

Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Änderungsdetektion mit Hilfe kohärenter SAR Bildanalyse

vorgelegt von

Sebastian Telzer

U102627, UNIGIS MSc Jahrgang 2012

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:
Prof. Dr. Josef Strobl

Hürth, 18.12.2014

Danksagung

Die vorliegende Master-Thesis wurde mit der Unterstützung der Abteilung Aufklärung und Sicherheit im Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen angefertigt. Das analysierte Satellitenbildmaterial wurde ebenfalls durch die Abteilung Aufklärung und Sicherheit bereitgestellt.

Besonderen Dank möchte ich dem Leiter der Abteilung Aufklärung und Sicherheit Herrn Prof. Dr. Helmut Süß und seinen Mitarbeitern Herrn Dr. Rainer Speck und Herrn Dr. Gerald Rode aussprechen, die mich in allen fachlichen Fragen unterstützt haben.

Außerdem möchte ich der Firma EXELIS für die Bereitstellung der Software ENVI und SARscape danken, sowie für den qualitativ hochwertigen technischen Support, der mir geholfen hat etliche Klippen zu umschiffen.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie danken, die mich während des Studiums und insbesondere während der Abschlussarbeit unterstützt und mir den Rücken freigehalten hat, damit ich mich vollkommen darauf konzentrieren konnte.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Master-Thesis selbstständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel benutzt sowie die Stellen der Arbeit, die in anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, durch Angaben der Quellen sichtbar gemacht wurden.

Datum, Sebastian Telzer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
1.1	Zielsetzung der Master-Thesis.....	7
1.2	Untersuchungsgebiet San-Andreas-Graben.....	7
2	Grundlagen der Satelliten-Fernerkundung.....	12
2.1	Grundlagen der SAR-Fernerkundung.....	12
2.2	Die SAR-Aufnahmegeometrie	15
2.3	Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen.....	18
2.3.1	Oberflächenstreuung	19
2.3.2	Volumenstreuung	20
2.3.3	Direkte Reflektion	21
2.3.4	Bildstörung durch Speckle-Rauschen	24
2.4	Das Interferometrie Verfahren.....	25
2.4.1	Prinzipieller Ablauf interferometrischer Untersuchungen	26
2.4.2	Erzeugen von Interferogrammen.....	28
2.4.3	Kohärenz zwischen SAR-Bildern	28
2.4.4	Erzeugen absoluter Phasen durch Phase Unwrapping	31
2.5	Arten der Interferometrie.....	31
2.6	Differentielles Interferometrisches SAR zur Änderungsdetektion.....	33
3	Die TerraSAR-X Mission	35
3.1	Satelliten Orbit.....	35
3.2	Sensor des TerraSAR-X	35
3.3	TerraSAR-X Produkte	36
3.4	TerraSAR-X Aufnahmemodi	37
3.5	Vergleich SAR-Bild zu optischen Bild	40
4	Verfahren zur interferometrischen Analyse mit SARscape.....	42
4.1	Bestimmung der Basislinien.....	42
4.2	Ablauf interferometrische Untersuchung in SARscape.....	43
4.3	Erzeugen der Interferogramme	45

4.4	Refinement und Reflattening	49
4.5	Umrechnen der Phaseninformationen in Höhenwerte	51
4.6	Phase to Displacement Conversion	52
4.7	Dual Pair Interferometry	53
4.7.1	Verschiebungsannahme abrupte Verschiebung.....	55
4.7.2	Verschiebungsannahme keine Verschiebung im ersten Paar	56
4.7.3	Ergebnisse Dual Pair Interferometry	58
4.7.4	Vergleich der Ergebnisse von Analyse 1,3 und 9	58
4.7.5	Vergleich der Ergebnisse von Analyse 2 und 4	60
4.7.6	Vergleich der Ergebnisse von Analyse 5 und 7	62
4.7.7	Vergleich der Ergebnisse von Analyse 8 und 10	63
4.8	Simulation einer Oberflächenänderung in SARscape	64
5	Bestimmung der Phasendifferenzen in Pixelauflösung	68
6	Ergebnisse und Ausblick.....	72
7	Verzeichnisse	74
7.1	Abbildungsverzeichnis	74
7.2	Tabellenverzeichnis	76
7.3	Formelverzeichnis	76
7.4	Literaturverzeichnis	77
7.5	Internetquellenverzeichnis.....	77
I.	Aufbau der Testdaten	79
II.	Messungen der Phasen und Amplituden der Corner-Reflektoren	83
III.	Ablauf einer Interferometrischen Untersuchung	85
IV.	Abkürzungen	86

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung der Master-Thesis

Diese Master-Thesis beschäftigt sich mit einem Teilgebiet der Satelliten-Fernerkundung. Das Ziel besteht darin nachzuweisen, ob man mit Hilfe der Synthetischen Apertur Radar (SAR) Technologie Bewegungen an plattentektonischen Grenzen nachweisen kann. Die Herausforderung besteht darin die Veränderungen an solchen Grenzen zu detektieren.

Der Auswahl des Untersuchungsgebietes wird daher ein besonderes Augenmerk gewidmet.

Zunächst werden die Grundlagen für die SAR-Fernerkundung in Kapitel 2 gelegt. Dabei werden physikalischen Eigenschaften der SAR-Bildaufnahmen beschrieben. Ebenfalls wird in diesem Kapitel das Prinzip der Interferometrie hergeleitet, welches im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet. Anschließend werden im Kapitel 3 die Eigenschaften der TerraSAR-X Mission beschrieben und hergeleitet, welche Produkte dieser Satellitenmissionen für die vorliegende Arbeit verwendet werden.

Der Hauptteil der Arbeit beschreibt in Kapitel 4 die Analyse innerhalb der SARscape Toolbox. Für die Analyse wird die kommerzielle Software ENVI der Firma EXELIS verwendet. Dieses Kapitel stellt die praktische Umsetzung des Kapitels 2.4 dar. Die Ergebnisse der durchgeführten interferometrischen Untersuchungen werden in Kapitel 4.7 aufgeführt und analysiert. Es werden auch Phasenänderungen simuliert und die dabei erzeugten Ergebnisse in Kapitel 4.8 aufgelistet. Anschließend erfolgt in Kapitel 5 zur Überprüfung der interferometrischen Messungen die direkte Phasenmessung bei Referenzpunkten. Die Änderung der Phasenunterschiede zwischen diesen Referenzpunkten entspricht einer Entfernungsänderung und soll mit den in Kapitel 4 detektierten Verschiebungen verglichen werden.

Im letzten Kapitel folgt noch eine kurze Zusammenfassung und an Hand der durchgeführten Arbeiten ein Ausblick für die weitere Forschung gegeben.

1.2 Untersuchungsgebiet San-Andreas-Graben

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit befindet sich im Bundesstaat Kalifornien in der Nähe verschiedener Ballungsräume. Der Bundesstaat Kalifornien wird in Nordwest-Südost Richtung durch die San Andreas Verwerfung durchzogen (siehe Abbildung 1). Dies stellt ein Grabensystem dar, welches sich zwischen zwei tektonischen Platten (Nordamerikanische Platte und Pazifische Platte) gebildet hat. Dabei schiebt sich die Nordamerikanische Platte in Richtung Südost, während sich die pazifische Platte nach Nordwest schiebt. Diese Verschiebungen liegen in einer Größenordnung von durchschnittlich 5 [cm] pro Jahr¹, und werden immer wieder durch Erdbeben begleitet. Daher wird für die Untersuchung von einer messbaren Verschiebung über den gesamten Untersuchungszeitraum ausgegangen. In

¹ <http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/move.html>

Abbildung 1 sind neben dem Grabensystem Erdbeben eingezeichnet, die im Untersuchungszeitraum (27.11.2013 und 21.09.2014) stattgefunden haben².

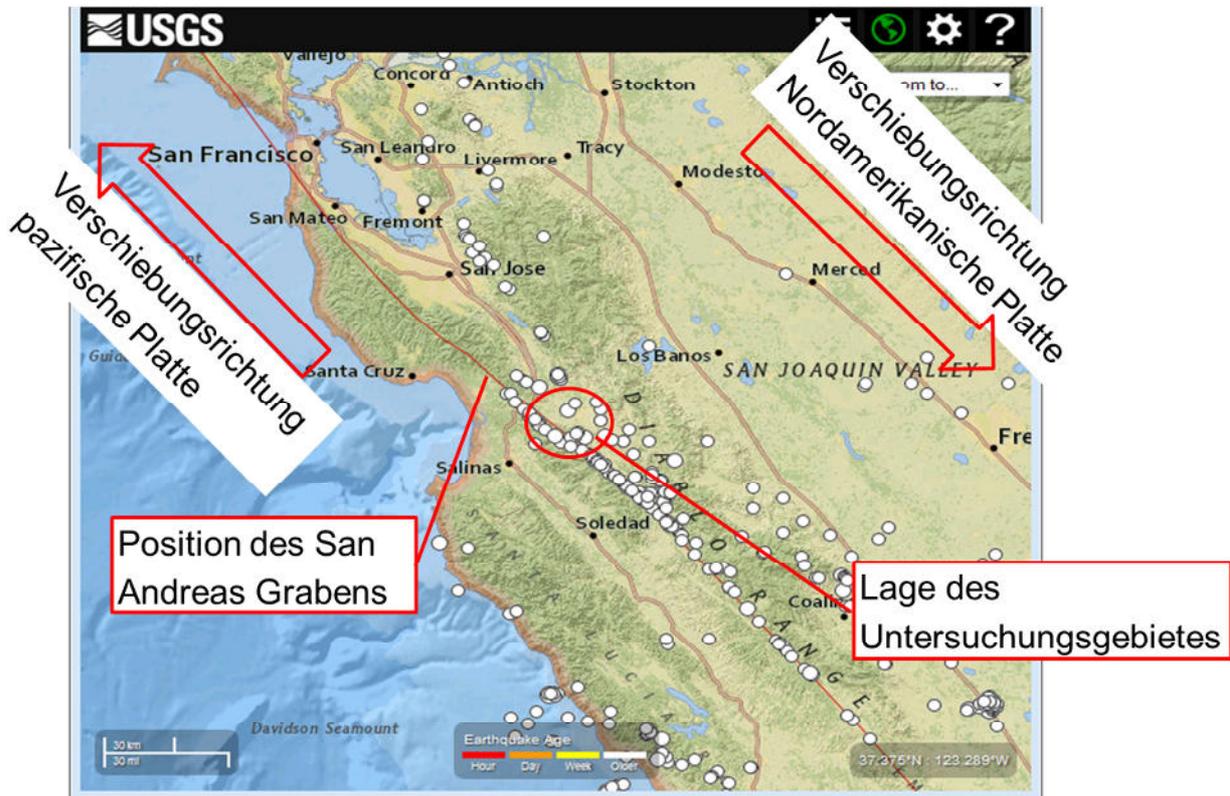


Abbildung 1: Erdbeben entlang des San-Andreas-Grabens (Quelle: USGS³)

Das Untersuchungsgebiet liegt nahe der Westküste der vereinigten Staaten im San Benito County ca. 80[km] südlich der Stadt San José und 150[km] südlich San Francisco. Diese Region verfügt über ein warmgemäßigtes Klima. Die Jahresmitteltemperaturen liegen bei ca. 14°C (Köln 10°C) und die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge liegt bei 348 [mm] (Köln 780 [mm])⁴. Dabei fallen die meisten Niederschläge in den Monaten November bis März. Dies stellt gleichzeitig den Zeitraum der Messkampagne dar. Aufgrund der Temperaturverteilung ist davon auszugehen, dass die Monate November bis März ebenfalls die stärksten Änderungen der Vegetation beinhalten. Veränderungen der Vegetation können zu Änderungen im Rückstreuverhalten führen.

Im Zeitraum der Untersuchung hat es mehrere Erdbeben im Umfeld des Untersuchungsgebietes gegeben (siehe Abbildung 1). Ein Erdbeben fand am 05.07.2014 mit einer Stärke von 4,6 in der Nähe von San Bernardino (ca. 480 [km] südwestlich des Untersuchungsgebietes⁵) statt. Das stärkste dieser Erdbeben wurde am 24.08.2014 mit einer

² <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>

³ <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>

⁴ <http://de.climate-data.org/>

⁵ <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci15520985#summary>

Stärke von 6,1 mit dem Epizentrum bei der Stadt Napa rund 180 [km] nördlich des Untersuchungsgebietes gemessen⁶.

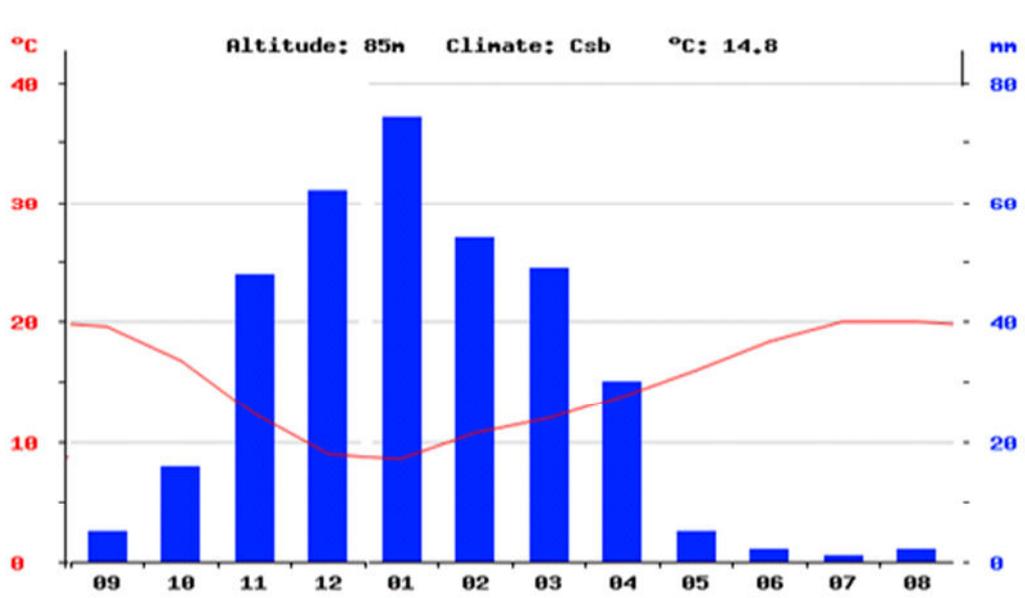


Abbildung 2: Klimataabelle der Stadt San José (Quelle: de.climate-data.org⁷)

Es wird davon ausgegangen, dass eines dieser Erdbeben messbare Veränderungen an der Erdoberfläche im Untersuchungsgebiet verursacht. In der Untersuchung wird diese Annahme geprüft.



Abbildung 3: laterale Verschiebung durch das Napa Erdbeben vom 24.08.2014 (Quelle: usgs.gov⁸)

Jedoch muss dabei beachtet werden, dass lediglich Verschiebungen in Entfernungsrichtung mit dem gewählten Verfahren detektiert werden können. In Abbildung 4 ist erkennbar, dass lediglich ein kleiner Teil der erwarteten Verschiebung in dieser Richtung erfolgt.

⁶ <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/napa-heftiges-beben-erschuettert-kalifornien-a-987830.html>

⁷ <http://de.climate-data.org/location/16222/>

⁸ http://gallery.usgs.gov/photos/09_03_2014_15GSj77iid_09_03_2014_7#.VGW8GclUvYN

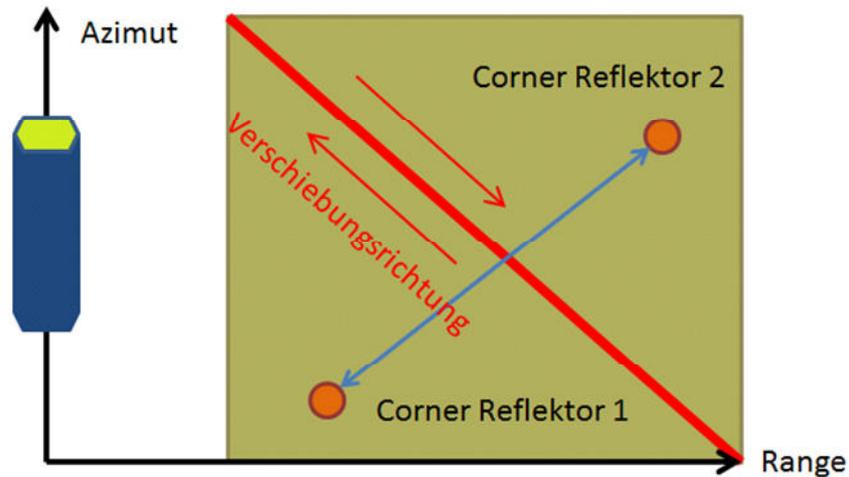


Abbildung 4: Messanordnung zur Detektion der Erdbebenverschiebung

In Abbildung 5 und Abbildung 6 das Untersuchungsgebiet in einer vergleichbaren räumlichen Darstellung festgehalten. Das optische Bild wurde dafür gespiegelt und gestaucht, damit es dem SAR-Bild entspricht. Im SAR-Bild (Abbildung 5) sind zudem die beiden Corner-Reflektoren markiert.

Im optischen Bereich ist erkennbar, dass im Untersuchungsgebiet zum Teil keine Vegetation vorhanden ist. Diese vegetationslosen Bereiche liefern bei der Berechnung der Interferogramme auch die bessere Kohärenz. Jedoch ist außerhalb dieses Kernuntersuchungsgebietes deutlich mehr Vegetation vorhanden, welche sich negativ auf die Kohärenz auswirkt.



Abbildung 5: Untersuchungsgebiet als SAR-Aufnahme in Schrägsichtgeometrie

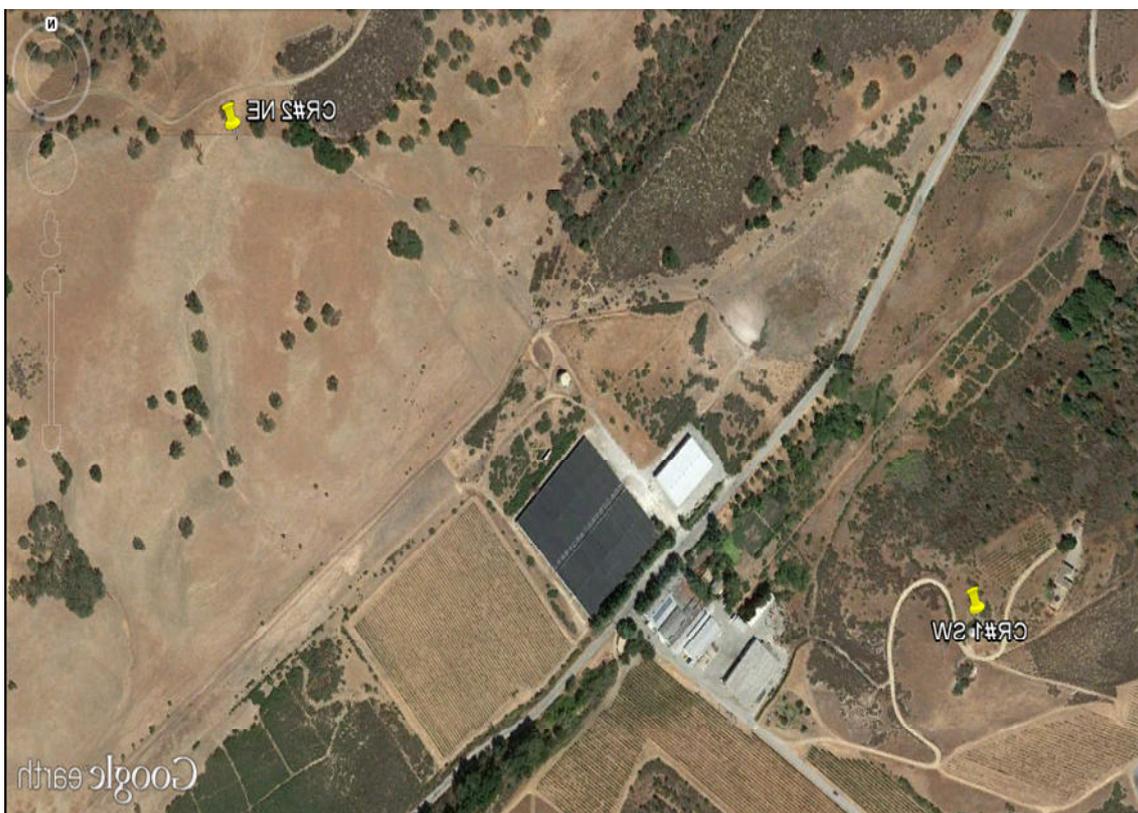


Abbildung 6: Untersuchungsgebiet als optisches Bild (Quelle: Google Earth)

2 Grundlagen der Satelliten-Fernerkundung

Unter Fernerkundung versteht man alle Verfahren, die sich mit dem:

- speichern, erfassen, kartieren, interpretieren und klassifizieren von Erscheinungen der Erdoberfläche oder der Oberfläche anderer Himmelskörper befassen
- die ohne direkten physischen Kontakt des Sensors mit dem Objekt arbeiten
- die das Objekt aus einer größeren Distanz beobachten⁹.

Diese Eigenschaften machen Verfahren der Fernerkundung besonders geeignet für großflächige Beobachtung und Beobachtungen über lange Zeiträume hinweg. In der vorliegenden Arbeit soll die sogenannte Synthetische-Apertur-Radar(SAR) - Fernerkundung genutzt werden, um eine Fragestellung aus dem Bereich der Erdbebenvorhersage beantworten zu können. Im Kern geht es dabei um die Fragestellung, ob Bewegungen der Erdoberfläche, die geringer sind als die räumliche Auflösung des Sensorsystems erfasst werden können. Auf diese Weise könnten Verschiebungen der Erdkruste, die vor einem Erdbeben entstehen detektiert werden. Ähnliche Verfahren werden bereits erfolgreich eingesetzt, um die Fließgeschwindigkeit von Gletschern zu bestimmen (siehe Abbildung 24).

2.1 Grundlagen der SAR-Fernerkundung

Die SAR-Fernerkundung hat grundlegend andere Eigenschaften, als die Fernerkundung im optischen und im infraroten Frequenzspektrum der elektromagnetischen Strahlung. Dies liegt daran, dass bei SAR-Systemen elektromagnetische Strahlung anderer Frequenzbereiche genutzt wird.

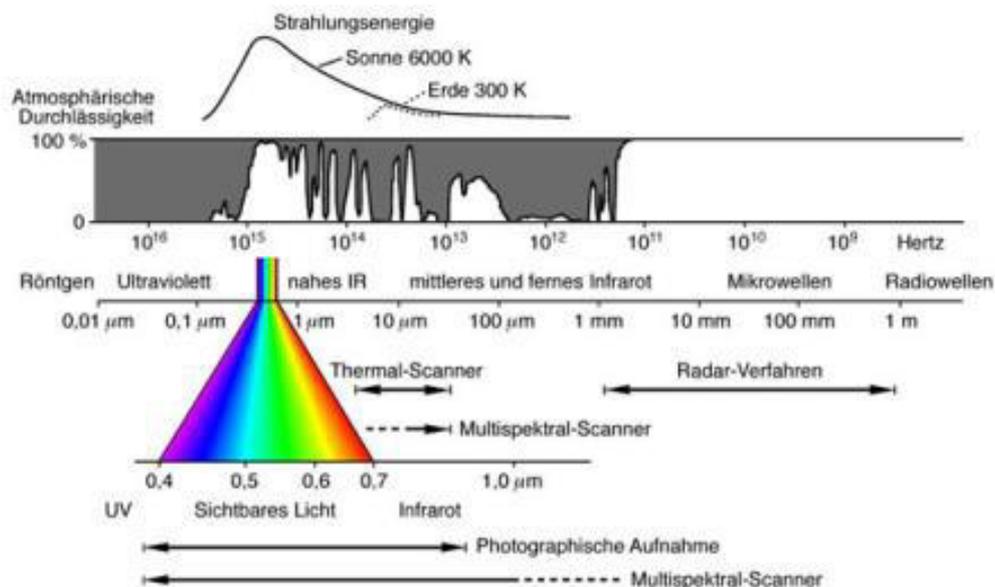


Abbildung 7: Frequenzbereiche der Fernerkundung¹⁰

⁹ <http://www.fe-lexikon.info/lexikon-f.htm#fernerkundung>

¹⁰ fe-lexikon.info

Die atmosphärische Durchlässigkeit für elektromagnetische Strahlung ist wellenlängenabhängig und wird als Transmissionsgrad bezeichnet (ALBERTZ [d]). Die Wellenlängen Bereiche in denen die Atmosphäre weitgehend durchlässig ist, werden als atmosphärische Fenster (ALBERTZ [d]) bezeichnet. Für die Zwecke der Fernerkundung werden die atmosphärischen Fenster im Bereich des sichtbaren Lichts ($0,3-2,5 \mu m$), des mittleren Infrarot ($3-5 \mu m$) und des thermalen Infrarot ($8-13 \mu m$) genutzt. Außerdem weist die Atmosphäre für den Wellenlängenbereich der Mikrowellen keine Dämpfung auf, sodass dieser Bereich für die SAR-Fernerkundung genutzt wird (siehe Abbildung 7 ALBERTZ [d]). Sichtbares Licht und Infrarotstrahlung werden allerdings relativ leicht durch atmosphärische Objekte (z.B.: Wasserdampf, Staub, Tropfen) gebrochen, sodass optische Systeme und Infrarot-Systeme eine deutlich stärkere Wetterabhängigkeit aufweisen als das bei Systemen der Fall ist, die im Wellenlängenbereich der Mikrowellen arbeiten (ALBERTZ [d]). Aktive Radar-Systeme, aber auch passive Radiometer Sensoren verwenden diese Mikrowellenstrahlung¹¹ und sind daher besser dazu geeignet Daten durch Bewölkung hindurch zu erfassen¹².

Radar-Systeme sind meist als aktive Sensoren ausgelegt, das heißt der Sensor beleuchtet das Untersuchungsgebiet selbst. Aus diesem Grund sind Radar-Systeme unabhängig von externer Beleuchtung, wie sie die Sonne bietet und können auch bei Nacht operieren.

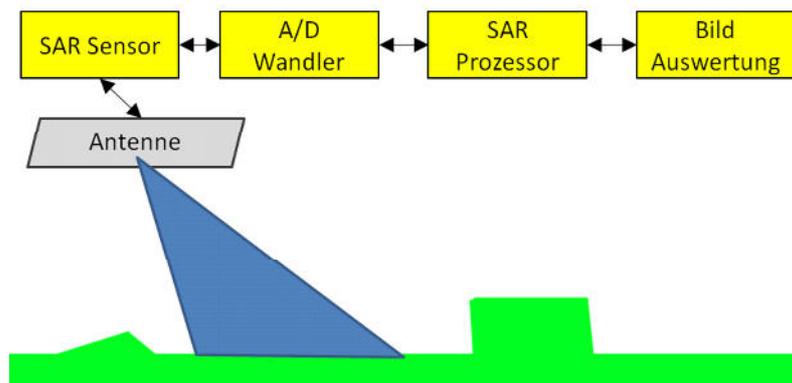


Abbildung 8: Bestandteile eines SAR-Systems nach [11]

Ein SAR-System besteht aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten wie sie in Abbildung 8 dargestellt sind. Am Ende der SAR-Daten-Gewinnung steht ein prozessiertes SAR-Bild, welches für weitere Analysen verwendet werden kann. Informationen über die Datenerfassung werden den SAR-Bildprodukten in Form von Metadaten (siehe Anhang I) mitgegeben. Dadurch können zum Beispiel die genauen Bahnparameter und damit die exakte Aufnahme position rekonstruiert werden.

Alle Analysen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, sind im letzten Schritt dieser SAR-Prozessierungskette zuzuordnen.

Für alle Radarsysteme gilt die Radargleichung (siehe Formel 1), welche das Verhältnis der gesendeten Energie zur empfangenen Leistung beschreibt.

¹¹ www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-2434/3770_read-32516

¹² www.fe-lexikon.info/lexikon-s.htm#sar

$$P_r = P_t G_t * \frac{1}{4\pi R^2} * \sigma * \frac{1}{4\pi R^2} * A_e [W]$$

Wobei:

P_r ... empfangene Energiemenge

P_t ... gesendete Energiemenge

G_t ... Antennengewinn der Sendeantenne

σ ... Rückstreuquerschnitt des Ziels in [m²]

A_e ... effektive Antennenfläche

Formel 1: Radargleichung [g]

Aus der Radargleichung ist erkennbar, dass die Entfernung zwischen Sensor und Ziel (R) in der vierten Potenz eingeht. Abbildende seitwärtsblickende Radarsysteme werden bei konstanter Fluggeschwindigkeit betrieben. Dabei werden die Bildkoordinaten durch die Flugrichtung (azimuth) und die dazu orthogonale Entfernungsrichtung (range) gebildet (MOREIRA [h]). Die Entfernungsauflösung wird durch die Bandbreite des Sendesignales bestimmt (MOREIRA [h]).

Radar-Systeme weisen im Vergleich zu optischen Systemen eine geringere Winkelauflösung am Sensor auf (siehe hierzu auch Kapitel 2.2). Die Entfernungsauflösung ist durch die Messbarkeit der Signallaufzeit sehr hoch. Dies führt bei SAR-Systemen dazu, dass eine sogenannte Schrägsicht-Aufnahme durchgeführt wird. Im optischen Bereich werden die Aufnahmen dagegen man möglichst senkrecht unter den Sensor erfasst (sogenannte Nadir-Aufnahme) um damit die Verzerrungen am Bildrand gering zu halten.

Die SAR-Fernerkundung basiert grundsätzlich auf den Eigenschaften von Radar-Systemen wie sie zum Beispiel für die Luftraumüberwachung eingesetzt werden.

Bei solchen Real-Apertur-Systemen bestimmt sich die Größe der Apertur nach der Größe der tatsächlich vorhandenen Antenne. Die mögliche Winkelauflösung eines solchen Real Apertur Radar Systems ist ebenfalls an die Größe der Antenne gekoppelt:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{D} R$$

Wobei:

Δx ... Größe der Auflösungszelle am Boden

λ ... Wellenlänge

D ... Größe der Antenne

R ... Entfernung Antenne zu Ziel

Formel 2: Größe einer Auflösungszelle bei einem Real-Apertur-Radar-System [g]

Wenn man in Formel 2 Zahlenwerte für typische Fernerkundungssysteme im optischen und im Mikrowellen-Frequenzbereich einsetzt, ist zu erkennen, dass der Einsatz eines solchen Real-Apertur für die Zwecke der Fernerkundung keine ausreichenden Ergebnisse liefert.

Optisches Fernerkundungssystem	Real-Aperture-Radar
$\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ [m]	$\lambda = 5 \cdot 10^{-2}$ [m]
D = 1[m]	D = 1[m]
R = 500[km]	R = 500[km]
$\Delta x = 0.25$ [m]	$\Delta x = 25000$ [m]

Tabelle 1: Winkelauflösung optisches Fernerkundungssystem zu Real-Aperture-Radar-System

Daher werden die Aperturen der Radar-Systeme synthetisch vergrößert. Diese synthetische Apertur besteht darin, dass mehrere Aufnahmen des Zielgebietes entlang einer Flugbahn angefertigt und anschließend danach nachprozessiert werden. Um eine rechnerisch größere Apertur zu erhalten. Einzelstreuer werden in mehreren aufeinanderfolgenden überlappenden Aufnahmen mit Phase und Amplitude registriert (siehe Abbildung 9) und können danach durch den SAR-Prozessor wieder zu einem Punkt komprimiert werden.

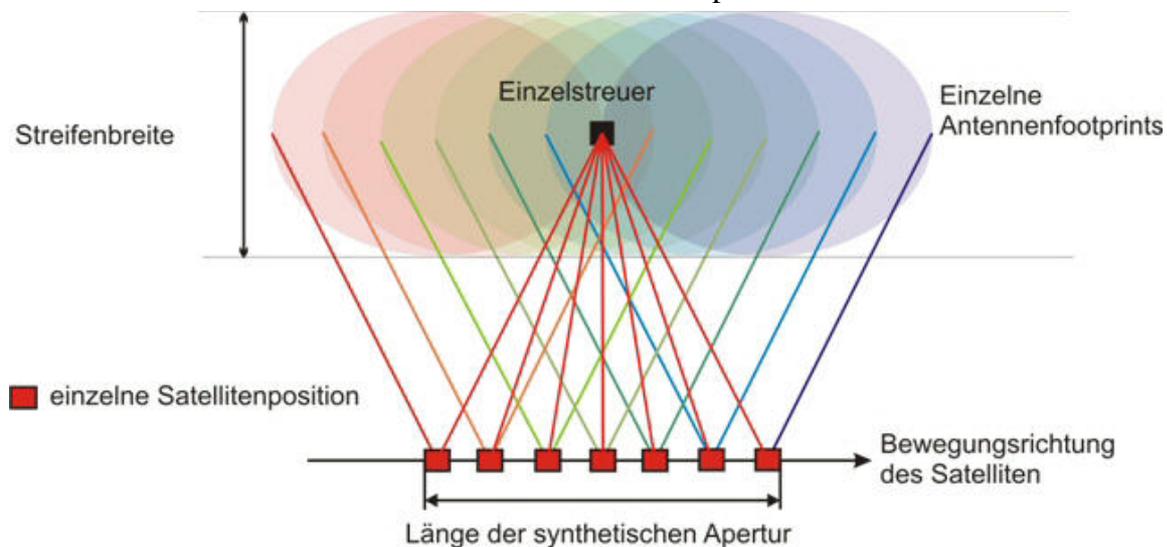


Abbildung 9: Erfassen eines Zielpunktes in mehreren Aufnahmen zur Vergrößerung der Apertur [i]

Durch diese synthetische Vergrößerung der Antenne verbessert sich die Auflösung in Azimut Richtung:

$$\Delta x_s = \frac{D}{2}$$

Wobei:

D... Größe der realen Antenne

Formel 3: Azimut Auflösung eines SAR-Systems

2.2 Die SAR-Aufnahmegeometrie

Der Satellitenbetreiber stellt bereits vorprozessierte Satellitenbilder zur Verfügung [7]. Diese Satellitenbilder werden in einer Schrägsicht (Slant-Range) Geometrie bereitgestellt, d.h. die Daten liegen noch in Sensorkoordinaten vor. Um eine Vergleichbarkeit zu topographischen Karten zu erreichen, können Korrekturen angebracht werden. Ziel ist es die Ground Range Koordinaten zu erhalten (siehe Abbildung 10). Am Ende der Analyse werden die Produkte geokodiert, damit sie mit geographischen Koordinaten versehen werden können.

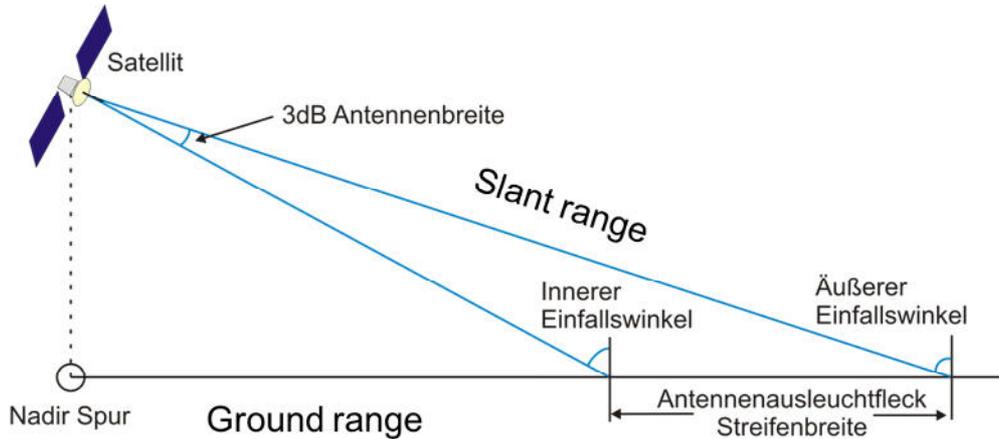


Abbildung 10: slant range Koordinaten und ground range Koordinaten

Im Gegensatz zur optischen Fernerkundung, bei der auf eine angenäherte Senkrechtaufnahme gezielt wird, um die Verzerrungen im Randbereich der Aufnahmen besser modellieren zu können, wird bei der SAR-Fernerkundung bewusst eine Schrägsicht gewählt. Der Hintergrund dafür ist, dass bei SAR primär Entfernungen detektiert werden, wohingegen bei optischen Sensoren eher Winkel in Bezug zum Sensorhauptpunkt erfasst werden.

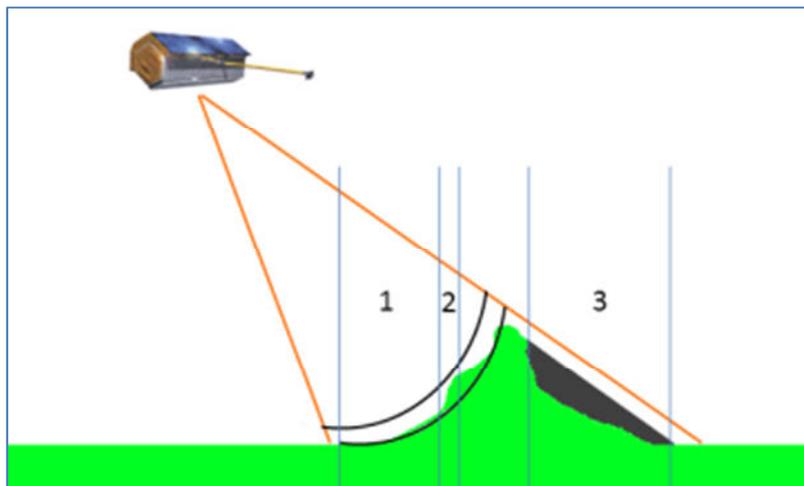
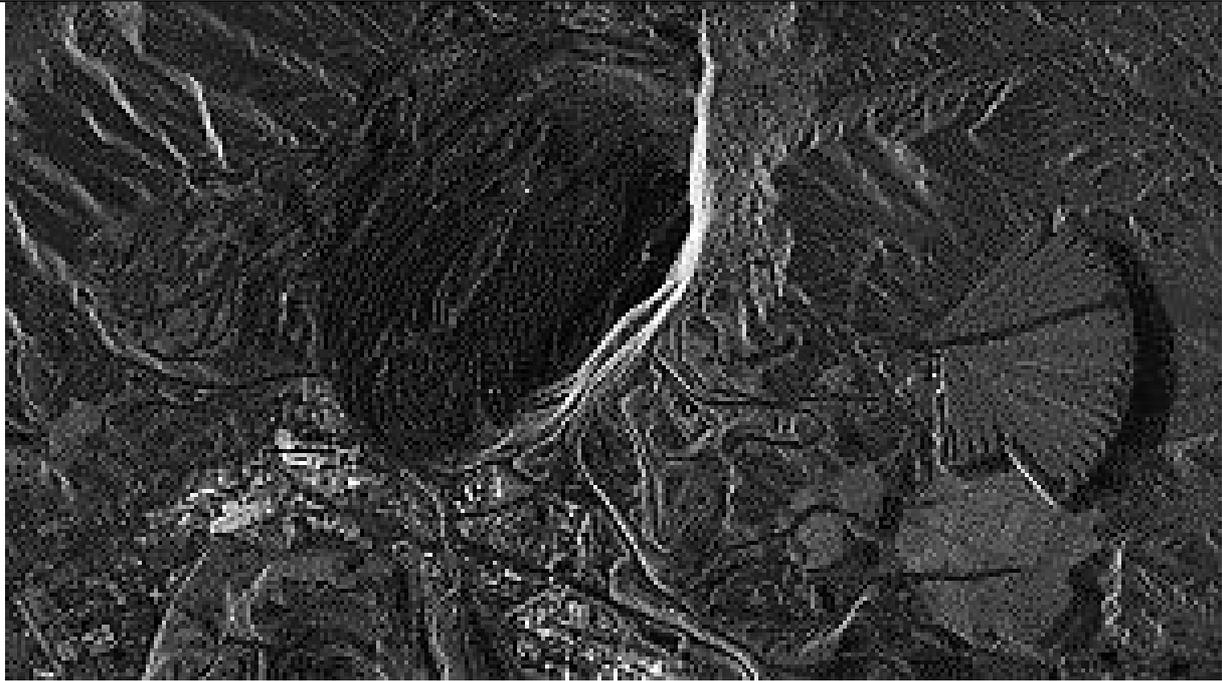


Abbildung 11: SAR-Aufnahmegeometrie (Foreshortening: 1; Layover: 2; Schatten: 3)

In der schematischen Darstellung in Abbildung 11 ist gut zu erkennen, dass die Oberflächenbeschaffenheit starken Einfluss auf die Position der Bodenpunkte im Bildmaterial hat. So kann es passieren, dass Hochpunkte von Objekten (z.B. Turmspitzen) näher am Sensor sind als die entsprechenden Fußpunkte. Das Objekt verkippt im Bild dann in Richtung Sensor (sogenanntes Layover) wie in Abbildung 11 dargestellt ist. Ebenso besteht die Möglichkeit, dass der Hochpunkt eines Objektes und sein Fußpunkt auf einer Entfernung zum Sensor liegen. Durch die Entfernungsdarstellung werden diese Punkte dann auf einen Bildpunkt projiziert. Man nennt diesen Effekt Foreshortening.

TerraSAR-X Bild (Quelle: DLR.de¹³)

Optisches Bild (Quelle: Google Earth)

**Abbildung 12: Chuquicamata Kupfer Mine in Chile als SAR-Aufnahme und als optische Aufnahme**

In Abbildung 12 sind die Auswirkungen des Foreshortening zu erkennen. Die komplette rechte Flanke des Tagebaus befindet sich nahezu in derselben Entfernung zum Sensor. Daher

¹³ http://www.dlr.de/eo/en/desktopdefault.aspx/tabid-6695/10983_read-10126/

wird die rückgestreute elektromagnetische Energie auf eine Linie projiziert. Außerdem ist in Abbildung 11 ein Bereich dargestellt, der sich im „Schatten“ der Antennenausleuchtung befindet. Aufgrund der lokalen Topographie gelangt keine elektromagnetische Strahlung in dieses Gebiet. Diese Schattengebiete enthalten keine Informationen und erscheinen daher schwarz. Bei der Umrechnung von slant range Koordinaten zu ground range Koordinaten werden daher soweit verfügbar digitale Geländemodelle mit einbezogen, um solche Effekte zu entzerren.

2.3 Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen

Die elektromagnetische Welle, die für ein Radar-System genutzt wird, kann mit verschiedenen Kenngrößen beschrieben werden. Eine sehr wichtige Kenngröße stellt die Wellenlänge dar. Diese ist bei Radar-Systemen zwischen 1 [mm] und ca. 1 [m] und damit deutlich länger als bei optischen Systemen. Dies hat unter anderem zur Folge, dass Objekte die im optischen Bereich als rau wahrgenommen werden spiegelnde Eigenschaften im Radar-Bild aufweisen (z.B: Straßen).

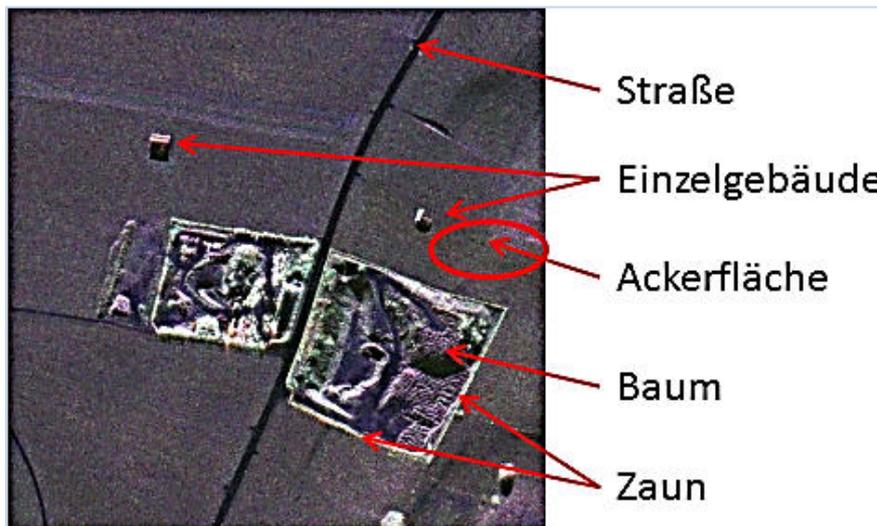


Abbildung 13: E-SAR Ausschnitt mit spiegelndem Zaun und Straße (DLR¹⁴)

Es besteht die Möglichkeit elektromagnetische Welle in unterschiedlicher Richtung auszurichten. Diese Ausrichtung wird als Polarisation bezeichnet (ALBERTZ [d]). Bei SAR-Systemen herrscht die sogenannte lineare Polarisation vor, das heißt dass die elektromagnetische Welle quer zur Ausbreitungsrichtung in einer Ebene schwingt. Diese Schwingungsebene liegt entweder orthogonal zur Erdoberfläche (vertikale Polarisation V), oder parallel zur Erdoberfläche (horizontale Polarisation H). Die SAR-Sensoren des TerraSAR-X können elektromagnetische Wellen in beiden Polarisationsarten erzeugen und empfangen. Je nach Zustand (Material, geometrische Ausrichtung) der Erdoberfläche kann sich die Polarisation der rückgestreuten Welle ändern. Aus der Messung dieser Polarisation können daher Rückschlüsse auf die Oberflächeneigenschaften gezogen werden ALBERTZ

¹⁴ http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-4698/7782_read-12248/gallery-1/216_read-17/

[d]). Wenn die Ausrichtung des Phasenwinkels der elektromagnetischen Welle bekannt ist, ist diese Phaseninformation mit auswertbar. Dies wird als kohärente elektromagnetische Strahlung beschrieben. Für die SAR-Technologie stellt das Vorhandensein eines vollkohärenten Radarsystems eine wesentliche Voraussetzung dar [10] da erst durch das Wissen und die Modellierbarkeit der Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Aufnahmepositionen entsprechende Bildkompressionsverfahren entwickelt werden können. Die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Welle hängen von der verwendeten Wellenlänge und von den elektrischen Eigenschaften des abgebildeten Gebiets ab [h]. Zusätzlich hat die Einfallsgometrie der elektromagnetischen Welle in Bezug zur Oberfläche Einfluss auf die Reflektionseigenschaften.

Elektromagnetische Wellen für SAR-Systeme sind im Vergleich zu optischen Sensoren sehr langwellig. Daher sind auch nicht alle Reflektions- und Streueigenschaften an natürlichen Oberflächen aus dem optischen Bereich übertragbar. Die Hauptstreumechanismen sind nach RICHARDS [b]:

- Oberflächenstreuung
- Volumenstreuung
- Direkte Reflektion

2.3.1 Oberflächenstreuung

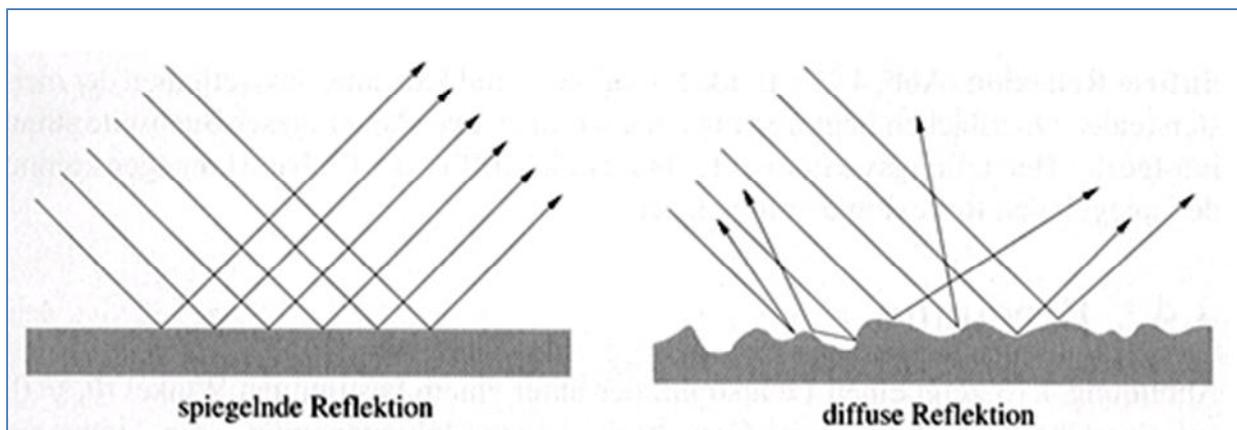


Abbildung 14: spiegelnde und diffuse Oberflächenreflektion (g)

Das Streuverhalten an Oberflächen lässt sich unterteilen in die sogenannte spiegelnde Reflexion (bei ebener Oberfläche) und die diffuse Reflexion (bei rauer Oberfläche). Die Oberflächenrauigkeit wird in Abhängigkeit der verwendeten Wellenlänge und des Einfallswinkels beurteilt. Nach KEYDEL [11] gilt eine Oberfläche dann als eben, wenn:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i}$$

Wobei:

θ_i ... Einfallswinkel

λ ... mittlere Wellenlänge

Formel 4: Formel zur Abschätzung der Oberflächenrauigkeit [11]

$\theta_{i \min}$ 20 [°]
 $\theta_{i \max}$ 55 [°]
 λ 31 [mm]

Die Zahlenwerte für $\theta_{i \min}$, $\theta_{i \max}$, und λ entstammen dem TerraSAR-X Product Guide [7] und ergeben Δh :

$$\Delta h_{20} < 7,52 [mm]$$

$$\Delta h_{55} < 4,59 [mm]$$

Dies bedeutet, dass bei einem Einfallswinkel von 20[°] eine Oberfläche mit Höhendifferenzen $> 7,52 [mm]$ als rau zu betrachten ist.

2.3.2 Volumenstreuung

Mikrowellen können bei geeigneter Wellenlänge und Oberfläche tief eindringen und so Informationen über verborgene Objekte liefern. Dieses Streuverhalten nennt man Volumenstreuung.

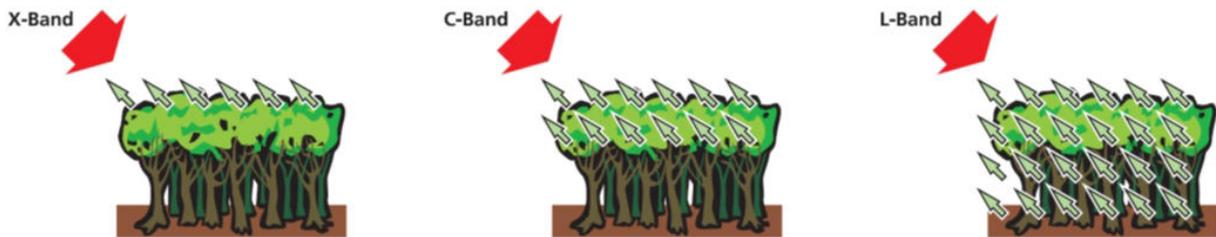


Abbildung 15: Volumenstreuung in Abhängigkeit der Wellenlänge (DLR [14])

Jedoch ist dieser Effekt bei X-Band SAR-Systemen nicht so stark ausgeprägt wie bei anderen SAR-Systemen. Wie in Abbildung 15 dargestellt ist, tritt Volumenstreuung bei langwelligeren Systemen stärker auf.

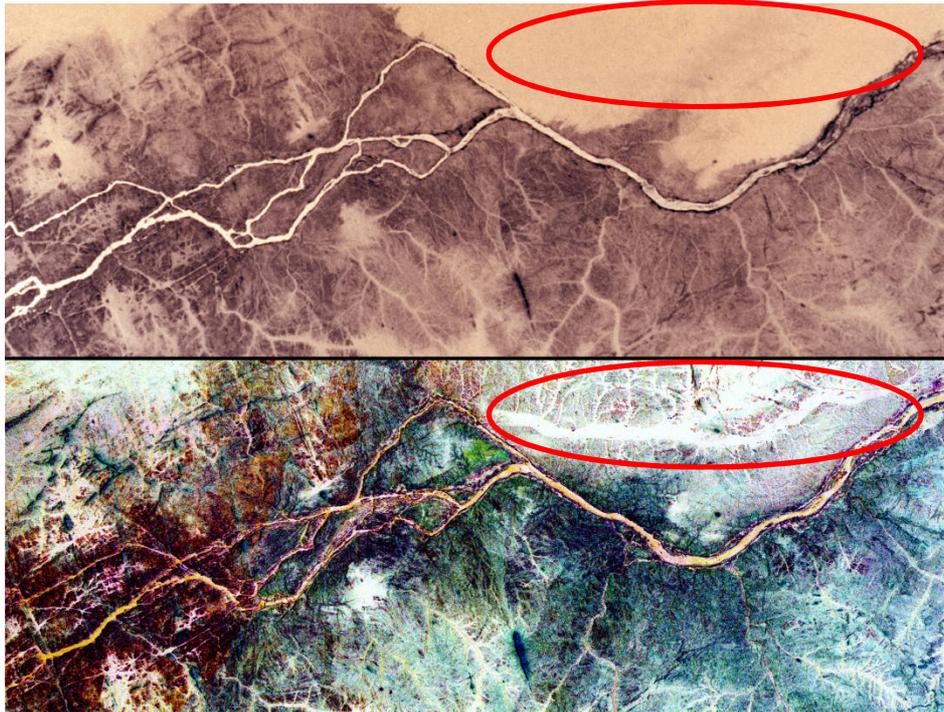


Abbildung 16: Vergleich Farb-Infrarot Bildes (oben) mit SAR-Bild (unten) vom Niltal (Quelle: Nasa.gov¹⁵)

Als Beispiel für die Volumenstreuung bei SAR-Systemen ist Abbildung 16 aufgeführt. Beide Aufnahmen zeigen einen Abschnitt des Nils. Die obere Aufnahme ist eine Farb-Infrarot Aufnahme, während die untere Aufnahme mit dem C/X-Band SAR des Space Shuttles während der SIR-C/X-SAR Mission erfasst wurde¹⁶. In der SAR-Aufnahme sind Nil-Arme zu erkennen, die im optischen Bereich nicht mehr wahrnehmbar sind, da sie unter einer Sandschicht verdeckt sind.

2.3.3 Direkte Reflektion

Bestimmte punkthafte Objekte können besonders starke Radar-Reflektion erzeugen. Diese Einzelobjekte dominieren oftmals die Rückstreueigenschaften der Auflösungszelle, sodass für die resultierenden Bildpixel dadurch bestimmt wird, dass man den effektiven Radarquerschnitt (σ) durch die Größe der Auflösungszelle dividiert (RICHARDS [b]).

Die einfachste Direkte Reflektion wird durch ebene Flächen erzeugt, die direkt in Richtung des SAR-Sensors ausgerichtet sind (z.B.: Hausdächer). Der Radarquerschnitt einer solchen Fläche lässt sich über Formel 5 berechnen. Nach RICHARDS [b] wird dieses Streuverhalten auch Facet Scattering genannt (siehe Abbildung 17).

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} (ab)^2 * \cos^2 \theta$$

Wobei:

a ; b ... Maße der reflektierenden Fläche in [m]

θ ... Einfallswinkel

¹⁵ <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=52410>

¹⁶ <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=52410>

λ ... Wellenlänge

Formel 5: Radarrückstreuquerschnitt für direkte Reflektion Facet Scattering

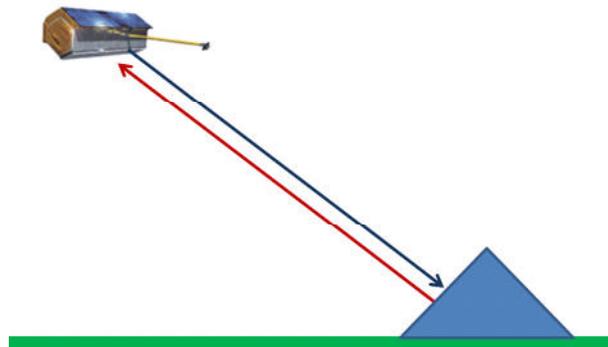


Abbildung 17: Facet Scattering (nach [b] S.136)

Neben der direkten spiegelnden Reflektion gibt es auch Reflektionserscheinungen über mehrere Ebenen. Man spricht dabei von dihedralen (2-orthogonale Ebenen) oder trihedralen (3-orthogonale Ebenen) Reflektoren (siehe Abbildung 18).

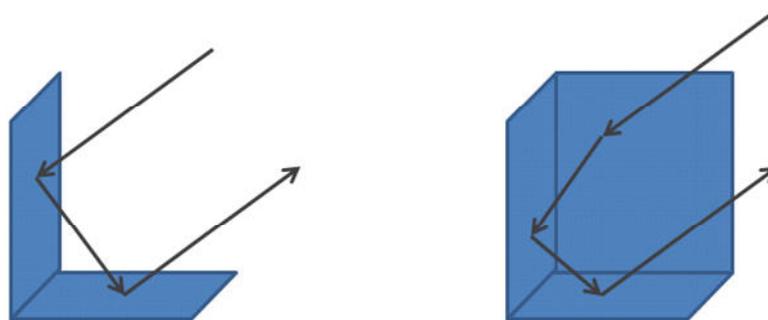


Abbildung 18: Mehrfachreflektion an dihedralen & trihedralen Reflektoren (nach[b] S.116)

Objekte, die sich wie dihedrale, oder trihedrale Reflektoren verhalten, können elektromagnetische Strahlung aus einem sehr großen Winkelbereich wieder zum Sender zurück werfen. Daher erscheinen solche Objekte in SAR-Aufnahmen besonders hell (siehe Abbildung 20). Der maximale Radarquerschnitt von dihedralen und trihedralen Reflektoren ist in Abhängigkeit der verwendeten Wellenlänge und der Reflektorgröße (siehe Formel 6 und Formel 7) zu sehen. Der tatsächliche Radarquerschnitt ist zusätzlich noch abhängig vom Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle.

$$\sigma = 8\pi \frac{a^4}{\lambda^2}$$

Formel 6: größter Radarquerschnitt für einen dihedralen Reflektor¹⁷ ([b] S.117)

¹⁷ Gilt für quadratische Reflektoren mit der Kantenlänge a

$$\sigma = 12\pi \frac{a^4}{\lambda^2}$$

Wobei:

a ... Kantenlänge in [m]

λ ... Wellenlänge

Formel 7: größter Radarquerschnitt für einen trihedralen Reflektor¹⁸ ([b] S.117)

Im Vergleich hat ein quadratischer dihedraler Reflektor einen kleineren maximalen Radarrückstreuquerschnitt, als ein gleich großer quadratischer trihedraler Reflektor. Dazu werden auch künstliche metallene Reflektoren ins Untersuchungsgebiet gebracht, die sogenannten Corner Reflektoren. Diese Reflektoren verhalten sich wie trihedrale Reflektoren und sind besonders gut in SAR-Bildern zu erkennen. Diese gut zu erkennende Signatur ermöglicht es, insbesondere trihedrale Reflektoren als Referenzziele zum Beispiel zur Sensorkalibrierung zu nutzen (siehe Abbildung 20).

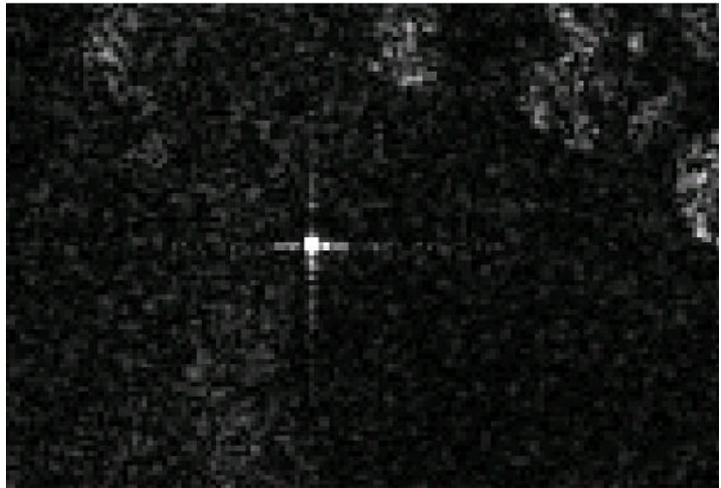
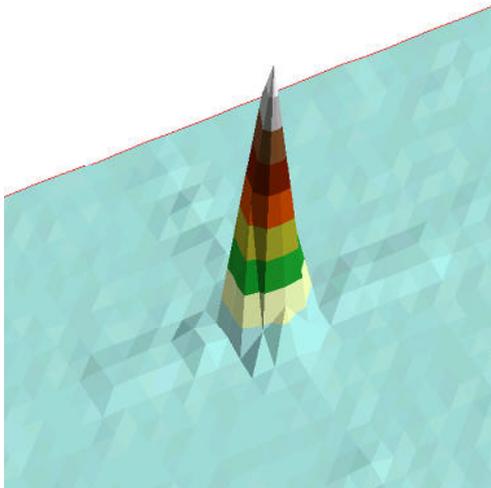


Abbildung 19: dreidimensionales Amplitudenbild des zweiten Corner-Reflektors

Abbildung 20: Amplitudenbild von Corner-Reflektor 2

Für die Detektion einer Verschiebung im Untersuchungsgebiet wurden mehrere solcher Corner-Reflektoren im Untersuchungsgebiet aufgestellt. Die Corner-Reflektoren dieser Messkampagne befinden sich bei folgenden Koordinaten:

Name	Geographische Breite [°]	Geographische Länge [°]
CR 1 SW	36.749422	-121.388697
CR 2 NE	36.753139	-121.379786
CR 3	36.745909	-121.368985

Tabelle 2: Position der Corner-Reflektoren

Die beschriebenen Rückstreuereigenschaften von Objekten treten in der Realität oftmals nebeneinander auf, sodass in einem SAR-Bild mehrfache Abbildung von Objekten möglich sind (siehe Abbildung 21).

¹⁸ Gilt für quadratische Reflektoren mit der Kantenlänge a

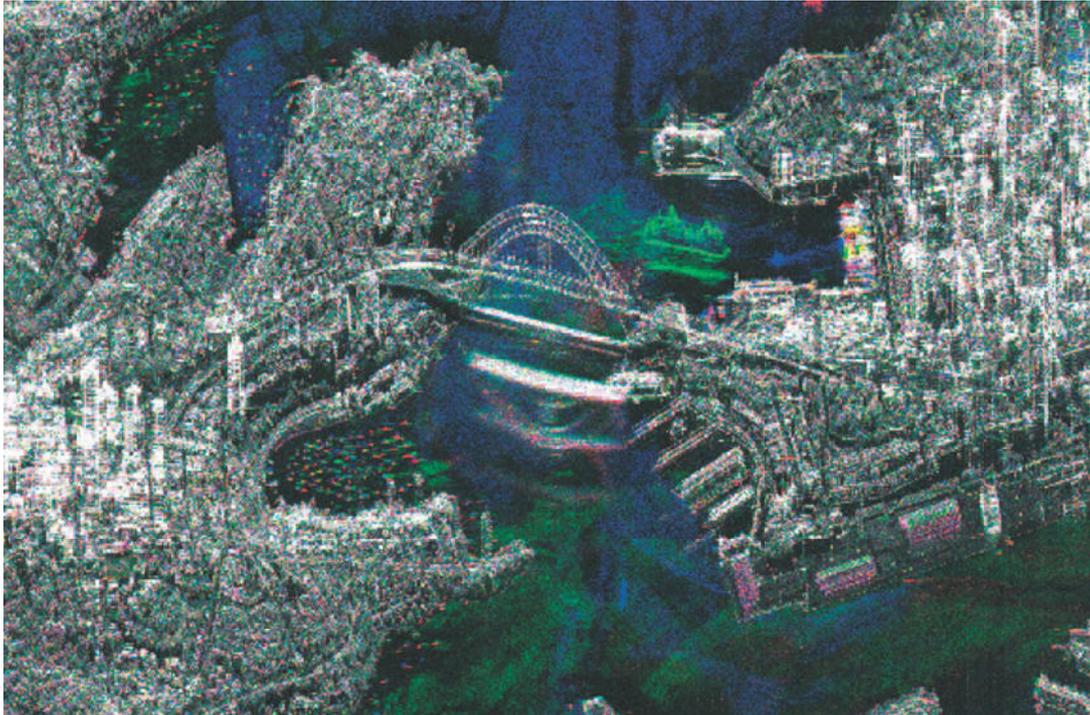


Abbildung 21: Sydney Australien aufgenommen im Spotlight Mode (DLR[2])

2.3.4 Bildstörung durch Speckle-Rauschen

Bei SAR-Aufnahmeverfahren kommt es durch die Verwendung kohärenter Signale zu sogenannten Speckle-Rauschen. Der SAR-Sensor sendet elektromagnetische Energie zur Erdoberfläche, die dann mit den Streuern am Boden interagiert. Dabei reflektiert jeder Einzelstreuer innerhalb einer Auflösungszelle des SAR-Systems einen bestimmten Anteil elektromagnetischer Energie zum Sensor.

Es werden im SAR-Sensor für jeden Aufnahmepunkt die Phase der elektromagnetischen Welle und die Amplitude der elektromagnetischen Welle aufgezeichnet. Dies wird als komplexe Aufnahmen bezeichnet. Innerhalb einer Auflösungszelle befinden sich mehrere Streuer, die einen eigenen statistisch unabhängigen Anteil (Amplitude + Phase) zum Gesamtergebnis der Auflösungszelle beitragen. Im Sensor erfolgt für jeden Auflösungspunkt eine Summation der Anteile aller Einzelstreuer. Dabei können schon geringe Unterschiede zwischen den Auflösungszellen im resultierenden SAR-Bild als Rauschen wahrgenommen werden. Dieses Speckle-Rauschen tritt insbesondere an Oberflächen auf, die eine Rauigkeit in der Größenordnung der verwendeten Radar-Wellenlänge besitzen [h]. Dabei ist die Varianz der Bilddaten gekoppelt an die rückgestreute Energieleistung [h].

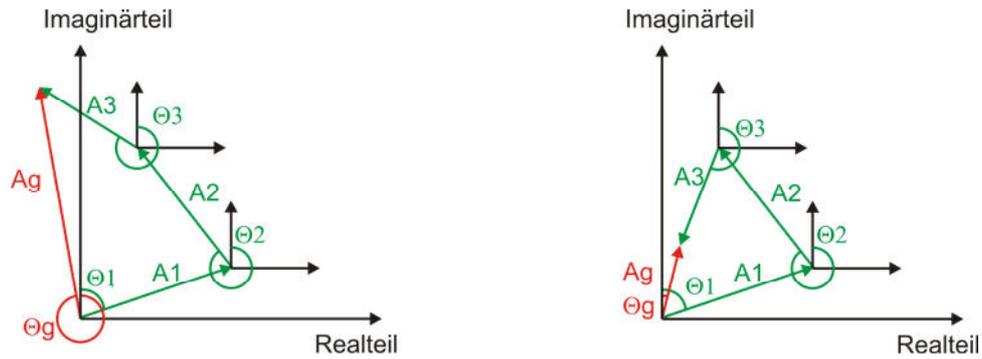


Abbildung 22: kohärente Addition von Einzelstreuern führt zum Speckle-Effekt ([9] TELZER 2008)

Um das Speckle-Rauschen zu reduzieren kann die sogenannte Multi-Look Filterung angewendet werden. Dabei wird die verfügbare Bandbreite des Empfangssignals in gleich große statistisch unabhängige Bereiche aufgeteilt. Die Aufteilung kann in Azimut-Richtung und in Entfernungsrichtung erfolgen. Im Ergebnis zeigen sich mehrere statistisch unabhängige Bilder derselben Szene. Diese Bilder werden inkohärent aufaddiert, wodurch sich ein Ergebnisbild mit reduziertem Speckle-Rauschen ergibt [h]. Durch die Multi-Look Verarbeitung reduziert sich jedoch ebenfalls die geometrische Auflösung mit der Anzahl von unabhängigen nicht-überlappenden Bandbreitenbereichen. Für die vorliegende Untersuchung wird Multi-Looking in der Dimension 4x4 für die Untersuchungsbilder durchgeführt.

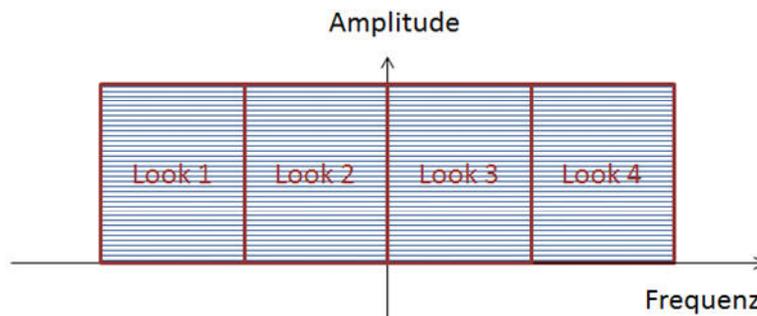


Abbildung 23: Bandbreitenbereiche für ein 3-Look Multi-Look Verfahren nach [h]

2.4 Das Interferometrie Verfahren

Neben zahlreichen Messmethoden bietet insbesondere das Messverfahren der Interferometrie umfangreiche Möglichkeiten zur Datengewinnung und Analyse von Fernerkundungsdaten. Durch die Methode der Interferometrie können digitale Höhenmodelle gewonnen werden, wie bei der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)¹⁹ demonstriert wurde. Außerdem können mit diesem Messverfahren Langzeitbeobachtungen über der Erdoberfläche durchgeführt werden, um zum Beispiel Gletscherbewegungen festzustellen, wie in Abbildung 24 zu sehen ist.

¹⁹ <http://srtm.usgs.gov/>

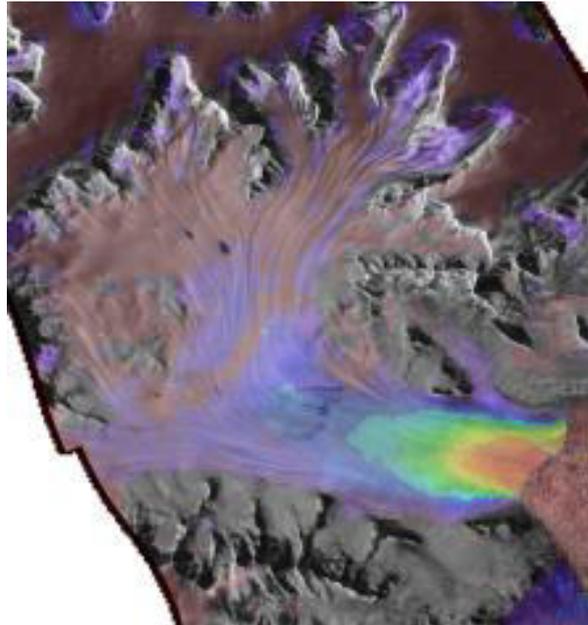


Abbildung 24: Drygalski-Gletscher in der Antarktis farblich nach Fließgeschwindigkeit codiert (DLR²⁰)

Das Messverfahren macht sich die kohärente Aufzeichnung von Phase und Amplitude für jeden Bodenpunkt (siehe hierzu auch Kapitel 2.3.4) zu Nutze. Bei der Radar-Fernerkundung ist für jeden Punkt am Boden die Amplitude und Phase des rückgestreuten elektromagnetischen Impulses bekannt ([b] Seite 181). Durch Differenzbildung zwischen diesen Phasenwinkeln erhält man einen relativen Phasenwinkel, welcher im sogenannten Interferogramm graphisch dargestellt wird. Dieses Verfahren ermöglicht Analysemöglichkeiten in der Größenordnung der elektromagnetischen Wellenlänge (TerraSAR-X: X-Band Wellenlänge $\lambda \approx 3\text{cm}$).

2.4.1 Prinzipieller Ablauf interferometrischer Untersuchungen

Für eine interferometrische Analyse müssen mindestens zwei kohärente Aufnahmen (Radarbild 1 und Radarbild 2) aus demselben Untersuchungsgebiet vorliegen. Zwischen diesen beiden Bildern wird die Differenz der Phase der elektromagnetischen Welle berechnet und in ein Interferogramm gespeichert (siehe Abbildung 25).

²⁰ http://www.dlr.de/DesktopDefault.aspx/tabid-6840/86_read-17874/gallery-1/gallery_read-Image.1.9630/

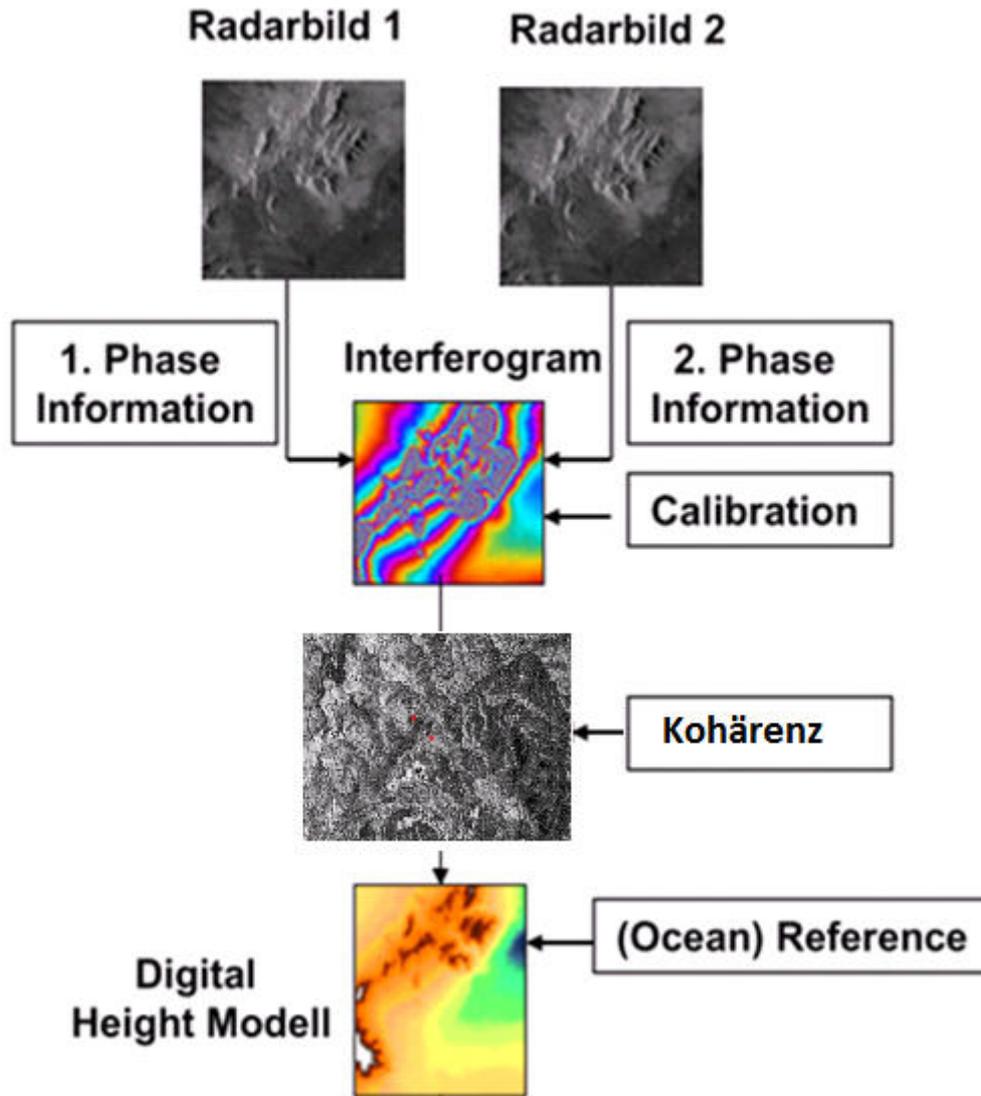


Abbildung 25: prinzipieller Ablauf einer interferometrischen Untersuchung [11]

Dieses Interferogramm beinhaltet die Phasendifferenzwerte, die sich im Wertebereich zwischen 0 und 2π befinden. Durch Phase Unwrapping werden diese relativen Phasen in Absolute Phasen übersetzt, die dann wiederum in Höhenwerte, oder Verschiebungen übersetzt werden können. Die kommenden Kapitel gehen im Detail auf diese Arbeitsschritte ein.

2.4.2 Erzeugen von Interferogrammen

Beide Radar-Antennen beobachten dabei das gleiche Gebiet. Die Antennen sind durch die Basislinie B voneinander getrennt. Aus dieser Basislinie wird die orthogonale Basislinie B_{\perp} abgeleitet.

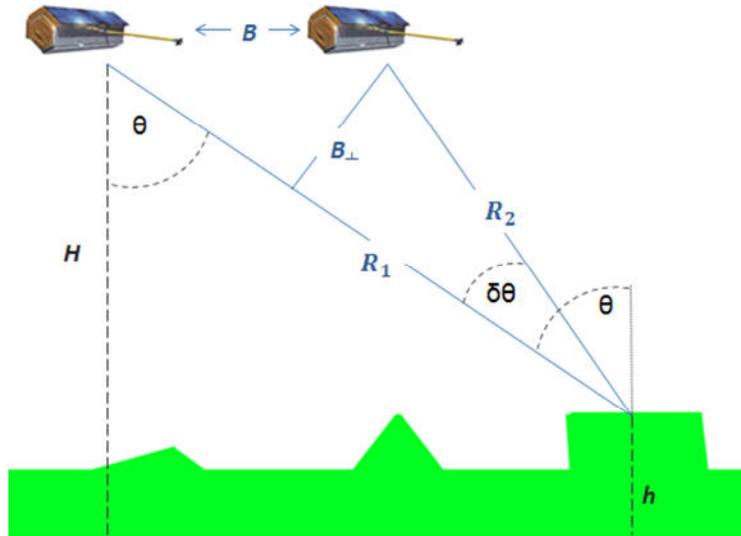


Abbildung 26: prinzipielle Aufnahmegeometrie bei Interferometrie (nach [b] S.183)

$$R_1 = R_2 \cos \delta \theta + B \sin \theta$$

Aufgrund der relativ großen Entfernung vom Satelliten zur Erdoberfläche (ca. 500km bei TerraSAR-X²¹) gilt: $\delta \theta \approx 0$.

Daher:

$$R_1 = R_2 + B \sin \theta$$

$$\Delta R = R_1 - R_2 = B * \sin \theta$$

Formel 8: Entfernungsunterschied in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel und der Basislinie ([b] S.183)

Die entsprechende Differenz im Phasenwinkel zwischen den beiden Signalen ist:

$$\Delta \phi = \frac{4\pi B \sin \theta}{\lambda}$$

Formel 9: interferometrischer Phasenwinkel

Mit Hilfe dieses interferometrischen Phasenwinkels werden Höhenunterschiede, oder Geländeverschiebungen kalkuliert.

2.4.3 Kohärenz zwischen SAR-Bildern

Damit Interferometrische Untersuchungen durchgeführt werden können, muss die Kohärenz γ zwischen den SAR-Bildern hoch sein. Die Kohärenz zwischen zwei SAR-Bildern gibt an, wie hoch das Verhältnis zwischen kohärenter und inkohärenter Summation ist.

²¹ http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#/gallery/350

$$\gamma = \frac{|\sum s_1(X) * s_2(X)|}{\sqrt{\sum |s_1(X)|^2 * \sum |s_2(X)|^2}}$$

Formel 10: Formel für die Kohärenz

Die resultierenden Werte liegen im Bereich zwischen 0 (=keine Kohärenz) und 1 (=volle Kohärenz). Dabei muss beachtet werden, dass für interferometrisches SAR eine gute Kohärenz als Voraussetzung gilt um weitere phasenbezogene Informationen zu gewinnen. Die Kohärenz kann auch als eigenständige Eigenschaft genutzt werden um Objekte zu detektieren, oder um Bodenbedeckung zu klassifizieren.

Für die Along Track Interferometrie hat die Kohärenz als Maß der Korrelation zwischen den beiden Bildern eine hohe Bedeutung. Wenn die Kohärenz gleich null ist, dann besteht keine Korrelation, d.h. kein Zusammenhang zwischen den Bildern. Um gute Interferogramme zu erhalten ist es wichtig, dass sich das Rückstreuverhalten bei der ersten und der zweiten Aufnahme nicht wesentlich ändert, um eine hohe Kohärenz zu erreichen [h]. Nach KEYDEL[11] können die Einflüsse, die in Tabelle 3 aufgeführt sind, die Kohärenz zwischen verschiedenen SAR-Bildern reduzieren:

Bezeichnung	Fehlerursache
$\gamma_{instrument}$	Fehler bezogen auf das Radar System und die Plattform
$\gamma_{azimuth}$	Unterschiedliche Doppler Kern Frequenzen
$\gamma_{processor}$	Fehler, durch den SAR-Prozessor
$\gamma_{baseline}$	Kritische Basislinie
γ_{noise}	System Rauschen
$\gamma_{temporal}$	wiederholter Überflug dabei Änderung der Streueigenschaften (z.B.: Vegetationsänderung)
$\gamma_{spatial}$	Unterschiedliche Erfassungswinkel
γ_{range}	Unterschiedliche Projektionen der Daten auf die Oberfläche
γ_{volume}	Höhenverteilung der Streuer

Tabelle 3: Fehlereinflüsse, die Kohärenz zwischen SAR-Bildern reduzieren [11]

Die Auswertung dieser Kohärenz bietet insbesondere für die Interferometrie großes Potential. So kann im Allgemeinen festgestellt werden, dass Gebiete mit geschlossener Vegetation (z.B.: Wald) geringere Kohärenzwerte aufweisen, als Gebiete ohne Vegetation. Abseits der Interferometrie kann dieser Zusammenhang auch genutzt werden um Oberflächen zu klassifizieren. In Abbildung 27 ist das Untersuchungsgebiet in einem optischen Bild in geographischer Projektion dargestellt. In dieser Abbildung ist ein Bereich markiert, der primär durch Vegetation (Bäume und Büsche) geprägt ist. In Abbildung 28 kann man die Kohärenz, die zwischen der Aufnahme vom 19.04.2014 und der Aufnahme vom 22.05.2014 berechnet wurde. Dabei fällt auf, dass die Flächen, die vorher als Vegetationsflächen beschrieben wurden jetzt über die geringe Kohärenz verfügen (dunklere Grauwerte).



Abbildung 27: Bereich im Untersuchungsgebiet, primär vegetationsbedeckt (Hintergrundkarte: ESRI)

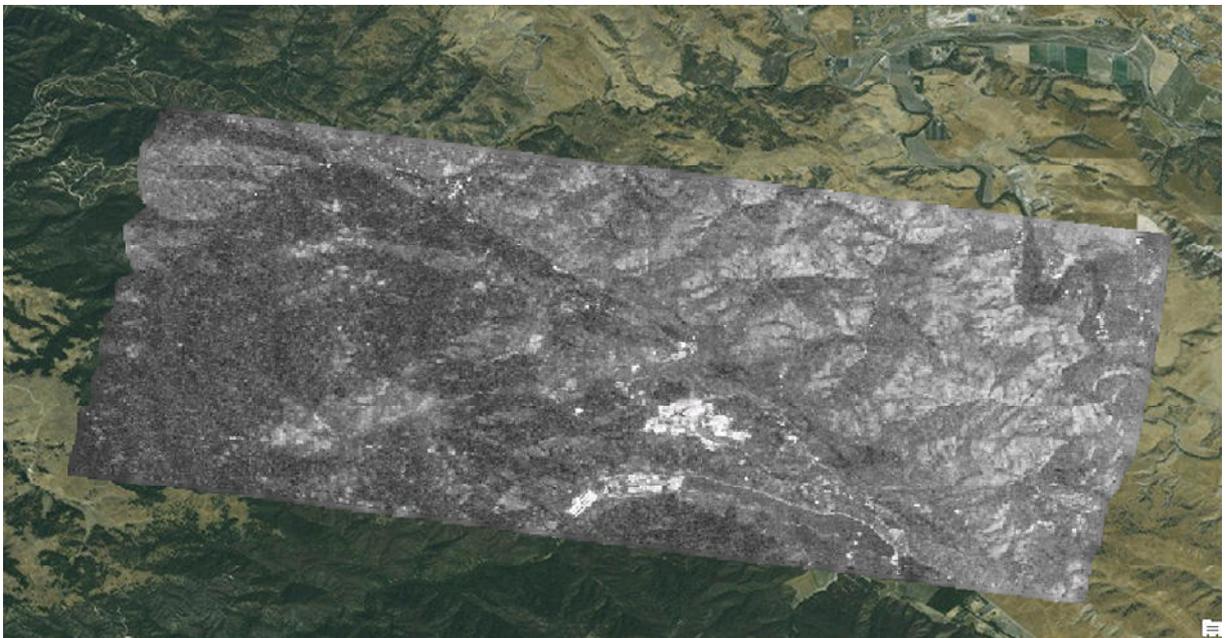


Abbildung 28: Kohärenz zwischen Aufnahme 19.04.14 und 22.05.14 (Hintergrundkarte: ESRI)

Änderungsdetektion genutzt werden können (siehe Abbildung 32). Dieser zeitliche Versatz wird als temporale Basislinie **B** bezeichnet.

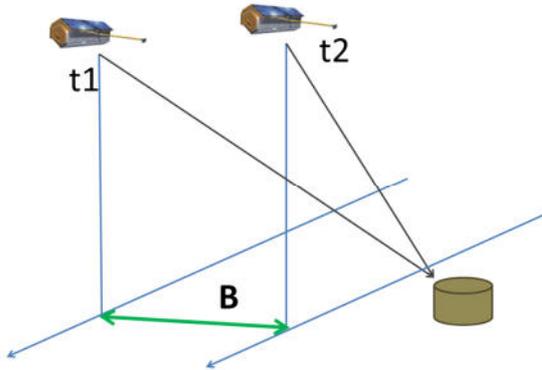


Abbildung 30: Cross Track Interferometrie nach [b] Seite 193

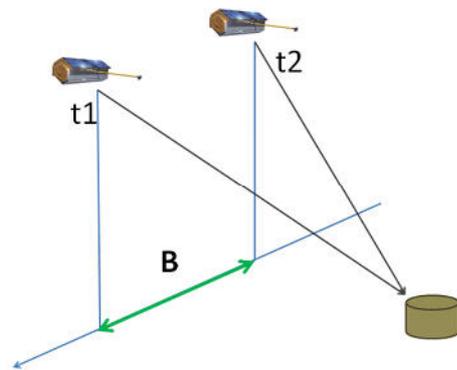


Abbildung 31: Along Track Interferometrie nach [b] Seite 193

Die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) war eine Cross Track Interferometry Mission, die zum Ziel hatte ein genaues Höhenmodell der Erdoberfläche zu erzeugen. Wenn die räumliche Basislinie **B** zwischen den Aufnahmen vom Zeitpunkt t1 und t2 nahe null ist, sind die einzigen detektierbaren interferometrischen Phasenwinkel auf Änderung der Oberfläche zurückzuführen (siehe Abbildung 30).

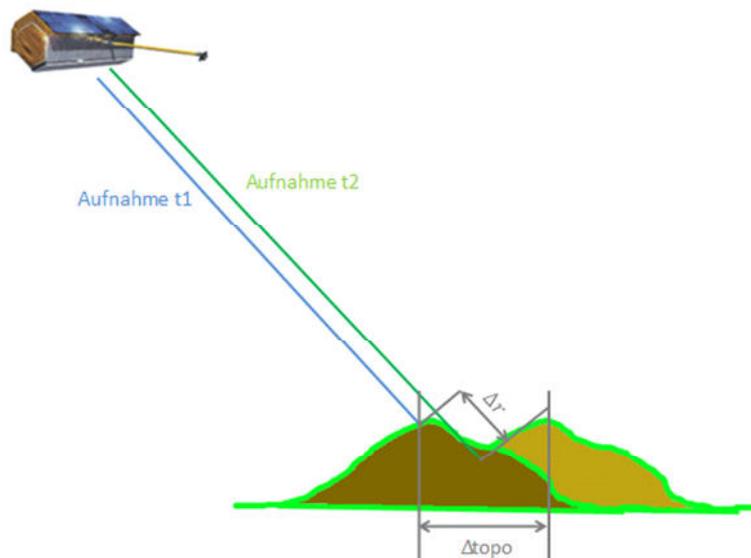


Abbildung 32: Messung von Änderungen der Erdoberfläche nach [b] S.198

Die Änderung der Erdoberfläche in Blickrichtung des SAR-Systems (Slant Range) wird mit Δr bezeichnet. Aus dieser Änderung kann die Verschiebung der Topographie (Δ_{topo}) errechnet werden. Für die durchgeführten Analysen bedeutet dies, dass die normalen Basislinien zwischen den beiden Aufnahmepositionen möglichst kurz sein sollen, damit der Phasenunterschied ausschließlich auf eine Änderung der Topographie zurückgeführt werden kann.

2.6 Differentielles Interferometrisches SAR zur Änderungsdetektion

Wenn Veränderungen der Topographie detektiert werden sollen, kann Differentielles Interferometrisches SAR (DInSAR) genutzt werden. Das Ziel besteht dabei darin, dass man die Änderung der Phase misst, die durch die Änderung der Topographie entsteht. Dazu muss die vorhandene Oberflächenstruktur aus dem Interferogramm entfernt werden. Es gibt für dieses Ziel zwei Ansätze ([b] Seite 199):

1. Ein existentes digitales Höhenmodell (DEM) wird genutzt, um ein Interferogramm zu errechnen. Dieses Interferogramm kann dann vom neu gemessenen Interferogramm abgezogen werden.

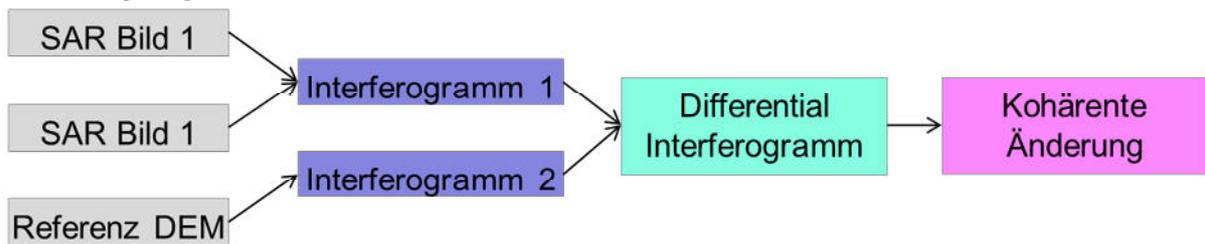


Abbildung 33: Alternative DInSAR Analyse bei Vorhandensein eines DEM [6]

2. Es werden drei SAR-Aufnahmen verwendet. Aus zwei SAR-Bildern wird ein Interferogramm berechnet, mit welchem ein Höhenmodell abgeleitet wird. Daraufhin wird ein zweites Interferogramm gebildet. Die interferometrischen Phasen vom zweiten Interferogramm werden von den interferometrischen Phasen des ersten Interferogramms abgezogen. Auf diese Weise erhält man die Phasenänderung die ausschließlich auf Änderung der Topographie beruht.

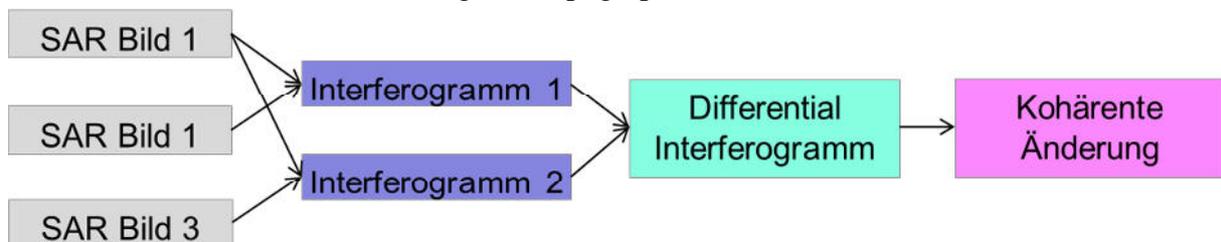


Abbildung 34: prinzipieller Ablauf einer DInSAR Analyse [6]

Der detektierte Phasenunterschied steht in direktem Zusammenhang mit Änderungen der Topographie:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi B_{\perp} \cos\theta * \Delta h}{\lambda H * \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$$

Wobei:

$\Delta\varphi$... Phasenänderung

B_{\perp} ... Länge der orthogonalen Basislinie

θ ... Blickwinkel

Δh ... Änderung der topographischen Höhe

Δr ... Verschiebung in Schrägsicht

λ ... Wellenlänge

H ... Flughöhe des Sensors

Formel 11: Änderung des Phasenwinkels in Abhängigkeit der Basislinie ([b] Seite 199)

Dabei haben folgende Fehlergrößen Einfluss auf die Qualität der gemessenen Phasendifferenzen:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{disp} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{pixel} + \Delta\varphi_{noise} + \Delta\varphi_{error}$$

Formel 12: Einflussgrößen auf die Phasendifferenz ([b] Seite 200)

Bezeichnung	Grund für interferometrischen Phase
$\Delta\varphi_{topo}$	Topographie
$\Delta\varphi_{disp}$	Versatz (Displacement)
$\Delta\varphi_{atm}$	Änderung der dielektrischen Eigenschaften der Atmosphäre
$\Delta\varphi_{pixel}$	Änderung der Reflektivität zwischen den Pixeln
$\Delta\varphi_{noise}$	Phasenrauschen am Radar-System
$\Delta\varphi_{error}$	Unsicherheiten in der Plattformposition, bzw. Basislinienlänge

Tabelle 4: Bedeutung der Einflussgrößen auf die interferometrische Phase

Im vorliegenden Testfall ist ein entsprechend genaues digitales Höhenmodell nicht verfügbar. Jedoch können Referenzhöhenwerte aus der SRTM Mission mit in die Analyse eingebunden werden. Der in Abbildung 34 dargestellte Analyseweg wird in der Analyse verfolgt. Für diesen Analyseweg genügt ein geringer aufgelöstes Referenzhöhenmodell.

3 Die TerraSAR-X Mission

Die TerraSAR-X Mission ist als Public Private Partnership (PPP) Projekt zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) und der Firma Airbus Defence & Space beschlossen und liefert Fernerkundungsdaten für wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen [7] . Der TerraSAR-X Satellit wurde am 15. Juni 2007 vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur aus gestartet und soll für mindestens fünf Jahre kontinuierliche Erdbeobachtung ermöglichen. Der Sensor auf dem Satellit liefert unabhängig von Tageslicht und Wetter hochaufgelöste Radarbilder für topographische Karten, Stadtplanung und Katastrophenmanagement [1] .

3.1 Satelliten Orbit

Der TerraSAR-X Satellit bewegt sich in einer nominalen Orbithöhe von ca. 500 [km] mit einer Inklination von 97° [2] . Durch diese Bahn ist gewährleistet, dass der Satellit stets an der Tag-Nacht Grenze fliegt [2]. Auf diese Weise ist die Energieversorgung für das aktive Fernerkundungssystem sichergestellt. Der Satellitenorbit ist so ausgelegt, dass TerraSAR-X nach elf Tagen wieder exakt dieselbe Position hat. Dieser Zeitraum wird repeat cycle oder revisit time genannt [8] . Für Interferometrisches SAR ist diese Revisit Time von besonderem Interesse, da hier eine besonders kurze geometrische Basislinie zwischen den Aufnahmen realisiert werden kann. Ein Untersuchungsgebiet kann bereits nach zwei bis vier Tagen ein Gebiet erneut aufgenommen werden kann, dann jedoch unter veränderter Aufnahmegeometrie [8] . Die Genauigkeit der Orbitdaten hat immensen Einfluss auf das Ergebnis der Analyse. Der Satellitenbetreiber bietet drei Qualitäten für die Genauigkeit der Orbitparameter an [7] :

Name	Genauigkeit	Zweck
Predicted Orbit	700m entlang der Flugbahn	Für „Near-Real-Time“ Produkte
Rapid Orbit	2m (3D, 1sigma)	Standard Prozessierung
Science Orbit	20cm (3D, 1sigma)	Für Stapelanalysen von SAR-Bildern

Tabelle 5: Orbit-Genauigkeiten bei TerraSAR-X

Im Rahmen dieser Untersuchung werden SAR-Bilder mit Science Orbit Information verarbeitet. Diese weisen die höchste geometrische Genauigkeit auf.

3.2 Sensor des TerraSAR-X

Der Sensor des TerraSAR-X ist eine aktive elektronisch gesteuerte Antenne (active phased array antenna), die im X-Band Frequenzbereich (Mittenfrequenz 9,65 GHz) arbeitet [8] . Die TerraSAR-X Antenne kann in zwei Polarisationen (H = horizontal und V = vertikal) operieren. Außerdem erlaubt die Konstruktion der Antenne die Antennenkeule in Flugrichtung um $0,75^\circ$ und quer zur Flugrichtung um 20° zu schwenken [2] . Aufgrund dieser Beweglichkeit der Antennenkeule wird es ermöglicht, Aufnahmen mit einer Auflösung von einem Meter im Spotlight Aufnahmemodus [1] anzufertigen.

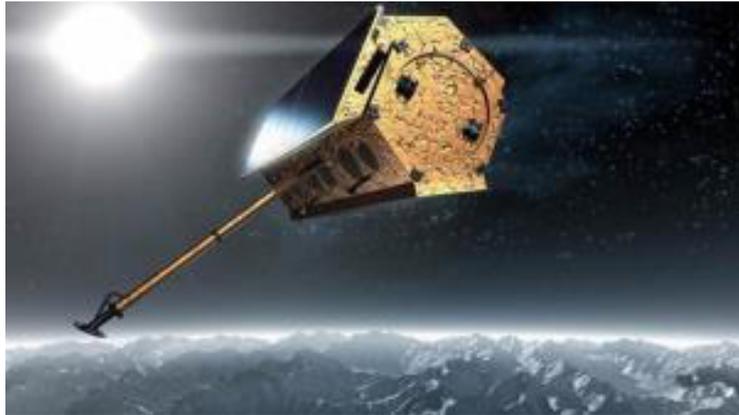


Abbildung 35: TerraSAR-X [1]

TerraSAR-X kann verschiedene Aufnahmemodi durchführen, sodass der Nutzer den Schwerpunkt entweder auf große Abdeckung, oder auf große Auflösung legen kann. Zusätzlich bietet die Aufzeichnung voll polarimetrischer Informationen weitere Analysemöglichkeiten. Der TerraSAR-X Sensor kann entweder in einfacher Polarisation, oder dualer Polarisation operieren. Bei der einfachen Polarisation verändert sich die Polarisation zwischen den Sendepulsen nicht. Bei der dualen Polarisation hingegen wird zwischen den einzelnen Sendepulsen, oder Empfangspulsen die Polarisationsrichtung des Sensors geändert [8]. Für die gegebene Aufgabenstellung werden hochaufgelöste SAR-Bilder genutzt, die im Spotlight Aufnahmemodus (siehe Kapitel 3.4) erfasst wurden.

3.3 TerraSAR-X Produkte

Die Firma AIRBUS DEFENCE& SPACE²² als Betreiber des TerraSAR-X unterscheidet zwischen Basic Image Products und Enhanced Image Products. Die Basic Image Products werden auch als L1b-Produkte bezeichnet. Die folgenden Definitionen entstammen den TerraSAR-X Produkt Hinweisen [7] und [8]

Folgende Produkte werden als Basic Image Product (L1b-Produkte) verstanden:

- **Slant Range Image Product (SSC):** Dieses Produkt stellt ein fokussiertes SAR-Bild dar, welches noch in Schrägsicht Geometrie (Slant-Range) dargestellt ist. Die einzelnen Pixel beinhalten Informationen zu Phase und Amplitude der empfangenen elektromagnetischen Signale. Sie sind in Sensoraufnahme Geometrie abgelegt (d.h. Azimut-Richtung und Rangerichtung). Das Produkt wird im COSAR-Format geliefert, welches im Detail in Anhang I dargestellt wird.
- **Multi Look Ground Range Product (MGD):** Dieses Produkt weist reduziertes Speckle Rauschen auf, da hier Multi-Look Filterung eingesetzt wurde. Das Satellitenbild ist bereits in Ground-Range umgerechnet, jedoch noch nicht georeferenziert
- **Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC):** Dies stellt ebenfalls ein Produkt dar, welches auf Multi-Look Daten basiert. Dabei werden die SAR-Bilder auf ein WGS84 Referenzellipsoid mit einer mittleren Höhe projiziert. Dabei wird keine Geländekorrektur

²² <http://www.astrium-geo.com/de/>

durchgeführt. Die Pixelgenauigkeiten dieses Produktes sind abhängig von der lokalen Topographie, da in die Berechnung kein digitales Geländemodell einfließt.

- **Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC):** Dieses Produkt entspricht dem GEC, wird jedoch zusätzlich noch über ein externes digitales Geländemodell korrigiert. Es wird als das Produkt mit dem höchsten Grad an geometrischer Korrektur innerhalb der Basic Image Products betrachtet.

Folgende Produkte werden als Enhanced Products verstanden:

- **Orthorectified Image (ORI):** Dies stellt ein orthorektifiziertes SAR-Bild dar. Dazu werden Korrekturen bezüglich der Geländeoberfläche angebracht und fehlerhafte Bereiche im SAR-Bild (insbesondere Layover und Schatten) werden beseitigt. Dadurch wird eine erhöhte Lagegenauigkeit der Bildpixel erreicht. Es wird insbesondere empfohlen für Nutzer, die schnelle Bildinterpretation im Zusammenspiel mit anderen Informationsquellen durchführen wollen.
- **Radiometrically Corrected Image (RaN):** Dieses Produkt stellt eine radiometrische Korrektur der GEC und EEC Produkte dar. Dieses Produkt wird empfohlen für Klassifikationen, die unabhängig von Blickwinkelabhängigkeiten sind sowie für die Kombination verschiedener benachbarter Aufnahmen, da bei diesem Produkt die Winkelabhängigkeiten zwischen den Aufnahmen korrigiert werden können.
- **Mosaic (MC):** Um größere Gebiete abzudecken, können benachbarte georeferenzierte oder orthorektifizierte Bilder kombiniert werden. Der radiometrische Einfluss der einzelnen Bilder wird automatisch korrigiert. Außerdem wird die Sichtbarkeit von Schnittkanten durch die geschickte Wahl entlang von topographischen Gegebenheiten (z.B.: Waldrand oder Straße) vermindert.

Ascending/ Descending Merge (ADM): Dieses Produkt stellt eine Verschneidung von SAR-Bildern aus dem aufsteigenden und absteigenden Arm des Satelliten Orbits. Dieses Produkt kann aus EEC, ORI oder MC Produkten erstellt werden.

3.4 TerraSAR-X Aufnahmemodi

Der TerraSAR-X Sensor beherrscht eine Reihe verschiedener Aufnahmemodi zum Erzeugen von Bildprodukten, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften genauer betrachtet werden müssen.

StripMapSAR: Dies stellt den grundlegenden SAR-Aufnahmemodus dar. Dabei wird ein Gebiet mit einer konstanten Aufnahmegeometrie erfasst. Die Aufnahmen können dabei in einfacher, oder in dualer Polarisation durchgeführt werden.

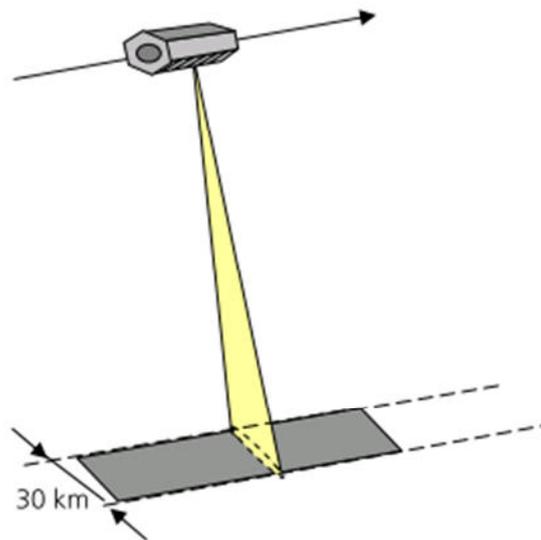


Abbildung 36: Stripmap SAR-Aufnahmegeometrie des TerraSAR-X [8]

Die Leistungswerte einer Stripmap SAR-Aufnahme betragen:

Parameter	Wert
Streifenbreite	30 [km] (einfache Polarisation) 15 [km] (duale Polarisation)
Szenenlänge	50 [km]
Neigungswinkel des Sensors (optimal)	20°-45°
Erfassungswinkel des Sensors	15°-60°
Auflösung in Azimuth-Richtung	3,3 [m] (6,6 [m] bei dualer Polarisation)
Auflösung in Entfernungsrichtung	1,7 – 3,49 [m] (Erfassungswinkel 20° - 45°)

Tabelle 6: Leistungsparameter einer Stripmap SAR-Aufnahme bei TerraSAR-X [8]

ScanSAR-Aufnahmemodus: Beim ScanSAR-Mode werden besonders große Bereiche der Erdoberfläche erfasst. Dies hat allerdings zur Folge, dass nur eine begrenzte Empfangsbandbreite und damit eine geringere Bodenaufklärung erzielt werden kann.

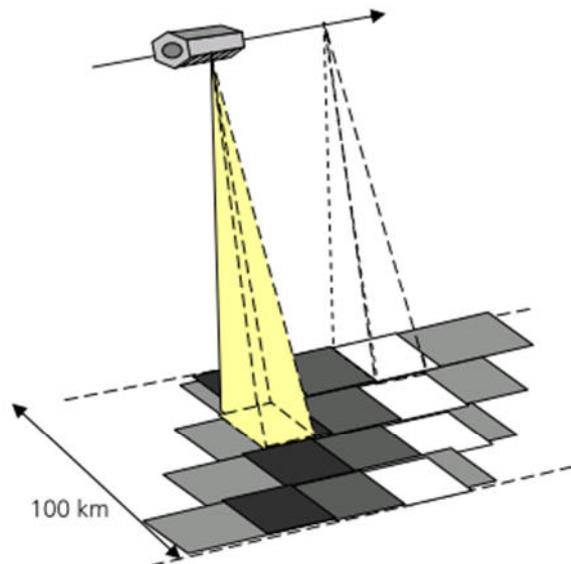


Abbildung 37: ScanSAR Aufnahmemodus des TerraSAR-X [8]

Die Leistungswerte einer ScanSAR-Aufnahme betragen:

Parameter	Wert
Anzahl der Teilstreifen	4
Breite des Gesamtstreifens	<100 [km]
Szenenlänge	<150 [km]
Neigungswinkel des Sensors (optimal)	20°-45°
Erfassungswinkel des Sensors	15°-60°
Azimuth-Auflösung	18,5 [m]
Auflösung in Entfernungsrichtung	1,7 -3,49 [m] bei Erfassungswinkel 20°-45°

Tabelle 7: Leistungsparameter des ScanSAR-Aufnahmemodus bei TerraSAR-X [8]

Spotlight SAR-Aufnahmemodus: Um besonders hohe geometrische Auflösung am Boden zu erreichen kann der sogenannte Spotlight SAR-Aufnahmemodus genutzt werden. Dabei wird ein Untersuchungsgebiet während des Vorbeifluges besonders lange durch den SAR-Sensor beleuchtet. Dadurch verlängert sich die Integrationszeit und vergrößert sich die registrierte Dopplerverschiebung eines Punktes, welches die Auflösung am Boden verbessert. Dieses Verfahren kann man im Extremfall soweit bringen, dass sich das beleuchtete Gebiet (Antennenausleuchtfleck) nicht verändert. Dies nennt man Staring Spotlight. TerraSAR-X verwendet das sogenannte sliding Spotlight, bei dem der Antennenausleuchtfleck langsam mit dem Satelliten mitwandert. Dadurch verringert sich zwar die erreichbare geometrische Auflösung, jedoch vergrößert dieses Verfahren die Szenengröße. Der TerraSAR-X Sensor kann diesen Aufnahmemodus mit einfacher Polarisation (HH oder VV) oder dualer Polarisation (HH/VV) durchführen.

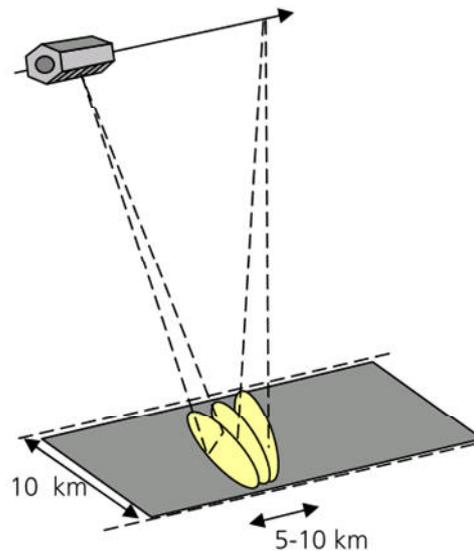


Abbildung 38: Spotlight Aufnahme Modus bei TerraSAR-X [8]

Es werden bei TerraSAR-X Spotlight Aufnahmemodi unterschieden:

- Staring Spotlight (ST)
- High Resolution Spotlight (HS)
- Spotlight Mode (SL)

Parameter	Spotlight Mode (SL)	High Resolution Spotlight Mode (HS)	Staring Spotlight Mode
Szenengröße ^a	10 x 10 [km ²]	5 x 10 [km ²]	3,7 x 4 [km ²]
Erfassungswinkel (optimal)	20° - 55°	20° - 55°	20° - 45°
Erfassungswinkel	15° - 60°	15° - 60°	15° - 60°
Auflösung in Azimut	1,7 [m] ^b , 3,4 [m] ^c	1,1 [m] ^b , 2,2 [m] ^c	0,24 [m]
Auflösung in Entfernungsrichtung	1,48 – 3,49 [m] ^d	1,48 – 3,49 [m] ^d	0,6 [m]
^a Azimutrichtung * Entfernungsrichtung ^b einfache Polarisation ^c doppelte Polarisation ^d bei Erfassungswinkel 20° - 55°			

Tabelle 8: Leistungsparameter der Spotlight-Aufnahme Modi für TerraSAR-X [8]

Die vorliegenden Untersuchungsbilder sind als High Resolution Spotlight SAR-Bilder bereitgestellt.

3.5 Vergleich SAR-Bild zu optischen Bild

Für die Untersuchung stehen insgesamt 13 hochauflösende SAR-Bilder des TerraSAR-X Satelliten zur Verfügung. Diese sind im Spotlight Aufnahmemodus erfasst. Die Bilder weisen eine Entfernungsauflösung am Boden von 1,64 [m] und eine Azimut Auflösung von 1,10 [m]

auf. Die SAR-Bilder sind im absteigenden Orbit (Descending) des Satelliten aufgenommen. Bei einer Aufnahme im absteigenden Orbit fliegt der Satellit von Nord nach Süd, während bei einem aufsteigenden Orbit (Ascending) der Satellit von Süd nach Nord fliegt (siehe Abbildung 39).

Datum	Polarisation	Orbit
27.11.2013	HH	Descending
19.12.2013	HH	Descending
08.04.2014	VV	Descending
19.04.2014	HH	Descending
11.05.2014	VV	Descending
22.05.2014	HH	Descending
13.06.2014	VV	Descending
24.06.2014	HH	Descending
16.07.2014	VV	Descending
27.07.2014	HH	Descending
18.08.2014	HH	Descending
09.09.2014	VV	Descending
20.09.2014	HH	Descending

Tabelle 9: SAR-Bildmaterial mit Polarisation und Orbit

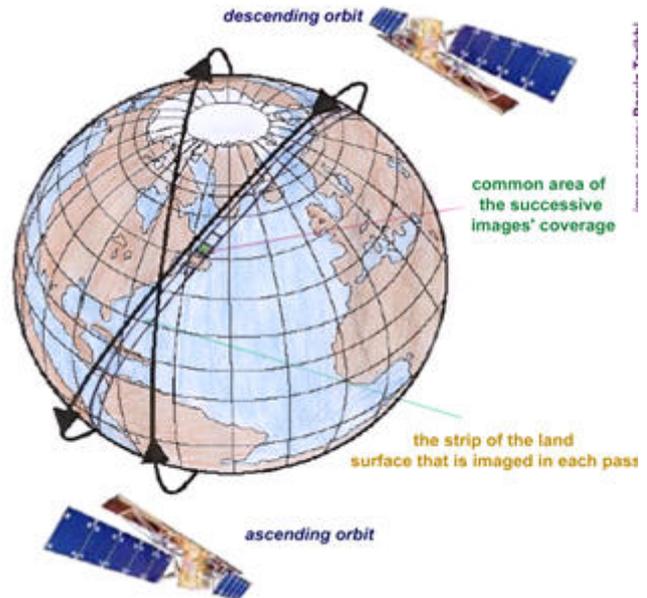


Abbildung 39: Unterschied zwischen aufsteigenden (ascending) und absteigenden (descending) Orbit Quelle: parviztarikhi.wordpress.com²³

²³ <http://parviztarikhi.wordpress.com/features-2/insar-for-aquatic-bodies/>

4 Verfahren zur interferometrischen Analyse mit SARscape

SARscape ist eine umfangreiche kommerzielle Toolbox zur Auswertung von SAR-Bildmaterial. Diese Toolbox kann als zusätzliche Funktionalität in andere kommerziell verfügbare Analysesoftware eingebunden werden. Eine Verknüpfung mit der Software ENVI der Firma EXELIS, oder auch ArcGIS der Firma ESRI sind möglich. Im vorliegenden Fall wurden Untersuchungen in ENVI eingebettet. Dabei erscheint in ENVI ein zusätzlicher Ordner im Bereich der Werkzeuge, der auf die SARscape Werkzeuge zugreift.

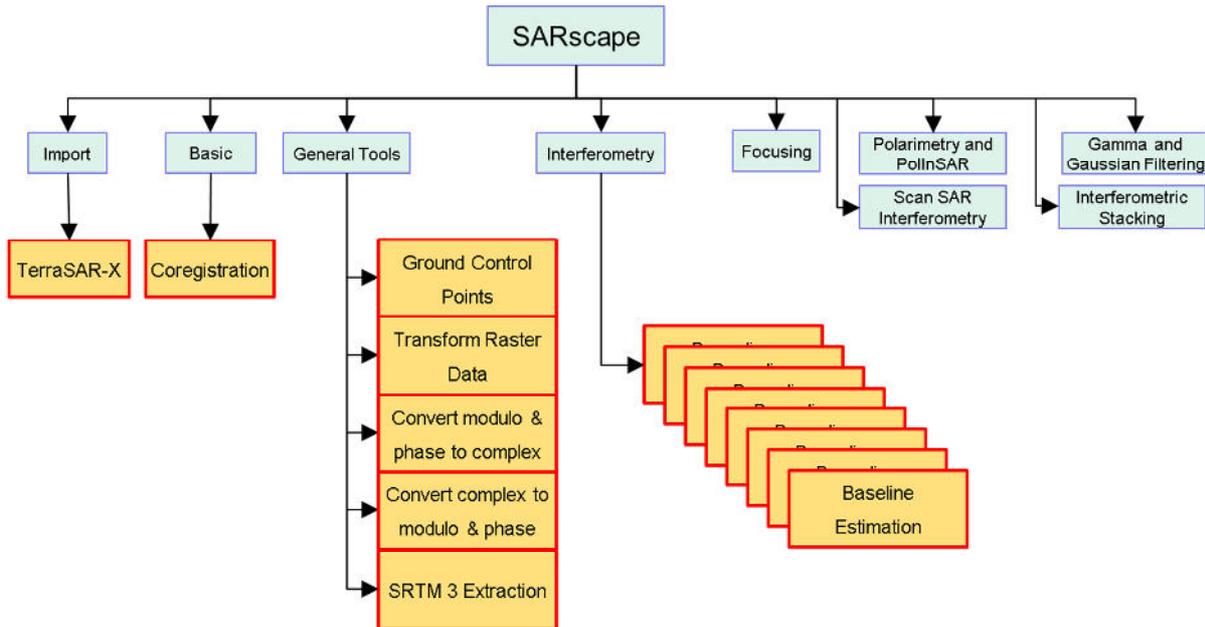


Abbildung 40: SARscape Toolbox Hauptgruppen der Werkzeuge

Die SARscape Toolbox besitzt neun Werkzeughauptgruppen, in denen sich die Werkzeuge der Toolbox befinden (siehe Abbildung 40). Für die durchgeführten Analysen werden Werkzeuge aus den Hauptgruppen Import, Basic, General Tools und Interferometry entnommen.

4.1 Bestimmung der Basislinien

Die Basislinien (oder Baselines) zwischen den einzelnen Satellitenbildern sollten nahe null sein. In [13] wird für die ERS Satelliten ein Wert von 30[m] bis 50[m] für Änderungsdetektion angegeben. Um dies zu überprüfen werden die Basislinien zwischen den einzelnen Satellitenbildern bestimmt. Dieser Schritt ist erforderlich um bewerten zu können, wie gut die Interferogramme erstellt werden können.

erstes SAR Bild	zweites SAR Bild	normale Basislinie [m]	kritische Basislinie min [m]	kritische Basislinie max [m]	temporale Basislinie [d]
20140511	20140613	-5,392	-9639,83	9639,83	33
20140511	20140716	-36,633	-9639,83	9639,83	66
20140522	20140624	-55,625	-9639,56	9639,56	33
20140522	20140727	-149,487	-9639,56	9639,56	66
20140613	20140716	-37,883	-9640,88	9640,88	33
20140613	20140909	-166,978	-9640,87	9640,87	88
20140716	20140909	-133,458	-9640,07	9640,07	55
20140727	20140818	54,937	-9641,67	9641,67	22
20140624	20140818	-42,616	-9640,87	9640,87	55
20140624	20140727	-94,628	-9640,87	9640,87	33

Tabelle 10: Basislinien zwischen zwei Bildern

In Tabelle 10 sind die bestimmten Basislinien-Werte aufgeführt, die die Funktion „Baseline Estimation“ errechnet. Bei einer größeren Basislinie reagiert die Interferometrie sensitiver auf Phasenunterschiede. Wenn jedoch die Basislinie zu groß wird, können die Phasenunterschiede nicht mehr korrekt aufgelöst werden. Bei kleinen Basislinien ändert sich die Phase über mehrere Auflösungszellen, bevor der 2π Übergang erfolgt. Wenn die Basislinie zu groß wird, erhält man in jeder Auflösungszelle diese 2π Übergänge. Es wird dann unmöglich die tatsächlichen Veränderungen der Erdoberfläche zu rekonstruieren (RICHARDS 2009 [b] Seite 194). Diese Basislinie wird als kritische Basislinie bezeichnet. Aus Tabelle 10 ist erkennbar, dass alle gemessenen Basislinien deutlich kürzer sind, als die kalkulierten kritischen Basislinien.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Änderungsdetektion an der Erdoberfläche durchgeführt werden. Diese Änderungsdetektion folgt dem Prinzip der Across Track Interferometrie (siehe Kapitel 2.5). Dabei sollte die räumliche Basislinie jedoch sehr klein sein ([b] Seite 198), damit die Phasenunterschiede auf die Änderung der Topographie zurückzuführen sind. Diese Voraussetzung kann nach Berechnung der Basislinien als erfüllt betrachtet werden.

Weiterhin ist ersichtlich, dass die zeitliche Basislinie (wichtig für Along Track Interferometrie siehe 2.5) sich zwischen 33 und 88 Tagen bewegt. Nach jeweils 11 Tagen befindet sich der TerraSAR-X Satellit an identisch derselben Position. Die verfügbaren Aufnahmen sind jeweils nach Vielfachen dieser Revisit Time erfasst, daher sollte die räumliche Basislinie auch sehr gering sein. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass nicht nur nahezu dasselbe Gebiet betrachtet wird, sondern dass dazu auch nahezu dieselbe Aufnahmegeometrie verwendet wird.

4.2 Ablauf interferometrische Untersuchung in SARscape

Um eine interferometrische Untersuchung in SARscape durchzuführen zu können, müssen ein Referenzbild (Master-Image) und ein Untersuchungsbild (Slave-Image) vorliegen, die mit demselben Sensor, demselben Erfassungsmodus, derselben Polarisation und derselben

Bildgeometrie erzeugt worden sind²⁴. In diesem Kapitel sollen auch einige wichtige Tools aus der SARscape Toolbox vorgestellt werden. Die Beschreibung basiert dabei auf der Software-eigenen Hilfe und wird nur da, wo es extra gekennzeichnet ist, durch andere Quellen ergänzt.



Abbildung 41: Funktionsablauf in SARscape für die interferometrische Änderungsanalyse

Der Analyselauf in SARscape nutzt außer den Interferometrie Werkzeugen die generell bereitgestellten Werkzeuge:

- Import/ TerraSAR-X Bilder
- Basic/Koregistrierung
- General Tools/ Ground Control Points
- General Tools/ SRTM 3 Extraction
- General Tools/ Transform Raster Data
- General Tools/ Convert Complex to Modulo & Phase
- General Tools/ Convert Modulo & Phase to Complex

Der interferometrische Analyseablauf in SARscape ist in Abbildung 41 graphisch dargestellt. Es besteht die Möglichkeit die interferometrische Untersuchung auf drei Wegen durchzuführen:

- 1.) Basislinien-Messung, Interferometric Workflow (1step), Refinement and Reflattening, Phase to Height Conversion, Phase to Displacement Conversion
- 2.) Basislinien-Messung, Interferogramm Estimation, Adaptive Filter & Coherence, Phase Unwrapping, Refinement and Reflattening, Phase to Height Conversion, Phase to Displacement Conversion
- 3.) Basislinien-Messung, Dual Pair Interferometry

²⁴ SARscape Hilfe Frequently Asked Questions Interferometry Module

Die Eingänge und Ausgänge der einzelnen Funktionen werden im Detail in den jeweiligen Kapiteln dargestellt. Der prinzipielle Ablauf für eine interferometrische Analyse von SAR-Bildmaterial listet neun Punkte auf, die logisch aufeinander folgen [9] :

Nr.	Analyseschritt gem. SAR-Guidebook	Realisierung in SARscape
(1)	Basislinien-Messung	Interferogramm erzeugen (Kapitel 4.3)
(2)	Generierung des Interferogramm's	
(3)	Kohärenzberechnung und adaptive Filterung	Adaptive Filterung & Kohärenz
(4)	Phase Unwrapping zur Berechnung absoluter Phasenwerte	Phase Unwrapping
(5)	Verfeinerung der Orbitparameter	Orbital Refinement & Reflattening (Kapitel 4.4)
(6)	Höhenberechnung aus den absoluten Phasen und Geocodierung	Phase to Height
(7)	Phasen zu Versatz Berechnung	Phase to Displacement (Kapitel 4.6)
(8)	Differentielle Interferometrie	
(9)	Phasen bewahrende SAR Fokussierung	

Tabelle 11: Reihenfolge einer interferometrischen Analyse in SARscape (Quelle [9])

Als Ergebnis der eigenen Untersuchung wird ein Interferogramm, wie in Abbildung 42 zu sehen ist, erwartet. In diesem Interferogramm sind die Phasen Ringe (fringe) auf die Verschiebung durch das Erdbeben zurückzuführen.

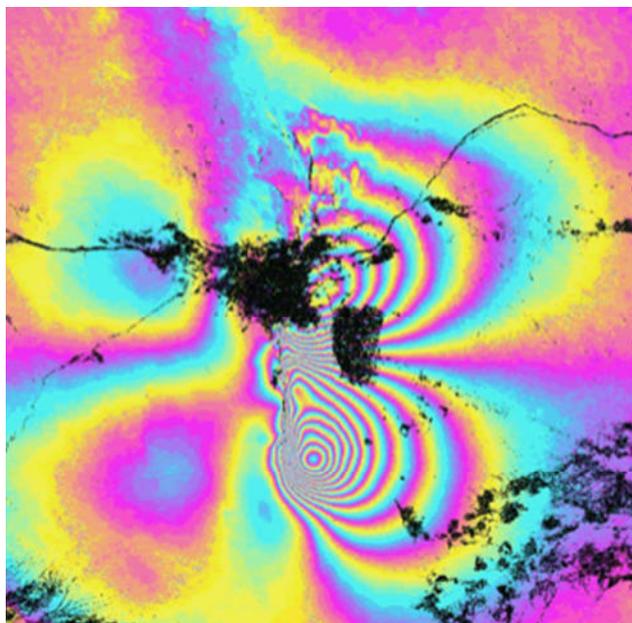


Abbildung 42: Displacement Interferogramm nach Erdbeben im Iran (Quelle:[e])

4.3 Erzeugen der Interferogramme

Das Erzeugen der Interferogramme stellt einen wesentlichen Grundbaustein für die vorliegende Analyse dar. Aus den Metadaten können die Umrisse dieser Satellitenbilder

ausgelesen werden, sodass das Werkzeug DEM Extraction den erforderlichen Bereich der im Internet verfügbaren Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Höhendaten bereitstellen kann.

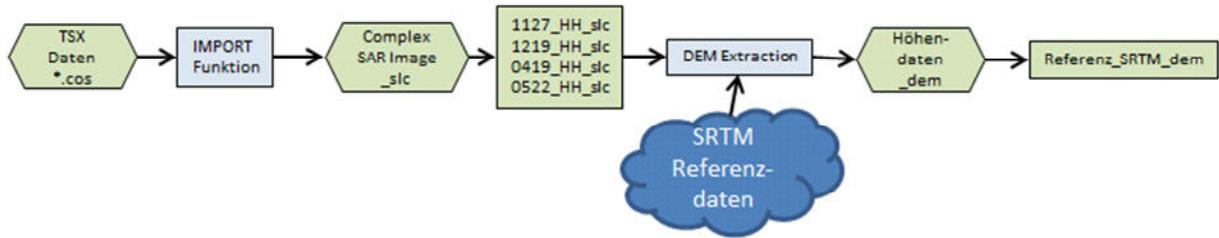


Abbildung 43: Importieren der SAR-Bilder und Extrahieren des Referenz Höhenmodells als Voraussetzung für die Interferometrie

Die komplexen SAR-Bilder (_slc) gehen zusammen mit dem in Abbildung 43 dargestellten Referenz-Höhenmodell in die Erzeugung der Interferogramme ein.

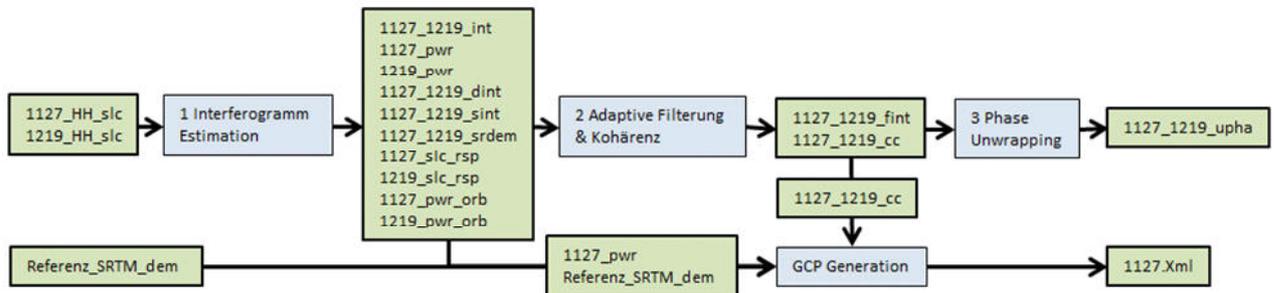


Abbildung 44: Erzeugen der Interferogramme und der Kontrollpunkte

Nach der Interferogramm Erzeugung werden diese berechneten Interferogramme (z.B.: 1127_1219_int) über das Werkzeug „Adaptive Filterung und Kohärenz“ gefiltert um abschließend im Werkzeug „Phase Unwrapping“ zu absoluten Phasen-Bildern (z.B.: 1127_1219_upha) umgerechnet zu werden (siehe Abbildung 44). Außerdem müssen noch für weitere Werkzeuge Bodenkontrollpunkte (Ground Control Point GCP) erfasst werden. Dafür stellt SARscape ein eigenes Werkzeug zur Verfügung.

Für die Berechnung der Interferogramme stehen in SARscape folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Entweder stellt der Nutzer den single-step Workflow ein, welcher zunächst die Interferogramme erzeugt, diese danach filtert und zum Schluss ein Phase Unwrapping durchführt um aus den relativen Phasenwerten ($0-2\pi$) Absolute Phasenwerte zu erzeugen,
- oder der Nutzer lässt diese Arbeitsschritte getrennt voneinander in eigenen Werkzeugen (Interferogramm Generation, Adaptive Filtering and Coherence Generation, Phase Unwrapping) ablaufen (siehe Abbildung 44). Dieser Ansatz bietet dem Nutzer ein stärkeres Maß der Interaktion, da direkt auf die Zwischenergebnisse zugegriffen werden kann.

Im Rahmen dieser Analyse werden mehrere Interferogramme erzeugt, die jeweils vor und nach einem der beiden Erdbebenereignisse aufgenommen wurden. Neben den Eingangsdatensätzen benötigt das Tool noch die Angabe folgender Eingangsparameter:

Eingangsdateien und Parameter	Bedeutung
Master / Slave file	Komplexe Referenz-, und Untersuchungsbilder (_slc).
Digital Elevation Model file	Name des Referenz Höhenmodells; dieses sollte sich auf ein Ellipsoid beziehen.
Azimuth Looks/ Range Looks	Anzahl der Looks in Azimut und in Range
Coregistration with DEM	Wenn diese Option gewählt wird, werden die komplexen Eingangsdaten (_slc) mit dem Referenzhöhenmodell koregistriert. Dadurch können die Kohärenz und die interferometrische Phase verbessert werden, insbesondere dann, wenn hochaufgelöstes Material prozessiert wird. Es wird empfohlen diese Option nicht zu wählen, wenn die Orbitparameter ungenau sind.
Load GCP file / Create GCP file	Diese Option erlaubt entweder die Erfassung von Bodenkontrollpunkten, oder das Laden bereits erfasster Kontrollpunkte. Wenn die verfügbaren Satelliten Orbit Daten zu ungenau sind, werden Bodenkontrollpunktdateien (GCP) benötigt, um die SAR-Daten zu korrigieren. Die GCP sollen in Bezug zum Master-File erstellt werden.
Prozessierungseinstellung	generelle Einstellungen in SARscape Coregistration Setting <ul style="list-style-type: none"> • Flattening Setting • Kohärenz Berechnung • Phase Unwrapping Methode • Resampling
Output Root Name	Basisname der Ergebnisdateien. An diese Basis werden die in Tabelle 13 aufgeführten Dateierweiterungen angehängt

Tabelle 12: Eingangsdateien und -parameter für die Berechnung der Interferogramme

Datei	Bedeutung
_int	Interferogramm
_dint	Abgeflachtes Interferogramm (Interferogramm, bei dem die Topographie über ein Referenzhöhenmodell vom Interferogramm entfernt wurde)
_par	ASCII Datei, die die Verschiebungsparameter der Koregistrierung beinhaltet
_pwr	Intensitätsbilder vom Referenzbild- (_master) und Untersuchungsbild (_slave)
_orb.xml	Xml Datei, die die Orbit Parameter der Szene beinhaltet

_sint	Synthetisches Interferogramm
_srdem	Digitales Höhenmodell in Slant Range Geometrie
_fint	Gefiltertes Interferogramm, wird nur erzeugt wenn die Auswahl „adaptive Filterung“ gewählt wurde
_part1_fint / _part2_fint	Gefiltertes Interferogramm das abgeleitet ist aus den niedrigsten Anteilen /höchsten Anteilen des Doppler-Spektrums
_mai_fint	Gefiltertes Interferogramm das die Differenz zwischen höchsten und niedrigsten Doppler Frequenzen darstellt.
_cc	Geschätzte Kohärenz; wird nur erzeugt wenn die Funktion Coherence Generation aktiviert wurde
_upha	Absolute Phase
_slc_rsp	Koregistrierte Single Look Komplex Daten

Tabelle 13: Ergebnisdateien der Interferogrammerzeugung

Der Entfernungsunterschied zwischen einem Bodenpunkt und der Sensorposition bei mehreren Aufnahmen kann über den Phasenunterschied $\Delta\varphi$ zwischen zwei koregistrierten komplexen SAR-Bildern gemessen werden. Die interferometrische Phase φ wird berechnet über:

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{\text{imaginär}(I)}{\text{real}(I)}\right)$$

Wobei:

imaginär (*I*) ... Imaginärteil des Interferogramms
real (*I*) ... Realteil des Interferogramms

Formel 13: Berechnung der interferometrischen Phase

Das Abflachen der Interferogramme wird mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells, oder eines Ellipsoidmodells durchgeführt. Die Kontrollpunkte werden dafür verwendet das Master-Bild auf das digitale Höhenmodell zu korrigieren.

Für jede der durchgeführten Analysen muss ein Bodenkontrollpunkt (siehe Abbildung 45: Beispiel-XML Code eines Bodenkontrollpunktes

) verfügbar sein. Diese werden im ersten Master-Bild erfasst und erhalten die geographischen Koordinaten von Corner-Reflektor 1.

```
<GCP_FILE>
  <GCP_NUMBER>1</GCP_NUMBER>
  <GCP ID = "0">
    <GCP_LABEL>GCP_1</GCP_LABEL>
    <GCP_TYPE>undefined</GCP_TYPE>
    <GCP_COLUMN>4207.000</GCP_COLUMN> <GCP_ROW>3002.000</GCP_ROW>
    <GCP_AZIMUTH_LOOKS>1</GCP_AZIMUTH_LOOKS>
    <GCP_RANGE_LOOKS>1</GCP_RANGE_LOOKS>
    <GCP_OTHER_INFO>20140511_VV_slc</GCP_OTHER_INFO>
    <CartographicSystem>
      <State>GEO-GLOBAL</State>
      <Projection>GEO</Projection>
      <Ellipsoid>WGS84</Ellipsoid>
    </CartographicSystem>
```

Bildkoordinaten

Bezugsdatei

```

<GCP_MEASURE_TYPE>POSITION_AND_VELOCITY_LIST</GCP_MEASURE_TYP
<MEASURE_LIST NUMBER_OF_POINT = "1">
  <MEASURE_POINT ID = "0">
    <X>-121.388700</X> <Y>36.749422</Y> <Z>390.000</Z>
    <VX>0.0000</VX> <VY>0.0000</VY> <VZ>0.0000</VZ> <STD>0.000</STD>
    <TIME>17-NOV-2014 12:48:59.000000</TIME>
  </MEASURE_POINT>
</MEASURE_LIST>
</GCP>
</GCP_FILE>
  
```

Geographische
Koordinaten

Abbildung 45: Beispiel-XML Code eines Bodenkontrollpunktes

Die XML-Notation eines solchen GCP ist in Abbildung 45 abgebildet. Dabei sind insbesondere die Bildkoordinaten mit denen der GCP erfasst wurde (GCP_COLUMN und GCP_ROW), die komplexe SAR-Datei in welcher der GCP erfasst wurde (GCP_OTHER_INFO) und die geographischen Koordinaten des Kontrollpunktes (X,Y,Z) hervorgehoben. Für die Analyse in SARscape wird nur ein Referenzpunkt benötigt, da die zur Verfügung stehenden SAR-Bilder bereits über Science Orbit Parameter und damit sehr genaue Orbit Daten verfügen.

4.4 Refinement und Reflattening

Nach dem Phase Unwrapping werden die Orbitparameter für die berechneten absoluten Interferogramme verfeinert. Dieser Schritt ist erforderlich, um die abgewinkelte Phaseninformationen in Verschiebungen, oder Höhenwerte umrechnen zu können.

Datei	Bedeutung
Input Master/ Slave file	Intensitätsbilder von Master-Datei und Slave-Datei (_pwr).
Interferogram file	Name der abgeflachten Phase (_fint, _dint)
Synthetic Phase file	Name der synthetischen Phase (_sint)
Unwrapped Phase file	Absolutphasendatei (_upha)
Coherence file	Datei der Bildkohärenz (_cc)
Slant Range Digital Elevation Model file	Digitales Höhenmodell in Schrägsicht Geometrie (_srdem).
Load / Create Orbital GCP file	Erfassen oder Laden von Bodenkontrollpunkten (.xml).
Digital Elevation Model file	Name des Referenz Höhenmodells. Diese Datei ist erforderlich, wenn sie als Eingangsdatensatz für die Berechnung des abgeflachten Interferogramms genutzt wurde. Wenn kein Referenz-Höhenmodell angegeben wird, werden ellipsoidische Höhen angenommen.
Re-flattening	Wenn diese Option gewählt wird, werden korrigierte Ergebnisprodukte erzeugt gem. den Einstellungen für Refinement, Sollte diese Option nicht gewählt werden, werden Korrekturparameter in die Header Dateien der Absoluten-Phase

	(_upha.sml) eingetragen, jedoch keine neuen korrigierten Dateien erzeugt.
--	---

Tabelle 14: Eingangsdateien für Refinement und Reflating

Wie in Tabelle 14 zu sehen ist, benötigt das orbitale Refinement verschiedene Eingangsdatensätze und Parameter, die bereits im vorangegangenen Werkzeug (siehe Kapitel 4.3) erzeugt wurden. Weiterhin werden die erfassten GCP eingebunden. Als Ergebnis liefert das Tool eine Reihe statistischer Parameter, die für die durchgeführte Analyse in Tabelle 15 abgebildet sind.

		20131127_20131219	20140419_20140522
A-priori achievable RMS (m)		0.8594	1.2328
Orbitale Verschiebung	X-Richtung (m)	8.9895	-46.1079
	Y-Richtung (m)	1.5424	0.8964
	Z-Richtung (m)	-8.2457	46.1490
Richtungsabhängigkeit des Versatzes	X-Richtung (m/pixel)	-0.0108	0.0405
	Y-Richtung (m/pixel)	-0.0016	0.0061
	Z-Richtung (m/pixel)	0.0047	-0.0169
Phasenversatz der Absolutphase (rad)		-627.83105	712.2256
Root Mean Square Fehler (m)		18.62545	10.7796
Mean difference POINTS HEIGHT after Orbital refinement (m)		0.06367	-0.0231
Standard Deviation POINTS HEIGHT after Orbital refinement (m)		24.26715	9.2305

Tabelle 15: Statistische Auswertung des Refinements

Dabei muss beachtet werden, dass sich das zweite Interferogramm (20140419_20140522) auf das erste Interferogramm (20131127_20131219) bezieht. Einige Parameter (z.B.: Phasenversatz in rad) erscheinen daher in einer höheren Größenordnung.

Ergebnisdatei	Bedeutung
_reflat_dint/fint	Abgeflachtes Interferogramm
_reflat_sint	Abgeflachte synthetische Phasendatei
_reflat_upha	Abgeflachte absolute Phasen
_reflat_srdem	Höhenmodell in Schrägsichtgeometrie
_reflat.txt	Textdatei mit den Korrekturparametern der Refinement Funktion
_refinement.shp	Shapefile, der Bodenkontrollpunkte mit folgenden Attributen: <ul style="list-style-type: none"> • Höhenwert (m) aus dem Referenz Höhenmodell in Entfernungsrichtung • Absolute und relative Höhenunterschiede zwischen den Höhenwerten vom Referenzhöhenmodell und Höhenwerten, die aus den korrigierten Orbits gewonnen werden

	<ul style="list-style-type: none"> • Standardabweichung (in m) der Bodenkontrollpunkte • Standardabweichung (in rad) der Bodenkontrollpunkte
--	--

Tabelle 16: Ergebnis Dateien Refinement

4.5 Umrechnen der Phaseninformationen in Höhenwerte

Mit Hilfe des Werkzeuges Phase to Height Conversion können aus den absoluten interferometrischen Phasen Höhenwerten berechnet werden. Dabei gehen in die Berechnung neben den absoluten Phasenwerten auch die synthetischen Phasenwerte (_sint) ein. Diese synthetischen Phasenwerte entsprechen der Phasenänderung, die durch die flache Erde verursacht wird. In SARscape wird auch der Einfluss der Höhe aus dem Referenzhöhenmodell mit in die synthetische Phase eingerechnet. Die Höhenwerte werden danach in eine Kartenprojektion gebracht. Durch die simultane Lösung der Range-Doppler Gleichungen für die beiden Sensoren können die Höhe und die exakte Position für jeden Pixel bestimmt werden. Außerdem wird die Kohärenz ebenfalls in die Kartenprojektion umgerechnet und geocodiert.

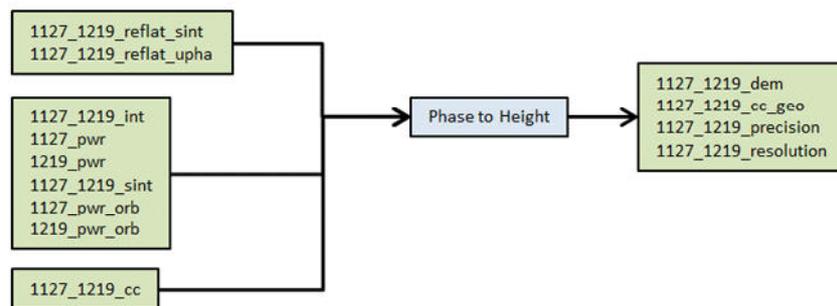


Abbildung 46: Eingangsdateien und Ergebnisdateien des Tools Phase to Height

Datei	Bedeutung
Unwrapped Phase file	Datei der Absolutphasen Diese Datei wird im Modul Refinement und Reflating erzeugt (siehe Kapitel 4.4)
Master / Slave Orbit file	Datei mit den Orbitparametern des Master-Bildes bzw. des Slave Bildes (_pwr_orb.sml).
Coherence file	Kohärenzdatei (_cc)
Synthetic Phase file	Synthetisches Phasenbild (_sint)
Product Coherence Threshold	Pixel, deren Kohärenz niedriger ist als diese Schwelle, werden im Ergebnis auf Not a Number (NaN) gesetzt.
Grid Size	Die Rasterweite in den Ergebnisdaten muss gesetzt werden. Dabei können unterschiedliche Rasterweiten für die Koordinatenrichtungen X (Ost) und Y (Nord) festgelegt werden.
Interpolation Window Size	Dummy Werte werden interpoliert. Dieser interpolierte Wert stellt den Mittelwert der gültigen umgebenden Werte dar,

	welche sich im angegebenen Interpolationsfenster befinden. Wenn hier null eingestellt wird, erfolgt keine Interpolation.
Mean Window Size	Die Ergebnishöhen werden durch einen Mittelwertfilter mit der angegebenen Filtergröße gefiltert. Dieser Schritt am Ende der Interpolationen und erfolgt auf dem Höhenmodell.
Relax Interpolation	Wenn für ein Pixel aus der Analyse keine Werte herauskommen, kann mit dieser Option eine Interpolation aus dem Referenzhöhenmodell erreicht werden.

Tabelle 17: Eingangsdateien und Parameter für das Tool Phase to Height Conversion

Datei	Bedeutung
_dem	Digitales Höhenmodell
_resolution	Pixel Auflösung in ground range, die an Hand des lokalen Inzidenzwinkels berechnet wird. $\frac{\text{PixelAbstand in slant range}}{\sin\theta}$ wobei: θ ... lokaler Inzidenzwinkel
_precision	Geschätzte Datenqualität $\sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{2\gamma^2}} * \frac{\lambda R \sin\theta}{4\pi B}$ Wobei: γ ... interferometrische Kohärenz λ ... Wellenlänge R ... Abstand in slant range B ... Basislinie
_cc_geo	Geocodierte Kohärenz

Tabelle 18: Ergebnisdatensätze des Moduls Phase to Height Conversion

4.6 Phase to Displacement Conversion

Mit dieser Funktion werden die Phasenunterschiede, die im Interferogramm gemessen werden in Verschiebungen umgerechnet. Dabei wird auch die geocodierte Kohärenz (_cc_geo) berechnet. Als Voraussetzung müssen geglättete abgeflachte Absolutphasen (siehe Tabelle 16), die berechnete Kohärenz und ein Höhenmodell vorliegen (siehe Abbildung 47).

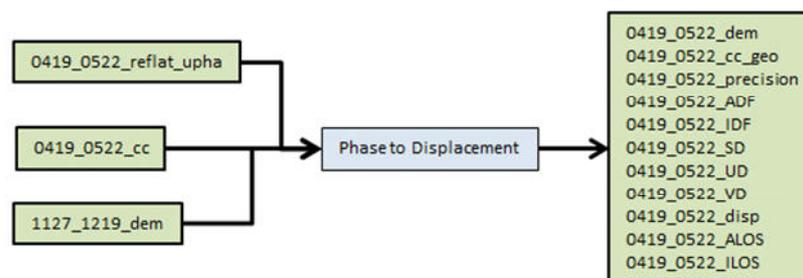


Abbildung 47: Eingangs-, und Ergebnisdateien des Tools Phase to Displacement

Die Ergebnisse des Werkzeugs „Phase to Displacement“ sind in Tabelle 19 beschrieben. Mit diesem Werkzeug werden die absoluten Phasenwerte umgerechnet in Verschiebungen und geocodiert in eine Karte eingetragen. Dabei werden die Entfernungs-Doppler Gleichungen ebenso gelöst, wie geodätische Transformationen durchgeführt. Dadurch wird zum einen der Versatz für jedes Pixel und die exakte geographische Position bestimmt²⁵. Bevor dieses Werkzeug angewendet werden kann, muss zunächst ein orbitales Refinement (siehe Kapitel 4.4) berechnet werden.

Jeder 2π Durchlauf der differentiellen Phase entspricht einem Versatz vom Betrag der halben Wellenlänge in Blickrichtung des SAR-Systems (slant-range). Dieser Versatz in Entfernungsrichtung kann auf eine beliebige andere Richtung projiziert werden. Die Ergebniskarte zeigt Verschiebungen in Metern:

- Schrägsicht Versatz: positive Werte entsprechen Bewegungen mit einer Verringerung der Entfernung zwischen Sensor und Ziel (z.B.: durch Geländehebung)
- Versatz in spezifischer Richtung: positive Werte entsprechen Bewegungen in der vorgegebenen Richtung

Datei	Bedeutung
_dem	Umgerechnetes und auf die Ausmaße der SAR-Bilder angepasstes digitales Höhenmodell
_cc_geo	Geocodierte Kohärenz
_ADF	Richtung des maximalen Gefälles
_IDF	Anstieg des maximalen Gefälles
_SD	Versatzwerte in Richtung des maximalen Gefälles
_UD	Versatzwerte in vorgegebener Richtung
_VD	Werte des vertikalen Versatzes
_disp	Versatzwerte in Blickrichtung des Satelliten
_precision	Schätzung der Genauigkeit, wird nur bei eingegangener Kohärenzdatei (_cc) berechnet
_ALOS	Blickrichtung Azimut
_ILOS	Blickrichtung in vertikaler Richtung

Tabelle 19: Ergebnisdatensätze nach der Berechnung Phase to Displacement

4.7 Dual Pair Interferometry

Das Dual Pair Interferometry Werkzeug fasst die Interferometrie Werkzeuge in SARscape zusammen, die für den Anwendungsfall der Änderungsdetektion erforderlich sind. Mit dieser Funktion können sowohl Höhenwerte, als auch Verschiebungen bestimmt werden.

Wenn dem Werkzeug kein Referenzhöhenmodell zur Verfügung steht, werden alle Höhen und Höhendifferenzen auf ein Ellipsoid bezogen. Die Berechnung der Dual Pair Interferometry erfolgt in zwei Iterationen. Bei der ersten Iteration werden die

²⁵ Aus SARscape Hilfe zu Phase to Displacement Conversion

Interferogramme erzeugt und die absoluten Phasen durch Phase Unwrapping berechnet. Bei der zweiten Iteration können dann die eigentlichen Produkte (Versatzkarten in Schrägsicht und geographischer Projektion) erzeugt werden.

Eingangsdatei/ Parameter	Bedeutung
Input Master 1 / Master 2 / Slave 1/ Slave 2 file	Dateiname der Master und zugehörigen Slave-Aufnahme. Es handelt sich dabei um die komplexen SAR-Bilder (_slc).
Digital Elevation Model file	Digitales Bezugshöhenmodell; sollte diese Datei nicht bereitgestellt werden, sind das kartographische Bezugssystem und eine ellipsoidische Bezugshöhe anzugeben. Für diese Analysen wurde ein SRTM Referenzhöhenmodell genutzt.
Orbital GCP	Diese Datei ist verpflichtend und beinhaltet die orbitalen Kontrollpunkte, oder bietet die Möglichkeit orbitale Kontrollpunkte zu erfassen (z.B: Abbildung 45)
Prozessierungseinstellungen	Verweis auf die allgemeinen Prozessierungseinstellungen: <ul style="list-style-type: none"> • Koregistrierung • Berechnung der Interferogramme / Interferogrammfilter • interferometrische Abflachung (Flattening) • Filterungseinstellungen • Phase Unwrapping Methoden • Resampling
Modell der Verschiebung	<ul style="list-style-type: none"> • Lineares Modell • Step Model (siehe Kapitel 4.7.1) • No Model (siehe Kapitel 4.7.2)
Azimuth Looks / Range Looks	Anzahl der Looks in Azimut / Range; Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit 4x4 Multi-Looking gearbeitet um den Effekt des Speckle-Rauschens zu reduzieren.
Unwrapping Coherence Threshold	Pixel, deren Kohärenz niedriger liegt, als diese eingestellte Schwelle erhalten keinen Absolutphasenwert; Wurde auf 0,20 gesetzt
Product Coherence Threshold	Pixel mit Kohärenzwerten niedriger als diese Schwelle werden im geocodierten Kohärenzbild auf einen NULL Wert gesetzt. Wurde auf 0,20 gesetzt.
Interpolation Window Size	Die Pixel mit NULL Werte in den Höhendaten und Versatzkarten werden interpoliert, wobei sich der interpolierte Wert als Mittelwert von gültigen Werten innerhalb des Interpolationsfensters ergibt. Wenn die Fenstergröße auf null gesetzt wird, erfolgt keine Interpolation.

Mean Window Size	Die Ergebnishöhen werden durch einen Mittelwertfilter mit der angegebenen Filtergröße gefiltert. Dieser Schritt am Ende der Interpolationen und erfolgt ausschließlich auf dem digitalen Höhenmodell.
Grid Size	Die Rasterweite der Ergebnisdaten X (Ost) Y (Nord)
Cartographic System	Hinter dieser Einstellung kann man verschiedene geographische Bezugssysteme auswählen. Im vorliegenden Fall lag ein niedrig aufgelöstes Referenzhöhenmodell vor. Dieses Referenzhöhenmodell aus SRTM Daten legt gleichzeitig die geographische Projektion fest.

Tabelle 20: Eingangsdaten und Parameter der Funktion Dual Pair Interferometry

4.7.1 Verschiebungsannahme abrupte Verschiebung

Sind zwischen den interferometrischen Paaren plötzliche Verschiebung vermutet (z.B.: durch Erdbeben) so ist das Step Model zu nutzen. Es wird davon ausgegangen, dass die beiden interferometrischen Paare die gleiche Verschiebung aufweisen. Um dies zu erreichen muss die Zuordnung von Master- und Slave-Aufnahme sich um das Deformationsereignis sortieren. Es sollen zwei Aufnahmen nach dem Ereignis vorliegen um das Ereignis detektieren zu können. Die Verschiebungen werden dann in [mm] berechnet.

$$\varphi_1 = (H_{res} * K_1) + (D * 4\pi/\lambda)$$

$$\varphi_2 = (H_{res} * K_2) + (D * 4\pi/\lambda)$$

Formel 14: Gleichungssystem zur Berechnung der Verschiebung bei Step Model Ansatz

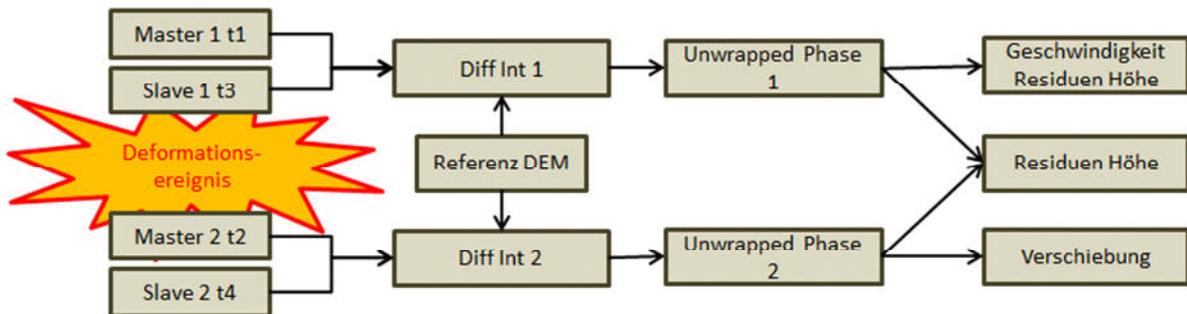


Abbildung 48: Zuweisung SAR-Bilder bei 4-pass Interferometrie bei Step Model Ansatz

Oder bei 3 vorhandenen SAR-Aufnahmen:

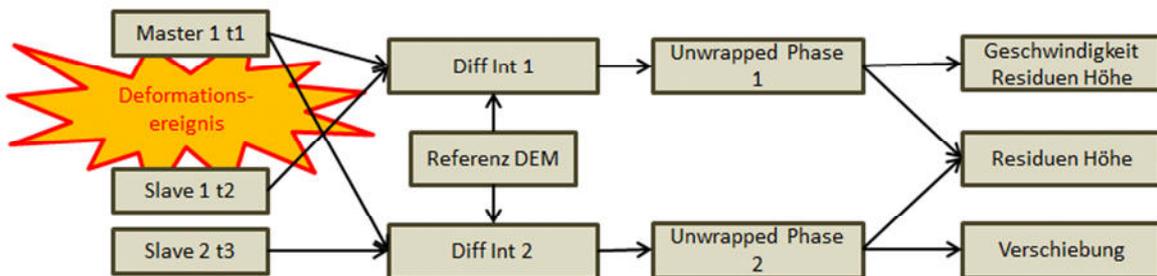


Abbildung 49: Zuweisung SAR-Bilder bei 3-pass Interferometry bei Step Model Ansatz

4.7.2 Verschiebungsannahme keine Verschiebung im ersten Paar

Wenn zwischen dem ersten Referenzbild (Master 1) und dem ersten Untersuchungsbild (Slave 1) keine Verschiebungen vorhanden sind, kann die Option No Model gewählt werden. Diese beiden Bilder werden genutzt um ein Referenzhöhenmodell zu erzeugen. Dieses Höhenmodell kann dann genutzt werden, um Verschiebungen zum zweiten interferometrischen Bildpaar festzustellen. Dabei wird folgendes Gleichungssystem gelöst:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= H_{res} * K_1 \\ \varphi_2 &= (H_{res} * K_2) + (D * 4\pi/\lambda) \end{aligned}$$

H_{res} ... Höhe der Residuen

D ... Verschiebung in [mm]

K_1, K_2 ... Faktoren zur Umwandlung der Höhenwerte in Phasen

Formel 15: Gleichungssystem zur Berechnung der Verschiebung, wenn keine Verschiebung unterstellt wird

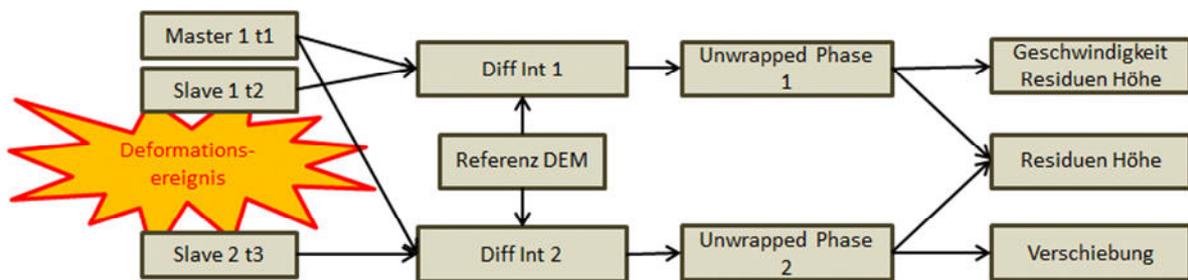


Abbildung 50: Zuweisung SAR-Bilder 3-pass Interferometrie bei No Model Ansatz

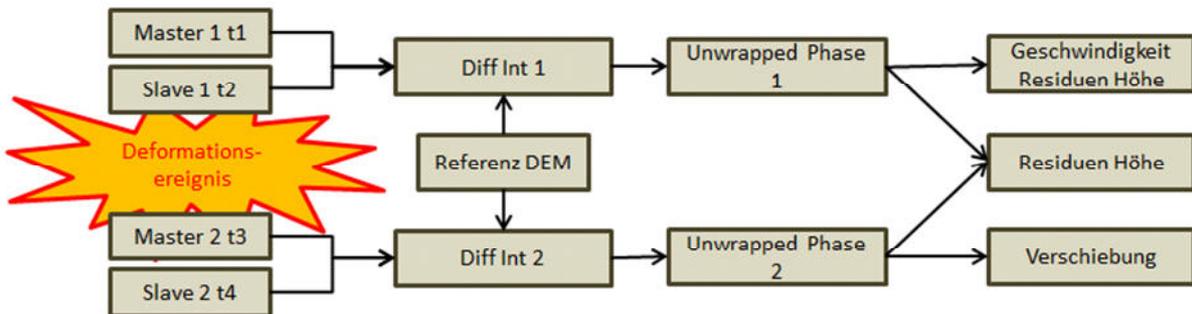


Abbildung 51: Zuweisung SAR-Bilder 4-pass Interferometrie bei No Model Ansatz

- Wenn nur 3 SAR-Bilder zur Verfügung stehen, wird Master 1 für die Erzeugung beider Interferogramme genutzt. Zwischen dem Master und Slave 1 sollte kein Deformationsereignis stattgefunden haben. Wenn ein Deformationsereignis (z.B.: Erdbeben) durch das Werkzeug erfasst werden soll, muss die Aufnahme Slave 2 nach diesem Ereignis erfasst werden.

Mit der Dual Pair Interferometrie werden insgesamt zehn interferometrische Untersuchungen getätigt. Dabei werden gem. Kapitel 4.7.1 und Kapitel 4.7.2 die SAR-Bilder so ausgewählt, dass die bekannten Erdbebenereignisse vom 05.07.2014 und vom 24.08.2014 zeitlich eingeschlossen sind (siehe Abbildung 52).

Analyse Nr	Model	11.05.14	22.05.14	13.06.14	24.06.14	05.07.14	16.07.14	27.07.14	18.08.14	24.08.14	09.09.14
1	3-pass	Step	M1		S1		S2				
		No									
2	3-pass	Step	M1		S1		S2				
		No									
3	4-pass	Step	M1		M2		S1		S2		
		No									
4	4-pass	Step	M1		M2		S1		S2		
		No									
5	3-pass	Step	M1		S1		S2				
		No									
6	3-pass	Step	M1		S1		S2				
		No									
7	4-pass	Step	M1		M2		S1		S2		
		No									
8	4-pass	Step	M1		M2		S1		S2		
		No									
9	3-pass	Step	M1		S1		S2				
		No									
10	3-pass	Step	M1		S1		S2				
		No									

Polarisation: HH VV

Abbildung 52: Zuweisung der SAR-Aufnahmen zu interferometrischen Paaren

Analysen 1, 2, 5 und 6 sind als 3-pass Analysen ausgeführt, während Analysen 3, 4, 7 und 8 als 4-pass Analyse durchgeführt werden. Das Erdbebenereignis vom 24.08.14 kann auf diese Weise nur durch Analyse 6 erfasst werden. Die übrigen Analysen berechnen den Versatz, der in Folge des Erdbebens vom 05.07.2014 entstanden sein könnte.

Datei	Bedeutung
_cc	Kohärenz in Schrägsichtgeometrie
_disp	Verschiebungskarte in Schrägsichtgeometrie
_fint	Abgeflachtes und gefiltertes Interferogramm in Schrägsichtgeometrie
height	Höhe der Residuen H{res} in Schrägsichtgeometrie
_srdem	Präzises Höhenmodell (Referenzhöhenmodell + InSAR residual height), in Schrägsichtgeometrie
_upha	Absolutphase
_vel	Karte der Verschiebungsgeschwindigkeit in Schrägsichtgeometrie
_dem	Präzises Höhenmodell (Referenzhöhenmodell + InSAR residual height)
_disp_geo	Geocodierte Versatzkarte in [mm]
_vel_geo	Geocodierte Karte der Versatzgeschwindigkeit in [mm/jahr]

Tabelle 21: Ergebnisdatensätze des Tool Dual Pair Interferometry

4.7.3 Ergebnisse Dual Pair Interferometry

Die Dual Pair Interferometry Analyse liefert Aussagen über Verschiebungen zwischen verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. Jedoch sind im Kern des Untersuchungsgebietes (zwischen Corner-Reflektor 1 und Corner-Reflektor 2) kaum solche Verschiebungen zu detektieren. Die Ergebnis-Werte werden durch SARscape in Millimeter berechnet. Dabei werden positive Werte als Verringerung der Entfernung zwischen Sensor und Erdoberfläche (z.B.: durch eine Geländehebung) und negative Werte als Vergrößerung des Abstandes zwischen Sensor und Erdoberfläche (z.B.: durch eine Geländesenkung) deklariert.

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, werden die durchgeführten Analysen (siehe Abbildung 52) nach folgenden Kriterien sortiert:

- Polarisation der SAR-Bilder
- Verschiebungsmodell
- Verschiebungsereignis

Die in den kommenden Abschnitten dargestellten Rasterdateien decken jeweils das komplette Untersuchungsgebiet ab. Dabei sind die Darstellungen in Schrägsicht Geometrie abgebildet. Für die interferometrische Untersuchung ist die Kohärenz der beiden SAR-Bilder wichtig. Dies kann man daran erkennen, dass die Bereiche im Untersuchungsgebiet, die eine geringe Kohärenz in den interferometrischen Paaren aufweisen, ein starkes Rauschverhalten im Ergebnis aufweisen. Innerhalb einer Vergleichsgruppe werden die Farbwerte der Bilder graphisch gleich skaliert. Daher sollten die Bilder identisch aussehen, wenn die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen gleich sind.

4.7.4 Vergleich der Ergebnisse von Analyse 1,3 und 9

Analyse Nr	Model	11.05.14	22.05.14	13.06.14	24.06.14	05.07.14	16.07.14	27.07.14	18.08.14
1	3-pass	Step				M1	S1 S2		
						24.06.14	05.07.14	27.07.14 18.08.14	
3	4-pass	Step	M1		M2		S1 S2		
			22.05.14	24.06.14		05.07.14	27.07.14 18.08.14		
9	3-pass	Step	M1			S1 S2			
			22.05.14	05.07.14			27.07.14 18.08.14		

Abbildung 53: Vergleich 1 erfolgt zwischen Analyse 1, 3 und 9

Die Analysen 1, 3 und 9 werden auf horizontal polarisierten SAR-Aufnahmen durchgeführt. Die dargestellten Verschiebungskarten sind im farblich im Wertebereich zwischen -41 [mm] (rot) und +20 [mm] (blau) skaliert.

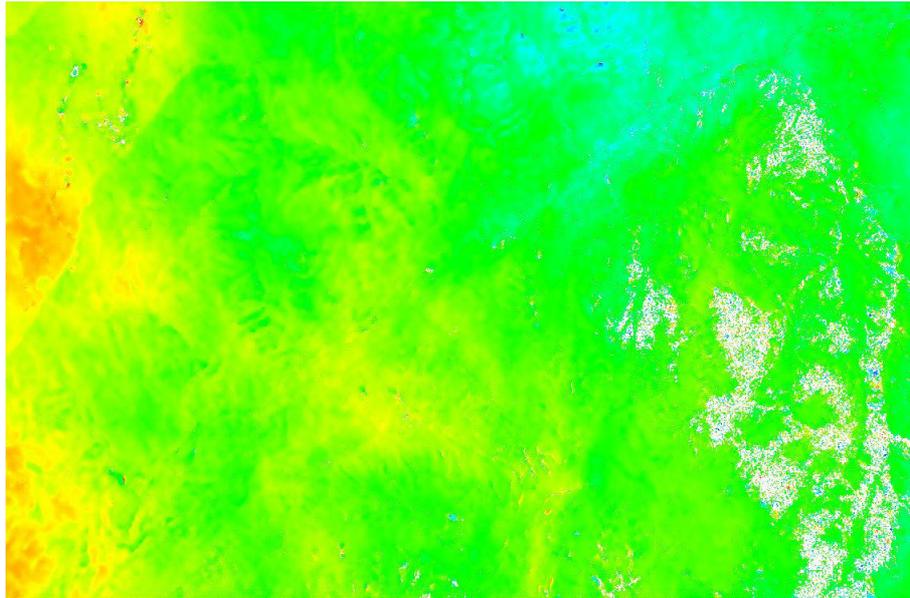


Abbildung 54: Displacement gem. Analyse 1



Abbildung 55: Verschiebungsergebnis von Analyse 3

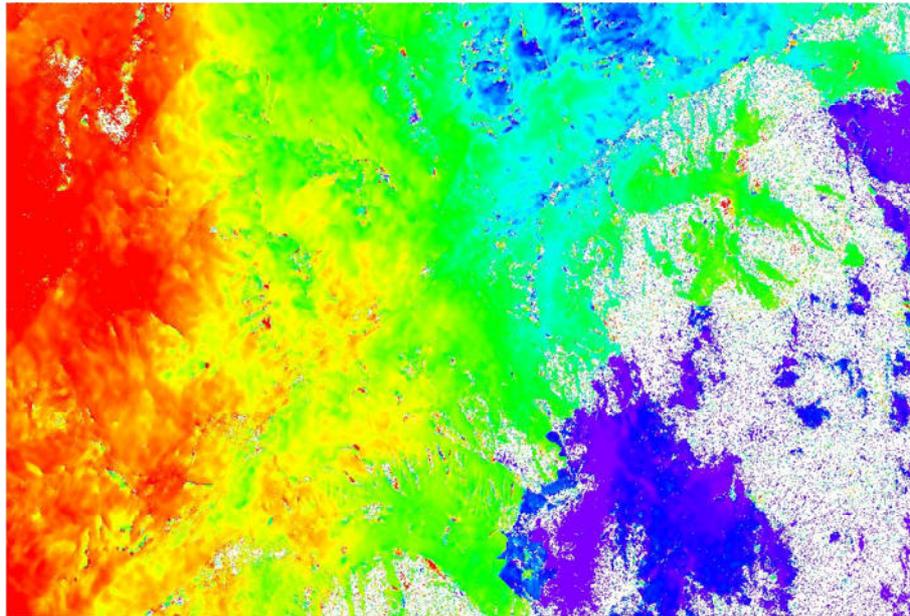


Abbildung 56: Verschiebung nach Analyse 9

Während das Ergebnis von Analyse 1 (Abbildung 54) und Analyse 3 (Abbildung 55) zu vergleichbaren Ergebnissen kommen, stellt das Ergebnis von Analyse 9 (Abbildung 56) eine andere Verschiebung fest. In Abbildung 56 fällt die Hebung im linken Bereich des Untersuchungsgebietes auf, während im rechten Bereich des Untersuchungsgebietes eine Senkung berechnet wird.

4.7.5 Vergleich der Ergebnisse von Analyse 2 und 4

Analyse Nr		Model	11.05.14	22.05.14	13.06.14	24.06.14	05.07.14	16.07.14	27.07.14	18.08.14
2	3-pass	No		M1		S1		S2		
				22.05.14		24.06.14	05.07.14		27.07.14	
4	4-pass	No		M1		S1		M2		S2
				22.05.14		24.06.14	05.07.14		27.07.14	18.08.14

Abbildung 57: Vergleich 2 erfolgt zwischen Analyse 2 und 4

Die Analysen 2 und 4 basieren auf horizontal polarisierten SAR-Aufnahmen. Die Verschiebungskarten sind farblich zwischen -32 [mm] (blau) und +20 [mm] (rot) skaliert.

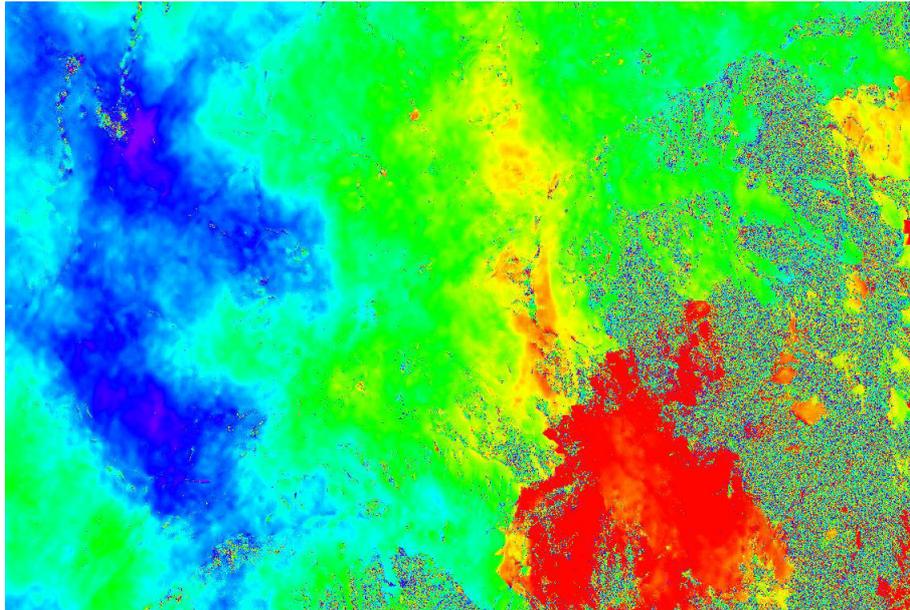


Abbildung 58: Ergebnis der Verschiebungsanalyse 2

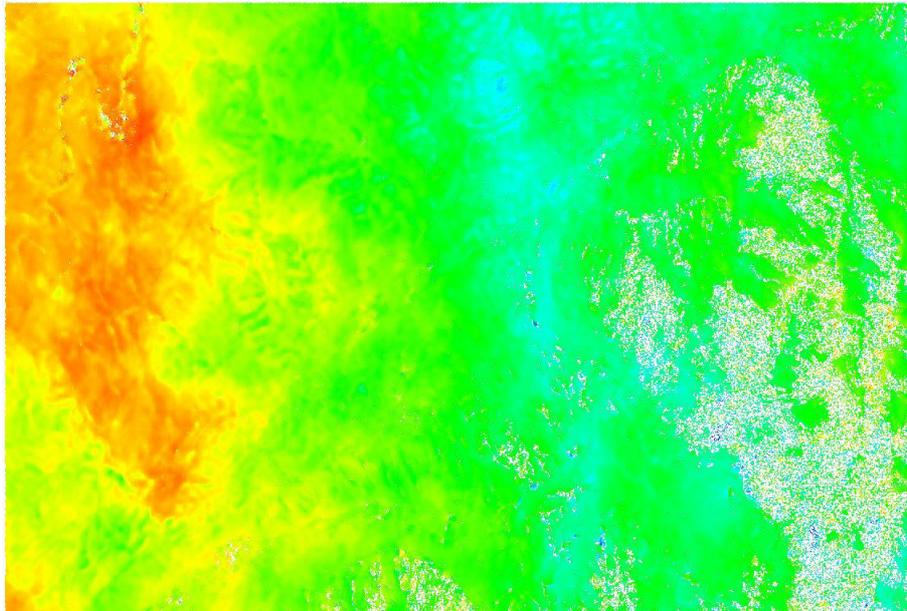


Abbildung 59: Ergebnis der Verschiebungsanalyse nach Analyse 4

Zwischen Analyse 2 (Abbildung 58) und Analyse 4 (Abbildung 59) fällt auf, dass sich die Verschiebungsrichtung verkehrt hat. Bereiche, die in Analyse 2 positive Verschiebungswerte (rot) erhalten, sind in Analyse 4 mit negativen Verschiebungswerten bewertet.

4.7.6 Vergleich der Ergebnisse von Analyse 5 und 7

Analyse Nr	Model	11.05.14	22.05.14	13.06.14	24.06.14	05.07.14	16.07.14	27.07.14	18.08.14	24.08.14	09.09.14
5	3-pass	Step	M1			S1			S2		
				13.06.14		05.07.14	16.07.14				09.09.14
7	4-pass	Step	M1		M2		S1		S2		
			11.05.14		13.06.14		05.07.14	16.07.14			

Abbildung 60: Vergleich 3 wird zwischen Analyse 5 und 7 durchgeführt

Die Analysen 5 und 7 werden an vertikal polarisierten SAR-Bildern durchgeführt. Die dargestellten Verschiebungen sind farblich skaliert zwischen -25 [mm] und +35 [mm]

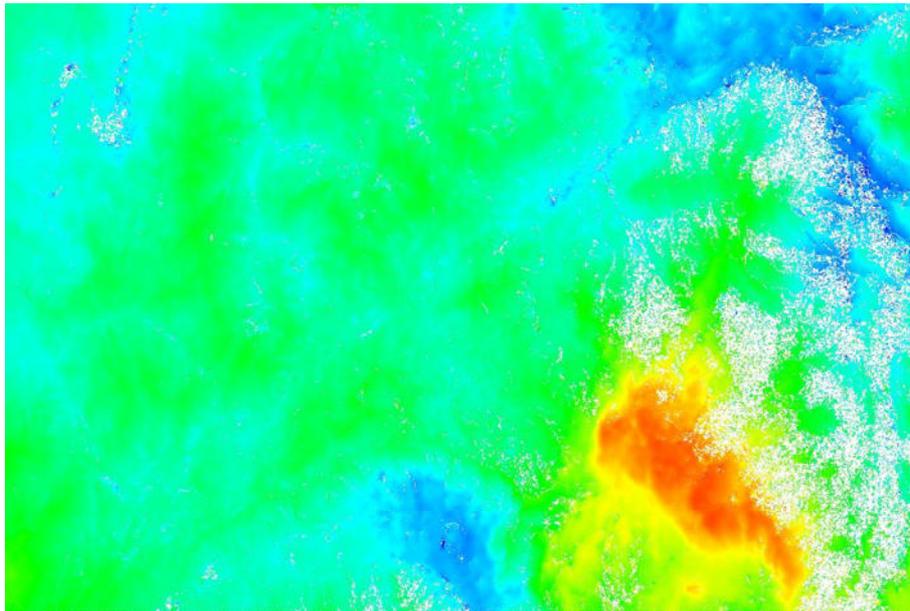


Abbildung 61: Verschiebung nach Analyse 5

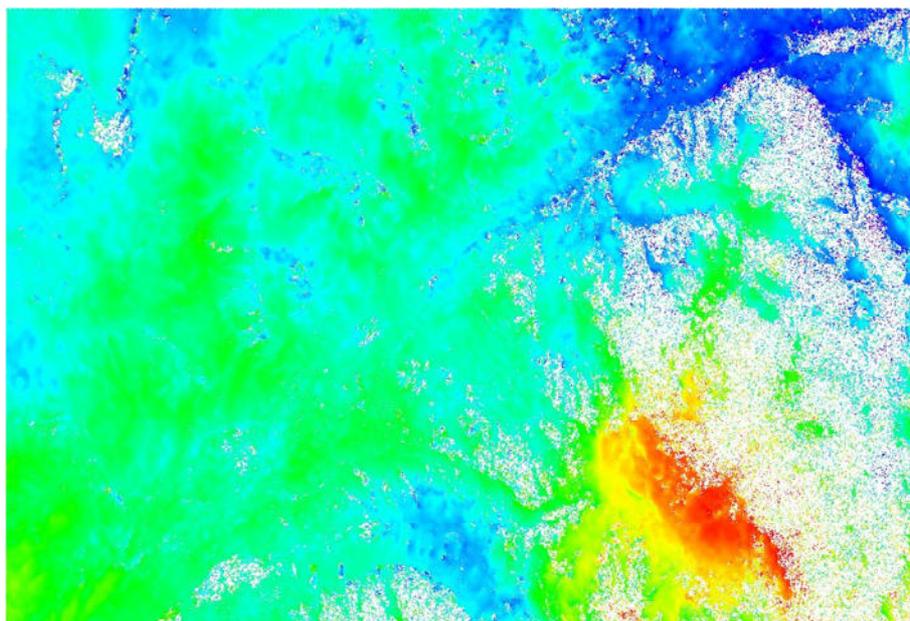


Abbildung 62: Verschiebung gem. Analyse 7

Zwischen Analyse 5 (Abbildung 61) und Analyse 7 (Abbildung 62) sind die Ergebnisse vergleichbar. In diesen beiden Analysen gibt es eine Hebung im rechten unteren Bereich des Bildes (Rot-Werte), während insbesondere im rechten oberen Bereich der Rasterdatei eine Senkung (blau) detektiert wird.

4.7.7 Vergleich der Ergebnisse von Analyse 8 und 10

Analyse Nr		Model	11.05.14	22.05.14	13.06.14	24.06.14	05.07.14	16.07.14	27.07.14	18.08.14	24.08.14	09.09.14
8	4-pass	No	M1		S1		M2		S2			
			11.05.14		13.06.14		05.07.14	16.07.14				09.09.14
10	3-pass	No	M1		S1		S2					
			11.05.14		13.06.14		05.07.14	16.07.14				

Abbildung 63: Vergleich 4 wird durchgeführt zwischen Analyse 8 und 10

Die Analysen 8 und 10 unterstellen keine Verschiebung im ersten interferometrischen Paar (No Model Ansatz). Beide Analysen sollen das Verschiebungsereignis vom 05.07.14 detektieren. Die dargestellten Verschiebungskarten sind von -50 [mm] (magenta) bis +50 [mm] (rot) farblich skaliert. Extremere Verschiebungswerte werden jedoch auch auf diese beiden Farbwerte skaliert.

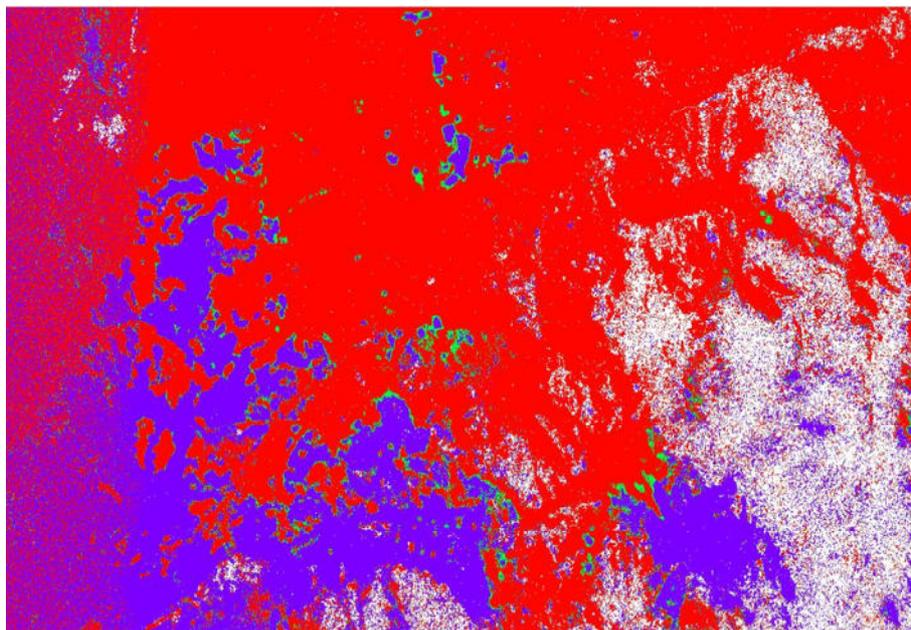


Abbildung 64: Verschiebung nach Analyse 8

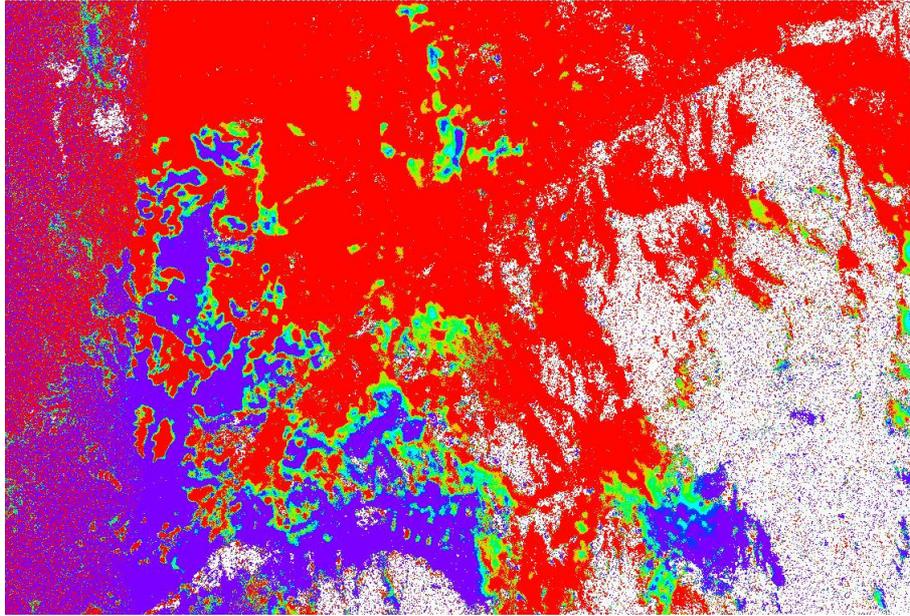


Abbildung 65: Verschiebung nach Analyse 10

Die Ergebnisse dieser beiden Analysen sind nicht vertrauenswürdig einzustufen. Die Farbdarstellung zeigt, dass der größte Bereich des Untersuchungsgebietes mit einer Verschiebung kleiner gleich, oder größer gleich 50 [mm] eingestuft wird. Außerdem sind in beiden Ergebnisbildern große Bereiche durch Rauschprozesse beeinträchtigt.

4.8 Simulation einer Oberflächenänderung in SARscape

Für den Untersuchungszeitraum von einem halben Jahr wird von einem Versatz in der Größenordnung von 2-3 cm (d.h. in der Größenordnung der Wellenlänge λ von TerraSAR-X) ausgegangen (siehe Kapitel 1). Diese Verschiebung muss auf die Ground-Range Richtung des Sensors projiziert werden, denn das SAR-System kann nur Verschiebungen in Range Richtung detektieren.

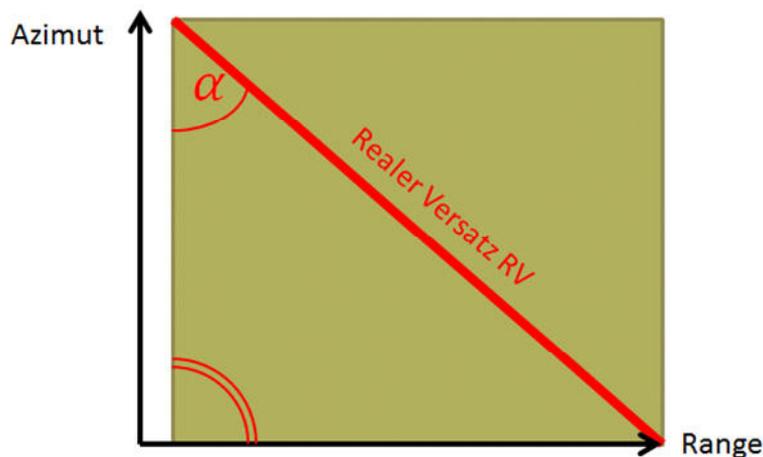


Abbildung 66: Winkel α der Verschiebung in Bezug zur Range Richtung des Sensorsystems auf dem Boden

Im nächsten Schritt muss dieser Ground-Range Versatz auf die Schrägsicht Geometrie projiziert werden. Das Ergebnis wird durch den Blickwinkel θ beeinflusst:

$$dis_{sr} = \frac{RV * \sin\alpha}{\sin\theta}$$

Wobei:

dis_{sr} ... Versatz in Schrägsichtgeometrie

RV... reale am Boden gemessene Versatz

Formel 16: Versatz in Schrägsichtgeometrie

Für den vorliegenden Fall betragen die Zahlenwerte in erster Näherung für $\alpha = \theta = 45^\circ$. Die gemessenen Schrägsicht-Verschiebungen entsprechen daher den realen Verschiebungen am Boden. Um die Ergebnisse aus Kapitel 4 leichter interpretieren zu können, wird eine kontrollierte Änderung der gemessenen Phasendifferenzen mit folgenden Arbeitsschritten durchgeführt:

- 1.) Einlesen geglättetes Interferogramm (_fint siehe Abbildung 67)
- 2.) Convert Complex to Phase and Mod, dadurch entsteht Phasendatei und Modulo Datei
- 3.) Region of Interest (ROI) auf Phasendatei erzeugen
- 4.) Aus ROI Maske erstellen (Build Mask)
- 5.) Band Math auf Phasendatei und Maske anwenden
- 6.) Geänderte Phasendatei mit Mod Datei über Convert Werkzeug verbinden
- 7.) Interferogramm Differenz zwischen Originalem Interferogramm und manipuliertem Interferogramm erstellen

Wichtig: Da die Funktion Band Math nicht zu SARscape gehört, sondern eine ENVI Funktion ist, kann diese nicht mit komplexen Dateien (wie den Interferogramm Dateien) umgehen. Eine Bearbeitung erfolgt daher mit den aufgeteilten Phasendateien. Diese Dateien sind vom Dateityp float und können daher durch die Band Math Funktion bearbeitet werden.

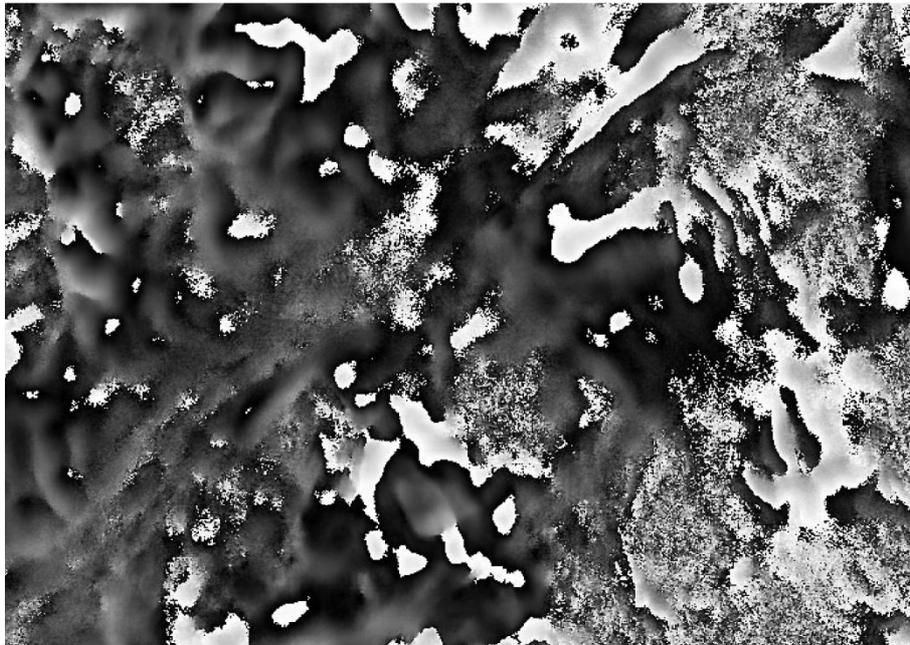


Abbildung 67: originales geglättetes Interferogramm

Im nächsten Schritt werden im Bereich unten rechts die Phasenwerte des Interferogramms um den Betrag $\pi/2$ erhöht (siehe Abbildung 68). Dabei ist die Kante an welcher die Phasen verändert wurden deutlich zu erkennen.



Abbildung 68: Interferogramm mit Phasen Versatz von $\pi/2$

Die Interferogramm Differenz von diesem angepassten Interferogramm und dem originalen Interferogramm ergibt die Rasterdatei in Abbildung 69. In dieser Datei ist die Kante deutlich zu erkennen, an der das Interferogramm angepasst wurde. Der Bereich oben links in Abbildung 69 besteht aus null und No Data Werten, während der Bereich unten rechts konstant mit $\pi/2$ Werten gefüllt ist. Auf diese Weise kann man Änderungen an einem Interferogramm detektieren.

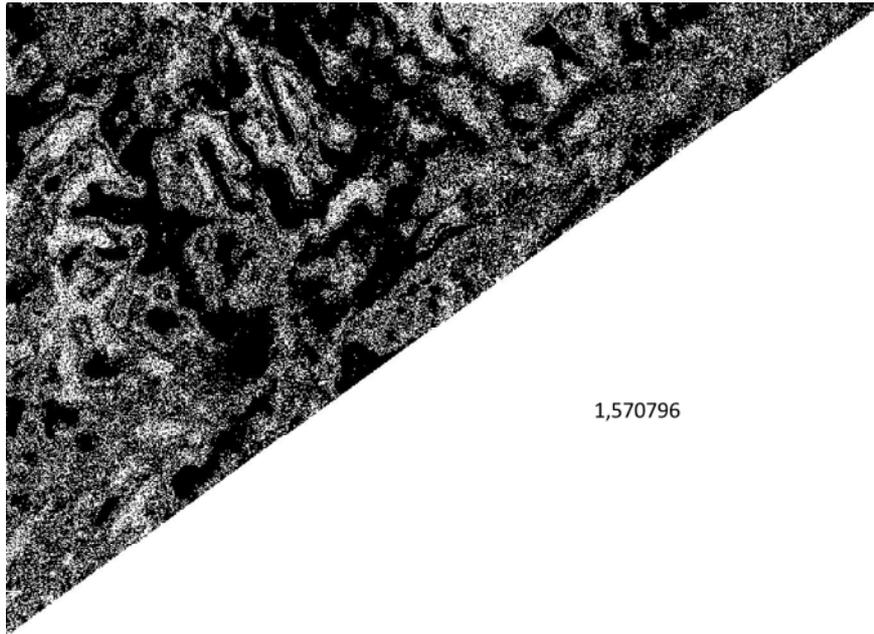


Abbildung 69: Differenz des originalen Interferogramm's (Abbildung 67) und des manipuliertem Interferogramm's (Abbildung 68)

5 Bestimmung der Phasendifferenzen in Pixelauflösung

Dieses Kapitel beschreibt die punktuelle Analyse, die mit Hilfe der Corner-Reflektoren durchgeführt wird. Wie in Kapitel 2.3.3 dargestellt wurde kann man die Corner-Reflektoren als Referenzziele in fast allen Bildern detektieren. Dadurch bieten sich diese Punkte an, relative Entfernungsänderungen in der Größenordnung der Wellenlänge zwischen den Referenzpunkten zu entdecken.

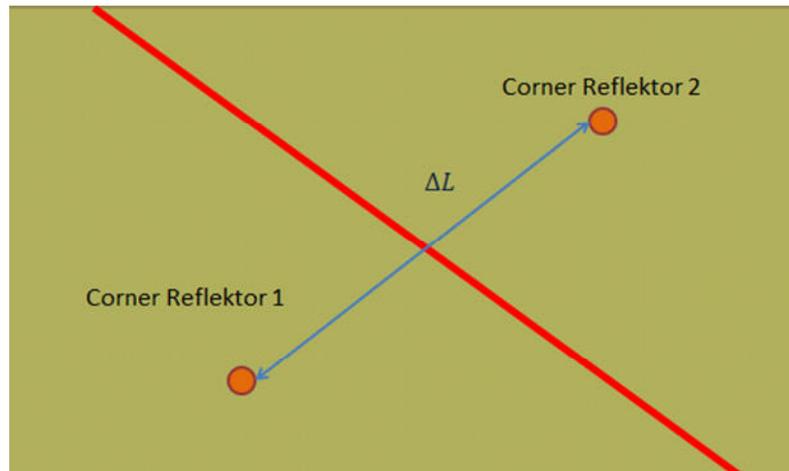


Abbildung 70: Messanordnung für die Punktuelle Untersuchung

In den SAR-Bildern, in denen beide Corner-Reflektoren vorhanden sind, wird deren exakte Position bestimmt, um dann die Distanzen zwischen diesen Streuzentren zu messen. Dabei wird angenommen, dass sich Verschiebungswerte ähnlich zu denen aus der InSAR-Analyse ergeben. Die Messanordnung ist in Abbildung 70 abgebildet. Die Herausforderung besteht darin die exakte Position der Streuzentren in den komplexen Bildern zu bestimmen, da die sich die Corner-Reflektoren über mehrere Pixel ausdehnen. Teilweise erscheinen die tatsächlichen Streuzentren auch nicht exakt mit der Struktur der Rasterdateien zusammenzufallen, sondern vielmehr zwischen zwei Pixel zu liegen.

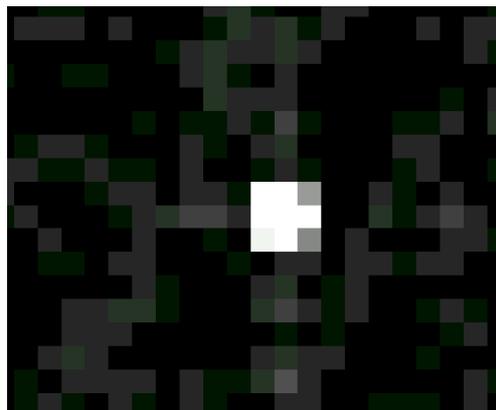


Abbildung 71: zentraler Bereich Corner-Reflektor 1 am 19.12.2013

Aus dem Ausschnitt in Abbildung 71 wird ein Profil erstellt, welches über die drei zentralen Pixel des Corner-Reflektors reicht (siehe Abbildung 72). Bei genauer Betrachtung fällt auf,

dass dieses Profil nicht symmetrisch ist. Dies deutet darauf hin, dass das Streuzentrum des Corner-Reflektors nicht komplett mit den Pixelkoordinaten zusammenfällt.

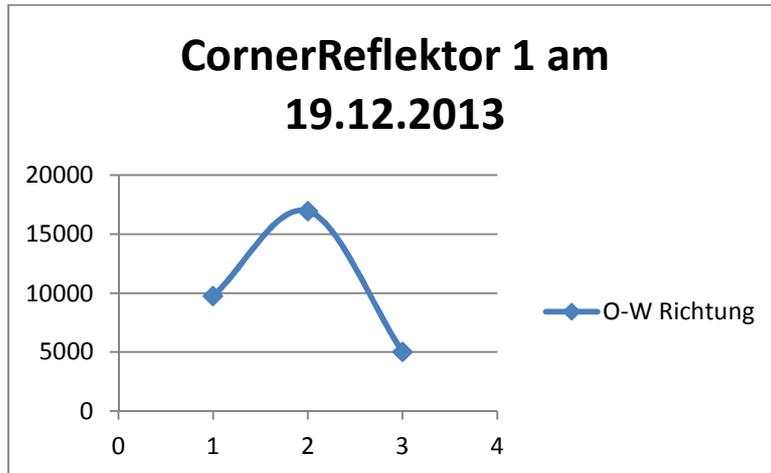


Abbildung 72: Profil durch die Amplitude des Corner-Reflektors 1 am 19.12.2013

Die subpixelgenaue Erfassung des Streuzentrums kann nicht mit herkömmlichen Methoden der Bildanalyse erfolgen, da der Phasenanteil des komplexen SAR-Bildmaterials sich nicht durch solche Bildanalyse erfassen lässt.

Über die Funktion Convert Complex to Phase and Module werden aus den komplexen SAR-Bildern die Phasenbestandteile und die Amplitudenbestandteile in eigene Rasterdateien geschrieben. Dies ist erforderlich, um die Phasenwerte der komplexen SAR-Bilder messen zu können. Derzeit gibt es in SARscape keine Möglichkeit Merkmale in Rasterdateien durch Überabtastung subpixel genau zu erfassen. Daher bleibt nur die Möglichkeit der pixelgenauen Messung.

Die SAR-Bilder wurden vor der Messung untereinander koregistriert. Bei der Koregistrierung wird durch die Software eine Überabtastung in Kombination mit einer Kreuzkorrelation zwischen den SAR-Bildern durchgeführt²⁶. Dies führt dazu, dass die koregistrierten Bilder auch neu aufgerastert werden. Die komplexen Werte jeder Rasterzelle (Phase + Amplitude) werden dabei neu berechnet. Als eines der Resultate dieser Koregistrierung erhalten die Corner-Reflektoren in den Untersuchungsbildern überall identische Pixelkoordinaten. Eine Positionsveränderung bei pixelgenauer Messung kann daher nur durch eine Veränderung der Phasenwerte detektiert werden.

		Corner Reflektor 1		
20140522		6434,9131	10777,5342	3255,4331
		-1,4696	-1,444	-1,4073
		9358,6914	15964,7363	4941,5688
		-1,3587	-1,3407	-1,3513
		1929,6766	3317,5535	1179,6694
		-1,2415	-1,2469	-1,3538

zentrales Pixel
 Amplitude
 Phase

Tabelle 22: Phasen und Amplitudenwerte für Corner-Reflektor 1 in der SAR-Aufnahme vom 22.05.2014

²⁶ SARscape Hilfe

In Tabelle 22 sind die pixelgenauen Messungen der Phasen und Amplitudenwerte für Corner-Reflektor 1 in der SAR-Aufnahme vom 22.05.2014 dargestellt. Dabei sind für jeden Corner-Reflektor die Werte des zentralen Pixels und der acht direkten Nachbarpixel erfasst. In der jeweils oberen Zeile ist der Amplitudenwert dokumentiert und in der darunter liegenden Zeile der dazugehörige Phasenwert. Diese Phasenwerte werden durch SARscape im Wertebereich zwischen $-\pi$ und $+\pi$ angegeben. Die gesamte Auflistung aller Messwerte für die beiden Corner-Reflektoren in den untersuchten SAR-Bildern befindet sich in Anhang II.



Abbildung 73: Phasendifferenzen vor und nach einem Deformationsereignis

Es wird angenommen, dass die Phasendifferenzen im Untersuchungsgebiet im Zusammenhang zu tatsächlichen Verschiebungsereignissen stehen. Dies würde bedeuten, dass die gemessenen Phasenwerte eine Aussage zu tendenziellen Verschiebung zwischen den beiden Corner-Reflektoren gibt. Für die Untersuchung werden die Phasenwerte an Corner-Reflektor 2 umgerechnet in absolute Phasen, indem der Phasenwert von Corner-Reflektor 1 als Referenz gesetzt wird und auf null gesetzt wird. Die Phasendifferenz zu Corner-Reflektor 2 wird als absoluter Phasenwert dem Corner-Reflektor 2 übertragen.

Da die absoluten Phasenwerte an Corner-Reflektor 2 aus den Phasendifferenzen gebildet worden sind, wird davon ausgegangen, dass sie die tendenzielle Verschiebung widerspiegeln. Jedoch zeigt sich in Tabelle 23, dass eine solch einfache Absolutphasenmessung keine Aussage zur Verschiebung beisteuern kann (siehe auch Kapitel 2.4.4), weil keine Aussage getroffen werden kann über die Anzahl der Phasendurchläufe ($0-2\pi$) sich hinter einer dieser Zahlen verbergen.

HH	Cornerreflektor 2 Absolutphasen			VV	Cornerreflektor 2 Absolutphasen		
20140522	7,0147	7,0096	6,9866	20140511	0,3095	0,3777	0,4336
	7,3676	7,3643	7,3458		0,7591	0,7735	0,8311
	1,5512	1,5732	1,6346		1,2724	1,2688	1,4225
20140624	1,165	1,2155	1,1743	20140613	1,1244	1,1743	1,2374
	1,6016	1,6151	1,5681		1,5482	1,5622	1,6122
	2,0596	2,0746	1,9418		1,974	2,0009	2,1139
20140705				20140705			
20140727	7,8153	7,8376	7,7935	20140716	1,9419	1,9846	2,0593
	8,2177	8,2596	8,2473		2,2925	2,3168	2,3653
	8,6572	8,7804	8,5952		2,7662	2,8131	2,7846
20140818	2,6794	2,6911	2,6818				
	3,0831	3,1097	3,1132				
	3,5294	3,5962	3,4976				
20140824				20140824			
20140920	2,4122	2,3021	2,2735	20140909	6,3461	6,4008	6,5463
	2,6249	2,6182	2,6289		0,4173	0,4391	0,5159
	3,0419	3,0695	3,0637		0,8495	0,8943	0,9839

Tabelle 23: absolute Phasen am Corner-Reflektor 2 zu den jeweiligen Messterminen

6 Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Verfahren getestet, welche unter Ausnutzung des interferometrischen Prinzips Veränderungen an der Erdoberfläche detektieren sollen. Es konnte gezeigt werden, dass Änderungen zwischen verschiedenen Interferogrammen detektiert werden können. Jedoch kann die detektierte Veränderung nicht mit einer signifikanten Veränderung der Erdoberfläche in Verbindung gebracht werden. Dies zeigt sich insbesondere daran, dass die interferometrischen Analysen zwar einen identischen Zeitraum überdecken, die Verschiebungsanalysen jedoch unterschiedliche, teilweise widersprechende Ergebnisse liefern. Weiterhin fällt auf, dass die Kohärenz von SAR-Bildern eine zentrale Größe darstellt um die Aussagekraft von Interferogrammen beurteilen zu können. Im Untersuchungsgebiet gibt es großflächige Bedeckung der Erdoberfläche durch Vegetation. Diese Vegetation verändert sich von Aufnahme zu Aufnahme, was die Kohärenz zwischen den Aufnahmen reduziert.

Für weitere Untersuchungen wird vorgeschlagen folgende Modifikationen an der Analyse umzusetzen.

- 1.) Anbringen von weiteren Corner-Reflektoren zur Verbesserung der Kohärenz und Koregistrierung zwischen zwei Aufnahmen
- 2.) Test mit Verfahren Persistent Scatterer oder Small Baseline Interferometrie, dazu jedoch große Anzahl von Bildern erforderlich
- 3.) Zeitliche Verdichtung der Datenerfassung (Einhaltung der 11 Tage revisit time)
- 4.) Verlängerung des Beobachtungszeitraumes
- 5.) Beschaffung terrestrischer Referenzmessungen, um gegebenenfalls eine Modellierung der Fehlereinflüsse durchführen zu können.
- 6.) Verschiebung des Untersuchungsgebietes in einen Bereich mit weniger Vegetation
- 7.) Kontrollierte Verschiebung der Referenzpunkte zwischen den Aufnahmen
- 8.) Modellierung der subpixel genauen Phasen-Änderung, um das Streuzentrum eines Corner-Reflektors subpixel genau bestimmen zu können

Im Bereich der Corner-Reflektoren wird eine besonders hohe Kohärenz durch SARscape berechnet. Diese punktuell sehr gute Kohärenz ist allerdings nur dort vorhanden, wo diese stabilen Streuer vorhanden sind. Daher wird empfohlen weitere Corner-Reflektoren zur punktuellen Verbesserung der Kohärenz im Untersuchungsgebiet einzubringen.

Während Punkte 1.) bis 6.) auf einem realen Untersuchungsgebiet durchgeführt werden können, müsste Punkt 7.) in einem tektonisch stabilen Gebiet durchgeführt werden, damit keine zusätzlichen Fehlereinflüsse das Messergebnis beeinflussen. Eine Messung könnte so stattfinden, dass man die Referenz-Ziele (Corner-Reflektoren) hochgenau einmisst, um sie dann für einzelne SAR-Aufnahmen im Zentimeterbereich kontrolliert zu verschieben. Eine solche kontrollierte Verschiebung könnte durch ein geeichtes Stativ mit verschiebbarem Reflektor-Körper realisiert werden.

Das Verfahren mit Hilfe der SAR-Interferometrie Geländeänderungen zu detektieren stellt eine Möglichkeit dar, solche Veränderungen auch in abgelegenen Regionen detektieren kann. Hebungen und Senkungen von Geländeabschnitten deuten auf bevorstehende Erdbebenereignisse hin, oder sind die Folge solcher Ereignisse. Die Detektion solcher Verschiebungen kann daher eine Möglichkeit darstellen, betroffene Bewohner frühzeitig zu informieren oder die Planungen im Erdbebenfall zeitgerecht zu unterstützen (z.B.: im Rahmen automatisierter Frühwarnsysteme). Dazu müssen die Ergebnisse vertrauenswürdig und verfügbar sein. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse robust sein müssen gegen reduzierte Kohärenz und unabhängig von der gewählten Polarisation. Weiterhin ist für den beschriebenen Anwendungsfall nur ein Analyseweg nutzbar, der mit wenigen kurzfristig beschaffbaren Satellitenbildern zu verlässlichen Aussagen kommt. Die durchgeführten Analysen in SARscape führten zu teilweise widersprüchlichen Ergebnissen, obwohl der Untersuchungszeitraum nahezu unverändert geblieben ist. Das beschriebene Verfahren muss daher als nicht robust und verlässlich für die beschriebene Aufgabe eingestuft werden. Die aufgeführten acht Punkte zur Verbesserung des Verfahrens bieten Raum für weitere Forschungen.

7 Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erdbeben entlang des San-Andreas-Grabens (Quelle: USGS)	8
Abbildung 2: Klimatabelle der Stadt San José (Quelle: de.climate-data.org)	9
Abbildung 3: laterale Verschiebung durch das Napa Erdbeben vom 24.08.2014 (Quelle: usgs.gov)	9
Abbildung 4: Messanordnung zur Detektion der Erdbebenverschiebung	10
Abbildung 5: Untersuchungsgebiet als SAR-Aufnahme in Schrägsichtgeometrie	11
Abbildung 6: Untersuchungsgebiet als optisches Bild (Quelle: Google Earth)	11
Abbildung 7: Frequenzbereiche der Fernerkundung	12
Abbildung 8: Bestandteile eines SAR-Systems nach [11]	13
Abbildung 9: Erfassen eines Zielpunktes in mehreren Aufnahmen zur Vergrößerung der Apertur [i]	15
Abbildung 10: slant range Koordinaten und ground range Koordinaten	16
Abbildung 11: SAR-Aufnahmegeometrie (Foreshortening: 1; Layover: 2; Schatten: 3)	16
Abbildung 12: Chuquicamata Kupfer Mine in Chile als SAR-Aufnahme und als optische Aufnahme	17
Abbildung 13: E-SAR Ausschnitt mit spiegelndem Zaun und Straße (DLR)	18
Abbildung 14: spiegelnde und diffuse Oberflächenreflektion ([g])	19
Abbildung 15: Volumenstreuung in Abhängigkeit der Wellenlänge (DLR [14])	20
Abbildung 16: Vergleich Farb-Infrarot Bildes (oben) mit SAR-Bild (unten) vom Niltal (Quelle: Nasa.gov)	21
Abbildung 17: Facet Scattering (nach [b] S.136)	22
Abbildung 18: Mehrfachreflektion an dihedralen & trihedralen Reflektoren (nach[b] S.116)	22
Abbildung 19: dreidimensionales Amplitudenbild des zweiten Corner-Reflektors	23
Abbildung 20: Amplitudenbild von Corner-Reflektor 2	23
Abbildung 21: Sydney Australien aufgenommen im Spotlight Mode (DLR[2])	24
Abbildung 22: kohärente Addition von Einzelstreuern führt zum Speckle-Effekt ([9] TELZER 2008)	25
Abbildung 23: Bandbreitenbereiche für ein 3-Look Multi-Look Verfahren nach [h]	25
Abbildung 24: Drygalski-Gletscher in der Antarktis farblich nach Fließgeschwindigkeit codiert (DLR)	26
Abbildung 25: prinzipieller Ablauf einer interferometrischen Untersuchung [11]	27
Abbildung 26: prinzipielle Aufnahmegeometrie bei Interferometrie (nach [b] S.183)	28
Abbildung 27: Bereich im Untersuchungsgebiet, primär vegetationsbedeckt (Hintergrundkarte: ESRI)	30
Abbildung 28: Kohärenz zwischen Aufnahme 19.04.14 und 22.05.14 (Hintergrundkarte: ESRI)	30
Abbildung 29: Umrechnung von relativen Phasenwerten zu absoluten Phasenwerten [11]	31
Abbildung 30: Cross Track Interferometrie nach [b] Seite 193	32
Abbildung 31: Along Track Interferometrie nach [b] Seite 193	32
Abbildung 32: Messung von Änderungen der Erdoberfläche nach [b] S.198	32
Abbildung 33: Alternative DInSAR Analyse bei Vorhandensein eines DEM [6]	33
Abbildung 34: prinzipieller Ablauf einer DInSAR Analyse [6]	33
Abbildung 35: TerraSAR-X [1]	36
Abbildung 36: Stripmap SAR-Aufnahmegeometrie des TerraSAR-X [8]	38
Abbildung 37: ScanSAR Aufnahmemodus des TerraSAR-X [8]	39
Abbildung 38: Spotlight Aufnahme Modus bei TerraSAR-X [8]	40
Abbildung 39: Unterschied zwischen aufsteigenden (ascending) und absteigenden (descending) Orbit Quelle: parviztarikhi.wordpress.com	41

Abbildung 40: SARscape Toolbox Hauptgruppen der Werkzeuge	42
Abbildung 41: Funktionsablauf in SARscape für die interferometrische Änderungsanalyse	44
Abbildung 42: Displacement Interferogramm nach Erdbeben im Iran (Quelle:[e])	45
Abbildung 43: Importieren der SAR-Bilder und Extrahieren des Referenz Höhenmodells als Voraussetzung für die Interferometrie	46
Abbildung 44: Erzeugen der Interferogramme und der Kontrollpunkte	46
Abbildung 45: Beispiel-XML Code eines Bodenkontrollpunktes	49
Abbildung 46: Eingangsdateien und Ergebnisdateien des Tools Phase to Height	51
Abbildung 47: Eingangs-, und Ergebnisdateien des Tools Phase to Displacement	52
Abbildung 48: Zuweisung SAR-Bilder bei 4-pass Interferometrie bei Step Model Ansatz	55
Abbildung 49: Zuweisung SAR-Bilder bei 3-pass Interferometry bei Step Model Ansatz	55
Abbildung 50: Zuweisung SAR-Bilder 3-pass Interferometrie bei No Model Ansatz	56
Abbildung 51: Zuweisung SAR-Bilder 4-pass Interferometrie bei No Model Ansatz	56
Abbildung 52: Zuweisung der SAR-Aufnahmen zu interferometrischen Paaren	57
Abbildung 53: Vergleich 1 erfolgt zwischen Analyse 1, 3 und 9	58
Abbildung 54: Displacement gem. Analyse 1	59
Abbildung 55: Verschiebungsergebnis von Analyse 3	59
Abbildung 56: Verschiebung nach Analyse 9	60
Abbildung 57: Vergleich 2 erfolgt zwischen Analyse 2 und 4	60
Abbildung 58: Ergebnis der Verschiebungsanalyse 2	61
Abbildung 59: Ergebnis der Verschiebungsanalyse nach Analyse 4	61
Abbildung 60: Vergleich 3 wird zwischen Analyse 5 und 7 durchgeführt	62
Abbildung 61: Verschiebung nach Analyse 5	62
Abbildung 62: Verschiebung gem. Analyse 7	62
Abbildung 63: Vergleich 4 wird durchgeführt zwischen Analyse 8 und 10	63
Abbildung 64: Verschiebung nach Analyse 8	63
Abbildung 65: Verschiebung nach Analyse 10	64
Abbildung 66: Winkel α der Verschiebung in Bezug zur Range Richtung des Sensorsystems auf dem Boden	64
Abbildung 67: originales geglättetes Interferogramm	65
Abbildung 68: Interferogramm mit Phasen Versatz von $\pi/2$	66
Abbildung 69: Differenz des originalen Interferogramm's (Abbildung 67) und des manipuliertem Interferogramm's (Abbildung 68)	67
Abbildung 70: Messanordnung für die Punktuelle Untersuchung	68
Abbildung 71: zentraler Bereich Corner-Reflektor 1 am 19.12.2013	68
Abbildung 72: Profil durch die Amplitude des Corner-Reflektors 1 am 19.12.2013	69
Abbildung 73: Phasendifferenzen vor und nach einem Deformationsereignis	70
Abbildung 74: Aufbau und Inhalt eines L1b Abgabeorders am Beispiel der Aufnahme vom 19.12.2013 (gelb = Ordner, blau= Datei)	80
Abbildung 75: Untersuchungsgebiet (rosa) dargestellt in ArcGIS (Hintergrundkarte: ESRI)	81
Abbildung 76: Untersuchungsgebiet in ArcGIS (Hintergrundkarte: ESRI)	81
Abbildung 77: Süd West Ecken der Satellitenbilder	82
Abbildung 78: interferometrischer Analyseablauf mit Darstellung der Kohärenz [18]	85

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Winkelauflösung optisches Fernerkundungssystem zu Real-Apertur-Radar-System.....	15
Tabelle 2: Position der Corner-Reflektoren	23
Tabelle 3: Fehlereinflüsse, die Kohärenz zwischen SAR-Bildern reduzieren [11]	29
Tabelle 4: Bedeutung der Einflussgrößen auf die interferometrische Phase.....	34
Tabelle 5: Orbit-Genauigkeiten bei TerraSAR-X	35
Tabelle 6: Leistungsparameter einer Stripmap SAR-Aufnahme bei TerraSAR-X [8].....	38
Tabelle 7: Leistungsparameter des ScanSAR-Aufnahmemodus bei TerraSAR-X [8]	39
Tabelle 8: Leistungsparameter der Spotlight-Aufnahme Modi für TerraSAR-X [8].....	40
Tabelle 9: SAR-Bildmaterial mit Polarisation und Orbit	41
Tabelle 10: Basislinien zwischen zwei Bildern.....	43
Tabelle 11: Reihenfolge einer interferometrischen Analyse in SARscape (Quelle [9])	45
Tabelle 12: Eingangsdateien und -parameter für die Berechnung der Interferogramme	47
Tabelle 13: Ergebnisdateien der Interferogrammerzeugung.....	48
Tabelle 14: Eingangsdateien für Refinement und Reflattening	50
Tabelle 15: Statistische Auswertung des Refinements	50
Tabelle 16: Ergebnis Dateien Refinement.....	51
Tabelle 17: Eingangsdateien und Parameter für das Tool Phase to Height Conversion	52
Tabelle 18: Ergebnisdatensätze des Moduls Phase to Height Conversion.....	52
Tabelle 19: Ergebnisdatensätze nach der Berechnung Phase to Displacement	53
Tabelle 20: Eingangsdaten und Parameter der Funktion Dual Pair Interferometry	55
Tabelle 21: Ergebnisdatensätze des Tool Dual Pair Interferometry.....	57
Tabelle 22: Phasen und Amplitudenwerte für Corner-Reflektor 1 in der SAR-Aufnahme vom 22.05.2014	69
Tabelle 23: absolute Phasen am Corner-Reflektor 2 zu den jeweiligen Messterminen	71
Tabelle 24: Benennung der TerraSAR-X Abgabeordner [19].....	79
Tabelle 25: Erfassungszeiten der TerraSAR-X Testdaten	82
Tabelle 26: pixelgenaue Messung der Phasen und Amplituden in den vertikal polarisierten Aufnahmen	83
Tabelle 27: pixelgenaue Messungen der Phasen und Amplituden der horizontal polarisierten Aufnahmen	84

7.3 Formelverzeichnis

Formel 1: Radargleichung [g]	14
Formel 2: Größe einer Auflösungszelle bei einem Real-Apertur-Radar-System [g].....	14
Formel 3: Azimut Auflösung eines SAR-Systems.....	15
Formel 4: Formel zur Abschätzung der Oberflächenrauigkeit [11].....	19
Formel 5: Radarrückstreuquerschnitt für direkte Reflektion Facet Scattering	22
Formel 6: größter Radarquerschnitt für einen dihedralen Reflektor ([b] S.117)	22
Formel 7: größter Radarquerschnitt für einen triahedralen Reflektor ([b] S.117).....	23
Formel 8: Entfernungsunterschied in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel und der Basislinie ([b] S.183)....	28
Formel 9: interferometrischer Phasenwinkel	28
Formel 10: Formel für die Kohärenz	29
Formel 11: Änderung des Phasenwinkels in Abhängigkeit der Basislinie ([b] Seite 199).....	34
Formel 12: Einflussgrößen auf die Phasendifferenz ([b] Seite 200)	34
Formel 13: Berechnung der interferometrischen Phase.....	48
Formel 14: Gleichungssystem zur Berechnung der Verschiebung bei Step Model Ansatz	55

Formel 15: Gleichungssystem zur Berechnung der Verschiebung, wenn keine Verschiebung unterstellt wird...	56
Formel 16: Versatz in Schrägsichtgeometrie	65

7.4 Literaturverzeichnis

- [a] Didier Massonet & Jean Claude Souyris, Imaging with synthetic aperture radar, EPFL Press, 2008
- [b] J.A. Richards, Remote Sensing with Imaging Radar, Springer Verlag, 2009
- [c] H.Klausing/W.Holpp, Radar mit realer und synthetischer Apertur, Oldenburg, 2000
- [d] Jörg Albertz, Einführung in die Fernerkundung, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 2009
- [e] SARscape Tutorial, ITT Visual Information Solutions
- [f] Timo Balz, Echtzeitvisualisierung von SAR-Effekten mittels programmierbarer Graphikhardware, Fakultät für Luft und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart vom 03.12.2007
Download bei: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/dissertationen/> am 01.09.2014
- [g] H. Süß, Vorlesung Radar-, und Lasermethoden an der Universität der Bundeswehr Okober- Dezember 2007
- [h] A. Moreira, Radar mit synthetischer Apertur Grundlagen und Signalverarbeitung, Habilitationsschrift an der Universität Fridericana zu Karlsruhe (TH) Download bei: ww.geo.uzh.ch/microsite/rsi-documents/research/SARlab/GMTILiterature/PDF/Moreira00.pdf am 10.09.2014
- [i] S. Telzer, Erstellung eines Tutorials für Fernerkundungsdaten, Diplomarbeit an der Universität der Bundeswehr München vom 28.02.2008

7.5 Internetquellenverzeichnis

- [1] <http://www.astrium.eads.net/de/programme/terrasar-x-7sd.html> vom 27.01.14
- [2] TerraSAR-X_web_Broschuere2010_LoRes.pdf Download bei http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#gallery/350 am 27.01.2014
- [3] <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/radar-interferometrie/13075> vom 15.04.2014
- [4] Radar Fernerkundung – millimetergenaue Beobachtung von Deformationsprozessen aus dem Weltall <http://www.giz.wetzell.de/Vortraege/Radarfernerkundung/> Download am 15.04.2014
- [5] SAR Interferometrie Vermessung aus dem Weltall http://www.geoleipzig.de/images/file/gf2010_f4_4.pdf Download am 15.04.2014
- [6] Synthetic Aperture Radar Land Applications Tutorial published by SARMap, ESA and UNESCO Download bei: http://earth.eo.esa.int/download/eoedu/Earthnet-website-material/to-access-from-Earthnet/2008_Bilko-SAR-Land-Applications-Tutorial/sar_land_apps_1_theory.pdf am 29.06.2014
- [7] TerraSAR-X Services Image Product Guide published by Airbus Defence & Space Geo-Intelligence Product Line Download at: www.astrium-geo.com/en/228-terrasar-x-technical-documents am 03.07.2014
- [8] TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document: TX GS DD 3302 vom 09.10.2013 Download bei: www.dlr.de am 01.09.2014
- [9] Synthetic Aperture Radar and SARscape published by sarmap download bei: www.sarmap.ch/SAR-Guidebook.pdf am 02.07.14
- [10] Synthetic Aperture Radar bei www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.de.html am 15.07.14
- [11] W. Keydel, Vorlesung und Übung zum Thema Radarsysteme www.keydel.com Download am 15.07.14
- [12] S. Plank, J. Singer, Ch. Minet & K. Thuro, Eignung des differentiellen Radarinterferometrie-Verfahrens (DInSAR) zur Deformationsüberwachung von Hangbewegungen – ein neues GIS basiertes Analysetool www.geo.tum.de/people/thuro/pubs/2011_taging_dinsar.pdf am 15.08.14

- [13] O. Hadj Sahraoui, B.Hassaine, C.Serief, Radar Interferometry with SARscape Software www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps05_08_03_sahraoui_u0222.pdf am 02.07.14
- [14] Tandem-L Broschüre Vorschlag für eine Satellitenmission zur Erfassung von dynamischen Prozessen auf der Erdoberfläche Download bei: www.dlr.de/portaldata/32/Ressources/dokumente/broschueren/Tandem-L_web_Broschuere2014_de.pdf Download am 03.09.2014
- [15] Wie Xu, A Region Growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping, http://sar.ece.ubc.ca/papers/Region_Growing.pdf Download am 05.09.14
- [16] TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification Document: TX-GS-DD-307 vom 10.12.2007 Download bei: dlr.de
- [17] Jana Schmidt, Operationalisierung von Monitoring periodischer Überflutung im Nigerbinnendelta durch Satellitengestützte Radarfernerkundung, Download bei http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/13866/Dissertation_JanaSchmidt.pdf am 24.10.2014
- [18] Parviz Tarikhi, INSAR FOR AQUATIC BODIES, <http://parviztarikhi.wordpress.com/features-2/insar-for-aquatic-bodies/> am 02.12.14
- [19] TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification Document TX-GS-DD-3307 vom 10.12.2007

I. Aufbau der Testdaten

Für die Analyse im Rahmen dieser Arbeit werden Slant Range Images verwendet, die als COSAR Dateien (*.cos) bereitgestellt werden. Seitens der Satellitenbetreiber werden die TerraSAR-X Bilddaten in einer festgelegten Ordnerstruktur und Aufbau abgegeben (siehe Abbildung 74), die durch das DLR definiert wurde.

Die Eigenschaften des verfügbaren Bildmaterials sind zum Teil bereits im Abgabennamen erkennbar:

TSX1_SAR__AAA_BBBB_CC_D_EEE_XXXXXXXXTXXXXXX_yyyyyyyTyyyyyy	
AAA	Produkt Klasse: <ul style="list-style-type: none"> • SSC... Single Look Slant Range Complex • MGD... Multi Look Ground Range Detected • GEC... Geocoded Ellipsoid Corrected • EEC... Enhance Ellipsoid Corrected
BBBB	Produkt-Unterklasse <ul style="list-style-type: none"> • SE__ ... räumlich verbessert • RE__ ... radiometrisch verbessert • ____ ... keine Verbesserung angebracht
CC	Abbildungsmodus <ul style="list-style-type: none"> • SM ... Stripmap Mode • SC ... ScanSAR Mode • SL ... Spotlight Mode • HS ... High Resolution spotlight Mode
D	Polarisationsart <ul style="list-style-type: none"> • S ... Single Polarisation • D ... Dual Polarisation • T ... Twin Polarisation • Q ... Quad Polarisation
EEE	Antennenkonfiguration zum Empfang <ul style="list-style-type: none"> • SRA ... Single Receive Antenna • DRA ... Dual Receive Antenna
XXXXXXXXTXXXXXX	Aufnahmestartzeitpunkt in UTC
yyyyyyTyyyyyy	Aufnahmeendzeitpunkt in UTC

Tabelle 24: Benennung der TerraSAR-X Abgabeordner [19]

TSX1_SAR__SSC_____HS_S_SRA_ 20131219T140717_20131219T140718	
ANNOTATION	DOPPLER_CENTROID_HH_SRA_spot_67.xml GEOREF.xml RFANTPAT_PHASE_HH_SRA_spot_067.xml
AUXRASTER	CAL_QL_MRES_HH.tif CAL_QL_MRES_HH.tif.kml STD_MRES_HH.tif STD_MRES_HH.tif.kml stdcalcomposite_MRES.tif stdcalcomposite_MRES.tif.kml
IMAGEDATA	IMAGE_HH_SRA_spot_067.cos
PREVIEW	Browse.tif Composite_QL.tif MAP_PLOT.tif QL_HH_SRA_spot_067.tif
SUPPORT	antennaPhasePattern.xsd focussedDopplerCentroid.xsd GEARTH_POLY.kml generalHeader.xsd geoReference.xsd level1Product.xsd PGS_Types.xsd README.txt types_inc.xsd
TSX1_SAR__SSC_____HS_S_SRA_20131219T140717_20131219T140718	L1B_iif.xml
TSX1_SAR__SSC_____HS_S_SRA_20131219T140717_20131219T140718.xml	

Abbildung 74: Aufbau und Inhalt eines L1b Abgabeordners am Beispiel der Aufnahme vom 19.12.2013 (gelb = Ordner, blau= Datei)

Beim Import in SARscape wird die Parameter XML Datei eingelesen, die sich im gleichnamigen Abgabeordner befindet (hier: TSX1_SAR__SSC_____HS_S_SRA_20131219T140717_20131219T140718.xml). Diese Parameter Datei verweist auf die eigentliche Bilddatei, die sich im Ordner IMAGEDATA befindet.

Die gelieferten Satellitenbilder liegen nahe beieinander über dem Untersuchungsgebiet dabei sind die Umriss-Rechtecke (Bounding Boxes) der Satellitenbilder jedoch nicht deckungsgleich. Es müssen daher im Rahmen dieser Arbeit Koregistrierungen zwischen den SAR-Bildern erfolgen. Die meisten Interferometriewerkzeuge in SARscape führen diese Koregistrierung implizit mit aus, sodass sie in den weiteren Ausführungen nicht explizit erwähnt wird.

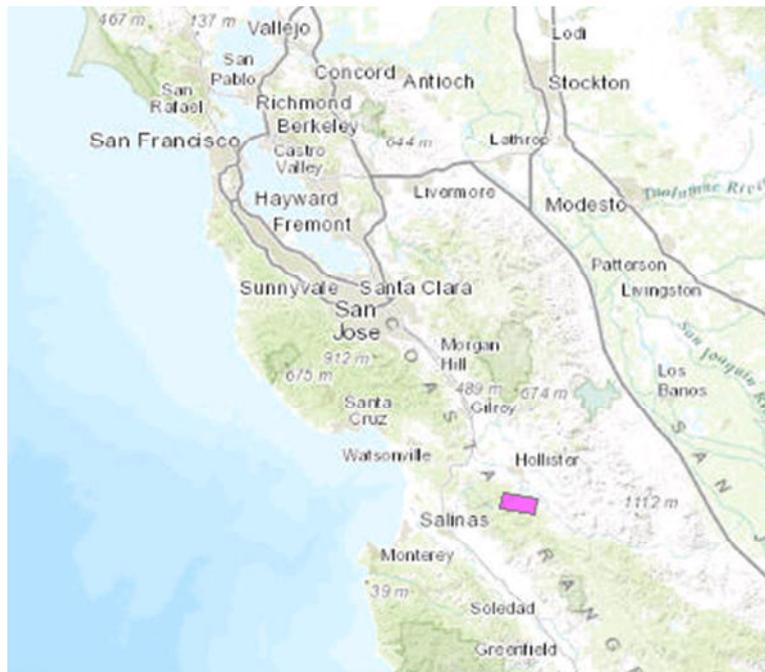


Abbildung 75: Untersuchungsgebiet (rosa) dargestellt in ArcGIS (Hintergrundkarte: ESRI)

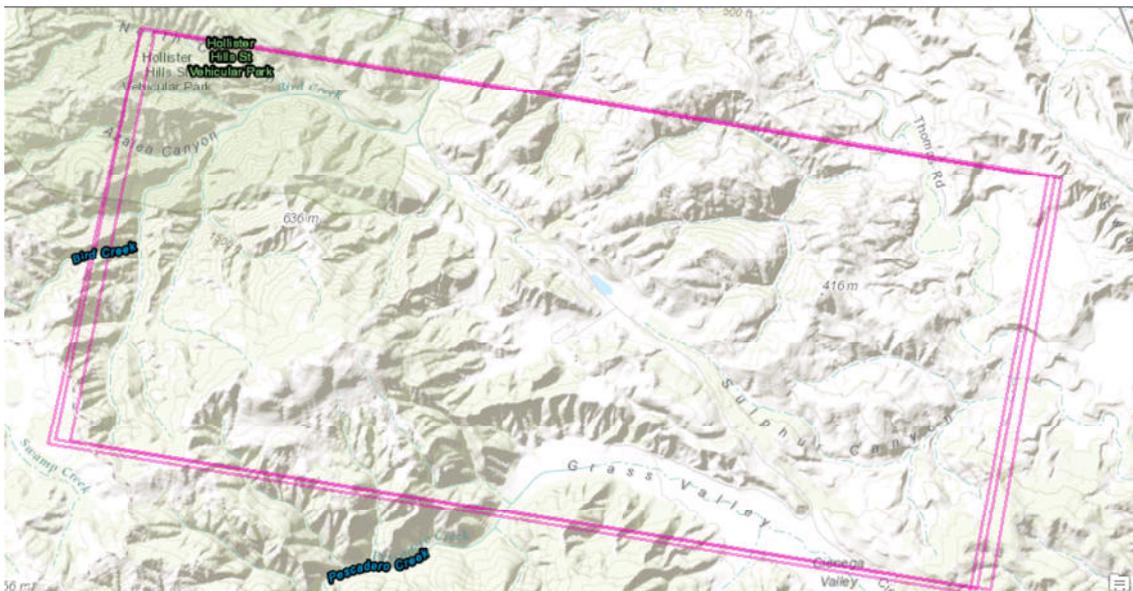


Abbildung 76: Untersuchungsgebiet in ArcGIS (Hintergrundkarte: ESRI)

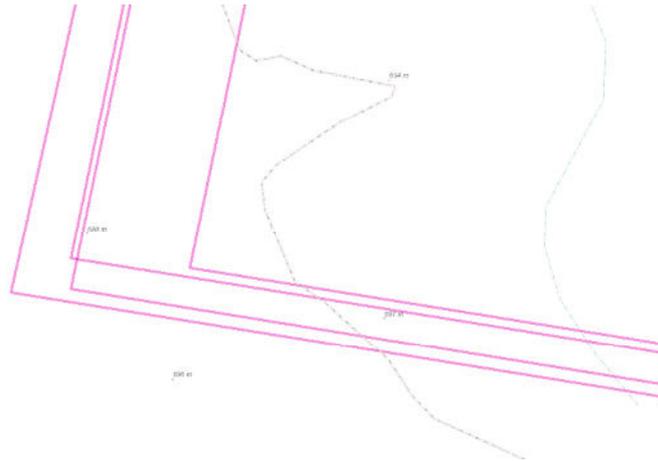


Abbildung 77: Süd West Ecken der Satellitenbilder

In Abbildung 77 sieht man den Süd-Westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes. Bei genauer Betrachtung der Satellitenbilder fällt auf, dass diese nicht deckungsgleich liegen, sondern um ca. 390 [m] in West-Ost Richtung auseinander liegen. Diese Differenz muss im Rahmen der Analyse überwunden werden, wenn man Verschiebungen in einer Größenordnung von wenigen [cm] detektieren möchte. Man verwendet dazu die sogenannte Koregistrierung

Image name	data acquisition			product generation		scene centerpoint		
	date	starttime	endtime	date	time	Lat [°]	Lon [°]	Inc [°]
TDX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20131127T140718_20131127T140719	27.11.2013	14:07:18	14:07:19	02.12.2013	10:36:26	36,74897	-121,39	45,58405
TSX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20131219T140717_20131219T140718	19.12.2013	14:07:17	14:07:18	25.12.2013	21:55:08	36,74879	-121,393	45,57497
TSX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20140419T140716_20140419T140717	19.04.2014	14:07:16	14:07:17	24.04.2014	00:50:01	36,74929	-121,392	45,58187
TSX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20140522T140718_20140522T140719	22.05.2014	14:07:18	14:07:19	27.05.2014	01:31:55	36,74898	-121,393	45,57393
TSX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20140408T140716_20140408T140717	08.04.2014	14:07:16	14:07:17	13.04.2014	00:55:37	36,74905	-121,393	45,58544
TSX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20140511T140717_20140511T140718	11.05.2014	14:07:17	14:07:18	16.05.2014	01:08:30	36,74956	-121,392	45,55706
TDX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20131127T140718_20131127T140719	27.11.2013	14:07:18	14:07:19	15.01.2014	07:58:32	36,74897	-121,39	45,58405
TSX1_SAR_SSC_HS_S_SRA_20131219T140717_20131219T140718	19.12.2013	14:07:17	14:07:18	15.01.2014	07:59:02	36,74879	-121,393	45,57497

Tabelle 25: Erfassungszeiten der TerraSAR-X Testdaten

Es fällt ebenfalls auf, dass die ersten beiden Bilder (27.11.2013 und 19.12.2013) doppelt vorhanden sind. Der augenscheinliche Unterschied besteht darin, dass diese Bilder zu unterschiedlichen Zeiten prozessiert worden (02.12.2013 und 25.12.2013 im Gegensatz zum 15.01.2014). Im Interferogramm ist für diese beiden Bilder keine Änderung zu erwarten, daher wird der zweite Satz dieser Satellitenbilder nicht weiter betrachtet.

II. Messungen der Phasen und Amplituden der Corner-Reflektoren

In Tabelle 26 und Tabelle 27 sind die Messwerte für die Phasenwerte und Amplitudenwerte für die beiden Corner-Reflektoren dargestellt, die in den einzelnen SAR-Bildern erfasst wurden. Die SAR-Bilder wurden zunächst koregistriert, damit die Streuzentren an identischen Positionen liegen.

	Corner Reflektor 1			Corner Reflektor 2		
20140511	6537,6689	10406,3467	2869,7493	1575,9648	3918,0002	1843,5835
	0,239	0,2557	0,2303	0,5485	0,6334	0,6639
	10565,0791	17080,9082	4800,3755	6558,5303	16986,4004	8036,2261
	0,2544	0,2645	0,1933	1,0135	1,038	1,0244
	2538,0293	4039,7283	1203,0369	4193,1924	10779,5615	5159,7686
	0,2745	0,2918	0,1155	1,5469	1,5606	1,538
20140613	5877,5698	10078,4658	2951,3237	1434,0013	3626,3647	1631,8472
	-1,123	-1,1106	-1,1275	0,0014	0,0637	0,1099
	9879,0488	17131,4824	5142,103	6709,8936	16689,8594	7535,167
	-1,1443	-1,1404	-1,2094	0,4039	0,4218	0,4028
	2554,9414	4427,3037	1452,1577	4621,0737	11465,4814	5256,8267
	-1,1043	-1,1195	-1,2565	0,8697	0,8814	0,8574
20140716	6672,8135	11102,005	3252,7849	1798,7957	4690,8706	2258,3457
	1,0237	1,0332	1,0016	2,9656	3,0178	3,0609
	9747,0205	16558,6816	4936,6665	6640,4077	17179,5156	8067,4561
	1,0342	1,0346	0,9761	-2,9565	-2,9318	-2,9418
	1950,4567	3268,1096	1036,8264	3766,7261	9593,6289	4541,1753
	1,0679	1,0416	1,0454	-2,4491	-2,4285	-2,4532
20140909	6199,1978	9538,8936	2464,8936	1255,7026	3200,2556	1500,4319
	-0,2108	-0,1977	-0,2871	-0,1479	-0,0801	-0,024
	10768,006	16812,8789	4462,5298	6507,1821	16218,3252	7242,1987
	-0,1391	-0,1414	-0,2378	0,2782	0,2977	0,2781
	2787,4307	4448,1592	1268,5759	4472,4814	11987,4854	5434,8013
	-0,0176	-0,0526	-0,1759	0,8319	0,8417	0,808

Tabelle 26: pixelgenaue Messung der Phasen und Amplituden in den vertikal polarisierten Aufnahmen

	Corner Reflektor 1			Corner Reflektor 2		
20140522	6434,9131	10777,5342	3255,4331	1676,3007	4696,082	2415,0051
	-1,4696	-1,444	-1,4073	-0,7381	-0,7176	-0,7039
	9358,6914	15964,7363	4941,5688	5929,6289	16725,3418	8584,2637
	-1,3587	-1,3407	-1,3513	-0,2743	-0,2596	-0,2887
	1929,6766	3317,5535	1179,6694	3409,1831	9475,8613	4962,3027
	-1,2415	-1,2469	-1,3538	0,3097	0,3263	0,2808
20140624	5944,377	9962,083	2934,876	1680,1488	4483,3623	2170,0083
	1,9063	1,9134	1,9701	3,0713	3,1289	-3,1388
	9479,9346	16295,1514	5008,6094	6052,7544	16712,3398	8187,106
	1,7816	1,7929	1,8142	-2,9	-2,8752	-2,9009
	2255,1152	4033,4766	1376,9713	3511,9368	9685,123	4827,731
	1,6503	1,6584	1,7497	-2,5733	-2,5502	-2,5917
20140727	6999,2319	10535,5088	2625,5105	1791,1633	4351,0127	1751,0891
	-2,7737	-2,7859	-2,7718	-1,2416	-1,2315	-1,2615
	9987,7891	15305,0801	4040,052	6881,0571	16512,166	6967,2939
	-2,834	-2,8455	-2,8646	-0,8995	-0,8691	-0,9005
	1701,6333	2823,1948	807,8465	3920,3701	9442,7813	3981,0984
	-2,8946	-2,9527	-2,7744	-0,5206	-0,4555	-0,4624
20140818	6171,1763	10350,6699	2954,4587	1998,0515	5054,9009	2174,0498
	-1,843	-1,8485	-1,8362	0,8364	0,8426	0,8456
	9173,4971	15656,7012	4689,9448	6272,9326	16548,0566	7682,6104
	-1,9203	-1,9242	-1,9481	1,1628	1,1855	1,1651
	1964,6119	358,99	1099,1383	3358,6292	8937,3945	4214,0684
	-1,978	-2,016	-1,9325	1,5514	1,5802	1,5651
20140920	4505,1123	9286,2256	3409,3533	1110,3604	3622,8577	1982,2583
	0,8522	0,8715	0,8843	-3,0188	-3,1096	-3,1254
	8071,1548	16826,543	6278,6714	4575,3892	15670,4209	8833,4922
	0,816	0,8422	0,8262	-2,8423	-2,8228	-2,8281
	2017,4806	4341,8477	1755,5176	3111,355	10446,041	5849,127
	0,8324	0,8687	0,8782	-2,4089	-2,345	-2,3413

Tabelle 27: pixelgenaue Messungen der Phasen und Amplituden der horizontal polarisierten Aufnahmen

III. Ablauf einer Interferometrischen Untersuchung

Die Darstellung zeigt den Ablauf einer interferometrischen Änderungsdetektion unter Einbeziehung der Kohärenz (siehe Abbildung 78).

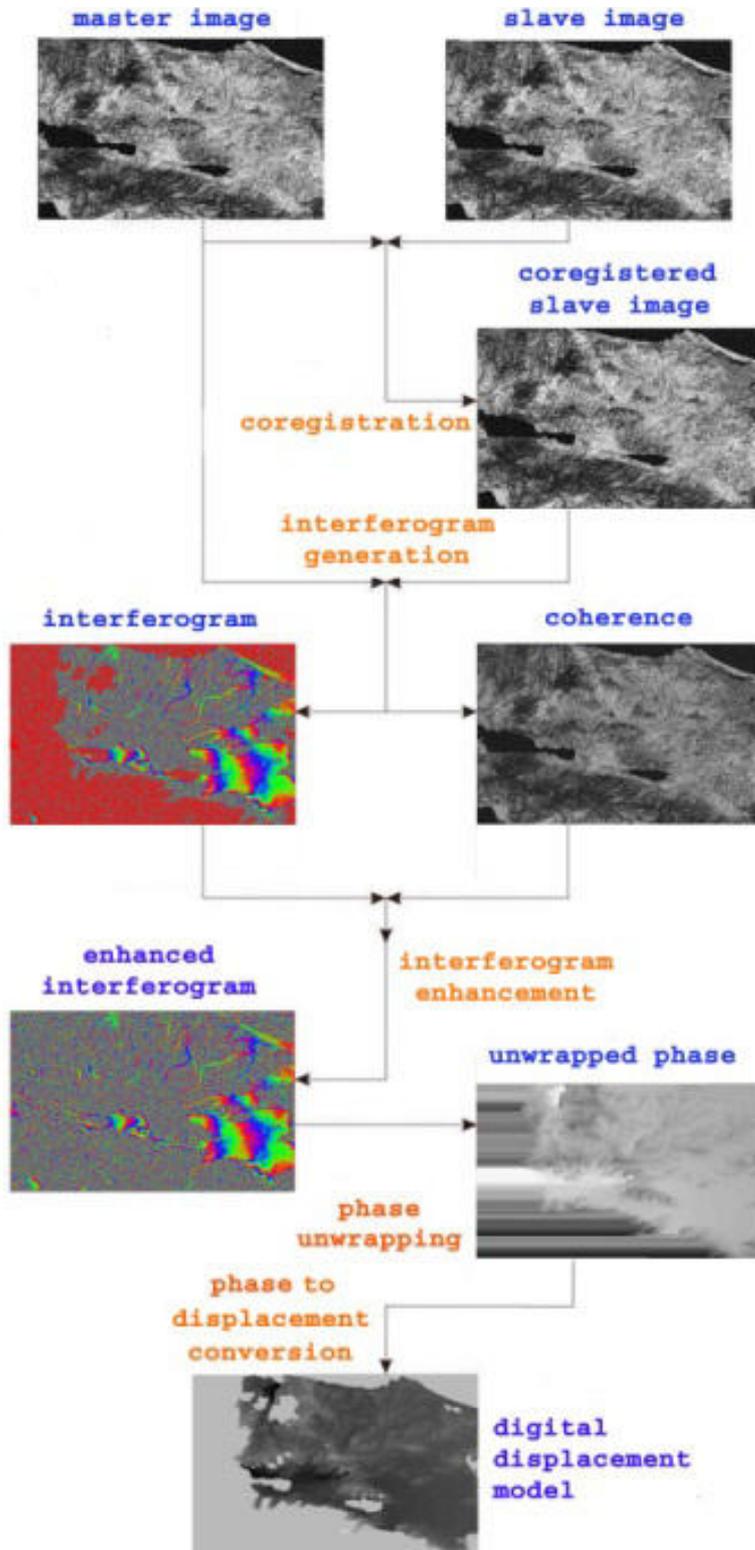


Abbildung 78: interferometrischer Analyseablauf mit Darstellung der Kohärenz [18]

IV. Abkürzungen

DLR	... Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
ESA	... European Space Agency
NEST	... Next ESA SAR Toolbox
SAR	... Synthetic Aperture Radar = abbildendes Radar mit synthetisch vergrößerter Apertur
DEM	... Digital elevation modell = digitales Höhenmodell
SNR	... Signal to Noise Ratio = Signal zu Rausch Verhältnis
GCP	... Ground Control Point = Referenzpunkt, der mit anderem Messverfahren bestimmt wurde
PS	... Persistent Scatterer = dauerhafter Streuer
DInSAR	... Differentielles Interferometrisches synthetisches Apertur Radar
ERS	... European Remote Sensing Satellite
TSX	... TerraSAR-X
RMS	... Root Mean Square error
UTC	...