaten-Verarbeitung eingesetzt. Dabei ist anzumerken, dass es bei Änderungen der F-SAR-Hardware-Konfiguration aufgrund des experimentellen Charakters des F-SAR-Systems zu Änderungen der Transkriptionssoftware kommen kann. Jedoch lassen sich diese im leichtverständlichen Python-Quellcode schnell und einfach umsetzen. Das Antennen-Tool soll in Zukunft regelmäßig benutzt werden, um neue Antennendaten aus der CTR für die Prozessierung von F-SAR-Rohdaten leicht und schnell aufzubereiten zu können.

Während Replica-Aufbereitung und Navigationsdatenanalyse schon den Großteil der in den Daten steckenden Information nutzen, gibt es sowohl bei der SAR-Rohdatenanalyse als auch beim Antennen-Tool noch Raum für Erweiterungen. Bei der SAR-Rohdatenanalyse könnten in manchen Diagrammen durch die Nutzung von in Entfernungsrichtung fokussierten Rohdaten aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden. Dazu müsste jedoch eine ausreichend schnelle Kompression implementiert werden, sodass die Analyse weiterhin in kurzer Zeit durchgeführt werden kann. Außerdem besteht die Möglichkeit, je nach Bedarf noch weitere Analyse-Funktionen hinzuzufügen. Auch beim Antennen-Tool können noch zusätzliche Funktionen ergänzt werden. So ist für die Zukunft eine Abschätzung des Phasenzentrums der Antenne angedacht. Auch lässt sich das verwendete HDF5-Dateiformat beliebig erweitern, um weitere Metainformationen zu den Datenprodukten hinzuzufügen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass vier Programme entstanden sind, die dabei helfen, die SAR-Rohdaten für die nachfolgende Prozessierung schnell und einfach aufzubereiten und zu analysieren.

## Literatur

- [1] H. KLAUSING, W. H.: *Radar mit realer und synthetischer Apertur*. Oldenburg, 2000. – ISBN 3-486-23475-7
- [2] *Radartutorial: Grundlagen der SAR-Technologie*. <http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.de.html>. Version: August 2014
- [3] *Abbildung des F-SAR Systems des DLR inklusive der Frequenzbänder*. [http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/images/institut/sar-technologie/fsar1-500\\_380.jpg](http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/images/institut/sar-technologie/fsar1-500_380.jpg),. Version: August 2014
- [4] *Webseite des DLR über das F-SAR System*. [http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabcid-2326/3776\\_read-5691/](http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabcid-2326/3776_read-5691/). Version: August 2014
- [5] *Bild eines Gletschers aus der Gallerie des Institutes HR*. [http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/images/institut/picture\\_gallery/i03omegas0109x1\\_t03\\_glaciersledgetraces.jpeg](http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/images/institut/picture_gallery/i03omegas0109x1_t03_glaciersledgetraces.jpeg). Version: Juli 2014
- [6] *Bild eines Waldes aus der Gallerie des Institutes HR*. [http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/images/institut/picture\\_gallery/i09op09af0205x1\\_pol\\_wald.jpeg](http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/images/institut/picture_gallery/i09op09af0205x1_pol_wald.jpeg). Version: Juli 2014
- [7] *Google Maps*. <https://www.google.de/maps/>. Version: August 2014
- [8] SCHEIBER, Rolf: *Bestimmung der Doppler-Parameter von flugzeug- und weltraumgestützter SAR-Systeme bei der zweidimensionalen Datenverarbeitung*. 1994
- [9] *Webseite des DLR über die Compact Test Range*. [http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabcid-6832/11242\\_read-26088/](http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabcid-6832/11242_read-26088/). Version: Juli 2014
- [10] THE HDF GROUP: *Hierarchical Data Format, version 5*. 1997-2014. – <http://www.hdfgroup.org/HDF5/>