

**Diplomarbeit im Studiengang Geodäsie und
Geoinformatik**

**Untersuchung eines Verfahrens zur Erkennung von
Geländedeformationen mit Persistent Scatterer
Interferometrie**

Alexander Schunert

Oktober 2008

Hannover, den 29 September 2008

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Diplomarbeit selbstständig von mir verfasst wurde. Ich habe keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und ausschließlich die dokumentierten fremden Hilfen verwendet

Alexander Schunert

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vor allem sind hier mein Betreuer Herr Prof. Dr.-Ing. U. Sörgel und Herr. Dipl.-Ing. Jan Dirk Wegener hervorzuheben, deren Türen mir immer offen standen. Dem Entwickler der StaMPS-Software Andrew John Hooper gilt mein besonderer Dank für die freie Distribution der StaMPS-Software und so manche beantwortete Frage.

Weiterhin bin ich Herrn Dipl.-Ing Nico Lindenthal für ein offenes Ohr und die Kaffeepausen sehr verbunden, die einen langen Arbeitstag um einiges angenehmer machten. Meinem Bruder Sebastian gilt mein Dank für diverse Korrekturen und Anregungen zu Arbeit und Vortrag.

Zuletzt möchte ich ganz besonders meinen Eltern dafür danken, mein Studium überhaupt möglich gemacht zu haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Inhalt und Zielsetzung	4
2	Grundlagen	5
2.1	Das Radar-Prinzip	5
2.2	Bildgebende Radarsysteme	6
2.2.1	Real Aperture Radar	7
2.2.2	Radar mit synthetischer Apertur	9
2.2.3	Geometrische Abbildungseigenschaften	10
2.2.4	Verfügbare Sensoren	12
3	SAR-Interferometrie	13
3.1	Interferometrisches SAR zur Ableitung der Topographie	14
3.2	Differentielle SAR-Interferometrie	17
3.3	Ablauf der interferometrischen Prozessierung	18
3.3.1	Grobe Koregistrierung basierend auf Orbitdaten	20
3.3.2	Grobe Koregistrierung basierend auf Amplitudenkorrelation	20
3.3.3	Filterung in Azimut und Entfernung	21
3.3.4	Feinregistrierung	22
3.3.5	Resampling	23
3.3.6	Interferogrammerzeugung	23
3.3.7	Eliminierung des geometrischen und topographischen Phasenanteils	24
3.3.8	Adaptive Phasenfilterung und Phase-Unwrapping	25
3.3.9	Geokodierung	30
3.4	Dekorrelation	30
3.4.1	Rauschen im Sende und Empfangssystem	31
3.4.2	Doppler Zentroid Dekorrelation	32
3.4.3	Geometrische Dekorrelation	33
3.4.4	Zeitliche Dekorrelation	33
3.4.5	Fehler während der Prozessierung	34
4	PS-Verfahren	36
4.1	Permanent Scatterer Verfahren nach Ferretti	36
4.1.1	Selektion von PS-Kandidaten	37
4.1.2	Schätzung des APS auf den Referenzpunkten	37
4.1.3	Pixelweise Interferogrammverarbeitung	40

4.1.4	Kritikpunkte	41
4.2	PS-Interferometrie nach Kampes	42
4.2.1	Punktauswahl	42
4.2.2	Funktionales Modell	44
4.2.3	Stochastisches Modell	46
4.2.4	Aufbau des Referenznetzwerks	46
4.2.5	Parameterschätzung im Netzwerk	47
4.2.6	Phasenfortsetzung	47
4.2.7	Zusammenfassung und Vergleich	48
5	Stanford Method of Persistent Scatterer	50
5.1	Interferogrammgenerierung	52
5.1.1	Registrierung des Geländemodells in die Mastergeometrie	52
5.1.2	Feinregistrierung im Interferogrammstapel	53
5.2	Identifikation der Persistent Scatterer	54
5.2.1	Analyse der Amplitude	55
5.2.2	Analyse der Phase	56
5.2.3	Auswahl der Persistent Scatterer nach Kohärenz	61
5.3	Auswahl der Persistent Scatterer	62
5.4	Schätzung der Bewegung	63
5.4.1	Phasenfortsetzung	64
5.4.2	Schätzung SCLA und Master-APS	65
5.4.3	Raum-Zeitliche Filterung	65
6	Ergebnisse	67
6.1	Ergebnisse der Koregistrierung	67
6.2	Ergebnisse der PS-Auswertung	76
6.2.1	Auswertung A	80
6.2.2	Auswertung B	89
7	Zusammenfassung	93
7.1	Ausblick	94
A	Abbildungen und Tabellen	95
B	Komponenten des STUN-Algorithmus	108
B.1	Integer-Least-Squares-Estimation (ILS)	108
B.2	Räumliche Integration der Parameterdifferenzen	110
B.3	Testen von Kanten und Punkten	110

Kapitel 1

Einleitung

Die genaue und zuverlässige Erfassung von Bewegungen der Erdoberfläche ist für diverse wirtschaftliche und wissenschaftliche Fragestellungen von hohem Interesse. So wurden bzw. werden in vielen Regionen Deutschlands unter Tage Rohstoffe abgebaut. Die Auswirkungen dieses Abbaus auf die Oberfläche müssen erfasst werden, um mögliche Schäden an der Oberfläche auf unterirdische Bautätigkeiten zurückzuführen und Bewegungstrends abzuleiten. Zum Einen kann dies in Hinblick auf eine Identifikation notwendiger Maßnahmen zum Schutz von Sachwerten und Bevölkerung geschehen. Zum Anderen ist aber auch die Frage der Haftung für eventuelle Schäden an der Oberfläche zu klären. Im wissenschaftlichen Bereich ist eine Kenntnis der Oberflächenbewegung vor allem für geologische und geophysikalische Fragestellungen interessant. Ein Beispiel hierfür wäre die Beschreibung von Vulkanen mit geophysikalischen Modellen. Diese bilden das System eines Vulkans mehr oder weniger stark vereinfacht ab. Eine Kenntnis der Oberflächenbewegung ist hier in zweierlei Hinsicht nützlich. Zunächst können Modelle aus der bekannten Deformation abgeleitet bzw. angepasst werden (siehe z.B. [9]). Weiterhin müssen für diese Modelle, die das System eines Vulkans in Abhängigkeit einiger Parameter beschreiben, Randbedingungen vorliegen, um eine spezielle Lösung für den betrachteten Anwendungsfall zu finden. Diese spezielle Lösung kann dann im Umkehrschluss mit den Deformationsdaten verglichen werden, was bei angenommener Richtigkeit der Deformationsdaten Fehler im geophysikalischen Modell aufzeigt.

Traditionell werden Deformationsdaten in Form von Punktmessungen erhoben, wobei Nivellement, Tachymetrie und GPS die gängigsten Methoden wären. Neben dem offensichtlichen Nachteil der punkthaften Messungen steht vor allem der erhöhte Aufwand dieser Verfahren der hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Verfahren gegenüber. Eine Alternative stellt seit einiger Zeit die differentielle Radarinterferometrie dar, die im klassischen Fall, unter Nutzung von zwei Radarbildern und einem Geländemodell, flächenhafte Deformationsanalysen liefert. Allerdings hat dieses Verfahren den großen Nachteil, dass die Szenen zweier Radarbilder, die durch lange räumliche bzw. zeitliche Basislinien getrennt sind, dekorrelieren. Die Dekorrelation der Szenen wirkt im Interferogramm, das die Differenzphase der beiden Aufnahmen enthält, wie Rauschen und kann eine Auswertung großer Bereiche des Interferogramms schwierig bis unmöglich machen. Zwar kann der Einfluss einiger Dekorrelationseffekte durch geeignete Filtermethoden reduziert werden, jedoch wird das Grundproblem nicht beseitigt.

Neben der Menge der dekorrelierten Interferogrammpunkte treten aber auch Punkte in Interferogrammen auf, die ein stabiles Signal über die Zeit liefern. Diese Punkte werden im Rahmen dieser Arbeit als PS (Persistent Scatterer) bezeichnet. Bei diesen Punkten handelt es sich zumeist um Gebäudeteile und Felsen. Eine Auswertung der interferometrischen Phase auf diesen Punkten ist auch für lange Basislinien möglich. Es wurden daher einige Verfahren entwickelt, die diese Punkte identifizieren und zur Auswertung des Signals nutzen. Hierfür ist die Verarbeitung eines Stapel notwendig, der im Allgemeinen mehr als zwölf differentielle Interferogramme¹ enthalten muss, um ein Deformationssignal zu isolieren.

Die *Stanford Method of Persistent Scatterer* (StaMPS) ist solch ein Verfahren. Vorteile dieses Algorithmus sind vor allem die freie Verfügbarkeit des Quellcodes und die Tatsache, dass kein bekanntes Bewegungsmodell in die Auswertung eingeführt werden muss, was bei vielen anderen gängigen *Persistent Scatterer* Verfahren notwendig ist (siehe z.B. [16, 2]).

1.1 Inhalt und Zielsetzung

In den ersten beiden Abschnitten werden die notwendigen Grundlagen erläutert, die zum Verständnis der PS-Verfahren notwendig sind. Vor allem im Abschnitt über die Radarinterferometrie werden einige Vorgehensweisen erläutert, die auch im Rahmen des StaMPS-Algorithmus zur Anwendung kommen. Es besteht hier nicht der Anspruch einer erschöpfenden Abhandlung über das gesamte Gebiet der Interferometrie, da dieses im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Vielmehr soll eine Vorstellung von den grundlegenden Konzepten und Charakteristiken der Radarinterferometrie gegeben werden. Aufbauend auf der Beschreibung der Radarinterferometrie werden zwei alternative PS-Verfahren vorgestellt. Diese wurden von Alessandro Ferretti bzw. Bert Kampes entwickelt und sollen vor allem den Unterschied der StaMPS-Auswertung hervorheben und die Ursprünge der PS-Technik klar machen. Anschließend wird die aktuelle StaMPS-Version erläutert, die von der in [9] vorgestellten Version in einigen Punkten abweicht. Schließlich werden Ergebnisse für einen ERS1- bzw. ERS2-Bildstapel über dem Alcedo-Vulkan auf der Isla Isabela (Galapagos) gezeigt. Dieser Stapel reicht zeitlich vom 15.06.1992 bis zum 09.11.2000. Jedes Bild wurde hierbei in einem absteigendem Orbit aufgenommen.

Ziel der Arbeit ist vor allem die Erprobung des StaMPS-Algorithmus und die Reproduktion der Referenzergebnisse, um die einzelnen Schritte dieses komplexen Verfahrens zu verstehen und auf andere Szenen zu übertragen. Hierbei ist vor allem die Dokumentation der Zwischenergebnisse wichtig, um in späteren Auswertungen Vergleiche ziehen zu können. Zusätzlich soll eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Verarbeitungsschritte zur Identifikation möglicher Erweiterungen und Verbesserungen durchgeführt werden, was auch für insbesondere für weiterführende Arbeiten interessant ist. Insgesamt ist das Ziel dieser Arbeit also eine weitergehende Betrachtung des Feldes der PS-Verfahren vorzubereiten und zu erleichtern.

¹Für die meisten Verfahren sind deutlich mehr Interferogramme notwendig

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden und im Rahmen dieser Arbeit wichtigen Konzepte der Radarfernerkundung kurz erläutert. Begonnen wird mit dem Radar-Prinzip, das allen aktiven Radarsensoren zu Grunde liegt. Anschließend wird das Prinzip des bildgebenden Radars anhand raum- bzw. luftgestützter Radarsensoren erläutert. Hierbei wird sowohl auf das Radar mit realer als auch auf das Radar mit synthetischer Apertur eingegangen. Ergänzend zu den Aufnahmeprinzipien des bildgebenden Radars werden auch die geometrischen (und radiometrischen) Abbildungseigenschaften erläutert, die bei der Interpretation der Bilder immer zu berücksichtigen sind.

2.1 Das Radar-Prinzip

Aktive Radarsensoren beleuchten die Umgebung mit elektromagnetischer Strahlung. Diese wird von einer Antenne ausgesandt und auf ihrem Ausbreitungsweg durch Streukörper reflektiert bzw. gestreut. Je nach Konfiguration wird das Radarsignal von der Sendeanenne oder einer bzw. mehreren anderen Antennen empfangen, die jeweils den in ihre Richtung zurückgestreuten Signalanteil messen. Im Falle einer einzelnen Antenne (monostatisches Radar) kann die Entfernung zu einem Streukörper durch die Messung der Zeitdifferenz zwischen Sende- und Empfangszeitpunkt und einer bekannten bzw. angenommenen Signal-Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Abhängig von der Aufgabenstellung sind außerdem Signalstärke, Phase und Polarisation mögliche Messgrößen. So kann die Signalstärke genutzt werden, um Rückschlüsse über Größe und Beschaffenheit eines Objektes zu ziehen.

Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich die Betrachtung von Radarsensoren auf raum- bzw. luftgestützte bildgebende Radarsysteme. Diese beleuchten die Umgebung mit elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen in der Größenordnung einiger Zenti- bis Dezimeter. Der wesentliche Vorteil dieser Sensoren gegenüber optischen raum- bzw. luftgestützten Fernerkundungssensoren liegt in der Unabhängigkeit von externen Beleuchtungsquellen und somit der Tageszeit und der weitgehenden Wetterunabhängigkeit (vgl. [12]). Letzteres wird vor allem durch lange Wellenlängen erreicht. Je länger hierbei die Wellenlänge gewählt wird, desto geringer ist der Wettereinfluss auf die Messung.

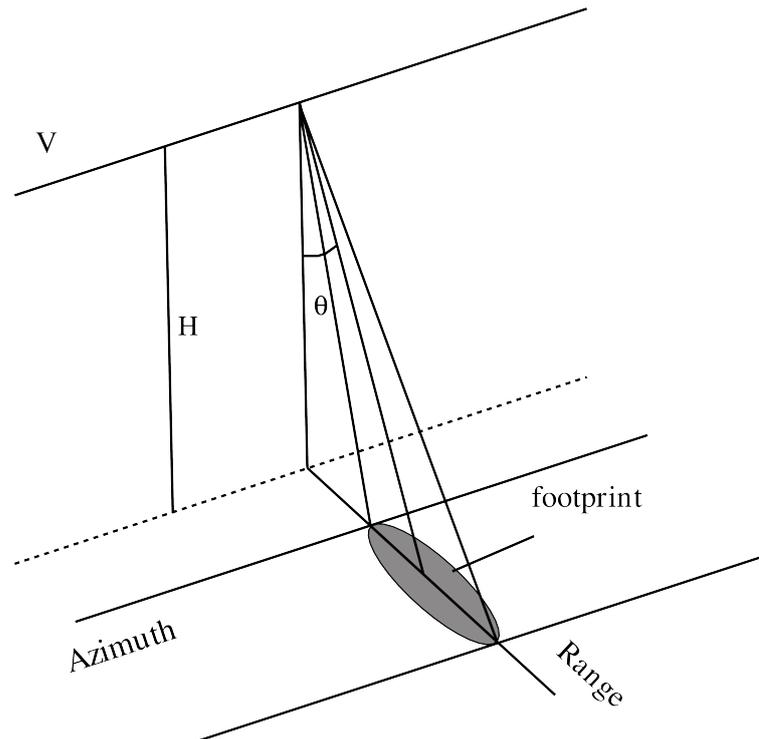


Abbildung 2.1: SAR-Abbildungsgeometrie

2.2 Bildgebende Radarsysteme

Bildgebende Radarsysteme bestehen aus einer Sende und einer Empfangsantenne, die sich auf einer bewegten Plattform befinden [12]. Die Sende- und die Empfangsantenne sind hierbei in Schrägsicht und quer zur Flugrichtung ausgerichtet. Die Aufnahmeconfiguration ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Der Träger der Antennen bewegt sich mit der Geschwindigkeit V in einer Höhe H über dem Erdboden. Die auf den Erdboden projizierte Bewegungsrichtung des Trägers (along-track) wird Azimut- und die auf den Erdboden projizierte Blickrichtung des Sensors (across-track) wird Entfernungs-Richtung genannt. Die Blickrichtung des Sensors steht im Idealfall exakt senkrecht auf der Bahn des Trägers und beleuchtet den Erdboden in Schrägsicht ¹. Letzteres ist notwendig um sicherzustellen, dass Koordinaten in Entfernungs-Richtung eindeutig über die Laufzeit des Signals zugeordnet werden können ².

Jeder emittierte Puls beleuchtet eine gewisse Fläche auf dem Erdboden. Diese Fläche wird Footprint genannt. Die Ausdehnung dieses Footprints hängt von den Charakteristiken der Sendeeinheit ab und wird im Wesentlichen durch Beugungseffekte bestimmt. Die Auflösung in Azimut- und Entfernungsrichtung ist dabei sehr unterschiedlich, da Streuer in Entfernungsrichtung über die Laufzeit der zugehörigen Echos identifiziert werden können. Während also einzelne Streuer innerhalb des Footprints, die entlang einer Li-

¹Blickrichtung schließt mit der Nadirrichtung den Winkel $\Theta \neq 0$ ein

²Bei dieser Betrachtung wird die Topographie vernachlässigt

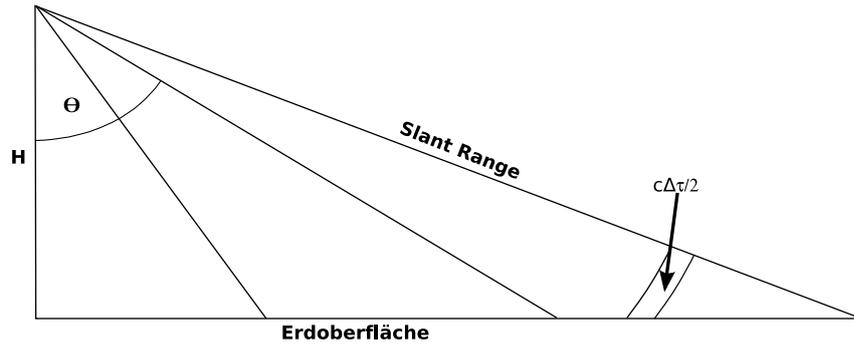


Abbildung 2.2: Entfernungsgometrie

nie gleicher Azimut-Koordinate (also variable Entfernungskoordinate) verteilt sind, im Rahmen der Zeitaufösung des Sensors noch getrennt werden können, können Streuer im Footprint, die entlang einer Linie gleicher Entfernungskoordinate verteilt sind, nicht mehr getrennt werden. Das führt zu einer deutlich schlechteren Azimut-Auflösung von Radarsystemen, die das Bild aus einzelnen Zeilen zusammenfügen, wobei jede Zeile für sich aus den Echos eines Pulses generiert wird. Radarsysteme, die nach diesem Prinzip arbeiten, werden Real Aperture Radar genannt.

Eine Verbesserung der Azimut-Auflösung kann durch die Generierung einer synthetischen Apertur erreicht werden. Hierbei nutzt man den Dopplereffekt, der durch die Bewegung des Trägers hervorgerufen wird, um Streuer in Azimut-Richtung besser trennen zu können. Radarsysteme, die nach diesem Prinzip arbeiten, werden Synthetic Aperture Radar genannt.

In den folgenden beiden Abschnitten werden diese beiden Techniken näher erläutert, wobei im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Synthetic-Aperture-Radar-Daten verwendet worden sind.

2.2.1 Real Aperture Radar

Wie schon erwähnt, wird beim Real Aperture Radar das Bild im Allgemeinen Zeile für Zeile aus den Echos der einzelnen Pulse aufgebaut. Die Auflösungen in beiden Richtungen unterscheiden sich hierbei deutlich und werden durch unterschiedliche System- bzw. Aufnahmeparameter bestimmt. Während die Auflösung in Entfernungsebene im Wesentlichen von der Pulsdauer abhängt, hängt die Auflösung in Azimutrichtung von der Antennenlänge (der sogenannten Apertur) und der Entfernungskoordinate der Auflösungszelle ab, wobei die Antennenlänge aufgrund von Beugungserscheinungen eine Rolle spielt. Während die Entfernungsaufösung also pulsbegrenzt ist, ist die Azimutaufösung beugungsbegrenzt (siehe auch [12, 22]). Abbildung 2.2 stellt einen Schnitt entlang einer Linie gleicher Azimut-Koordinate dar. Die Ebene entlang der Beobachtungsrichtung wird Entfernungsebene oder Slant-Range genannt. Es wird nun ein Puls einer bestimmten Länge $\Delta\tau$ ausgesandt, der einen Bereich entlang der Entfernungsebene beleuchtet, wobei die Größe dieses Bereichs von der Breite der Antenne abhängt. Die Auflösung in der Entfer-

nungsgeometrie³ ist dann gegeben durch (siehe [22]):

$$\delta_r = \frac{c \cdot \Delta\tau}{2} \quad (2.2.1)$$

Hierbei steht c für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Pulses. Wegen der Antiproportionalität von Signal-Bandbreite W und Pulsdauer $\Delta\tau$ kann Gleichung (2.2.1) dargestellt werden als [12]:

$$\delta_r = \frac{c}{2 \cdot W} \quad \text{mit} \quad \tau \cdot W \approx 1 \quad (2.2.2)$$

Die Auflösung in der Bodengeometrie hängt zusätzlich vom Winkel θ ab, der die Neigung der Beobachtungsrichtung gegen die Nadirrichtung wiedergibt, und ist gegeben durch (siehe [22]):

$$\delta_{r,Boden} = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \sin \theta} = \frac{c}{2W \sin \theta} \quad (2.2.3)$$

Aus Gleichung (2.2.3) ist auch die Notwendigkeit der schrägen Beobachtungsrichtung ersichtlich, da der Nenner für $\theta = 0$ ebenfalls den Wert Null annimmt.

Setzt man einen mittleren Winkel Θ und eine Streifenbreite auf der gedachten Referenzfläche⁴ voraus, kann die Entfernungsauflösung nur über die Pulsdauer gesteuert werden. Allerdings ist diese nach unten durch die Sendeelektronik begrenzt. Um etwa ausreichende Signal-Rausch-Verhältnisse erzeugen zu können, muss der Puls eine gewisse Gesamtenergie aufweisen, was bei kurzen Pulsen zu Leistungsspitzen führt, die die Sendeelektronik beschädigen würden (vgl. [12]). Man sendet daher einen längeren linear frequenzmodulierten Puls⁵ aus. Die Frequenz dieses Pulses steigt von einer Startfrequenz f_0 bis zu einer Endfrequenz f_n linear mit der Zeit an. Die Bandbreite dieses Pulses entspricht der Differenz zwischen Anfangs- und Endfrequenz [12]:

$$W = |f_0 - f_n| \quad (2.2.4)$$

Durch Verlängerung der Pulsdauer bzw. Erhöhen der Frequenzänderung pro Zeitintervall, kann die Bandbreite vergrößert werden, so dass das ausgesandte frequenzmodulierte Signal eine deutlich höhere Entfernungsauflösung ermöglicht als ein nicht frequenzmoduliertes Signal gleicher Länge. Die an unterschiedlichen Stellen der Erdoberfläche reflektierten Echos überlagern sich während des Empfangsprozesses und müssen getrennt werden. Dieses geschieht durch Korrelation des empfangenen Signals mit einer komplex konjugierten und zeitinvertierten Version des Sendesignals und wird als Matched-Filter-Prozess bezeichnet. Praktisch führt diese Vorgehensweise zu einer Kompression des langen Sendesignals zu einem schmalen Puls [12], so dass das Ergebnis interpretiert werden kann als ob ein schmaler Puls gesendet worden wäre [22].

Die Auflösung in Azimut-Richtung ist wie schon erwähnt von der Antennenlänge und der Entfernungs-Koordinate der Auflösungszelle abhängig. Die Winkelauflösung des Sensors ist hierbei im Wesentlichen durch beugungsbedingte Effekte an der Apertur begrenzt

³Slant Range

⁴flache Erde, sphärisches oder ellipsoidisches Modell

⁵Chirp

[12]. Je länger die Antenne gewählt wird, desto kleiner ist der minimal auflösbare Winkel. Die Winkelauflösung kann durch Multiplikation mit der Entfernung zur Auflösungszelle in eine Bodenauflösung umgerechnet werden, was die Abhängigkeit von der Entfernung erklärt:

$$\delta_{az,Boden}^{ra} = \frac{\lambda}{D} \cdot r_{Ziel} \quad (2.2.5)$$

Hierbei steht λ für die Wellenlänge des Radarsystems, D für die Antennenlänge⁶ und r_{Ziel} für die Entfernung zum Zielpunkt. Der erste Teil von Gleichung (2.2.5), bestehend aus Wellenlänge und Antennenlänge, entspricht der Winkelauflösung. Da an der Zielentfernung bei gegebener Aufnahmekonfiguration wenig geändert werden kann, muss die Winkelauflösung verbessert werden, um eine bessere Auflösung in Azimut-Richtung zu erreichen. Allerdings ist die Antennenlänge baulich nach oben und die Wellenlänge u.a. durch Atmosphärendämpfung nach unten begrenzt (vgl. [22]), so dass sich auch die Winkelauflösung nicht signifikant verbessern lässt.

Insgesamt weist das Radar mit realer Apertur zwei sehr große Nachteile auf. Zum Einen ist die Auflösung in Azimut-Richtung von der Entfernung zum Streuer abhängig, so dass die Auflösungszellen in einer Linie gleicher Azimut-Koordinate unterschiedliche Ausdehnungen aufweisen. Zum Anderen ist die Ausdehnung der Auflösungszellen in Azimut generell sehr groß, so dass bei Satellitenaufnahmen mit realistisch angenommenen Aufnahmeparametern Auflösungen im Kilometerbereich die Regel wären (vgl. [12]).

2.2.2 Radar mit synthetischer Apertur

Die Grundidee des Radars mit synthetischer Apertur ist mehrere örtlich und zeitlich versetzte Messungen einer kleinen Antenne zu einer Messung einer großen Antenne zusammenzufassen. Die geometrischen Verhältnisse sind in Abbildung 2.3 wiedergegeben. Der Sensorträger bewegt sich mit der Geschwindigkeit v auf der eingezeichneten Kurve. Der Punkt P auf dem Boden liegt zwischen den beiden Sensorpositionen $k - 1$ und $k + 1$ innerhalb des von der Antennenkeule beleuchteten Bereichs und trägt somit zum aufgezeichneten Signal bei. Nun werden wiederholt Radarimpulse mit einer bestimmten Pulswiederholungsrate⁷ ausgesandt, so dass eine ganze Reihe von Messungen vorhanden sind, in denen der Einfluss des Punktes P präsent ist. Um das Signal dieses Punktes⁸ zu isolieren, nutzt man die Änderung der Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und Bodenpunkt P aus, die zu einer Veränderung der Dopplerfrequenz führt. Diese beschreibt für jeden Bodenpunkt eine Parabel, deren Scheitel sich am sogenannten Dopplerschwerpunkt befindet⁹, wenn Blickrichtung und Bewegungsrichtung des Sensors genau senkrecht zueinander sind. Der Dopplerschwerpunkt für den Bodenpunkt P ist der Punkt k auf der Flugbahn des Sensors. Der Dopplerschwerpunkt eines Bodenpunkt P' , der einen bestimmten Betrag in Azimut vom Bodenpunkt P entfernt liegt, würde an einem anderen Ort auf der Flugbahn des Sensors liegen. Die Dopplerhistorien beider Punkte unterscheiden sich also, so dass beide auf Basis ihrer Dopplerhistorien getrennt werden können.

⁶Ausdehnung der Antenne in Azimut-Richtung

⁷Pulse Repetition Frequency (PRF)

⁸Um genau zu sein handelt es sich nicht um einen Punkt, sondern um einen ausgedehnten Bereich

⁹Ort geringster Entfernung zwischen Sensor und Bodenpunkt

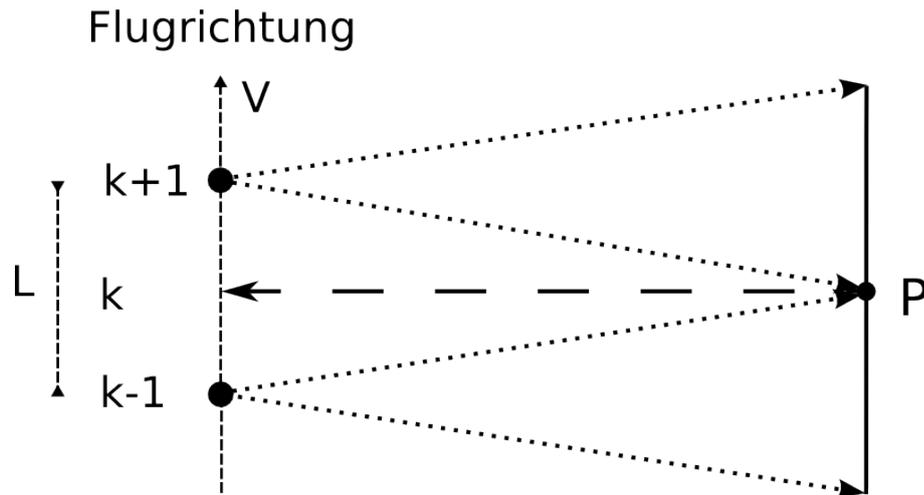


Abbildung 2.3: Veranschaulichung des Prinzips der Synthetic Aperture Radar Technik

Dieses kann z.B. wie im Fall der Signalverarbeitung des Entfernungssignals (Entfernungskompression) nach dem Matched-Filter-Prinzip geschehen, da das Signal eines Punktstreuers durch die Dopplerverschiebung frequenzmoduliert ist. Hierbei muss das Referenzsignal abhängig von der Entfernung generiert werden, was eine genaue Kenntnis der Sensorbewegung vorausgesetzt [7].

Nach der SAR-Prozessierung können die Daten behandelt werden, als wenn sie von einer Antenne mit der Länge L aufgenommen worden wären. Die Länge dieser generierten Apertur entspricht der Azimutaufösung des Radars mit realer Apertur in der entsprechenden Entfernung. Die mit dieser Technik generierte Winkelaufösung ist nach [22] und [12] gegeben durch:

$$\theta^{sa} \approx \frac{\lambda}{2 \cdot L} \quad (2.2.6)$$

Damit folgt für die Azimut-Auflösung in der Bodengeometrie:

$$\delta_{az,Boden}^{sa} = r_{Ziel} \cdot \theta^{sa} \approx \frac{\lambda \cdot r_{Ziel}}{2 \cdot L} = \frac{D}{2} \quad (2.2.7)$$

Hierbei ist D die reale Antennenlänge. Auffallend ist, dass die erreichbare Auflösung weder von der Objektentfernung noch von der Wellenlänge abhängt und mit Verkleinerung der Antennenlänge besser werden würde.

2.2.3 Geometrische Abbildungseigenschaften

Der Bildaufbau bei Radarsystemen mit realer und synthetischer Apertur¹⁰ geschieht Zeile für Zeile, wobei die Echos auf einen ausgesandten Puls eine Zeile bilden. Folglich ist die Abbildungsgeometrie in Azimut-Richtung eine Parallelprojektion und muss hinsichtlich

¹⁰Zwar wird bei Systemen mit synthetischer Apertur das Bild anders aufgebaut. Allerdings gibt es keinen Unterschied zu einer Aufnahme mit einer großen Antenne

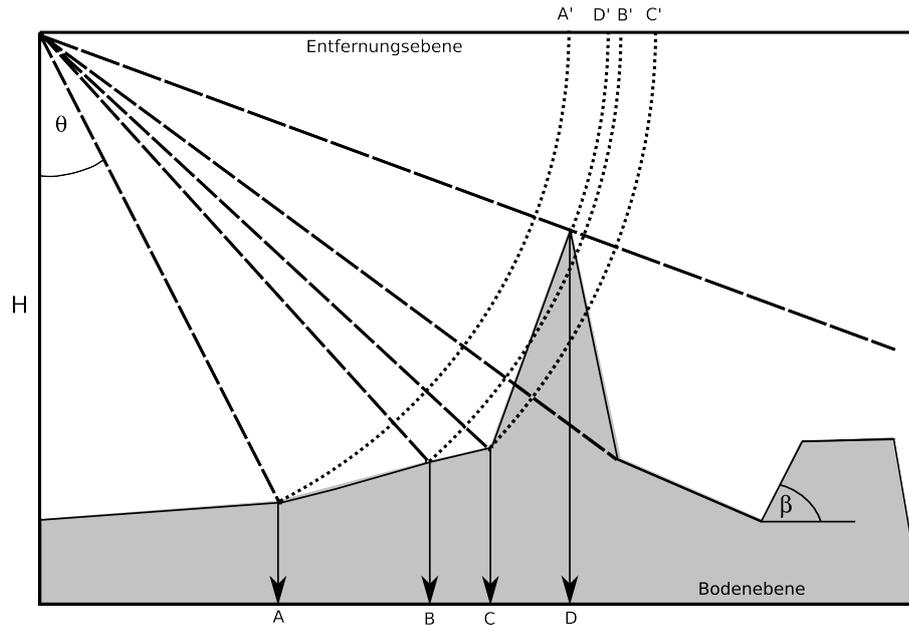


Abbildung 2.4: Verzerrungen bei Abbildung in die Entfernungs-Geometrie

geometrischer Verzerrungen nicht untersucht werden.

Im Gegensatz dazu ist die Abbildung einer Zeile in die Entfernungsgeometrie nichtlinear [22]. Insbesondere treten bei der Erfassung von unebenem Gelände aufgrund der seitlichen Beobachtungsrichtung Verzerrungen auf [22]. Diese werden in Abbildung 2.4 dargestellt. Im Wesentlichen unterscheidet man drei verschiedene Effekte: Foreshortening, Layover und Schatten. Alle drei Effekte werden im Folgenden kurz erläutert.

- Foreshortening:

Dieser Effekt tritt auf, wenn die Geländeneigung β kleiner ist als der Elevationswinkel θ . In Abbildung 2.4 tritt dieser Effekt zwischen den Punkten A' und B' in der Entfernungebene auf, deren Abstand deutlich geringer ist als der Abstand der Punkte A und B in der Bodenebene. Wegen der verkürzten Abbildung der Strecke ist der Bildbereich zwischen den Punkten A' und B' recht hell, da dieser die gesamte reflektierte Energie aus dem Bereich zwischen den Punkten A und B enthält [22].

- Layover:

Layover tritt auf, wenn die Geländeneigung β gleich oder größer ist als der Elevationswinkel θ . Betrachtet man in Abbildung 2.4 die Punkte C und D in der Bodenebene bzw. die Punkte C' und D' in der Entfernungebene, stellt man fest, dass diese in der Entfernungebene ihre Positionen getauscht haben. Der Gipfel des Berges wird also vor dem Fuß in das Radarbild abgebildet, so dass der Eindruck entsteht die entsprechenden topographischen Objekte neigten sich in Richtung des Sensors.

- Schatten:

Vom Sensor abgewandte Bereiche der Erdoberfläche werden nicht beleuchtet, wenn ihre Neigung größer als der Elevationswinkel Θ ist [12, 22], oder sie durch ein hoch aufragendes Hinderniss verdeckt sind. In diesen Bereichen erhält der Sensor kein Signal, so dass dieses Gebiet im Radarbild schwarz erscheint¹¹. In Abbildung 2.4 gilt das für den Bereich des Radarbildes hinter dem Punkt C' in der Entfernungsebene.

2.2.4 Verfügbare Sensoren

Im Rahmen dieser Arbeit sind ausschließlich raumgestützte Sensorsysteme von Interesse. Insbesondere liegen Daten der SAR-Sensoren des ERS1- und ERS2-Satelliten und Daten des ASAR¹²-Sensors des ENVISAT-Satelliten vor. Die SAR-Sensoren der beiden ERS-Satelliten sind baugleich und arbeiten mit einer Trägerwellenlänge im C-Band von 5,66 cm, was einer Frequenz von 5,3 GHz entspricht [22]. Der ASAR-Sensor des ENVISAT-Satelliten arbeitet ebenfalls im C-Band mit einer Wellenlänge von 5,62 cm [16]. Die Wellenlängen unterscheiden sich also leicht, was bei Verwendung von Daten beider Sensoren in einem Interferogrammstapel durchaus Auswirkungen hat. Der ASAR-Sensor bietet im Vergleich zum SAR-Sensor der ERS-Satelliten mehr Flexibilität in Inzidenzwinkel und Polarisation, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht ins Gewicht fällt. Der Vorteil der ERS-Daten ist die Anzahl an verfügbaren Akquisitionen und Tandempaaren, was die Bestimmung von Höhenmodellen für die differentielle Radarinterferometrie direkt in der Mastergeometrie erlaubt, vorausgesetzt der Master besitzt einen Tandempartner. Der große Vorteil des ASAR-Sensors des ENVISAT-Satelliten sind die simultan vorliegenden MERIS-Daten, die nach [21] für atmosphärische Korrekturen verwendet werden können, was zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse genutzt werden könnte.

¹¹Mit Ausnahme des Sensorrauschens

¹²Advanced Synthetic Aperture Radar

Kapitel 3

SAR-Interferometrie

Ein SAR-Sensor unterscheidet Objekte in Entfernungsrichtung anhand der Laufzeit. Folglich können zwei Objekte, die sich in gleicher Entfernung und Azimutposition zum Sensor aber an unterschiedlichen Orten in der Bodengeometrie befinden nicht aufgelöst werden. Beide Objekte könnten allerdings durch den Elevationswinkel, unter dem der Sensor die Objekte sieht, unterschieden werden. Dieser geht allerdings durch die Projektion der dreidimensionalen Welt in das Radarkoordinatensystem (Azimut und Entfernung) verloren [12]. Die Rekonstruktion dieses Blickwinkels gelingt unter Einsatz zweier SAR-Sensoren, die Messungen von unterschiedlichen Orten durchführen¹. Das Resultat sind Entfernungsdifferenzen, die die Rekonstruktion dieses Winkels ermöglichen.

Man unterscheidet im Wesentlichen die Across- und die Along-Track-Interferometrie. Bei der Along-Track-Interferometrie sind die Sensoren in Flugrichtung angeordnet, was die Ableitung radialer Objektbewegungen ermöglicht [12]. Die Along-Track-Interferometrie hat für diese Arbeit keine Bedeutung.

Die bei der Across-Track-Interferometrie gewonnene Messgröße ist im Wesentlichen die Phasendifferenz zweier komplexer Messgrößen und setzt sich aus den Phasenanteilen der flachen Erde ϕ_{geom} (geometrische Phasenanteil), der Topographie ϕ_{topo} , der Deformation ϕ_{defo} und einem Rauschterm ϕ_{noise} zusammen:

$$\phi^w = W\{\phi_{geom} + \phi_{topo} + \phi_{defo} + \phi_{noise}\} \quad (3.0.1)$$

Die Across-Track-Interferometrie erlaubt mit senkrecht zur Flugrichtung angeordneten Sensoren die Ableitung einer Geländehöhe, was zur großflächigen topographischen Erfassung der Erdoberfläche genutzt wird. Hierbei werden alle Terme außer dem Phasenanteil der Topographie auf ein Minimum reduziert, um die Geländehöhe zu bestimmen. Als bislang bedeutendstes Beispiel sei hier die SRTM-Mission genannt.

Werden alle Phasenanteile außer dem Deformationsterm eliminiert, ist es möglich² eine Oberflächenbewegung mit hoher Auflösung zu messen. Diese Vorgehensweise wird differentielle SAR-Interferometrie genannt. Im Weiteren werden die grundlegenden Prinzipien

¹Messungen können auch zeitlich auseinander liegen

²zeitlich versetzte Aufnahmen vorausgesetzt

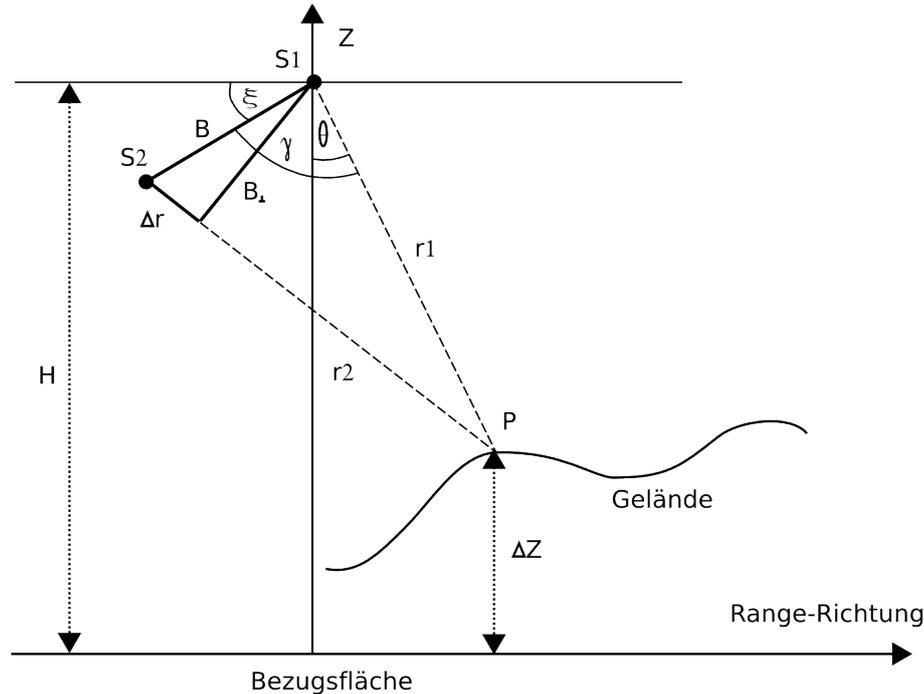


Abbildung 3.1: Geometrische Konfiguration der across-track-Interferometrie

der SAR-Interferometrie und der differentiellen SAR-Interferometrie erläutert, wobei besonderes Gewicht auf der differentiellen Interferometrie liegt. Insbesondere sind die technischen Probleme, die bei der Umsetzung des Prinzips auftreten, und zur Entwicklung der Permanent bzw. Persistent Scatterer-Techniken geführt haben, Gegenstand der Diskussion.

3.1 Interferometrisches SAR zur Ableitung der Topographie

Wie schon erwähnt, kann der Elevationswinkel unter dem ein Streukörper beobachtet wurde rekonstruiert werden, wenn mindestens zwei räumlich versetzte SAR-Aufnahmen vorliegen. Diese können sowohl gleichzeitig von zwei unterschiedlichen Sensoren³ (Single-Pass-Interferometrie) als auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Repeat-Pass-Interferometrie)⁴ aufgenommen worden sein. Der beiden Sensoren müssen hierbei in Across-Track-Richtung versetzt sein, um die Geländetopographie ableiten zu können. Abbildung 3.1 zeigt einen Schnitt dieser Aufnahmekonfiguration entlang einer beliebigen Azimutkoordinate. Beide Sensoren, bezeichnet mit S_1 und S_2 , sind durch eine räumliche Basislinie der Länge B getrennt. Diese ist um den Winkel ξ gegen die Horizontale geneigt. Die Entfernungen der Sensoren zu einem Punkt P auf der Geländeoberfläche sind mit r_1 und r_2 benannt. Der Weglängenunterschied, der letztendlich die Information über den Elevationswinkel trägt

³zumeist auf einem Sensorträger

⁴z.B. ein Satellit aus unterschiedlichen Orbits

[7], ist mit Δr bezeichnet und definiert als $\Delta r = r_2 - r_1$. Die zu bestimmende Zielgröße ist der Winkel θ , der über die bekannte Objektentfernung r_1 und die bekannte Flughöhe H des Sensors S_1 bestimmt werden kann. Weiterhin wird der wirksame Abstand der Sensoren als effektive bzw. senkrechte Basislinie bezeichnet und ist in Abbildung 3.1 mit B_\perp gekennzeichnet.

Die Entfernungsdifferenz könnte nun mit Hilfe der Objektentfernung, die aus der Laufzeit gewonnen wurde, berechnet werden. Allerdings wäre diese Messung viel zu ungenau, so dass stattdessen die Phaseninformation beider Sensoraufnahmen genutzt wird [7]. Ausgangspunkt der Betrachtung ist also die in beiden SAR-Aufnahmen am Geländepunkt P gemessene Phase, die bei Vernachlässigung von atmosphärischen Einflüssen im Wesentlichen aus einem entfernungsabhängigen Anteil und einem objektabhängigen Anteil besteht (hierbei werden Rauschen und Bewegung vernachlässigt). Während der erste Anteil zur Entfernung proportional ist und die in diesem Fall interessante Information trägt, entspricht der zweite Anteil einer Phasenänderung bei der Streuung am Objekt im Bodenpunkt P [12]. Diese Streukomponente ist nicht vorherzusagen. Allerdings ist sie deterministisch, so dass sie bei gleichen Aufnahmebedingungen den gleichen Wert annimmt [7]. Beim interferometrischen SAR geht man im Allgemeinen von unveränderten Aufnahmebedingungen aus, so dass sich die interferometrische Phase darstellen lässt als:

$$\psi_{1,P} = -\frac{2\pi 2r_1}{\lambda} + \psi_{streu} \quad (3.1.1)$$

$$\psi_{2,P} = -\frac{2\pi 2r_2}{\lambda} + \psi_{streu} \quad (3.1.2)$$

$$\phi_P = \psi_{2,P} - \psi_{1,P} = -\frac{4\pi \Delta r}{\lambda} \quad (3.1.3)$$

Hierbei ist λ die Wellenlänge des Radarsignals, die je nach Sensor im Bereich von Zenti- bis Dezimetern liegt. Die Größen $\psi_{1,P}$ und $\psi_{2,P}$ sind die für den Punkt P gemessenen Phasen der Sensoren S_1 und S_2 . Anzumerken ist, dass sich die Gleichungen (3.1.1) bis (3.1.3) auf den Fall eines Mehrfachüberfluges beziehen. Die Phasendifferenz für einen Einfachüberflug müsste noch durch zwei dividiert werden. Allerdings ist der Fall von Repeat-Pass-Interferometrie von größerer Relevanz für diese Arbeit, so dass weitere Ausführungen auf den Gleichungen (3.1.1) bis (3.1.3) aufbauen.

Die Änderung der interferometrischen Phase ϕ_P in Abhängigkeit von der Differenzstrecke Δr ist gegeben durch [7]:

$$\partial \phi_P = -\frac{4\pi}{\lambda} \partial \Delta r \quad (3.1.4)$$

Wegen der im Vergleich zur Objektentfernung kurzen Basislinie kann die Entfernungsdifferenz näherungsweise ausgedrückt werden als:

$$\Delta r \approx B \sin(\theta - \xi) \quad (3.1.5)$$

Gleichung (3.1.5) ist als Parallel-Ray-Approximation bekannt (vgl. [7, 12]), da hier von parallelen Beobachtungsrichtungen ausgegangen wird. Ableiten von (3.1.5) und Einsetzen in (3.1.4) ergibt die Änderung der interferometrischen Phase mit der Blickrichtung:

$$\partial \phi_P \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \cdot \cos(\theta - \xi) \cdot \partial \theta \approx \Delta \phi \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \cdot \cos(\theta - \xi) \cdot \Delta \theta \quad (3.1.6)$$

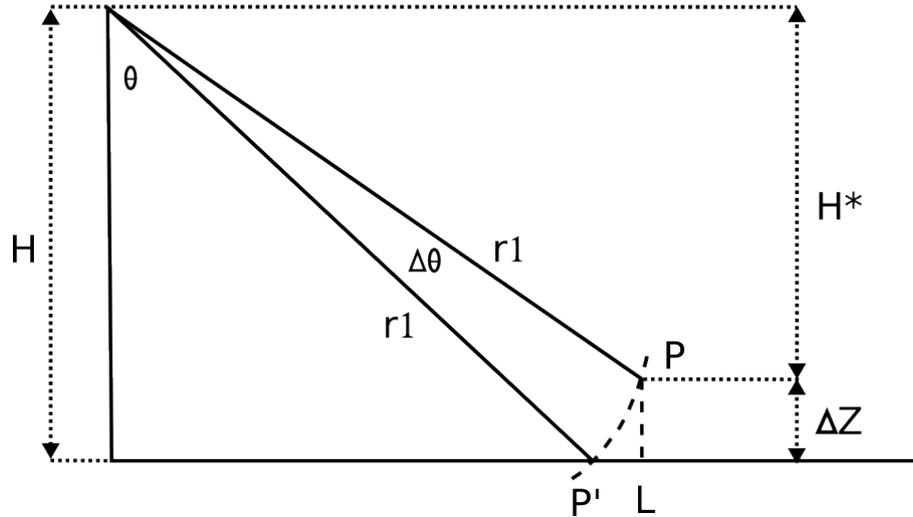


Abbildung 3.2: Zusammenhang zwischen Blickwinkel, Satellitenhöhe und Höhe des Geländepunktes

Auf der anderen Seite kann eine Änderung der Höhe eines Streuers mit der Änderung des Elevationswinkels ausgedrückt werden als:

$$\Delta Z \approx r_1 \cdot \Delta\theta \cdot \sin\theta \quad (3.1.7)$$

Die zugehörige Situation ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Gleichung (3.1.7) ergibt sich dann durch Berechnung des entsprechenden Maßes in dem Dreieck P', L, P , wobei der Bogen P, P' als Sehne approximiert wird. Durch Auflösen von (3.1.6) nach $\Delta\theta$ und anschließendem Einsetzen in (3.1.7) ergibt sich [7]:

$$\Delta Z \approx -\frac{\lambda r_1 \sin\theta_0}{4\pi B \cos(\theta_0 - \xi)} \Delta\phi = -\frac{\lambda r_1 \sin\theta_0}{4\pi B_\perp} \Delta\phi \quad (3.1.8)$$

Diese Gleichung drückt die Höhe ΔZ eines Streuers in Bezug auf eine Referenzfläche aus. Der Punkt P' in Abbildung 3.2 ist hierbei ein hypothetischer Punkt auf der Referenzfläche. Er wird vom Sensor unter dem Elevationswinkel θ_0 gesehen, während dem realen Punkt P der Elevationswinkel $\theta + \Delta\theta$ zugeordnet wird. Die abweichende Blickrichtung hat eine Differenz in der interferometrischen (Differenz)-Phase zur Folge, die in Gleichung (3.1.6) zum Ausdruck kommt. Hierbei ist die interferometrische Differenzphase $\Delta\phi$ als Differenz zwischen der gemessenen interferometrischen Phase und der geometriebedingten Phasenkomponente (z.B. Phase der flachen bzw. ellipsoidischen Erde) definiert [7]:

$$\Delta\phi = \phi - \phi_{geom} \quad (3.1.9)$$

Aus Gleichung (3.1.8) lässt sich also die Topographie ableiten. Der Ansatzpunkt gegeben durch die Gleichungen (3.1.1) bis (3.1.3) setzen allerdings vorhandene aufeinander referenzierte SAR-Aufnahmen voraus, die ggf. vorher gefiltert wurden, um die Annahme gleichen Streuverhaltens zu rechtfertigen. Insbesondere ist die Phase nur modulo 2π bekannt, so dass vor der Berechnung der Höhe eines Punktes eine Phasenfortsetzung erfolgen muss. Weiterhin gibt es einige Anforderungen an die geometrische bzw. zeitliche

Anordnung der verwendeten SAR-Aufnahmen, die sich im Wesentlichen auf die Annahme gleichen Streuverhaltens zurückführen lassen. Sowohl Vor- und Nachbearbeitungsschritte als auch die genannten Anforderungen an die Beobachtungsbasis werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

3.2 Differentielle SAR-Interferometrie

Im vorangegangenen Kapitel wurde davon ausgegangen, dass sich die Topographie zwischen den Aufnahmen nicht verändert. Trifft diese Annahme nicht zu, ergibt sich eine zusätzliche Phasenkomponente für diese Deformation. Der Anteil dieses Deformationssignals in Blickrichtung fließt, skaliert mit einem Faktor $\frac{4\pi}{\lambda}$, direkt in die gemessene interferometrische Phase ein [7, 12]. Ist die Änderung der Topographie die wesentliche Zielgröße der Messung, muss das Topographiesignal eliminiert werden. Hierzu existieren im Wesentlichen drei Verfahren. Das 2-Pass-Verfahren, das 3-Pass-Verfahren und das 4-Pass-Verfahren. Während das 2-Pass-Verfahren ein externes Geländemodell einführt, um die topographiebedingte Phase unter Kenntnis der Aufnahmegeometrie zu simulieren, wird bei der 3- bzw. der 4-Pass-Methode der Einfluss der Bewegung und der Topographie unter Nutzung mehrerer Interferogramme getrennt.

Bei der 3-Pass-Methode werden aus drei SAR-Aufnahmen zwei Interferogramme erstellt, wobei eines dieser Interferogramme bewegungsfrei sein muss, d.h. kein Deformationssignal enthalten darf. Das bewegungsfreie Interferogramm wird nun benutzt, um den topographischen Phasenanteil aus einem Interferogramm mit Deformationssignal zu eliminieren. Die Generierung eines bewegungsfreien Interferogramms setzt hierbei einen hinreichend kurzen zeitlichen Abstand der SAR-Aufnahmen voraus [12].

Bei der 4-Pass-Methode werden aus vier SAR-Bildern zwei Interferogramme berechnet. Diese sind unabhängig voneinander und können pixelweise als Gleichungssystem aufgefasst werden, in dem Deformation und Topographie als Unbekannte auftreten. Durch die Unabhängigkeit der Interferogramme ergeben sich allerdings vier Unbekannte für zwei Bestimmungsgleichungen, so dass das Gleichungssystem unterbestimmt ist. Durch Annahme eines konstanten Topographieeinflusses und einer zeitlich gleichförmigen Bewegung kann die Anzahl der Unbekannten jedoch reduziert werden, so dass das Gleichungssystem lösbar wird [12].

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Topographie ausschließlich unter Nutzung eines externen Geländemodells eliminiert, so dass wenn von Topographie- bzw. Blickwinkel-Korrektur die Rede ist, immer die 2-Pass-Methode bzw. eine an dieses Verfahren angelehnte Methode gemeint ist. Weitere Informationen zur 3- bzw. 4-Pass-Methode geben [12, 7].

Die Simulation der topographiebedingten Phase, die bei Anwendung des 2-Pass-Verfahrens durchgeführt wird, erfordert die Konvertierung des Geländemodells in das Radarkoordinatensystem. Der entsprechende Phasenanteil kann dann durch Freistellen von $\Delta\phi$ in Gleichung (3.1.8) berechnet werden. Berücksichtigt man den geometrischen, den topographischen und den deformationsbedingten Phasenanteil ist die gemessene interferometri-

sche Phase gegeben durch [7]:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(B \sin(\theta_0 - \xi) - \delta_{def} - \frac{B_{\perp}}{r_1 \sin \theta_0} \Delta Z \right) \quad (3.2.1)$$

Die Klammerterme stehen hierbei in dieser Reihenfolge für den geometrischen, deformationsbedingten und topographischen Phasenanteil. Mit dem Index 0 sind jeweils Größen gekennzeichnet, die sich auf die Referenzfläche beziehen (so steht θ_0 für den Elevationswinkel eines Punktes auf der Referenzfläche (siehe Abbildung 3.2). Da alle Größen in Gleichung (3.2.1) gemessen sind bzw. aus Navigationsdaten des Sensorträgers und einem externen Geländemodell berechnet werden können, kann das Deformationssignal durch Freistellen von δ_{def} ermittelt werden.

Allerdings führen Dekorrelationseffekte, die im Wesentlichen durch die Aufnahmekonfiguration bzw. durch den zeitlichen Abstand der Aufnahmen hervorgerufen werden (siehe Abschnitt 3.4), sowie unterschiedliche atmosphärische Einflüsse zu den Aufnahmezeitpunkten zu zusätzlichen Phasentermen, die das Deformationssignal überlagern (vgl. [9, 7]). Ein Ansatz, der die geometrischen und temporalen Dekorrelationseffekte zu minimieren versucht, ist der Permanent bzw. Persistent Scatterer Ansatz. Hier werden einzelne konstante Streuer in einem Stapel von Interferogrammen identifiziert. Die Phasenhistorie dieser konstanten Streuer weist ein deutlich niedrigeres Rauschniveau als die Phasenhistorie gewöhnlicher Punkte auf [9], so dass atmosphärische und ggf. andere zusätzliche Einflüsse geschätzt werden können und ein Deformationssignal extrahiert werden kann. Verfahren, die nach diesem Prinzip arbeiten wurden unter anderem in [3, 16, 9] vorgestellt. Diese Permanent- bzw. Persistent-Scatterer Verfahren werden in den Abschnitten 4 und 5 wieder aufgegriffen und genauer erläutert.

3.3 Ablauf der interferometrischen Prozessierung

Die Prozessierung wird im Rahmen dieser Arbeit ausgehend von fokussierten SAR-Aufnahmen⁵ betrachtet. Hierbei werden nur die für differentiell interferometrisches SAR wesentlichen Schritte beschrieben, da das interferometrische SAR zur Ableitung der Geländehöhe im Rahmen dieser Arbeit keine wesentliche Rolle spielt. Die herkömmliche Verarbeitungskette zur Erstellung eines differentiellen Interferogramms (etwa bei der 2-Pass-Methode) und die Verarbeitungskette beim StaMPS-Verfahren, das im Rahmen dieser Arbeit angewandt wurde, unterscheiden sich in einigen Punkten. Insbesondere prozessiert das StaMPS-System einen Bildstapel, wobei ein Referenzbild (Master) als Bezug für alle anderen Bilder (Slaves) dient. Einige Verarbeitungsschritte erfolgen für jedes Master-Slave-Paar. Ausgenommen sind die Filterungen in Azimut- und Entfernungsrichtung, die während der StaMPS-Verarbeitung nicht durchgeführt werden, das Phaseunwrapping, das zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt wird, und die Koregistrierung, die nicht für jedes Master-Slave-Paar durchgeführt wird, sondern für räumlich und zeitlich benachbarte Szenen⁶. Die erforderlichen Polynomfunktionen, die eine Master-Position auf eine

⁵Entfernungs- und Azimut-Kompression schon erfolgt

⁶inklusive der Masterszene

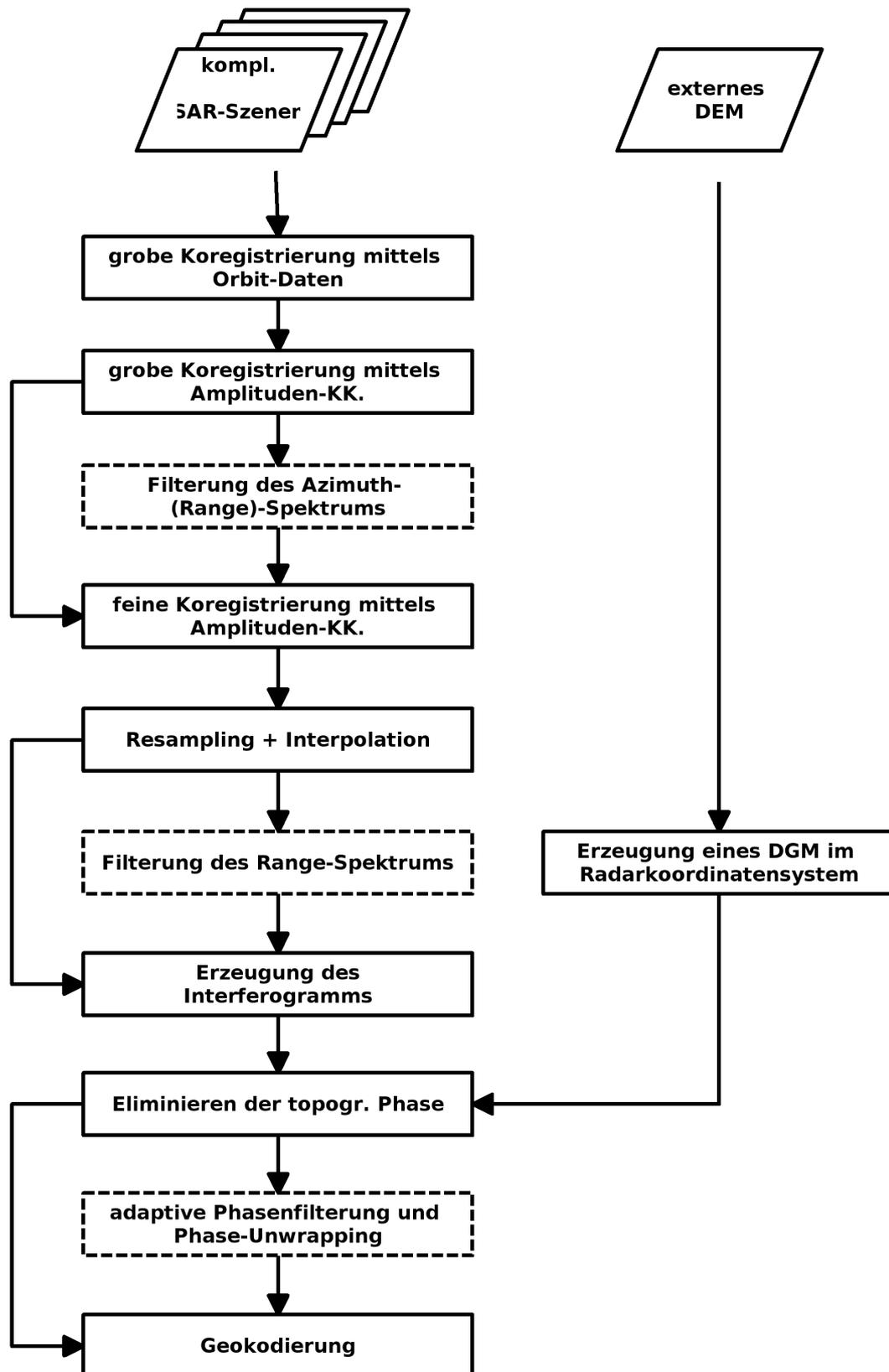


Abbildung 3.3: Schritte bei der dINSAR-Verarbeitung

Slave-Position abbilden, werden für jeden Slave durch Schätzungen im Sinne der kleinsten Quadrate bestimmt [9]. Weiterhin ist die Reihenfolge der Ausführung der einzelnen Schritte teilweise beliebig. Die in Abbildung 3.3 dargestellte Verarbeitungskette ist die in [13] empfohlene bzw. die nach [9] im Rahmen der StaMPS-Prozessierung durchgeführte Vorgehensweise, wobei die gestrichelten Felder andeuten, dass diese Schritte im Rahmen der StaMPS-Prozessierung nicht oder zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden.

3.3.1 Grobe Koregistrierung basierend auf Orbitdaten

In diesem ersten Schritt wird ein Offset in Line- und Pixel-Koordinaten⁷ festgelegt. Dieses geschieht durch Referenzierung der Szenenmitte der Masterakquisition auf ein Ellipsoid. Verfahren hierzu werden in [22] bzw. [13] vorgestellt. Im Wesentlichen basieren diese Verfahren auf der Forderung für die Weltkoordinaten eines in der SAR-Aufnahme abgebildeten Flächenstücks die Entfernungs-, Doppler- und Ellipsoid-Gleichungen zu erfüllen. Die Entfernungsgleichung begrenzt den Ort des Flächenstücks hierbei auf eine Kugel um den Satelliten als Mittelpunkt, wobei der Radius durch die Entfernungsordinate des entsprechenden Punktes gegeben ist. Die Dopplergleichung wiederum begrenzt die Koordinate des Flächenstücks auf ein Rotationshyperboloid. Der Schnitt dieser beiden Körper ist ein Kreis. Schließlich ist der Ort des Flächenstücks noch auf das Erdellipsoid begrenzt. Der Schnitt von Kreis und Erdellipsoid resultiert zumeist in zwei Schnittpunkten, wobei ein Schnittpunkt meist abseits der Szene liegt und verworfen werden kann.

Durch Rück-Transformation dieses Ellipsoidpunktes unter Nutzung der Dopplergleichung (siehe [13]) in die Slave-Aufnahme erhält man die Position dieses Punktes im Line-Pixel-System der Slave-Aufnahme. Die Differenz der Line-Pixel-Koordinaten in der Master- und der Slave-Aufnahme werden dann als Startwerte für eine genauere Koregistrierung verwendet. Die Genauigkeit dieses Verfahrens wird in [13] mit 30 Pixeln angegeben, wobei im Rahmen dieser Arbeit durchweg bessere Ergebnisse erzielt wurden, was durch Vergleich der in diesem und der im nächsten Schritt erzielten Ergebnisse deutlich wurde.

3.3.2 Grobe Koregistrierung basierend auf Amplitudenkorrelation

Basierend auf den im vorangegangenen Schritt berechneten Startwerten wird für eine vorgegebene Anzahl Fenster aus der Masteraufnahme (Slaveaufnahme) ein entsprechender Bereich im Slave (Master) durch Kreuzkorrelation der Amplitudenwerte gesucht. Diese kann sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich durchgeführt werden. Im Wesentlichen ist das Ziel dieses Schrittes nur die Verfeinerung der Offsetwerte des vorherigen Schrittes, so dass aus den Verschiebungen der einzelnen Korrelationsfenster ein Offset berechnet werden muss. Nach [13] wird hierbei der Modalwert aller Offsets verwendet.

⁷Bildkoordinaten, die mit Azimut- und Entfernungs-Position korrespondieren

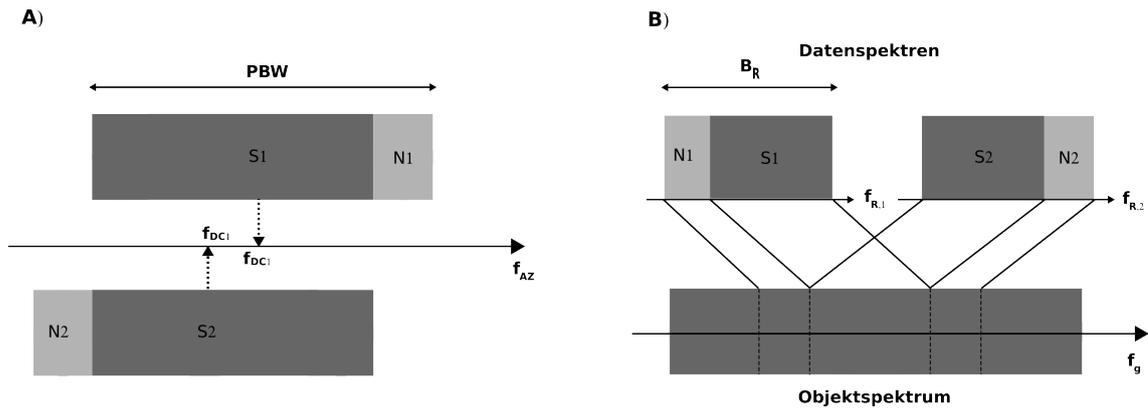


Abbildung 3.4: A) Die Spektren sind in Azimutrichtung um die Differenz zwischen den Dopplerverzerrungsfrequenzen verschoben. Durch die limitierte Verarbeitungsbandbreite ergeben sich nicht überlappende Signalanteile (N_1, N_2), die wie Rauschen wirken. B) Abbildung unterschiedlicher Teile des Objektspektrums in gleiche Frequenzbereiche zweier Aufnahmen. Abbildung nach [7].

3.3.3 Filterung in Azimut und Entfernung

Notwendigkeit der Filterung

Aufgrund unterschiedlicher geometrischer Verhältnisse bei der Aufnahme der SAR-Daten entstehen nicht überlappende Teile in den Daten-Frequenz-Spektren in Entfernungs- und Azimut-Richtung, wobei die Ursachen dieser nicht überlappenden Anteile in beiden Richtungen unterschiedlich sind. Während nicht überlappende Frequenzanteile in der Azimut-Richtung durch verschiedene Squintwinkel (Schielwinkel) und damit durch unterschiedliche Dopplerverzerrungsfrequenzen hervorgerufen werden, liegt der Grund für jene nicht überlappenden Frequenzanteile in der Entfernungsrichtung bei der blickwinkelabhängigen Abbildung des Objektspektrums in das Datenspektrum [7, 6]. Abbildung 3.4 zeigt den erläuterten Sachverhalt schematisch. Hierbei ist in Teil A) zu sehen, dass die Spektren in Azimutrichtung gegeneinander verschoben sind. Da die Bandbreite des Systems auf die PBW (Processing Bandwidth) beschränkt ist, ergeben sich am rechten/linken Rand von Spektrum 1/2 Komponenten, die im jeweiligen anderen Spektrum nicht vorhanden sind und wie Rauschen wirken.

Die Abbildung des Objektspektrums in Entfernungsrichtung in das Datenspektrum ist im Wesentlichen von der Beobachtungsgeometrie abhängig. Allerdings wird ein bestimmter Teil des Objektspektrums (in Abhängigkeit von der Beobachtungsgeometrie) immer in ein durch die Eigenschaften des Sensors festgelegtes Frequenzband im Datenspektrum transformiert. Aus Abbildung 3.4, Teil B) wird ersichtlich, dass zwei Akquisitionen unterschiedliche Teile des Objektspektrums in denselben Frequenzbereich des Datenspektrums abbilden, wobei gleiche Frequenzen, die in beiden Akquisitionen enthalten sind, im Datenspektrum relativ zueinander verschoben sind. In [6] wird gezeigt, dass dieser Verschiebungsbetrag gerade die lokale Fringe-Frequenz ist, die der Ableitung der interferometrischen Phase nach der Entfernung proportional ist [7]. Wie schon erwähnt wirken die

nichtüberlappenden bzw. nichtkorrespondierenden Teile beider Spektren wie Rauschen. Nach [7] führt die ohne vorherige Filterung dieser Effekte durchgeführte Interferogrammgenerierung zu einer "Verschmierung" dieses Quasi-Rauschens über das komplette Interferogramm, was eine Filterung dieser Anteile nach der Interferogrammgenerierung schwierig bzw. unmöglich macht. Der Verschmierungseffekt kommt hierbei durch die Multiplikation der aufeinander registrierten SAR-Szenen zustande, die einer Faltung im Frequenzraum entspricht.

Durchführung der Filterung

Die Filterung der Azimutspektren kann auf Basis der bekannten Azimut-Leistungsdichten von Master- und Slave-Akquisition durchgeführt werden. In [6] wird ein Filteransatz vorgestellt, dessen Ergebnisspektrum das geometrische Mittel der Eingangsspektren ist.

Die Filterung der Entfernungsspektren basiert im Wesentlichen auf der Messung der Fringe-Frequenz, die die relative Frequenzverschiebung gleicher Objektfrequenzen im Datenspektrum misst. Folglich kann, wie aus Abbildung 3.4, Teil B) ersichtlich ist, ein Bandpassfilter unter Kenntnis der Fringe-Frequenz erstellt werden, der die nicht überlappenden Teile des Datenspektrums in der Entfernungsrichtung eliminiert. Die Schätzung der Fringe-Frequenz kann unter Nutzung eines vorübergehend berechneten Interferogramms geschehen, wobei die Fringe-Frequenz durch eine Fourier-Peak-Analyse [6, 7] oder unter Nutzung präziser Orbits und Annahme einer konstanten Geländeneigung [13] bestimmt werden kann. Letztere Methode würde an dieser Stelle ihre Anwendung finden, wohingegen erstere Methode erst nach der Feinregistrierung und dem Resampling erfolgen kann [13] (Filterung des Entfernungs-Spektrums).

Im Programmpaket StaMPS wird auf eine Filterung der Azimut- und der Entfernungsspektren verzichtet, da dieses die Auflösung verringert und somit auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Streuer eine Auflösungszelle dominiert und als konstanter Streukörper identifiziert wird [9]. Zudem unterliegen ideale dominante Streukörper nicht der beschriebenen Aspektabhängigkeit im Gegensatz zu Pixeln, deren Signal als Summe der Beiträge vieler Streukörper entsteht.

3.3.4 Feinregistrierung

Der durch die grobe Amplitudenkorrelation berechnete Offset muss verfeinert werden, um ein brauchbares Interferogramm erzeugen zu können. Nach [7] führt ein Registrierungsfehler von einem Pixel zu einer kompletten Dekorrelation der Phasenbeziehung. Ein Versatz unterhalb von $1/8$ eines Pixels hingegen führt zu einem vernachlässigbar kleinen Kohärenzverlust (4%), so dass diese Genauigkeit ausreicht. Wie die Grobkorrelation wird auch die Feinkorrelation auf Basis der Signalamplituden durchgeführt. Zwar sind Korrelationsverfahren, die die gesamte komplexe Messgröße nutzen, genauer, aber im Allgemeinen auch weniger robust [7].

Die Korrelation wird wieder auf Basis einer bestimmten Anzahl vorgegebener Fenster durchgeführt, die aus der Master-Szene entnommen und mit der Slave-Szene abgeglichen

werden. Das Ergebnis ist eine Verschiebung in Line- und Pixel-Richtung pro Fenster. Die Menge aller Fenster definiert damit ein Feld von Verschiebungsvektoren. Um die erforderliche Registrierungsgenauigkeit zu erreichen, ist im Allgemeinen eine Überabtastung notwendig [13].

Schließlich werden zwei Flächenpolynome aus den bestimmten Verschiebungsvektoren geschätzt, die die Verschiebung in Line- bzw. Pixelrichtung als Funktion der Master-Bildkoordinaten liefern. Das Polynom kann hierbei einen Grad von Fünf aufweisen, was aber in den meisten Fällen nicht notwendig ist, da aufgrund der geringen geometrischen Verzerrungen der Satellitenaufnahmen eine affine Transformation (Grad 1) ausreicht [7].

Da das Programmsystem StaMPS auf einem Bildstapel arbeitet, wobei zeitliche und räumliche Basis deutlich größer werden können als bei herkömmlichen 2-Pass- oder 3-Pass-Verfahren, werden auch Slave-Bilder⁸ aus dem Stapel aufeinander referenziert. Das entsprechende Polynom, das für das spätere Resampling benötigt wird, wird dann durch Schätzung nach kleinsten Quadraten gewonnen.

Weil die aus der Amplituden-Korrelation erhaltenen Verschiebungen grobe Fehler enthalten können, muss eine Ausreißersuche durchgeführt werden. Das in StaMPS genutzte Interferogrammpaket DORIS bietet hierfür ein Datasnooping nach Baarda an [13]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses durch einen RANSAC-Algorithmus ersetzt, der deutlich bessere Ergebnisse im Hinblick auf die Identifizierung von Ausreißern liefert (z.B. werden nicht zu viele gute Datenpunkte entfernt, weil ein grober Fehler auch alle anderen Datenpunkte beeinflusst). Die Koregistrierung wird im Detail noch in Abschnitt 5.1.2 erläutert.

3.3.5 Resampling

Um ein Interferogramm aus beiden SAR-Szenen zu gewinnen, muss die Slaveakquisition in das Koordinatensystem der Masterakquisition transformiert werden. Dieses kann nach [7] durch Rekonstruktion des kontinuierlichen Signals aus dem abgetasteten Signal mittels Interpolation und anschließender Neuabtastung auf Punkten des Masterrasters geschehen. Die entsprechenden neuen Stellen für die Abtastung können aus dem im vorherigen Schritt gewonnenen Polynom berechnet werden. DORIS bietet hierbei mehrere Interpolationskerne an. Der Standard-Kern des StaMPS-Pakets ist der Raised-Cosine-Kern bestehend aus zwölf Punkten, wobei die Interpolation getrennt in Azimut und Entfernungsrichtung durchgeführt wird (d.h. es werden eindimensionale Interpolationskerne benutzt) [13]. Eine ausführliche Erläuterung der Parameter liefert [13]; [7] diskutiert die in diesem Schritt eingeführten Fehler.

3.3.6 Interferogrammerzeugung

Das Interferogramm wird aus zwei komplexen, überabgetasteten und aufeinander referenzierten SAR-Szenen gewonnen, indem pixelweise das Produkt der einen SAR-Szene mit dem komplex konjugierten der anderen SAR-Szene gebildet wird. Wie schon erwähnt kann

⁸Der Stapel hat genau eine Masterakquisition auf den alle anderen Szenen referenziert sein müssen

sich hierbei die Bandbreite des Signals verdoppeln, was dazu führt, dass das Abtasttheorem verletzt wird und somit Aliasingeffekte auftreten [6, 7]. Dieses wird im Allgemeinen durch eine Überabtastung der beiden SAR-Szenen um mindestens Faktor Zwei verhindert, was aber zumeist im Rahmen der Feinregistrierung geschieht.

In [7] wird außerdem die Möglichkeit von Multilooking genannt, womit eine Tiefpassfilterung gemeint ist, die als Faltung mit einer Rechteckfunktion realisiert ist. StaMPS verzichtet aus Gründen der Auflösung (siehe Filterung des Azimut-(Entfernungs)-Spektrums) auf diesen Schritt.

3.3.7 Eliminierung des geometrischen und topographischen Phasenanteils

Dieser Schritt kann prinzipiell in zwei getrennte Schritte aufgeteilt werden. Zunächst muss die Phasenkomponente der Bezugsfläche⁹ und dann die topographische Phasenkomponente abgezogen werden. Nach Gleichung (3.2.1) enthält das Interferogramm dann nur noch Informationen über die Deformation zwischen den Akquisitionen. Die Subtraktion beider Phasenanteile wird durch Multiplikation des komplexen Interferogramms mit den komplex Konjugierten der Phasenanteile berechnet [7].

Die geometrische Phasenkomponente kann nach [12] unter Nutzung der Satellitenorbits und eventuell vorhandener Passpunktinformationen unter Annahme einer Referenzfläche eliminiert werden. Im Falle des DORIS-Pakets wird das WGS84-Ellipsoid als Referenzfläche genutzt. Die geometriebedingte Phasenkomponente wird für eine bestimmte Anzahl von Stellen im Interferogramm berechnet und mittels eines Polynomansatzes auf alle anderen Stellen im Interferogramm übertragen, wobei ein Polynom vom Grad Fünf im Allgemeinen ausreicht [13]. Nach [7] und [13] kann die Referenzphase eines Interferogrammpunktes durch Kenntnis der beiden Satellitenorte während der Aufnahme und dem Zielpunkt auf der Referenzfläche berechnet werden. Der Ort des Master-Satelliten ist mit Kenntnis des Aufnahmezeitpunktes und genauer Orbits bekannt. Der Zielpunkt auf der Referenzfläche kann nach [22, 7, 13] iterativ berechnet werden. Der Orbitpunkt des Slave-Satelliten kann anschließend nach [13] unter Nutzung der Doppler-Gleichung bestimmt werden. Dieses Verfahren ist dem in Punkt “Grobe Koregistrierung mittels Orbit-Daten” vorgestellten Verfahren recht ähnlich. Die Referenzphase ist hiernach einfach unter Nutzung der bekannten Punktkoordinaten zu errechnen (siehe Gleichung (3.2.1) bzw. [13]).

Der topographische Phasenanteil wird mit einem digitalen Geländemodell berechnet, das in die Mastergeometrie transformiert wird. Nach [13] wird das digitale Geländemodell zunächst überabgetastet und bilinear interpoliert, so dass es ungefähr die Auflösung des Interferogramms aufweist. Dann wird das Geländemodell ins Radarkoordinatensystem transformiert, wobei die ursprünglichen Stellen des Geländemodells im Allgemeinen nicht mit den Stellen des Interferogramms zusammenfallen. Deshalb wird das radarkodierte Geländemodell noch auf das Raster des Interferogramms interpoliert, was durch eine Nearest Neighbour bzw. eine Trilineare Interpolation erfolgt [13]. Da die Aufnahmegeometrie

⁹Oft auch als geometrische Phasenkomponente bezeichnet

bekannt bzw. berechenbar ist, kann die topographische Phase nach Gleichung (3.2.1) bestimmt werden.

3.3.8 Adaptive Phasenfilterung und Phase-Unwrapping

Nachdem die geometrie- und topographiebedingten Phasenanteile entfernt worden sind, ist es vorteilhaft die Qualität des differentiellen Interferogramms durch geeignete Filtermethoden zu verbessern. So wird in [26] eine deutliche Verringerung der Anzahl an Phaseninkonsistenzen mittels einer solchen Filterung erreicht. Allerdings versagen herkömmliche richtungsisotrope Filter nach [7], wenn die Fringe-Frequenz zu groß wird. Abhilfe schaffen hierbei richtungsanisotrope Filter, die vor allem eine oft vorhandene dominante Richtung der Fringe-Frequenz ausnutzen. Alternativ kann ein in [14] beschriebenes Filter verwendet werden. Dieses basiert auf der Schätzung der lokal dominanten Frequenzen durch Multiplikation des Leistungsspektrums eines lokalen Interferogrammausschnittes mit einer Übertragungsfunktion, die sich als Amplitude¹⁰ einer geglätteten Version des Leistungsspektrums hoch einem Wert zwischen Null und Eins ergibt. Der Exponent bestimmt im Wesentlichen die Stärke der Filterung. Ist er nahe Null, so findet keine Filterung statt. Ist er nahe Eins, ist die Filterung sehr stark. In [26] wird vorgeschlagen, den Exponenten aus der Dichte der Residuen zu berechnen, um sowohl eine ausreichende Filterung in Bereichen geringer Interferogrammqualität (starkes Dekorrelationsrauschen) zu gewährleisten als auch in Bildbereichen hoher Interferogrammqualität (niedriges Dekorrelationsrauschen) eine zu starke Filterung zu vermeiden. Die Filterung wird, wie schon erwähnt, für Ausschnitte des Interferogramms durchgeführt (typische Fenstergrößen sind 32x32 oder 64x64 Pixel), die sich überlappen, um Konsistenz zu gewährleisten. Das so beschriebene Filter mit einem festen Exponenten wird im Rahmen des StaMPS-Algorithmus eingesetzt, um das Interferogramm¹¹ vor der Phasenfortsetzung zu optimieren.

Das um die geometrie- und topographiebedingten Phasenanteile bereinigte und gefilterte komplexe Interferogramm enthält die Information über die Deformation in der Phase der komplexen Messgröße. Diese ist allerdings nur im Intervall $[-\pi; \pi)$ aus der komplexen Messgröße zu berechnen und damit mehrdeutig. Hierbei unterscheidet sich die bekannte aufgewickelte Phase um eine ganzzahlige Anzahl von Zyklen von der unbekanntem wahren bzw. fortgesetzten Phase. Nach [7] und [19] ist der Zusammenhang zwischen aufgewickelter und fortgesetzter Phase gegeben durch:

$$\phi^w = W\{\phi\} = \text{mod}\{\phi + \pi, 2\pi\} - \pi \quad (3.3.1)$$

Hierbei stellt ϕ^w die eingewickelte Phase und ϕ die fortgesetzte Phase dar. W wird als Wrapping-Operator bezeichnet. Bei der in Gleichung (3.3.1) ausgedrückten Operation geht das Wissen um die absoluten Phasenwerte verloren. Folglich ist eine Rückgewinnung der absoluten Phasenwerte nur mit Annahmen über den Phasenverlauf möglich [19, 7]. Da man im Allgemeinen von einer ausreichenden Abtastrate und einem glatten fortgesetzten Phasenverlauf ausgeht, arbeiten die meisten Verfahren auf Basis des Phasengradienten,

¹⁰Es handelt sich um komplexe Größen

¹¹Es handelt sich hier genauer gesagt um die auf ein Grid transformierten Phasenwerte der gefundenen konstanten Streukörper

wobei angenommen wird, dass die Phasendifferenz zwischen zwei benachbarten Punkten nicht größer als π ist, was in [7] als *smoothness criterion* bezeichnet wird. Aus dieser Annahme leitet sich eine Schätzung des Phasengradienten ab, der in [19] als *wrapped-differences-of-wrapped-phases* bezeichnet wird. Hierbei wird der Phasengradient mit folgender Formel geschätzt:

$$\hat{\nabla}\phi_{i,j}^w = \begin{bmatrix} W\{\phi_{i+1,j}^w - \phi_{i,j}^w\} \\ W\{\phi_{i,j+1}^w - \phi_{i,j}^w\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W\{\Delta_i\phi_{i+1,j}^w\} \\ W\{\Delta_j\phi_{i,j+1}^w\} \end{bmatrix} \quad (3.3.2)$$

Die Anforderung an den Phasengradienten, keine Komponenten außerhalb des Intervalls $[-\pi; \pi)$ zu enthalten, ist dabei eine Annahme und hat keinen physikalischen Hintergrund [24]. In [19] wird gezeigt, dass der Fehler, der bei der Schätzung des Phasengradienten mittels Gleichung (3.3.2) entsteht, im statistischen Mittel nicht Null ist, sondern sowohl von der Kohärenz als auch vom wahren Wert des Gradienten abhängt, was in diesem Zusammenhang als *slope-bias* bezeichnet wird. Insbesondere bewirken starke Phasengradienten im wahren fortgesetzten Phasenfeld einen systematische Fehler bei der Schätzung des Gradienten nach Gleichung (3.3.2). Es ist also im Allgemeinen nicht davon auszugehen, dass einfache Berechnung der Gradienten nach Gleichung (3.3.2) und Integration von einem beliebigen Startpunkt¹², ein richtiges Ergebnis liefert. Vielmehr führt ein solches Vorgehen in den meisten Fällen zu globalen Fehlern [7], da die Integration im geschätzten Phasenfeld wegabhängig ist. Diese Wegabhängigkeit der Integration liegt in der Rotation des geschätzten Gradientenfeldes begründet. Diese wird hierbei nach [19] als Residuenfeld bezeichnet und kann auf einem regelmäßigen Gitter nach folgender Formel bestimmt werden:

$$r_{i,j} = W\{\Delta_i\phi_{i,j}^w\} + W\{\Delta_j\phi_{i+1,j}^w\} - W\{\Delta_i\phi_{i,j+1}^w\} - W\{\Delta_j\phi_{i,j}^w\} \quad (3.3.3)$$

Die Residuen $r_{i,k}$ können nur drei Werte annehmen: 0, 2π und -2π . Nach [19] markieren die Residuen Endpunkte von sogenannten *Branch-Cuts*. Jedes Ringintegral, das einen *Branch-Cut* kreuzt, ergibt nicht Null, was der Forderung nach einem wegunabhängigen Integrationspfad, der in einem rotations- bzw. residuenfreien Feld garantiert wäre, widerspricht. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Zur Lösung dieser Problematik sind zahlreiche Ansätze entwickelt worden. Im Rahmen dieser Arbeit sind hierbei sowohl Verfahren von Interesse, die in zwei Dimensionen arbeiten als auch komplexere Ansätze die eine dritte Dimension (hier die Zeitdimension) berücksichtigen.

Die zweidimensionalen Ansätze kann man nach [24] in globale und lokale Verfahren unterteilen. Während lokale Verfahren nach Möglichkeiten suchen die Menge aller möglichen Pfade derart zu begrenzen, dass die Integration wegunabhängig wird [19, 23], minimieren globale Verfahren die Differenz zwischen dem Phasengradienten aus aufgewickelten und dem korrespondierenden Phasengradienten aus fortgesetzten Phasen bezüglich einer angenommenen Fehlernorm [4]. Diese Fehlernorm ist im allgemeinsten Fall gegeben durch:

$$\Omega = \sum_{i,j} \omega_{i,j}^i |W\{\Delta_i\phi_{i,j}^w\} - \Delta_i\phi_{i,j}|^p + \sum_{i,j} \omega_{i,j}^j |W\{\Delta_j\phi_{i,j}^w\} - \Delta_j\phi_{i,j}|^p \quad (3.3.4)$$

Hierbei sind $W\{\Delta_{i/j}\phi_{i,j}^w\}$ und $\Delta_{i/j}\phi_{i,j}$ die Komponenten des Gradienten der aufgewickelten bzw. der fortgesetzten Phase, $\omega_{i,j}^{i/j}$ sind entsprechende Gewichte und p bestimmt die zu

¹²Dessen Phase zu Null gesetzt wird

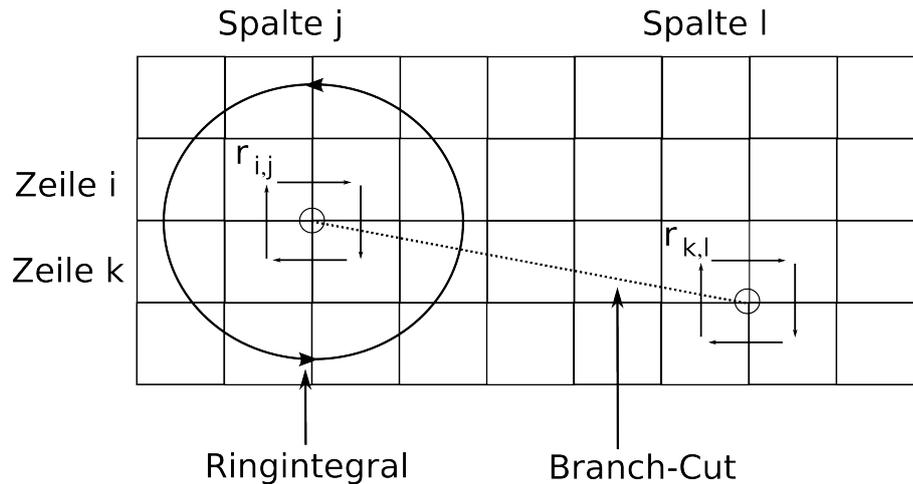


Abbildung 3.5: An den Position (i,k) und (l,l) treten Residuen ungleicher Polarität auf, die durch einen Branch-Cut verbunden werden. Das Ergebnis eines Ringintegrals, dessen Integrationspfad diesen Branch-Cut kreuzt (wie eingezeichnet), ist ungleich Null

minimierende Norm. Die Lösung von Gleichung (3.3.4) ist dann gegeben durch das Gradientenfeld mit den Komponenten $\Delta_{i/j}\phi_{i,j}$ für das Ω zum Minimum wird. Dieses bestimmt das gesuchte Phasenfeld dann bis auf einen Offset. Gleichung (3.3.4) wird weiterhin als Kostenfunktion bezeichnet.

Die Unterscheidung zwischen lokalen und globalen Verfahren bezieht sich eher auf die Implementierung als auf das Ergebnis, denn nach [4, 24, 23] können lokale Verfahren bzw. das erzielte Ergebnis mit Blick auf eine zu minimierende globale Fehlernorm beschrieben werden. So kann der in [7, 19] und [23] beschriebene und von Goldstein entwickelte *Residue-Cut*-Algorithmus auf eine Schätzung der Phasengradienten nach L^0 -Norm zurückgeführt werden. Nach [7] wird beim *Residue-Cut*-Algorithmus versucht alle Residuen so durch Kanten zu verbinden, dass erstens die Summe aller $r_{i,j}$ einer Zusammenhangskomponente Null ergibt und die Gesamtlänge der eingefügten Kanten minimal wird. Die Kanten werden in diesem Zusammenhang auch als *Branch-Cuts* bezeichnet und dürfen von keinem Integrationpfad gekreuzt werden. Folglich ist die Anzahl aller Phasengradienten (bzw. deren Komponenten), die im fortgesetzten und im aufgewickelten Phasenfeld unterschiedlich sind, gleich der gesamten Länge aller *Branch-Cuts* [4]. Minimiert ein Algorithmus also die Länge der *Branch-Cuts* ist die resultierende Lösung gleich der Minimum L^0 -Norm-Lösung (siehe [24]). Praktisch gelingt es allerdings nicht die Kombination von *Branch-Cuts* zu finden, die in der Summe eine minimal mögliche Länge aufweist, so dass der *Residue-Cut*-Algorithmus die L^0 -Lösung nur approximiert. Auf der anderen Seite können Lösungen bezüglich einer globalen Fehlermetrik auf ein lokal arbeitendes Verfahren zurückgeführt werden, wobei man diese nach [24] als Minimum-Cost-Flow-Algorithmen formuliert. Hierbei modelliert man jedes 2×2 -Integral des zweidimensionalen Gitters als Knoten in einem Netzwerk, der je nach berechnetem Residuum als Supply-, Transport- oder Demandknoten bezeichnet wird. Diese Knoten sind über gerichtete Kanten verbunden, die einen Fluss tragen, der einen Unterschied zwischen aufgewickelter und fortgesetzter Phasengradienten-

ten widerspiegelt. Eine passend zu wählende Funktion bildet den Fluss einer Kante auf Kosten ab, wobei unter anderem Kostenfunktionen nach Gleichung (3.3.4) gewählt werden können. Diese Kosten sind zur Lösung des Problems über das gesamte Netzwerk unter der Nebenbedingung der Flussserhaltung (Fluss aus dem Knoten heraus abzüglich Fluss in den Knoten herein muss dem Wert des Residuums entsprechen, was der Forderung nach Residuenfreiheit des fortgesetzten Ergebnisfeldes entspricht [24]) zu minimieren. Offensichtlich handelt es sich hierbei nur um eine Umformulierung der globalen Optimierungsaufgabe aus Gleichung (3.3.4) in Begriffen der Graphentheorie, die sehr effektive Lösungsmöglichkeiten bereithält [23]. Ein anderer Ansatz zur Lösung beliebiger L^p -Norm-Schätzungen wird in [4] vorgestellt. Dabei wird die zu bestimmende Schätzung der fortgesetzten Phasengradienten bezüglich einer bestimmten L^p -Norm auf eine Schätzung nach gewichteter L^2 -Norm zurückgeführt, die iterativ durchgeführt wird, was den Vorteil hat, dass effektive Algorithmen zur Berechnung der gewichteten L^2 -Norm zur Verfügung stehen.

Der Wahl der zu minimierenden Fehlernorm kommt beim Phase-Unwrapping eine zentrale Rolle zu. So würde eine Schätzung nach L^2 -Norm in den meisten Fällen zu globalen Fehlern führen [19], während Lösungen nach L^1 - und L^0 -Norm im Allgemeinen bessere Resultate liefern. Wenn keine Mehrfachzyklen (Phasendiskontinuität größer als ein Phasenzklus) auftreten [24], was in Interferogrammen ohne Topographieanteil vorkommen kann, sind L^0 - und L^1 -Norm-Lösung identisch. Liegen aber Mehrfachzyklen vor, unterscheiden sich L^1 - und L^0 -Norm-Lösung. Die L^1 -Lösung wird eher Einfachzyklen enthalten, da Mehrfachzyklen höhere Kosten verursachen, während die L^0 -Lösung Einfachzyklen nicht bevorzugt, da Einfach- und Mehrfachzyklen dieselben Kosten verursachen. Je größer der Exponent p , desto eher werden Einfach- vor Mehrfachzyklen bevorzugt. Schätzt man das fortgesetzte Phasenfeld schließlich nach L^∞ -Norm werden Einfachzyklen immer vor Mehrfachzyklen bevorzugt [9]. Zwar existiert kein Grund, dass die Lösung nach L^0 -Norm immer korrekt ist, allerdings liefern L^0 -Lösungen in der Praxis die besten Ergebnisse¹³ [24]. Daher ist man an einer L^0 -Lösung interessiert, die allerdings nach [24] nicht exakt in polynomialer Laufzeit berechnet werden kann, so dass man an guten Approximationen interessiert ist oder eine Lösung bezüglich einer L^1 -Norm berechnet, die, wie schon erwähnt, in bestimmten Fällen der L^0 -Norm-Lösung gleicht, aber exakt und schnell berechnet werden kann. Das Konzept der L^p -Norm-Schätzung kann nach [23] weiter verallgemeinert werden. Dabei wird die Schätzung, die sich aus einer Minimierung der Kostenfunktion nach Gleichung (3.3.4) ergibt, durch eine Maximum-Aposteriori-Schätzung (MAP) (siehe [20] für eine Definition der MAP-Schätzung im Kontext der Bayes'schen Statistik) ersetzt. Um eine MAP-Schätzung durchzuführen, muss die durch die Beobachtungen bedingte Verteilung der Parameter bestimmt werden, die im Kontext der Bayes'schen Statistik als Posteriori-Dichte bezeichnet wird. In diesem Fall sind die Parameter die fortgesetzten Phasengradienten und die Beobachtungen sind die aufgewickelten Phasengradienten. Aus der bekannten Posteriori-Dichte kann dann eine entsprechende Kostenfunktion abgeleitet werden. Die Posteriori-Dichte wird hierbei unter Beachtung der Anwendung (InSAR, dInSAR), der lokalen Bildintensität und der Kohärenz lokal bestimmt und kann über das Interferogramm variieren [23]. Im Rahmen des StaMPS-Algorithmus wird das externe Programm *snaphu* genutzt, das das Konzept der Kostenfunktionen durch Maximierung

¹³Sofern sie durch einen existierenden Algorithmus hinreichend gut approximiert werden

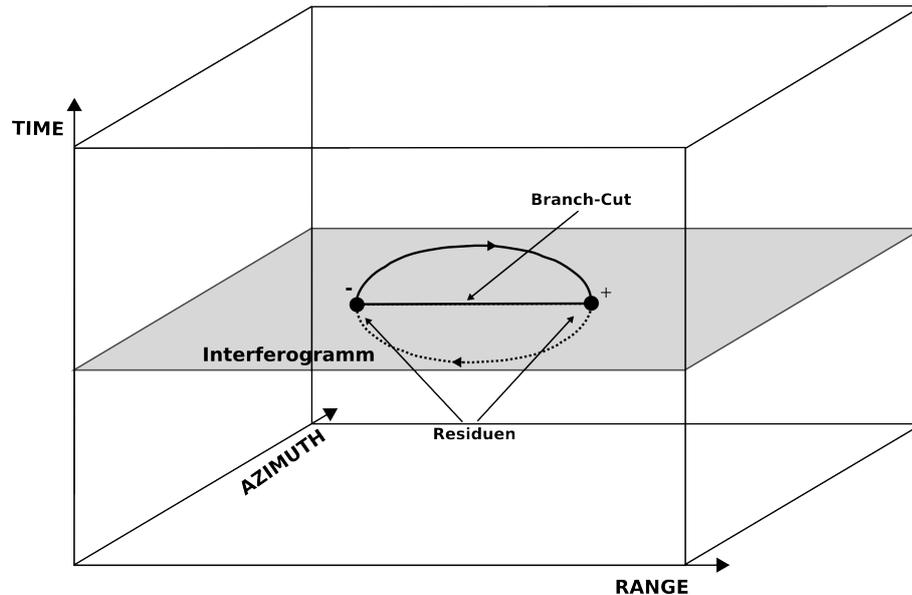


Abbildung 3.6: Eine geschlossene Residuenkurve schneidet das Interferogramm an zwei Stellen und erzeugt durch die Durchlaufrichtung der Kurve und die Orientierung der Ebene Residuen unterschiedlicher Polarität, die beim *Residue-Cut*-Algorithmus durch einen *Branch-Cut* verbunden werden müssen

der posteriori-Dichte implementiert, und mit MCF-Algorithmen ein global optimales Ergebnis bezüglich dieser Fehlernorm sucht.

Bei Stapelverarbeitung mehrerer Interferogramme kann das Phasenfortsetzungsproblem auch dreidimensional betrachtet werden. Ansätze hierzu werden in [9] und [15] vorgestellt. Zunächst muss der Begriff des Residuenfeldes von zwei auf drei Dimensionen verallgemeinert werden. Der Einfachheit halber wird hier eine gleichabständige Aufteilung des Volumens in Voxel angenommen. Eine Verallgemeinerung auf unregelmäßig verteilte Punkte ist leicht durch Triangulation (Punkte sind nur in der räumlichen Dimension unregelmäßig verteilt) bzw. Tetrahedralisation (Punkte sind in Raum und Zeit unregelmäßig verteilt) möglich [9]. Residuen in diesem dreidimensionalen Raster werden einfach für jede Grenzfläche eines Voxels berechnet, wobei Gleichung (3.3.3) analog anzuwenden ist. Die Grundlage beider Algorithmen bildet nun die Tatsache, dass Residuen in drei Dimensionen geschlossene Kurven bilden (siehe [15] für eine Begründung). Die in zwei Dimensionen sichtbaren Residuen sind nur die Schnitte der dreidimensionalen Residuenkurven mit Ebenen gebildet durch die jeweiligen Interferogramme, wobei die Polarität der Residuen durch die Durchlaufrichtung der Kurve und die Orientierung der Ebene gegeben ist (Ableitungsvektor der Residuenkurve in Richtung des Ebenennormalenvektors bzw. in Gegenrichtung orientiert), Abbildung 3.6 zeigt die beschriebene Situation. Die Kurve schneidet die dargestellte Interferogrammebene an zwei Stellen (ein Sonderfall wäre nur ein Schnittpunkt, während der andere Schnittpunkt außerhalb des betrachteten Bereichs liegt), was zur Bildung eines Residuendipols führt. In zwei Dimensionen könnte dieser Residuendipol durch Platzierung eines *branch-cuts* behandelt werden, der ja wie schon beschrieben als

Hinderniss während der Integration wirkt. Dieser wird durch die gerade Verbindungslinie zwischen den Residuen realisiert. In drei Dimensionen wäre die dargestellte Kurve der Rand einer Oberfläche, die analog zu den *branch-cuts* in zwei Dimensionen ein Hinderniss für Integrationspfade darstellen. Folglich markiert diese Oberfläche Orte möglicher Diskontinuitäten. Eine Möglichkeit eine Menge Oberflächen aus einem Satz bekannter Residuenkurven zu bestimmen, wäre für jede Residuenkurve eine Minimalfläche zu bestimmen [9]. Allerdings würde ein nach diesem Prinzip arbeitender Algorithmus Lösungen nach L^∞ -Norm liefern, da mit diesen Minimalflächen nur Diskontinuitätsoberflächen modelliert werden können, die durch Einfachzyklen entstehen (Genau genommen kann der Fall einer geschlossenen Oberfläche ohne Rand in einer L^∞ -Norm-Lösung vorkommen, was auch nicht mit Minimalflächen modelliert werden kann. Daher wird diese Lösung nach [9] als quasi- L^∞ -Norm-Lösung bezeichnet). Diskontinuitätsoberflächen, die typischerweise im Falle von Mehrfachzyklen auftreten, weisen oft mehrere Ränder und sind daher deutlich komplizierter zu handhaben. Die in [15] und [9] vorgestellten Algorithmen liefern beide L^∞ -Norm-Lösungen und sind somit nur ohne Bedenken einsetzbar, wenn keine Mehrfachzyklen auftreten.

3.3.9 Geokodierung

Die Geokodierung wird nach [13] und analog zum beschriebenen Vorgehen in der Koregistrierung nach Orbitdaten durchgeführt. Hierbei müssen die Geokoordinaten derart bestimmt werden, dass das System der Entfernungs-, Doppler- und Ellipsoidgleichung erfüllt sind. Eine Bestimmung dieser kartesischen Koordinaten gelingt dann iterativ durch Linearisierung der drei genannten Gleichungen [13, 22]. Zur Bestimmung der ellipsoidischen Koordinaten kann anschließend die Methode von Bowring [13] verwendet werden.

3.4 Dekorrelation

Die differentielle interferometrische Phase enthält nach Gleichung (3.2.1) und unter Annahme einer absolut fehlerfreien Elimination von geometrie- und topographiebedingter Phase nur noch einen Phasenanteil, der proportional zur Deformation ist. Praktisch ist diese Annahme nicht haltbar, da Atmosphäreneinflüsse, Fehler in der Orbitbestimmung, Fehler im Geländemodell und Phasenrauschen die Deformationsphase überlagern. Alle genannten Größen werden in dieser Anwendung als Störgrößen angesehen, jedoch ist die Definition von Dekorrelation relativ beliebig. Im Rahmen dieser Erläuterung wird deshalb die Definition der Dekorrelation nach [7] aufgegriffen. Nach dieser Definition ist Dekorrelation die Überlagerung aller Störgrößen mit einer Korrelationslänge, die kleiner ist als ein gewöhnliches Fenster zur Kohärenzschätzung. Hierzu zählen:

- Geometrische Dekorrelation
- Doppler Zentroid Dekorrelation
- Rauschen im Sende und Empfangssystem

- Zeitliche Dekorrelation
- Fehler während der Prozessierung

Um das lokale Rauschniveau eines Interferogramms abzuschätzen, wird häufig nicht die Varianz des Rauschens sondern die komplexe Korrelation der beiden Eingabe-SAR-Bilder verwendet. Die Kohärenz ist funktional aus der Varianz der Phase ableitbar und umgekehrt und ist mathematisch definiert als:

$$\gamma = \frac{E[y_1 y_2^*]}{\sqrt{E[|y_1|^2] E[|y_2|^2]}} \quad (3.4.1)$$

Hierbei bezeichnet $E[\cdot]$ den Erwartungswertoperator, y_1 und y_2 zwei korrespondierende komplexe Messgrößen aus dem Master bzw. dem Slave-Bild, wobei $*$ die Konjugierte einer komplexen Größe kennzeichnet. Da eine Bestimmung der Erwartungswerte in Gleichung (3.4.1) aus praktischen Gründen nicht über ein Ensemble-Mittel möglich ist, kann die Kohärenz nur unter Annahme von Ergodizität aus der verfügbaren räumlichen Realisierung mit einem gleitenden Fenster geschätzt werden [7, 22].

$$|\hat{\gamma}| = \frac{\left| \sum_{n=1}^N y_1^{(n)} y_2^{*(n)} \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |y_1^{(n)}|^2 \sum_{n=1}^N |y_2^{(n)}|^2}} \quad (3.4.2)$$

Hierbei ist N die Anzahl der Pixel des gleitenden Fensters. Die gesamte Kohärenz kann nun nach [7] als Produkt einzelner Kohärenzbeiträge ausgedrückt werden, wobei jede Einflussgröße einen Term zu diesem Produkt beiträgt. Die einzelnen Beiträge sind hierbei als Wert der Kohärenz bei Fehlen aller anderen Ursachen aufzufassen, so dass gilt:

$$\gamma = \gamma_{geom} \cdot \gamma_{DC} \cdot \gamma_{vol} \cdot \gamma_{thermal} \cdot \gamma_{temporal} \cdot \gamma_{processing} \quad (3.4.3)$$

Hierbei wird die geometrische Dekorrelation mit γ_{geom} , die Doppler Zentroid Dekorrelation mit γ_{DC} , die Volumendekorrelation mit γ_{vol} , die Dekorrelation durch thermisches Rauschen im Sende- und Empfangssystem mit γ_{therm} , die zeitliche Dekorrelation mit $\gamma_{temporal}$ und die Dekorrelation verursacht durch Prozessierungsfehler mit $\gamma_{processing}$ bezeichnet. Im Folgenden werden aufgeführten Ursachen der Dekorrelation näher erläutert und in Hinblick auf ihren Einfluss auf die Gesamtkohärenz dargestellt.

3.4.1 Rauschen im Sende und Empfangssystem

Dieser Term spiegelt das Rauschen im Sende- und Empfangssystem wieder, das im Grunde durch die Bewegung von Ladungsträgern in der Sende bzw. der Empfangselektronik ausgelöst wird [22], wobei diese Bewegung immer festzustellen ist, wenn die Temperatur über dem absoluten Minimum liegt. Im Wesentlichen kann dieser Dekorrelationseinfluss über das Signal-Rausch-Verhältniss des Radarsystems bestimmt werden. Die Signalleistung kann dabei über die Radargleichung abgeschätzt werden, während das Rauschen als weißes Rauschen modelliert wird und im Wesentlichen durch die Systembandbreite und die effektive Systemtemperatur charakterisiert wird. Die Signalleistung, die sich

durch die Radargleichung abschätzen lässt, ist außer von Systemparametern (wie z.B. der Sendeleistung) auch von der Szene abhängig (siehe [7]). Das Signal-Rausch-Verhältniss lässt sich wiederum an den Wert $\gamma_{thermal}$ koppeln. Einen Ausdruck für das Signal-Rausch-Verhältniss eines Radarsystems unter Beachtung ausschließlich thermischen Rauschens für einen Impuls ist in [22] beschrieben als:

$$SNR_{IMP} = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot A_{eff} \sigma \cdot \tau}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_{system} \cdot r^4 L_v} \quad (3.4.4)$$

Hierbei stellen P_t die gesendete Signalleistung, A_{eff} die effektive Antennenfläche, σ den Radarrückstreuoeffizienten, τ die Pulsdauer, k die Boltzmann-Konstante, r die Zielentfernung und L_v einen Verlustfaktor dar, der z.B. zur Modellierung der Atmosphärendämpfung genutzt werden kann. Der Zusammenhang mit der Kohärenz ist gegeben durch [7]:

$$\gamma_{therm} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (3.4.5)$$

Interessant ist vor allem der Zusammenhang zwischen Radarrückstreuoeffizient und Kohärenz, denn alle anderen Einflussgrößen in Gleichung (3.4.4) sind weitestgehend durch die Aufnahmeconfiguration vorgegeben. In [7] wird der Zusammenhang zwischen normalem Radarrückstreuoeffizienten (Radarrückstreuoeffizient dividiert durch die Querschnittsfläche des Streuers in Blickrichtung des Sensors) und dem in Gleichung (3.4.5) angegebenen Kohärenzwert unter Annahme von ERS-Systemparametern untersucht, wobei die Kohärenz für einen normalisierten Rückstreuoeffizienten von $\sigma^0 = -20$ [dB] ($\hat{=} 0,01$) einen Wert von $\gamma_{therm} = 0,84$ annimmt. Eine der wichtigen Erkenntnisse hierbei ist, dass der Grad der Dekorrelation von der Rückstreuung des Objektes abhängt. Eine höhere Rückstreuung hat also eine höhere Kohärenz zur Folge. Dieser Effekt ist oft bei gemeinsamer Betrachtung von Amplitudenbild und Kohärenzbild sichtbar, denn dunkle Bereiche entsprechen oft Bereichen niedriger Kohärenz.

3.4.2 Doppler Zentroid Dekorrelation

Wie schon in Abschnitt 3.3 erläutert wurde, führen unterschiedliche Schielwinkel während den SAR-Akquisitionen zu einer Abbildung des Azimut-Objektspektrums in unterschiedliche Bereiche des Datenspektrums. Unter der Annahme einer einheitlichen spektralen Gewichtung hängt dieser Einfluss linear von der Differenz der Dopplerzentroidfrequenzen ab. Ist diese Differenz größer als die Azimutbandbreite, nimmt der entsprechende Kohärenzterm γ_{DC} den Wert Null an, so dass folglich komplette Dekorrelation eintritt. Nach [7] kann γ_{DC} beschrieben werden als:

$$\gamma_{DC} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta f_{DC}}{PBW} & \text{für } |\Delta f_{DC}| \leq PBW, \\ 0 & \text{für } |\Delta f_{DC}| > PBW \end{cases} \quad (3.4.6)$$

Dieser Einfluss ist für raumgestützte Sensoren zumeist gering. Allerdings zeigen Interferogramme, die mit ERS2-Aufnahmen nach dem 07.02.2000 erstellt worden sind, starke Dekorrelation aufgrund der Dopplerbasislinie [7], da das Kreiselsystem des Satelliten defekt ist. Sind die Azimutspektren nicht komplett dekorreliert, kann durch eine entsprechende Filterung (wie im Abschnitt über die dInSAR-Prozessierung erläutert) eine Verbesserung der Interferogrammqualität erreicht werden.

3.4.3 Geometrische Dekorrelation

Die geometrische Dekorrelation wird, wie im Abschnitt über dInSAR-Prozessierung erläutert, durch die blickwinkelabhängige Abbildung des Objektspektrums in das Datenspektrum hervorgerufen. In rechten Teil von Abbildung 3.4 ist dieser Sachverhalt veranschaulicht. Während die Datenspektren beider SAR-Aufnahmen dasselbe Frequenzband abdecken, werden gleiche Frequenzen des Objektspektrums auf unterschiedliche Frequenzen im jeweiligen Datenspektrum abgebildet. Es tritt also eine relative Frequenzverschiebung zwischen beiden Bildern ein, die von der lokalen Geländeneigung, der effektiven Basislinie und dem Inzidenzwinkel abhängt [7, 6]. Hierbei wirken die nicht korrespondierenden Teile der Datenspektren wie Rauschen und führen folglich zu Dekorrelation. Interessant ist vor allem die Länge der maximalen Basislänge, die zu einer kompletten Dekorrelation der Datenspektren in Entfernungsrichtung führen würde. Diese maximale Länge der effektiven Basislinie bezeichnet man als kritische Basislinie. Sie ist in Abhängigkeit von der Verarbeitungsbandbreite B_R , der Wellenlänge des Radarsystems λ , dem Blickwinkel θ , der Geländeneigung β und der Lichtgeschwindigkeit c gegeben durch [12, 7]:

$$B_{\perp,krit} = \left| \frac{B_R \cdot \lambda \cdot r \cdot \tan(\theta - \beta)}{c} \right| \quad (3.4.7)$$

Unterhalb der kritischen Basislinie nimmt man für den entsprechenden Kohärenzterm, der die geometrische Dekorrelation beschreibt, einen linearen Zusammenhang mit der effektiven Basislinie an. Nach [7] gilt:

$$\gamma_{geom} = \begin{cases} \frac{B_{\perp,krit} - B_{\perp}}{B_{\perp,krit}}, & |B_{\perp}| \leq B_{\perp,krit} \\ 0, & |B_{\perp}| > B_{\perp,krit} \end{cases} \quad (3.4.8)$$

Trägt man die geometrische Dekorrelation bzw. den entsprechenden Kohärenzterm gegen die effektive Basislinie ab, erhält man eine Gerade mit negativer Steigung, die für eine Basislinie der Länge Null den Wert Eins annimmt. Da die einzige weitere Veränderliche in den Gleichungen (3.4.7) und (3.4.8) die Geländeneigung ist, ist eine Betrachtung verschiedener Geraden entsprechend unterschiedlichen Geländeneigungen interessant. Nach [7] steigt der Betrag der Geradensteigung mit abnehmender Geländeneigung und führt somit für kleinere Geländeneigungen zu stärkerer Dekorrelation. Zum Vergleich liegt die Länge der kritischen Basislinie bei einer Geländeneigung von $\beta = -15^\circ$ unter 500 Metern, während die Länge der kritischen Basislinie für eine Geländeneigung von $\beta = 0^\circ$ bei etwa 1100 Metern liegt.

3.4.4 Zeitliche Dekorrelation

Die Berechnung der interferometrischen Phase aus den komplexen Messwerten zweier koregistrierter Auflösungszellen wird in den Gleichungen (3.1.1) bis (3.1.3) beschrieben. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Phasenanteil der Streuung ψ_{streu} in beiden Aufnahmen (nahezu) gleich ist, so dass dieser bei Berechnung der interferometrischen Phase herausfällt. Die Streukomponenten sind jeweils eine Funktion der Streukörperverteilung und der Blickrichtung [7]. Eine Änderung der Streukörperverteilung zwischen beiden SAR-Aufnahmen würde also dazu führen, dass sich die Streukomponenten zu beiden Zeitpunkten unterscheiden. Das dadurch entstehenden Phasenrauschen beeinträchtigt die Kohärenz.

In [9] wird die interferometrische Phase einer Auflösungszelle ohne dominanten Streuer (d.h. alle Streuer in der Auflösungszelle haben gleichen Einfluss) für unterschiedliche Zeitpunkte simuliert, wobei die zeitliche Dekorrelation durch eine zufällige Bewegung der Streukörper in der Auflösungszelle derart modelliert wurde, dass komplette Dekorrelation eintritt. Das Ergebnis ist eine Variation der (aufgewickelten) Phase über das gesamte Intervall $[-\pi; \pi)$, so dass die interferometrische Phase praktisch zufällig ist. Es ist also von entscheidender Bedeutung, dass die Streuphasen der beiden korrespondierenden Auflösungszellen übereinstimmen, um eine vernünftige interferometrische Phase zu erzeugen. Eine quantitative Beschreibung der Dekorrelation ist bisher nicht erfolgreich gewesen, da ein Teil der Einflüsse und auftretenden Effekte nicht oder nur schwer vorhersagbar und diskreter Natur ist [7]. So kann der Einfluss eines neu gebauten Hauses oder der Einfluss besonderer Wetterverhältnisse auf die Kohärenz schwer abgeschätzt werden.

3.4.5 Fehler während der Prozessierung

Unter dem Oberbegriff der Prozessierungsfehler werden sowohl Interpolations- als auch Koregistrierungsfehler zusammengefasst. Interpolationen sind hierbei immer dann notwendig, wenn Werte einer Funktion, die auf Stützstellen eines Gitters bekannt sind, auf Stützstellen eines anderen Gitters übertragen werden sollen. Im Rahmen dieser Darstellung wird auf eine Erläuterung der Interpolationsfehler verzichtet, da ihr Einfluss durch eine passende Wahl des Interpolationskerns auf ein Minimum reduziert werden kann [7].

Koregistrierungsfehler treten immer dann auf, wenn die korrespondierenden Auflösungszellen, denen die Größen zur Bestimmung der interferometrischen Phase entnommen werden, nicht denselben Ausschnitt der Erdoberfläche zeigen. Ein Koregistrierungsfehler von einem Pixel hätte komplette Dekorrelation zur Folge, so dass der entsprechende Kohärenzterm $\gamma_{processing}$ Null werden würde. Der Einfluss eines Koregistrierungsfehlers (in einer Richtung) auf die Kohärenz kann nach [7] durch den nachfolgenden Ausdruck berechnet werden:

$$\gamma_{coreg,r/a} = \begin{cases} \frac{\sin(\pi\mu_{r/a})}{\pi\mu_{r/a}}, & 0 \leq \mu_{r/a} \leq 1 \\ 0, & \mu_{r/a} > 1 \end{cases} \quad (3.4.9)$$

Hierbei bezeichnet μ einen Koregistrierungsfehler in Entfernungs- oder Azimutrichtung (gekennzeichnet durch Index r/a) in Bruchteilen einer Auflösungszelle. Der Kohärenzterm bei vorliegenden Koregistrierungsfehlern in Entfernungs- und Azimutrichtung ist einfach das Produkt der beiden unabhängigen Kohärenzterme:

$$\gamma_{coreg,r/a} = \gamma_{coreg,r} \cdot \gamma_{coreg,a} \quad (3.4.10)$$

Eine Koregistrierungsgeauigkeit von einem Zehntel einer Auflösungszelle wird oft als ausreichend und erreichbar bezeichnet, was einer Kohärenz von $\gamma_{coreg,r/a} = 0,98$ entspricht. Nimmt man diesen Wert in beiden Richtungen an, ergibt sich eine Kohärenz von $\gamma_{coreg} = 0,96$.

Der gesamte Kohärenzterm, der die Prozessierungsfehler in Gleichung (3.4.3) repräsentiert, kann als das Produkt von γ_{coreg} und γ_{interp} dargestellt werden, wobei γ_{interp} der Kohärenzterm der Interpolation ist. Ein Vergleich verschiedener Interpolationskerne in [7]

erbrachte allerdings, dass γ_{interp} für bestimmte Interpolationskerne¹⁴ fast genau Eins wird und somit kaum einen Einfluss hat, so dass γ_{coreg} den Hauptanteil von $\gamma_{processing}$ ausmacht.

Die einzelnen Beiträge zur Gesamtkohärenz können dazu führen, dass ein Interferogramm kaum noch verwendbar ist, da das Phasenrauschen zu groß wird bzw. mit anderen Worten die Phasen in beiden SAR-Aufnahmen komplett dekorreliert sind. Die Größen der Beiträge der beschriebenen Störeinflüsse zur Dekorrelation sind sehr unterschiedlich. So ist der Einfluss der Prozessierung und der Einfluss der Doppler-Zentroid-Differenz bei ERS-Aufnahmen gegenüber der geometrischen und insbesondere der zeitlichen Dekorrelation zu vernachlässigen. Letztere führt dazu, dass für den Fall der differentiellen SAR-Interferometrie Interferogramme mit langen zeitlichen Basislinien (die man eigentlich nutzen möchte) nicht verwendbar sind, da das Signal durch zeitliche Dekorrelation komplett verdeckt wird. Alle weiteren Einflüsse können durch passende Auswertemethoden minimiert bzw. eliminiert werden. Die zeitliche und die geometrische Dekorrelation stellen also die größten Probleme der klassischen differentiellen Interferometrie dar. Dieser Umstand führte zur Entwicklung der sogenannten Permanent- bzw. Persistent Scatterer Methoden¹⁵. Der ursprüngliche PS-Ansatz geht auf die Forschung von Alessandro Ferretti, Claudio Prati und Fabio Rocca zurück und ist z.B. in [2] beschrieben. Basierend auf dieser Idee sind einige Ansätze zur PS-Auswertung entwickelt worden. Eine genauere Betrachtung dieser Ansätze findet sich in den Abschnitten 4 und 5. Der grundlegende Gedanke der Permanent- bzw. Persistent-Scatterer Verfahren besteht in der Identifikation von Auflösungszellen in den Radardaten, die einen dominanten Streuer enthalten. Ein dominanter Streuer ist oft ein Körper in einer Auflösungszelle dessen Rückstreuung wesentlich größer ist als die Rückstreuung aller anderen Streuer in der Auflösungszelle. In [9] wird z.B. gezeigt, dass wenn ein Streuer in einer Auflösungszelle dominant ist, die zeitliche Dekorrelation (durch zufällige Bewegung der Streuer modelliert) signifikant reduziert wird und somit das Deformationssignal dieses Streuers isoliert werden kann.

¹⁴u.a. der in der StaMPS-Auswertung benutzte Raised Cosine-Kernel

¹⁵Der Begriff Permanent Scatterer ist geschützt und steht in direktem Bezug zum Verfahren nach Ferretti et al. Alle anderen Verfahren werden im Rahmen dieser Arbeit als Persistent Scatterer Verfahren bezeichnet. die Abkürzung PS steht je nach Verfahren für Permanent oder Persistent Scatterer

Kapitel 4

PS-Verfahren

Die durch lange räumliche und zeitliche Basislinien auftretenden Probleme der geometrischen und zeitlichen Dekorrelation schränken die Möglichkeiten, die vorhandenen Datensätze auszuwerten, erheblich ein. So sind für große Gebiete Zeitreihen von ERS1- bzw. ERS2-Aufnahmen vorhanden, die für großräumige Deformationsanalysen mittels differentieller Interferometrie genutzt werden könnten. Allerdings ist man bei Deformationsmessungen insbesondere an langen zeitlichen und kurzen räumlichen Basislinien interessiert, was aber durch die auftretende zeitliche Dekorrelation problematisch ist. Eine Lösung für dieses Problem bieten die PS-Verfahren, die Auflösungsstellen identifizieren, die über die Zeit ein kohärentes Phasensignal liefern. Allen PS-Ansätzen ist die Nutzung eines Bild- bzw. Interferogrammstapels gemein, was für die Identifikation der konstant streuenden Körper und die Isolation des Deformationssignals notwendig ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden der ursprüngliche Ansatz von Ferretti et al [2, 3, 5] und ein Ansatz, der von Bert Kampes [16] entwickelt wurde, neben dem StaMPS-Verfahren von Andy Hooper [9] vorgestellt. Die Ansätze nach Ferretti et al bzw. Kampes behandeln die Isolation des Deformationssignals als Parameterschätzung und erfordern deshalb eine explizite Modellierung des Deformationssignals als Funktion der Zeit, was oft als wesentlicher Nachteil dieser Verfahren angeführt wird [9]. Ein weiterer Unterschied in den Ansätzen von Ferretti und Kampes auf der einen und Hooper auf der anderen Seite ist die Identifikation von konstanten Streukörpern. In den ersten beiden Ansätzen werden nur Streukörper mit einer starken Rückstreuung als potentielle stabile Streuer untersucht, was nur in besiedelten Gebieten gut funktioniert und in unbesiedelten Gebieten oft zu einer zu kleinen Population an konstanten Streuern führt [9]. Im Gegensatz dazu beschreibt Hooper in [9] eine verfeinerte Identifikation von konstant streuenden Körpern, die auch in unbesiedelten Gebieten eine ausreichende PS-Dichte liefert.

4.1 Permanent Scatterer Verfahren nach Ferretti

Das Verfahren nach Ferretti kann in drei wesentliche Schritte eingeteilt werden. Zunächst müssen Auflösungsstellen gefunden werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit ein geringes Phasenrauschen aufweisen. Diese Stützpunkte bilden ein zumeist unregelmäßiges Referenznetzwerk. Auf Punkten dieses Netzwerks werden nachfolgend die verschiedenen Beiträge zur interferometrischen Phase bestimmt. Das wesentliche Ergebnis dieses Schrittes ist eine Schätzung der sogenannte APS (Atmospheric Phase Screen), der für jedes Interfe-

rogramm des Bildstapels auf das eigentliche regelmäßige Raster interpoliert wird. Schließlich werden die unterschiedlichen Beiträge zur interferometrischen Phase für jedes Pixel unter Maximierung einer Ensemble-Kohärenz geschätzt, nachdem der Atmosphärenanteil (APS) beseitigt worden ist [3].

4.1.1 Selektion von PS-Kandidaten

Zunächst muss eine Reihe von Punkten gefunden werden, die eine hohe Phasenstabilität aufweisen. Hierfür ist die unter Annahme von Ergodizität nach Gleichung (3.4.2) ermittelte Kohärenz nicht geeignet. So würden z.B. kleine Korrelationsfenster zu einer hohen Anzahl irrtümlich identifizierter Punkte (*False Positives*) und große Fenster zu einer Nicht-Erkennung konstanter Streukörper durch Überlagerung mit den Signalen nicht konstanter Streukörper in der Umgebung führen[3]. Eine Möglichkeit die Phasenstabilität zu schätzen bietet hingegen der Variationskoeffizient der Amplitude. Dieser kann aus den zeitlichen Realisierungen der komplexen Messgröße für jedes Pixel geschätzt werden. Nach [3] folgt die Verteilung der Amplitude der komplexen Messgrößen jedes Pixels einer Rice-Verteilung, wenn für die Verteilungsfunktion der komplexen Messgröße eine zweidimensionale komplexe Gaussverteilung angenommen wird. Hierbei wird eine gleiche Streuung $\sigma_R = \sigma_I = \sigma_n$ in beiden Richtungen der komplexen Ebene angenommen. Der Erwartungswert der Amplitude ist die Reflektivität des abgebildeten Flächenstückes $\underline{g} = [g_R \ g_I]$, die o.B.d.A. als reelle Zahl angenommen wird, so dass gilt $\underline{g} = [|\underline{g}| \ 0]$. Für hohe Signal-Rausch-Abstände ($\sigma_n \ll |\underline{g}|$) kann die Rice-Verteilung durch eine Normalverteilung mit dem Streuparameter σ_n und dem Erwartungswert $|\underline{g}|$ angenähert werden [8]. Schließlich kann die Phasenstabilität mit Hilfe des Quotienten aus Amplituden-Standardabweichung und Amplituden-Erwartungswert abgeschätzt werden. Nach [3] gilt:

$$\sigma_\phi \approx \frac{\sigma_I}{|\underline{g}|} = \frac{\sigma_n}{|\underline{g}|} \approx \frac{s_A}{m_A} \triangleq D_A \quad (4.1.1)$$

Im Wesentlichen beschreibt diese Gleichung den Zusammenhang zwischen einem reellen¹ Erwartungswert $|\underline{g}|$ der Signalamplitude und der Standardabweichung des Imaginärteils der komplexen Ausgangsgröße mit der Standardabweichung der komplexen Phase σ_ϕ . Dieser Zusammenhang ist geometrisch über die Bogenformel gegeben, wie in Abbildung 4.1 dargestellt wird. Da die Standardabweichung des komplexen Anteils bei hohen Signal-Rausch-Verhältnissen gleich der Standardabweichung der Signalamplitude ist (Approximation der Rice-Verteilung durch eine Gauss-Verteilung), die ebenso wie der Erwartungswert der Signalamplitude aus den zeitlichen Realisierungen im Stapel geschätzt werden kann (s_A und m_A), ist die Phasenvariation und somit ein Maß für die Phasenstabilität ableitbar. Ein entsprechender Schwellwert für den Variationskoeffizienten der Amplitude D_A bzw. für die Phasenstandardabweichung σ_ϕ wird in [3] mit $D_A = 0,25$ angegeben.

4.1.2 Schätzung des APS auf den Referenzpunkten

Die durch die Analyse der Amplitudenhistorie gefundenen Punkte weisen ein niedriges Phasenrauschen auf und können dazu verwendet werden den Beitrag der Atmosphäre

¹Um genau zu sein, einem als reell angenommenen

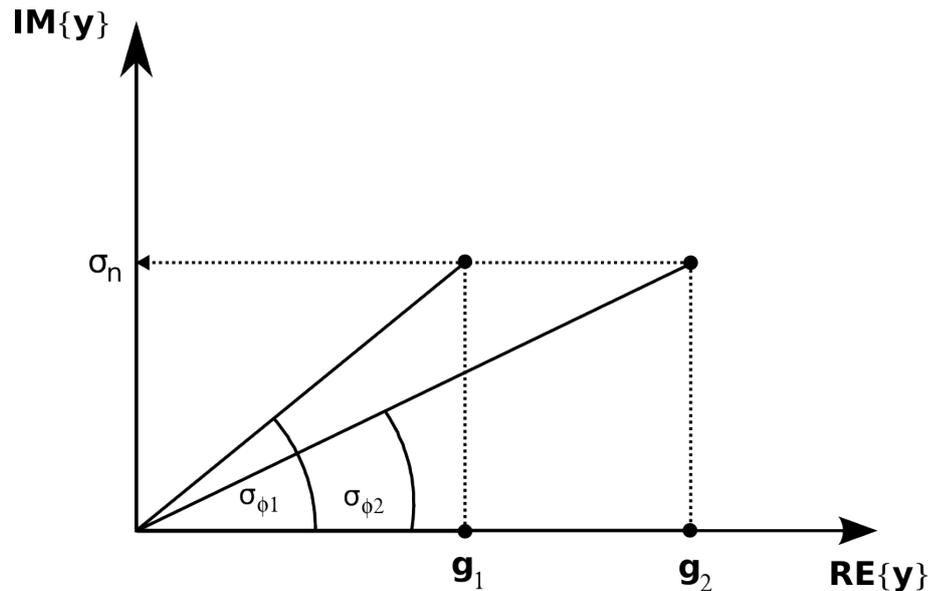


Abbildung 4.1: Geometrische Begründung der Amplitudendispersion als Schätzung der Phasenstandardabweichung

in jedem Interferogramm zu berechnen. Hierzu sind zwei Methoden entwickelt worden. Während im Rahmen der ersten Methode ein System von Gleichungen für das gesamte Referenznetzwerk gelöst wird, um die Parameter zu bestimmen, werden im alternativen Ansatz entsprechende Parameter auf Basis von Phasendifferenzen benachbarter Punkte geschätzt.

Simultane Parameterschätzung für das gesamte Referenznetzwerk:

Geht man davon aus, dass durch die Auswahl nach der Amplitudendispersion H stabile Streuer identifiziert wurden und K Interferogramme vorliegen, stehen $N = H \cdot K$ Beobachtungen entsprechend N Gleichungen zur Verfügung um die einzelnen Beiträge zur interferometrischen Phase zu schätzen. Nach [3] ist dieses System von Gleichungen gegeben durch:

$$\underline{\Phi} = \underline{a} \cdot \underline{1}^T + \underline{p}_\xi \cdot \underline{\xi}^T + \underline{p}_\eta \cdot \underline{\eta}^T + \underline{B} \cdot \underline{\Delta h}^T + \underline{T} \cdot \underline{v}^T + \underline{E} \quad (4.1.2)$$

Die aufgeführten Größen sind die folgt definiert:

- beobachtete aufgewickelte Phasen in der $[K \times H]$ Matrix $\underline{\Phi}$
- unbekannter konstanter Phasenterm im $[K \times 1]$ -Vektor \underline{a}
- unbekannter Einfluss von Orbitfehlern und Atmosphäre in Azimut- bzw. Entfernungsrichtung approximiert durch eine Ebene und dargestellt durch die $[K \times 1]$ -Vektoren \underline{p}_ξ (Azimut) und \underline{p}_η (Entfernung)
- unbekannter Fehler des Geländemodells im $[1 \times H]$ -Vektor $\underline{\Delta h}^T$

- unbekannte Bewegung der PS in linearer Approximation im $[H \times 1]$ -Vektor \underline{v}^T
- Azimut- und Entfernungskoordinaten in den $[1 \times H]$ -Vektoren $\underline{\xi}^T$ und $\underline{\eta}^T$
- effektive räumliche Basislinien im $[K \times 1]$ -Vektor \underline{B}
- Zeitdifferenzen zur Masteraufnahme im $[K \times 1]$ -Vektor \underline{T}
- Residuen in der $[K \times H]$ -Matrix \underline{E} .

Dieses System ist nichtlinear, da die wahren fortgesetzten Phasen nicht bekannt sind, und muss iterativ gelöst. Ein Ansatz hierzu findet sich in [3]. Die Residuen \underline{E} , die nach einer Lösung des Systems zurückbleiben, enthalten neben dem Dekorrelationsrauschen einen Atmosphärenanteil, der durch die räumliche Ebenen-Approximation nicht modelliert wurde. Dieser ist räumlich korreliert und kann somit durch Tiefpassfilterung vom Dekorrelationsrauschen getrennt werden. Der APS ist damit vollständig bekannt und kann mittels Kriging-Interpolation auf das regelmäßige Raster interpoliert werden. Für jeden Punkt des Referenznetzes kann schließlich ein Qualitätsmaß definiert werden, dass nach [3] durch die nachfolgende Gleichung gegeben ist:

$$\gamma_h = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \exp \left(j(\Phi_{k,h} - (APS_{k,h} + \underline{b}_k \cdot \hat{\Delta h}_h^T + \underline{T}_k \cdot \hat{v}_h^T)) \right) = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \exp(j\delta_{k,h}) \quad (4.1.3)$$

Im Wesentlichen ist der Term $\delta_{k,h}$ das zurückbleibende Residuum, wenn alle geschätzten Beiträge zur Phase von der gemessenen Phase abgezogen werden. Der Wert von γ_h liegt immer zwischen Null und Eins und kann als Ensemble-Kohärenz interpretiert werden.

Parameterschätzung auf Basis von Phasendifferenzen im Referenznetzwerk:

Da es durchaus vorkommen kann, dass keine Lösung für das Gleichungssystem gegeben durch (4.1.2) mit dem besagten Algorithmus gefunden wird, was zumeist durch nichtlineare Oberflächenbewegung und einem zu großen Auswertebereich hervorgerufen wird [2], ist noch eine Abwandlung des vorgestellten Algorithmus zur Schätzung des APS von Ferretti et al entwickelt worden. Dieser beruht auf der Bildung von Differenzen benachbarter PS-Kandidaten und Schätzung eines Höhenfehler- und eines Bewegungsincrements auf Basis der aufgewickelten Phase. Das Problem ist nach [2] gegeben durch:

$$\exp(j \cdot \Delta\phi_{x,y,k}) = \exp(j(\Delta h_{x,y} \cdot b_k + \Delta v_{x,y} \cdot T_k + e_{x,y,k})) \quad (4.1.4)$$

Die zwischen den Orten x und y im k -ten Interferogramm gemessene Differenz-Phase $\Delta\phi_{x,y,k}$ setzt sich hierbei aus dem Anteil des Blickwinkelfehlers $\Delta h_{x,y} \cdot b_k$, dem Anteil der linearen Deformation $\Delta v_{x,y} \cdot T_k$ und einem Rauschterm $e_{x,y,k}$ (hier LPR für *linear phase residue* genannt) zusammen. Letzterer beinhaltet den Einfluss der Atmosphäre (und der Orbitfehler), der nichtlinearen Deformation und des Dekorrelationsrauschens. Nach [2] gelingt die Lösung von Gleichung (4.1.4) und damit die Bestimmung der Parameter $\Delta h_{x,y}$ und $v_{x,y}$ für jeden Punkt des Referenznetzwerkes unter Verwendung bekannter Methoden

der Spektralanalyse. Nachfolgend kann ein Qualitätsmaß ähnlich dem durch Gleichung (4.1.3) definiert werden:

$$\gamma = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \exp(j \cdot e_{x,y,k}) \quad (4.1.5)$$

Differenzwerte im Referenznetzwerk, für die dieses Qualitätsmaß eine Schwelle unterschreitet, werden im weiteren Verlauf nicht mehr betrachtet. Nach einer Phasenfortsetzung auf den verbliebenen Referenzpunkten, kann der LPR-Term, der für jede Phasendifferenz und jedes Interferogramm vorliegt ausgewertet werden, um den APS für jedes Punktpaar zu schätzen. Da die nichtlineare Bewegung zeitlich und räumlich, der APS nur räumlich und das Phasenrauschen weder zeitlich noch räumlich korreliert ist, kann der APS durch zeitliche Hochpassfilterung gefolgt von einer räumlichen Tiefpassfilterung bestimmt [2], und anschließend auf das regelmäßige Interferogrammraaster interpoliert werden, um eine pixelweise Verarbeitung der Daten zu ermöglichen.

4.1.3 Pixelweise Interferogrammverarbeitung

Nachdem der APS von jedem Interferogramm abgezogen worden ist, ist die Schätzung von linearer Deformation v_x und DGM-Fehler Δh_x durch Maximierung einer Ensemble-Kohärenz analog zu Gleichung (4.1.4) möglich. Der Ansatz ist für ein beliebiges Interferogrammpixel nach [3] gegeben durch:

$$\begin{aligned} \Delta h_x &= \operatorname{argmax}_{\Delta h_x} \left(\left| \gamma \right| = \left| \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \exp(j\phi_{x,k}) \cdot \exp(-j \cdot (C_{x,k}^h \cdot b_k \cdot \Delta h_x + C^v \cdot T_k \cdot v_x)) \right| \right) \\ v_x &= \operatorname{argmax}_{v_x} \left(\left| \gamma \right| = \left| \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \exp(j\phi_{x,k}) \cdot \exp(-j \cdot (C_{x,k}^h \cdot b_k \cdot \Delta h_x + C^v \cdot T_k \cdot v_x)) \right| \right) \end{aligned} \quad (4.1.6)$$

Hierbei sind $C_{x,k}^q = 4\pi/(\lambda r_{x,k} \sin \theta_{x,k})$ und $C^v = 4\pi/\lambda$ Faktoren, die die Bewegungsgeschwindigkeit bzw. den Höhenfehler auf Phasenwerte abbilden. Sowohl C^q als auch C^v hängen nur von den bekannten Größen Objektentfernung $r_{x,k}$, Inzidenzwinkel $\theta_{x,k}$ und Trägerwellenlänge des Sensors λ ab. Die Varianzen der geschätzten Größen Δh und v sind jeweils der Phasenvarianz proportional. Während sich die Varianz des Höhenfehlers aber entgegengesetzt proportional zur Varianz der Basislinien verhält, ist die Varianz der mittleren Geschwindigkeit entgegengesetzt proportional zur Varianz der Zeitdifferenzen zum Master. Mit dem Mittelwert der Basislinien \bar{b} und dem Mittelwert der Zeitdifferenzen zur Masteraufnahme \bar{T} gilt:

$$\sigma_{\Delta h_x}^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{(C_{x,k}^q)^2 \sum (b_k - \bar{b})^2} \quad (4.1.7)$$

$$\sigma_{v_x}^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{(C^v)^2 \sum (T_k - \bar{T})^2} \quad (4.1.8)$$

Typische Werte für die zugehörigen Standardabweichungen liegen nach [3] im Bereich eines halben Meters für die Höhenfehlerbestimmung und im Bereich eines halben Millimeters pro Jahr für die mittlere Bewegung, wobei die Genauigkeit der mittleren Bewegung natürlich sehr stark davon abhängt, ob das lineare Bewegungsmodell zutrifft.

4.1.4 Kritikpunkte

Zunächst ist hier zwischen den beiden vorgestellten Versionen des Algorithmus zu entscheiden. Die erste Version, die zur Schätzung des APS das System gegeben durch Gleichung (4.1.2) zu lösen versucht, hat bei zu großen Gebieten und nichtlinearer Bewegung starke Probleme. Zu ausgedehnte Gebiete führen hierbei vor allem dazu, dass die Anzahl der zu schätzenden Parameter zu groß wird und die Approximation des APS als Ebene nicht mehr zutrifft. Eine nichtlineare Oberflächenbewegung hat zur Folge, dass konstant streuende Körper nicht identifiziert werden oder der nichtlineare Anteil an der Bewegung als Teil des APS geschätzt wird [2].

In der zweiten Version des Algorithmus, der auf Differenz-Phasen zwischen Punkten des Referenznetzwerkes arbeitet, sind diese Probleme teilweise behoben. So wird z.B. die Abweichung von einer linearen Bewegung in den LPR-Term aufgenommen und kann später durch geeignete Filterung in Raum und Zeit vom APS bzw. vom Dekorrelationsrauschen getrennt werden. Außerdem ist eine Approximation des APS durch eine Ebene nicht mehr notwendig, so dass auch das betrachtete Gebiet vergrößert werden kann. Allerdings ist es für diese Version des Algorithmus notwendig, dass der LPR-Term klein ist, da eine Analyse auf aufgewickelten Phasen durchgeführt wird [9]. Diese Voraussetzung ist zumeist erfüllt, wenn das Referenznetzwerk dicht genug (drei bis vier PS pro km^2) ist, da die Einflüsse der Atmosphäre dann auf beiden Stützpunkten fast gleich sind, so dass die Phasendifferenz frei von Atmosphäreneinflüssen ist. Allerdings werden im Rahmen der PS-Auswahl auf Basis der Amplitudendispersion vor allem starke Streuer ausgewählt [9], was zu einer geringen PS-Dichte in unbesiedelten Gebieten führt. In [2] wird der Fall diskutiert, dass in dem betrachteten Gebiet mehrere PS-Cluster auftreten, was z.B. im Falle mehrerer getrennter Siedlungsgebiete auftreten könnte. Für solche Fälle wird eine getrennte Verarbeitung jedes Clusters mit anschließender Verschmelzung unter Nutzung weiterer Information (z.B. GPS-Messungen oder ein Bewegungsmodell) empfohlen. In vollkommen unbesiedelten Gebieten würde das vorgestellte Verfahren jedoch versagen, da die PS-Dichte generell zu gering ist. Ein weiteres Problem entsteht, wenn die Abweichung der Oberflächenbewegung vom linearen (bzw. periodischen, polynomiellen usw.) Bewegungsmodell zu groß wird oder wenn die Bewegung nicht räumlich korreliert ist. In diesem Fall würde der LRT-Term wiederum groß werden, was dazu führen würde, dass kein zuverlässiges Referenznetzwerk bestimmt werden kann [9]. In [16] werden weitere Kritikpunkte diskutiert, die vor allem in der unvollständigen statistischen bzw. funktionalen Beschreibung des Problems begründet liegen. Diese Punkte werden im nächsten Abschnitt über den PS-Ansatz von Kampes wieder aufgegriffen. Schließlich ist die Amplitudendispersion als Maß für die Phasenstabilität ein schlechterer Schätzer als es den Anschein hat. So wird in [9] gezeigt, dass die Variabilität des Phasenrauschens bei gegebener Amplitudendispersion D_A selbst für betragsmäßig kleine Variationskoeffizienten beträchtlich sein kann, so dass vermeintlich konstant streuende Körper ein hohes Phasenrauschen aufweisen. Dieser Punkt wird im Abschnitt 5.2.1 wieder aufgegriffen und näher erläutert.

4.2 PS-Interferometrie nach Kampes

Der von Bert Kampes entwickelte STUN-Algorithmus (Spatio-Temporal Unwrapping Network) knüpft im Wesentlichen an die ursprüngliche PS-Methode an. Allerdings wird diese im Hinblick auf die funktionale Modellierung und das Lösungsverfahren ergänzt, um offensichtliche Schwächen zu beseitigen. So ermöglicht die Nutzung eines kleinsten Quadrate Schätzverfahrens die stochastische Modellierung der Beobachtungen (inklusive Gewichtung) und eine stochastische Bewertung der Ergebnisse. Da gängige kleinste Quadrate-Verfahren lineare bzw. linearisierte funktionale Zusammenhänge benötigen, was in diesem Fall nicht gewährleistet werden kann, ist das Herzstück dieses Algorithmus eine effiziente Implementierung der sogenannten LAMBDA²-Methode [17]. Weiterhin wird Gebrauch von Varianz-Komponenten-Schätzung (siehe [25]) gemacht, um die Eingabe-Daten stochastisch zu modellieren. Eine Übersicht über den Ablauf des STUN-Algorithmus ist in Abbildung 4.2 gegeben. Im Wesentlichen ist das Ziel des Algorithmus die Schätzung bestimmter Phasenanteile auf einer kohärenten Untermenge aller Interferogrammpunkte. Dieses ermöglicht eine Phasenfortsetzung auf dem unregelmäßigem Gitter, da die geschätzten Signalanteile von der gemessenen Phase abgezogen werden. Die Phasengradienten werden hierdurch im Allgemeinen verkleinert, was eine zuverlässigere Phasenfortsetzung ermöglicht.

Der Algorithmus läuft in mehreren Schritten ab. Zunächst werden die lokal stabilsten Punkte ausgewählt und zu einem Referenznetzwerk verbunden. Für jede Kante dieses Netzwerkes werden Parameterdifferenzen mit dem Integer-Least-Squares-Algorithmus (ILS) geschätzt. Die Parameter auf den Netzwerkpunkten können durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten, die der Berechnung von Höhen aus nivellierten Höhenunterschieden ähnelt, bestimmt werden. Im Rahmen dieses Schrittes wird auch ein Test der Kanten und Punkte des Netzwerkes durchgeführt, um falsche Schätzungen zu entfernen. Ist das Referenznetzwerk erstellt, werden dem Netzwerk weitere als ausreichend kohärent eingestufte Punkte hinzugefügt. Dabei wird jeder neue Punkt mit einer bestimmten Anzahl nächstgelegener Punkte des Referenznetzwerkes verbunden. Die Parameterdifferenzen können dann wieder in Anlehnung an die Auswertung eines Nivellementnetzes bestimmt werden, wobei die Parameter der Punkte im Referenznetzwerk als deterministisch vorausgesetzt werden. Ein geeigneter Testschritt stellt schließlich die Richtigkeit der neu bestimmten Parameter sicher und sorgt ggf. für die Entfernung des entsprechenden neuen Netzwerkpunktes. Das Ergebnis dieser Auswertung ist ein unregelmäßiges Netzwerk von Punkten, wobei für jeden Punkt geschätzte Parameter vorliegen. Der Beitrag dieser Parameter zur Phase wird nun von der gemessenen Phase abgezogen, um die darauf folgende Phasenfortsetzung zu vereinfachen. In einem abschließenden Schritt kann dann eine Parameterschätzung auf den fortgesetzten Phasen durchgeführt werden (siehe [16]).

4.2.1 Punktauswahl

Die Punktauswahl kann analog zum ursprünglichen Verfahren auf Basis des Amplitudenvariationskoeffizienten erfolgen. Alternativ wird in [16] aber auch die Nutzung eines einfachen Amplitudenschwellwertes bzw. die Nutzung des Leistungsverhältnisses von Objekt-

²Least squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment

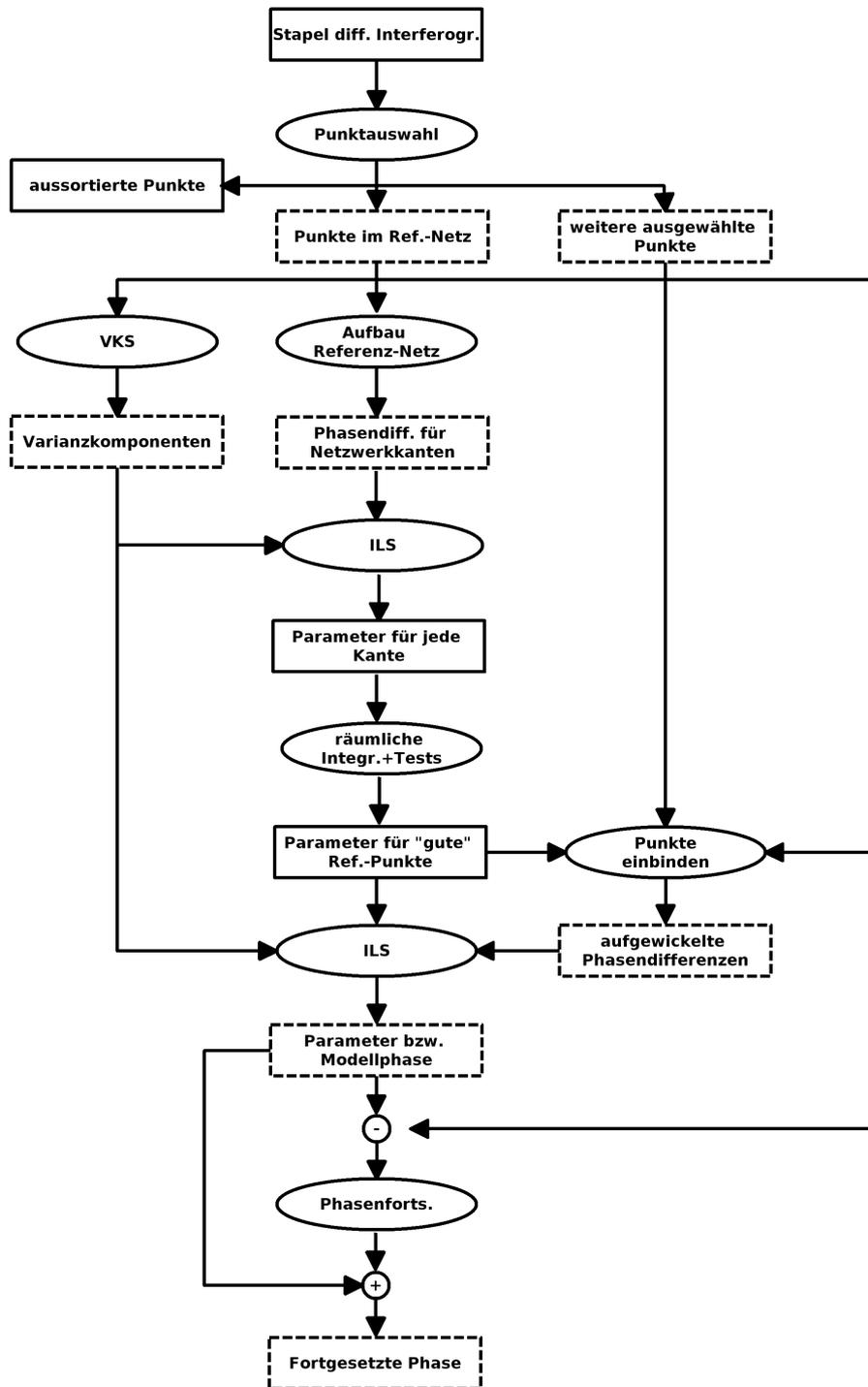


Abbildung 4.2: Ablauf der STUN-Prozessierung;eckige Kästen stehen für Daten, gestrichelte eckige Kästen stehen für Datenstapel (variabel in der Zeit) und ovale Kästen stehen für Prozesse [16]

zu Hintergrundsignal (*Signal to Clutter Ratio* (SCR)), das mit einem gleitenden Fenster geschätzt werden kann, diskutiert. Der Amplitudenschwellwert stellt an ein beliebiges Pixel die Anforderung, dass eine bestimmte Anzahl von Amplituden dieses Pixels im Bildstapel größer als ein Schwellwert ist. Das SCR wird hingegen mit einem gleitenden Fenster geschätzt, wobei davon ausgegangen wird, dass bestimmte Regionen innerhalb dieses Fensters für das Signal und andere Regionen für den Clutter maßgebend sind. In Städten wird das SCR oft unterschätzt, was bei der Schwellwertbildung zu berücksichtigen ist [16]. In der Praxis ist die gestellte Aufgabe, einen Großteil der vorhandenen Punktstreuer zu finden, mit jedem dieser Maße durch Anpassen des Schwellwertes zu erreichen. Es muss angemerkt werden, dass sowohl Amplitudenvariationskoeffizient als auch SCR das Phasenrauschen bei schlechter werdendem Signal-Rausch-Verhältnis unterschätzen (siehe Abbildung 5.2), wobei dieses Problem beim Amplitudenvariationskoeffizienten ausgeprägter ist [16]. Die Punkte, die auf Basis des gesetzten Schwellwertes bezüglich einer der beschriebenen Kenngrößen ausgewählt worden sind, werden in zwei Gruppen unterteilt. Die eine Gruppe enthält die in ihrer lokalen Umgebung stabilsten Punkte und bildet das Referenznetzwerk. Die andere Gruppe besteht aus dem Rest der gefundenen stabilen Streuer und wird nach einer ersten Schätzung in das Referenznetzwerk integriert.

4.2.2 Funktionales Modell

Das funktionale Modell muss die Beobachtungen (in diesem Fall die aufgewickelten Phasen) mit den Parametern in Beziehung setzen. Hierzu wird zunächst die gemessene Phase als Summe einzelner Phasenbeiträge angenommen:

$$\phi_{x,k}^w = W\{\phi_{x,k,topo} + \phi_{x,k,defo} + \phi_{x,k,obj} + \phi_{x,k,atmo} + \phi_{x,k,orbit} + \phi_{x,k,noise}\} \quad (4.2.1)$$

Die am Ort x im Interferogramm k gemessene aufgewickelte Phase $\phi_{x,k}^w$ setzt sich aus den Phasenbeiträgen der residualen Topographie $\phi_{x,k,topo}$, der Deformation $\phi_{x,k,defo}$, der Abweichung der Streuerposition vom Pixelzentrum $\phi_{x,k,obj}$, der Atmosphäre $\phi_{x,k,atmo}$, der Orbitfehler $\phi_{x,k,orbit}$ und des Rauschens $\phi_{x,k,noise}$ zusammen. Der Operator $W\{\cdot\}$ bezeichnet den Wrapping Operator, der ein gegebenes Argument in das Intervall $[-\pi; \pi)$ transformiert. Der Unterschied zur ursprünglichen Permanent-Scatterer-Methode sind die Einführung eines Phasenanteils für die nichtzentrale Lage eines (dominanten) Streukörpers und die Trennung von Atmosphären- und Orbitfehler-Einfluss. Allerdings werden nicht alle Summanden in (4.2.1) in jedem Anwendungsfall im funktionalen Modell berücksichtigt. So wird die Atmosphäre nach [16] im Wesentlichen im stochastischen Modell berücksichtigt, kann aber auch (im Falle eines starken Atmosphäreneinflusses in der Masterakquisition) durch eine Konstante berücksichtigt werden. In vielen Fällen sind die folgenden Annahmen gerechtfertigt:

- Beitrag der Master-Atmosphäre ist nicht übermäßig stark $E\{\phi_{x,0,atmo}\} = 0$,
- Die Deformation ist ausreichend durch ein lineares Modell beschrieben,
- Die Dopplerbasislinien sind vernachlässigbar klein, so dass der Offset der Streuerposition vom Pixelzentrum in Azimut nicht modelliert werden muss,
- Die einzelnen Aufnahmen wurden mit gleichen Sensoren gemacht, so dass der Offset der Streuerposition in Entfernung nicht modelliert werden muss.

Der ILS-Estimator wird auf Parameterdifferenzen angewendet, so dass sich das funktionale Modell mit den genannten Einschränkungen schreiben lässt als:

$$E\{\Delta\phi_{x,y,k}\} = \beta_{x,k}\Delta h_{x,y} - \frac{4\pi}{\lambda}T_k v_{x,y} \quad (4.2.2)$$

Hierbei ist $\beta_{x,k}$ eine Funktion der Aufnahmegeometrie³, $\Delta h_{x,y}$ die Höhenfehlerdifferenz zwischen den Punkten x und y , T_k die Zeitdifferenz zur Masteraufnahme und $v_{x,y}$ eine lineare Bewegungsrate (in der Einheit einer Geschwindigkeit). Eine Parametrisierung aller in Gleichung (4.2.1) aufgeführten Phasenanteile ist in [16] zu finden. Wichtig ist vor allem zu bedenken, dass die Größe auf der linken Seite die unbekannte fortgesetzte Phase ist. Gemessen wurde aber die aufgewickelte Phase, so dass noch ein ganzzahliges Vielfaches eines vollen Phasenzyklus zu Gleichung (4.2.2) addiert werden muss:

$$E\{\Delta\phi_{x,y,k}^w\} = -2\pi \cdot a_k + \beta_{x,k}\Delta h_{x,y} - \frac{4\pi}{\lambda}T_k v_{x,y} \quad \text{mit } a_k \in (Z) \quad (4.2.3)$$

Für eine Kante können K Beobachtungsgleichungen nach Gleichung (4.2.3) aufgestellt werden, wobei K die Anzahl der Interferogramme bezeichnet. Diese K Gleichungen können in Matrixschreibweise zusammengefasst werden:

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_{x,y,1}^w \\ \Delta\phi_{x,y,2}^w \\ \vdots \\ \Delta\phi_{x,y,K}^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\pi & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -2\pi & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -2\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{x,1} & \frac{-4\pi}{\lambda}T_1 \\ \beta_{x,2} & \frac{-4\pi}{\lambda}T_2 \\ \vdots & \vdots \\ \beta_{x,K} & \frac{-4\pi}{\lambda}T_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_{x,y} \\ v_{x,y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_K \end{bmatrix} \quad (4.2.4)$$

$$y = A \cdot a + B \cdot b + e \quad (4.2.5)$$

Für die K Beobachtungen entstehen zusätzlich zu den reellen Parametern K zu schätzende ganzzahlige Mehrdeutigkeiten, so dass das System in Gleichung (4.2.4) unterbestimmt ist. Eine Lösung kann nach [16] trotzdem erreicht werden, indem für jeden zu schätzenden reellwertigen Parameter Pseudobeobachtungen eingeführt werden, die das System dann eindeutig bestimmen. Eine Lösung des Systems ist aber nur möglich, wenn die ganzzahlige Natur der Phasenmehrdeutigkeiten ausgenutzt wird. Das erweiterte System ist gegeben durch:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} a + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} b \quad (4.2.6)$$

Hierbei enthält der $[K \times 1]$ -Vektor y_1 die Beobachtungen aus Gleichung (4.2.4). A_1 und B_1 sind identisch mit den Matrixen A und B in den Gleichungen (4.2.4) und (4.2.5). Die Pseudobeobachtungen sind im Vektor y_2 enthalten und werden zu Null gewählt. Die Matrixen A_2 und B_2 sind die Null- bzw. die Einheitsmatrix in passender Dimension. Das so aufgestellte funktionale Modell kann rein formal wieder wie Gleichung (4.2.5) geschrieben werden und wird mit dem ILS-Estimator gelöst.

³Basislinie, Inzidenzwinkel und Zielentfernung

4.2.3 Stochastisches Modell

Neben dem funktionalen Modell wird die gemessene Phase auch stochastisch modelliert. Dieses geschieht über Varianzfortpflanzung ausgehend von den Varianz-Kovarianz-Matrizen (VKM) bzw. der Kofaktormatrix der betrachteten Phasenwerte in den SAR-Aufnahmen. Betrachtet man weiterhin den Spezialfall zweier Punkte für deren Phasendifferenz in K Interferogrammen eine Kofaktormatrix aufgestellt werden soll, so gelingt unter Annahme einer geringen Punktentfernung eine Zerlegung der Gesamt-VKM in eine Summe aus Einzelmatrizen, wobei jede Matrix für eine SAR-Aufnahme steht (siehe [16]):

$$Q_{ifg} = \sum_{k=0}^K \sigma_{noise^k}^2 \cdot Q_k \text{ mit } Q_k = \begin{cases} 2E_K & \text{wenn } k=0 \\ 2i_k i_k^T & \text{wenn } k = 1, \dots, K \end{cases} \quad (4.2.7)$$

Hierbei ist E_K eine $[K \times K]$ -Matrix die nur Einsen enthält und i_k ist ein $[K \times 1]$ -Vektor, der bis auf eine Eins an der k -ten Stelle nur Nullen enthält. Es ist zu erwähnen, dass das aus der Varianzfortpflanzung abgeleitete Modell den Atmosphäreinfluss explizit enthält. Durch zulässige Vereinfachungen kann das Modell allerdings nach Gleichung (4.2.7) umparametrisiert werden, was für die Varianzkomponentenschätzung günstiger ist. Außerdem hängen die zu schätzenden Varianzkomponenten nicht von der betrachteten Kante ab, da Q_{ifg} weder eine Funktion des Ortes noch eine Funktion der Kantenlänge ist (durch Vereinfachung). Für die Schätzung der Varianz-Komponenten nach Gleichung (4.2.7) ist es notwendig das gesamte System einmal auszuwerten, wobei ein angenommenes stochastisches Modell für diese initiale Lösung Anwendung findet. Hierbei wird jeder Punkt einmal benutzt, was die Streuung der gefundenen Varianzkomponenten im Vergleich zu einer Schätzung der Varianzkomponenten auf nur einem Punktpaar verbessert. Die Formeln der Varianzkomponentenschätzung sind z.B. in [25] dargestellt und werden hier nicht aufgeführt. Die für die Doppeldifferenzphasen ($\Delta\phi_{x,y,k}^w$) gefundenen Varianz-Kovarianz-Matrizen werden in den nachfolgenden Ausgleichungen als apriori stochastisches Modell (für die Beobachtungen) genutzt. Für die im vorherigen Abschnitt eingeführten Pseudobeobachtungen wird ein stochastisches Modell angesetzt. Passende Werte für die Standardabweichungen der Pseudobeobachtungen werden in [16] angegeben. Fasst man die angesetzte stochastische Information über die Pseudobeobachtungen in der VKM Q_{y2} zusammen und setzt $Q_{y1} = Q_{ifg}$ ist das stochastische Modell gegeben durch:

$$D\left\{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} Q_{y1} & 0 \\ 0 & Q_{y2} \end{bmatrix} \quad (4.2.8)$$

4.2.4 Aufbau des Referenznetzwerks

Das Referenznetzwerk besteht beim STUN-Algorithmus im Gegensatz zur ursprünglichen PS-Methode nicht aus allen gefundenen kohärenten Punkten. Vielmehr wird ein Punkt in das Referenznetzwerk aufgenommen, wenn er in einer lokalen Umgebung der konstanteste Streuer (beschrieben durch das entsprechende Stabilitäts-Maß) ist. Hierzu wird ein Gitter über das Interferogramm gelegt, wobei die Gitterweite angemessen zu wählen ist (im Bereich von 500 m). Für jede Zelle wird das potentiell phasenstabilste Pixel gespeichert. Dann wird ein zweites Raster über das Interferogramm gelegt, das in jeder Dimension eine halbe Gitterweite gegen das erste Raster verschoben ist. In jeder Rasterzelle wird

wiederum das stabilste Pixel gespeichert. Das Ergebnis dieses Schrittes sind räumlich homogen verteilte Punkte, die in ihrer Umgebung die stabilsten Streukörper sind. Um eine Nachbarschaft auf diesem unregelmäßigen Gitter der Referenzpunkte zu erzeugen, wird jeder Punkt mit einer bestimmten fixen Anzahl Nachbarpunkte verbunden. Eine homogene räumliche Verteilung der Anschlüsse eines Punktes wird dadurch erreicht, dass der erste gewählte Nachbarpunkt der nächste Nachbar im ersten Quadranten, der zweite Nachbarpunkt der nächste Nachbar im zweiten Quadranten usw. sein muss. Bei Bedarf können zu lange Kanten in einem Nachbearbeitungsschritt entfernt werden. Dieses Verfahren zur Tessellation der Interferogrammebenen wird vorgeschlagen und hat z.B. gegenüber der Delaunay Triangulation den Vorteil, dass Referenzpunkte an den Rändern mit der gleichen Anzahl Kanten verbunden sind wie Referenzpunkte in der Mitte.

4.2.5 Parameterschätzung im Netzwerk

Die Parameterschätzung im Referenznetzwerk bzw. in der nachfolgenden Erweiterung des Referenznetzwerkes wird mit dem *Integer-Least-Squares-Estimator* durchgeführt. Dieser nutzt die aus der GPS-Auswertung bekannte sogenannte LAMBDA-Methode, wobei diese zur Verbesserung der Laufzeit durch einen sogenannten *bootstrap estimator* optimiert wird. Die LAMBDA-Methode wird hierbei verwendet, um den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Parametern und Beobachtungen zu invertieren und zieht Nutzen aus der Ganzzahligkeit der Phasenmehrdeutigkeiten. Eine Erläuterung des *Integer-Least-Squares-Estimators* findet sich in Abschnitt B.1 im Anhang.

Da die im Netzwerk geschätzten Größen Parameterdifferenzen zwischen benachbarten Punkten darstellen, als Ergebnis aber absolute Parameter erwünscht sind, werden die Differenzparameter analog zur Auswertung von Nivellementnetzen auf einem Referenzpunkt gelagert und in absolute Werte umgewandelt. Das funktionale Modell für diesen Schritt ist in Abschnitt B.2 im Anhang aufgeführt.

Um die Richtigkeit der geschätzten Parameter zu gewährleisten, werden alle bestimmten Parameter *Detection Identification Adaption Alternative Hypothesis Testing*-Prozedur (DIA) unterzogen. Hierfür werden explizite Alternativhypothesen aufgestellt, die grobe Fehler in einem Netzwerkpunkt oder auch einer Kante modellieren. Durchgeführt werden alle Tests nach der B-Methode des Testens (siehe [25, 16]). Basierend auf den Testentscheidungen werden Kanten oder Netzwerkpunkte vor der nachfolgenden Phasenfortsetzung entfernt.

4.2.6 Phasenfortsetzung

Für die geschätzten Parameter werden die entsprechenden Phasenanteile berechnet, addiert, in das Intervall $[-\pi; \pi)$ transformiert und von der gemessenen aufgewickelten Phase abgezogen. Die residuale Phase enthält dann nur noch einen langwelligen Anteil aufgrund von Atmosphäreneinfluss und unmodellierter Bewegung und einen hochfrequenten Rauschanteil geringer Amplitude [16]. Beide Anteile können durch Filterung getrennt und fortgesetzt werden. Die Endergebnis des Algorithmus ist das vollständige fortgesetzte Phasenfeld, das sich durch Addition der Modellphase (Phasenanteile der geschätzten Pa-

parameter) und der fortgesetzten residualen Phase (bzw. der Summe aus den beiden fortgesetzten residualen Phasenanteilen) ergibt. Eine finale Parameterschätzung kann schließlich auf dem fortgesetzten dreidimensionalen Phasenfeld durchgeführt werden, wobei deutlich komplexere Bewegungs- oder Atmosphärenmodelle verwendet werden können, da eine Schätzung von Parametern auf Basis von fortgesetzten Phasen im Gegensatz zur Parameterschätzung mit aufgewickelten Phasen relativ einfach ist.

4.2.7 Zusammenfassung und Vergleich

Das PS-Verfahren nach Kampes folgt im Wesentlichen der Idee der weiterentwickelten Version des PS-Verfahrens nach Ferretti. Im Rahmen des letztgenannten Verfahrens werden auf Basis von Phasendifferenzen benachbarter (ausreichend kohärenter) Punkte jeweils Differenzen zweier Parameter geschätzt. Diese Parameter repräsentieren den Blickwinkelfehler (in diesem Fall als Höhenfehler des Referenzhöhenmodells bezeichnet) und einen linearen Bewegungsanteil. Die Schätzung erfolgt hierbei mit Methoden der Spektralanalyse [2]. Die verbleibenden Residuen werden dann fortgesetzt und analysiert, um den APS zu schätzen und auf alle Pixel zu interpolieren, um schließlich eine pixelweise Interferogrammverarbeitung durchzuführen. Eine der wesentlichen Schritte ist hierbei das Entfernen einiger Phasenanteile vor der Phasenfortsetzung, was die Fehlerfälligkeit dieses Schrittes deutlich verringert. Im Rahmen des STUN-Algorithmus wird ähnlich vorgegangen. Zunächst wird eine Parameterschätzung auf einem Referenznetzwerk durchgeführt, das anschließend um weitere hinreichend kohärente Punkte ergänzt wird. Die Phasenanteile der auf diesen Punkten geschätzten Parameter werden dann von der gemessenen Phase abgezogen, was die Phasenfortsetzung vereinfacht. Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Verfahren ist die finale Parameterschätzung. Während diese beim Verfahren nach Ferretti pixelweise auf Basis der aufgewickelten Phase nach Elimination des APS durchgeführt wird, nutzt der STUN-Algorithmus nur Netzwerkpunkte, für die bereits fortgesetzte Phasen vorliegen. Der Vorteil des STUN-Algorithmus ist die höhere Zuverlässigkeit der Netzwerkpunkte und das Vorliegen von fortgesetzten Phasen, wohingegen der Algorithmus nach Ferretti den Vorteil hat flächendeckend (für jedes Pixel) Schätzwerte zu liefern.

Ein andere wesentlicher Unterschied ist die Konstruktion des Referenznetzwerkes. Dieses wird beim Verfahren nach Ferretti durch Schwellwertbildung auf dem Amplitudenvariationskoeffizienten durchgeführt. In einem späteren Schritt können Punkte deren Qualität nach Gleichung (4.1.5) zu gering ist vor der Phasenfortsetzung eliminiert werden. Das Vorgehen im STUN-Algorithmus macht hier einen ausgereifteren Eindruck. Zunächst wird ein Referenznetzwerk aus den lokal besten Punkten aufgebaut, was den Vorteil einer gleichmäßigen räumlichen Verteilung der Punkte hat. Dann werden in diesem Netzwerk Parameter geschätzt, wobei falsche Schätzungen über einen statistisch begründeten Testschritt entfernt werden. Bei der anschließenden Hinzunahme weiterer Punkte wird auch jeweils (zumindest durch einen Globaltest der Ausgleichung) eine statistisch begründete Entscheidung getroffen, ob der Punkt ausreichend kohärent ist und weiter betrachtet werden sollte. Der wesentliche Vorteil des STUN-Algorithmus ist hierbei, dass alle Entscheidungen statistisch begründet sind. Die Beurteilung des Qualität nach Gleichung (4.1.5) erfordert einen Schwellwert, der im Rahmen der Auswertung angepasst

werden muss. Ein weiterer Vorteil ist die gleichmäßige Verteilung der Referenzpunkte im STUN-Algorithmus, da ein Zerfallen des Gebiets in einzelne Cluster vermieden wird. Dieses würde zu langen Kanten zwischen den PS führen, was einen unkontrollierbaren Einfluss der Atmosphäre zur Folge haben kann (zur Lösung dieses Problems wird in [2] eine Zerlegung des Auswertebereichs vorgeschlagen).

Schließlich ist die Parameterschätzung der beiden Algorithmen komplett verschieden. Der Algorithmus nach Ferretti basiert im Wesentlichen auf Verfahren aus der Spektralanalyse. Im Gegensatz dazu wird beim STUN-Algorithmus die in der GPS-Auswertung genutzte LAMBDA-Methode verwendet. Der große Vorteil der LAMBDA-Methode ist die Möglichkeit Varianzen und Kovarianzen zwischen einzelnen Beobachtungen bzw. Parametern zu modellieren. Zusätzlich ist eine Abschätzung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit (siehe [25] für Begriffsdefinition) der Ergebnisse möglich. So ist es denkbar die Bewegung als Polynom zu modellieren und die einzelnen Koeffizienten auf Signifikanz zu testen und ggf. das funktionale anzupassen.

Beide Verfahren haben den Nachteil, dass eine ungefähre funktionale Beschreibung der Deformation notwendig ist. Zwar können nach [2] auch Anteile der Deformation vorhanden sein, die von diesem Modell abweichen, allerdings müsstend diese klein sein. Zusätzlich ist die Auswahl der PS auf Basis der Amplitudendispersion nicht optimal und funktioniert zumeist nur in städtischen Gebieten zufriedenstellend. Ein dritter Ansatz, der den Kernpunkt dieser Arbeit bildet ist die Stanford Method of Persistent Scatterer (StaMPS). Dieser wird im nächsten Abschnitt erläutert und sucht im Wesentlichen die zuletzt genannten Nachteile, die beide bisher vorgestellten Verfahren aufweisen zu beheben.

Kapitel 5

Stanford Method of Persistent Scatterer

Die Stanford Method of Persistent Scatterer ist eine von Andy Hooper im Rahmen seiner Promotion entwickelte Software, die beide am Ende des letzten Abschnitts angesprochenen Probleme für nicht-städtische Gegenden zu lösen versucht. Hierbei ist kein apriori Modell der Deformation notwendig. Ursprünglich wurde die Software entwickelt, um Bodendeformationen an Vulkanen zu untersuchen. Da es zumeist keine besiedelten Gebiete in der Nähe der interessierenden Vulkane gibt und die Deformation nicht nur linear oder saisonal (periodisch) sondern auch häufig abrupt verläuft [9], sind diese beiden Verbesserungen erforderlich für den Erfolg der Datenauswertung solcher Vulkanszenen. Im Rahmen dieser Arbeit ist es vor allem von Interesse, dass kein Modell für die Bewegung angenommen werden muss, was eine große Fehlerquelle der anderen beiden Auswertelgorithmen eliminiert. Der StaMPS-Algorithmus lässt sich in vier Schritte gliedern.

- Interferogrammgenerierung
- Identifikation der Persistent Scatterer
- PS-Auswahl
- Schätzung der Bewegung

Die Interferogrammgenerierung folgt dabei den Ausführungen im entsprechenden Abschnitt über die interferometrische Verarbeitungskette, die in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Allerdings wird der Feinregistrierungsschritt modifiziert durchgeführt, um besser mit langen Basislinien umgehen zu können. Zur Identifikation der Persistent Scatterer wird eine Kombination aus Amplituden- und Phasenanalyse verwendet. Die gefundenen PS werden im Auswahlschritt nach Rauschen, Nähe zu anderen PS und Variation des Stabilitätsmaßes ausgedünnt. Auf den verbleibenden Punkten wird dann die Deformation geschätzt. Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über die letzten drei Schritte der StaMPS-Verarbeitungskette. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Prozessierung einschließlich des Modells, das die Zusammensetzung der differentiellen interferometrischen Phase beschreibt, erläutert.

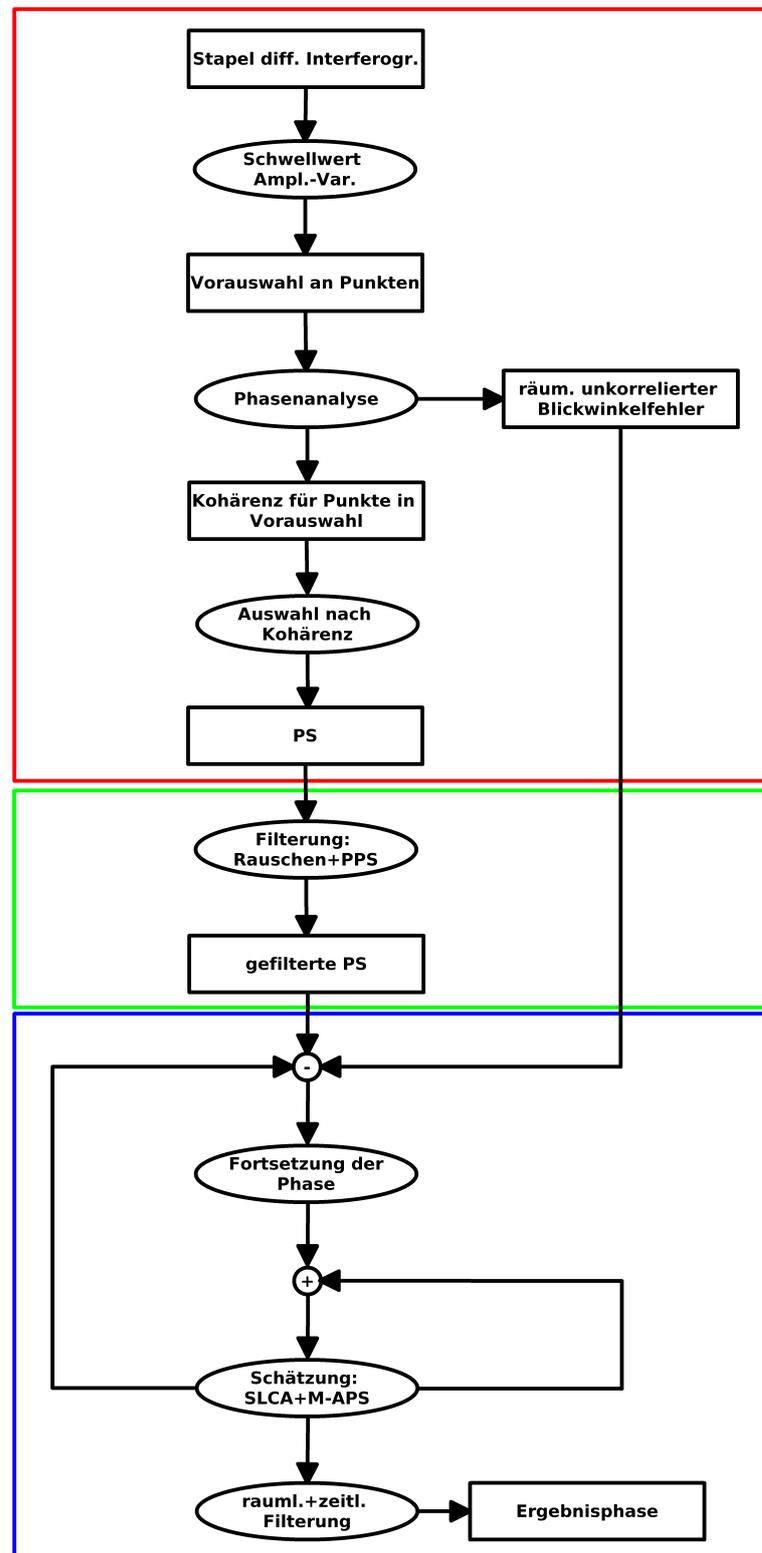


Abbildung 5.1: Ablauf der StaMPS-Prozessierung; Eckige Felder sind Daten und ovale Felder sind Prozesse; Rot/Grün/Blau umfassen alle Daten in StaMPS Schritt 2/3/4

5.1 Interferogrammgenerierung

Die Generierung der Interferogramme läuft, wie im entsprechenden Abschnitt über die interferometrische Verarbeitungskette erläutert, ab. Hierbei wird auf eine Filterung der Spektren und eine Phasenfortsetzung vor der Geokodierung verzichtet. Die Filterung würde eine Verringerung der Auflösung bewirken, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass statt nur einem mehrere starke Streukörper auf eine Auflösungszelle entfallen. Die Feinregistrierung, die im Rahmen der StaMPS-Auswertung durchgeführt wird, wird im Gegensatz zur gewöhnlichen Koregistrierung zwischen einem Master und einem Slave erweitert, was die Verarbeitung größerer effektiver Basislinien erlaubt. Eine weiterer Schritt, der im Rahmen des StaMPS-Algorithmus durchgeführt wird (bzw. werden kann), ist eine genauere Registrierung des Geländemodells in die Mastergeometrie, durch die Bestimmung einer Verschiebung zwischen Interferogramm und Höhenmodell. Im Folgenden werden diese beiden wesentlichen Erweiterungen der interferometrischen Verarbeitungskette näher erläutert.

5.1.1 Registrierung des Geländemodells in die Mastergeometrie

Um diese Verschiebung zu bestimmen, wird ein Interferogramm für einen Slave mit kurzer räumlicher und zeitlicher Basislinie erzeugt. Die Amplituden des Interferogramms¹ werden dann mit der Steigung des Geländemodells in Entfernungsrichtung korreliert. Die zugrundeliegende Idee ist, dass die Rückstreuung maßgeblich durch die Orientierung eines Oberflächenstücks zum Sensor beeinflusst wird, was auf das ursprüngliche Anwendungsgebiet des StaMPS-Algorithmus zutrifft. Dabei wurde nämlich ein größtenteils unbewachsener Vulkan untersucht. In Gegenden ohne starke Topographie, die z.B. zu größten Teil mit landwirtschaftlichen Nutzflächen bedeckt sind, trifft die Grundannahme des Algorithmus nicht zu und die Offsetbestimmung schlägt fehl. So hängt die Rückstreuung oft von der Bodenbedeckung und der Bodenfeuchte ab.

Da die Offsetbestimmung auf Basis des vorgestellten Verfahren nicht immer funktioniert, wurde im Rahmen dieser Arbeit mit einer Offsetbestimmung auf Basis der gemessenen bzw. der aus dem DEM simulierten topographischen Phase experimentiert. Hierzu wurde der Master des Bildstapels so ausgewählt, dass dieser einen Tandempartner hat². Mit diesem Tandempaar kann man ein Interferogramm erzeugen, das im Wesentlichen Topographie enthält. Dieses Interferogramm wird mit der simulierten topographischen Phase korreliert, um einen Offset zu bestimmen. Hierbei wurde zunächst keine Phasenfortsetzung durchgeführt, was unproblematisch ist, wenn die Mehrdeutigkeitshöhe nicht überschritten wird. Eine weitere Möglichkeit wäre die Generierung der Geländemodelle direkt aus dem Stapel, was z.B. in [2] vorgeschlagen wird und die Registrierung des Geländemodells in die Mastergeometrie überflüssig machen würde. Allerdings muss der Master für die letzten beiden Verfahren einen Tandempartner besitzen, was die Flexibilität bei der Auswahl der Szenen einschränkt, da die ERS-Tandemmission nur in einem begrenzten Zeitraum durchgeführt wurde und für den ASAR-Sensor im ENVISAT-Satelliten nichts vergleichbares existiert.

¹das Produkt der Amplituden aus Master und Slave

²d.h. ein Bild mit nur einem Tag zeitlichen Abstand

5.1.2 Feinregistrierung im Interferogrammstapel

Wie schon erwähnt, wurde das Verfahren der Feinregistrierung von Hooper verbessert, um auch die Verarbeitung besonders langer Basislinien zu ermöglichen. In einem herkömmlichen Verfahren würden aus jedem Slave getrennt Ausschnitte entnommen werden und mit dem Masterbild korreliert werden. Mit den beobachteten Offsets (Differenz zwischen Master- und Slave-Position) kann ein Polynom geschätzt werden, das die Masterposition auf die entsprechende Slave-Position abbildet. Bei großen räumlichen Basislinien kann die Kreuzkorrelation, obwohl diese auf Basis der Amplituden durchgeführt wird und damit relativ robust ist [7], versagen. Um lange Basislinien zwischen zwei Bildern in der Feinregistrierung zu vermeiden, wird der Master auf alle Bilder koregistriert, deren Basislinie kleiner als ein Schwellwert ist und jeder Slave wird auf die N nächsten Bilder koregistriert, wobei der Basislinien-Schwellwert für die direkte Registrierung auf den Master und N vom Anwender passend gewählt werden müssen (Standard sind 300 m für die Basislinie und Registrierung auf die drei nächsten Slaves). Die Bestimmung der Polynomkoeffizienten wird dann durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten mit dem folgenden funktionalen Modell erreicht:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta x_{m,i}^n \\ \Delta x_{m,i+1}^n \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots \\ \cdots & 1 & x_i^m & y_i^m & \cdots & -1 & -x_i^n & -y_i^n & \cdots \\ \cdots & 1 & x_{i+1}^m & y_{i+1}^m & \cdots & -1 & -x_{i+1}^n & -y_{i+1}^n & \cdots \\ \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ a_{00}^m \\ a_{10}^m \\ a_{01}^m \\ \vdots \\ a_{00}^n \\ a_{10}^n \\ a_{01}^n \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5.1.1)$$

Hierbei wird z.B. der i -te Offset $\Delta x_{m,i}^n$ zwischen den Slaves m und n als Differenz der Offsets zwischen Slave m und Master und Slave n und Master ausgedrückt, wobei $x_i^{m/n}$ und $y_i^{m/n}$ die Positionen der Patches in den Slaves bezeichnen. Die Beobachtungen werden hierbei auf Basis des jeweiligen Kreuzkorrelationswertes nach Bamler gewichtet [9].

Für die Entzerrung in die Mastergeometrie wird allerdings nicht das Polynom beschrieben durch die Koeffizienten $a_{o,p}^k$ in Gleichung (5.1.1) benötigt, das jeder Slave-Position die Verschiebung auf die Masterposition zuordnet, sondern ein Polynom, das einem entsprechenden Punkt im Master eine Position im Slave (bzw. eine Verschiebung auf diese Position) zuordnet. Zur Berechnung dieses gesuchten Polynoms wird das bisher gefundene Polynom auf dem Slavegitter ausgewertet. Die Verschiebungen des i -ten Korrelationsfensters im m -ten Slave in x -Richtung (es tut hier nichts zur Sache, ob es sich dabei um Pixel- oder Linierichtung handelt) an der Stelle (x_i^m, y_i^m) auf das Masterkoordinatensystem wird mit $\Delta x_{m,i}^0$ bezeichnet. Mit den entsprechenden Koordinaten dieses Verschiebungswertes im Mastergrid $x_i^0 = x_i^m + \Delta x_{m,i}^0$ und $y_i^0 = y_i^m + \Delta y_{m,i}^0$ kann das geforderte Polynom durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten mit dem folgenden funktionalen Modell be-

rechnet werden:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ -\Delta x_{m,i}^0 \\ -\Delta x_{m,i+1}^0 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \\ \dots & 1 & x_i^0 & y_i^0 & x_i^0 x_i^0 & \dots \\ \dots & 1 & x_{i+1}^0 & y_{i+1}^0 & x_{i+1}^0 x_{i+1}^0 & \dots \\ \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ b_{00}^m \\ b_{10}^m \\ b_{01}^m \\ b_{11}^m \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5.1.2)$$

Die ermittelten Verschiebungen enthalten im Allgemeinen Ausreißer, die vor der Schätzung des ersten Polynoms nach Gleichung (5.1.1) entfernt werden müssen. Dieses geschieht im ursprünglichen StaMPS-Algorithmus nach der in DORIS implementierten Methode des Data-Snooping nach Baarda [13] (siehe zusätzlich [25] für eine Erläuterung des Data-Snoopings). Dieses Verfahren reagiert sehr empfindlich auf die angenommene apriori Genauigkeit der Beobachtungen und neigt dazu große Teile der guten Daten zu entfernen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein RANSAC-Algorithmus verwendet (siehe [1]). Dieser erhält als Eingabe die beobachteten Verschiebungen und die korrespondierenden Positionen. Im Rahmen des RANSAC-Algorithmus wird eine bestimmte Anzahl von Iterationen durchgeführt, wobei in jeder Iteration eine Untermenge der Daten zufällig ausgewählt wird, so dass die gesuchten Parameter gerade eindeutig bestimmt werden können. Nach der Schätzung der Parameter wird für die restlichen Daten durch Einsetzen der bekannten Stützpunkte in die berechnete Polynomgleichung eine Verschiebung geschätzt. Die Differenz zwischen berechneten und "gemessenen" Verschiebungen wird mit einem Schwellwert (hier ein Zehntel eines Pixels) verglichen. Ist der Fehler einer Verschiebung kleiner als dieser Schwellwert, gehört die Verschiebung bezüglich dieser Schätzung zu den Inliern, sonst gehört sie zu den Outliern. Jede Schätzung bezüglich einer Untermenge der Daten wird über die Anzahl der Inlier bewertet. Die Schätzung mit den meisten Inliern wird als richtig erachtet und alle Verschiebungen, die bezüglich dieser Schätzung zu den Outliern gehören, werden verworfen. Dieses Verfahren hat in den meisten Fällen deutlich bessere Ergebnisse geliefert als das Data-Snooping. Natürlich hängt der Erfolg des Verfahrens auch von der gesetzten Fehlergrenze ab, die für die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit auf den zehnten Teil eines Pixels gesetzt wurde, was als sehr strenge Fehlergrenze angesehen werden kann (vgl. Einfluss eines Registrierungsfehlers auf die Kohärenz in Abschnitt 3.4.5). Letztlich ist der RANSAC ein sehr robustes Verfahren mit einem hohen Bruchpunkt (siehe [25] für eine Definition des Bruchpunktes). Die einzige Voraussetzung für das Gelingen des Verfahrens ist, dass die fehlerfreien Beobachtungen im Rahmen der gesetzten Fehlergrenze die größte zueinander konsistente Gruppe bilden.

5.2 Identifikation der Persistent Scatterer

Der Identifikationsschritt des StaMPS-Algorithmus, dessen Ergebnis eine Gruppe von Punkten im Interferogramm ist, die ein niedriges Phasenrauschen aufweisen, ist im Vergleich zum Algorithmus nach Ferretti oder dem STUN-Algorithmus recht aufwendig. Die Erweiterung des Identifikationsschrittes ist vor allem durch das ursprüngliche Einsatzgebiet des Algorithmus bedingt. Dieser wurde insbesondere für unbesiedelte Gegenden entwickelt, in denen die Identifikation von PS z.B. durch Schwellwertbildung auf Basis

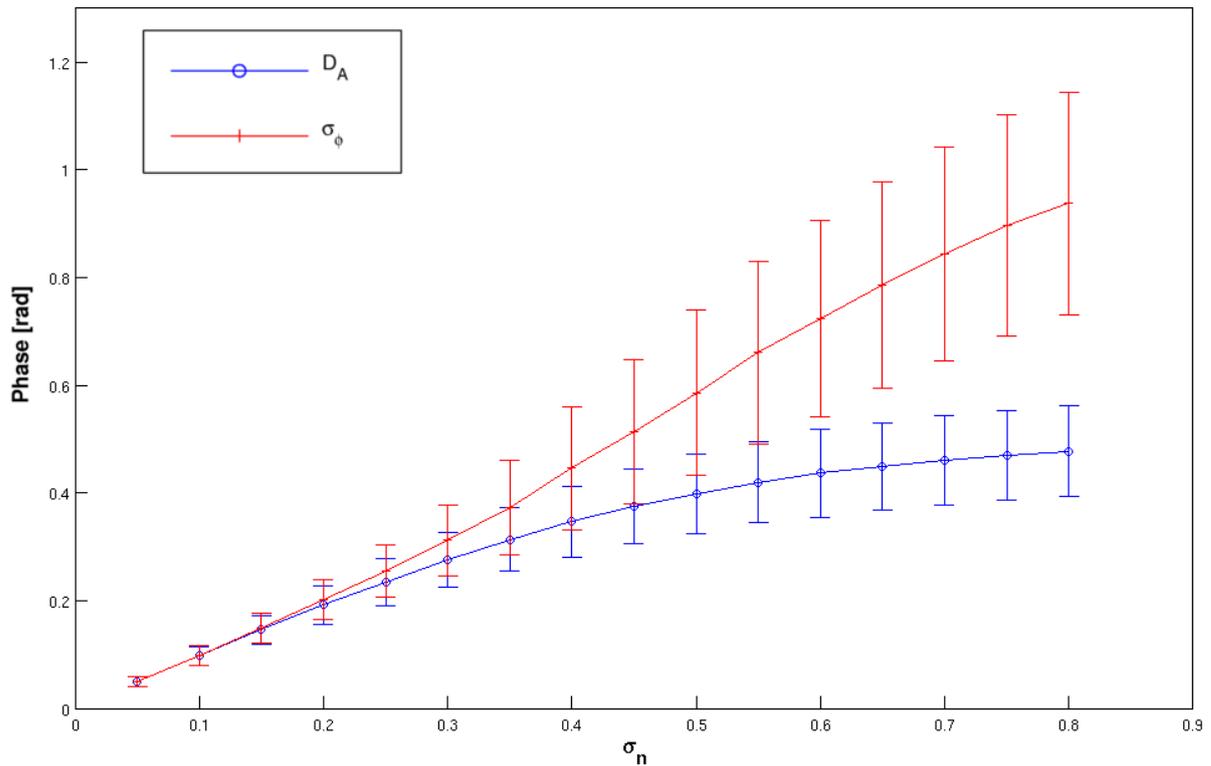


Abbildung 5.2: Aus simulierten Signalen berechnete Amplitudendispersionen und Phasenstandardabweichungen für verschiedene Signal-Rausch-Verhältnisse. Die rote Kurve zeigt die Phasenstandardabweichung. Die blaue Kurve zeigt die Amplitudendispersion. Die dargestellten Fehlerbalken kennzeichnen den Bereich einer Standardabweichung. Simulation ist angelehnt an [3, 9]

der Amplitudendispersion nicht zufriedenstellend funktioniert. Deshalb wird eine Kombination aus Amplituden- und Phasenanalyse verwendet, um PS zu identifizieren.

5.2.1 Analyse der Amplitude

Die Analyse der Amplitude wird auf Basis des in [3] beschriebenen Amplitudendispersionsindex durchgeführt. Dieser ist definiert als Variationskoeffizient der Amplitude. Nach [3] ist die Amplitudendispersion nur bei gutem Signal-Rausch-Verhältnis ein annehmbarer Schätzer für das Phasenrauschen, wobei in [9] festgestellt wird, dass dieses zumeist nur in städtischen Gebieten mit einem dichten Netz starker Streukörper (hohe Amplitude) erfüllt ist. Einen Eindruck über die Qualität der Schätzung der Phasenstandardabweichung mit dem Dispersionsindex ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Diese zeigt den simulierten Verlauf des Amplitudendispersionskoeffizienten D_A und der Phasenstandardabweichung σ_ϕ in Abhängigkeit vom Signalrauschen σ_n . Bei der Simulation wurde ein Signalmodell der Form $z_i = g + n_i$ verwendet, wobei das Signal g o.B.d.A. konstant zu Eins gesetzt wurde, und n_i durch eine komplexe Gaussverteilung beschrieben wurde. Real- und Imaginärteil des Rauschterms werden hierbei als unkorreliert, erwartungswertfrei und

mit gleicher Standardabweichung σ_n angenommen. Für jedes σ_n werden während der Simulation 5000 Werte von D_A bzw. σ_ϕ berechnet und gemittelt. Jeder dieser 5000 Werte für D_A bzw. σ_ϕ wird als Mittel aus 34 Einzelrealisierungen des Signals berechnet. Diese Simulation folgt der Vorgabe von [3] und ist bereits in [9, 16] reproduziert. In Abbildung 5.2 kann man zunächst die Eignung der Amplitudendispersion als Schätzer für das Phasenrauschen bei gutem Signal-Rausch-Verhältnis erkennen. Bei zunehmender Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses neigt der Amplitudendispersionskoeffizient aber dazu, wie schon in Abschnitt 4.2.1 und in [16] erwähnt, das Phasenrauschen zu unterschätzen. Nach [9] ist auch zu bedenken, dass die Variabilität eines Wertes D_A bei gegebenem Rauschniveau σ_n (eingezeichnete Fehlerbalken) nicht wirklich aussagekräftig ist. Hilfreicher wäre in diesem Fall der Fehler in der Abschätzung des Rauschniveaus bei gegebenem Dispersionindex D_A . Bei der Anwendung auf einen Bildstapel sucht man schließlich Bereiche mit einem niedrigem Rauschniveau, wobei man annimmt, dass dieses in Bereichen mit niedriger Amplitudenfluktuation gewährleistet ist. Ist der Fehler bei der Abschätzung des Rauschniveaus aus der Amplitudenvariation allerdings zu groß, muss das nicht unbedingt richtig sein. Nach [9] wäre der Bereich einer Standardabweichung auf der σ_n -Achse bei einer Amplitudendispersion von $D_A = 0,3$ nach unten durch $0,28$ und nach oben durch $0,4$ begrenzt. Ausgehend von diesen Grenzen würde der Fehler in der Schätzung von σ_ϕ (rote Fehlerbalken) einen Bereich für das Phasenrauschen von $0,25$ bis $0,54$ bedeuten.

Aus den genannten Gründen wird eine Kombination aus Amplituden- und Phasenanalyse verwendet, wobei der Amplitudendispersionskoeffizient im Wesentlichen in einem Vorauswahlschritt eingesetzt wird, um die Recheneffizienz zu steigern. Der Schwellwert kann relativ großzügig $D_A \leq 0,4$ (Vergleiche hierzu den in [3] vorgeschlagenen Schwellwert von $0,25$) gesetzt werden, was nach [9] die Anzahl der zu prozessierenden Interferogrammpunkte um eine Größenordnung verringert. Allerdings kann die Phasenanalyse auch ohne eine vorherige Schwellwertbildung durchgeführt werden, was aber die Rechenzeit deutlich erhöht. Zusätzlich wird die Amplitudendispersion in der Auswahl der PS neben der Kohärenz als Merkmal eingeführt.

5.2.2 Analyse der Phase

Die Punkte, die im Rahmen des Vorauswahlschrittes nicht aussortiert worden sind, werden einer weitergehenden Phasenanalyse unterzogen. Diese dient im Wesentlichen der Isolation des Phasen-Rauschterms. Hierzu wird die aufgewickelte Phase im i -ten differentiellen Interferogramm an der Position x als Summe einzelner Phasenbeiträge dargestellt:

$$\phi_{int,x,k}^w = W\{\phi_{def,x,i} + \phi_{atm,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i} + \phi_{n,x,i}\} \quad (5.2.1)$$

Die Terme auf der rechten Seite von Gleichung (5.2.1) sind die Phasenbeiträge der Deformation $\phi_{def,x,i}$, der Atmosphäre $\phi_{atm,x,i}$, der Orbitfehler $\Delta\phi_{orb,x,i}$, des Blickwinkelfehlers, der sich aus den Anteilen des Höhenfehlers und des Fehlers durch nichtzentrale Lage des Streukörpers in Entfernungsrichtung zusammensetzt, und des Phasenrauschens $\phi_{n,x,i}$. Auf die Modellierung des Fehlers durch die nichtzentrale Lage eines Pixels in Azimutrichtung wird nach [9] wegen einer möglichen Störung des Schätzwertes für die Deformation verzichtet. Der beiden Anteile des Blickwinkelfehlers können nach [16] nicht getrennt werden,

Tabelle 5.1: Überblick über die räumlichen und zeitlichen Autokorrelationseigenschaften der Phasenanteile aus Gleichung (5.2.1)

Phasenanteil	räuml. Korrelation	zeitl. Korrelation
$\phi_{def,x,i}$	ja	ja
$\phi_{atm,x,i}$	ja	nur Masteranteil
$\Delta\phi_{orb,x,i}$	ja	nur Masteranteil
$\Delta\phi_{\theta,x,i}$	zum Teil	nein
$\phi_{n,x,i}$	nein	nein

wenn alle Akquisitionen mit derselben Trägerwellenlänge arbeiten und sind deshalb in einem Term zusammengefasst. Anzumerken ist, dass der Blickwinkelfehler proportional zur effektiven Basislinie ist, was bei der Schätzung dieses Anteils ausgenutzt werden kann. Die Trennung der einzelnen Phasenanteile, die weitgehend ohne funktionale Modellierung der einzelnen Anteile auskommt, basiert auf Annahmen über das räumliche und zeitliche Verhalten der Beiträge. Einen Überblick über die angenommenen Autokorrelationseigenschaften gibt Tabelle 5.1. Es ist anzumerken, dass der Blickwinkel in dieser Tabelle als zeitlich nicht korreliert dargestellt wird. Allerdings hängt das von der zeitlichen Verteilung der effektiven Basislinien ab, denen der jeweilige Blickwinkelfehler proportional ist. Sind diese linear in der Zeit angeordnet, korreliert dieser Term auch mit der Zeit.

Zunächst muss der Rauschterm isoliert werden, um die Phasenstabilität beurteilen zu können. Dazu müssen die ersten vier Terme auf der rechten Seite von Gleichung (5.2.1) für jeden Punkt geschätzt und von der gemessenen Phase abgezogen werden. Die ersten drei und Teile des vierten Terms sind räumlich korreliert und können nach [9] mit einer adaptiven Bandpassfilterung geschätzt werden. Diese Bandpassfilterung basiert auf der Kombination eines einfachen Tiefpassfilters mit einem adaptiven Filter im Frequenzbereich, wobei die Übertragungsfunktion des adaptiven Teils des Filters auf Basis des geglätteten Datenspektrums berechnet wird. Die Konstruktion dieses adaptiven Filteranteils ist an den Goldsteinphasenfilter [14] angelehnt. Für die Anwendung dieser Filtertechnik muss das unregelmäßige Raster der vorläufig ausgewählten Punkte auf ein regelmäßiges Raster transformiert werden, wobei die Gitterweite hinreichend klein gewählt werden muss, so dass über ein Element dieses Gitters keine starke Variation in der Phase stattfindet (typische Werte wären 40 bis 100 m)[9]. Das Filter arbeitet wie das Goldsteinfilter auf einzelnen Ausschnitten des Bildes (gefensterte Fouriertransformation). Die typische Größe dieser Fenster liegt bei 32x32 oder 64x64 Zellen des vorher erzeugten Rasters. Die Filterung wird iterativ durchgeführt, wobei jede Rasterzelle im ersten Schritt mit dem Kehrwert der zugehörigen Amplitudendispersion gewichtet wird³. In späteren Iterationen wird eine Rasterzelle entweder mit dem Signal-Rausch-Verhältnis, das für jeden Bildpunkt aus den isolierten Rauschtermen abgeschätzt werden kann, oder mit der quadrierten Wahrscheinlichkeit, dass ein verarbeiteter Punkt ein PS ist⁴, gewichtet. Das

³die Amplitude der Rasterzelle wird auf diesen Wert gesetzt

⁴Die Methode diese Wahrscheinlichkeit zu berechnen wird später noch erläutert und ist abweichend zu [9] nicht als Kehrwert der quadrierten PS-Wahrscheinlichkeit definiert

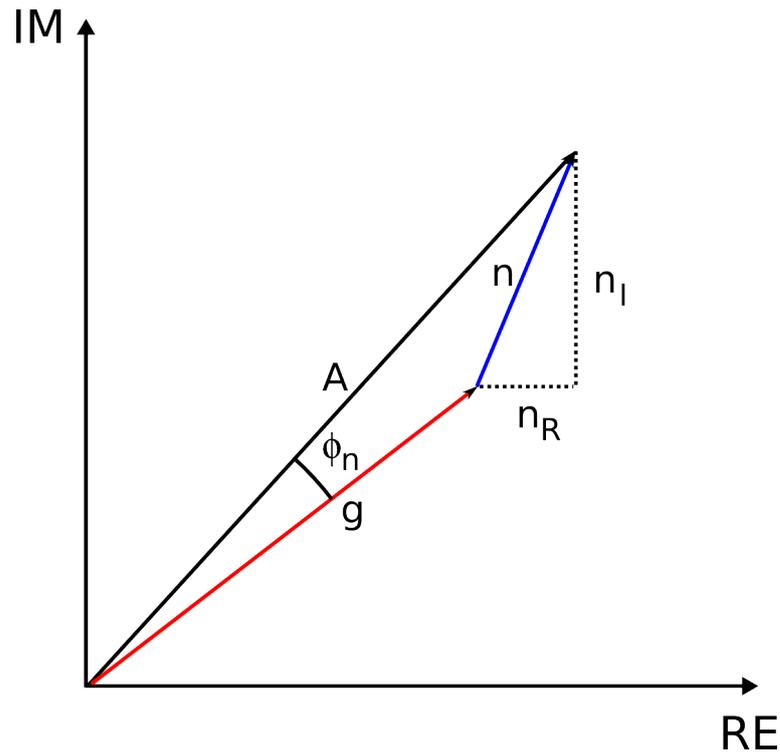


Abbildung 5.3: Signalmodell nach [9] zur Berechnung des SNR bei bekannter Amplitude A und bekanntem Phasenrauschen ϕ_n . Das Gesamtsignal ergibt sich hierbei einfach als Summe eines Signals mit konstanter Amplitude und einem Rauschvektor n , der durch einen zirkular komplex gaussverteilten Prozess beschrieben wird, wobei Real- und Imaginärteil n_R bzw. n_I unkorreliert angenommen werden.

Signal-Rausch-Verhältnis ist dabei gegeben durch:

$$SNR = \frac{g_x}{\sigma_{n,x}} \quad (5.2.2)$$

Die rechte Seite von Gleichung (5.2.2) wird hierbei durch den Quotienten aus Signalstärke g_x und Standardabweichung des Rauschens $\sigma_{n,x}$ gebildet. Das entsprechende Signalmodell ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Wenn die Amplitude A und das Phasenrauschen bekannt sind, kann das Signal-Rausch-Verhältnis auf Basis dieses Signalmodells berechnet werden. So kann die Stärke des eigentlichen Signals g_x an der Stelle x nach der folgenden Formel geschätzt werden [9]:

$$\hat{g}_x = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K A_{x,i} \cos \phi_{n,x,i} \quad (5.2.3)$$

Die Signalstärke wird also für jeden Punkt und jedes Interferogramm einfach durch Projektion der Amplitude auf die Richtung des Signalvektors bestimmt, die durch das bekannte Phasenrauschen gegeben ist. Der endgültige Schätzwert ergibt sich dann als arithmetisches Mittel über den Stapel. Die Signalvarianz ergibt sich für jeden ausgewählten Punkt als Quadratmittel über die Rauschterme (Real- und Imaginärteil) in allen Interferogrammen:

$$\hat{\sigma}_{n,x}^2 = \frac{1}{2 \cdot N} \sum_{i=1}^K (n_{I,x,i}^2 + n_{R,x,i}^2) = \frac{1}{2 \cdot N} \sum_{i=1}^K (A_{x,i}^2 \sin^2 \phi_{n,x,i} + (A_{x,i} \cos \phi_{n,x,i} - g_x)^2) \quad (5.2.4)$$

Mit dem schon bestimmten Schätzwert für die Signalstärke ergibt sich die Varianz zu:

$$\hat{\sigma}_{n,x}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^K A_{x,i}^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^K A_{x,i} \cos \phi_{n,x,i} \right)^2 \right) \quad (5.2.5)$$

Die Filterung selbst wird jeweils für Ausschnitte des Rasters und für jedes Interferogramm getrennt durchgeführt, wobei sich die Ausschnitte um die Hälfte bzw. ein Viertel der Fensterbreite überlappen. Für jeden Ausschnitt muss ein Anteil der Übertragungsfunktion des Filters neu berechnet werden, da dieser vom Spektrum des aktuellen Ausschnitts abhängt. Die Übertragungsfunktion des Filters wird durch diesen adaptiven Anteil und einen konstanten Tiefpassanteil in Abhängigkeit der Frequenzen f_x und f_y wie folgt gebildet:

$$G(f_x, f_y) = L(f_x, f_y) + \beta \cdot \left(\frac{H(f_x, f_y)}{\bar{H}(f_x, f_y)} - 1 \right)^\alpha \quad (5.2.6)$$

Hierbei kennzeichnet $L(f_x, f_y)$ die Übertragungsfunktion des Butterworth-Filters fünfter Ordnung, die bis zu einer Grenzfrequenz (diese Frequenz korrespondiert typischerweise mit 800 m räumlicher Wellenlänge) einen horizontalen Verlauf aufweist und danach rasch abfällt. Der adaptive Teil der Übertragungsfunktion ist durch $H(f_x, f_y)$ gegeben. Dieser wird aus dem Spektrum der Daten berechnet, was an die Konstruktion des Goldsteinphasenfilters angelehnt ist [14]. Hierzu wird das Spektrum des Ausschnitts $Z(f_x, f_y)$ mit einem Gaußfilter GW geglättet (typische Größe des Gaussfilters ist 7×7). Der adaptive Anteil der Übertragungsfunktion wird dann durch Bilden des Betrages⁵ aus dem geglätteten Spektrum gewonnen:

$$H(f_x, f_y) = |Z(f_x, f_y) * GW| \quad (5.2.7)$$

Die Glättung wird dabei durch den Faltungsoperator $*$ bezeichnet. Schließlich bezeichnen $\bar{H}(f_x, f_y)$ den Median von $H(f_x, f_y)$ und α und β Gewichtsparameter, die nach [9] typischerweise mit 1 und 0,3 angenommen werden.

Wie schon erwähnt, liefert die Filterung Schätzungen für die ersten drei und einen Teil des vierten Phasenanteils auf der rechten Seite von Gleichung (5.2.1). Nach Rücktransformation der gefilterten Phasenwerte auf das unregelmäßige Raster der PS-Kandidaten, wird diese Schätzung der räumlich korrelierten Signalanteile $\hat{\phi}_{sc,x,i}^w$ von der ursprünglichen Phase abgezogen (wobei nach der Differenzbildung eine erneute Transformation in das Intervall $[-\pi; \pi)$ stattfindet).

$$W\{\phi_{int,x,i}^w - \hat{\phi}_{sc,x,i}^w\} = W\{\phi_{def,x,i}^{nc} + \phi_{atm,x,i}^{nc} + \Delta\phi_{orb,x,i}^{nc} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc} + \phi_{n,x,i}^{nc}\} \quad (5.2.8)$$

Hierbei bezeichnet der Index nc eine räumlich nicht korrelierte Größe. Nach den Annahmen über die Autokorrelationseigenschaften der Phasenanteile (siehe Tabelle 5.1) sind

⁵Die Daten sind komplex, so dass es sich hier um die Amplitude handelt

die ersten drei Terme vernachlässigbar klein und können zu $\delta_{x,i}$ zusammengefasst werden. Der Phasenanteil des Blickwinkelfehlers $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ ist nach [9] eine lineare Funktion des Blickwinkelfehlers $\Delta\theta_x$, der wiederum vom Höhenfehler des Geländemodells und der nicht-zentralen Lage des Streukörpers in der Auflösungszelle in Entfernungsrichtung abhängt. Dieser lineare Zusammenhang gilt auch für den räumlich nicht korrelierten Phasenanteil des Blickwinkelfehlers $\Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc}$, sofern er zeitlich dieselben Frequenzanteile enthält wie der gesamte Phasenanteil des Blickwinkelfehlers [9]. Da keine Korrelation zwischen Basislinie und Rauschen bzw. Residuenterm $\delta_{x,i}$ angenommen wird, kann der Anteil des Blickwinkelfehlers durch eine lineare Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden, wobei die Basislinie die unabhängige und die Phasendifferenz $W\{\phi_{int,x,i}^w - \hat{\phi}_{sc,x,i}^w\}$ die abhängige Variable dieser Regression ist. Zu Bestimmen sind Steigung (entspricht den Einfluss des Blickwinkelfehlers) und Achsenabschnitt (repräsentiert den Einfluss des Masterrauschens siehe [9]) der Geraden. Umschreiben von Gleichung (5.2.8) liefert dann:

$$W\{\phi_{int,x,i}^w - \hat{\phi}_{sc,x,i}^w\} = W\left\{\frac{4\pi}{\lambda}B_{\perp,x,i}\Delta\theta_x^{nc} + \phi_{n,x,i}^{nc} + \delta_{x,i}\right\} \quad (5.2.9)$$

Die Inversion der Beobachtungsgleichungen gegeben durch Gleichung (5.2.9) für einen Punkt ist nichtlinear, da die Phasenwerte aufgewickelt sind. Im StaMPS-Paket wird deshalb ein maximaler Blickwinkelfehler (als entsprechender Höhenfehler im DGM, wobei typische Werte im Bereich von 10m liegen) angenommen. Dieser legt die Größe des Lösungsraums für die Parameter fest. Dieser Lösungsraum wird durchsucht, indem ein Wert für den Blickwinkelfehler angenommen und mit diesem Schätzwert für den entsprechenden Phasenanteil, eine Ensemble-Kohärenz, definiert durch Gleichung (5.2.11), berechnet wird. Der Blickwinkelfehler, der zur maximalen Kohärenz führt, wird als Näherungswert für die Regression genutzt, wobei davon ausgegangen wird, dass das Problem in einer lokalen Umgebung linear ist. Die jeweiligen Blickwinkelfehler werden ausgehend von einer Grenze des Suchraums um einen bestimmten Wert derart inkrementiert, dass der korrespondierende Phasenanteil sich um $\pi/4$ erhöht.

Die Schätzung des Phasenanteils des Blickwinkelfehlers wird wiederum von der Phase in Gleichung (5.2.9) abgezogen, wodurch sich die folgende Restphase ergibt:

$$W\{\phi_{int,x,i}^w - \hat{\phi}_{sc,x,i}^w - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc}\} = W\{\phi_{n,x,i}^{nc} + \delta'_{x,i}\}, \quad (5.2.10)$$

mit der Summe der Differenzen zwischen geschätzten und realisierten Phasenanteilen $\delta'_{x,i} = \delta_{x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc} + \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc}$. Nimmt man an, dass das räumlich unkorrelierte $\phi_{n,x,i}^{nc}$ und das gesamte Rauschen $\phi_{n,x,i}$ ungefähr gleich, und die Summe der Residuen der Schätzungen $\delta'_{x,i}$ ungefähr Null ist, kann auf Basis der Phase in (5.2.10) ein Maß für die Phasenstabilität definiert werden. Dieses ist an die Ensemble-Kohärenz, die vom Permanent Scatterer Verfahren nach Ferretti bekannt ist, angelehnt.

$$\gamma_x = \frac{1}{K} \left| \sum_{i=1}^K \exp(j \cdot (\phi_{int,x,i}^w - \hat{\phi}_{sc,x,i}^w - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc})) \right| \quad (5.2.11)$$

Dieses Maß ist nach [9] dem klassischen Konzept der Kohärenz nicht unähnlich, ist aber unabhängig von der Amplitude. Wie die klassische Kohärenz liegt auch dieses Maß immer

zwischen Null und Eins. Im Weiteren wird dieses Maß zusammen mit der Amplitudendispersion genutzt, um eine Auswahl an Punkten zu treffen, wobei ein Element dieser Auswahl nur mit einer bestimmten festgelegten Wahrscheinlichkeit (False Positive) kein PS sein darf. Hervorzuheben ist, dass der Schritt der Phasenanalyse iterativ vorgenommen wird bis das Quadratmittel der Änderungen aller γ_x unter einen Schwellwert fällt. Wird im Rahmen der Erläuterung des StaMPS-Algorithmus der Begriff Kohärenz verwendet, ist das durch (5.2.11) definierte Maß gemeint.

5.2.3 Auswahl der Persistent Scatterer nach Kohärenz

Die Auswahl der PS wird auf Basis der Amplitudendispersion und der Kohärenz durchgeführt. Hierzu wird für einen gegebenen Wert der Amplitudendispersion ein Schwellwert für die Kohärenz berechnet, so dass der Anteil an Punkten, die fälschlicherweise als kohärent erkannt wurden unter einer gesetzten Schwelle bleibt. Hierzu muss unter anderem die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Pixel ein PS ist, bekannt sein, was im vorherigen Kapitel für die Gewichtung der Punkte schon erwähnt wurde (ein Punkt wird dabei mit dem Quadrat der PS-Wahrscheinlichkeit gewichtet). Ausgangspunkt ist die Modellierung der gesamten Punktmenge als Mischung zweier Mengen (PS und Nicht-PS), die jeweils durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p_{PS}(\gamma_x)$ (PS) bzw. $p_R(\gamma_x)$ (Nicht-PS) repräsentiert werden. Die Dichtefunktion aller Punkte wird dann in Abhängigkeit der Kohärenz als gewichtetes Mittel der Dichtefunktionen beider Populationen modelliert [9]:

$$p(\gamma_x) = \alpha \cdot p_{PS}(\gamma_x) + (1 - \alpha)p_R(\gamma_x) \quad (5.2.12)$$

Der Faktor α ist hierbei der Anteil der PS an der Menge aller Punkte. Bevor ein Schwellwert abgeleitet wird, ist es für die Gewichtung der Punkte in der Filterung wichtig, die PS-Wahrscheinlichkeit berechnen zu können. Hierzu muss der Faktor α bestimmt werden, was durch Betrachtung der Menge aller Punkte mit einer niedrigen Kohärenz (z.B. kleiner 0,3) gelingt. Bildet man die Wahrscheinlichkeitsverteilung durch Integration von Gleichung (5.2.12) ergibt sich:

$$\int_0^{\gamma_m} p(\gamma_x)d\gamma_x = \alpha \cdot \int_0^{\gamma_m} p_{PS}(\gamma_x)d\gamma_x + (1 - \alpha) \int_0^{\gamma_m} p_R(\gamma_x)d\gamma_x \quad (5.2.13)$$

Ist die obere Integrationsgrenze γ_m klein genug, ist das Integral über die Dichte der PS-Population fast Null, da für PS niedrige Kohärenzen unwahrscheinlich sind, so dass sich für (hinreichend kleine γ_m) schreiben lässt:

$$\int_0^{\gamma_m} p(\gamma_x)d\gamma_x \approx (1 - \alpha) \int_0^{\gamma_m} p_R(\gamma_x)d\gamma_x \quad (5.2.14)$$

Diese Gleichung kann dafür genutzt werden den PS-Anteil zu bestimmen, indem das Integral der rechten Seite durch Simulation und das der linken Seite durch Analyse der Daten gelöst wird [9]. Bei der Simulation zur Lösung des Integrals der rechten Seite wird eine große Anzahl Phasen im Intervall $[-\pi; \pi)$ zufällig generiert. Jede simulierte Phase wird als Ergebnis der Phasenanalyse nach der Subtraktion der räumlich korrelierten Anteile aufgefasst (nach Gleichung (5.2.8)) und dementsprechend weiterverarbeitet. Das Ergebnis sind Kohärenzwerte für Punkte, deren Phasenwerte vollkommen zufällig sind. Das

zugehörige Integral der rechten Seite kann dann einfach durch Zählen der Punkte, deren Kohärenzen kleiner als der Schwellwert γ_m sind, ausgewertet werden. Das Integral der linken Seite kann auf die gleiche Weise unter Nutzung der Daten ausgewertet werden. Ist der PS-Anteil bekannt kann eine PS-Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Kohärenz berechnet werden [9]:

$$P(x \in PS) = 1 - \frac{(1 - \alpha)p_R(\gamma_x)}{p(\gamma_x)} \quad (5.2.15)$$

Die für die Punktauswahl erforderlichen Schwellwerte für die Kohärenz werden, wie schon erwähnt unter Berücksichtigung der Amplitudendispersion bestimmt, was eine Erweiterung des in Gleichung (5.2.12) dargestellten Modells notwendig macht. Hierbei wird der Anteil der PS an der gesamten Punktmenge als Funktion der Amplitudendispersion D_A betrachtet, was sinnvoll erscheint, da bei niedrigerer Amplitudendispersion der Anteil der PS höher sein dürfte. Zusätzlich werden die Wahrscheinlichkeitsdichten in Abhängigkeit von γ_x und D_A betrachtet, so dass Gleichung (5.2.12) erweitert wird zu:

$$p(\gamma_x, D_A) = \alpha(D_A) \cdot p_{PS}(\gamma_x, D_A) + (1 - \alpha(D_A))p_R(\gamma_x, D_A) \quad (5.2.16)$$

Nun wird die bedingte Dichtefunktion $p(\gamma_x | \hat{D}_A)$ betrachtet, für die man nach der beschriebenen Methode einen Wert für den PS-Anteil $\alpha(\hat{D}_A)$ berechnet, indem man die Punkte nach der Amplitudendispersion in Klassen einteilt und für jede Klasse das beschriebene Verfahren verwendet. Ist für jede Amplitudendispersionsklasse ein entsprechendes $\alpha(\hat{D}_A)$ bestimmt, können entsprechende Schwellwerte γ_{min} für die Kohärenzen γ_x aufgestellt werden. Hierbei ist die Wahrscheinlichkeit für False Positives entscheidend, die mit q bezeichnet wird. Diese ergibt sich als Quotient aus dem Anteil der ausgewählten nicht PS-Pixel und dem Gesamtanteil der ausgewählten Pixel, so dass der Kohärenzschwellwert γ_{min} mit der folgenden Bestimmungsgleichung berechnet werden kann:

$$\frac{(1 - \alpha(\hat{D}_A)) \int_{\gamma_{min}}^1 p_R(\gamma_x) d\gamma_x}{\int_{\gamma_{min}}^1 p(\gamma_x | \hat{D}_A)} = q \quad (5.2.17)$$

Im Allgemeinen ist bei größeren Werten der Amplitudendispersion mit kleineren Kohärenzwerten zu rechnen, was nach Annahme der Amplitudenvariation als Maß für die Phasenstabilität nahe liegt. Um bei steigendem Anteil von Nicht PS-Pixeln die Wahrscheinlichkeit für False Positives auf demselben Niveau zu halten, wird sich der Kohärenzschwellwert mit steigender Amplitudendispersion erhöhen. Nach [9] kann dieser Zusammenhang als linear angenommen werden, so dass mit den für jede Amplitudendispersionsklasse bestimmten Schwellwerten als Eingangsdaten eine Gerade nach kleinsten Quadraten geschätzt werden kann, was die Berechnung eines Kohärenzschwellwertes für beliebige Amplitudendispersionswerte ermöglicht.

5.3 Auswahl der Persistent Scatterer

Die im vorherigen Abschnitt gefundenen PS werden nach drei weiteren Kriterien ausgedünnt. Zunächst wird geprüft, ob die Pixel über den gesamten Stapel kohärent sind. Dieses ist notwendig, da Pixel, die über einen bestimmten Zeitraum stabil streuen und später ihr Streuverhalten ändern, trotzdem eine hohe Kohärenz aufweisen können. Um

diese Pixel zu identifizieren, wird die Standardabweichung der Kohärenzwerte jedes ausgewählten Pixels, die mit einem Bootstrap-Verfahren bestimmt wurde, mit einem gesetzten Schwellwert verglichen und das Pixel im Falle einer Überschreitung aus der Menge der PS entfernt [9].

Ein weiteres Kriterium ist die Distanz zwischen den gefundenen PS. Da ein phasenstabiles Pixel oft einen starken Streukörper enthält (was sich in einer niedrigen Amplitudendisersion zeigen würde), kann es vorkommen, dass dieser Streuer auch benachbarte Pixel dominiert. Zwar führt die veränderte Position zu Fehlern im Blick- und Schielwinkel, allerdings kann dieser Fehler für benachbarte Pixel, durch die Überabtastung während der Prozessierung, so klein werden, dass dieses Pixel zusätzlich zum wahren PS-Pixel ausgewählt wird [9]. Im entsprechenden Auswahlschritt wird das Pixel aus einer zusammenhängenden PS-Gruppe ausgewählt, das das beste Signal-Rausch-Verhältnis aufweist.

Schließlich können Pixel noch aufgrund ihres Rauschens aussortiert werden. Da der Einfluss der Atmosphäre von Aufnahme zu Aufnahme stark variiert und die Phasen aufgewickelt sind, sind absolute Phasenwerte für jedes Pixel über die Zeit dekorreliert. Bildet man allerdings Differenzen benachbarter PS-Pixel, wobei die Nachbarschaft über eine Delaunay-Triangulation bestimmt wird, hebt sich die Phasenmehrdeutigkeit heraus [9]. Für jede Kante liegt nun eine Zeitreihe von Phasendifferenzen vor, aus der man die Standardabweichung des Rauschens der Differenzphase ableiten kann, was durch Abziehen eines Tiefpassanteils und Berechnung der Standardabweichung gelingt. Ein Pixel wird dann aus der Menge der PS entfernt, wenn die zu diesem Pixel inzidente Kante mit der geringsten Standardabweichung einen gesetzten Schwellwert überschreitet.

5.4 Schätzung der Bewegung

Die Schätzung der Bewegung gliedert sich im Wesentlichen in drei Schritte, die iterativ durchgeführt werden (siehe Abbildung 5.1). Zunächst muss die Phase fortgesetzt werden. Dann wird mit der fortgesetzten Phase für jeden Punkt der korrelierte Blickwinkelfehler und die Master-Atmosphäre geschätzt und schließlich wird die Bewegung aus den möglichst fehlerfrei fortgesetzten Daten durch eine raum-zeitliche Filterung bestimmt. Iterativ werden hierbei die ersten beiden Schritte durchgeführt, wobei zunächst eine Phasenfortsetzung durchgeführt wird. Der räumlich korrelierte Blickwinkelfehler und die Master-Atmosphäre werden dann auf Basis der Interferogramme berechnet, die keine bzw. wenige Fehler in der Phasenfortsetzung aufweisen. Die erhaltenen Schätzungen werden anschließend von der fortzusetzenden Phase abgezogen, um das Ergebnis zu verbessern. Aus der verbesserten fortgesetzten Phase werden wiederum Schätzwerte für Blickwinkel- und Masteratmosphäre bestimmt, nachdem die entsprechenden Einflüsse der letzten Iteration wieder zur fortgesetzten Phase addiert worden sind. Dieses Verfahren wird durchgeführt bis alle Fehler beseitigt sind, bzw. bis sich keine Änderungen mehr ergeben. Die in diesem Schritt als Eingangsgröße genutzte Phase ist bereits um den Einfluss des nicht räumlich korrelierten Blickwinkelfehlers und des Masterrauschens bereinigt.

5.4.1 Phasenfortsetzung

Die Phasenfortsetzung wird in der verwendeten StaMPS-Version abweichend von [9] mittels eines Minimum-Cost-Flow Algorithmus durchgeführt (siehe entsprechendes Kapitel über Phasenfortsetzung). Hierfür wird die externe Software *snaphu* verwendet, die in [23] beschrieben ist. Um diese Software einsetzen zu können, müssen die Eingabedaten auf ein regelmäßiges Raster transformiert werden, was in diesem Fall über eine Nearest-Neighbour-Interpolation geschieht⁶.

Im Standardmodus für differentielle Interferogramme benötigt *snaphu* ein Raster mit Kohärenzwerten und die Größe der maximal erwarteten Diskontinuität (Anzahl von Phasenzyklen), um die Kostenfunktion aufzustellen (siehe [23] für Details). Im Rahmen des StaMPS-Algorithmus wird diese Kostenfunktion aber extern bestimmt, so dass letztlich eine Phasenfortsetzung nach gewichteten kleinsten Quadraten (implementiert durch den *snaphu*-Minimum-Cost-Flow Solver) durchgeführt wird. Die Berechnung der Gewichte erfolgt auf Basis der Signalvarianz der einzelnen PS-Kandidaten. Um diese abzuschätzen wird zunächst wie bei der Auswahl der Punkte nach dem Kantenrauschen (siehe vorheriges Kapitel) vorgegangen. Für eine Kante zwischen den Punkten x und y wird hierzu die Zeitreihe der Phasendifferenzen $\Delta_x^y \phi_i$ mit $i = 1, \dots, K$ betrachtet. Mit einem Gaußfilter werden die niedrigen Frequenzen der Zeitreihe $\mathbf{L}(\Delta_x^y \phi_i)$ bestimmt und abgezogen, was auf die Rauschterme führt, deren Varianz geschätzt wird:

$$\begin{aligned}\Delta_x^y \phi_{n,i} &= \Delta_x^y \phi_i - \mathbf{L}(\Delta_x^y \phi_i) \\ \Delta_x^y \sigma_n^2 &= D(\Delta_x^y \phi_{n,i})\end{aligned}\tag{5.4.1}$$

Hierbei bezeichnet $D(\cdot)$, den Dispersionsoperator, der für eine Zufallsgröße eine entsprechende Varianz liefert. Um die Varianz der gesamten Differenzphase zu erhalten, muss noch die Varianz des Signals berechnet werden, wobei einfach die geschätzten Rauschterme von der Gesamtphase abgezogen werden, um die Signalterme zu berechnen und analog zu Gleichung (5.4.1) eine Varianz geschätzt wird:

$$\begin{aligned}\Delta_x^y \phi_{s,i} &= \Delta_x^y \phi_i - \Delta_x^y \phi_{n,i} \\ \Delta_x^y \sigma_s^2 &= D(\Delta_x^y \phi_s)\end{aligned}\tag{5.4.2}$$

Die Gesamtvarianz ergibt sich dann als Summe der beiden Einzelvarianzen, was einer Varianzfortpflanzung bei einem Signalmodell analog zu Abbildung 5.3 entspricht.

$$\Delta_x^y \sigma^2 = \Delta_x^y \sigma_s^2 + \Delta_x^y \sigma_n^2\tag{5.4.3}$$

Aus den Varianzen der Phasendifferenzen für jede Kante müssen zwei Raster gewonnen werden, die als Eingabe für *snaphu* notwendig sind und die Varianzen der Phasendifferenzen in Zeilen bzw. Spaltenrichtung des Rasters enthalten. Dieses geschieht über die Delauny-Triangulation vorgegebene Nachbarschaft. Die Kosten für eine Phasendifferenz $\Delta\phi$ in beliebiger Richtung zwischen zwei benachbarten Zellen des Rasters kann als Quotient dieser Phasendifferenz und der entsprechenden Varianz $\sigma_{\Delta\phi}^2$ berechnet werden (vgl. [23]):

$$g(\Delta\phi) = \frac{\Delta\phi}{\sigma_{\Delta\phi}^2}\tag{5.4.4}$$

⁶Nearest Neighbour Interpolation generiert keine neuen Phasenwerte

Das Ergebnis der *snaphu*-Software ist ein Raster, das die Anzahl an Phasenzyklen enthält, die zur aufgewickelten Phase hinzuaddiert werden muss, um die fortgesetzte Phase zu erhalten.

5.4.2 Schätzung SCLA und Master-APS

Die fortgesetzte Phase nach Elimination des Einflusses des nicht räumlich korrelierten Blickwinkelfehlers ist nach [9] gegeben durch:

$$\phi_{int,x,i} = \phi_{def,x,i} + \phi_{atm,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^{corr} + \Delta\phi_{n,x,i} + 2k_{x,i}\pi \quad (5.4.5)$$

Hierbei ist $k_{x,i}$ die verbleibende ganzzahlige Phasenmehrdeutigkeit, die für alle Punkte x gleich ist, wenn die Phasenfortsetzung keine Fehler enthält. Diese Phasenmehrdeutigkeit ist im Allgemeinen ungleich Null, da absolute Werte für die Phase nicht mehr rekonstruiert werden können. Da außer dem räumlich korrelierten Blickwinkelfehler keiner der Phasenanteile in Gleichung (5.4.5) mit der effektiven Basislinie korreliert⁷, kann dieser Anteil wieder analog zum nicht korrelierten Basislinienfehler geschätzt werden, wobei die Beobachtungsgleichungen in diesem Fall aufgrund der fortgesetzten Phase linear sind. Die Schätzung kann nach L^2 - bzw. L^1 -Norm durchgeführt werden, wobei die Wahl der Fehler-Norm von der erwarteten Anzahl der Fehler in der Phasenfortsetzung abhängt. Die L^1 -Norm dürfte bessere Ergebnisse liefern, wenn Fehler in der Phasenfortsetzung vorhanden sind. Auf fehlerfreien Daten sollte aber⁸ die L^2 -Norm bessere Ergebnisse liefern.

Die geschätzten Parameter sind die Geradensteigung, die den Blickwinkelfehler beschreibt, und der Achsenabschnitt der Geraden, der eine Schätzung der Master-Atmosphäre und des Master-Orbitsfehlers darstellt. Die korrespondierenden Phasenanteile werden mit $\Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{corr}$ und $\hat{\phi}_{atm,x,i}^m$ bzw. $\hat{\Delta}\hat{\phi}_{orb,x,i}^m$ bezeichnet. Betrachtet man die räumliche Ausprägung beider Parameter sollte diese recht glatt aussehen, da es sich um räumlich korrelierte Größen handelt. Abrupte Änderungen deuten auf Fehler in der Schätzung hin und können z.B. durch eine Tiefpassfilterung beseitigt werden.

5.4.3 Raum-Zeitliche Filterung

Die im vorherigen Schritt punktweise geschätzten Parameter werden vor der finalen Schätzung der verbleibenden Phasenanteile abgezogen, so dass die entsprechenden Phasenbeiträge schon beseitigt sind. Die Phase kann mit dieser Annahme dargestellt werden als⁹:

$$\phi_{int,x,k} = \phi_{def,x,i} + \phi_{atm,x,i}^s + \Delta\phi_{orb,x,i}^s + \Delta\phi_{n,x,i} + 2k_{x,i}\pi \quad (5.4.6)$$

Da die absoluten Phasenwerte aufgrund des $2k_{x,i}\pi$ -Terms dekorreliert sind, werden wieder Differenzen zwischen benachbarten Punkten gebildet, was diesen Term im Falle einer fehlerfreien Phasenfortsetzung eliminiert [9]. Die einzige zeitlich korrelierte Größe in Gleichung (5.4.6) ist der Phasenanteil der Deformation. Eine Hochpassfilterung über die Zeit

⁷es kann durchaus vorkommen, dass eine abrupte Deformation mit der effektiven Basislinie korreliert [10], was allerdings recht unwahrscheinlich ist

⁸Für diese Annahme muss man Normalverteilung voraussetzen

⁹Abweichend von [9]

(durch Abziehen der niedrigen zeitlichen Frequenzen $\mathbf{L}^T(\Delta_x^y \phi_{int,i})$) führt auf:

$$\Delta_x^y \phi_{int,i} - \mathbf{L}^T(\Delta_x^y \phi_{int,i}) \approx \Delta_x^y \phi_{atm,i}^s + \Delta_x^y \Delta \phi_{orb,i}^s + \Delta_x^y \Delta \phi_{n,i} \quad (5.4.7)$$

Die absoluten Werte für diesen Hochpassanteil erhält man durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten, die analog zur räumlichen Integration im Rahmen des STUN-Algorithmus durchgeführt wird. Schließlich wird das Signal nach Ableitung der absoluten Werte einer Tiefpassfilterung unterzogen, was den vorhandenen Rauschterm eliminiert, so dass sich ein Schätzwert für $\phi_{atm,x,i}^s + \Delta \phi_{orb,x,i}^s$ ergibt. Durch Umstellen von Gleichung (5.4.5) und Abziehen der geschätzten Phasenanteile ergibt sich die Deformation zu:

$$\phi_{def,x,i} = \phi_{int,x,k} + \hat{\phi}_{atm,x,i}^m - \hat{\phi}_{atm,x,i}^s + \hat{\phi}_{orb,x,i}^m - \hat{\Delta} \phi_{orb,x,i}^s - \hat{\Delta} \phi_{\theta,x,i}^{corr} - \Delta \phi_{n,x,i} - 2k_{x,i} \pi \quad (5.4.8)$$

Kapitel 6

Ergebnisse

Der im vorherigen Abschnitt beschriebene StaMPS-Algorithmus ist im Rahmen dieser Arbeit in Hinblick auf verschiedene Einstellungen getestet worden. Hierzu wurde ein Datensatz ausgewertet, der auch im Rahmen von [9] verwendet wurde. Diese geschieht zunächst in Hinblick auf die Validierung und die Erprobung der um den RANSAC-Algorithmus erweiterten Koregistrierung. Weiterhin werden Identifikation und Auswahlsschritt des Algorithmus bezüglich Qualität (vor allem Rauschniveau) und Dichte der gefundenen PS untersucht. Schließlich erfolgt eine Bewertung der erhaltenen Ergebnisse mit Bezug zur Auswertung in [9], die als Referenz angesehen wird.

Das Auswerteggebiet umfasst den Vulkan Alcedo auf den Galapagos-Inseln und ist als Übersichtskarte in Abbildung 6.1 dargestellt. Der ausgewertete Datensatz umfasst 15 SLC-Aufnahmen. Eine Aufstellung der einzelnen Aufnahmen mit den entsprechenden räumlichen und Doppler-Basislinien findet sich Tabelle 6.1. Die Verteilung der räumlichen Basislinien ist zusätzlich in Abbildung 6.2 dargestellt. Für die Koregistrierung ist es vor allem wichtig, dass die vorliegenden Basislinien gleichmäßig verteilt sind, so dass keine großen Lücken zwischen den Basislinien auftreten. Hierbei ist die Güte der Registrierung nicht direkt von der Länge der maximalen bzw. minimalen Basislinie abhängig, da Aufnahmen im Stapel immer auf ihre räumlichen Nachbarn registriert werden. In Abbildung 6.2 ist zu erkennen, dass durchaus Lücken vorhanden sind. So wird z.B. die Aufnahme vom 10.12.1998, wenn die Defaulteinstellungen der Koregistrierung angenommen werden, auf die drei räumlich benachbarten Aufnahmen registriert, was eine maximale (relative) Basislinie zwischen dieser Aufnahme und dem entsprechenden Partner in der Koregistrierung von etwa 500 m zur Folge hat. Zwar ist die Korrelation relativ robust, jedoch dürften die längeren Basislinien zu erhöhtem Rauschen in der interferometrischen Phase führen.

6.1 Ergebnisse der Koregistrierung

Die Koregistrierung, die im Rahmen des StaMPS-Algorithmus durchgeführt wird, identifiziert und eliminiert Ausreißer nach der Methode des Data-Snooping nach Baarda (siehe [25] für Details). Häufig wird die Anzahl der Beobachtungen hierbei derart verringert, dass eine Schätzung der Koregistrierungsparameter zwischen einem Bildpaar nicht mehr möglich ist. Zwar ist eine Bestimmung der Polynomkoeffizienten unter Umständen doch möglich, da der StaMPS-Algorithmus eine Aufnahme auf mehrere räumlich benachbar-

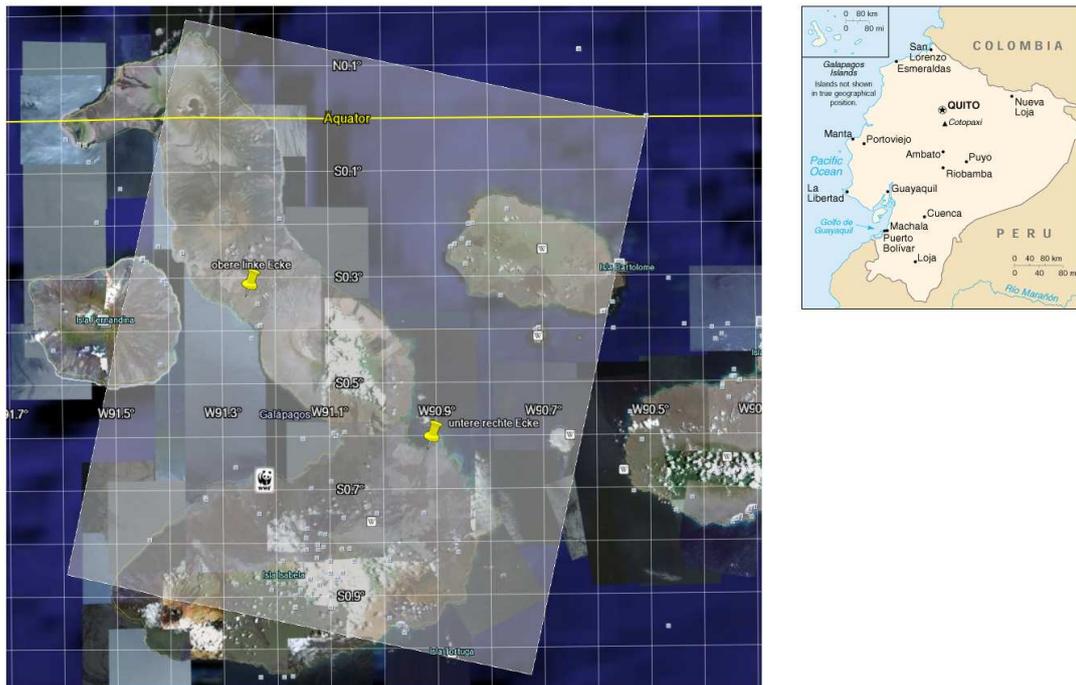


Abbildung 6.1: Der linke Teil der Abbildung zeigt das Auswertebereich, wobei die obere linke und die untere rechte Ecke des betrachteten Gebietes jeweils markiert sind. Überblendet wird auch der Bereich, der durch die Masteraufnahme am 03.02.2000 abgedeckt ist, dargestellt. Auf der rechten Seite ist eine Übersichtskarte mit der Lage der Galapagos-Inseln an der Westküste Südamerikas dargestellt

te Aufnahmen registriert, jedoch sollten die Registrierungs-paare mit weniger als zwölf Beobachtungen nach [10] aus der finalen Bestimmung der Parameter entfernt werden. Um die Leistung der alternativen Fehlersuche mit dem RANSAC-Algorithmus (siehe Abschnitt 5.1.2) zu beurteilen, werden die Aufnahmen, die in Tabelle 6.1 aufgeführt sind, mit dem ursprünglichen Verfahren und mit dem RANSAC-Verfahren bearbeitet. Die entsprechenden Ergebnisse werden dann verglichen. Hierbei wird für den RANSAC-Algorithmus ein Fehlerschwellwert von einem Zehntel einer Rasterzelle angenommen. Für das Data-Snooping nach Baarda wird ein Quantil von 1.97 für die Erkennung der Ausreißer (siehe [13]) angenommen. Bevor die groben Fehler mittels eines der Verfahren entfernt werden, werden die Daten auf Basis eines Korrelationsschwellwerts einer Vorauswahl unterzogen. Während dieser Schwellwert für den Data-Snooping-Algorithmus nach Baarda mit 0,3 angenommen wurde (Standardwert bei StaMPS), wurde er in der Vorauswahl für den RANSAC-Algorithmus auf 0,2 gesenkt.

Der wesentliche Vergleichspunkt ist die Anzahl und die Qualität der Zuordnungen. Diese werden in der Feinregistrierung bestimmt und fließen in die Schätzung der Transformationspolynome ein. Um die Ergebnisse beider Verfahren bewerten zu können, werden die für die Akquisitionen vom 10.12.1998 und 14.01.1999 bestimmten Verschiebungen untersucht.

Tabelle 6.1: Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen

Datum	Sensor	B_{\perp}	f_{DC}
15-Jun-1992	ERS-1	616	-301,24
16-Oct-1997	ERS-2	175	-677,10
05-Nov-1998	ERS-2	532	-574,81
10-Dec-1998	ERS-2	-917	-633,35
14-Jan-1999	ERS-2	-484	-574,48
18-Feb-1999	ERS-2	974	-447,77
25-Mar-1999	ERS-2	-407	-472,2
03-Feb-2000	ERS-2	0	-551,03
09-Mar-2000	ERS-2	-199	-421,53
13-Apr-2000	ERS-2	-275	-684,07
18-May-2000	ERS-2	-309	-594,90
22-Jun-2000	ERS-2	-453	-746,82
27-Jul-2000	ERS-2	-39	-667,34
05-Oct-2000	ERS-2	-338	-883,46
09-Nov-2000	ERS-2	-100	-908,65

In Abbildung 6.3 sind die Verschiebungsvektoren für das genannte Bildpaar und beide Verfahren vor dem Hintergrund des Amplitudenbildes der Aufnahme vom 14.01.1999¹ als rote Pfeile dargestellt. Anzumerken ist, dass die Verschiebungsvektoren in beiden Bildern nicht in ursprünglicher Länge dargestellt sind und die Skalierung der Vektoren in beiden Bildern unterschiedlich ist². Interessant ist in Abbildung 6.3 vor allem die Lage der gefundenen Verschiebungsvektoren. Die Verschiebungsvektoren liegen vor allem im rechten Teil des Bildes, obwohl beide Bilder fast den gleichen Ausschnitt der Erdoberfläche zeigen. Vor allem die mit dem schwarzen Pfeil in Abbildung 6.3 markierte Struktur ist in den beiden Amplitudenbildern enthalten und ähnlich ausgeprägt. Hier müssten sich zumindest einige gültige Verschiebungsvektoren ergeben. Fraglich ist auch die Entstehung der Gruppe von Verschiebungsvektoren in der oberen rechten Ecke, die insbesondere bei den mit dem RANSAC-Verfahren prozessierten Daten auffällt, da die Amplitudenbilder kaum Struktur in diesem Bereich aufweisen. Erwartete Verschiebungsvektoren finden sich vor allem um die Caldera des Vulkans und der Kante zwischen hellem und dunklem Bereich im mittleren bzw. rechten unteren Bildbereich. Schließlich fällt auf, dass Verschiebungsvektoren im Ergebnis des RANSAC-Algorithmus auf einer horizontalen Linie enden. Insgesamt ist die Verteilung der Verschiebungsvektoren relativ ungünstig, da diese meist zu Gruppen zusammengeballt auftreten. Zwar ist die als Inlier erkannte Datenmenge im RANSAC-Algorithmus größer, jedoch findet auch der RANSAC-Algorithmus keine gültigen Verschiebungsvektoren im linken Bildbereich. Es ist nun zu klären, ob die verworfenen Verschiebungsvektoren im Rahmen der Grobfehlererkennung herausgenommen werden oder schon durch den anfänglichen Kohärenzschwellwert eliminiert werden. Hierzu

¹Diese Aufnahme ist für dieses Paar der Master

²Maßstab wird von Matlab automatisch berechnet

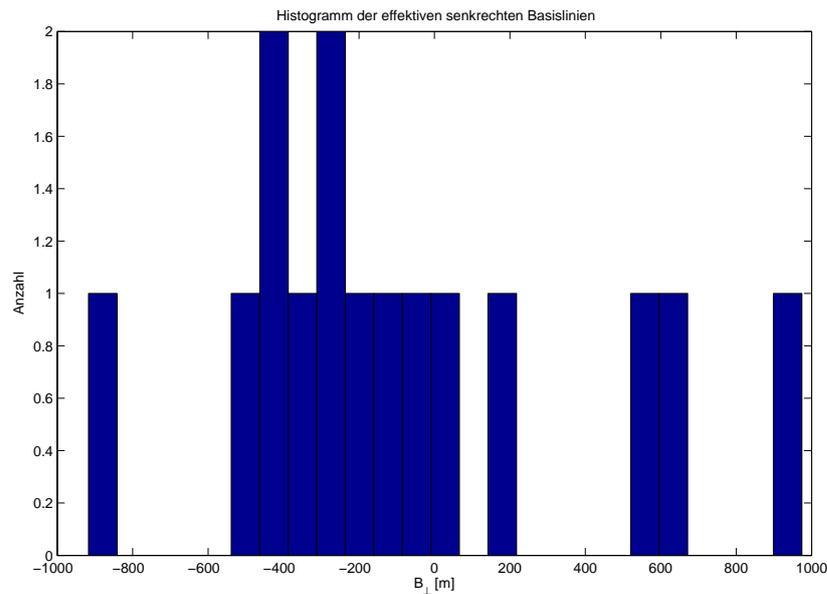


Abbildung 6.2: Histogramm der effektiven räumlichen Basislinien

sind in Abbildung 6.4 die vom RANSAC-Algorithmus verworfenen Verschiebungsvektoren dargestellt. Diese Beobachtungen zuzüglich den Inliern in Abbildung 6.3 weisen einen Korrelationsschwellwert von über 0,2 auf. Die restlichen Verschiebungsvektoren werden auf Grund zu geringer Korrelation verworfen. Da die Korrelationsfenster vor der Korrelation auf einem regelmäßigen Raster vorgegeben werden, so dass insgesamt 3600 dieser zu korrelierenden Fenster entstehen und beide Bilder fast denselben Ausschnitt der Erdoberfläche zeigen, müssen die Fenster an der durch den schwarzen Pfeil gekennzeichneten Struktur wegen zu geringer Korrelation verworfen worden sein. Zusätzlich scheinen die Verschiebungsvektoren in Abbildung 6.3 (rechts) und 6.4 auf einer Geraden mit konstanter Line-Koordinate zu beginnen bzw. zu enden. Diese Auffälligkeiten erklären sich bei Betrachtung von Abbildung 6.5, die die Position aller Korrelationsfenster in der Mastergeometrie des betrachteten Koregistrierungspaares (Aufnahme vom 14.01.1999) mit den entsprechenden Korrelationswerten zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Positionen der ursprünglichen 3600 Fenster nur über einen Teil der Mastergeometrie verteilen. Da beide Aufnahmen etwa denselben Ausschnitt der Erdoberfläche zeigen, könnten Korrelationsfenster in einem viel größeren Bereich des Masteramplitudenbildes vom 14.01.1999 verteilt werden. Die Ursache der schlechten Verteilung der Korrelationsfenster ist die Routine, die die Positionen dieser Fenster berechnet. Im Idealfall wäre die Schnittmenge der Aufnahmen für jedes Master-Slave-Paar in der Koregistrierung bekannt. Die Positionen der Fenster in der Mastergeometrie könnten dann so gewählt werden, dass die komplette Schnittmenge auf korrespondierende Punkte untersucht wird. Da dieses Verfahren zu aufwendig wäre ist es möglich die Korrelationsfenster-Koordinaten für den Master des Stapels zu erzeugen und auf alle Master-Slave-Paare der Koregistrierung zu übertragen. Für die Slave-Aufnahmen würde das bedeuten, dass nur ein Teil des Aufnahmegebietes mit Korrelationsfenstern überdeckt ist. Hierzu muss das Auswertebereich des Masters auf den

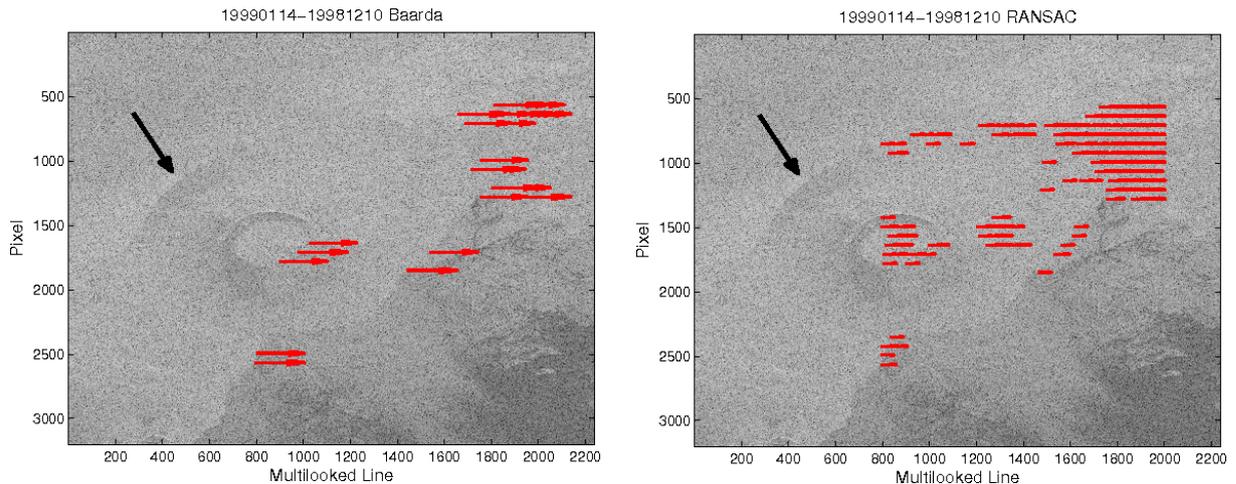


Abbildung 6.3: Inlier-Verschiebungsvektoren vor dem Hintergrund des Amplitudenbildes vom 14.01.1999 für das Verfahren nach Baarda (links) und das RANSAC-Verfahren (rechts)

Slave übertragen werden, was durch Anbringen der im Rahmen der Grobregistrierung bestimmten Offsets geschehen könnte. In der vorliegenden Routine zur Verteilung der Fenster wird diese Übertragung nicht durchgeführt, so dass einfach die Koordinaten der (Stapel)-Mastergeometrie übernommen werden. Wenn zwischen Slave und Master³, wie es bei der Aufnahme vom 14.01.1999 der Fall ist, ein großer Offset in Azimutrichtung besteht, liegen die Korrelationsfenster in diesem Slave⁴ an einer anderen Position oder sind gar nicht mehr im betrachteten Ausschnitt des Slaves enthalten. Letzteres trifft für die untersuchte Aufnahme vom 14.01.1999 zu. Das DORIS-Paket reagiert auf solch eine Situation mit der Verschiebung der Positionen der Korrelationsfenster in den Ausschnitt des jeweiligen Slaves, wenn dieser als Master eines Koregistrierungspaars verwendet wird. Die Folgen sind aber keineswegs falsche Verschiebungsvektoren, sondern eine nicht optimale Verteilung der Korrelationsfenster. So liegen für die linke Flanke des Vulkans, wie aus Abbildung 6.5 ersichtlich, keine Verschiebungsdaten vor. Überdies erstreckt sich dieses Problem auf jedes Master-Slave-Paar, in dem die Aufnahme vom 14.01.1999 als Master verwendet wird. Die Qualität der Koregistrierung an der linken Vulkanflanke für diese Aufnahme könnte also durchaus durch die ungünstige Verteilung der Korrelationsfenster verursacht werden. Um diese Vermutung zu testen, wird das entsprechende Programm, das die Positionen der Korrelationsfenster in der Master-Geometrie berechnet, erweitert, so dass zwar nicht der gesamte Überlappungsbereich des betrachteten Koregistrierungspaars enthalten ist, aber die Korrelationsfenster für die Aufnahme vom 14.01.1999 im Auswertebereich liegen. Dieses geschieht für jeden Master eines Koregistrierungspaars durch Verschiebung des in der Geometrie des absoluten Masters vorgegebenen Rasters um die in der Grobkorrelation bestimmten Offsets. Diese Version der Koregistrierung wird zur besseren Unterscheidung im Folgenden mit Version B bezeichnet, während die vorherige Version mit A bezeichnet wird. Um die Unterschiede zwischen den Versionen A und B der Koregistrierung

³Hier ist die Rede vom Master des gesamten Stapels

⁴Der später als Master eines Koregistrierungspaars genutzt wird

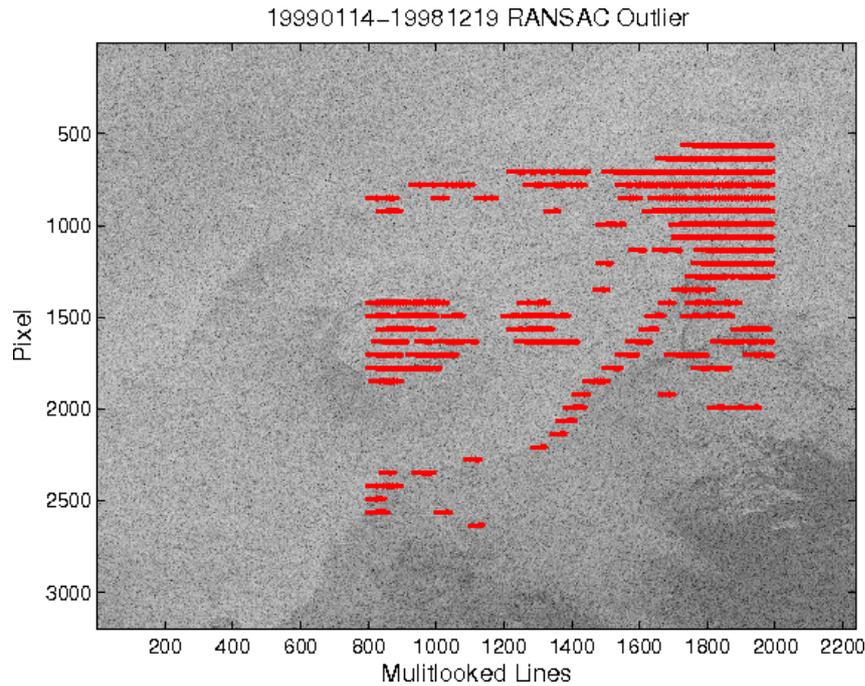


Abbildung 6.4: Outlier-Verschiebungsvektoren nach dem RANSAC-Algorithmus für das Bildpaar 14.01.1999 und 10.12.1998

zu untersuchen, werden Überlagerungen zwischen Amplitudenbildern betrachtet. Hierbei wird das nach der Koregistrierungsversion B in die Mastergeometrie transformierte Amplitudenbild eines Slaves mit dem entsprechenden Bild der Version A überlagert, so dass sich wieder vier Farbbilder ergeben (19990114 mit RANSAC/Baarda und 19981210 mit RANSAC/Baarda). Die so beschriebene Überlagerung ist in Abbildung 6.6 zu sehen. Wie sich eindeutig erkennen lässt, hat die Änderung an der Koregistrierungsroutine keine Auswirkung auf die in die Mastergeometrie transformierten Amplitudenbilder zu haben, da keine farbigen Bereiche in den Überlagerungen in Abbildung 6.6 zu erkennen sind. Eine Kontrolle der Positionen der Korrelationsfenster in Koregistrierungsversion B im Master des betrachteten Koregistrierungspaares (14.01.1999 ist Master und 10.12.1998 ist Slave) ist in der Abbildung 6.7 dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die Korrelationsfenster in der Aufnahme vom 14.01.1999 so angeordnet, dass das entsprechende Gebiet der Masteraufnahme des Stapels (siehe Abbildung A.4 links) abgedeckt ist. Die neue Verteilung der Inlier-Verschiebungsvektoren der Koregistrierungsversion B ist analog zu Abbildung 6.3 in Abbildung 6.8 dargestellt. Die Inlier sind hierbei mit den anfänglichen Korrelationsfenstern nach links gerückt, so dass zumindest die komplette Caldera mit Verschiebungsdaten abgedeckt ist. Weiterhin sind gültige Verschiebungsvektoren an der linken Seite der Caldera hinzugekommen. Am rechten Rand sind allerdings auch einige Verschiebungsvektoren weggefallen, was nach der Verteilung der Fenster in Abbildung 6.7 auch zu erwarten war. Insgesamt ist die Verteilung der gültigen Verschiebungsvektoren für die Koregistrierungsversionen A und B, abgesehen von der Verschiebung, recht ähnlich. Allerdings umfasst der auszuwertende Bereich, der durch die Masteraufnahme des Stapels festgelegt und in Abbildung A.4 im Anhang dargestellt ist, nicht die in Abbildung 6.3 mit dem schwarzen

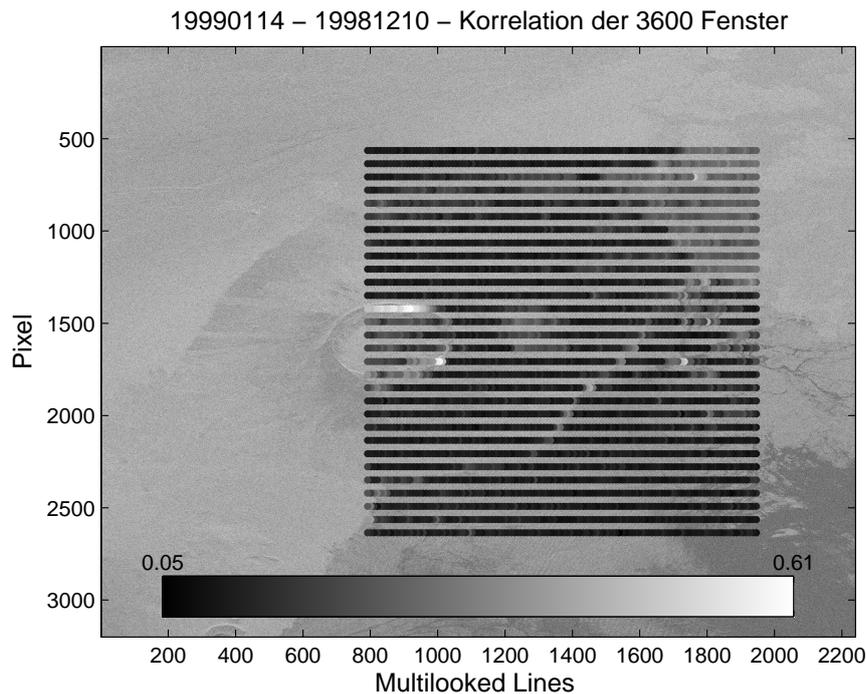


Abbildung 6.5: Darstellung der Korrelationsmaxima der ursprünglichen 3600 Korrelationsfenster über ihrer Position im Masteramplitudenbild 19990114.

Pfeil gekennzeichnete Struktur. Diese würde sicherlich noch einige gültige Verschiebungsvektoren für beide Algorithmen liefern. Zwar ist das Auswertegerbiet in der Version B der Koregistrierung durch Verschiebungsvektoren abgedeckt, allerdings wäre das Verfahren durch Ausnutzen der gesamten Schnittmenge des Koregistrierungspaares etwas robuster.

Es wurden nun vier Koregistrierungen berechnet, wobei zwei nach dem RANSAC-Algorithmus und zwei nach dem Data-Snooping-Algorithmus prozessiert wurde. Überdies sind zwei Verteilungen der Korrelationsfenster im Master des untersuchten Koregistrierungspaares (14.01.1999 als Master und 10.12.1998 als Slave) untersucht worden. Fraglich ist inwieweit die vier Ergebnisse voneinander abweichen. Dieses kann durch Auswertung der geschätzten Polynome geschehen, wobei dieses nach den Vorgaben in [13] durchgeführt wurde. Mit jedem bestimmten Polynom kann für eine vorgegebene Position im Master des Stapels der Offset in Line- bzw. Pixelrichtung auf die korrespondierende Position im Slave-Koordinatensystem berechnet werden. Als Slave wurde hierbei die Aufnahme vom 14.01.1999 gewählt, die im untersuchten Koregistrierungspaar als Master verwendet wurde (siehe Abschnitt 5.1.2). In Abbildung 6.9 ist das auf einem regelmäßigen Gitter in der Mastergeometrie ausgewertete Polynom, das den Offset in Linierrichtung liefert, für die vier unterschiedlichen Koregistrierungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich alle vier Polynome trotz der unterschiedlichen Konfiguration der Beobachtungen fast nicht unterscheiden. Zusätzlich fällt auf, dass der Offset für jedes einzelne Polynom über den gesamten betrachteten Bereich des Masters fast gleich ist (Differenz beträgt ungefähr eine Rasterzelle). Dieses sollte jedoch nicht überraschen, da der Hauptanteil der Transforma-

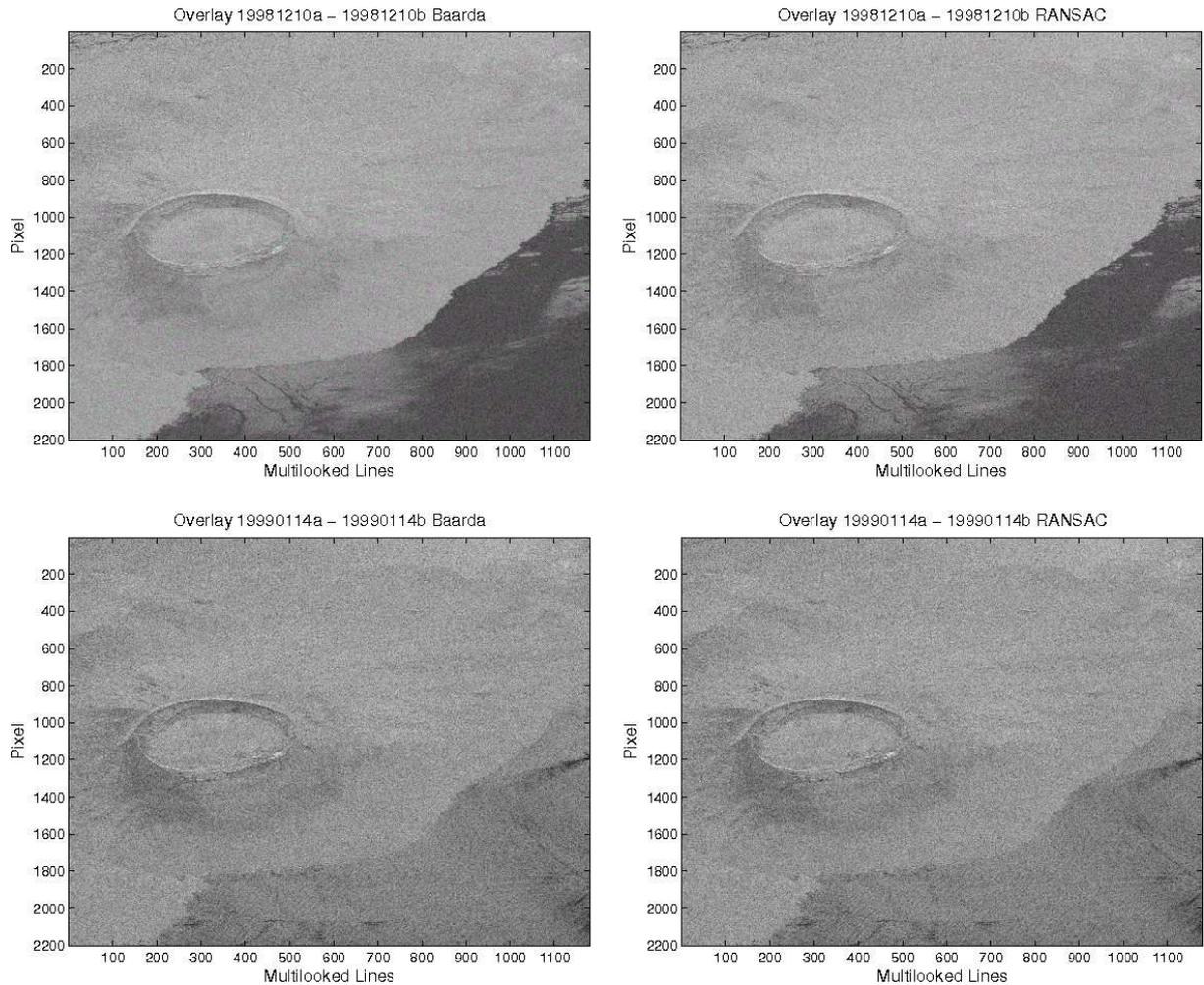


Abbildung 6.6: Überlagerung der mit den Koregistrierungsversion A und B in die Mastergeometrie transformierten Slaves vom 10.12.1998 und 14.01.1999.

tion zwischen Master- und Slave-Geometrie durch eine Verschiebung gegeben ist. Die Differenzen zwischen Verschiebungswerten der einzelnen Koregistrierungen sind zusätzlich in Abbildung A.1 im Anhang dargestellt. Diese unterstützen den Eindruck, dass alle vier Koregistrierungen fast identisch sind. Der maximale Unterschied zwischen den vier Koregistrierungen (ausgenommen ist hier die Differenz der Ergebnisse des RANSAC-Algorithmus in Version A/B und des Ergebnisses des Data-Snoopings nach Baarda in Version B/A) beträgt etwa 0,02 Rasterzellen in Linierrichtung. Das liegt deutlich unter der in [7] genannten Fehlerschranke, so dass diese maximale Differenz als unbedenklich angesehen werden kann. Analog zu den Abbildungen 6.9 und A.1 stellen die Abbildungen A.2 und A.3 im Anhang den erläuterten Sachverhalt für die Pixelrichtung dar. Zwar liegt die maximale Fehlergrenze mit etwas unter 0,1 etwas höher, jedoch ist selbst dieser Wert unter dem genannten Schwellwert. Zusätzlich liegen die Bereiche mit den größten Abweichungen am Rand des betrachteten Bereichs, so dass für das Zentrum fast gleiche Koregistrierungsergebnisse angenommen werden können. Es ist nun zu entscheiden welches Koregistrierungsergebnis für die weitere Prozessierung verwendet wird. Da sich

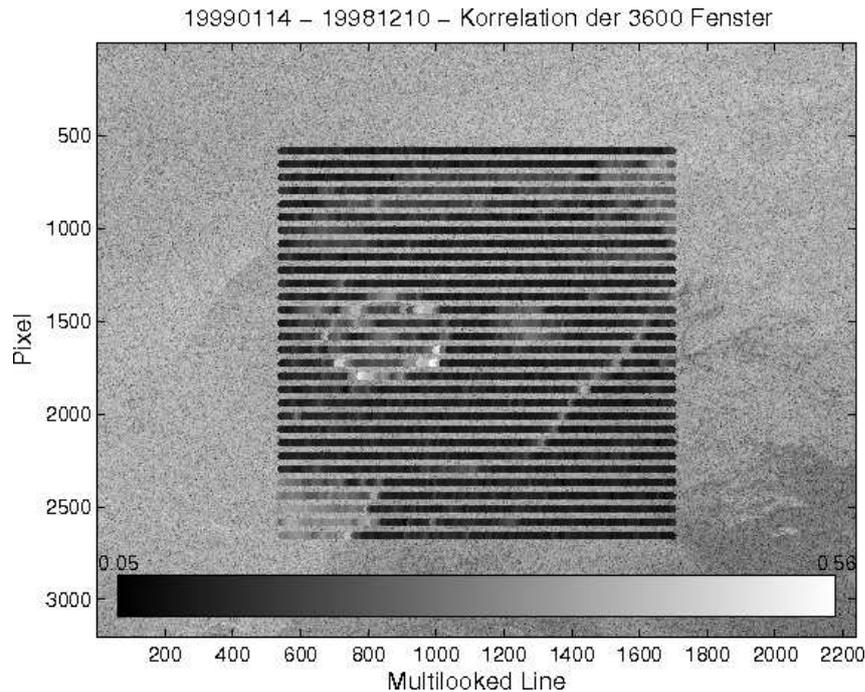


Abbildung 6.7: Darstellung der Korrelationmaxima der ursprünglichen 3600 Korrelationsfenster über ihrer Position im Masteramplitudenbild 19990114 nach der Korrektur des Quellcodes.

alle Polynome sehr ähnlich sind, dürfte die Wahl des Koregistrierungsergebnisses keinen allzu großen Einfluss auf das Endergebnis haben. Allerdings werden die vier Koregistrierungsergebnisse abschließend validiert, indem die auf Basis des Ergebnisses der jeweiligen Koregistrierung in die Mastergeometrie transformierte Aufnahme vom 14.01.1999 ausschnittsweise mit dem Master des Stapels korreliert wird. Dieses Vorgehen wird in [13] vorgeschlagen, um das Ergebnis des Resamplings zu testen. Hierzu werden im Master (03.02.2000) 6000 Ausschnitte entnommen und korreliert. Die sich ergebenden Verschiebungsvektoren werden nach der Kohärenz selektiert, wobei ein Schwellwert von 0,3 für die Kohärenz verwendet worden ist. Für die verbleibenden gültigen Verschiebungsvektoren wird die Länge berechnet. Abbildung 6.10 zeigt die Histogramme der entsprechenden Längen für die vier Koregistrierungsergebnisse. Es überrascht nicht, dass alle vier Schaubilder fast gleich aussehen, da sich auch die Polynome, die zur Transformation in die Mastergeometrie verwendet wurden, kaum unterscheiden. Der Sollwert der Längen der Verschiebungsvektoren liegt bei Null. Auffallend ist unter diesem Gesichtspunkt der hohe Anteil von Verschiebungen mit Längen über einem Pixel. Diese Ausreißer entstehen durch die unterschiedliche Abbildung der Strukturen auf dem Erdboden in die betrachteten Abbildungen und werden keineswegs von der Transformation des Slaves in die Mastergeometrie beseitigt. Anzumerken ist auch, dass die betrachtete in die Mastergeometrie transformierte Aufnahme vom 14.01.1999 im Rahmen der Koregistrierung des StaMPS-Algorithmus niemals mit dem Master des Stapels korreliert wurde, sondern indirekt durch Korrelation mit weiteren Slave-Bildern auf den absoluten Master registriert wurde.

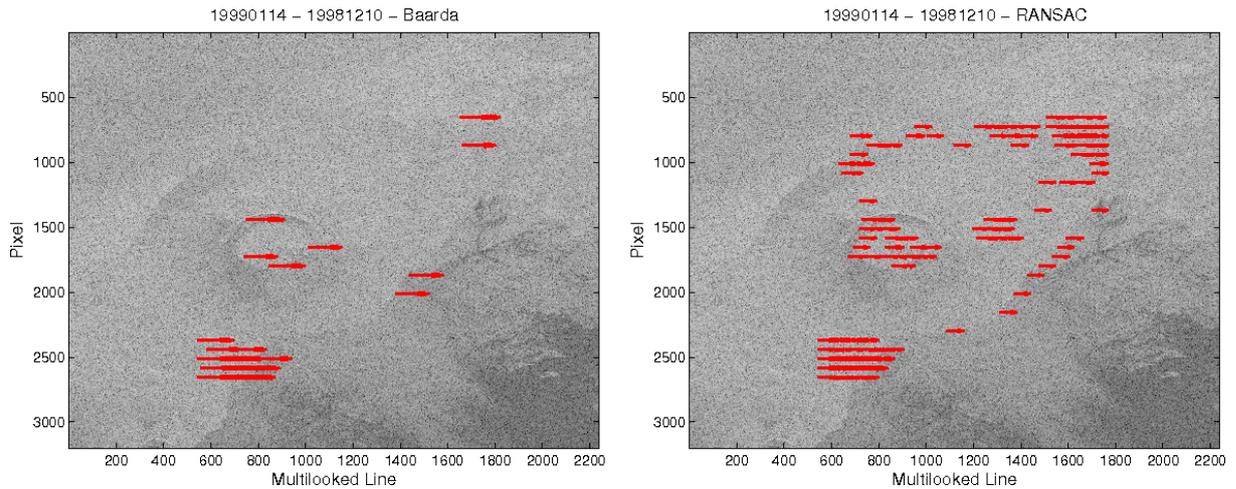


Abbildung 6.8: Inlier-Verschiebungsvektoren vor dem Hintergrund des Amplitudenbildes vom 14.01.1999 für das Verfahren nach Baarda (links) und das RANSAC-Verfahren (rechts) nach der Korrektur des Quellcodes

Letztendlich scheint die Wahl, welches Koregistrierungsergebnis für die weitere Verarbeitung am geeignetsten ist, unter Berücksichtigung aller Ergebnisse recht beliebig zu sein, da sich alle Ergebnisse sehr stark ähneln. Allerdings wird hier davon ausgegangen, dass die Version B der Koregistrierung sinnvoller ist als die Version A, da die Positionierung der Fenster für ein Koregistrierungspaar von der Lage der Slave-Aufnahme, die für dieses Paar als Master verwendet wird, zur absoluten Masteraufnahme abhängt. Weiterhin wird der RANSAC-Algorithmus als leistungsfähiger eingeschätzt als der Baarda-Algorithmus, da letzterer eine größere Menge offensichtlich guter Daten verwirft. Zwar wird in [13] eine iterative Koregistrierung vorgeschlagen, um die Anzahl der nicht verworfenen Beobachtungen zu maximieren, jedoch ist ein solches Vorgehen umständlich und für einen großen Bildstapel oft nicht anwendbar.

Insgesamt ist das etwas Resultat der Untersuchung der Koregistrierung, dass das die Anzahl der Zuordnungen sowie deren Verteilung kaum einen Einfluss auf das bestimmte Polynom zu haben scheint. Das liegt vermutlich an der einfachen Abbildungsgeometrie zwischen Master und Slave, die zu im Wesentlichen aus einer Verschiebung besteht.

6.2 Ergebnisse der PS-Auswertung

Sind die Polynome aus der Koregistrierung für alle Aufnahmen des Stapels bekannt, können die Aufnahmen wie in Abschnitt 3.3 beschrieben weiterverarbeitet werden. Das Ergebnis sind differentielle Interferogramme, die, wie in Abschnitt 5 beschrieben, weiterverarbeitet werden. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse dieses letzten Schrittes aufgezeigt und erläutert. Hierbei werden zwei Auswertungen durchgeführt, die sich um den tolerierten Anteil der nicht konstanten Steukörper an der Menge der PS unterscheiden. Die wesentlichen Parameter sind in Tabelle A.2 im Anhang mit einer kurzen Erläuterung ihrer Bedeutung aufgeführt. Die folgenden Auswertungen werden auf Basis desselben Da-

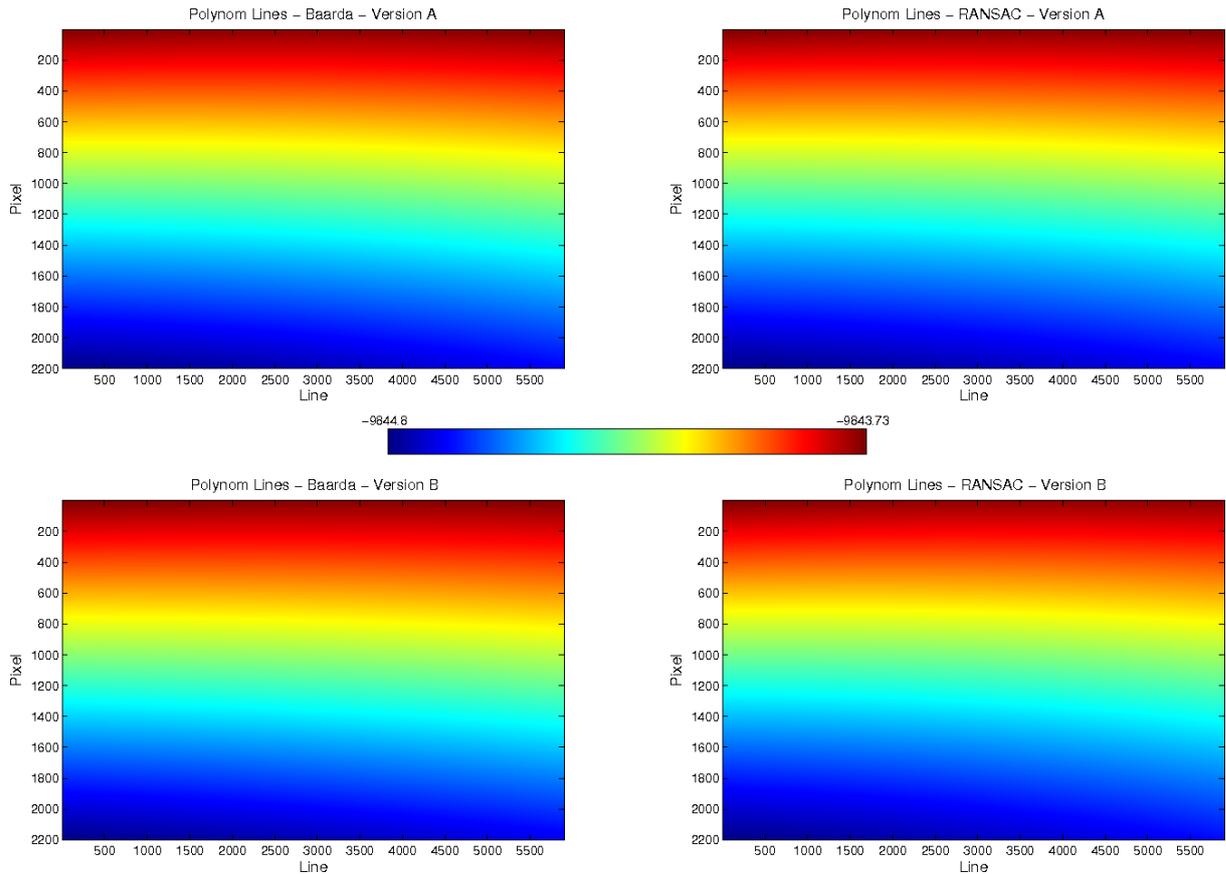


Abbildung 6.9: Darstellung der vier bestimmten Polynome für den Offset in Linierrichtung ausgewertet auf dem Raster des Masters. Die oberen Abbildungen zeigen die Polynome für die Fehlererkennung nach Baarda (links) und RANSAC (rechts) für die Version A der Registrierung. Die unteren Abbildungen zeigen die entsprechenden Polynome die Version B der Koregistrierung

tensatzes durchgeführt. Dieser besteht im Wesentlichen aus den um den Phasenanteil der flachen Erde und der Topographie bereinigten Interferogrammen und ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Es fällt auf, dass in einigen Interferogrammen Strukturen wie die Caldera des Vulkans zu erkennen sind. In anderen Interferogrammen sind überhaupt keine Strukturen zu erkennen. Ein Beispiel für ein solches Interferogramm ist mit der Aufnahme vom 18.02.1999 erzeugt worden. Diese ist durch eine effektive Basislinie von 974 m von der Masteraufnahme getrennt, was zu starker Dekorrelation (siehe Abschnitt 3.4) führt, so dass dieses Interferogramm mit gewöhnlichen Methoden nicht auszuwerten ist. Ein Beispiel für ein Interferogramm, das verhältnismäßig wenige dekorrelierte Bereiche aufweist, ist das aus der Aufnahme vom 09.11.2000 erzeugte Interferogramm. Der Grund für das relativ niedrige Rauschniveau dieses Interferogramms ist die kurze räumliche Basislinie (100 m Länge). Insgesamt Abbildung 6.11 die Notwendigkeit der PS-Technik in der Anwendung auf differentiell interferometrisches InSAR, da mit herkömmlichen Auswertetechniken auf Basis der gezeigten Interferogramme kaum ein Ergebnis zu erhalten wäre.

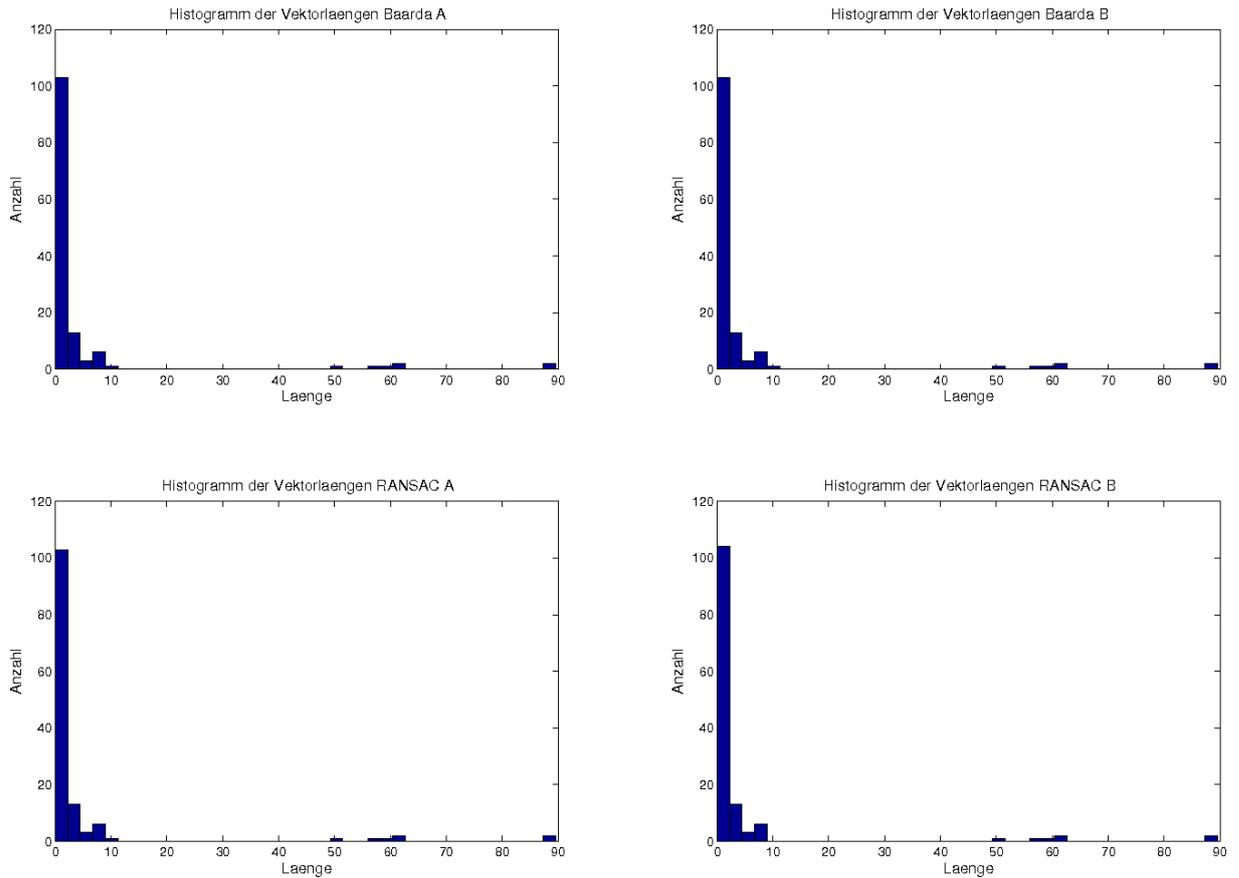


Abbildung 6.10: Histogramm der Vektorlängen für die vier Koregistrierungsergebnisse bei Koregistrierung eines in die Mastergeometrie transformierten Slaves mit dem Master

Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben besteht der erste Schritt in einer Vorauswahl der Punkte nach der Amplitudendispersion. Da dieser Schritt im Wesentlichen der Reduktion des Rechenaufwandes dient (siehe [9]), wird der Schwellwert mit $D_{A,max} = 0,4$ relativ hoch angesetzt, um nicht zu viele Punkte zu eliminieren. Die nach diesem Kriterium ausgewählten Punkte sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Die Phasen der ausgewählten Punkte sind in dieser Abbildung in einem geographischen Koordinatensystem (Standard-einstellung von StaMPS) dargestellt, so dass die rechte obere Ecke jedes Einzelbildes in Abbildung 6.12 mit der linken oberen Ecke des entsprechenden Interferogrammplots in Abbildung 6.11 korrespondiert. Weiterhin korrespondieren die jeweiligen unteren linken Ecken aus Abbildung 6.12 mit den rechten unteren Ecken in Abbildung 6.11. Die leichte Verdrehung der einzelnen Plots in Abbildung 6.12 wird durch die Bahnneigung des Orbits hervorgerufen. Insgesamt sind 1661870 Punkte für die weitere Verarbeitung ausgewählt worden. Das sind etwa 13% aller Interferogrammpixel. Deutlich erkennbar ist, dass am linken unteren Rand des Auswertgebietes die Punktdichte abweichend vom Rest des Auswertgebietes gering ist. Vergleicht man die Lage dieser Gebiete aus Abbildung 6.12 (Längs- bzw. Hochachse korrespondieren mit Länge und Breite) mit der Lage der Wasserflächen in Abbildung 6.1, so stimmen diese weitestgehend überein. Zum besseren Vergleich mit den in [9] gezeigten Abbildungen der Interferogramme sind in Abbildung

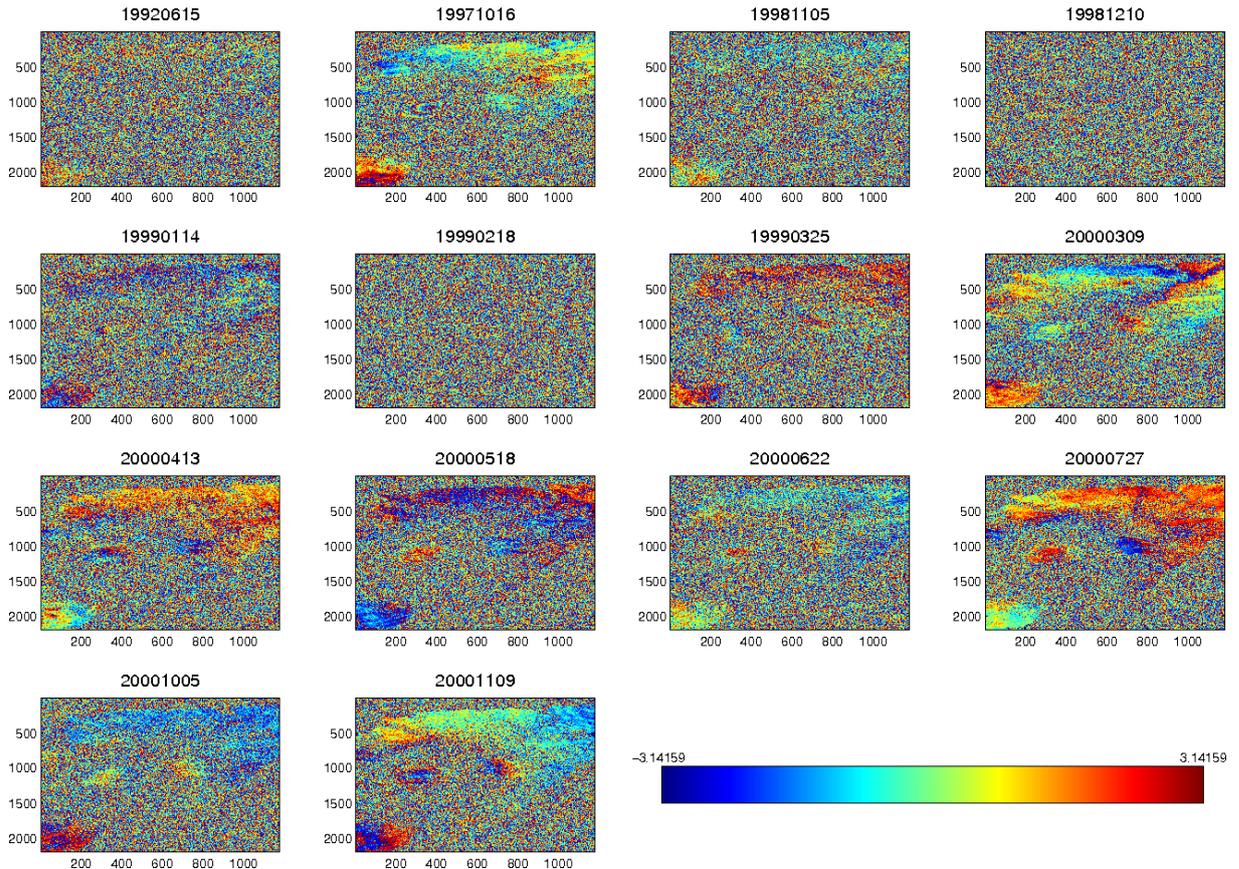


Abbildung 6.11: Darstellung der um den Phasenanteil der flachen Erde und der Topographie bereinigten Interferogramme des auszuwertenden Stapels in der Entfernungsgeometrie des Masters. Auf der x-Achse ist die (multilooked) Linearkoordinate und auf der y-Achse die Pixelkoordinate aufgetragen.

A.5 im Anhang die Interferogramme nach einem zwanzigfachen Multilooking in Linierrichtung und einem vierfachen Multilooking in Pixelrichtung dargestellt. Zusätzlich wurde die Belegung der Hoch- mit Längsachse vertauscht, um eine bessere Orientierung in Bezug auf die in [9] gezeigten Abbildungen der Interferogramme zu gewährleisten. Betrachtet man die Ausprägung des Signals in der Caldera, kann man deutliche Übereinstimmungen zwischen den im Rahmen dieser Arbeit erzeugten und den in [9] dargestellten differentiellen Interferogrammen erkennen. Insbesondere fällt in dem Interferogramm vom 03.09.2000 die Struktur in der unteren linken Bildecke auf (durch einen schwarzen Kreis gekennzeichnet), die im entsprechenden Interferogramm in [9] in der unteren rechten Ecke zu finden ist (Es ist hierbei anzumerken, dass die Abbildung in [9] nicht in der Entfernungsgeometrie dargestellt ist). Diese Struktur zieht sich in Abbildung A.5 vom unteren linken Rand bis zu einem (nur recht unscharf zu erkennenden) weiteren Muster, das durch einen schwarzen Pfeil gekennzeichnet ist. In der entsprechenden Abbildung in [9] sind diese beiden Strukturen auch in fast gleicher relativer Lage zu finden. Eine ähnliche Beobachtung kann im Interferogramm für den 27.07.2000 gemacht werden. Hier zeigt sich ein Muster (Blau, während der Hintergrund rot ist), das auch im korrespondierenden Interferogramm in [9]

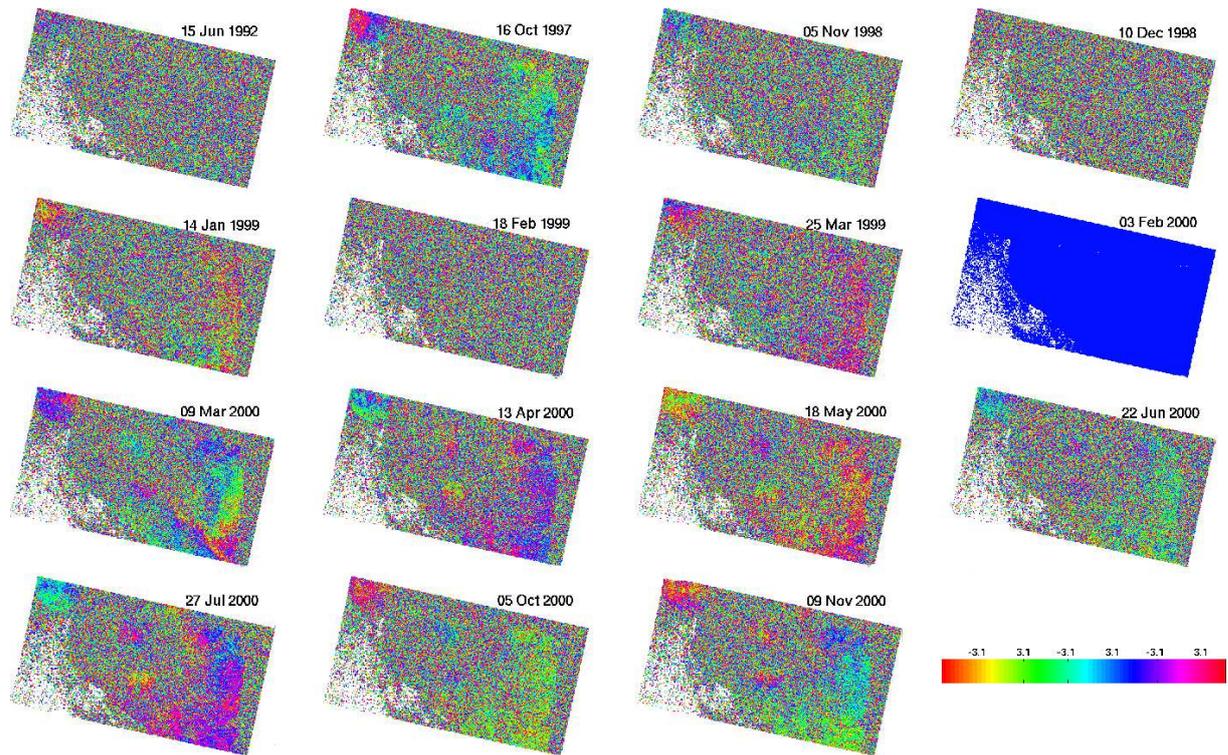


Abbildung 6.12: Darstellung der Phase der nach der Auswahl auf Basis der Amplitudendispersion verbliebenen Interferogrammpunkte in einem geographischen Koordinatensystem (Länge auf der x-Achse und Breite auf der y-Achse).

zu finden ist, in der Nähe der durch den Pfeil gekennzeichneten Form. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass die erzeugten Interferogramme nicht allzu stark von den Referenzergebnissen in [9] abweichen. Folglich kann die im vorherigen Abschnitt beschriebene Koregistrierung nicht grob falsch zu sein, da das nach [7] bzw. Abschnitt 3.4 schnell zur kompletten Dekorrelation führen würde.

6.2.1 Auswertung A

Die Parameter dieser ersten Auswertung werden, wie in [9] angegeben, verwendet. Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die Werte der Parameter. Dabei werden die nicht aufgeführten Parameter erst im Laufe der Auswertung bestimmt, um ein optimales Ergebnis zu erhalten. Zunächst werden die Phasen der durch den Amplitudenschwellwert ausgewählten Punkte analysiert, um das Phasenrauschen zu bestimmen. Hierzu werden die Punkte wie in Abschnitt 5.2.2 erläutert mit einem adaptiven Filter bearbeitet, um den räumlich korrelierten Anteil zu bestimmen. Dieser wird abgezogen, um für die residuale Phase den räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehler durch eine Kombination von Kohärenzmaximierung und linearer Regression zu schätzen. Die Ensemblekohärenz ist für alle Punkte der Vorauswahl in Abbildung 6.13 dargestellt. Gebiete hoher Ensemblekohärenz sind innerhalb der Caldera, am rechten Fuß des Vulkans und bei der in Abbildung A.5 (in den Interferogrammen vom 09.03.2000 und 27.07.2000) mit dem schwar-

Tabelle 6.2: Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen

Parameter	Wert
clap_alpha	0,3
clap_beta:	1,0
clap_low_pass_wavelength	800m
clap_win	64
filter_grid_size	40m
filter_weighting	P-Square
max_topo_err	10m
percent_rand	1%
scn_time_win	180
scn_wavelengt	50 m
unwrap_gold_n_win	32
unwrap_grid_size	100m
unwrap_time_win	180

zen Pfeil gekennzeichneten Struktur zu finden. Auffallend ist, dass die Punkte mit der höchsten Kohärenz im linken unteren Teil des Auswertgebietes gefunden werden. Diese Punkte liegen aber wie schon im Zusammenhang mit Abbildung 6.12 erwähnt auf dem Wasser. Wegen die Masse an Punkten, die auf Wasserflächen liegen, und deren hoher Kohärenz kann es sich hierbei nicht um ein Zufallsprodukt handeln. Fraglich ist ob diese Punkte nützliche Informationen für die Auswertung enthalten, da nur die Bewegung auf den Land-Flächen untersucht werden soll. Zusätzlich muss die Auswirkung der stark kohärenten Streuer auf den Wasserflächen auf den Schwellwert der Ensemblekohärenz berücksichtigt werden. Nimmt man beispielsweise einen erlaubten Anteil nicht stabiler Streuer an den ausgewählten PS von 1% an und geht zunächst davon aus, dass das Gebiet mit den hochkohärenten Streuern auf den Wasserflächen nicht zum betrachteten Bereich gehört, ergibt sich für jeden Wert der Amplitudendispersion ein Schwellwert für die Ensemblekohärenz. Dieser Schwellwert ist gerade so hoch, dass der Anteil der nicht stabilen Streuer in der Menge der PS bei 1% liegt. Nimmt man nun die Wasserfläche hinzu, wird der Schwellwert für die Kohärenz in Abhängigkeit von der Amplitudendispersion sinken, um den Anteil der *False Positives* auf 1% zu halten.

Ergänzend zum Ergebnis der Phasenanalyse sind auch einige Zwischenergebnisse zur Verdeutlichung des Vorgangs im Anhang dargestellt. Abbildung A.6 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers für vier ausgewählte Punkte. Die oberen beiden Subplots weisen kleine Residuen auf, während die unteren beiden große Residuen zeigen. Auffallend ist, dass die Maximalwerte der Kohärenz für die beiden Punkte mit großen Residuen nicht sehr eindeutig sind. Das bedeutet, dass eine Lösung bei Annahme des zweitbesten Näherungswertes für den unkorrelierten Blickwinkelfehler mit ähnlichen Residuen verbunden wäre. Da die Maximalwerte der Kohärenz für diese beiden Punkte niedrig sind (kleiner 0,5), würde auch der zweitbeste Näherungswert zu großen

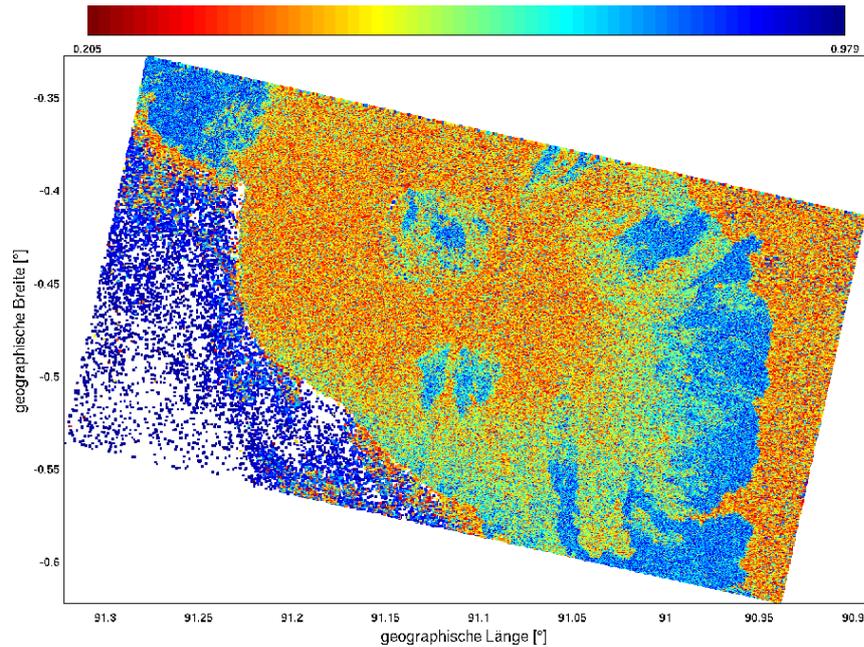


Abbildung 6.13: Ensemble-Kohärenz der Punkte der Vorauswahl in einem geographischen Koordinatensystem.

Residuen führen. Für die Punkte mit niedrigen Residuen ist das Kohärenzmaximum gut ausgeprägt, so dass hier die beste Lösung zu niedrigen die zweitbeste aber zu deutlich erhöhten Residuen führt. Weiterhin zeigt Abbildung A.7 einige Ergebnisse der statistischen Bewertung der berechneten Ensemblekohärenzen, was zur Gewichtung der Pixel vor der Filterung genutzt wird (siehe Abschnitt 5.2.2). Die oberen beiden Subplots zeigen die Histogramme der berechneten Ensemblekohärenzen. Die durch Normalisierung abzuleitende Wahrscheinlichkeitsdichte wäre also bimodal, was die Modellierung der gesamten Punktmenge als Mischung zweier Populationen sinnvoll erscheinen lässt (siehe Abschnitt 5.2.3). Die unteren beiden Subplots zeigen die Histogramme der Wahrscheinlichkeiten, ein nicht stabiler Streuer zu sein, für die gesamte Punktmenge. Von der ersten auf die zweite Iteration prägt sich das Maximum der PS-Population im Histogramm der Ensemblekohärenzen stärker aus, was im unteren Histogramm zu einer Verringerung der Anzahl hoher Wahrscheinlichkeiten führt. Insgesamt ist die Menge an Punkten mit hoher Kohärenz in der betrachteten Punktmenge recht groß wie sich leicht an den oberen beiden Schaubildern der Abbildung A.7 ersehen lässt.

Nachdem die Ensemble-Kohärenzen berechnet worden sind, werden die Punkte, wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, nach der Kohärenz ausgewählt bzw. verworfen. Dieses geschieht wie erläutert auf statistischer Basis als Funktion der Amplitudendispersion. Hierfür werden die Punkte zunächst nach dem Wert ihrer Amplitudendispersion in Klassen eingeteilt. In Abbildung A.8 im Anhang ist das Histogramm der Ensemblekohärenzen für zwei Amplitudendispersionklassen dargestellt. Dabei fällt der in Abschnitt 5.2.3 angenommene Zusammenhang von Amplitudendispersion und Verteilung der Kohärenzen auf. Das rechte Schaubild zeigt die Verteilung für eine höhere Amplitudendispersion und hat ein deutlich

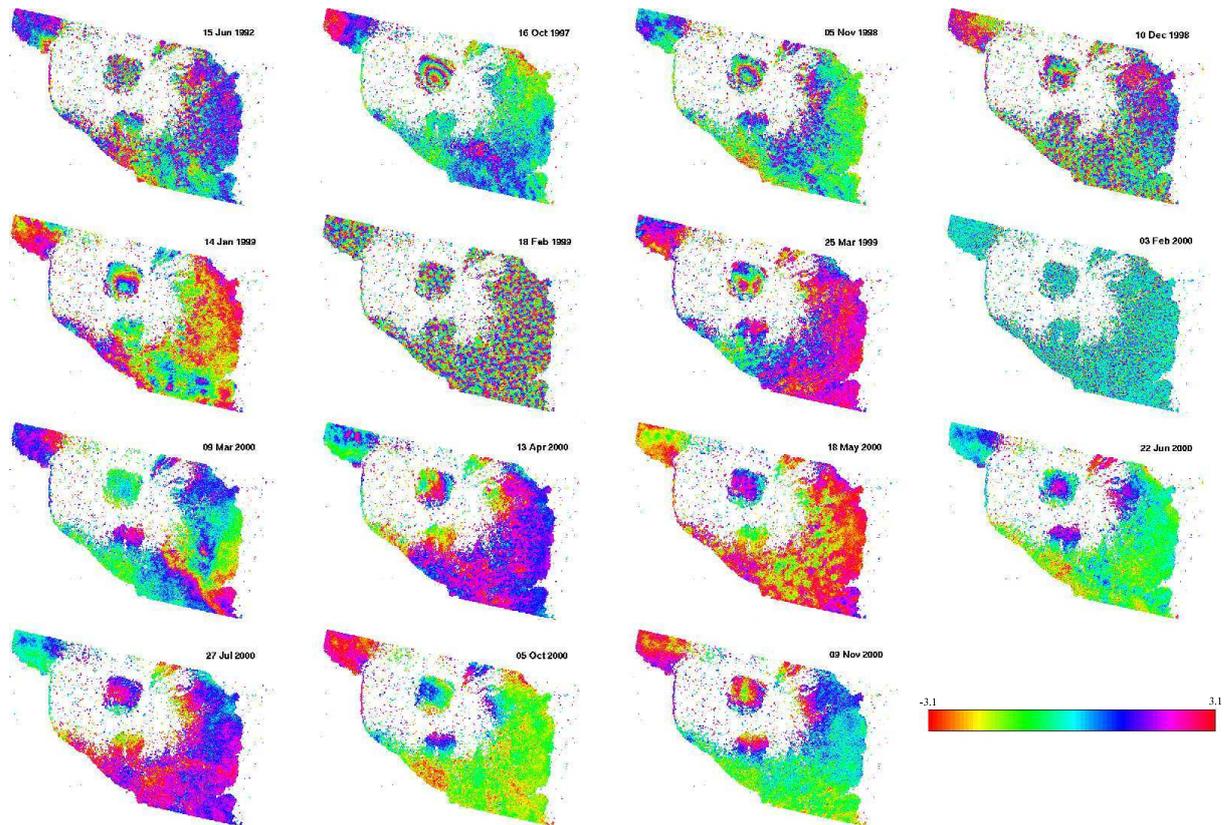
ausgeprägtes Maximum in niedrigen Kohärenzbereichen nahe dem Modus der Verteilung der simulierten Zufalls-Pixel⁵. Dahingegen zeigt das linke Schaubild die Verteilung der Ensemble-Kohärenzen für niedrige Amplitudendispersionen, die ein sehr ausgeprägtes Maximum in hohen Kohärenzbereichen aufweist. Die Auswirkung dieser unterschiedlichen Verteilung der Kohärenzen auf den Kohärenzschwellwert ist in Abbildung A.9 im Anhang dargestellt. Diese zeigt die berechneten Kohärenzschwellwerte für jede Amplitudendispersionsklasse und die zugehörige Regressionsgerade. Der Schwellwert steigt hier von etwa 0,5 für die niedrigste Amplitudendispersion auf etwa 0,7 für die höchste Amplitudendispersion an. Ein Blick auf die Histogramme in Abbildung A.8 zeigt die Notwendigkeit der Schwellwerterhöhung. Würde man auch für die im rechten Histogramm dargestellte Kohärenzverteilung für eine hohe Amplitudendispersion einen Schwellwert von 0,5 annehmen, wäre der Anteil der Punkte mit zufälliger Phase an der Gesamtmenge (gegeben durch das Verhältnis der Fläche unter der roten Kurve zur Fläche unter der grünen Kurve ab dem angenommenen Schwellwert) zu groß und würde den tolerierten Anteil an *False Positives* überschreiten.

Die nach diesem Schritt ausgewählten Punkte werden, in Abschnitt 5.3 erläutert, weiteren Auswahlkriterien unterzogen, wobei die Auswahl auf Basis der Standardabweichung der geschätzten Ensemblekohärenz nicht durchgeführt wird. Der Schwellwert für die Standardabweichung der Differenzphase zweier benachbarter PS ist mit 1,0 angenommen worden. Die aufgewickelte Phase für die nach dem letzten Auswahlschritt zurückgebliebenen Punkte abzüglich der Phasenanteile des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelnehlers und des Rauschens in der Masterakquisition, für die schon Schätzwerte vorliegen, ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Im Hinblick auf die Punktverteilung fällt auf, dass die hochkohärenten Punkte auf dem Wasser fast vollständig verworfen werden. Dieses muss im zweiten Auswahlschritt geschehen. Da keine Auswahl auf Basis der Standardabweichung der Kohärenz durchgeführt wird und Punkte auf Meereshöhe auch nicht verworfen werden⁶, müssen diese Punkte aufgrund ihres Rauschens aussortiert worden sein, da durch das Entfernen der Punkte aufgrund der Nähe zu anderen PS nicht so viele Punkte aussortiert werden können (der beste Punkte einer Gruppe bleibt erhalten). Aufgrund der Tatsache, dass die Punkte auf dem Wasser Werte für die Ensemblekohärenz nahe Eins haben, dürften die Phasen dieser Punkte auch keine großen Rauschsterme aufweisen. Allerdings haben die Punkte auf den Wasserflächen für diese Auswertung keine Bedeutung, so dass der Grund für deren Zurückweisung nicht weiter untersucht wird.

Der Hauptanteil der gefundenen Punkte konzentriert sich auf die Caldera, die südöstliche Flanke und den Fuß des Vulkans. An der nordwestlichen Flanke werden keine dichten Punktgruppen gefunden. Vergleicht man die Punktverteilung in Abbildung 6.14 mit der Punktverteilung in den entsprechenden Abbildung in [9] erkennt man wiederum ähnliche Strukturen. So fällt eine zweigeteilte Struktur auf, die sich vom nördlichen Fuß des Vulkans über die nördliche Vulkanflanke bis zur Caldera zieht. Diese zeigt sich in fast gleicher Ausprägung auch in [9]. Allerdings ist das Auswertgebiet verschieden. Dieses umfasst in [9] den nördlichen Fuß des Vulkans, während das Gebiet, das im Rahmen dieser Arbeit

⁵Hierbei ist anzumerken, dass die Verteilung der zufällig simulierten Pixel auf die aktuelle Verteilung skaliert worden ist

⁶Parameter `weed_zero.elevation` ist auf `no` gesetzt



75

Abbildung 6.14: Die um den Phasenanteil des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers und des Rauschens in der Masterakquisition bereinigten aufgewickelten Phasen auf den ausgewählten PS.

ausgewertet wird, an der nördlichen Vulkanflanke endet. So ist die im Nordwesten liegende Punktgruppe in [9] deutlich größer als in dieser Auswertung. Diese zieht sich an der am nördlichen Fuß des Vulkans gelegenen Küste entlang. Von dieser Punktgruppe ist in Abbildung 6.14 nur der südliche Teil zu sehen. Eine weitere Struktur, die sich in beiden Auswertungen fast gleich ausprägt, liegt direkt südlich der Caldera am Hang des Vulkans. Eine Beurteilung der Übereinstimmung der Punktverteilung an den spärlich besetzten Flanken des Vulkans gestaltet sich recht schwierig aufgrund der Auflösung der vorliegenden Abbildung aus [9]. Hier wäre wieder ein numerischer Vergleich der Daten notwendig. Eine niedrige Punktdichte um die Caldera wäre wegen der späteren Phasenfortsetzung kritisch, da lange Kanten zu großen Phasengradienten führen und dadurch Fehler in der Phasenfortsetzung entstehen.

Zur Validierung der vorhandenen Schätzwerte für den räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehler und das Masterrauschen ist die aufgewickelte Phase der ausgewählten Punkte, die nicht um diese beiden Phasenbeiträge korrigiert wurde, in Abbildung A.10 im Anhang dargestellt. Diese wirkt für alle Interferogramme deutlich verrauschter, was ein Anzeichen für die Richtigkeit der Schätzwerte sein dürfte, da offensichtlich ein räumlich

nicht korrelierender Anteil abgezogen worden ist. Das Interferogramm vom 18.02.1999 scheint aber trotz der Entfernung der räumlich nicht korrelierten Anteile recht verrauscht zu sein. Dieses hat neben dem Interferogramm vom 10.12.1998 die längste räumliche Basislinie, was sich in Abbildung A.5 im Anhang durch das scheinbare Fehlen jeglicher Informationen bemerkbar macht. Zwar scheint das Interferogramm vom 10.12.1998 im Ergebnis in Abbildung A.10 auch einen höheren Rauschanteil zu haben als die restlichen Interferogramme, was sich im unteren Bereich des entsprechenden Subplots zeigt. Jedoch prägt sich die Caldera in diesem Interferogramm besser aus. Fraglich ist, warum gerade das Interferogramm vom 18.02.1999 so stark in der Qualität abfällt. Zwar würde die lange Basislinie bei einigen nicht gänzlich punktartigen PS ein erhöhtes Rauschen erklären, jedoch müsste sich dieses dann auch in gleicher Art im Interferogramm vom 10.12.1998 ausprägen. Gleichermaßen würde sich ein residualer Blickwinkelfehler in gleicher Stärke im Interferogramm vom 10.12.1998 ausprägen. Problematisch ist die niedrige Interferogrammqualität vor allem in der Phasenfortsetzung. So führen hohe Rauschterme häufig zu Fehlern in der Phasenfortsetzung.

Die nachfolgende Phasenfortsetzung wird wie in Abschnitt 5.4.1 erläutert iterativ durchgeführt, wobei auf dem jeweils fortgesetzten Phasenfeld der räumlich korrelierte Blickwinkelfehler und die Masteratmosphäre durch punktweise lineare Regression nach kleinsten Quadraten geschätzt wird. Da Fehler in der Phasenfortsetzung zu Ausreißern in den Daten führen, werden für diese Schätzung nur Punkte aus den besten Interferogrammen verwendet. Diese sind im Einzelnen:

- 05.11.1998
- 14.01.1999
- 25.03.1999
- 03.02.2000
- 09.03.2000
- 13.04.2000
- 18.05.2000
- 22.06.2000
- 27.07.2000
- 05.10.2000
- 09.11.2000

Nach [9] hat zwischen dem 15.06.1992 und dem 16.10.1997 eine Deformation in Form eines sogenannten *Trapdoor Faultings* stattgefunden. Hierbei tritt ein Bruch auf, wobei sich eine Seite des Bruches nach oben die andere jedoch nach unten bewegt. Die Phasenfortsetzung kann wegen der Größenordnung dieser Bewegung und der vorliegenden Punktdichte zuverlässig nicht durchgeführt werden. Daher wird das Interferogramm vom 15.06.1992

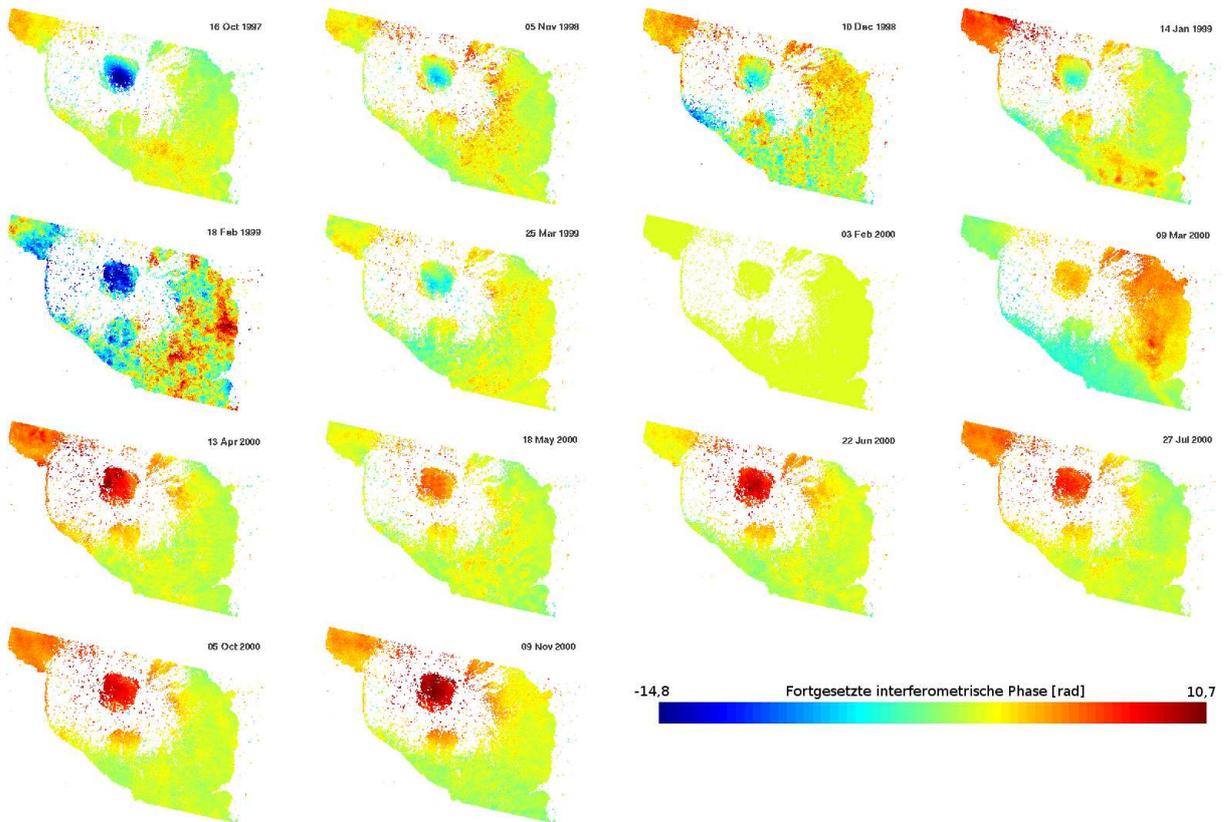


Abbildung 6.15: Ergebnis der Phasenfortsetzung für die ausgewählten PS

nicht verwendet. Das Endergebnis der Phasenfortsetzung konnte schon nach der ersten Iteration erreicht werden, da die Interferogramme vom 10.12.1998 und 18.02.1999 aufgrund der vermuteten geringen Qualität nicht in die Bestimmung des räumlich korrelierten Blickwinkelfehlers einbezogen worden sind. Das Interferogramm vom 16.10.1997 wurde ebenfalls nicht hinzugenommen, da in diesem Interferogramm zunächst Fehler in der Phasenfortsetzung vermutet wurden, was nicht zutreffend war. Allerdings sollte dieses Interferogramm für die lineare Regression nicht von entscheidender Bedeutung sein, da es eine kleine räumliche Basislinie aufweist und genug andere Interferogramme hoher Qualität mit kurzen räumlichen Basislinien zur Verfügung stehen. Das Endergebnis der Phasenfortsetzung ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Die Phasenwerte sind für diese Darstellung auf das Mittel der Phasenwerte im Bereich südlich der Caldera gelagert, so dass diese im Mittel zu Null werden. Deutlich ist wieder das erhöhte Rauschen in den Interferogrammen vom 10.12.1998 und 18.02.1999 zu erkennen. Zusätzlich scheinen in beiden Interferogrammen Fehler in der Phasenfortsetzung im südlichen bzw. westlichen Bereich aufzutreten. Insgesamt weisen alle Interferogramme, die zeitlich vor dem Master liegen kleinere bis größere Bereiche auf, die auf Fehler in der Phasenfortsetzung hindeuten. Die zeitlich nach dem Master angeordneten Interferogramme sehen hingegen deutlich glatter und fehlerfreier aus. Eine Erklärung hierfür wären die relativ kurzen Basislinien der zugehörigen Akquisitionen. Allerdings haben auch einige Interferogramme vor dem Master kürzere Basislinien. Es ist an dieser Stelle schwierig zu beurteilen, ob die Interferogramme

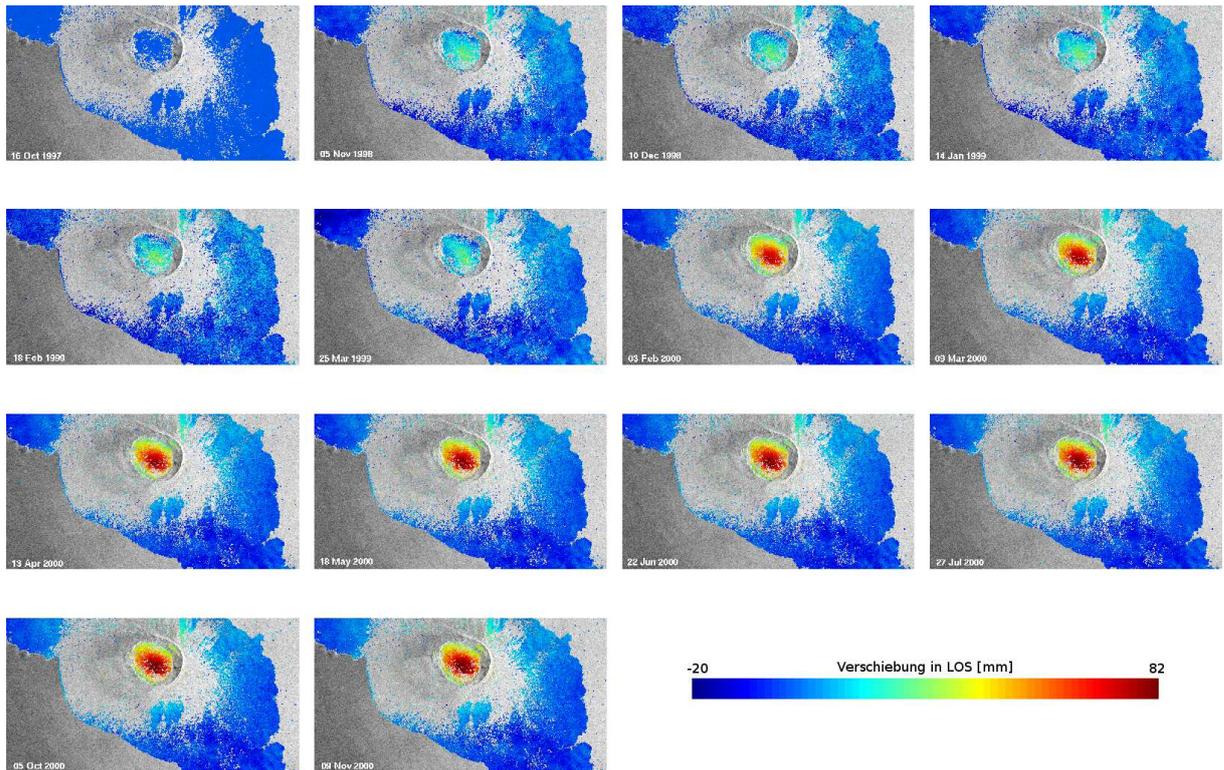


Abbildung 6.16: Deformation in Sichtlinie über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgeometrie.

vor dem Master generell schlechter sind als die nach dem Master, da das dargestellte Signal noch den kompletten Atmosphärenanteil und den räumlich korrelierten Blickwinkelfehler enthält. Die zu dieser Abbildung korrespondierenden Schätzwerte für den räumlich korrelierten Blickwinkelfehler und die Master-Atmosphäre sind in Abbildung A.11 im Anhang dargestellt. Beide Größen nehmen sehr große Werte an. So korrespondieren der minimale (-0.0074) und der maximale Blickwinkelfehler (0.0048) unter Vernachlässigung der nicht-zentralen Lage eines Pixels zu einem Höhenfehler des Geländemodells von etwa -70 m bzw. 45 m. Allerdings muss dieses Ergebnis in Hinblick auf das Endergebnis beurteilt werden. Stimmen diese mit der Referenz in [9] überein, muss geprüft werden was an dieser Stelle wirklich geschätzt wird. Denn auch unter Beachtung des Fehlers aus der Nichtzentrallage des Streukörpers in der Auflösungszelle wären die erhaltenen Werte immer noch enorm groß.

Die nach der Phasenfortsetzung folgende Filterung, die in Abschnitt 5.4.3 erläutert ist, liefert schließlich die Deformation. Die Phasen werden hierfür wieder räumlich auf den Interferogrammabschnitt südlich der Caldera gelagert. Zeitlich sind die Phasen auf das Interferogramm vom 16.10.1997 referenziert. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Zur besseren Orientierung sind die geschätzten Deformationsphasen über einem mittleren Amplitudenbild gezeigt, was die Darstellung in der Entfernungsgeometrie notwendig macht. Das Ergebnis zeigt insbesondere in der Caldera starke Übereinstimmungen mit den Ergebnissen in [9]. Die Größe der maximalen Deformation, die in der Caldera

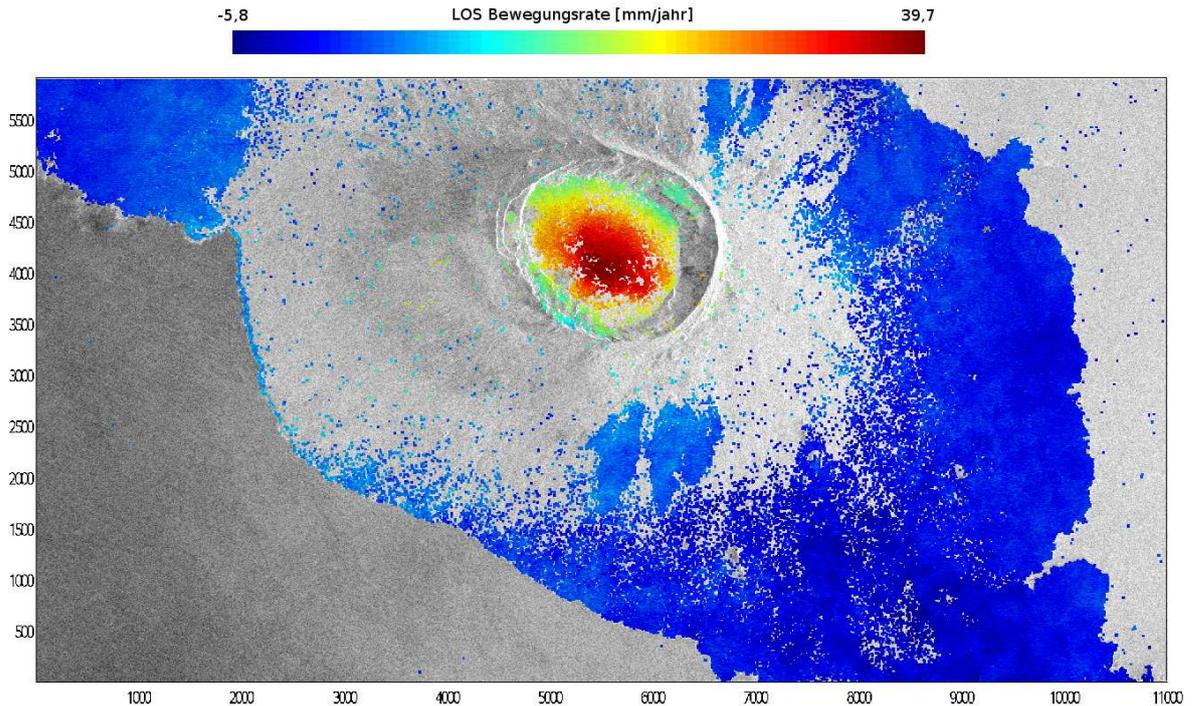


Abbildung 6.17: Mittlere Deformationsrate über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgeometrie.

auftritt, gleicht der im Ergebnis in [9]. Auch das Muster weist starke Ähnlichkeiten auf, obwohl das mit letzter Sicherheit aus den Abbildungen in [9] und den hier dargestellten Ergebnissen nicht zu klären ist. Hierfür müsste ein numerischer Vergleich der Ergebnisse durchgeführt werden. Auch außerhalb der Caldera stimmen die Daten recht gut überein. So ist die "größte" negative Deformation wieder fast identisch (20mm zu 25mm). Auch die räumliche Ausprägung der Deformation stimmt überein. Das zeigt sich recht gut an der Struktur nordöstlich der Caldera. Anzumerken ist hier, dass diese in dem hier verwendeten Auswertebereich nicht komplett enthalten ist. Aus den bestimmten Deformationen kann letztendlich eine mittlere Deformationsrate durch lineare Regression bestimmt werden. Diese ist in Abbildung 6.17 dargestellt. Bei Vergleich der berechneten Geschwindigkeiten mit den Referenzwerten in [9] fällt auf, dass die Caldera zwar wieder sehr gut passt, die Gebiete am Fuß und an der Flanke des Vulkans aber etwas unterschiedlich sind. In [9] sind die Geschwindigkeiten vor im nördlichen Bereich höher (-15 mm/jahr zu 5 mm/jahr). Die Gebiete am südlichen Fuß des Vulkans scheinen in den hier dargestellten Ergebnissen homogen eine Geschwindigkeit von etwa 5 mm/jahr aufzuweisen, während sie in den Ergebnissen von [9] variieren und etwa zwischen +5 mm/jahr und -10 mm/jahr liegen. Der Grund für diese Unterschiede können unterschiedliche Schwellwerte für das Rauschen in beiden Auswertungen sein, was z.B. in den hier vorgestellten Ergebnisse zur Entfernung einiger Punkte geführt haben könnte, die in den Ergebnissen in [9] zu einer Variation führen. Dagegen spricht allerdings die starken Ähnlichkeiten in der Punktverteilung. Eine andere Erklärung könnte die Referenzierung auf etwas andere Gebiete sein, denn der homogene Bereich im Süden (Abbildung 6.17) wird im Mittel komplett zu Null gesetzt,

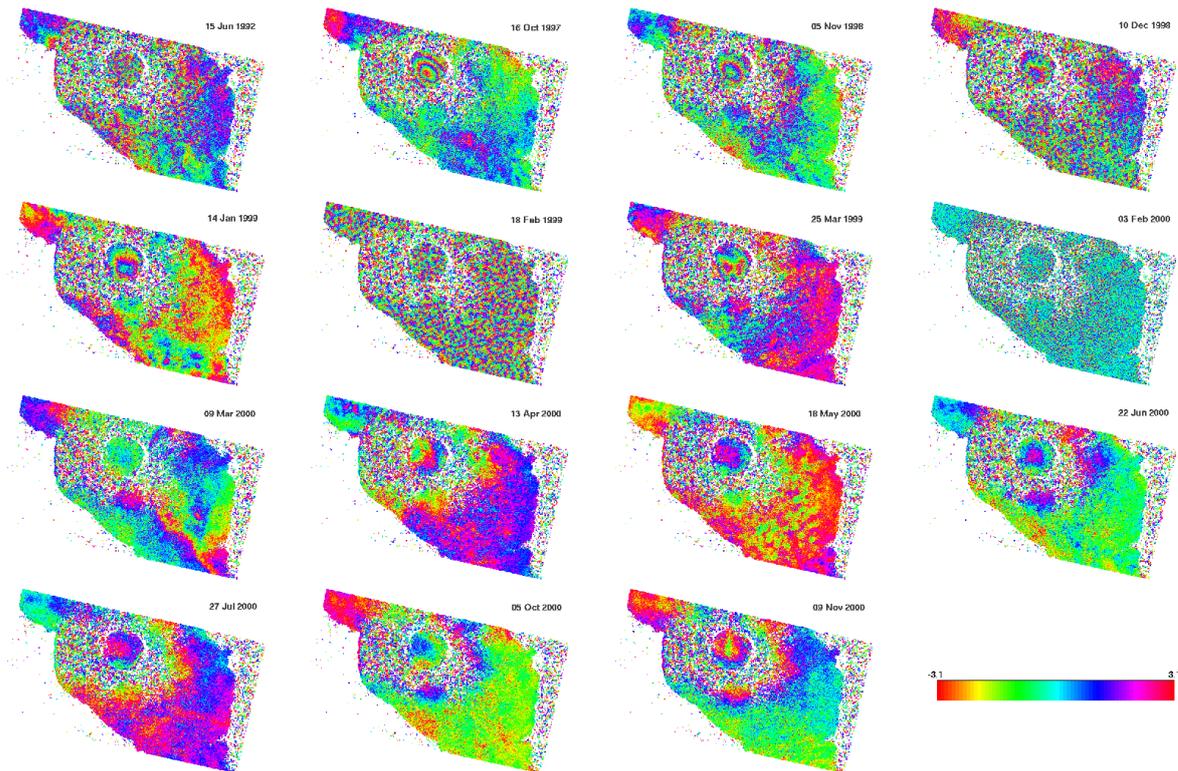


Abbildung 6.18: Phasenwerte der ausgewählten Punkte abzüglich des Einflusses des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers.

während in [9] nur von einer Referenzierung auf Küstengebiete gesprochen wird. Insgesamt ist das Ergebnis aber im Bereich der Caldera sehr ähnlich, so dass die Richtigkeit der hier vorgestellten Lösung angenommen werden kann.

6.2.2 Auswertung B

Da die Punktdichte an den Vulkanflanken recht niedrig ist, wird der erlaubte Anteil der *False Positives* von 1% auf 10% angehoben. Die Folge ist eine Verringerung der Kohärenz-Schwellwerte. Diese sind in Abhängigkeit von der Amplitudendispersion für die *False Positive*-Anteile von 1% und 10 % in Abbildung A.12 dargestellt. Werden mehr *False Positive* akzeptiert, senkt das den Kohärenzschwellwert. Die hier vorgenommene Änderung des akzeptierten Anteils führt zu einer wesentlichen Senkung der Schwellwerte. So liegt der Schwellwert für die niedrigste Amplitudendispersion bei nur noch 0,3 und für die höchste Amplitudendispersion bei nur noch 0,5. Diese Schwellwerte scheinen in Anbetracht eines maximal möglichen Kohärenzwertes von Eins sehr niedrig.

Die um den Einfluss des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers bereinigten Phasen der ausgewählten Punkte sind in Abbildung 6.18 dargestellt. Im Vergleich mit dem entsprechenden Ergebnis der vorherigen Auswertung in Abbildung 6.14 fällt zunächst auf, dass vor allem Punkte an den Hängen des Vulkans hinzugekommen sind. Diese sind nach

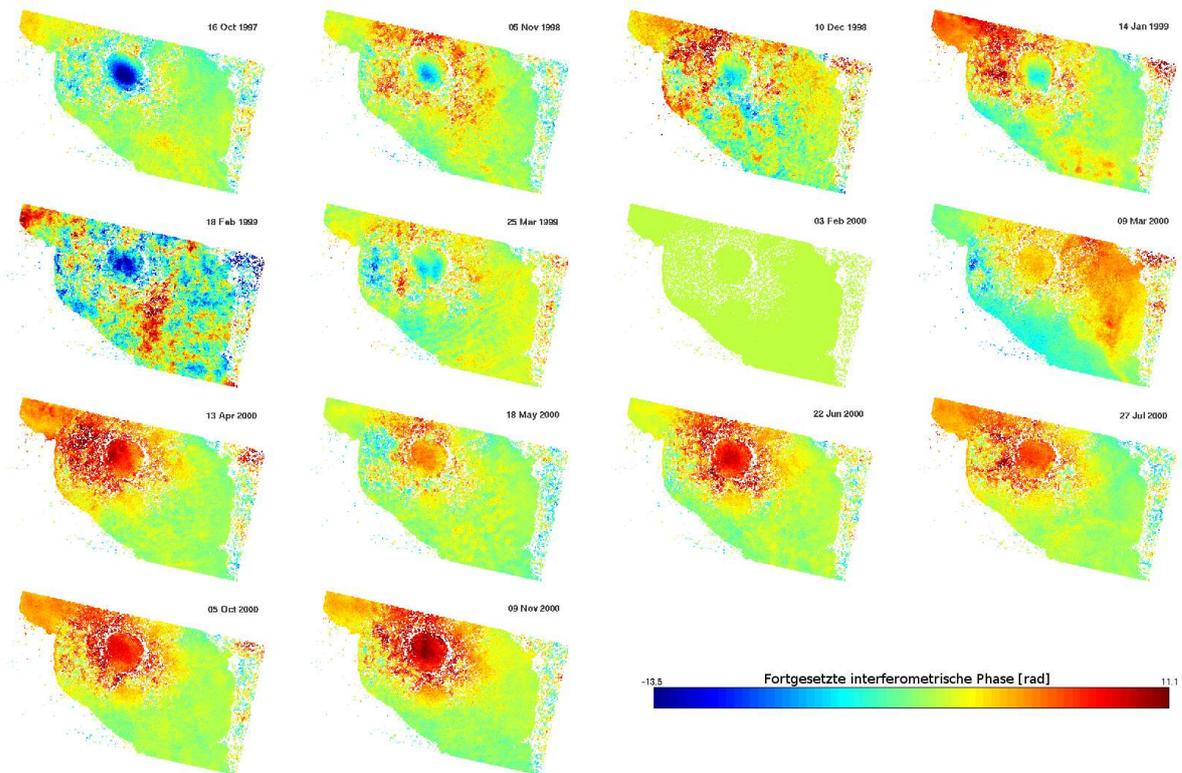


Abbildung 6.19: Ergebnis der Phasenfortsetzung.

[9] stark bewachsen, so dass eine vernünftige Auswertung dieser Bereiche zweifelhaft ist. Es ist außerdem ersichtlich, dass das Ergebnis in Abbildung 6.18 verrauschter wirkt als das in Abbildung 6.14. Betrachtet man z.B. die Struktur rechts über der Caldera im Interferogramm für den 22.07.2000, stellt man fest, dass diese kaum noch zu erkennen ist. Insbesondere die Phasen der neu hinzugenommenen Punkte zeigen in keinem Interferogramm regelmäßige Strukturen, was auf einen hohen Rauschterm schließen lässt, der eine Auswertung schwierig machen kann. Im Gegensatz dazu wirken die Ergebnisse in der Caldera recht ähnlich. Das hängt vermutlich mit der generell höheren Kohärenz in diesem Teil des Auswertgebietes zusammen, was schon in Auswertung A zu einer Auswahl fast aller möglicher Punkte geführt hat. Der Vollständigkeit halber sind die Phasen inklusive des räumlich korrelierten Blickwinkelfehlers in Abbildung A.13 im dargestellt.

Fraglich ist wie sich die neu hinzugenommenen Punkte auf das Ergebnis der Phasenfortsetzung auswirken. Das erhöhte Rauschniveau dieser Punkte kann zu globalen Fehlern führen, die eine zuverlässige Schätzung der Bewegung verhindern können. Das Ergebnis der Phasenfortsetzung ist in Abbildung 6.19 dargestellt. Ein Vergleich dieser Phasenfortsetzungsergebnisse mit den entsprechenden Resultaten aus Auswertung A (siehe Abbildung 6.15) zeigt zunächst eine weitgehende Übereinstimmung auf den in beiden Auswertungen vorliegenden Punkten. Allerdings sind die fortgesetzten Phasen in den Interferogrammen vom 16.10.1997 und vom 18.02.1999 in der Caldera im Vergleich zu Auswertung A größer geworden (minimal -14,8 zu minimal -13,5), während die Ergebnisse

einiger späterer Interferogramme in der Caldera ähnlich aussehen. Zusätzlich scheinen in den Interferogrammen vom 16.10.1997, 10.12.1998, 18.02.1999, 25.03.1999 und 09.03.2000 Fehler in der Phasenfortsetzung aufzutreten, wobei diese lokal begrenzt sind und eine Auswertung trotz der Fehler erfolgversprechend ist. Die Schätzungen des räumlich korrelierten Blickwinkelfehlers und des Masterbeitrags zu Atmosphären- und Orbitanteil sind in Abbildung A.14 im Anhang dargestellt. Vor allem fällt hier der Unterschied der Ergebnisse in der Caldera auf. Der Blickwinkelfehler ist hierbei um etwa 0,3 kleiner geworden. Die Schätzwerte für Masteratmosphäre und Masterorbit sind in der unteren rechten Ecke der Caldera von etwa Null auf einen Wert von etwa -1,5 gefallen. Merkwürdig ist vor allem, dass die scheinbar ähnlichen Ergebnisse der Phasenfortsetzung zu so großen Differenzen in den Schätzwerten für Masterorbit, Masteratmosphäre und räumlich korrelierten Blickwinkelfehler führen. Zusammen mit den eigentlich unrealistisch großen Werten für den Blickwinkelfehler ist die Richtigkeit dieser Schätzwerte in Frage zu stellen bzw. zu klären welche Phasenanteile an dieser Stelle wirklich bestimmt werden. Ein einleuchtendes Ergebnis für die neu hinzugenommenen Punkte zeigt sich für die beiden Masterbeiträge direkt über der Caldera. Im entsprechenden Ergebnis in Auswertung A sieht man am Rand des Auswertgebietes einen Bereich mit sehr großen Werten (bis 5,2). Zusätzlich sieht man am oberen Rand der Caldera einen Bereich mit ebenso hohen Werten. Die zwischen diesen Bereichen neu hinzugenommenen Punkte zeigen auch homogen hohe Werte, was in Anbetracht der erwarteten räumlichen Korrelation der geschätzten Größe sinnvoll erscheint.

Die nach der raum-zeitlichen Filterung bestimmte Deformation ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Die Ergebnisse beider Auswertungen sind in den auftretenden Deformationsmustern recht ähnlich. Allerdings wird die Deformation in der Caldera in der zweiten Auswertung mit etwa 72 mm einen Zentimeter kleiner eingeschätzt als in der ersten Auswertung. Die an den Vulkanhängen neu hinzugenommenen Punkte scheinen aber keinerlei brauchbare Information zu enthalten. So wirkt die Deformation in den betreffenden Gebieten recht verrauscht und weicht im Interferogramm vom 25.03.1999 von allen anderen Interferogrammen ab. Der Grund für diese Abweichungen könnten, wie im Zusammenhang mit Abbildung 6.19 erläutert, Fehler in der Phasenfortsetzung sein. Insgesamt wurde wenig bis keine neue Information durch die neu hinzugenommenen Punkte erhalten, so dass eine Erhöhung des Schwellwertes für den tolerierten Anteil an *False Positives* nicht sinnvoll erscheint, zumal die Ergebnisse der ersten Auswertung auch besser zu den Referenzergebnissen in [9] passen. Der Vollständigkeit halber ist der zugehörige Geschwindigkeitsplot in Abbildung A.15 im Anhang dargestellt.

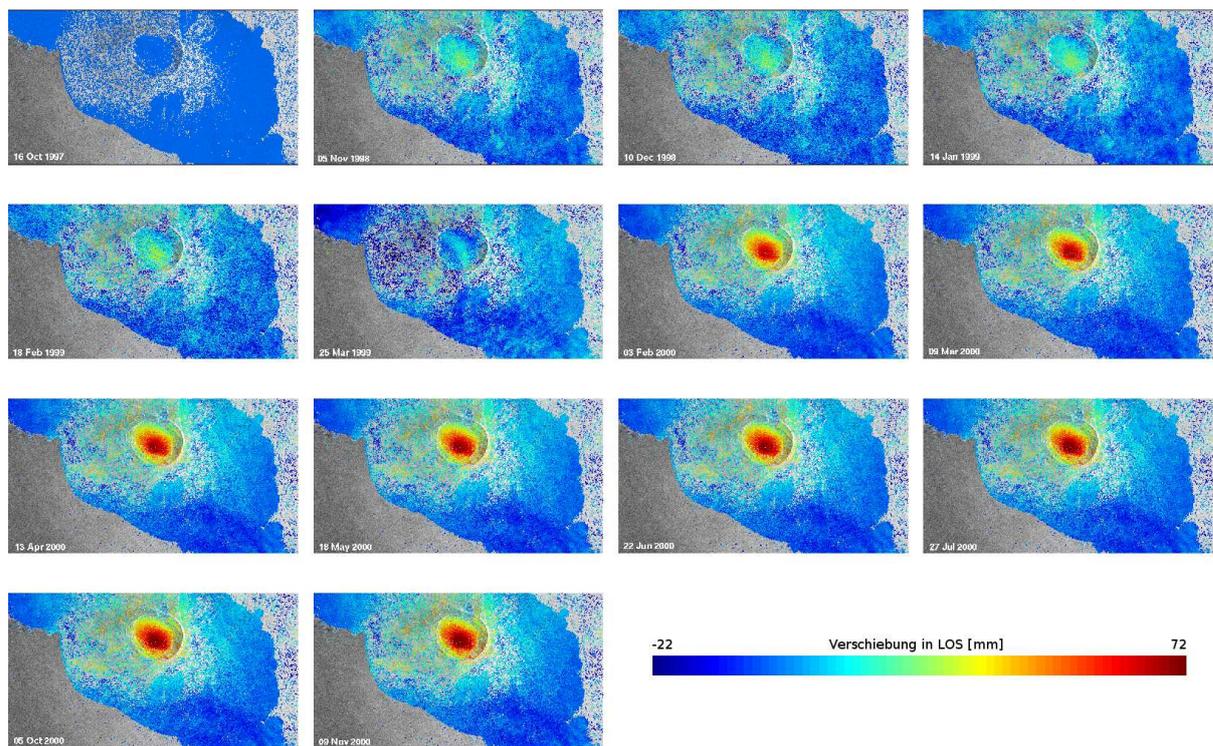


Abbildung 6.20: Deformation in Sichtlinie über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgometrie.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden, die in [9] vorgestellten Ergebnisse, mit dem StaMPS-Algorithmus reproduziert. Die maximale Differenz liegt bei etwa ± 1 cm/jahr Bewegungsrate im oberen linken Bereich des Auswertgebietes. Die Ursache für diesen Unterschied konnte nicht erschöpfend geklärt werden, allerdings sind sowohl Datumsgebung als auch Auswertgebiet unterschiedlich. Beide Faktoren könnten durchaus den auftretenden Unterschied erklären. Die Deformation in der Caldera stimmt sehr gut überein, so dass beide Ergebnisse als zueinander konsistent angesehen werden können. Die zweite dargestellte Auswertung, bei der der akzeptierte Anteil an *False Positives* erhöht wurde, zeigt eine erhöhte Punktdichte. Allerdings konnte für einen Großteil der zusätzlichen Punkte kein brauchbares Deformationssignal extrahiert werden. Dieses kann durch das erhöhte Phasenrauschen dieser Punkte erklärt werden. Die in beiden Auswertungen auftretenden Punkte zeigen hingegen ähnliche Ergebnisse. Auffallend ist in Anbetracht der letztgenannten Tatsache, dass die in beiden Auswertungen geschätzten Anteile der Masteratmosphäre, des Masterorbitfehlers und des räumlich korrelierten Blickwinkelfehlers deutliche Unterschiede aufweisen. Gerade die Schätzungen dieser Anteile sind in der verwendeten Version des StaMPS-Algorithmus sehr wichtig für die Phasenfortsetzung (siehe Abschnitt 5.4).

Die Referenzlösung des StaMPS-Algorithmus ist sehr gut validiert durch ein geophysikalisches Modell, wobei im Bereich der Caldera Abweichungen von ± 5 mm/jahr Bewegungsrate auftreten. Zusätzlich sind die Ergebnisse des StaMPS-Algorithmus durch Nivellements, elektro-optische Distanzmessungen und GPS-Daten validiert. Bei dieser Validierung tritt das Problem auf, das die mit dem StaMPS-Algorithmus geschätzte Deformation nur in Sichtlinie des Radarsensors bekannt ist und eine Aufteilung auf horizontale und vertikale dadurch Bewegung schwierig wird. Wird ausschließlich von vertikaler Deformation ausgegangen, treten Differenzen zwischen den *Ground Truth*-Daten im Bereich von ± 1 cm für einen Höhenunterschied zweier zehn Kilometer voneinander entfernt liegender Punkte auf. Wird zusätzlich eine horizontale Komponente angenommen, der der vertikalen Komponenten proportional ist, sind die Abweichungen deutlich geringer. Die Genauigkeit dieses Höhenunterschiedes wird von Andy Hooper für 68%-Konfidenz mit ± 2 cm angegeben. Der Algorithmus scheint also recht gut validiert und leistungsfähig genug, um großflächige, für viele Zwecke hinreichend genaue und zuverlässige Deformationsanalysen durchzuführen. Das gesetzte Ziel eine Auswertung mit dem StaMPS-Algorithmus

erfolgreich durchzuführen und zu dokumentieren, um nachfolgende Auswertungen zu erleichtern, ist also voll erfüllt worden.

7.1 Ausblick

Der StaMPS-Algorithmus wurde im Rahmen dieser Arbeit auf ein bergiges Gelände angewandt. Es ist nun zu untersuchen, wie zuverlässig dieser Algorithmus in anderen Gebieten arbeitet. Ein Beispiel wäre das Gebiet um Staßfurt. Dieses Gebiet besteht vor allem aus besiedelten Flächen auf der einen und landwirtschaftliche Flächen auf der anderen Seite. Während in den besiedelten Gebieten eine hohe PS-Dichte zu erwarten ist, werden die landwirtschaftlichen Flächen kaum stabile Streukörper enthalten, so dass das Gebiet in einige Blöcke mit hoher Punktdichte getrennt durch Gebiete niedriger Punktdichte zerfällt. Diese Blöcke müssen zusammengeführt werden, was vor allem in der Phasenfortsetzung Probleme bereiten dürfte. Um die für diese Gebiete erhaltenen Ergebnisse zu bewerten sind zunächst unabhängige *Ground Truth*-Daten anderer Messverfahren wie GPS oder Nivellement erforderlich. Zur Lösung des angesprochenen Problems bieten sich zunächst zwei Alternativen an. Für Daten des ASAR¹-Sensor (des ENVISAT²-Satelliten) könnten simultan aufgenommene MERIS³-Daten verwendet werden, um einen Tiefpassanteil der Atmosphäre zu schätzen, der gerade in der Phasenfortsetzung ein Problem darstellt. Da MERIS-Daten nur für den ASAR-Sensor des ENVISAT-Satelliten vorliegen, ist auch ein in [9] erwähnter Modellierungsschritt für die Atmosphäre interessant, in dem bekannte Charakteristiken der Atmosphäre ausgenutzt werden, um diese besser bestimmen zu können. Außerdem ist eine Kombination der PS-Technik mit sogenannten *short-baseline-methods*, wie in [11] beschrieben, möglich, um eine höhere Punktdichte zu erreichen. Die *short-baseline-methods* zeichnen sich vor allem durch die Auswertungen mehrerer Interferogrammpaare mit kleinen räumlichen, zeitlichen und Dopplerbasislinien aus, was Dekorrelationseffekte zwischen diesen Paaren minimiert. Schließlich ist zu prüfen ob die StaMPS-Auswertung durch Konzepte anderer Auswerteverfahren sinnvoll erweitert werden kann. So liefert StaMPS keine Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaße, die z.B. der STUN-Algorithmus liefert. Dieser wiederum benötigt ein bekanntes Bewegungsmodell. Eine Kombination, die die Vorteile beider Algorithmen bietet, wäre daher erstrebenswert.

¹Advanced Synthetic Aperture RADAR

²Environmental Satellite

³MEdium Resolution Imaging Specrometer

Anhang A

Abbildungen und Tabellen

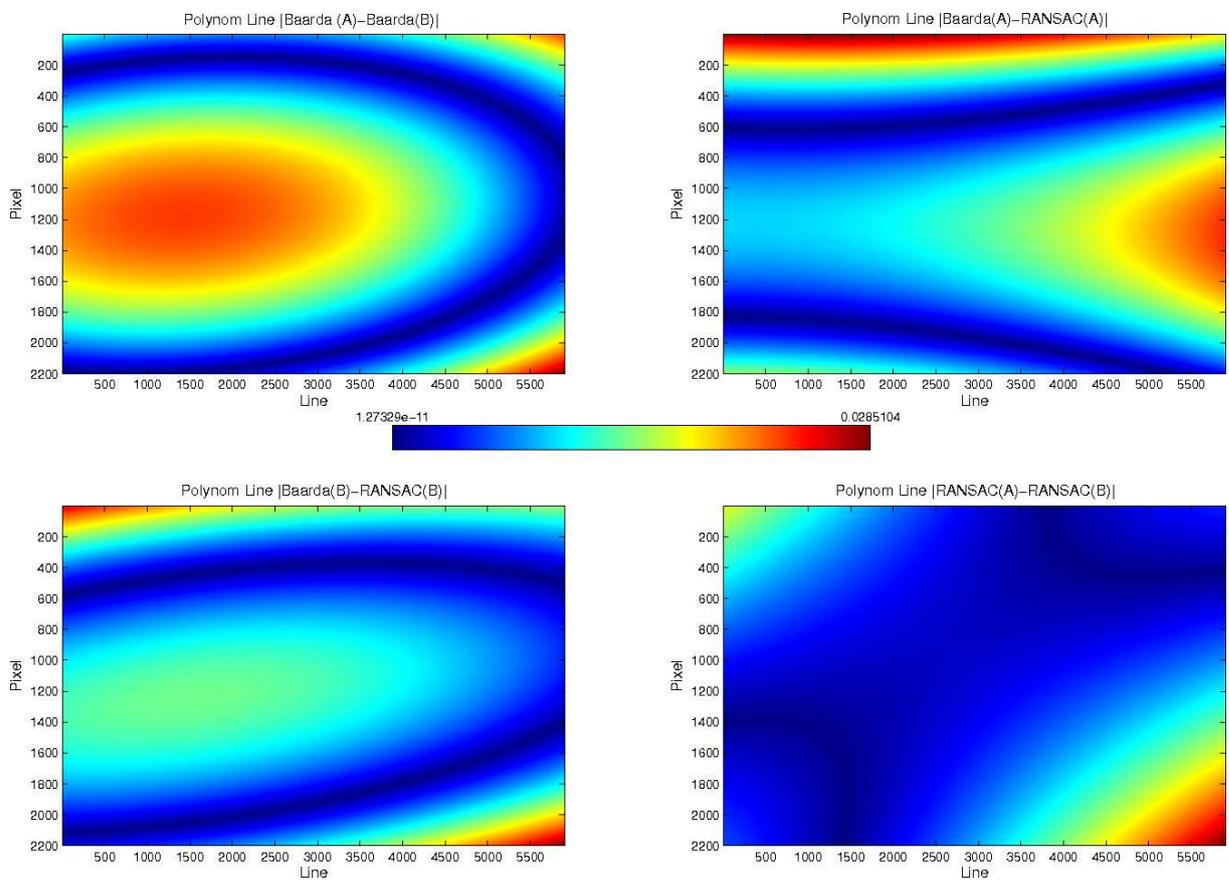


Abbildung A.1: Differenz der Polynome für den Offset in Linierrichtung für den Slave vom 14.01.1999. Oben links ist die Differenz der Polynome geschätzt mit der Fehlererkennung nach Baarda für die Version A und die Version B dargestellt. Unten rechts ist die entsprechende Differenz für die Fehlererkennung nach dem RANSAC-Algorithmus dargestellt. Oben rechts und unten links sind jeweils die Differenzen der Polynome nach Baarda und RANSAC für Version A bzw. Version B der Koregistrierung abgebildet.

Tabelle A.1: Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen

ID	Master	Slave
1	20000203	20000727
2	20000203	20001109
3	20000203	19971016
4	20000203	20000309
5	20000518	20000622
6	20000518	20001005
7	20000518	19990325
8	20000622	19981210
9	20000622	19990114
10	20000727	20001109
11	20000727	20000309
12	20000727	20000413
13	20001005	20000622
14	20001005	19990114
15	20001005	19990325
16	20001109	20000518
17	20001109	20000309
18	20001109	20000413
19	19920615	19990218
20	19971016	19981105
21	19981105	19920615
22	19981105	19990218
23	19990114	19981210
24	19990325	20000622
25	19990325	19990114
26	20000309	20000518
27	20000309	20001005
28	20000309	20000413
29	20000413	20000518
30	20000413	20001005
31	20000413	19990325

Tabelle A.2: Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen

Parameter	Bedeutung
clap_alpha	α aus Formel (5.2.6)
clap_beta:	β aus Formel (5.2.6)
clap_low_pass_wavelength	max. Wellenlänge für $L(f_x, f_y)$ Formel (5.2.6)
clap_win	Größe des Ausschnitts für gefensterte Fouriertrans.
filter_grid_size	Größe einer Rasterzelle Abschnitt 5.2.2
filter_weighting	Gewichtung Abschnitt 5.2.2 (SNR/Probabilistisch)
max_topo_err	maximaler Fehler des Geländemodells
percent_rand	Anteil der <i>False Positives</i> Formel (5.2.17)
recalc_index	Auswahl der Interferogr. (Abschnitt 5.4.2)
ref_lat/ref_lon	Lagerung des Deformationsfeldes auf Mittel dieser Punkte
scla_method	Kostenfunktion der Schätzung (Abschn. 5.4.2) L_1/L_2
scn_deramp_ifg	Abziehen einer geschätzten Ebene von Interferogrammen
scn_time_win	Tiefpassfilter über die Zeit in Abschnitt 5.4.3
scn_wavelengt	räumlicher Tiefpassfilter in Abschnitt 5.4.3
unwrap_gold_n_win	Fenstergr. des Goldsteinfilters vor der Phasenforts.
unwrap_grid_size	Größe der Rasterzellen bei der Phasenforts.
unwrap_ifg_index	Auswahl an Interferogrammen für Phasenforts.
unwrap_time_win	Schätzung des Rauschens (Abschnitt 5.4.1)
weed_standard_dev	Filterung aufgrund von Rauschen(Abschnitt 5.3)

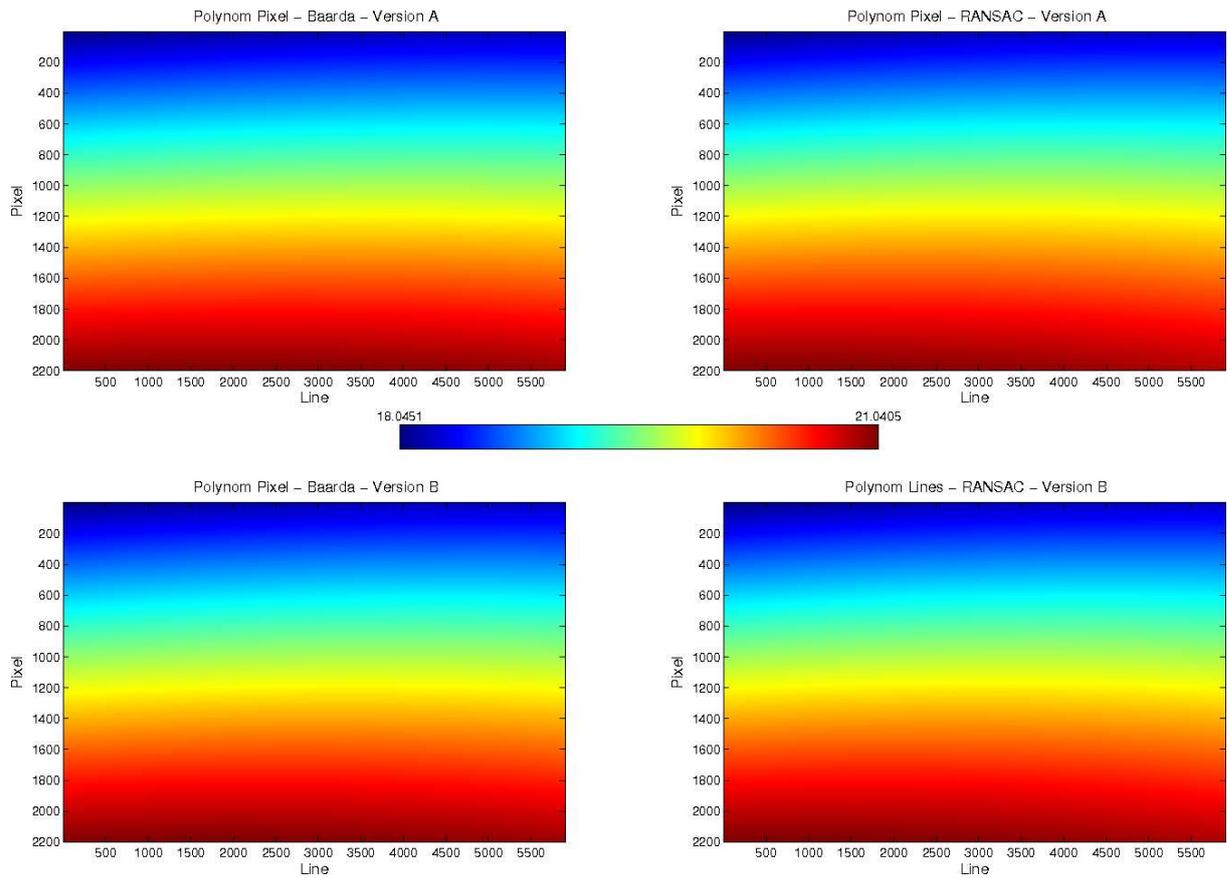


Abbildung A.2: Darstellung der vier bestimmten Polynome für den Offset in Pixelrichtung ausgewertet auf dem Raster des Masters. Die oberen Abbildungen zeigen die Polynome für die Fehlererkennung nach Baarda (links) und RANSAC (rechts) für die Version A der Registrierung. Die unteren Abbildungen zeigen die entsprechenden Polynome die Version B der Koregistrierung

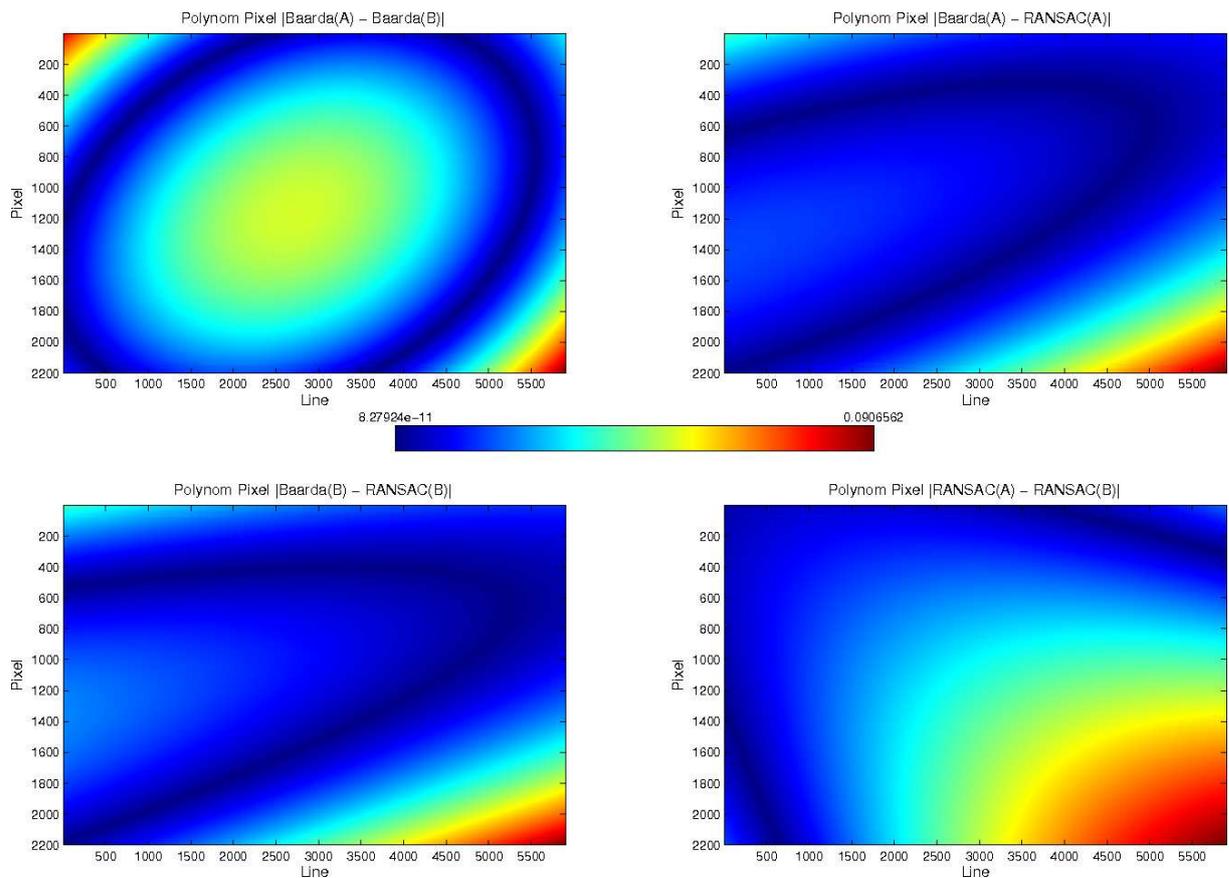


Abbildung A.3: Differenz der Polynome für den Offset in Pixelrichtung für den Slave vom 14.01.1999. Oben links ist die Differenz der Polynome geschätzt mit der Fehlererkennung nach Baarda für die Version A und die Version B dargestellt. Unten rechts ist die entsprechende Differenz für die Fehlererkennung nach dem RANSAC-Algorithmus dargestellt. Oben rechts und unten links sind jeweils die Differenzen der Polynome nach Baarda und RANAC für Version A bzw. Version B der Koregistrierung abgebildet.

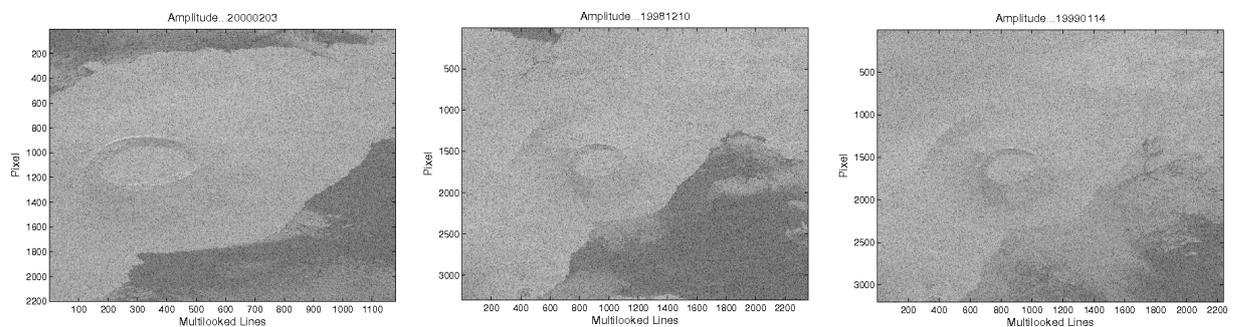


Abbildung A.4: Darstellung der Amplitudenbilder der Masterakquisition und der Akquisitionen vom 10.12.1998 und 14.01.1999

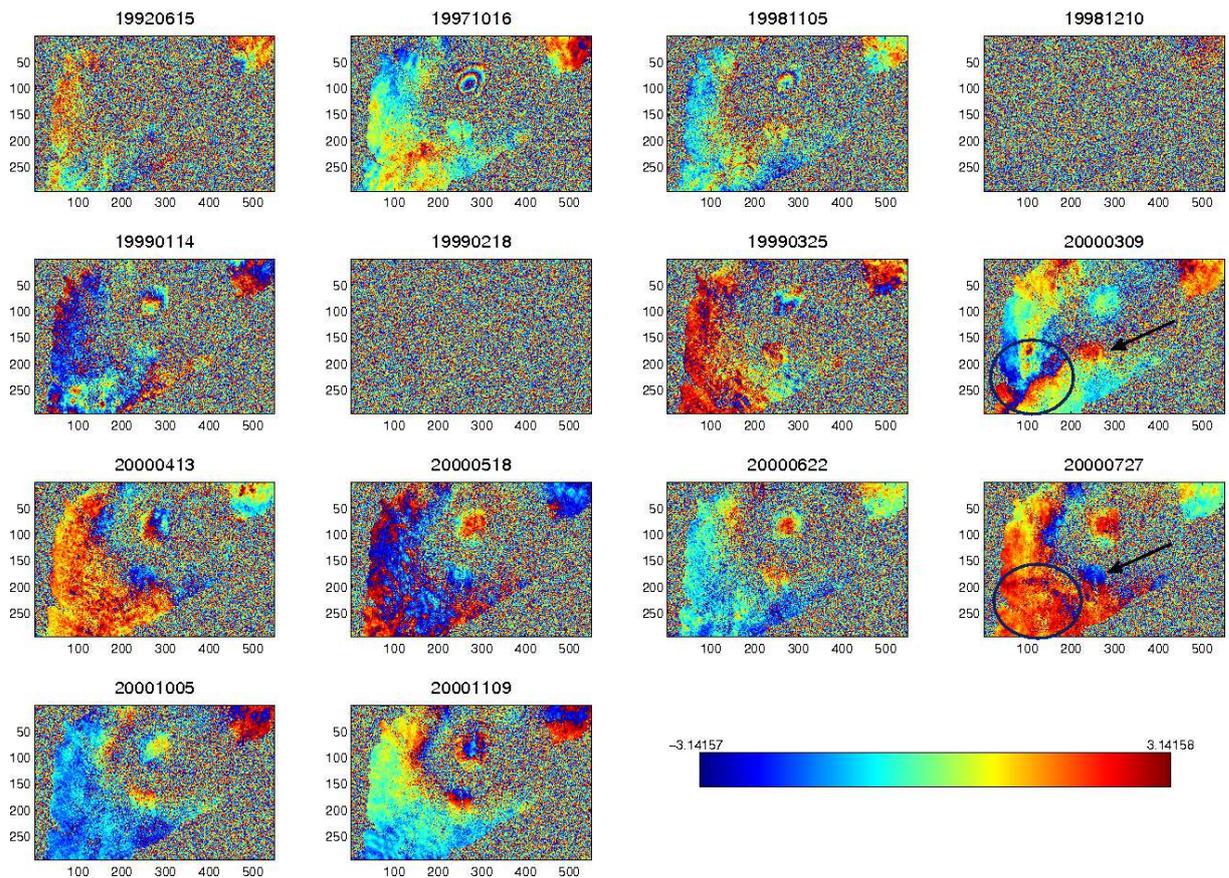


Abbildung A.5: Darstellung der um den Phasenanteil der flachen Erde und der Topographie bereinigten Interferogramme des auszuwertenden Stapels in der Entfernungsgeometrie des Masters. Die Rohdaten wurden einem zwanzigfachen Multilooking in Azimut und einem vierfachen Multilooking in Range unterzogen. Auf der x-Achse ist die Pixelkoordinate und auf der y-Achse die Linekoordinate aufgetragen.

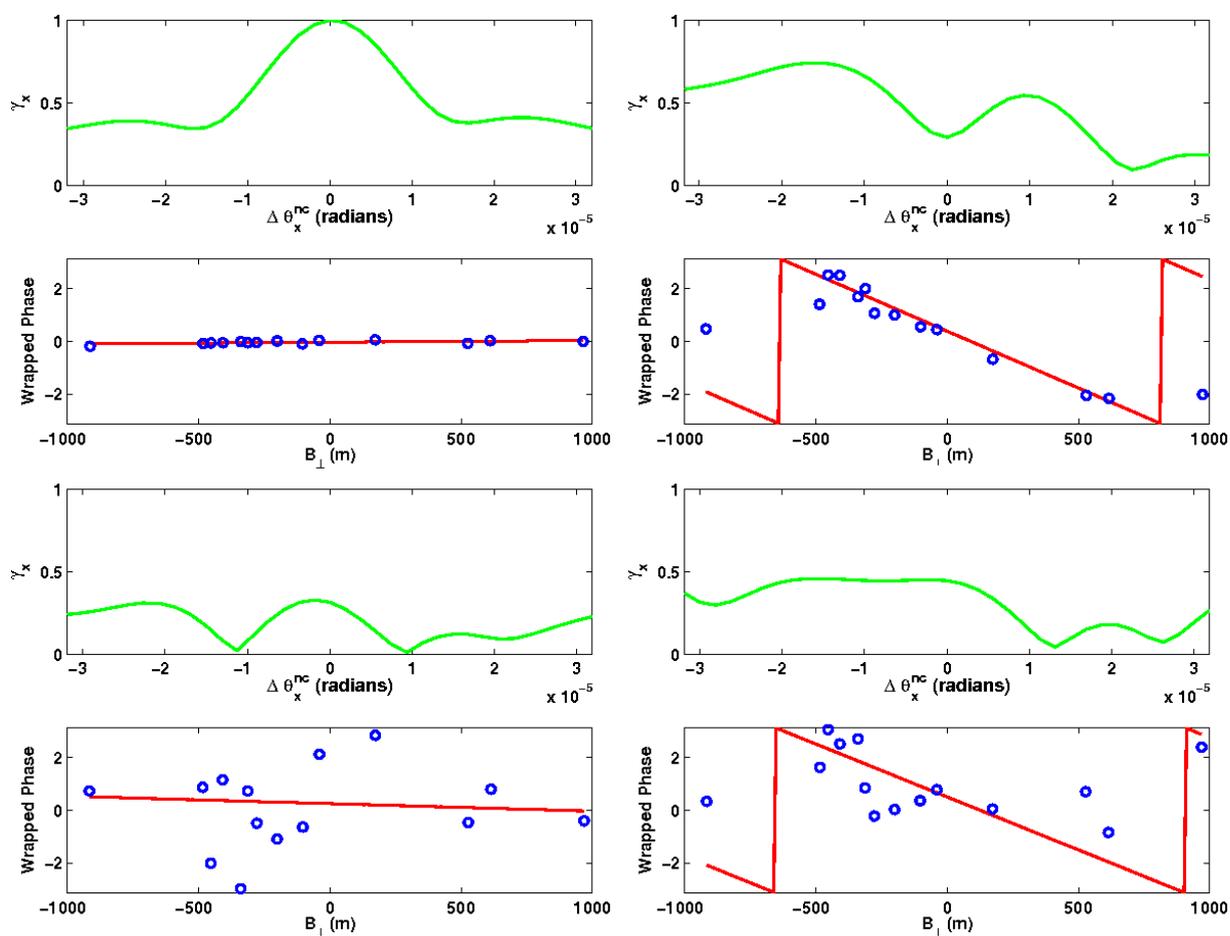


Abbildung A.6: Darstellung des Ergebnisses der Schätzung des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers durch Kohärenzmaximierung (jeweils im oberen Bereich jedes Subplots) und lineare Regression für die erste Regression des Algorithmus und einige ausgewählte Punkte. Im unteren Bereich jedes Subplots ist das Gesamtergebnis dargestellt. Der linke obere Plot zeigt eine Schätzung ohne vorhandene Mehrdeutigkeit mit kleinen Residuen. Der rechte obere Plot zeigt eine Schätzung mit Mehrdeutigkeit und kleinen Residuen. Der linke untere Plot zeigt eine Schätzung ohne Mehrdeutigkeit mit großen Residuen. Der rechte untere Plot zeigt eine Schätzung mit Mehrdeutigkeit und großen Residuen.

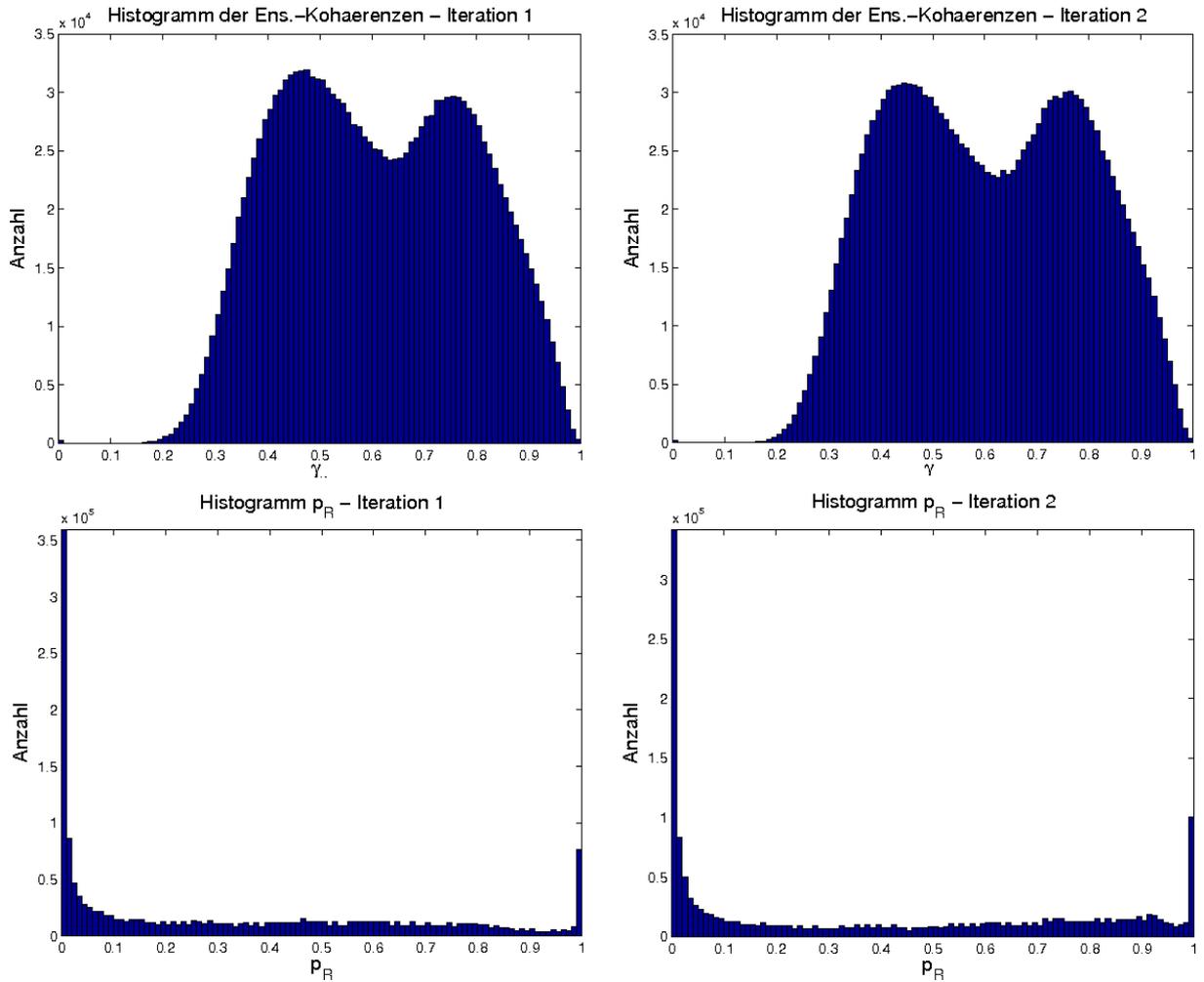


Abbildung A.7: Histogramme der im Phasenanalyseschritt geschätzten Ensemblekohärenzen für die erste und die zweite Iteration in der oberen beiden Subplots. Histogramme der Wahrscheinlichkeit zum nicht stabilen Anteil der Punkte zu gehören für die ersten beiden Iterationen in den unteren beiden Subplots.

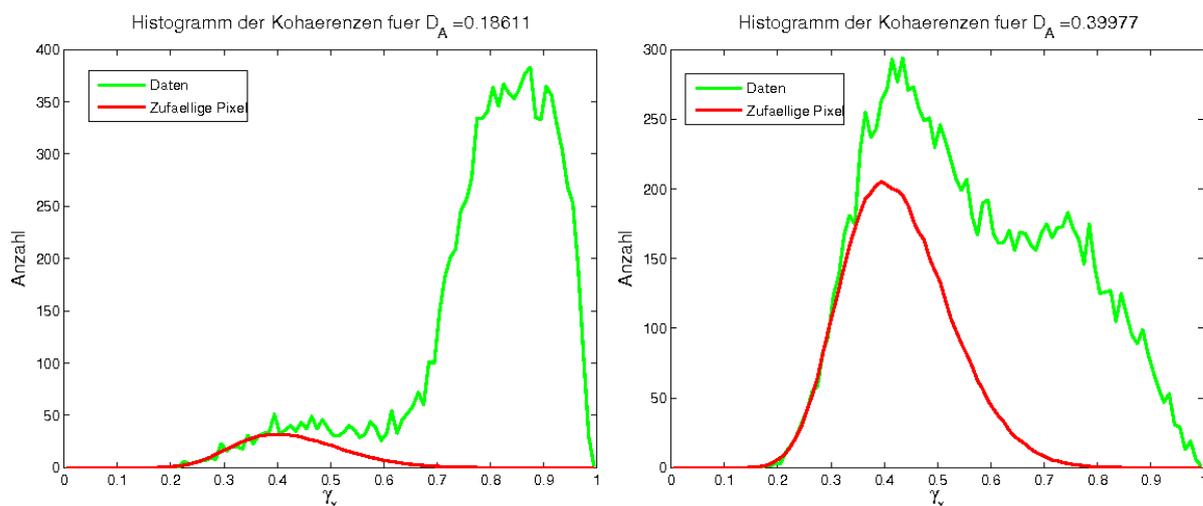


Abbildung A.8: Histogramm der Kohärenzen für zwei Amplitudendispersionsklassen.

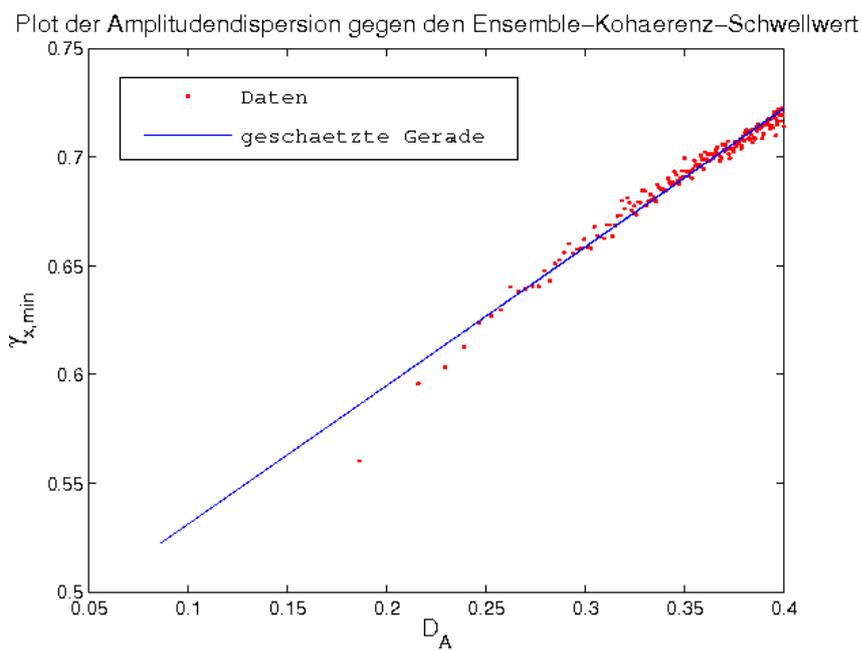


Abbildung A.9: Kohärenzschwellwert in Abhängigkeit von der Amplitudendispersion. Die roten Punkte repräsentieren den für jede Dispersionsklasse berechneten Schwellwert. Die blaue Regressionsgerade dient der Übertragung der berechneten Schwellwerte beliebige Amplitudendispersionwerte.

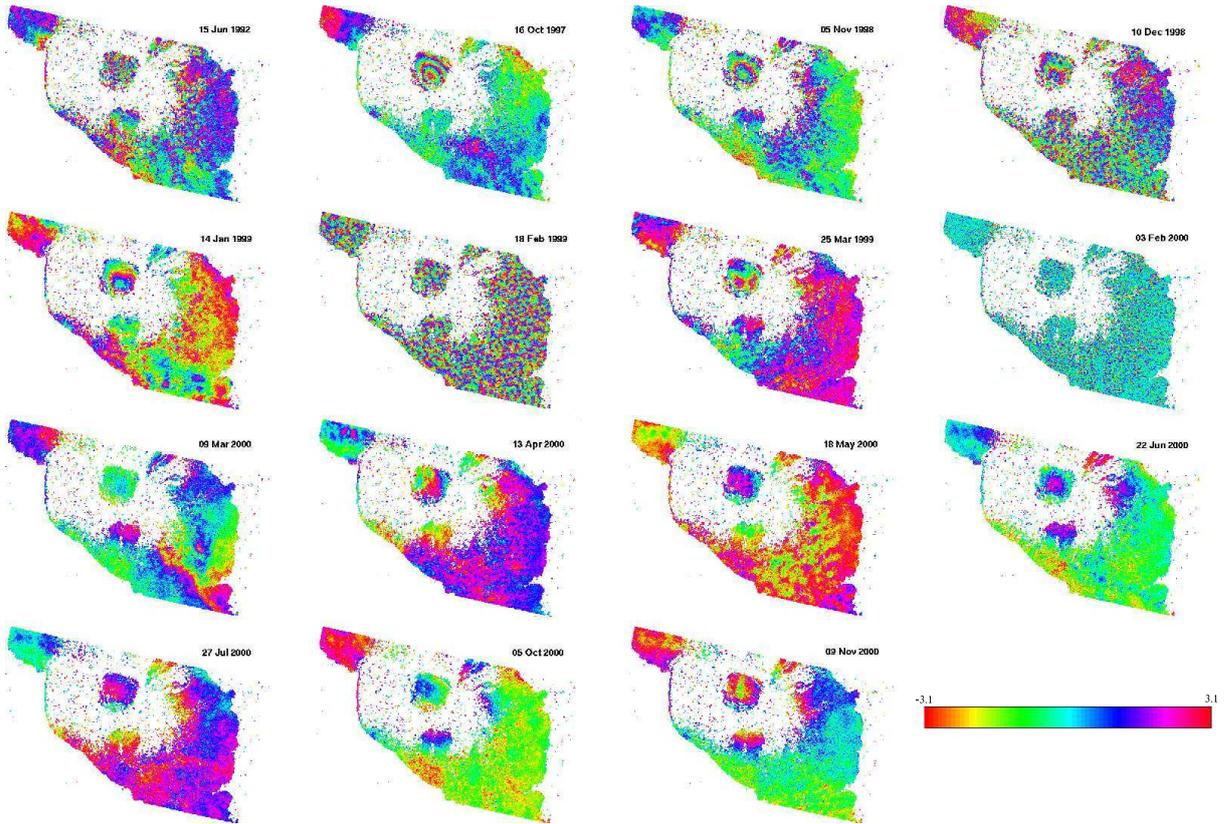


Abbildung A.10: Aufgewickelte Phase der ausgewählten PS inklusive des räumlich nicht korrelierenden Blickwinkelfehlers und des Masterrauschens.

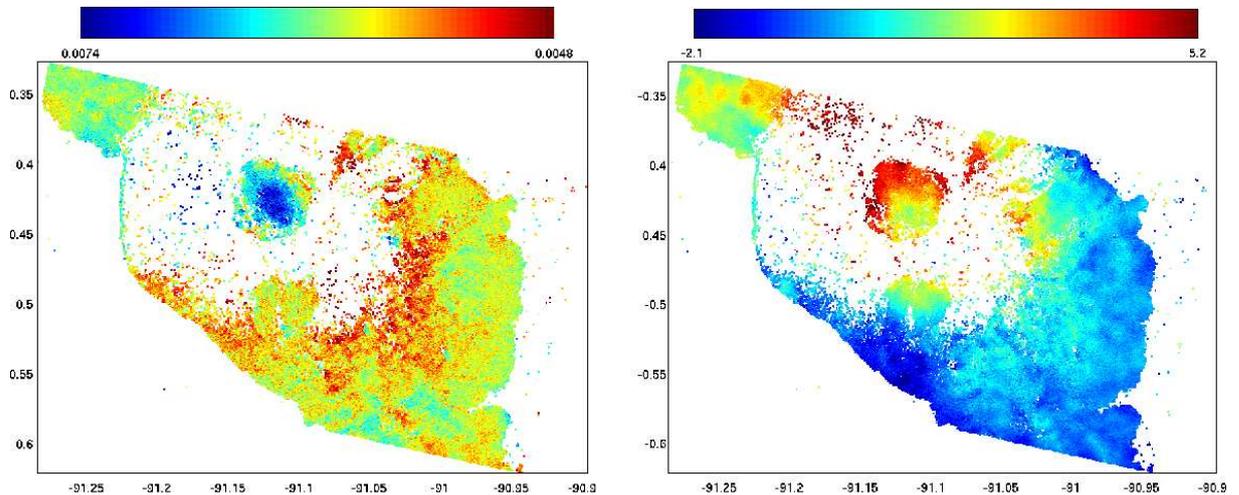


Abbildung A.11: Darstellung des geschätzten Blickwinkelfehlers (links) und der Masteratmosphäre in einem geographischen Koordinatensystem. Die linke Seite zeigt den Faktor die Steigung der geschätzten Geraden korrespondierend zum Blickwinkelfehler, während die rechte Seite den Achsenabschnitt korrespondierend zur Masteratmosphäre im Bogenmaß zeigt.

Plot der Amplitundispersion gegen den Ensemble-Kohärenz-Schwellwert

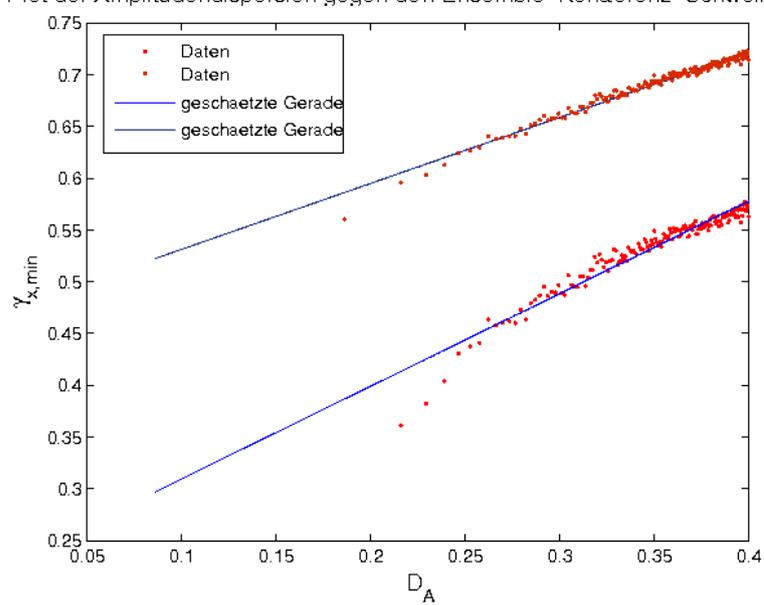


Abbildung A.12: Kohärenzschwellwert in Abhängigkeit von der Amplitundispersion für einen Anteil der *False Positives* von 1% (obere dunkelblaue Gerade) und einen Anteil der *False Positives* von 10% (untere blaue Gerade).

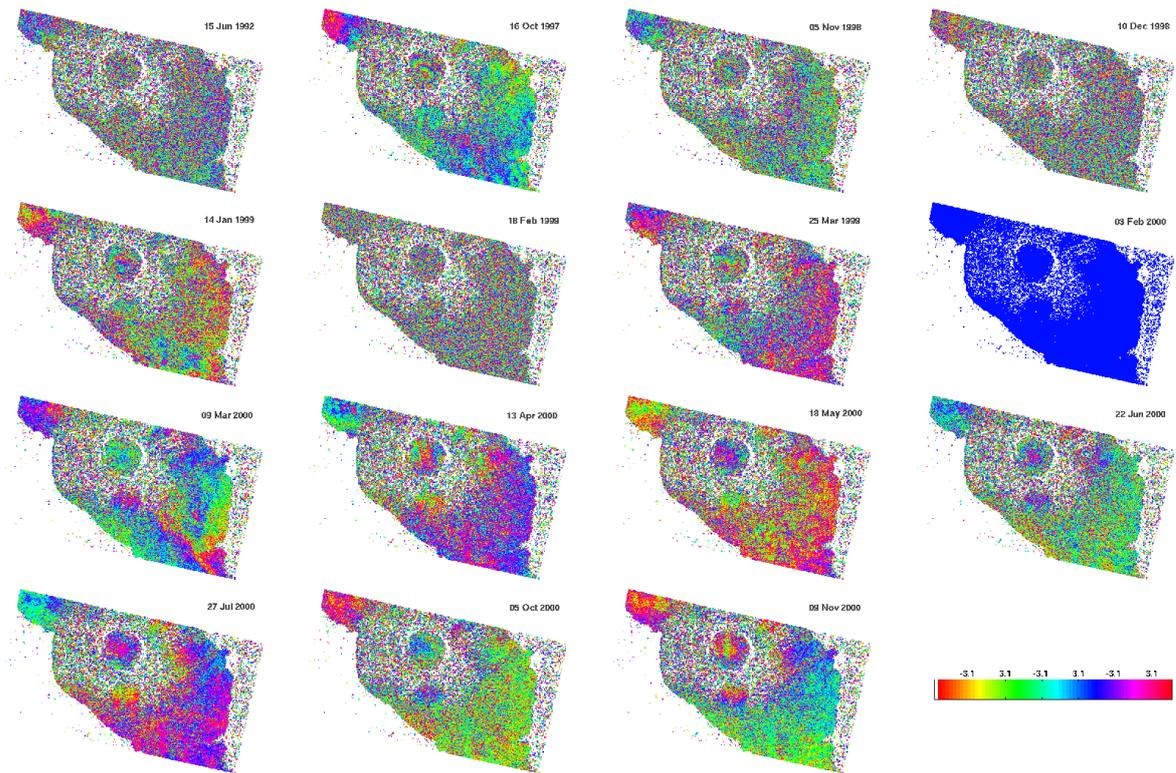


Abbildung A.13: Phasenwerte der ausgewählten Punkte inklusive des Einflusses des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers. Auswertung B.

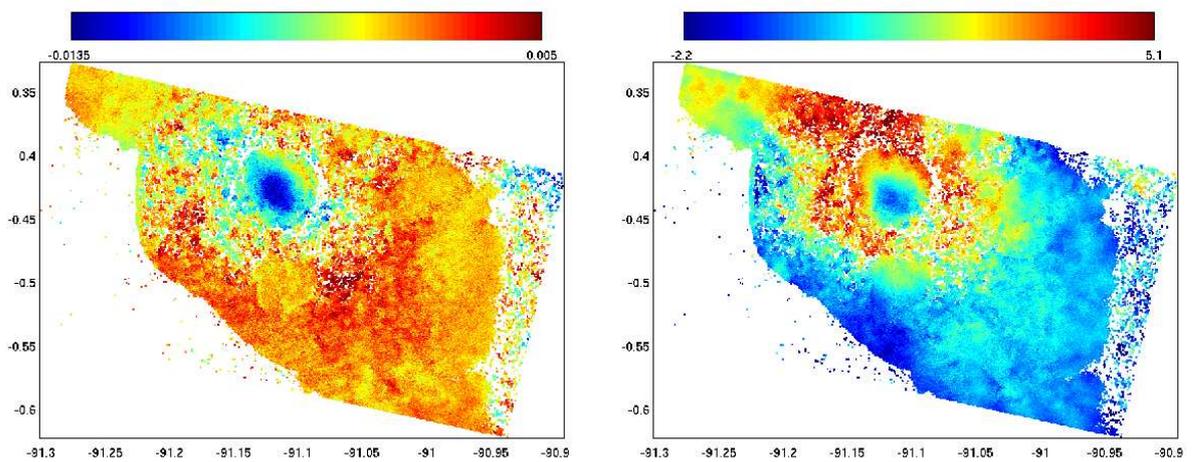


Abbildung A.14: Darstellung des geschätzten Blickwinkelfehlers (links) und der Masteratmosphäre in einem geographischen Koordinatensystem. Die linke Seite zeigt den Faktor die Steigung der geschätzten Geraden korrespondierend zum Blickwinkelfehler, während die rechte Seite den Achsenabschnitt korrespondierend zur Masteratmosphäre im Bogenmaß zeigt. Auswertung B.

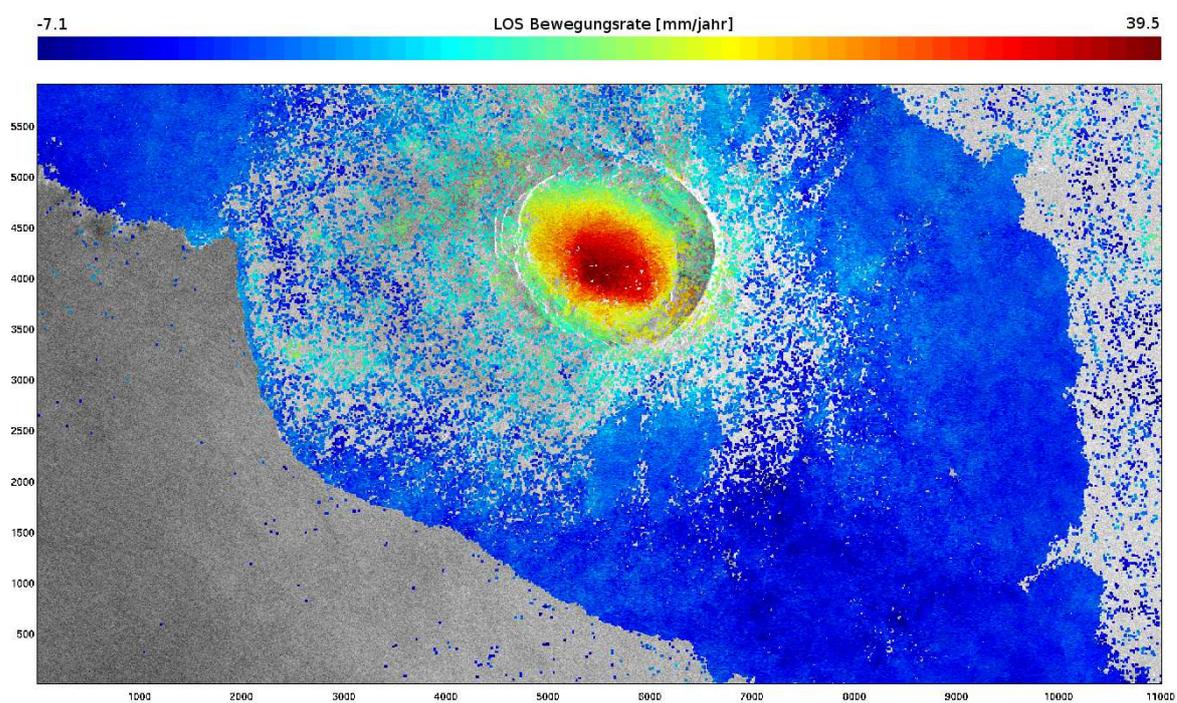


Abbildung A.15: Mittlere Deformationsrate über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgometrie. Auswertung B.

Anhang B

Komponenten des STUN-Algorithmus

B.1 Integer-Least-Squares-Estimation (ILS)

Nach dem Aufbau des Referenznetzwerkes und der Varianzkomponentenschätzung können Parameter für die Netzwerkkanten geschätzt werden. Dieses geschieht für jede Kante getrennt nach der LAMBDA-Methode. Die LAMBDA-Methode ist ein Verfahren, das im Rahmen der GPS-Trägerphasenmessung zur Lösung von Mehrdeutigkeiten eingesetzt wird und geht im Wesentlichen auf [17] zurück. Ansatzpunkt sind die Beobachtungsgleichungen in Matrizenform (Gleichung (4.2.5)):

$$y = Aa + Bb + e \quad \text{mit } a \in \mathbb{Z}; \quad b \in \mathbb{R} \quad (\text{B.1.1})$$

Der $[K \times 1]$ -Beobachtungsvektor y wird hierbei in Abhängigkeit der Parameter im $[U \times 1]$ -Vektor b und der unbekanntenen Mehrdeutigkeiten im $K \times 1$ -Vektor a ausgedrückt. Die Matrizen A und B sind passend dimensionierte und besetzte Designmatrizen, die für die Erläuterung des LAMBDA-Verfahrens wenig Bedeutung haben und für entsprechende Anwendungsfälle individuell angepasst werden müssen. Nach [17] wird Gleichung (B.1.1) in drei Schritten gelöst. Zunächst wird eine sogenannte Float-Lösung für das gesamte System durch einen gewöhnlichen kleinste-Quadrate-Algorithmus berechnet, d.h. die Forderung $a \in \mathbb{Z}$ wird zunächst fallen gelassen. Die Float-Lösung der Parameter wird hierbei in Anlehnung an die Notation in [17] und [16] mit \hat{a} bezeichnet. Im zweiten Schritt muss eine ganzzahlige Lösung für die Mehrdeutigkeiten gefunden werden, was durch Minimierung des nachfolgenden Ausdrucks gelingt:

$$\tilde{a} = \underset{a}{\operatorname{argmax}}\{(\hat{a} - a)Q_{\hat{a}}^{-1}(\hat{a} - a)\} \quad \text{mit } a \in \mathbb{Z}, \quad \hat{a} \in \mathbb{Z} \quad (\text{B.1.2})$$

Hierbei ist $Q_{\hat{a}}^{-1}$ die Kofaktormatrix der Float-Lösungen der Mehrdeutigkeiten. Offensichtlich ist die Lösung im Falle einer diagonalen Kofaktormatrix, was bei unkorrelierten Mehrdeutigkeiten der Fall wäre, einfaches Runden auf den nächsten ganzzahligen Wert. Im allgemeinsten Fall ist das Problem aber weder durch einfaches Runden (aufgrund auftretender Korrelationen) noch durch einen gewöhnlichen kleinste-Quadrate-Ansatz zu lösen (wegen der Forderung nach ganzzahligen Lösungen). Tatsächlich wird eine Lösung durch

eine Suche in einem festgelegten Bereich des Parameterraums erhalten. Allerdings wird die Suche nach einer Lösung auf Basis von Gleichung (B.1.2) durch die Form des Suchraums, die durch die Kofaktormatrix $Q_{\hat{a}}^{-1}$ bestimmt wird, ineffizient [18]. Daher wird eine Transformation konstruiert, die Gleichung (B.1.2) in eine Form überführt, die günstiger für eine Lösungssuche ist. Diese Transformation wird in [17] hergeleitet und ist volumenerhaltend, durch eine ganzzahlige Abbildungsmatrix vermittelt und führt zur Dekorrelation der Kofaktormatrix der Mehrdeutigkeiten. Alle drei Eigenschaften sind hierbei notwendig für die Effektivität der Mehrdeutigkeitsuche. Das durch Anwenden der Transformation aus Gleichung (B.1.2) hervorgehende Problem ist nach [16] gegeben durch:

$$z = Z^T a, \quad \hat{z} = Z^T \hat{a}, \quad Q_z = Z^T Q_{\hat{a}} Z \quad (\text{B.1.3})$$

$$\check{z} = \underset{z}{\operatorname{argmax}} \{ (\hat{z} - z) Q_{\hat{z}}^{-1} (\hat{z} - z) \} \quad \text{mit } z \in \mathbb{Z} \quad (\text{B.1.4})$$

Durch die Ganzzahligkeit der Transformationsmatrix ist sichergestellt, dass gefundene ganzzahlige Lösungen \check{z} nach Rücktransformation gegeben durch $\check{a} = (Z^T)^{-1} \check{z}$ wieder ganzzahlig sind. Findet man also eine Lösung für \check{z} , ist auch eine Lösung für \check{a} und damit für das gesamte System gefunden, da sich Gleichung (B.1.1) bei bekannten Mehrdeutigkeiten durch eine gewöhnliche kleinste Quadrate-Lösung berechnen lässt. Das Größe des Suchraums für die ursprünglichen und die transformierten Residuen ist gleich, da die Transformation volumenerhaltend ist. Der Suchraum lässt sich nach [18] durch die folgende Gleichung beschreiben:

$$\Omega_z = \{ z \in \mathbb{Z} \mid (\hat{z} - z) Q_{\hat{z}}^{-1} (\hat{z} - z) \leq \chi^2 \} \quad (\text{B.1.5})$$

Die konstante Größe χ^2 beschreibt in diesem Zusammenhang die Größe des Suchraums. Durch Umschreiben der linken Seite von Gleichung (B.1.5) können die Grenzen des Suchraums in den einzelnen Dimensionen des Lösungsraumes berechnet werden [18]:

$$\begin{aligned} (\hat{z}_1)^2 &\leq \sigma_1^2 \chi^2 \\ (\hat{z}_{2|1} - z_2^2) &\leq \sigma_{2|1}^2 \left(\chi^2 - \frac{(\hat{z}_1 - z_1)^2}{\sigma_1^2} \right) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (\text{B.1.6})$$

Die Größe $\hat{z}_{2|1}$ ist dabei das Ergebnis einer bedingten Schätzung nach kleinsten Quadraten und geht aus dem Transformationsschritt hervor. Dabei wird versucht, in jedem Schritt eine Einzeltransformation zu erzeugen, die die Varianz in einer gerade betrachteten Dimension unter Beibehaltung aller vorher berechneter Einzeltransformationen minimiert (siehe [17] für eine Ableitung der Transformationsvorschrift).

Die Effektivität der Suche hängt nun von Form und Größe des Suchraums ab. Durch die oben erläuterte Transformation wurde die Form des Suchraums optimiert, somit verbleibt als Verbesserungspotential die geeignete Wahl von dessen Größe. Um diese zu bestimmen, wird ein schnelles Verfahren zur Mehrdeutigkeitslösung verwendet, um einen Wert für χ^2 festzulegen. Im Fall des STUN-Algorithmus wird ein sogenanntes *bootstrap*-Verfahren verwendet. Dabei wird die erste transformierte Mehrdeutigkeit zunächst einfach gerundet. Anschließend werden alle Mehrdeutigkeiten um die Korrelation mit der ersten Mehrdeutigkeit bereinigt und die zweite Mehrdeutigkeit wird gerundet. Alle noch nicht bearbeiteten Mehrdeutigkeiten werden nun um die Korrelation mit der zweiten Mehrdeutigkeit

bereinigt usw. (für eine ausführlichere Beschreibung siehe [18]). Wenn alle Mehrdeutigkeiten auf ganze Zahlen gesetzt worden sind, ist das Verfahren beendet. Da die Erfolgsquote des Bootstrap-Verfahrens (siehe [16] bzw. [18] für eine Definition der sogenannten success-rate eines einfachen bootstrap-estimators) zu gering ist, werden weitere Iterationen analog zum eben beschriebenen Verfahren durchgeführt, wobei in der k -ten Iteration die schon als Ganzzahl festgelegte k -te Mehrdeutigkeit um Eins erhöht oder verringert wird, abhängig davon ob die um die Korrelation bereinigte Float-Lösung (siehe [18] für entsprechende Korrekturformel) größer oder kleiner als die ursprüngliche Float-Lösung ist. Die optimale Lösung des so beschriebenen *extended bootstrap estimators* erfüllt Gleichung (B.1.4) im Rahmen der betrachteten möglichen Lösungen. Die erhaltenen minimale Fehlernorm bestimmt dann die Größe des Suchraums bei der eigentlichen Durchführung der LAMBDA-Methode.

B.2 Räumliche Integration der Parameterdifferenzen

Mit dem ILS-Estimator werden für jede Kante des Referenznetzwerkes Parameterdifferenzen geschätzt. Aus diesen Differenzen müssen die absoluten Werte an den Knoten berechnet werden, was in Anlehnung an die Auswertung eines Nivellementnetzes geschieht. Da die in diesem Fall als Beobachtungen aufgefassten Parameterdifferenzen relative Werte sind, muss über das Datum verfügt werden, was in [16] durch Einführen eines Referenzpunktes (o.B.d.A. der erste Punkt, dessen Parameter zu Null gesetzt werden) gelingt. Alternativen zur Datumsgebung sind in [25] beschrieben. Das funktionale Modell ist für einen beliebigen Parameter α_h , wobei der Index h die einzelnen Punkte des Referenznetzwerkes identifiziert, gegeben durch:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{2,1} \\ \alpha_{3,1} \\ \vdots \\ \alpha_{H-1,H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \vdots \\ \alpha_{H-1} \\ \alpha_H \end{bmatrix} = \quad (\text{B.2.1})$$

$$y = C \cdot b$$

Die Parameterdifferenzen $\alpha_{i,j}$ werden hierbei als Differenz der Parameter α_i und α_j ausgedrückt. Die obere Grenze für den Index h ist hierbei die Anzahl der Netzwerk-Punkte H . Der Parameter des Referenzpunktes wird zu Null gesetzt, was einer Lagerung der Parameter auf einem Punkt entspricht.

B.3 Testen von Kanten und Punkten

Sowohl Netzwerkkanten als auch Netzwerkpunkte können grobe Fehler enthalten. In diesem Fall müssen die entsprechenden Elemente aus dem Netzwerk entfernt werden, was im Rahmen einer sogenannten *Detection Identification Adaption Alternative Hypothesis Testing*-Prozedur (DIA) durchgeführt wird. Zunächst wird hierbei festgestellt, ob ein Problem vorhanden ist (Detection). Hierzu wird der Globaltest der Ausgleichung genutzt

(siehe [25]).

$$\begin{aligned} H_0: \frac{\hat{e}^T \cdot Q_y^{-1} \cdot \hat{e}}{\sigma_0^2} &\sim \chi^2(r, 0) \\ H_A: \frac{\hat{e}^T \cdot Q_y^{-1} \cdot \hat{e}}{\sigma_0^2} &\sim \chi^2(r, \lambda) \end{aligned} \quad (\text{B.3.1})$$

H_0 und H_A stehen für Null- und Alternativhypothese, \hat{e} für die aposteriori Residuen der räumlichen Integration, Q_y^{-1} für die Inverse der VKM der Parameterdifferenzen und σ_0^2 für den apriori Varianzfaktor, der oft zu Eins gewählt wird. Schließlich bezeichnet $\chi^2(r, \lambda)$ die Chiquadrat-Verteilung mit r Freiheitsgraden, wobei r in diesem Fall für die Redundanz des Systems steht, und dem Nichtzentralitätsparameter λ . Die Testentscheidung kann mit einer passend gewählten Testgröße gefunden werden (siehe [25]). Wenn nicht die Nullhypothese angenommen wird, muss die Stelle identifiziert werden, an der ein Problem auftritt, indem explizite Alternativhypothesen aufgestellt werden. Hierbei wird eine Modellerweiterung wie folgt eingeführt und auf Gültigkeit überprüft:

$$\begin{aligned} H_0: E\{y\} &= C \cdot b \\ H_A: E\{y\} &= C \cdot b + C_q \nabla \end{aligned} \quad (\text{B.3.2})$$

Die Besetzung der Matrix C_q wird hierbei je nach Art der Modellerweiterung gewählt (in diesem Fall Punkt oder Kantentest siehe [16]). Die Variable ∇ steht für den groben Fehler. Basierend auf der Matrix C_q , den Residuen \hat{e} und der VKM der der Beobachtungen Q_y kann ein Testgröße T_q berechnet werden:

$$T_q = \hat{e}^T Q_y^{-1} C_q (C_q^T Q_y^{-1} Q_{\hat{e}} Q_y^{-1} C_q)^{-1} C_q^T Q_y^{-1} \hat{e} \quad (\text{B.3.3})$$

Diese ist im Falle einer anzunehmenden Null-Hypothese H_0 des Einzeltest zentral chiquadratverteilt und folglich nichtzentral chiquadratverteilt, wenn die Alternativhypothese H_A anzunehmen ist. Die entsprechende Testentscheidung ist nach [16] gegeben durch:

$$\frac{T_q}{\chi_{\alpha(q)}^2} \begin{cases} > 1 & H_A \text{ annehmen} \\ \leq 1 & H_0 \text{ annehmen} \end{cases} \quad (\text{B.3.4})$$

Im Allgemeinen werden mehrere Alternativhypothesen formuliert. Es wird dann die Alternativhypothese angenommen, die die maximale Testgröße aufweist. Der Wert α in Gleichung (B.3.4) wird als Signifikanzniveau des Tests bezeichnet und gibt die Wahrscheinlichkeit für einen Fehlschluss erster Art an (Produzentenrisiko). Bei der hier verwendeten B-Methode des Testens ist α eine Funktion der Freiheitsgrade des jeweiligen Einzeltests, was durch die Abstimmung der Testgüten aller erfolgenden Tests bedingt wird. Dieses hat den Vorteil, dass alle Tests mit derselben Wahrscheinlichkeit einen Fehlschluss zweiter Art liefern und somit vergleichbar sind [16]. Möglichkeiten zur Bestimmung des Signifikanzniveaus in Abhängigkeit der Freiheitsgrade findet man in [25]. Die größte Testgröße des Einzeltests wird nun in jedem Identifikationsschritt als Ausreißer identifiziert und im anschließenden Adaptionsschritt entfernt. Es ist anzumerken, dass für jeden Punkt und für jede Kante eine Testgröße gebildet wird, so dass in jedem Schritt entweder ein Punkt oder eine Kante entfernt wird. Nach dem Adaptionsschritt wird die DIA-Prozedur so lange durchgeführt, bis der Globaltest angenommen wird [16].

Diese Prozedur wird vornehmlich bei der Berechnung des Referenznetzwerkes eingesetzt. Bei der Hinzunahme weiterer Punkte in das Netzwerk hängt die Strategie Kanten bzw. Punkte zurückzuweisen von der Anzahl der Referenzpunkte ab, mit der ein neuer Punkt verbunden wird. Wird ein neuer Punkt beispielsweise mit mehreren Referenzpunkten verbunden, kann man einzelne Kanten bzw. den kompletten Neupunkt nach der beschriebenen Strategie testen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	SAR-Abbildungsgeometrie	6
2.2	Entfernungs-Geometrie	7
2.3	Veranschaulichung des Prinzips der Synthetic Aperture Radar Technik . .	10
2.4	Verzerrungen bei Abbildung in die Entfernungs-Geometrie	11
3.1	Geometrische Konfiguration der across-track-Interferometrie	14
3.2	Zusammenhang zwischen Blickwinkel, Satellitenhöhe und Höhe des Geländepunktes	16
3.3	Schritte bei der dINSAR-Verarbeitung	19
3.4	A) Die Spektren sind in Azimutrichtung um die Differenz zwischen den Dopplercentroidfrequenzen verschoben. Durch die limitierte Verarbeitungsbreite ergeben sich nicht überlappende Signalanteile (N1,N2), die wie Rauschen wirken. B) Abbildung unterschiedlicher Teile des Objektspektrums in gleiche Frequenzbereiche zweier Aufnahmen. Abbildung nach [7].	21
3.5	An den Position (i,k) und (l,l) treten Residuen ungleicher Polarität auf, die durch einen Branch-Cut verbunden werden. Das Ergebnis eines Ringintegrals, dessen Integrationspfad diesen Branch-Cut kreuzt (wie eingezeichnet), ist ungleich Null	27
3.6	Eine geschlossene Residuenkurve schneidet das Interferogramm an zwei Stellen und erzeugt durch die Durchlaufrichtung der Kurve und die Orientierung der Ebene Residuen unterschiedlicher Polarität, die beim <i>Residue-Cut</i> -Algorithmus durch einen <i>Branch-Cut</i> verbunden werden müssen . . .	29
4.1	Geometrische Begründung der Amplitudendispersion als Schätzung der Phasenstandardabweichung	38
4.2	Ablauf der STUN-Prozessierung; eckige Kästen stehen für Daten, gestrichelte eckige Kästen stehen für Datenstapel (variabel in der Zeit) und ovale Kästen stehen für Prozesse [16]	43
5.1	Ablauf der StaMPS-Prozessierung; Eckige Felder sind Daten und ovale Felder sind Prozesse; Rot/Grün/Blau umfassen alle Daten in StaMPS Schritt 2/3/4	51
5.2	Aus simulierten Signalen berechnete Amplitudendispersionen und Phasenstandardabweichungen für verschiedene Signal-Rausch-Verhältnisse. Die rote Kurve zeigt die Phasenstandardabweichung. Die blaue Kurve zeigt die Amplitudendispersion. Die dargestellten Fehlerbalken kennzeichnen den Bereich einer Standardabweichung. Simulation ist angelehnt an [3, 9] . . .	55

5.3	Signalmodell nach [9] zur Berechnung des SNR bei bekannter Amplitude A und bekanntem Phasenrauschen ϕ_n . Das Gesamtsignal ergibt sich hierbei einfach als Summe eines Signals mit konstanter Amplitude und einem Rauschvektor n , der durch einen zirkular komplex gaussverteilten Prozess beschrieben wird, wobei Real- und Imaginärteil n_R bzw. n_I unkorreliert angenommen werden.	58
6.1	Der linke Teil der Abbildung zeigt das Auswertebereich, wobei die obere linke und die untere rechte Ecke des betrachteten Gebietes jeweils markiert sind. Überblendet wird auch der Bereich, der durch die Masteraufnahme am 03.02.2000 abgedeckt ist, dargestellt. Auf der rechten Seite ist eine Übersichtskarte mit der Lage der Galapagos-Inseln an der Westküste Südamerikas dargestellt	68
6.2	Histogramm der effektiven räumlichen Basislinien	70
6.3	Inlier-Verschiebungsvektoren vor dem Hintergrund des Amplitudenbildes vom 14.01.1999 für das Verfahren nach Baarda (links) und das RANSAC-Verfahren (rechts)	71
6.4	Outlier-Verschiebungsvektoren nach dem RANSAC-Algorithmus für das Bildpaar 14.01.1999 und 10.12.1998	72
6.5	Darstellung der Korrelationmaxima der ursprünglichen 3600 Korrelationsfenster über ihrer Position im Masteramplitudenbild 199901114.	73
6.6	Überlagerung der mit den Koregistrierungsversion A und B in die Mastergeometrie transformierten Slaves vom 10.12.1998 und 14.01.1999.	74
6.7	Darstellung der Korrelationmaxima der ursprünglichen 3600 Korrelationsfenster über ihrer Position im Masteramplitudenbild 199901114 nach der Korrektur des Quellcodes.	75
6.8	Inlier-Verschiebungsvektoren vor dem Hintergrund des Amplitudenbildes vom 14.01.1999 für das Verfahren nach Baarda (links) und das RANSAC-Verfahren (rechts) nach der Korrektur des Quellcodes	76
6.9	Darstellung der vier bestimmten Polynome für den Offset in Linierrichtung ausgewertet auf dem Raster des Masters. Die oberen Abbildungen zeigen die Polynome für die Fehlererkennung nach Baarda (links) und RANSAC (rechts) für die Version A der Registrierung. Die unteren Abbildungen zeigen die entsprechenden Polynome die Version B der Koregistrierung	77
6.10	Histogramm der Vektorlängen für die vier Koregistrierungsergebnisse bei Koregistrierung eines in die Mastergeometrie transformierten Slaves mit dem Master	78
6.11	Darstellung der um den Phasenanteil der flachen Erde und der Topographie bereinigten Interferogramme des auszuwertenden Stapels in der Entfernungsgeometrie des Masters. Auf der x-Achse ist die (multilooked) Linieneordinate und auf der y-Achse die Pixelkoordinate aufgetragen.	79
6.12	Darstellung der Phase der nach der Auswahl auf Basis der Amplitudendispersion verbliebenen Interferogrammpunkte in einem geographischen Koordinatensystem (Länge auf der x-Achse und Breite auf der y-Achse). . . .	80
6.13	Ensemble-Kohärenz der Punkte der Vorauswahl in einem geographischen Koordinatensystem.	82

6.14	Die um den Phasenanteil des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers und des Rauschens in der Masterakquisition bereinigten aufgewickelten Phasen auf den ausgewählten PS.	84
6.15	Ergebnis der Phasenfortsetzung für die ausgewählten PS	86
6.16	Deformation in Sichtlinie über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgeometrie.	87
6.17	Mittlere Deformationsrate über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgeometrie.	88
6.18	Phasenwerte der ausgewählten Punkte abzüglich des Einflusses des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers.	89
6.19	Ergebnis der Phasenfortsetzung.	90
6.20	Deformation in Sichtlinie über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgeometrie.	92
A.1	Differenz der Polynome für den Offset in Linierrichtung für den Slave vom 14.01.1999. Oben links ist die Differenz der Polynome geschätzt mit der Fehlererkennung nach Baarda für die Version A und die Version B dargestellt. Unten rechts ist die entsprechende Differenz für die Fehlererkennung nach dem RANSAC-Algorithmus dargestellt. Oben rechts und unten links sind jeweils die Differenzen der Polynome nach Baarda und RANAC für Version A bzw. Version B der Koregistrierung abgebildet.	95
A.2	Darstellung der vier bestimmten Polynome für den Offset in Pixelrichtung ausgewertet auf dem Raster des Masters. Die oberen Abbildungen zeigen die Polynome für die Fehlererkennung nach Baarda (links) und RANSAC (rechts) für die Version A der Registrierung. Die unteren Abbildungen zeigen die entsprechenden Polynome die Version B der Koregistrierung	98
A.3	Differenz der Polynome für den Offset in Pixelrichtung für den Slave vom 14.01.1999. Oben links ist die Differenz der Polynome geschätzt mit der Fehlererkennung nach Baarda für die Version A und die Version B dargestellt. Unten rechts ist die entsprechende Differenz für die Fehlererkennung nach dem RANSAC-Algorithmus dargestellt. Oben rechts und unten links sind jeweils die Differenzen der Polynome nach Baarda und RANAC für Version A bzw. Version B der Koregistrierung abgebildet.	99
A.4	Darstellung der Amplitudenbilder der Masterakquisition und der Akquisitionen vom 10.12.1998 und 14.01.1999	99
A.5	Darstellung der um den Phasenanteil der flachen Erde und der Topographie bereinigten Interferogramme des auszuwertenden Stapels in der Entfernungsgeometrie des Masters. Die Rohdaten wurden einem zwanzigfachen Multilooking in Azimut und einem vierfachen Multilooking in Range unterzogen .Auf der x-Achse ist die Pixelkoordinate und auf der y-Achse die Linekoordinate aufgetragen.	100

A.6	Darstellung des Ergebnisses der Schätzung des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers durch Kohärenzmaximierung (jeweils im oberen Bereich jedes Subplots) und lineare Regression für die erste Regression des Algorithmus und einige ausgewählte Punkte. Im unteren Bereich jedes Subplots ist das Gesamtergebnis dargestellt. Der linke obere Plot zeigt eine Schätzung ohne vorhandene Mehrdeutigkeit mit kleinen Residuen. Der rechte obere Plot zeigt eine Schätzung mit Mehrdeutigkeit und kleinen Residuen. Der linke untere Plot zeigt eine Schätzung ohne Mehrdeutigkeit mit großen Residuen. Der rechte untere Plot zeigt eine Schätzung mit Mehrdeutigkeit und großen Residuen.	101
A.7	Histogramme der im Phasenanalyseschritt geschätzten Ensemblekohärenzen für die erste und die zweite Iteration in der oberen beiden Subplots. Histogramme der Wahrscheinlichkeit zum nicht stabilen Anteil der Punkte zu gehören für die ersten beiden Iterationen in den unteren beiden Subplots. .	102
A.8	Histogramm der Kohärenzen für zwei Amplitudendispersionsklassen.	103
A.9	Kohärenzschwellwert in Abhängigkeit von der Amplitudendispersion. Die roten Punkte repräsentieren den für jede Dispersionsklasse berechneten Schwellwert. Die blaue Regressiongerade dient der Übertragung der berechneten Schwellwerte beliebige Amplitudendispersionwerte.	103
A.10	Aufgewickelte Phase der ausgewählten PS inklusive des räumlich nicht korrelierenden Blickwinkelfehlers und des Masterrauschens.	104
A.11	Darstellung des geschätzten Blickwinkelfehlers (links) und der Masteratmosphäre in einem geographischen Koordinatensystem. Die linke Seite zeigt den Faktor die Steigung der geschätzten Geraden korrespondierend zum Blickwinkelfehler, während die rechte Seite den Achsenabschnitt korrespondierend zur Masteratmosphäre im Bogenmaß zeigt.	104
A.12	Kohärenzschwellwert in Abhängigkeit von der Amplitudendispersion für einen Anteil der <i>False Positives</i> von 1% (obere dunkelblaue Gerade) und einen Anteil der <i>False Positives</i> von 10% (untere blaue Gerade).	105
A.13	Phasenwerte der ausgewählten Punkte inklusive des Einflusses des räumlich nicht korrelierten Blickwinkelfehlers. Auswertung B.	106
A.14	Darstellung des geschätzten Blickwinkelfehlers (links) und der Masteratmosphäre in einem geographischen Koordinatensystem. Die linke Seite zeigt den Faktor die Steigung der geschätzten Geraden korrespondierend zum Blickwinkelfehler, während die rechte Seite den Achsenabschnitt korrespondierend zur Masteratmosphäre im Bogenmaß zeigt. Auswertung B.	106
A.15	Mittlere Deformationsrate über dem mittleren Amplitudenbild in der Entfernungsgometrie. Auswertung B.	107

Tabellenverzeichnis

5.1	Überblick über die räumlichen und zeitlichen Autokorrelationseigenschaften der Phasenanteile aus Gleichung (5.2.1)	57
6.1	Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen	69
6.2	Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen	81
A.1	Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen	96
A.2	Überblick über die räumlichen und Doppler-Basislinien der verwendeten Aufnahmen	97

Literaturverzeichnis

- [1] Fischler Martin A. and Bolles Robert C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis automated cartography. *Commun, ACM*, 24(6):381–195, 1981.
- [2] Ferretti Alessandro, Prati Claudio, and Rocca Fabio. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential sar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), September 2000.
- [3] Ferretti Alessandro, Prati Claudio, and Rocca Fabio. Permanent scatterers in sar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), January 2001.
- [4] Ghiglia Dennis C. and Romero Louis A. Minimum lp-norm two dimensional phase unwrapping. *Journal of the Optical Society of America A*, 13(10):1999–2013, October.
- [5] Colesanti Carlo, Ferretti Alessandro, Novali Fabrizio, Prati Claudio, and Rocca Fabio. Sar monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), July 2003.
- [6] Geudtner Dirk. *Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [7] Hanssen Ramon F. *Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis*, volume 2 of *Remote Sensing and Image Processing*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [8] Sölder Günter. *Stochastische Signaltheorie*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, 2007.
- [9] Hooper Andrew John. *Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation studies and modeling of volcanic Deformations*. Dissertation, Stanford University, 2006.
- [10] Hooper Andrew John. *StaMPS (Stanford Method of Persistent Scatterers) Manual*, v2.2 edition, December 2007.
- [11] Hooper Andrew John. A multi-temporal insar method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 35, 2008.

- [12] Meyer Franz Josef. *Simultane Schätzung von Topographie und Dynamik polarer Gletscher aus multi-temporalen SAR Interferogrammen*. Dissertation, Technische Universität München, 2004.
- [13] Bert Kampes. *Delft Object-oriented Radar Interferometric Software User's manual and technical documentation*, v3.16 edition, August 1999.
- [14] Goldstein R. M. and Werner C. L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letter*, 25(21):4035–4038, 1998.
- [15] Huntley Jonathan M. Three-dimensional noise-immune phase unwrapping algorithm. *APPLIED OPTICS*, 17(23):3901–3908, August 2001.
- [16] Kampes Bert M. *Radar Interferometry, Persistent Scatterer Technique*, volume 12 of *Remote Sensing and Image Processing*. Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [17] Teunissen P.J.G. A new method for fast carrier phase ambiguity estimation. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, April 1994.
- [18] Teunissen P.J.G. Statistical gnss carrier phase ambiguity resolution: A review. *Proceedings of the 11th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal Processing*, 2001.
- [19] Bamler Richard and Hartl Philip. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4):R1 – R54, 1998.
- [20] Koch Karl Rudolf. *Einführung in die Bayes-Statistik*. Springer, 1999.
- [21] Adham Khiabani S., ValadanZoej M.j., Mobasheri M.R., and Dehghani M. Atmospheric effects removal of asar-derived insar products using meris data. In *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Part B1 Beijing*, volume XXXVII, 2008.
- [22] Sörgel Uwe. *Iterative Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden in SAR und InSAR-Daten*. Dissertation, Universität Hannover, 2003.
- [23] Chen Curtis W. *Statistical-Cost Cetwork-Flow Approaches to two-dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry*. Dissertation, Stanford University, 2001.
- [24] Chen Curtis W. and Zebker Howard A. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 17(3):401–414, March 2000.
- [25] Niemeier Wolfgang. *Ausgleichsrechnung*. de Gruyter Lehrbuch. Walter de Gruyter, 2002.
- [26] Lei Yang, Qian Feng, and Zhigang Wang. Topography adaptive filtering of phase image based on residue matrix. In *ICSP2006 Proceedings*, 2006.