

Institut für Geodäsie und Geoinformation

---

Professur für Theoretische Geodäsie

Ermittlung des atmosphärischen Phasenanteils  
in interferometrischen SAR-Daten und  
Vergleich mit in situ Wetterdaten

Bachelorarbeit

im Bachelorstudiengang Geodäsie und Geoinformation

an der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität

zu Bonn

vorgelegt am 19. August 2013 von

Joël Noah Köhler

aus Troisdorf

Bonn 2013



Zum Druck freigegebene Version.

26. September 2013

Erster Prüfer: Prof. Dr. techn. W.-D. Schuh

Zweiter Prüfer: Dipl.-Ing. I. Krasbutter

19. März 2013

**Bachelorarbeit Joël Noah Köhler**

**Thema: Ermittlung des atmosphärischen Phasenanteils in interferometrischen SAR Daten und Vergleich mit In-situ Wetterdaten**

Zur Detektion und Modellierung von großräumigen und kleinräumigen Deformationen der Erdoberfläche in der Niederrheinischen Bucht, die durch natürliche (z.B. tektonische Bewegungen) oder anthropogene (z.B. Braunkohle-Tagebau) Einflüsse entstehen, werden klassischerweise terrestrische Nivellementmessungen durchgeführt. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von interferometrischen Satelliten-Radardaten (InSAR), was gegenüber dem klassischen Verfahren den Vorteil hat, dass die Informationen flächendeckend vorliegen. Ein limitierender Faktor dieser Methode ist allerdings, dass die Radarstrahlung auf den Weg durch die Atmosphäre durch diese stark beeinflusst wird. Die daraus resultierenden Phasenverschiebungen sind zeitabhängig und können somit auch nicht durch differentielles InSAR (D-InSAR) eliminiert werden. Sie vermindern letztendlich die Genauigkeit der Schätzung der Deformationen. Um die Genauigkeit zu steigern, ist eine Idee, die Daten vor der Schätzung um den atmosphärischen Phasenanteil, der in einem Vorverarbeitungsschritt bestimmt werden muss, zu reduzieren. Ziel dieser Bachelorarbeit ist deswegen die Bestimmung des atmosphärischen Phasenanteils aus einem gegebenen Datenstapel von D-InSAR Bildern.

Im ersten Schritt soll somit ein Verfahren entwickelt werden, mit dem aus einem Datenstapel von 100 D-InSAR Bildern für die Niederrheinische Bucht, der aus 46 InSAR Bildern von den Satelliten ERS 1/2 entstanden ist, den atmosphärischen Phasenanteil zu bestimmen.

Zur Validierung der Methode und den Ergebnissen des ersten Schritts, soll im zweiten ein Vergleich mit Referenzdaten durchgeführt werden. Hierfür müssen geeignete Daten, z.B. In-Situ Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst, herangezogen und für einen Vergleich aufbereitet werden. Die Ergebnisse des Vergleichs sind zu analysieren und zu bewerten.

Aufgabensteller: Prof. Dr. techn. Wolf-Dieter Schuh  
Betreuer: Dipl.-Ing. Ina Krasbutter

Tag der Ausgabe: 08. April 2013  
Dauer: 5 Monate  
Tag der Abgabe:

Bonn, den 19. März 2013

  
Wolf-Dieter Schuh



Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Bonn, 19. August 2013

---

Joël Noah Köhler



# Zusammenfassung

Deformationen der Erdoberfläche, die einen natürlichen (z. B. Plattentektonik) oder anthropogenen (z. B. Gewinnung von Rohstoffen) Ursprung haben, können mit differentiellen SAR-Interferometrie (DInSAR)-Bildern bestimmt werden. DInSAR-Daten lassen sich aus der Differenzphase zweier interferometrischen Satelliten-Radaraufnahmen und dem Abzug eines Höhenmodells berechnen (SOERGEL 2006). Ein Vorteil gegenüber der klassischen terrestrischen Nivellementmessung ist, dass mit DInSAR-Daten die Deformationen der Erdoberfläche flächendeckend erfasst werden können. Dabei liegen die theoretisch detektierbaren Bewegungen im Millimeterbereich (HALSIG 2012, S. 45). Diese theoretische Genauigkeit wird u. a. durch atmosphärisch bedingte Laufzeitverzögerungen der Radarstrahlung begrenzt, welche unter gegebenen Umständen zu Phasenverschiebungen im Zentimeterbereich führen können (SCHÄFER 2012, S. 2). Kleinräumige Variationen in der Troposphäre (z. B. Wolken) können in differentiellen Interferogrammen ähnliche Strukturen wie die gesuchten Höhenänderungen aufweisen und somit leicht mit diesen verwechselt werden (SCHÄFER und HANNEMANN 2010). Um eine Steigerung der Genauigkeit zu erlangen, sind die Daten in einem Vorverarbeitungsschritt um diesen atmosphärischen Phasenanteil zu reduzieren.

In dieser Bachelorarbeit soll das Verfahren von SCHÄFER (2012) umgesetzt werden, das ebendiesen atmosphärischen Phasenanteil aus einem Datenstapel von 113 differentiellen Interferogrammen für die Niederrheinische Bucht bestimmt. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass es nicht auf externe Daten angewiesen ist, da der atmosphärische Phasenanteil aus den DInSAR-Bildern selbst berechnet wird. Außerdem ist die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten der Interferogramme nicht erforderlich, womit sich Ungenauigkeiten beim Prozess der Phasenabwicklung nicht im Endergebnis niederschlagen.

Das Verfahren beruht zum einen auf der Tatsache, dass ein differentielles SAR-Interferogramm stets die Überlagerung des atmosphärischen Phasenanteils zu zwei Aufnahmezeitpunkten enthält, und zum anderen auf der Annahme, dass dieser Phasenanteil zufällig ist und den Erwartungswert Null hat. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass bei der Mittelbildung eines Stapels von DInSAR-Szenen, wobei diese alle einen Aufnahmezeitpunkt als Master oder Slave enthalten müssen, lediglich der atmosphärische Phasenanteil zum gemeinsamen Aufnahmezeitpunkt übrig bleibt. Das Besondere an diesem Verfahren ist die korrekte Behandlung der Phasenmehrdeutigkeiten, weshalb in dieser Arbeit insbesondere auf die mathematischen Formulierung eingegangen wird.

Neben den atmosphärischen Phasenbildern liefert das Verfahren zwei weitere Ergebnisse. Das erste ist ein Produkt, welches Aufschluss über Phasenstabilität von Gitterzellen während eines Betrachtungszeitraums gibt. Dieses kann optional auch zur Genauigkeitssteigerung bei der Erzeugung der atmosphärischen Phasenbilder verwendet werden. Des Weiteren ist es möglich Deformationsgebiete im Aufnahmegebiet zu lokalisieren, indem das Verfahren von SCHÄFER (2012) auf einen zeitlich sortierten Stapel mit den gewonnenen atmosphärischen Phasenbildern angewendet wird.

Zur Validierung der Methode und deren Ergebnisse werden zwei Ansätze gewählt. In dem gegebenen Datenstapel sind zwei DInSAR-Bilder enthalten, die aus Szenen der ERS-Tandem-Mission erzeugt wurden. Die Aufnahmezeitpunkte der Master- und Slaveszene dieser Interferogramme liegen somit nur 24 Stunden auseinander, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass diese kein Deformationssignal enthalten, sondern hauptsächlich die Überlagerung der atmosphärischen Phasenanteile darstellen. Infolgedessen wurden diese Interferogramme aus den berechneten atmosphärischen Phasenbildern rekonstruiert. Im Anschluss wurde eine Differenzbild von Original und Rekonstruktion erzeugt, um diese auf Abweichungen zu untersuchen.

Zur unabhängigen Kontrolle des Verfahrens wird ein Vergleich mit in situ Wetterdaten durchgeführt, wofür Aufnahmen des meteorologischen Satelliten Meteosat der Organisation EUMETSAT verwendet werden. Diese haben zwar eine geringere räumliche Auflösung als die Phasenbilder, liegen jedoch im Gegensatz zu an-

deren Wetterdaten auch flächenhaft vor. In diesem Fall stimmen die Aufnahmezeitpunkte der Satellitenbilder und der ERS-Szenen auf wenige Sekunden überein, womit eine hohe Vergleichbarkeit gegeben ist.



# Abstract

The approach of differential SAR interferometry (DInSAR) is used to monitor subaerial deformations, which may have their origins in natural (e.g. plate tectonics) conditions or anthropogenic (e.g. the mining of raw materials) determinants. DInSAR images are computed by subtracting an elevation model from the phase differences of two SAR images (SOERGEL 2006). The advantage of DInSAR data compared to classical levelling campaigns is the extensive acquisition of the deformation signal. The detection of vertical movements in the range of several millimeters is technically possible (HALSIG 2012, p. 45). Among others, this theoretical accuracy is limited by the atmospheric propagation delay of the radar beam. Under given circumstances this delay can cause phase shifts up to several centimeters (SCHÄFER 2012, p. 2). In differential interferograms, small scale variation in the troposphere (e.g. clouds) can show similar structures as the searched changes in altitude. Thus, the two signals can be easily mixed up (SCHÄFER und HANNEMANN 2010). For an enhanced accuracy the mitigation of the atmospheric effects on DInSAR images is recommended in a preprocessing step.

This bachelor thesis deals with the approach for the mitigation of the atmospheric phase delay proposed by SCHÄFER (2012). A stack of 113 DInSAR images depicting the “Niederrheinische Bucht” is given as data set. The chosen method does not depend on external data, as it computes the atmospheric phase shifts straight from the differential interferograms, which is a great advantage. It is not even necessary to solve the phase ambiguities. So the uncertainties of the unwrapping process are not propagated in the final results.

DInSAR data always contains the superposition of the atmospheric condition at the acquisition dates of the two SAR images. Assuming furthermore that the atmospheric propagation delay is stochastic and the first moment is zero, the delay for a specific date can be isolated by averaging a stack of DInSAR images. However, each interferogram in the stack contains this date as master or slave scene. The special feature of this method is the correct handling of the phase ambiguities and therefore this thesis is especially concerned with the proper mathematical formulation.

There are two other products beside the atmospheric images, which can be derived by this method. The first product depicts the longterm stability of the phase for every grid cell of the SAR images. It can be used optionally during the generation of the phase images in order to increase the accuracy. Additionally, the localisation of subaerial deformations is possible by applying the method of SCHÄFER (2012) on a chronologically sorted stack of the computed atmospheric phase images.

Two different approaches are applied for the validation of the method and its output. The given data set contains two differential interferograms derived from SAR images of the ERS tandem mission. Hence, the time lag between the acquisition dates of master and slave spans only 24 hours. Thus, one can assume that the interferogram contains no deformation signal but only the superposition of the atmospheric phase delays. Consequently, these interferograms are reconstructed with the atmospheric phase images and the discrepancy between original and reconstruction is analysed, subsequently.

For an independent evaluation the phase images are compared to in situ weather data. This data consists of images made by the meteorological satellite Meteosat maintained by the organisation EUMETSAT. The spatial resolution of the Meteosat images may be lower than the resolution of the interferograms, but in contrast to other weather data it is available over a wide area. In addition the acquisition dates of these satellite images and the ERS images coincide up to a few seconds whereby the comparability is increased.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der SAR-Interferometrie und Beschreibung der DInSAR-Daten</b>	<b>3</b>
2.1	SAR-Interferometrie (InSAR) und differentielle SAR-Interferometrie (DInSAR) . . . . .	3
2.2	Vorstellung der Daten . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Atmosphärischer Phasenanteil in interferometrischen SAR-Daten</b>	<b>7</b>
3.1	Einfluss der Atmosphäre auf elektromagnetische Radarstrahlung . . . . .	7
3.1.1	Aufbau der Erdatmosphäre . . . . .	7
3.1.2	Einfluss der Troposphäre . . . . .	8
3.1.3	Einfluss der Ionosphäre . . . . .	9
3.2	Mögliche Verfahren zur Ermittlung des atmosphärischen Phasenanteils in InSAR-Daten . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Detektion des atmosphärischen Phasenanteils mit differentiellen Interferogrammen</b>	<b>14</b>
4.1	Idee und Ablauf des Verfahrens von SCHÄFER (2012) . . . . .	16
4.1.1	Ausgleich der überlappenden Bildkacheln . . . . .	21
4.1.2	Berechnung der pixelbasierten Kohärenz . . . . .	23
4.2	Berechnung von pixelbasierten, statistischen Maßzahlen . . . . .	24
4.2.1	Berechnung des Phasenmittelwertes . . . . .	24
4.2.2	Berechnung der Phasenähnlichkeit . . . . .	27
4.2.3	Berechnung der Varianz der Phasenwerte . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Anwendung des Verfahrens nach SCHÄFER (2012) auf die gegebenen DInSAR-Szenen</b>	<b>29</b>
5.1	Erzeugung des Kohärenzbildes . . . . .	29
5.2	Einfluss verschiedener Ansätze bei der zeitlichen Mittelbildung . . . . .	31
5.3	Rekonstruktion von differentiellen Interferogrammen aus den atmosphärischen Phasenbildern . . . . .	33
5.4	Lokalisierung von Deformationsgebieten . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Vergleich mit in situ Wetterdaten</b>	<b>37</b>
6.1	Die Meteosat-Missionen der ersten Generation und ihre Produkte . . . . .	37
6.2	Vergleich von Meteosat-Aufnahmen mit den atmosphärischen Phasenbildern . . . . .	38
<b>7</b>	<b>Schlussbemerkungen</b>	<b>45</b>
7.1	Fazit . . . . .	45
7.2	Ausblick . . . . .	46

<b>A</b>	<b>Bezeichnungen</b>	<b>i</b>
<b>B</b>	<b>Abkürzungen</b>	<b>ii</b>
<b>C</b>	<b>Funktionen</b>	<b>iii</b>
<b>Verzeichnisse</b>		<b>ix</b>
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	ix
	Tabellenverzeichnis . . . . .	x
	Algorithmenverzeichnis . . . . .	xi
<b>Literatur</b>		<b>xii</b>

# 1. Einleitung

Die differentielle SAR-Interferometrie (DInSAR) ist ein Verfahren, mit dem aus der Differenzphase zweier interferometrischen Satelliten-Radaraufnahmen und dem Abzug eines Höhenmodells Bewegungen der Erdoberfläche bestimmt werden können (SOERGEL 2006). Ein Vorteil gegenüber der klassischen terrestrischen Nivellementmessung ist, dass mit DInSAR-Daten die Deformationen der Erdoberfläche flächendeckend erfasst werden können. Dabei liegen die theoretisch detektierbaren Bewegungen im Millimeterbereich (HALSIG 2012, S. 45). Diese theoretische Genauigkeit wird u. a. durch atmosphärisch bedingte Laufzeitverzögerungen der Radarstrahlung begrenzt, welche unter gegebenen Umständen zu Phasenverschiebungen im Zentimeterbereich führen können (SCHÄFER 2012, S. 2). Kleinräumige Variationen in der Troposphäre (z. B. Wolken) können in differentiellen Interferogrammen ähnliche Strukturen wie die gesuchten Höhenänderungen aufweisen und somit leicht mit diesen verwechselt werden (SCHÄFER und HANNEMANN 2010). Um eine Steigerung der Genauigkeit zu erlangen, sind die Daten in einem Vorverarbeitungsschritt um diesen atmosphärischen Phasenanteil zu reduzieren.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Ermittlung ebendieses Phasenanteils in interferometrischen SAR-Daten und der anschließende Vergleich der zugehörigen Phasenbilder mit geeigneten in situ Wetterdaten. Dazu ist ein Stapel von 113 differentiellen SAR-Interferogrammen für die Niederrheinische Bucht als Datengrundlage gegeben, die aus insgesamt 36 SAR-Aufnahmen der ERS-1/2-Mission entstanden sind. Es wird das Stacking-Verfahren von SCHÄFER (2012) umgesetzt, das für die Aufnahmezeitpunkte dieser SAR-Szenen das atmosphärische Phasenbild berechnet.

DING et al. (2008) fassen einige Verfahren zur Ermittlung bzw. Reduzierung des atmosphärischen Phasenanteils zusammen, die in der Literatur beschrieben sind. Zur Korrektur können beispielsweise punktuell gemessenen Daten genutzt werden, wie die Daten von meteorologischen Bodenstationen oder auch GPS-Beobachtungen. Ein weiterer Ansatz ist die Simulation der Wasserdampfverteilung in der Atmosphäre unter Verwendung von numerischen Wetterdaten. Dabei wird diese Verteilung an der Topographie mittels eines digitalen Geländemodells ausgerichtet (WADGE et al. 2004). Die Verwendung optischer Satellitendaten, insbesondere von Aufnahmen im Wasserdampf-Absorptionsband (z.B. des Sensors MERIS), wurde unter anderem von DING et al. (2008) untersucht. Ein weiterer Ansatz sind die sogenannten Stacking-Verfahren, die auf der Mittelbildung eines Bildstapels von differentiellen Interferogrammen basieren. Hierbei sind zwei Ansätze zu unterscheiden. Die Idee des klassischen Ansatzes ist, dass der atmosphärische Phasenanteil bei der Mittelbildung einer Zeitreihe von unabhängigen Interferogrammen herausfällt. Der neuere Ansatz, wie er mit den Verfahren von LEIJEN und HANSEN (2004) oder von SCHÄFER (2012) verfolgt wird, ist es, den atmosphärischen Phasenanteil für den Aufnahmezeitpunkt einer SAR-Szene aus dem Stapel der DInSAR-Bilder zu isolieren.

Zur Umsetzung der Aufgabenstellung wird in dieser Arbeit wie folgt vorgegangen:

In Kapitel 2 soll eine kurze Zusammenfassung der Grundlagen erfolgen, die für das Verständnis dieser Arbeit nötig sind. Es werden die Grundprinzipien der SAR-Interferometrie und der Erstellung der Interferogramme aufgegriffen (vgl. Kap. 2.1), bevor zur Beschreibung der vorliegenden DInSAR-Daten übergegangen wird (vgl. Kap. 2.2).

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Einfluss der Atmosphäre auf die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen. In diesem Zusammenhang lässt sich die Erdatmosphäre prinzipiell in zwei Schichten gliedern (vgl. Kap. 3.1). Die Troposphäre ist elektrisch neutral, enthält jedoch den Großteil der Atmosphärenmasse und zwar ca. 90% der Trockengase und 99% des Wasserdampfes. Außerdem finden in den unteren 15 km die turbulenten Durchmischungsprozesse statt, die als Wetter bezeichnet werden und zur Wolkenbildung führen.

Vor allem die Wasserdampfverteilung und das Vorhandensein von Wolken beeinflusst die Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung (vgl. Kap. 3.1.2). Im Gegensatz zur Troposphäre ist die Ionosphäre elektrisch geladen und damit ein dispersives Medium. Der Elektronengehalt in der Ionosphäre übt ebenfalls einen gewissen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen aus (vgl. Kap. 3.1.3). Eine kurze Übersicht möglicher Methoden, den Phasenanteil durch atmosphärische Laufzeitverzögerungen in differentiellen SAR-Interferogrammen zu reduzieren bzw. zu bestimmen, liefert der Abschnitt 3.2.

Das Verfahren von SCHÄFER (2012), das für diese Arbeit gewählt wurde, wird in Kapitel 4 vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein Stacking-Verfahren, das aus einem Stapel von differentiellen Interferogrammen ein atmosphärisches Phasenbild für einen Aufnahmezeitpunkt einer SAR-Szene berechnet. Die mathematische Formulierung sowie die Umsetzung in eine Routine sind dabei wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit (vgl. Kap. 4.1 und 4.2).

Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 vorgestellt und bestehen neben den atmosphärischen Phasenbildern aus zwei weiteren Produkten, die mit dem Verfahren erzeugt werden können. Das erste ist ein Kohärenzbild, das Aussagen über die langzeitige Phasenstabilität einer Gitterzelle erlaubt (vgl. Kap. 5.1), und das zweite ist ein Phasenbild das zur Lokalisierung von Deformationsgebieten verwendet werden kann (vgl. Kap. 5.4). Außerdem erfolgt in Abschnitt 5.3 eine erste interne Validierung des Verfahrens.

Durch einen Vergleich mit in situ Wetterdaten soll in Kapitel 6 eine weitere unabhängige Validierung durchgeführt werden. Dazu werden die verwendeten Wetterdaten in Abschnitt 6.1 beschrieben, bevor der optische Vergleich mit den Aufnahmen der Metosat-Satelliten der ersten Generation durchgeführt wird (vgl. Kap. 6.2).

Die Schlussbemerkungen in Kapitel 7 enthalten eine Zusammenfassung sowie einen kurzen Ausblick.

# 2. Grundlagen der SAR-Interferometrie und Beschreibung der DInSAR-Daten

## 2.1 SAR-Interferometrie (InSAR) und differentielle SAR-Interferometrie (DInSAR)

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Arbeit, die sich mit der Bestimmung des atmosphärischen Phasenanteils in differentiellen SAR-Interferogrammen befasst, sollen hier die Grundlagen dieser Technik kurz aufgegriffen werden.

Bei Radaraufnahmen mit synthetischer Apertur (engl. *Synthetic Aperture Radar*, kurz SAR) wird neben der Amplitude auch die Phase des zurückgestreuten Signals gemessen. Ein Phasendifferenzbild zweier Radarszenen eines Gebietes, die von unterschiedlichen Positionen erfasst wurden, wird interferometrische SAR-Aufnahme (kurz InSAR) genannt. Die beiden verwendeten SAR-Bilder werden als Master- und Slaveszene bezeichnet. Bei den hier verwendeten Daten (vgl. Kap. 2.2) ist die zeitlich nachfolgende Aufnahme stets die Masterszene. Da die gemessenen Phasendifferenzen nur relative Größen sind, liegen diese im Wertebereich einer Periode  $W_\varphi = [-\pi, \dots \pi]$ . Die messbaren Phasendifferenzen  $\varphi_{InSAR}$  setzen sich aus folgenden Anteilen zusammen (vgl. WALTER et al. 2004 und HALSIG 2012, S. 44):

$$\varphi_{InSAR} = \varphi_{topo} + \varphi_{defo} + \varphi_{flatearth} + \varphi_{noise} + \varphi_{atmo}. \quad (2.1)$$

Die dominierenden Anteile sind durch die Topographie  $\varphi_{topo}$  und durch Deformationen der Erdoberfläche  $\varphi_{defo}$  bedingt.

Der Anteil der „flachen Erde“ (engl. *flatearth*)  $\varphi_{flatearth}$  wird durch die Aufnahmegeometrie hervorgerufen. SAR-Szenen werden in Schrägsicht aufgenommen, daher kommt es durch die unterschiedlichen Aufnahmepositionen auch bei vollkommen ebener Erdoberfläche zu regelmäßigen Phasentrends (SCHÄFER 2012, S. 42). Da dieser Anteil über die Ephemeriden der Satelliten berechnet und anschließend aus den Daten eliminiert wird, nennt man die Restabweichungen, hervorgerufen durch ungenaue Bahndaten, auch Orbitfehler.

Ein weiterer Term ist das Phasenrauschen  $\varphi_{noise}$ . Dieser ist insbesondere auf sich ändernde Bedingungen während der Aufnahmezeitpunkte zurückzuführen (HALSIG 2012, S. 44).

Durch refraktive Einflüsse in der Atmosphäre (vgl. Kapitel 3.1) entsteht der letzte Phasenanteil  $\varphi_{atmo}$ , welcher jedoch die Überlagerung der atmosphärischen Einflüsse zu den beiden Aufnahmezeitpunkten beschreibt (LEIJEN und HANSSEN 2004). Es ist dieser Phasenanteil, dessen Bestimmung diese Arbeit motiviert und auf den daher besonders eingegangen wird.

Eine bedeutende Anwendung der InSAR-Technik ist die Erzeugung von Höhenmodellen (SOERGEL 2006). Die Bestimmung des deformationsbedingten Phasenanteil  $\varphi_{defo}$  und die Ermittlung von Höhenänderungen zwischen den Beobachtungszeitpunkten motiviert die differentielle SAR-Interferometrie (DInSAR). Für ein differentielles Interferogramm wird der topographische Phasenanteil  $\varphi_{topo}$  durch ein digitales Höhenmodell (DHM) entfernt. Dies kann zum einen ein externes Modell sein, d.h. aus anderen Daten oder Aufnahmeverfahren abgeleitet sein, oder zum anderen, wie oben erwähnt, direkt aus den InSAR-Aufnahmen erzeugt werden. Die restlichen Phasenanteile bleiben in der Gesamtphase enthalten.

Die Erzeugung von interferometrischen Radarbilder lässt sich in verschiedene Kategorien gliedern, bei denen sich die atmosphärischen Verhältnisse während der Aufnahme der SAR-Szene unterschiedlich auswirken. Je nachdem wie die von den Radarantennen aufgespannte Basislinie verläuft, lässt sich InSAR in die sogenannte

Along-Track- bzw. Across-Track-Interferometrie unterteilen. Des Weiteren ist eine Unterscheidung nach der Anzahl der nötigen Überfliegungen der SAR-Plattform möglich; hier differenziert man zwischen Single- und Repeat-Pass-Interferometrie.

Bei der Along-Track-Interferometrie sind zwei Antennen auf einer Trägerplattform montiert und, wie dem Namen zu entnehmen, parallel zur Flugrichtung orientiert, woraus resultiert, dass lediglich eine Überfliegung notwendig ist und dies somit ebenfalls der Kategorie der Single-Pass-Interferometrie angehört. Dahingegen sind die Antennen bei der Across-Track-Interferometrie orthogonal zur Flugrichtung ausgerichtet. Dies lässt sich ebenso mit einem Zwei-Antennen-SAR-System (als Single-Pass-Interferometrie) realisieren (z. B. bei der *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)). Alternativ lässt sich die Across-Track-Interferometrie mit Systemen durchführen, die lediglich eine Antenne haben, wie bei den vorliegenden DInSAR-Szenen, die auf Daten der ERS-1/2-Mission basieren. Um mit einer Antenne SAR-Interferogramme erzeugen zu können, muss die Radar-Plattform zur Aufnahme der gleichen Szene dasselbe Gebiet auf einer leicht versetzten Flugbahn erneut überfliegen. Die mehrmalige Überfliegung begründet somit den Namen Repeat-Pass-Interferometrie (vgl. DING et al. 2008 u. HALSIG 2012, S. 36f).

Da der Einfluss der Atmosphäre auf die SAR-Aufnahmen bei der Single-Pass-Interferometrie für beide Bilder nahezu identisch ist, wird der atmosphärische Phasenanteil bei der Berechnung des Interferogramms fast vollständig eliminiert. Dies ist auf die simultane Erfassung der SAR-Aufnahmen zurückzuführen und hängt weiterhin mit den annähernd gleichen Aufnahmegeometrien zusammen, die durch die sehr kleine Basislinie bedingt sind. Dahingegen ist der Einfluss bei der Repeat-Pass-Interferometrie nicht mehr zu vernachlässigen, denn die Veränderung der Atmosphäre zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten ist beachtlich (DING et al. 2008, S. 3). Dies führt bei InSAR- (und DInSAR-)Szenen zur Überlagerung der atmosphärischen Zustände zu den zwei Zeitpunkten, wie oben bereits erwähnt wurde. Daher wird in Kapitel 3 der Einfluss der Erdatmosphäre auf elektromagnetische Wellen etwas genauer erläutert werden.

## 2.2 Vorstellung der Daten

Für diese Arbeit liegen insgesamt 113 differentielle Interferogramme vor, die aus 36 Aufnahmen der *European Remote Sensing Satelliten* (ERS-1 und -2) berechnet wurden. Daher sollen diese beiden Satelliten der europäischen Weltraumorganisation (engl. *European Space Agency*, ESA) und die gleichnamigen Missionen an dieser Stelle kurz vorgestellt werden. ERS-1 und -2 dienten der Fernerkundung der Erde und starteten ihre Missionen in den Jahren 1991 (ERS-1) respektive 1995 (ERS-2). Nach dem Ausfall eines Computers und eines Kreiselensors wurde die ERS-1-Mission im März 2000 beendet; ERS-2 wurde erst im September 2011 außer Betrieb genommen. Während ihrer gemeinsamen Laufzeit wurden mehrere Tandem-Missionen (in den Jahren 1995-1997 und 1998-2000 (vgl. HALSIG 2012, S. 21)) durchgeführt, in deren Verlauf die beiden Satelliten in einem Abstand von 24 Stunden nahezu dieselbe Erdoberfläche aufnehmen konnten (vgl. ESA 2013). Aufgrund der geringen räumlichen und zeitlichen Basislinie weisen die Aufnahmen aus diesen Missionen eine hohe Kohärenz auf, was diese vor allem für SAR-interferometrische Anwendungen interessant macht (HALSIG 2012, S. 21).

In den für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Daten liegen zwei differentielle Interferogramme (vom 01. und 02.04.1996 sowie vom 10. und 11.06.1996) vor, die aus Aufnahmen der erwähnten Tandem-Missionen berechnet wurden und somit lediglich 24 Stunden auseinander liegen. Diese werden in Kapitel 5.3 näher untersucht, da aufgrund der kurzen zeitlichen Basislinie von einem Tag davon ausgegangen werden kann, dass sie keine Phasenanteile durch langzeitige Deformationen enthalten. Die restlichen DInSAR-Szenen wurden aus ERS-Aufnahmen berechnet, die zwischen dem 09.05.1992 und dem 19.10.1999 erfasst wurden. Für alle ERS-Szenen fand die Aufnahme zwischen 10:29 Uhr und 10:30 Uhr statt, wie der Abbildung 2.1 entnommen



<b>Spacecraft</b>	: ERS-2
<b>Product Type</b>	: SLC
<b>Product Format</b>	: CEOS format
<b>Orbit</b>	: 4972
<b>Pass Direction</b>	: Descending
<b>Product Start Time</b>	: 02-APR-1996 10:29:38.597
<b>Product Stop Time</b>	: 02-APR-1996 10:29:55.883
<b>Number of Product Lines</b>	: 29040
<b>Pixels per Line</b>	: 4992
<b>Processed Input Lines</b>	: 30186
<b>Missing Input Lines</b>	: 0
<b>Doppler Centroid</b>	: 211.015
<b>Processing Time</b>	: 19-JUN-2012 09:14:44.000
<b>Image Location</b>	: Limbourg

**Abbildung 2.1:** Produktinformationen der ERS-Szene vom 02.04.1996. Die genauen Aufnahmezeitpunkt sind rot umrandet.

werden kann.

Diese Tatsache spielt für den Vergleich mit den in situ Wetterdaten eine entscheidende Rolle, da diese möglichst exakt für diesen Zeitpunkt vorliegen sollten. Da vor allem die Wasserdampfverteilung in der Troposphäre zeitlich hoch variabel ist und Wolken sich stets mit der vorherrschenden Windgeschwindigkeit fortbewegen, können sich die atmosphärischen Zustände in kurzer Zeit stark ändern. Mit größer werdendem zeitlichen Abstand zwischen der Aufnahme der SAR-Szene und der Akquisition der Wetterdaten, steigt also die Wahrscheinlichkeit, dass die Daten unterschiedliche atmosphärischen Zustände beschreiben. Somit ist kein adäquater Vergleich zwischen den ermittelten, atmosphärischen Phasenanteilen und den Wetterdaten mehr möglich.

Zur Minderung der Rauscheffekte in den Interferogrammen wurde das Multilook-Verfahren (hier 80-look) angewendet, was zu einer Reduktion der räumliche Auflösung auf  $80 \times 80 \text{ m}^2$  für jede Gitterzelle führt. Damit ein Vergleich zwischen den 113 DInSAR-Bildern möglich ist, wurde eine Ko-Registrierung der Daten auf das Gitter der SAR-Szene vom 25.08.1998 durchgeführt. Alle in Kapitel 2.1 angesprochenen Korrekturen von systematischen Abweichungen wurden auf die Daten angewendet. Diese umfassen die Reduktion der topographiebedingten Abweichungen durch ein digitales Höhenmodell sowie der Orbit-Abweichungen durch die Einführung präziser Orbits.

Die verwendeten SAR-Szenen zeigen das Gebiet der Niederrheinischen Bucht, wie es größtenteils in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Im Nordosten befindet sich das Stadtgebiet von Köln. Außerdem sind auch die drei großen Tagebaue zu sehen, die das Gebiet prägen. Im Süden die Tagebaue Hambach und Inden (von Ost nach West) und im Norden der Aufnahme der Tagebau Garzweiler. Ansonsten spiegelt das Luftbild den hohen Anteil an vegetativen Flächen wider, seien es nun Agrar- oder Forstflächen, welche zu einem hohen Anteil von dekorelierten Bereichen in den differentiellen Interferogrammen führen.

Die SAR-Aufnahmen der ERS-1/2-Mission wurden von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) zur Verfügung gestellt. Die Weiterverarbeitung zu differentiellen Interferogrammen wurde von DI Dr. Karlheinz Gutjahr vom Institut für Informations- und Kommunikationstechnologien (DIGITAL) der Forschungsgesellschaft mbH Joanneum Research in Graz, Österreich, mit dem dort entwickelten Softwarepaket *Remote Sensing Package Graz* durchgeführt.

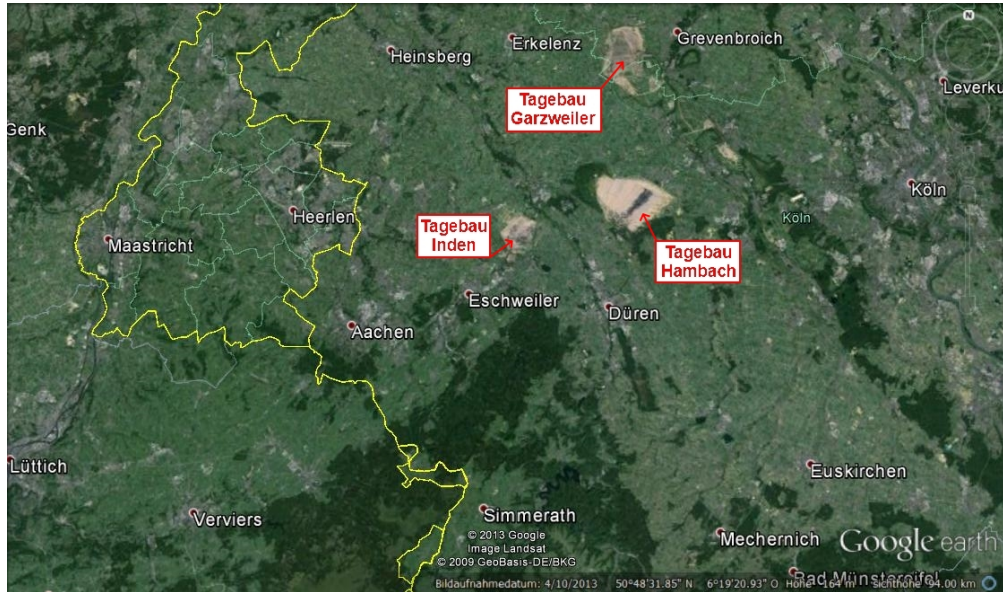


Abbildung 2.2: Luftbild von Teilen des Aufnahmegebiets

# 3. Atmosphärischer Phasenanteil in interferometrischen SAR-Daten

## 3.1 Einfluss der Atmosphäre auf elektromagnetische Radarstrahlung

### 3.1.1 Aufbau der Erdatmosphäre

Bevor der Einfluss der Erdatmosphäre auf differentielle SAR-Interferogramme erläutert wird, soll an dieser Stelle ein kurzer Einblick in den Aufbau der Atmosphäre gegeben werden.

Als Erdatmosphäre wird die Gashölle bezeichnet, welche die Erde umgibt. Je nach Anwendungsgebiet und Fragestellung werden verschiedene Unterteilungen in Schichten vorgenommen, die Sphären genannt werden. Kriterien für diese Einteilung sind beispielsweise Temperatur, Ionisationsgrad und Gaszusammensetzung (BAUER 2011, S. 100f). Die Grenzschichten zwischen den Sphären heißen Pausen. Eine solche Unterteilung veranschaulicht die Tabelle 3.1. Hier werden die Modelle nach den drei genannten Faktoren mit einer Höhenunterteilung aufgezeigt. Allerdings ist eine exakte Höhenfestlegung nicht möglich, da die Ausdehnung der Sphären sowohl breitenabhängig ist, als auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Ein weiteres Kriteri-

**Tabelle 3.1:** Aufbau der Erdatmosphäre (aus BAUER 2011, S. 101)

Höhe	Temperatur	Ionisation	Gaszusammensetzung
über 60.000 km	Interplanetarischer Raum		
über 1.000 km		Protonosphäre	
über 500 km	Exosphäre		Exosphäre
etwa 80 km	Thermosphäre (Mesopause)	Ionosphäre	Heterosphäre
etwa 50 km	Mesosphäre (Stratopause)		
etwa 10 km	Stratosphäre (Tropopause)	Neutrosphäre	Homosphäre
0 km	Troposphäre	Erdoberfläche	

um, welches zur Kategorisierung der Atmosphäre herangezogen wird, ist die Beeinflussung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Zurückzuführen ist diese Einordnung auf die satellitengestützte Entfernungsmessung mit Mikrowellen (z.B. GNSS oder SAR), deren Phasengeschwindigkeiten und Ausbreitungswege bei der Durchdringung der Atmosphäre durch refraktive Einflüsse verfälscht werden (JOECKEL et al. 2008, S. 104). Aus diesem Grund wird das Atmosphärenmodell stark vereinfacht, indem der Bereich von Troposphäre bis zur Stratopause (bis etwa 50 km) unter dem Begriff „Troposphäre“ zusammengefasst wird und die daran anschließende Ionosphäre sowie die Protonosphäre lediglich als „Ionosphäre“ behandelt werden (BAUER 2011, S. 100).

### 3.1.2 Einfluss der Troposphäre

Fast 90% der Atmosphärenmasse (trockene Gase und Wasserdampf) befinden sich in den unteren elf Kilometer der Erdatmosphäre; der darüberliegende Bereich, bis zu einer Höhe von ca. 50 km, verhält sich für Mikrowellen annähernd wie ein Vakuum (vgl. JOECKEL et al. 2008, S. 104 u. BAUER 2011, S. 111). Mit der angrenzenden Stratosphäre findet quasi kein Luftaustausch statt, denn die Tropopause wirkt als Grenze für wärmere aufsteigende Luftpakete. Dadurch finden beinahe alle Prozesse, welche die Ausbreitung von Mikrowellen beeinflussen, wie Thermik, Wolkenbildung oder Niederschlag in der untersten Atmosphärenschicht also in der Troposphäre statt (vgl. SCHÄFER 2012, S. 16).

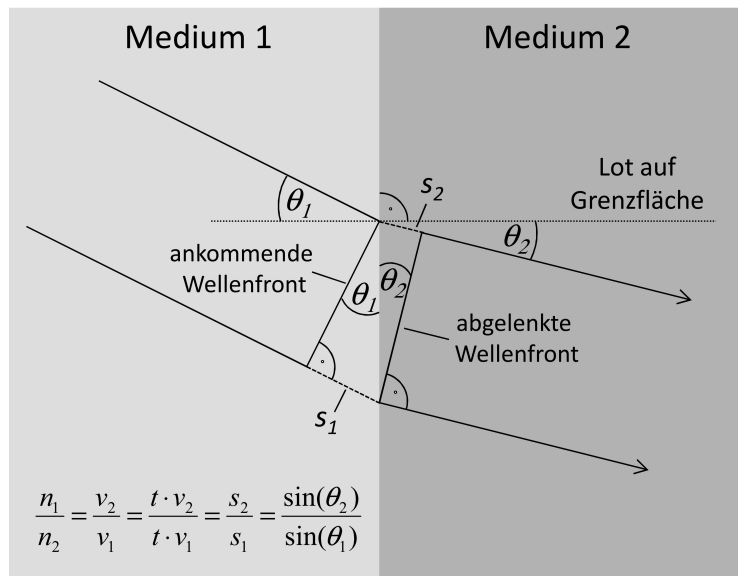


Abbildung 3.1: Prinzipskizze des SNELLIUS'sche Brechungsgesetz

Beim Durchlauf der Atmosphäre durchdringt das elektromagnetische Signal Luftschichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes  $n$ . Definiert ist dieser Index über:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (3.1)$$

- $c$  ... Geschwindigkeit des Signals im Vakuum
- $v$  ... Geschwindigkeit des Signals im Medium.

Der Ausbreitungsweg der Mikrowelle folgt dem FERMAT'schen Satz, der besagt, dass ein elektromagnetisches Signal stets den Weg einschlägt, der es am schnellsten von einem Raumpunkt zum Ziel führt. Da der Brechungsindex variiert, kommt es zu Änderungen der Laufgeschwindigkeit des Signals. Um seine Laufzeit zu optimieren folgt dieses Signal deshalb dem Verlauf einer Raumkurve statt dem einer Geraden. Den Zusammenhang zwischen Änderung des Brechungsindex, der Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit stellt das SNELLIUS'sche Brechungsgesetz her. Es beschreibt die Richtungsänderung der Strahlung an der Grenzfläche zweier Medien. Eine schematische Darstellung mit dem geometrischen und physikalische Zusammenhängen ist der Abbildung 3.1 zu entnehmen:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{t \cdot v_2}{t \cdot v_1} = \frac{s_2}{s_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)}, \quad (3.2)$$

- $n_i$  ... Brechungsindex des Mediums  $i$
- $v_i$  ... Geschwindigkeit des Signal im Medium  $i$
- $t$  ... Zeitintervall
- $s_i$  ... Strecke, die das Signal in Medium  $i$  innerhalb des Zeitintervalls  $t$  zurücklegt
- $\theta_i$  ... Winkel zwischen Strahl und Lot auf der Grenzfläche.

Oftmals wird statt des Brechungsindex  $n$  die Brechzahl  $N$  verwendet, da  $n$  für die Luft in der unteren Erdatmosphäre stets sehr nahe bei eins liegt und Unterschiede meist erst ab der fünften bzw. sechsten Nachkommastelle auftreten. Durch die Umrechnung in die Brechzahl entsteht eine bessere Vergleichbarkeit (HANSSEN 1998, S. 9):

$$N = 10^6 \cdot (n - 1). \quad (3.3)$$

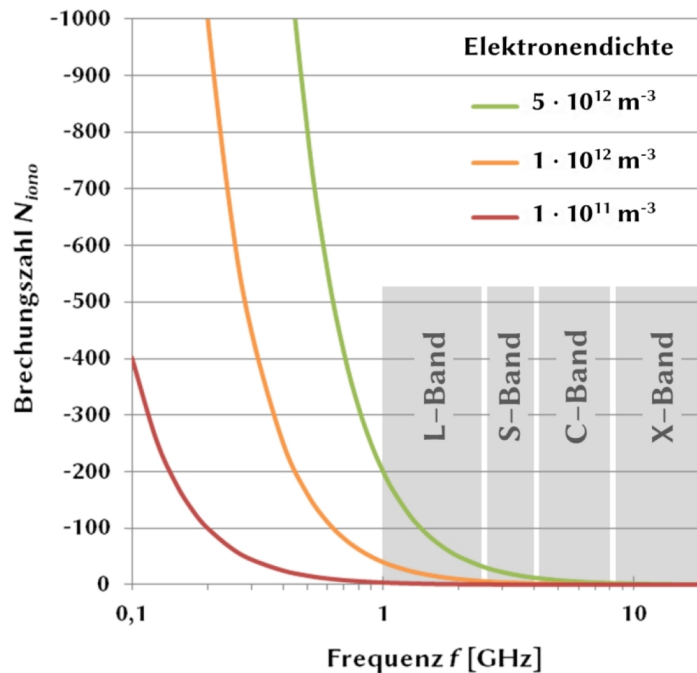
Die Brechzahl hängt im wesentlichen vom Partialdruck der trockenen sowie der feuchten Luft und der Temperatur ab. Der trockene Anteil der Atmosphäre ist für das Gebiet einer SAR-Aufnahme über alle Höhenbereiche annähernd homogen verteilt, was sich als Trend in den differentiellen Interferogrammen zeigen kann. Die Effekte durch Variationen der Temperatur und des Luftdrucks sind somit oftmals schwer von den Orbitabweichungen zu unterscheiden (vgl. SCHÄFER 2012, S. 20 u. DING et al. 2008). Die atmosphärischen Phasenverschiebungen in SAR-Interferogrammen werden am stärksten durch den Wasserdampfgehalt der Troposphäre beeinflusst. Durch die turbulenten Durchmischungsprozesse in der Troposphäre kann es lokal zu starken Änderungen des Wasserdampfgehalts kommen, was zu lokalen Gradienten des Brechungsindex und damit zu lokalen Phasengradienten führt. Neben den turbulenten Durchmischungsprozessen kann auch die vertikale Schichtung der Troposphäre zu Phasenverschiebungen in bergigen Regionen führen (DING et al. 2008). Besonders interessant sind jedoch kleinräumige Phänomene wie Wolken, welche sich als lokale Hebungs- bzw. Senkungsgebiete äußern können (SCHÄFER 2012, S. 23). Begründet ist dieser Effekt durch den Anteil an flüssigem Wasser in den Wolken, der zu einer deutlich differierenden Brechzahl gegenüber der Umgebung führt. Dies resultiert wiederum in der lokalen Phasenverschiebung, welche im differentiellen Interferogramm detektierbar ist. Ob die Verschiebung als Senkung oder Hebung auftaucht, hängt allerdings davon ab, ob die SAR-Szene mit der Wolke als „Master“ oder „Slave“ in die DInSAR-Aufnahme eingeht (SCHÄFER 2012, S. 45). Die Cumulus-Wolken (auch Haufenwolken) sind wegen ihres hohen Anteils an flüssigem Wasser von 0,5 bis 2,0 g/m<sup>3</sup> für die SAR-Interferometrie von besonderer Bedeutung, da sie zu einer Zenitverzögerung von 0,7 bis 3,0 mm/km führen können (HANSSEN 1998, S. 19).

### 3.1.3 Einfluss der Ionosphäre

Die Ionosphäre kennzeichnet sich gegenüber der Troposphäre durch ihren hohen Ionisierungsgrad aus, was zur Folge hat, dass sie ein dispersives, also frequenzabhängiges Medium ist. Neben der Frequenz ist der Brechungsindex abhängig von der Elektronendichte, welche die Anzahl der freien Elektronen pro Kubikmeter in der Ionosphäre angibt.

SCHÄFER (2012, S. 31f) stellt fest, dass der Einfluss der Ionosphäre bei SAR-Satelliten, die mit Strahlung aus dem C-Band arbeiten (wie z.B. ERS-1/-2), selbst bei hoher Elektronendichte sehr niedrig ist (vgl. Abbildung 3.2). Weiter führt er an, dass die Änderungen der Elektronendichte im Bereich einer SAR-Szene über den Tag in der Regel gering ist und somit nur als Trend in den atmosphärischen Phasenbildern auftauchen wird. Von Interesse sind auch hier kleinräumige Phänomene, die sogenannten *Traveling Ionospheric Disturbances* (TID) – wandernden ionosphärischen Störungen –, welche vermehrt in Jahren maximaler Sonnenaktivität auftreten. Sie zeichnen sich durch starke, kurzfristige Änderungen der Elektronendichte aus (BAUER 2011, S. 103). Die letzte Phase starker Sonnenaktivitäten war in den Jahren 1998 bis 2002. Aus diesen Zeitraum

stammen die letzten, der zur Verfügung stehenden SAR-Szenen, weshalb dieses Phänomen in den atmosphärischen Phasenbildern beobachtbar sein könnte.



**Abbildung 3.2:** Einfluss der Radarfrequenz auf die Brechzahl der Ionosphäre in Abhängigkeit der Elektronendichte (aus SCHÄFER 2012, S. 31).

### 3.2 Mögliche Verfahren zur Ermittlung des atmosphärischen Phasenanteils in InSAR-Daten

Im vorangehenden Kapitel 2 wurden die Grundlagen der SAR-Interferometrie dargelegt und in den vorherigen Abschnitten wurde der Einfluss der Erdatmosphäre auf die bei der Datenakquisition verwendete elektromagnetische Radarstrahlung behandelt. Im Folgenden sollen nun einige Verfahren zur Bestimmung des daraus resultierenden, atmosphärischen Phasenanteils kurz vorgestellt und schließlich die Wahl der in Kapitel 4 beschriebenen Methode begründet werden. Dabei spielen natürlich auch die Eigenschaften der vorliegenden Daten, die in Kapitel 2.2 vorgestellt wurden, eine wichtige Rolle. Die folgende Auflistung umfasst eine Auswahl der Methoden, die in der Literatur beschrieben sind:

**a) Nutzung von Wetterstationsdaten zur Korrektur des atmosphärischen Phasenanteils:** Die atmosphärischen Laufzeitverzögerungen können mit Hilfe von Daten meteorologischer Bodenstationen reduziert werden (DING et al. 2008). Hierfür wird in der Regel ein empirisches Troposphärenmodell, wie das von SAASTAMOINEN, verwendet. Die Nachteile dieser Herangehensweise sind:

1. die Berechnungen von atmosphärischen Laufzeitverzögerungen auf Grundlage von empirischen Troposphärenmodellen sind mit großen Unsicherheiten behaftet,

2. die räumliche Dichte von Wetterstationen ist relativ gering.

Daher können auch nur grobe Trends aus den Daten eliminiert werden.

**b) Nutzung von GPS-Beobachtungen zur Korrektur des atmosphärischen Phasenanteils:** Die GPS-Auswertung bietet die Möglichkeit die troposphärische Laufzeitverzögerung im Zenit als Unbekannte beim Ausgleichungsprozess zur Bestimmung der Stationskoordinaten mitzuschätzen. Dabei wird der hydrostatische Anteil in der Regel unter Verwendung eines Standardmodells und einer Mappingfunktion an die Beobachtungen angebracht. Somit wird nur der feuchte Anteil mitbestimmt (HESSELBARTH 2009). Auch hier ist die Dichte der Stationen sehr kritisch, da für die Korrektur der SAR-Daten ein Produkt benötigt wird, das die selbe räumliche Auflösung besitzt. Daher unterscheiden sich die auf GPS basierenden Korrektungsverfahren hauptsächlich in der Methode, wie die räumlich spärlich verteilten Messungen der Pfadverzögerung auf die Auflösung von SAR-Szenen interpoliert werden (DING et al. 2008).

**c) Nutzung von numerischen Wettermodellen zur Korrektur des atmosphärischen Phasenanteils:** Für die Verwendung von numerischen Wettermodellen zur Reduzierung der atmosphärischen Laufzeitverzögerung gibt es einige Fallstudien. Beispielsweise wird in der Arbeit von WADGE et al. (2004) mit Hilfe eines dynamischen Wettermodells die Verteilung des Wasserdampfes über dem Vulkan Ätna simuliert. Für die Simulation wird ein Programm namens N3HD benutzt, das eine nicht-hydrostatische und nicht-lineare Repräsentation der Atmosphäre darstellt. Zur Initialisierung von diesem Programm wird das numerische Wettervorhersage Modell des *European Centre for Medium Range Weather Forecasting* (ECMWF) genutzt. Der dynamische Fluss wird an der Topographie ausgerichtet, die durch ein digitales Höhenmodell einfließt. Die räumliche Auflösung beträgt  $1,7 \times 1,7 \text{ km}^2$ . Aus der simulierten Wasserdampfverteilung wird die Laufzeitverzögerung der Radarwellen in *line of sight* (LOS) für zwei Aufnahmezeitpunkte berechnet. Die Differenz dieser beiden Phasenbilder kann zur Korrektur des differentiellen Interferogramms genutzt werden (WADGE et al. 2004). Die Genauigkeit der Simulation hängt jedoch maßgeblich von den Daten zur Initialisierung des Modells ab. Für die Jahre 1990–1998 sind die numerischen Wetterdaten des ECMWFs in sechs Stunden Intervallen und mit einer Gitterweite von 250 km erhältlich, was die erreichbare Genauigkeit bei der Anwendung von WADGE et al. (2004) stark einschränkt.

SCHÄFER (2012, S. 54f) und DING et al. (2008) führen an, dass die räumliche und zeitliche Auflösung von numerischen Wettermodellen für die Korrektur von differentiellen Interferogrammen nicht ausreichend ist. Kleinräumige atmosphärische Strukturen lassen sich nicht ortsgenau bestimmen und somit können meist nur grobe Trends aus den Daten entfernt werden.

**d) Verwendung optischer Satellitendaten zur Korrektur des atmosphärischen Phasenanteils:** Die Nutzung von optischen Satellitendaten zur Verbesserung von DInSAR-Daten basiert insbesondere auf Wasserdampfprodukten, die aus Aufnahmen im nahen Infrarotbereich abgeleitet sind. Hier sei im Speziellen der Sensor MERIS (*MEDium Resolution Imaging Spectrometer*) genannt, der sich an Bord des Umwelt-Satelliten Envisat der ESA befindet und mit einer relativ hohen räumlichen Auflösung von 300 Metern aufzeichnet. Eine zeitgleiche Aufnahme mit den Radarbildern des Sensors ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) macht die Wasserdampfprodukte von MERIS gerade für die Korrektur von Interferogrammen interessant, die aus ASAR-Szenen abgeleitet sind. Jedoch führt auch hier die geringere räumliche Auflösung (im Vergleich zu den DInSAR-Bildern) bei der Interpolation auf das Gitter der Interferogramme zu Glättungseffekten. Des Weiteren ist die Verwendung von optischen Daten nur möglich, wenn diese bei Tag aufgenommen wurden und keine Bewölkung vorhanden ist (vgl. DING et al. 2008 u. SCHÄFER 2012, S. 54).

Da die Envisat-Mission in den Jahren 2002 bis 2012 durchgeführt wurde, liegen die MERIS-Daten nicht für den Zeitraum der gegebenen differentiellen Interferogramme vor.

**e) Stacking-Verfahren zur Korrektur des atmosphärischen Phasenanteils:** Die sogenannten Stacking-Verfahren basieren auf der Mittelbildung eines Bildstapels von interferometrischen SAR-Aufnahmen. Beim klassischen Ansatz wird eine Zeitreihe von unabhängigen DInSAR-Szenen verwendet. Unter der Annahme, dass die atmosphärischen Effekte unkorreliert und zufällig sind, mitteln diese sich im Idealfall heraus. Allerdings kann damit nur eine mittlere Deformationsrate bestimmt werden und eine Auswertung von Zeitreihen ist nicht mehr möglich. Diese Verfahren setzen voraus, dass nur lineare Deformationen vorliegen, denn nicht-lineare Deformationen können sich bei der Mittelbildung gegenseitig aufheben. Außerdem müssen die Phasenwerte aller Interferogramme abgewickelt sein (vgl. DING et al. 2008 u. SCHÄFER 2012, S. 56).

Neuere Verfahren, die auch auf Stapeln von DInSAR-Bildern beruhen, verfolgen einen anderen Ansatz. Dort soll der atmosphärische Phasenanteil nicht herausgemittelt werden, sondern durch eine bestimmte Stack-Struktur bei der Mittelbildung über den Stapel isoliert werden. Der Bildstapel enthält nur Interferogramme, deren Master- oder Slaveszenen in einem Aufnahmezeitpunkt übereinstimmen. Da auch hier angenommen wird, dass der atmosphärische Phasenanteil zufällig ist, ergeben sich die atmosphärischen Phasenanteile zu den anderen Zeitpunkten bei der Mittelbildung zu null. Die Funktionsweise, sowie Vor- und Nachteile dieser Methoden sind in Kapitel 4 genauer beschrieben.

Neben den oben aufgezählten Methoden zur Reduzierung der atmosphärischen Effekte aus differentiellen Interferogrammen gibt es noch einige andere, welche von DING et al. (2008) kurz, anhand einiger Anwendungen aus der Literatur, beschrieben werden.

Für diese Arbeit wurde, wie oben bereits angedeutet, eines der Stacking-Verfahren gewählt, die das atmosphärische Phasenbild für den Aufnahmezeitpunkt einer SAR-Szenen berechnen. Begründet ist diese Wahl durch mehrere Sachverhalte: Zum einen sollen die Korrekturwerte in einer relativ hohen räumlichen Auflösung vorliegen, womit die ersten drei erwähnten Methoden eher uninteressant sind. Bei den numerischen Wettermodellen kommt der zeitliche Aspekt hinzu. Damit ist gemeint, dass die vorliegenden DInSAR-Szenen aus SAR-Aufnahmen aus den Jahren 1992 bis 1999 berechnet wurden. Dies ist insoweit kritisch, da die ECMWF-Daten, welche zur Initialisierung der Simulation verwendet werden, zu jener Zeit eine weitaus schlechtere Auflösung hatten als heute. Die Aufnahmezeitpunkte der SAR-Szenen erschweren die Nutzung optischer Daten, denn für diesen Zeitraum kämen nur Aufnahmen der geostationären Meteosat Satelliten oder der polar umlaufenden Satelliten NOAA-AVHRR in Frage. Die Aufnahmen des Wasserdampfkanals von Meteosat haben für den gegebenen Zeitraum eine Auflösung von  $5 \times 5$  km im Nadir, dahingegen haben die AVHRR Sensoren eine Auflösung von  $1,1 \times 1,1$  km im Nadir. Andererseits haben die Meteosat Daten eine zeitliche Wiederholrate von 30 Minuten, die AVHRR Daten eine Rate von drei bis vier Stunden (HANSEN 1998, S. 33f). Im ungünstigsten Fall würde die AVHRR Aufnahme die Wasserdampfverteilung in der Atmosphäre zwei Stunden vor bzw. nach dem Aufnahmezeitpunkt der SAR-Szene beschreiben. Innerhalb dieser Zeitspanne kann sich die Verteilung unter Umständen stark ändern. Alle diese Nachteile weist die gewählte Stacking-Methode nicht auf. Sie liefert das atmosphärische Phasenbild in der gleichen räumlichen Auflösung, wie sie die zu korrigierenden Interferogramme auch besitzen. Es werden keine externen Daten benötigt und somit ist das Verfahren unabhängig vom Aufnahmezeitpunkt. Außerdem ist die gewählte Methode relativ leicht umzusetzen und nicht sehr rechenintensiv, wie zum Beispiel die Simulation beim numerischen Ansatz. Von Nachteil ist jedoch, dass eine gewisse Anzahl von Interferogrammen vorliegen muss, die den gleichen Aufnahmezeitpunkt enthalten, da sonst die Annahme verletzt ist, dass der atmosphärische Phasenanteil der



anderen Aufnahmezeitpunkte bei der Mittelbildung herausfällt. Nach SCHÄFER (2012, S. 57) sollten die vorliegenden Interferogramme aus mindestens 20 verschiedenen SAR-Szenen berechnet werden. Er gibt jedoch keine Empfehlung für die Anzahl der Interferogramme selbst.

# 4. Detektion des atmosphärischen Phasenanteils mit differentiellen Interferogrammen

Die Motivation des von SCHÄFER (2012) vorgestellten Verfahrens besteht darin, aus einer Anzahl von differentiellen Interferogrammen ohne Hinzunahme von externen Daten den atmosphärischen Phasenanteil einer SAR-Szene (also für einen Aufnahmezeitpunkt) zu bestimmen.

Die zugrunde liegende Idee basiert auf einem von LEIJEN und HANSSEN (2004) entwickelten Verfahren. Beide Methoden stützen sich auf die Annahme, dass die DInSAR-Bilder nur noch die atmosphärische Phasenanteile enthalten. Unter dieser Annahme lässt sich die Phasenverschiebung, welche durch die Atmosphäre zu einem Zeitpunkt bedingt ist, durch Mittelbildung über einen Bildstapel (engl. Stack) bestimmen. Dabei besteht der Stack aus ko-registrierten, differentiellen Interferogrammen mit gleicher Gitterauflösung. Für die Berechnung aller verwendeten DInSAR-Aufnahmen muss die SAR-Szene (als Master oder Slave) verwendet werden, deren atmosphärisch bedingte Laufzeitverzögerung bestimmt werden soll. Dies bedeutet auch, dass alle Interferogramme von den anderen Phasenanteilen bereinigt sein müssen. Die Entfernung von möglichen Orbitabweichungen ist nötig, da diese sonst als Trendfläche in der Schätzung der Atmosphäre auftauchen. Die topographische Phase wird durch ein Höhenmodell weitestgehend eliminiert, dies kann entweder ein externes DHM sein oder in der InSAR-Prozessierung aus zwei Aufnahmen abgeleitet werden. Der durch Deformationen der Erdoberfläche hervorgerufene Phasenanteil muss im Untersuchungsgebiet entweder minimal sein oder die Deformationsgebiete sollten in den Aufnahmen entfernt bzw. maskiert werden (LEIJEN und HANSSEN 2004).

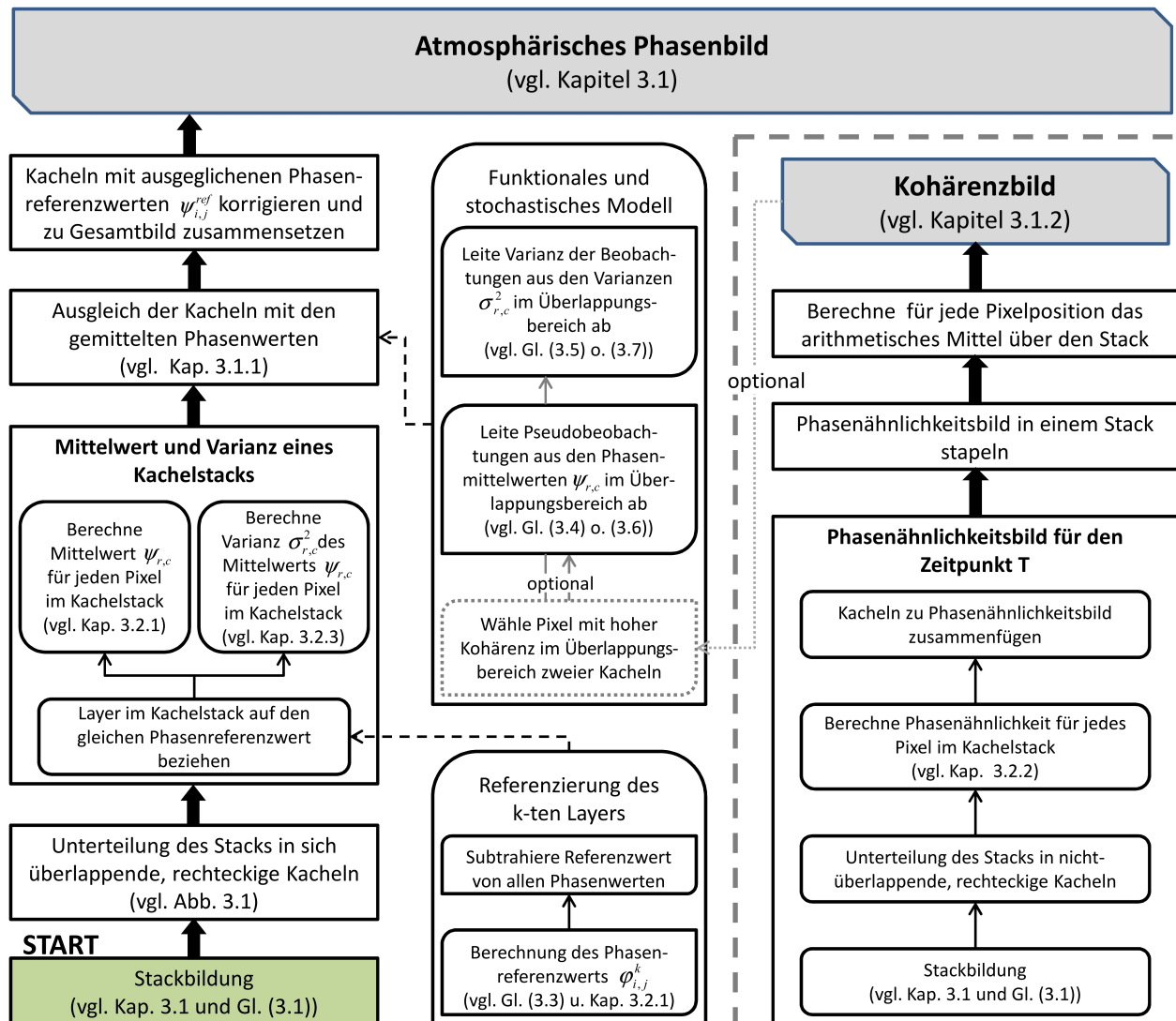
Die einfache Mittelbildung, wie in der Methode von LEIJEN und HANSSEN (2004) angewendet, bedingt jedoch, dass die Phasenmehrdeutigkeiten der differentiellen Interferogramme gelöst sind, was die Genauigkeit aufgrund von Fehlern bei der Abwicklung einschränkt.

Im Gegensatz dazu besteht der Vorteil des Verfahrens nach SCHÄFER (2012) darin, dass eine Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten nicht mehr notwendig ist. Hier wird ein spezielles Verfahren zur Mittelbildung angewendet, welches die Mehrdeutigkeiten der interferometrischen Phase berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2.1). Dies steigert zum einen die zu erwartende Genauigkeit der Schätzung des atmosphärischen Phasenanteils, zum anderen wird die Programmlaufzeit stark verringert, wodurch es auch möglich ist, eine höhere Anzahl von Interferogrammkombinationen für die Schätzung heranzuziehen (SCHÄFER 2012, S. 58).

Im Folgenden wird die Erzeugung eines atmosphärischen Phasenbilds nach dem Verfahren von SCHÄFER (2012) in seinen Teilschritten erläutert, wobei im besonderen auf die mathematische Formulierung eingegangen wird. Der prinzipielle Ablauf des Verfahrens wird in Abschnitt 4.1 dargestellt, wobei im Unterabschnitt 4.1.1 der Ausgleich der Bildkacheln, der Teil der Berechnung des Phasenbilds ist, besonders herausgearbeitet wird. Im Unterabschnitt 4.1.2 wird die Erzeugung des Kohärenzbilds erläutert, das ein Maß für die Phasenstabilität einer Gitterzelle innerhalb eines Zeitraums ist. Dieses ist für die Erzeugung des atmosphärischen Phasenbilds zwar nicht zwingend, kann jedoch zur Genauigkeitsverbesserung während des Ausgleichs verwendet werden. Der zweite Abschnitt dieses Kapitels (Kap. 4.2) erläutert die Berechnung von statistischen Maßzahlen, die von SCHÄFER (2012) entwickelt wurden, um die Lösung von Phasenmehrdeutigkeiten zu umgehen. Sie werden an diversen Stellen während des Berechnungsablaufs benötigt und bilden den Kern des Verfahrens zur Bestimmung des Phasenbilds.

Wie die einzelnen Rechenschritte und Abschnitte dieses Kapitels zusammenhängen, soll mit dem Ablaufsche-

ma in Abbildung 4.1 nochmals verdeutlicht werden. Es zeigt auf der linken Seite das Vorgehen zur Erzeugung des atmosphärischen Phasenbilds und auf der rechten Seite den Berechnungsablauf zur Erstellung des Kohärenzbilds.



**Abbildung 4.1:** Ablaufschema der Bestimmung eines atmosphärischen Phasenbilds nach dem Verfahren von SCHÄFER (2012). Der linke Teil stellt die Erzeugung des atmosphärischen Phasenbilds dar. Der rechte Teil beschreibt die Erstellung des Kohärenzbilds, welches optional ist.

## 4.1 Idee und Ablauf des Verfahrens von SCHÄFER (2012)

Zur Bestimmung der atmosphärischen Phasenverschiebung zu einem Zeitpunkt  $T$  werden als Eingangsdaten differentielle Interferogramme benötigt, für die folgende Voraussetzungen gelten:

- Die Daten müssen auf ein gleiches Gitter ko-registriert sein
- Die Daten müssen bereinigt sein vom Phasenanteil
  - der flachen Erde,
  - der Topographie (mittels eines DHMs)
- Deformationsgebiete sollten maskiert sein
- Alle Interferogramme enthalten die SAR-Aufnahme zum Zeitpunkt  $T$

Die Daten müssen allerdings nicht „phasenabgewickelt“ sein und „können sowohl rasterbasiert (DInSAR), als auch punktbasiert (*Permanent Scatterer Interferometry*, PSI) sein“ (SCHÄFER 2012, S. 58). Im ersten Schritt werden alle differentielle Interferogramme zu einem Stack zusammengefügt, die den Aufnahmezeitpunkt  $T$  enthalten, für den der atmosphärische Phasenanteil bestimmt werden soll. Die DInSAR-Bilder enthalten stets die Überlagerung der Atmosphäre zu dem gesuchten Aufnahmezeitpunkt  $T$  und einem weiteren Zeitpunkt  $t_i$ . Für das weitere Vorgehen ist es essentiell, dass der Atmosphärenanteil der untersuchten Szene durchgehend das gleiche Vorzeichen hat. Das heißt: je nach Richtung der Differenzbildung zur Erzeugung der differentiellen Interferogrammen müssen die Vorzeichen aller Phasenwerte umgekehrt werden, sodass ein Stack der folgenden Form entsteht:

$$S = \begin{bmatrix} I_{T-t_1} \\ I_{T-t_2} \\ \vdots \\ I_{T-t_M} \\ -I_{t_{M+1}-T} \\ -I_{t_{M+2}-T} \\ \vdots \\ -I_{t_N-T} \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

- $I_{T-t_i}$  ... Differentielles Interferogramm zur Masterszene  $t_i$  und Slaveszene  $T$   
 $I_{t_i-T}$  ... Differentielles Interferogramm zur Masterszene  $T$  und Slaveszene  $t_i$   
 $T$  ... Zeitpunkt der SAR-Aufnahme, deren atmosphärischer Phasenanteil bestimmt werden soll  
 $t_i$  ... Zeitpunkt der zweiten SAR-Szene für die Interferogrammberechnung  
 $M$  ... # der Interferogramme mit  $T$  als Slaveszene  
 $N$  ... # der Interferogramme mit  $T$  als Master- oder Slaveszene.

Unter der Annahme, dass die Interferogramme nur noch die atmosphärischen Phasenanteile enthalten (es gilt also  $I_{T-t_i} = \varphi_T - \varphi_{t_i}$ ) und der Erwartungswert der atmosphärischen Phasenverschiebung Null ist, ergibt sich durch pixelweise Mittelbildung über den Stack laut SCHÄFER (2012, S. 59):

$$\begin{aligned}
\psi_T &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_{T-t_i} - \frac{1}{N-M} \sum_{i=M+1}^N I_{t_i-T} \\
&= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\varphi_T - \varphi_{t_i}) - \frac{1}{N-M} \sum_{i=M+1}^N (\varphi_{t_i} - \varphi_T) \\
&= \frac{\sum_{i=1}^M (\varphi_T)}{M} - \frac{\sum_{i=1}^M (\varphi_{t_i})}{M} - \frac{\sum_{i=M+1}^N (\varphi_{t_i})}{N-M} + \frac{\sum_{i=M+1}^N (\varphi_T)}{N-M} \\
&= \frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_T)}{N} - \frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_{t_i})}{N} \\
&\cong \frac{N \cdot \varphi_T}{N} - 0 = \varphi_T,
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$\psi$  ... über den Stack gemittelter Phasenwert eines Pixels  
 $\varphi$  ... atmosphärischer Phasenanteil.

Damit diese Art der Mittelbildung funktioniert, ist es notwendig, dass alle Pixel auf einen Phasenwert referenziert werden. Für die Wahl eines geeigneten Phasenreferenzwertes gibt es mehrere Möglichkeiten. Die einfachste Methode ist, ein Referenzpixel zu wählen, dessen Wert von allen anderen Phasenwerten abgezogen wird. Dieses Pixel muss über den gesamten Betrachtungszeitraum eine stabile Phase besitzen. Der Nachteil von diesem Ansatz ist, dass das Rauschen der Phasenmittelwerte mit zunehmender Entfernung zu diesem Pixel ansteigt.

Die zweite Möglichkeit besteht darin eine Referenzfläche zu definieren und den Mittelwert aller Phasenwerte in dieser Fläche als Referenz zu verwenden. Die Größe dieser Fläche sollte nach SCHÄFER (2012, S. 59f) auf  $4 \times 4$  bis  $10 \times 10 \text{ km}^2$  beschränkt werden. Aber auch hierbei nimmt das Rauschen mit größer werdendem Abstand zu. SCHÄFER (2012, S. 60) schlägt daher vor, die Aufnahmen in ein gleichmäßiges Raster von rechteckigen Kacheln zu unterteilen, die sich jeweils zur Hälfte in Höhe und Breite überlappen. Die Unterteilung muss für alle Aufnahmen im Stack identisch durchgeführt werden. Jede dieser Kacheln  $(i, j)$  bildet eine eigene Referenzfläche, sodass mit Gleichung (4.3) der Referenzphasenwert  $\varphi_{i,j}^k$  des  $k$ -ten Layers im Kachelstapel berechnet werden kann. Dieser Referenzphasenwert entspricht dem Mittelwert aller Pixel in dieser Kachel, da die Phasenwerte jedoch mehrdeutig sind, muss die komplexe Mittelbildung nach SCHÄFER (2012) angewendet werden, die in Kapitel 4.2.1 hergeleitet wird:

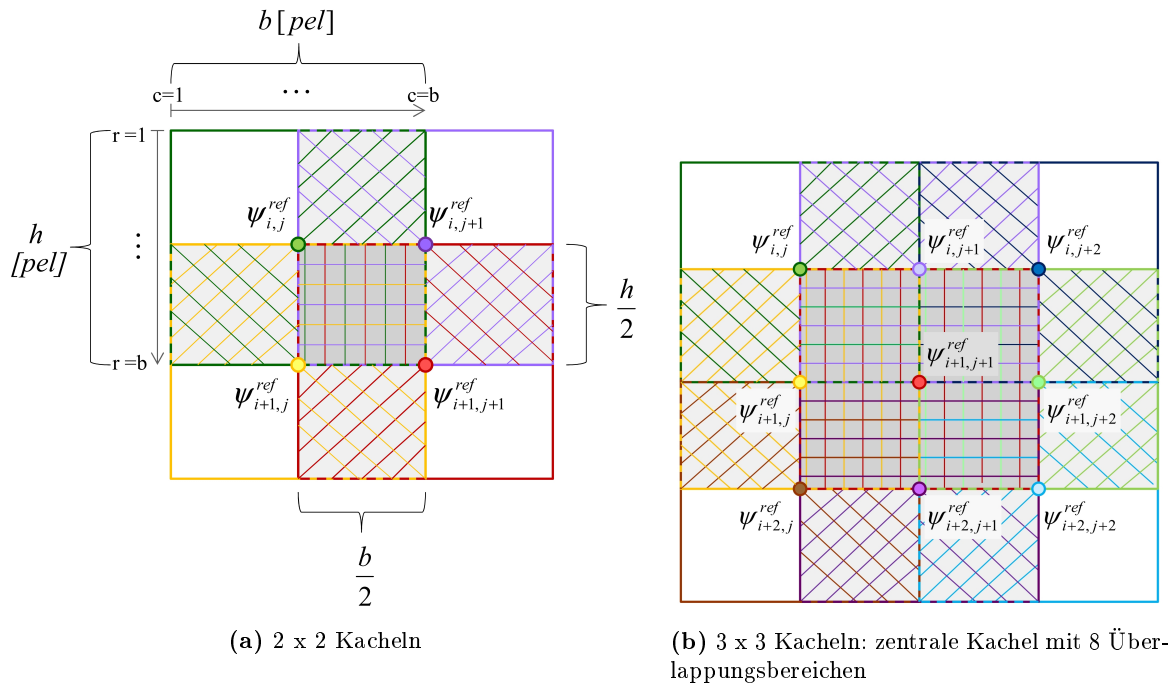
$$\varphi_{i,j}^k = \text{atan2} \left( \frac{1}{h \cdot b} \sum_{c=1}^h \sum_{r=1}^b \sin(\varphi_{r,c}^k), \frac{1}{h \cdot b} \sum_{c=1}^h \sum_{r=1}^b \cos(\varphi_{r,c}^k) \right), \tag{4.3}$$

$h$  ... # der Bildzeilen einer Kachel  
 $b$  ... # der Spalten einer Kachel  
 $r$  ... Laufindex über die Zeilen (engl. rows)  
 $c$  ... Laufindex über die Spalten (engl. columns).

Um zu verdeutlichen, wie viele Referenzwerte zu berechnen sind, wird ein kleines Beispiel herangezogen: Gegeben sei ein Bildstapel mit neun differentiellen Interferogrammen. Jedes dieser Interferogramme wird in  $100 \times 100$  Bildkacheln unterteilt, was zu einer Gesamtzahl von 10.000 Kacheln pro Bild und 90.000 Kacheln im Stack führt. Für jede dieser Kacheln ist ein Phasenreferenzwert zu berechnen, der von allen Phasenwerten in der jeweiligen Kachel zu subtrahieren ist.

Mit den so aufeinander bezogenen Phasenwerten kann in den Kachelstacks wiederum das Verfahren zur Mittelwertbildung nach SCHÄFER (2012) angewendet werden, das in Kapitel 4.2.1 beschrieben ist. Allerdings werden in diesem Fall nicht die Phasenwerte innerhalb einer Kachel gemittelt, wie in Gleichung (4.3), sondern es wird das Mittel an einer Pixelposition  $(r, c)$  entlang des Stacks gebildet. In den gemittelten Kacheln ist somit in jedem Bildelement laut Gleichung (4.2) nur noch der atmosphärische Phasenanteil  $\psi_{r,c}$  des gewünschten Zeitpunkts  $T$  vorhanden.

Da sich jede der gemittelten Kacheln auf einen anderen Referenzphasenwert bezieht, können diese nicht einfach wieder zusammengefügt werden, sondern müssen in einem linearen Ausgleich nach Parametern wieder auf einen gemeinsamen Phasenreferenzwert bezogen werden (vgl. Kapitel 4.1.1). Die Pseudobeobachtungen für den Ausgleich werden aus den Phasenmittelwerten  $\psi_{r,c}$  in den Überlappungsbereichen der Kacheln abgeleitet. Dazu können alle Pixel in diesem Bereich verwendet werden oder nach der Empfehlung von SCHÄFER (2012, S. 68) nur Pixel mit einer langzeitstabilen Phase. Die Wahl dieser Pixel kann mittels eines Kohärenzbilds getroffen werden, dessen Erzeugung in Abschnitt 4.1.2 erläutert wird. Die geschätzten Referenzwerte  $\psi_{i,j}^{ref}$ , auf die sich die Phasenmittelwerte einer Kachel  $(i, j)$  beziehen, werden von allen Phasenwerten der entsprechenden, gemittelten Kacheln subtrahiert. Sollten dabei Werte entstehen, die außerhalb des Wertebereich eines Interferogramms  $W_\varphi$  liegen, so müssen diese Werte um  $2\pi$  nach oben bzw. unten korrigiert werden. Somit sind alle Kacheln auf den selben Referenzphasenwert bezogen und können wieder zusammengesetzt werden. Um kleinere Abweichungen in den Überlappungsbereichen zu verringern, können diese nochmals nach dem Verfahren aus Kapitel 4.2.1 gemittelt.



**Abbildung 4.2:** Beispiele für eine Unterteilung in Kacheln mit Überlappungsbereichen mit zunehmender Komplexität

Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft eine Unterteilung in (a) vier Kacheln und (b) ein etwas komplexeres Beispiel

mit 3 x 3 Kachel, welches alle möglichen Überlagerungen enthält. Die Überlappungsbereiche sind jeweils in den korrespondierenden Farben der sich überlappenden Kacheln, in der Regel sind es vier (dunkelgraue hinterlegt), schraffiert. Ausnahmen bilden die Kacheln am Rand, wo sich lediglich zwei Kacheln überdecken (hellgraue hinterlegt), an den Ecken gibt es keine Überlagerungen (weiß hinterlegt). Die Punkte stehen stellvertretend für die Phasenreferenzwerte der bereits gemittelten Kacheln, die in der entsprechenden Farbe umrandet ist. Dies sind die Referenzwerte, die im Ausgleich bestimmt werden müssen und daher auch in Abbildung 4.3 wiederzufinden sind.

Der Algorithmus 1 fasst nochmals das Vorgehen zur Berechnung des atmosphärischen Phasenbildes für einen gewünschten Aufnahmezeitpunkt zusammen und zeigt beispielhaft, wie das Verfahren implementiert werden kann. Funktionen, deren Namen in Kapitälchen dargestellt sind, können im Anhang C nachgeschlagen werden, alle anderen Funktionen entsprechen der Programmiersprache von MATLAB:

---

**Algorithmus 1** Erzeugung eines atmosphärischen Phasenbilds für den Zeitpunkt T nach SCHÄFER (2012):  
Teil 1

---

**Input:**

Kohaerenz ... Bild mit Kohärenzwerten für die Pixel der DInSAR-Szenen (siehe Algorithmus 3)  
T ... Aufnahmezeitpunkt, für den das atmosphärische Phasenbild bestimmt werden soll

**Ergebnis:**

$\mathbf{API}_{[h \times b]}$  ... das atmosphärische Phasenbild für Zeitpunkt T

```

1: DInSAR_Liste = alle Szenen, die Zeitpunkt T enthalten;
2: initialisiere Stack;
3: // Stack aufbauen, wie in Gleichung (4.1) beschrieben
4: for  $i = 1 : \text{length}(\mathit{DInSAR\_Liste})$  do
5:   if T ist Slaveszene von  $\mathit{DInSAR\_Liste}(i)$  then
6:      $\mathit{DInSAR\_Liste}(i)$  in Stack einfügen;
7:   else
8:     // Vorzeichen der Phasenwerte umdrehen
9:      $-\mathit{DInSAR\_Liste}(i)$  in Stack einfügen;
10:  end if
11: end for

12: // Kachelbildung
13:  $r = \#$  der Kacheln pro Spalte;
14:  $c = \#$  der Kacheln pro Zeile;
15: Kachel = unterteile Stack in  $r \times c$  überlappende Kacheln;
16: unterteile Kohaerenz in  $r \times c$  überlappende Kacheln;

17: // Initialisierung der Daten für den Ausgleich
18:  $n = \#$  der Beobachtungen;
19:  $m = \#$  der Parameter;
20:  $\ell_{[n \times 1]} = \mathbf{0}_{[n \times 1]}$  ▷ Initialisiere Beobachtungsvektor
21:  $\mathbf{Q}_{\ell\ell [n \times n]} = \mathbf{0}_{[n \times n]}$  ▷ Initialisiere Kofaktormatrix
22:  $\mathbf{A}_{[n \times m]} = \mathbf{0}_{[n \times m]}$  ▷ Initialisiere Designmatrix
23:  $ind = 1$ ; ▷ Zeilenindex für Beobachtungsvektor  $\ell$  bzw. für Diagonaleintrag der Kofaktormatrix  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$ 

24: for  $i = 1 : r$  do
25:   for  $j = 1 : c$  do
26:     // zeitliches Mittel und Varianz des Kachelstacks
27:      $\mathit{Mittel}(i, j) = \text{MITTEL\_NACH\_SCHÄFER}(\mathit{Kachel}(i, j, :));$ 
28:      $\mathit{Varianz}(i, j) = \text{VARIANZ\_NACH\_SCHÄFER}(\mathit{Kachel}(i, j, :), \mathit{Mittel}(i, j));$ 
29: ▷ Fortsetzung auf der nächsten Seite!

```

---

---

**Algorithmus 2** Erzeugung eines atmosphärischen Phasenbilds für den Zeitpunkt T nach SCHÄFER (2012):  
Teil 2

---

```

30: // Fallunterscheidung, nach Lage der Kachel(i, j)
31: if i == 1 and j > 1 then
32: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu linkem Vorgänger ▷ Fall 1
33:  $\ell(ind) = \text{COMPUTE\_L}(\text{Mittel}(i, j), \text{Mittel}(i, j - 1), \text{Kohaerenz}(i, j), 1)$ ;
34:  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}(ind, ind) = \text{COMPUTE\_Q\_LL}(\text{Varianz}(i, j), \text{Varianz}(i, j - 1), \text{Kohaerenz}(i, j), 1)$ ;
35:  $\mathbf{A}(ind, :) = \text{FILL\_LINE\_OF\_A}(\mathbf{A}(ind, :), [i, j], [i, j - 1], c)$ ;
36:  $ind = ind + 1$ ;
37: else if j == 1 and i > 1 then
38: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu oberem Vorgänger ▷ Fall 2
39:  $\ell(ind) = \text{COMPUTE\_L}(\text{Mittel}(i, j), \text{Mittel}(i - 1, j), \text{Kohaerenz}(i, j), 2)$ ;
40:  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}(ind, ind) = \text{COMPUTE\_Q\_LL}(\text{Varianz}(i, j), \text{Varianz}(i - 1, j), \text{Kohaerenz}(i, j), 2)$ ;
41:  $\mathbf{A}(ind, :) = \text{FILL\_LINE\_OF\_A}(\mathbf{A}(ind, :), [i, j], [i - 1, j], c)$ ;

42: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu oberem, rechtem Vorgänger ▷ Fall 3
43:  $\ell(ind) = \text{COMPUTE\_L}(\text{Mittel}(i, j), \text{Mittel}(i - 1, j + 1), \text{Kohaerenz}(i, j), 3)$ ;
44:  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}(ind, ind) = \text{COMPUTE\_Q\_LL}(\text{Varianz}(i, j), \text{Varianz}(i - 1, j + 1), \text{Kohaerenz}(i, j), 3)$ ;
45:  $\mathbf{A}(ind, :) = \text{FILL\_LINE\_OF\_A}(\mathbf{A}(ind, :), [i, j], [i - 1, j + 1], c)$ ;
46:  $ind = ind + 2$ ;
47: else if j == c and i > 1 then
48: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu linkem Vorgänger
49: siehe Fall 1 ...
50: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu oberem Vorgänger
51: siehe Fall 2 ...
52: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu oberem, linkem Vorgänger ▷ Fall 4
53:  $\ell(ind) = \text{COMPUTE\_L}(\text{Mittel}(i, j), \text{Mittel}(i - 1, j - 1), \text{Kohaerenz}(i, j), 4)$ ;
54:  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}(ind, ind) = \text{COMPUTE\_Q\_LL}(\text{Varianz}(i, j), \text{Varianz}(i - 1, j - 1), \text{Kohaerenz}(i, j), 4)$ ;
55:  $\mathbf{A}(ind, :) = \text{FILL\_LINE\_OF\_A}(\mathbf{A}(ind, :), [i, j], [i - 1, j - 1], c)$ ;
56:  $ind = ind + 3$ ;
57: else if i > 1 and 1 < j < c then
58: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu linkem Vorgänger
59: siehe Fall 1 ...
60: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu oberem Vorgänger
61: siehe Fall 2 ...
62: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu oberem, rechtem Vorgänger
63: siehe Fall 3 ...
64: // Berechne Einträge von  $\ell$ ,  $\mathbf{Q}_{\ell\ell}$  und  $\mathbf{A}$  zu oberem, linkem Vorgänger
65: siehe Fall 4 ...
66:  $ind = ind + 4$ ;
67: end if
68: end for
69: end for

70: // Ausgleichung der Kacheln (siehe Kapite 4.1.1)
71:  $\mathbf{N}_{[n \times n]} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{\ell\ell}^{-1} \mathbf{A}$ ; ▷ Normalgleichungsmatrix
72:  $\mathbf{n}_{[n \times 1]} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{\ell\ell}^{-1} \ell$ ; ▷ Normalgleichungsvektor
73:  $\tilde{\mathbf{x}}_{[m \times 1]} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n}$  ▷ ausgeglichene Parameter
74: // Phasenreferenzwerte mit den ausgeglichenen Parametern verbessern
75: for i = 1 : r do
76: for j = 1 : c do
77: zeile = c * (i - 1) + (j - 1);
78: Mittel(i, j) = APPLY_XS(Mittel(i, j),  $\tilde{\mathbf{x}}$ (zeile));
79: end for
80: end for

81: setze Kacheln Mittel(i, j) zu Phasenbild  $\mathbf{API}_{[h \times b]}$  zusammen

```

---



### 4.1.1 Ausgleich der überlappenden Bildkacheln

Die Unterteilung der differentiellen Interferogramme in sich überlappende Bildausschnitte birgt das Problem, dass bei der Mittelbildung (mit dem Verfahren nach SCHÄFER (2012)) über die Kachelstacks sich jede Kachel  $(i, j)$  auf einen anderen Phasenreferenzwert bezieht. Um die komplette Aufnahme wieder rekonstruieren zu können, müssen die Kacheln auf eine gemeinsame Referenzphase bezogen werden. Dazu werden die Kacheln untereinander ausgeglichen, wobei der Ausgleich starke Analogien zu einem Ausgleich eines Höhennetzes aufweist. Die Referenzphasen sind durch die Überlappungsbereiche miteinander verknüpft, d.h. aus diesen Bereichen können Pseudobeobachtungen  $\ell_i$  abgeleitet werden. Für die Überlappungsbereiche aus Abbildung 4.2a können die Referenzwerte wie in Abbildung 4.3 durch Beobachtungen verknüpft werden. Für diese ergeben sich die Pseudobeobachtung beispielhaft zu:

$$\begin{aligned}
\ell_1 &= \frac{1}{h \cdot \frac{b}{2}} \left( \sum_{c=1}^{\frac{b}{2}} \sum_{r=1}^h \psi_{r,c}^{i,j+1} - \sum_{c=\frac{b}{2}+1}^b \sum_{r=1}^h \psi_{r,c}^{i,j} \right) \\
\ell_2 &= \frac{1}{\frac{h}{2} \cdot b} \left( \sum_{c=1}^b \sum_{r=1}^{\frac{h}{2}} \psi_{r,c}^{i+1,j} - \sum_{c=1}^b \sum_{r=\frac{h}{2}+1}^h \psi_{r,c}^{i,j} \right) \\
\ell_3 &= \frac{1}{\frac{h}{2} \cdot \frac{b}{2}} \left( \sum_{c=\frac{b}{2}+1}^b \sum_{r=1}^{\frac{h}{2}} \psi_{r,c}^{i+1,j} - \sum_{c=1}^{\frac{b}{2}} \sum_{r=\frac{h}{2}+1}^h \psi_{r,c}^{i,j+1} \right) \\
\ell_4 &= \frac{1}{\frac{h}{2} \cdot \frac{b}{2}} \left( \sum_{c=1}^{\frac{b}{2}} \sum_{r=1}^{\frac{h}{2}} \psi_{r,c}^{i+1,j+1} - \sum_{c=\frac{b}{2}+1}^b \sum_{r=\frac{h}{2}+1}^h \psi_{r,c}^{i,j} \right) \\
\ell_5 &= \frac{1}{h \cdot \frac{b}{2}} \left( \sum_{c=1}^{\frac{b}{2}} \sum_{r=1}^h \psi_{r,c}^{i+1,j+1} - \sum_{c=\frac{b}{2}+1}^b \sum_{r=1}^h \psi_{r,c}^{i+1,j} \right) \\
\ell_6 &= \frac{1}{\frac{h}{2} \cdot b} \left( \sum_{c=1}^b \sum_{r=1}^{\frac{h}{2}} \psi_{r,c}^{i+1,j+1} - \sum_{c=1}^b \sum_{r=\frac{h}{2}+1}^h \psi_{r,c}^{i,j+1} \right),
\end{aligned} \tag{4.4}$$

$\psi_{r,c}^{i,j}$  ... über den Stack gemittelter Phasenwert an Pixelposition  $(r, c)$  in Bildkachel  $(i, j)$ .

Die Gleichung (4.4) zeigt, dass die Beobachtungen die Differenzen der Phasenmittelwerte in den Überlappungsbereichen sind. Die Varianz einer Beobachtung  $\ell_i$  kann aus den Varianzen der Phasenmittelwerten  $\sigma_{r,c}^2$ , die nach Kapitel 4.2.3 berechnet werden, über das Varianzfortpflanzungsgesetz bestimmt werden; z. B. für  $\ell_1$ :

$$\sigma_{\ell_1}^2 = \left( \frac{1}{h \cdot \frac{b}{2}} \right)^2 \cdot \left( \sum_{c=1}^{\frac{b}{2}} \sum_{r=1}^h (\sigma_{r,c}^{i,j+1})^2 + \sum_{c=\frac{b}{2}+1}^b \sum_{r=1}^h (\sigma_{r,c}^{i,j})^2 \right), \tag{4.5}$$

$(\sigma_{r,c}^{i,j})^2$  ... Varianz des über den Stack gemittelten Phasenwerts  $\psi_{r,c}^{i,j}$  an Pixelposition  $(r, c)$  in Bildkachel  $(i, j)$ .

Alternativ kann zur Berechnung der Pseudobeobachtungen auch nur eine Auswahl von Pixel in den Überlappungsbereichen gewählt werden. SCHÄFER (2012, S. 68) schlägt vor nur solche Pixel zu verwenden, die ein

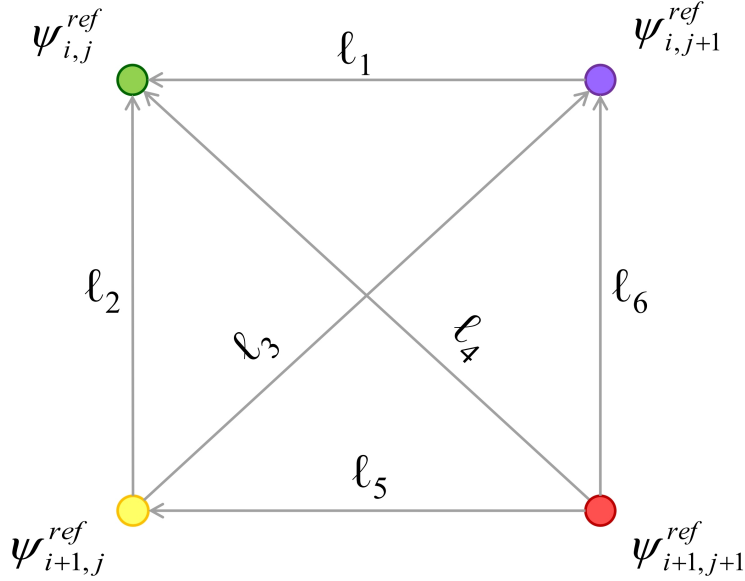


Abbildung 4.3: Pseudobeobachtungen zwischen Phasenreferenzwerten

langzeitstabile Phase haben. Für die Wahl dieser Pixel kann ein Kohärenzbild verwendet werden (vgl. Kap. 4.1.2). Es ist empfehlenswert, diejenigen  $p$  Pixel aus dem Überlappungsbereich zweier Kacheln zu wählen, welche die höchste Kohärenz haben. Dabei ist  $p$  eine festzulegende Anzahl, die von der Größe der Kacheln und somit der Überlappungsbereiche abhängig zu machen ist. In diesem Fall vereinfachen sich die Berechnungen der Pseudobeobachtungen und ihrer Varianzen beispielhaft zu:

$$\ell_1 = \frac{1}{p} \left( \sum_{k=1}^p \psi_k^{i,j+1} - \sum_{k=1}^p \psi_k^{i,j} \right) \quad (4.6)$$

$$\sigma_{\ell_1}^2 = \left( \frac{1}{p} \right)^2 \cdot \left( \sum_{k=1}^p (\sigma_k^{i,j+1})^2 + \sum_{k=1}^p (\sigma_k^{i,j})^2 \right), \quad (4.7)$$

- $\psi_k^{i,j}$  ... über den Stack gemittelter Phasenwert des  $k$ -ten Pixels aus dem gewählten Subset in Bildkachel  $(i, j)$   
 $(\sigma_k^{i,j})^2$  ... Varianz des  $k$ -ten Phasenmittelwerts  $\psi_k^{i,j}$  in Bildkachel  $(i, j)$ .

Für beide Varianten der Berechnung der Pseudobeobachtungen und ihrer Varianzen werden die Beobachtungen  $\ell_i$  als unkorreliert angenommen und das stochastische Modell ergibt sich somit zu:

$$\Sigma\{\mathcal{L}\} = \begin{bmatrix} \sigma_{\ell_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_{\ell_6}^2 \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Unbekannt sind die in Abbildung 4.3 dargestellten Phasenreferenzwerte  $\psi^{ref}$  der gemittelten Bildkacheln. Um einem Rangdefekt entgegenzuwirken, wird der Referenzwert der Kachel  $(i, j)$  festgehalten (vgl. NIEMEIER

2008, S. 129ff u. S. 227ff). Dazu kann der Referenzwert der ersten Kachel  $(i, j)$  z. B. zu null angenommen werden ( $\psi_{i,j}^{ref} = 0$ ), was in folgender Designmatrix mit zugehörigem Parametervektor resultiert:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \psi_{i,j+1}^{ref} \\ \psi_{i+1,j}^{ref} \\ \psi_{i+1,j+1}^{ref} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Die Referenzphasen können mit Gleichung (4.10) geschätzt werden:

$$\tilde{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \boldsymbol{\ell}. \quad (4.10)$$

Mit den geschätzten Referenzwerten können die gemittelten Kacheln korrigiert werden und wie in Kapitel 4.1 beschrieben zu einem kompletten atmosphärischen Phasenbild zusammengesetzt werden.

Der Übergang auf komplexere Unterteilungen (wie bspw. in Abb. 4.2b) sollte sich als unkritische erweisen, da diese nur eine Aneinanderreihung des hier vorgestellten Beispiels darstellen.

#### 4.1.2 Berechnung der pixelbasierten Kohärenz

SCHÄFER (2012) stellt neben der Ermittlung der atmosphärischen Phasenbilder mit der Phasenähnlichkeit bzw. „pixelbasierten Kohärenz“ noch ein weiteres Produkt vor, das durch ähnliche Verfahrensschritte gewonnen werden kann. Die pixelbasierte Kohärenz ist eine Maßzahl, welche die Stabilität der Phasenwerte eines Pixels über einen Zeitraum beschreibt. Der Wertebereich liegt zwischen null und eins, wobei ein hoher Wert eine hohe Kohärenz bedeutet. Wie bereits in Kapitel 4.1.1 beschrieben, empfiehlt SCHÄFER (2012, S. 68) für die Berechnung der Pseudobeobachtungen ausschließlich Pixel heranzuziehen, die eine hohe Kohärenz aufweisen.

Für die Berechnung des Kohärenzbildes wird im ersten Schritt analog zu Abschnitt 4.1 ein Stapel (vgl. Gleichung (4.1)) mit allen differentiellen Interferogrammen gebildet, die sich auf einen Aufnahmezeitpunkt beziehen. Anschließend wird dieser in Kacheln unterteilt, die sich im Gegensatz zu Kapitel 4.1 nicht mehr überlappen müssen, da die Kohärenz nicht mehrdeutig ist und somit auch kein Ausgleich unter den Kacheln erforderlich ist. Außerdem sollten diese Kacheln um den Faktor 10 kleiner sein, also eine Größe von 400 x 400 bis 1000 x 1000 m<sup>2</sup> haben. Von jeder Kachel im Stack wird wieder der Mittelwert abgezogen, sodass alle korrespondierenden Kacheln im Stack jeweils auf den gleichen Phasenreferenzwert bezogen sind (SCHÄFER 2012, S. 66f).

Normalerweise würde eine Deformation zur Änderung der Phasenwerte über die Zeit und damit zur Abnahme der Kohärenz führen. Durch die geringe Kachelgröße und die Referenzierung auf den Mittelwert haben Höhenänderung während des Betrachtungszeitraums keinen Einfluss auf die Berechnung der Kohärenz (SCHÄFER 2012, S. 67).

Für jede Pixelposition in jedem Kachelstack wird die von SCHÄFER (2012) vorgestellte Phasenähnlichkeit (vgl. Kapitel 4.2.2) berechnet. Das Ergebnis ist eine Phasenähnlichkeitsbild, das für jeden Pixel einen Wert enthält, der angibt wie sehr die Phasenwerte in den differentiellen Interferogrammen streuen. Die Ergebnisse für die einzelnen Aufnahmezeitpunkte werden wiederum in einem Stack zusammengefasst und es wird Pixel für Pixel das arithmetische Mittel über den Stack gebildet. Das Endergebnis ist die pixelbasierte Kohärenz, wie sie in Kapitel 4.1.1 verwendet wurde. Sie ist ein Maß für die Phasenstabilität einer Gitterzelle für den gesamten Datenzeitraum (SCHÄFER 2012, S. 67).

Der Algorithmus 3 soll einen kurzen Eindruck von einer möglichen Umsetzung des beschriebenen Verfahrens vermitteln:

---

**Algorithmus 3** Erzeugung der pixelbasierten Kohärenz
 

---

**Daten:**

$\mathbf{T}_{[n \times 1]}$  ... Liste mit allen  $n$  Aufnahmezeitpunkte

**Ergebnis:**

$\mathbf{I\_C}_{[h \times b]}$  ... Bild mit Kohärenzwert für jeden Pixel

```

1:  $n = \text{length}(\mathbf{T});$  ▷ Anzahl der Aufnahmezeitpunkte
2: initialisiere Phase_Similarity_Stack;

3: for  $i = 1 : n$  do
4:   DInSAR_Liste = alle Szenen, die Zeitpunkt  $\mathbf{T}(i)$  enthalten;
5:   initialisiere Stack;

6:   // Stack aufbauen, wie in Gleichung (4.1) beschrieben
7:   for  $i = 1 : \text{length}(DInSAR\_Liste)$  do
8:     if  $T$  ist Slaveszene von  $DInSAR\_Liste(i)$  then
9:        $DInSAR\_Liste(i)$  in Stack einfügen;
10:    else
11:      // Vorzeichen der Phasenwerte umdrehen
12:       $-DInSAR\_Liste(i)$  in Stack einfügen;
13:    end if
14:  end for

15:  Phase_Similarity_Image = COMPUTE_PHASE_SIMILARITY_IMAGE(Stack);
16:  Phase_Similarity_Stack( $i$ ) = Phase_Similarity_Image;
17: end for

18: //Arithmetisches Mittel entlang der dritten Dimension des Bildstapels Phase_Similarity_Stack
19:  $\mathbf{I\_C} = \text{mean}(Phase\_Similarity\_Stack, 3);$ 

```

---

## 4.2 Berechnung von pixelbasierten, statistischen Maßzahlen

Im vorausgehenden Abschnitt 4.1 wurde die Erzeugung eines atmosphärischen Phasen- sowie eines Kohärenzbilds nach dem Verfahren von SCHÄFER (2012) beschrieben. Diese Verfahren setzten jedoch die Berechnung von pixelbasierten, statistischen Maßzahlen voraus, wie sie von SCHÄFER (2012, S. 141ff) vorgestellt wurden, die das Lösen der Phasenmehrdeutigkeiten nicht notwendig machen.

Wie bereits am Anfang dieses Kapitels beschrieben, ist die besondere Berechnung des zeitlichen Mittels der Phasen ein Kernstück des von SCHÄFER (2012) vorgestellten Verfahrens, aber für den Ausgleich wird auch eine Berechnungsvorschrift für die Varianz benötigt. Weiterhin setzt die Erzeugung des Kohärenzbilds die Berechnung eines pixelbasierten Werts für die Phasenähnlichkeit voraus. Die Berechnung dieser Größen wird im Folgenden beschrieben:

### 4.2.1 Berechnung des Phasenmittelwertes

In Abbildung 4.4 ist ein Beispiel dargestellt, welches verdeutlicht, warum ein gesondertes Verfahren zur Mittelwertbildung nötig ist. Die Phasenwerte eines Interferogramms liegen im Wertebereich von  $W_\varphi =$

$[-\pi, \dots, \pi]$  und somit würde sich das Mittel der Phasenwinkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  aus Abbildung 4.4 bei einfacher Mittelung zu Null ergeben, da die Winkel im gegebenen Wertebereich betragsmäßig gleich groß sind, allerdings entgegengesetzte Vorzeichen besitzen.

SCHÄFER (2012) schlägt daher vor die Polarkoordinaten ( $r = 1, \varphi_i$ ) zuerst in kartesische Koordinaten umzurechnen; dies geschieht über die Gleichungen (4.11) und (4.12):

$$x_i = \cos(\varphi_i), \quad (4.11)$$

$$y_i = \sin(\varphi_i). \quad (4.12)$$

Anstelle der Phasenwinkel werden die korrespondierenden kartesischen Koordinaten gemittelt:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (4.13)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (4.14)$$

$N$  ... # der Interferogramme im Stack.

Aus den kartesischen Koordinaten  $(\bar{x}, \bar{y})$  kann der mittlere Phasenwert  $\psi$  mit der Arkustangensfunktion berechnet werden, unter Berücksichtigung der Quadrantenregel:

$$\psi = \text{atan2}(\bar{y}, \bar{x}). \quad (4.15)$$

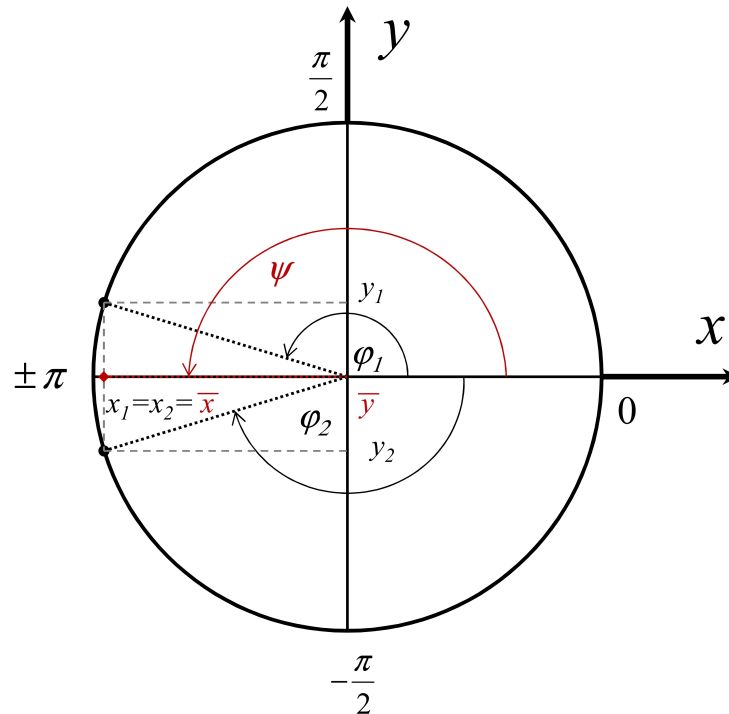


Abbildung 4.4: Mittelwertbildung zweier Phasenwerte

In Abbildung 4.4 ist die gemittelte kartesische Koordinaten (roter Punkt) eingezeichnet und es ist somit nachvollziehbar, dass sich für diesen Fall mit den Gleichungen (4.11) bis (4.15) der gewünschte Phasenwinkel  $\psi$  ergibt, ohne zuvor die Mehrdeutigkeiten gelöst zu haben. Allerdings liefert dieses Verfahren nur näherungsweise den Mittelwert, sofern mehr als zwei Phasenwerte gemittelt werden oder diese nicht regelmäßig verteilt sind. Um dies zu verdeutlichen folgt ein kleines synthetisches Beispiel, wobei für die bessere Anschauung mit Phasenwinkeln in  $[\circ]$  statt in  $[rad]$  gerechnet wird:

Gegeben seien zehn Phasenwerte die unter Annahme einer Gleichverteilung um den Phasenwinkel  $\psi = 180^\circ$  streuen. Im ersten Schritt beträgt die Streuweite  $\pm 1^\circ$ , im zweiten  $\pm 5^\circ$  und im letzten  $\pm 10^\circ$ :

$$\varphi_{\pm 1^\circ} = \begin{bmatrix} 180,392937 \\ 180,639815 \\ 180,724514 \\ 180,695344 \\ 180,905771 \\ 179,057094 \\ 179,364982 \\ 179,850047 \\ 179,525900 \\ 179,033723 \end{bmatrix} [\circ], \quad \varphi_{\pm 5^\circ} = \begin{bmatrix} 181,964686 \\ 183,199077 \\ 183,622569 \\ 183,476720 \\ 184,528857 \\ 175,285469 \\ 176,824912 \\ 179,250234 \\ 177,629502 \\ 175,168614 \end{bmatrix} [\circ], \quad \varphi_{\pm 10^\circ} = \begin{bmatrix} 183,929371 \\ 186,398154 \\ 187,245137 \\ 186,953440 \\ 189,057713 \\ 170,570937 \\ 173,649824 \\ 178,500468 \\ 175,259003 \\ 170,337228 \end{bmatrix} [\circ].$$

Werden nun die arithmetische Mittel dieser Vektoren von Phasenwerte berechnet, so ergeben sich für diese eindeutigen Winkel folgende Mittelwerte:

$$\overline{\varphi_{\pm 1^\circ}} = 180,0190127^\circ, \quad \overline{\varphi_{\pm 5^\circ}} = 180,0950640^\circ, \quad \overline{\varphi_{\pm 10^\circ}} = 180,1901275^\circ.$$

Um das von SCHÄFER (2012) vorgestellte Verfahren anwenden zu können, müssen die Phasenwerte vorher in den Wertebereich eines Interferogrammes von  $W_\varphi = [-180^\circ, \dots, 180^\circ]$  gebracht werden. Dafür werden alle Phasenwinkel größer  $180^\circ$  um  $360^\circ$  reduziert, was in folgenden Vektoren resultiert:

$$\varphi_{\pm 1^\circ} = \begin{bmatrix} -179,607063 \\ -179,360185 \\ -179,275486 \\ -179,304656 \\ -179,094229 \\ 179,057094 \\ 179,364982 \\ 179,850047 \\ 179,525900 \\ 179,033723 \end{bmatrix} [\circ], \quad \varphi_{\pm 5^\circ} = \begin{bmatrix} -178,035314 \\ -176,800923 \\ -176,377431 \\ -176,523280 \\ -175,471143 \\ 175,285469 \\ 176,824912 \\ 179,250234 \\ 177,629502 \\ 175,168614 \end{bmatrix} [\circ], \quad \varphi_{\pm 10^\circ} = \begin{bmatrix} -176,070629 \\ -173,601846 \\ -172,754863 \\ -173,046560 \\ -170,942287 \\ 170,570937 \\ 173,649824 \\ 178,500468 \\ 175,259003 \\ 170,337228 \end{bmatrix} [\circ].$$

Für die Anwendung des vorgestellten Verfahren zur Mittelbildung müssen die Phasenwerte natürlich in Radiant umgerechnet werden bzw. es muss eine Kosinus- und Sinus-Funktion verwendet werden, die mit Winkeln in Grad umgehen kann. Wird anschließend das Verfahren angewendet, so ergeben sich folgende Mittelwerte:

$$\overline{\varphi_{\pm 1^\circ}} = 180,0190158^\circ, \quad \overline{\varphi_{\pm 5^\circ}} = 180,0954463^\circ, \quad \overline{\varphi_{\pm 10^\circ}} = 180,1931978^\circ.$$

Zum Vergleich zwischen dem arithmetischen Mittel und dem Verfahren nach SCHÄFER (2012) werden die Differenzen dieser beiden Mittelwerte gebildet:

$$\Delta\overline{\varphi_{\pm 1^\circ}} = -3,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ, \quad \Delta\overline{\varphi_{\pm 5^\circ}} = -3,823 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ, \quad \Delta\overline{\varphi_{\pm 10^\circ}} = -30,703 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ.$$

Wie zu erkennen ist, nimmt die Genauigkeit der Näherung mit zunehmender Streuung ab.

Dieses vorgestellte Verfahren kann sowohl für die Berechnung des Phasenmittelwertes einer Pixelposition  $(r, c)$  in einem Stack verwendet werden, was zum atmosphärischen Phasenanteil  $\psi_{r,c}$  führt, als auch zur Berechnung des Phasenmittelwerts einer ganzen Kachel  $(i, j)$ , was den Phasenreferenzwert  $\varphi_{i,j}^k$  ergibt (vgl. Gleichung (4.3)).

## 4.2.2 Berechnung der Phasenähnlichkeit

Die Berechnung des Kohärenzbildes wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, basiert maßgeblich auf der Bestimmung der Phasenähnlichkeit, die mit dem zeitlichen Mittel nach SCHÄFER (2012) eng zusammenhängt. Sie ist ein Maß für die Streuung der Phasenwerte über einen Betrachtungszeitraum und besitzt einen Wertebereich  $W_{\varsigma_P} = [0, \dots, 1]$ , wobei ein höherer Wert auch gleichzeitig eine größere Ähnlichkeit bedeutet. Die Phasenähnlichkeit ist dabei nichts anderes als die euklidische Norm des Mittelwertvektors, wie er in den Gleichungen (4.13) und (4.14) berechnet wurde bzw. wie in Abb. 4.4 dargestellt:

$$\varsigma_P = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}. \quad (4.16)$$

Führt man das Beispiel aus Kapitel (4.2.1) weiter, so erkennt man, dass Gleichung 4.16 zu den gewünschten Ergebnissen führt; die Phasenähnlichkeit nimmt mit zunehmender Streuung ab:

$$\varsigma_{P,\pm 1^\circ} = 0,999926, \quad \varsigma_{P,\pm 5^\circ} = 0,998149, \quad \varsigma_{P,\pm 10^\circ} = 0,992607.$$

Werden die Phasenwerte zufällig über den gesamten Kreis verteilt, so konvergiert  $\varsigma_P$  gegen null.

## 4.2.3 Berechnung der Varianz der Phasenwerte

Für den in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Ausgleich werden die Varianzen der Pseudobeobachtungen benötigt. Diese ergeben sich laut Gleichung (4.4) über die mittlere Differenz der Phasenmittelwerte  $\psi_{r,c}$  im Überlappungsbereich zweier Kacheln. Damit die Varianz der Pseudobeobachtungen nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz wie in Gleichung (4.5) bestimmt werden kann, müssen die Varianzen der Phasenmittelwerte  $\sigma_{r,c}^2$  eines jeden Pixels  $(r, c)$  bekannt sein, das für die Berechnung der Beobachtung verwendet wird.

Dafür muss zunächst der Phasenmittelwert, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, bestimmt werden. Bevor nun die empirische Varianz wie in Gleichung (4.18) berechnet werden kann, müssen die Phasenmehrdeutigkeiten berücksichtigt werden, indem alle Phasenwerte einer Pixelposition  $(r, c)$  im Stack in den Wertebereich  $W_\phi = [\psi_{r,c} - \pi, \dots, \psi_{r,c} + \pi]$  gebracht werden. Durch die Zentrierung um dem Phasenmittelwert  $\psi_{r,c}$  ergeben sich bei der Berechnung der Verbesserungen des h-ten Pixels im Stack  $\phi_{r,c}^h - \psi_{r,c}$  wieder eindeutige Pha-

senwerte im Bereich von  $-\pi$  bis  $\pi$ . Dazu werden Phasenwerte, die unter- bzw. oberhalb des Wertebereichs liegen, um eine volle Periode von  $2\pi$  korrigiert:

$$\phi_{r,c}^h = \begin{cases} \varphi_{r,c}^h + 2\pi, & \text{für } \varphi_{r,c}^h < \psi_{r,c} - \pi \\ \varphi_{r,c}^h, & \text{für } \psi_{r,c} - \pi \leq \varphi_{r,c}^h \leq \psi_{r,c} + \pi, \\ \varphi_{r,c}^h - 2\pi, & \text{für } \varphi_{r,c}^h > \psi_{r,c} + \pi \end{cases} \quad (4.17)$$

- $\psi_{r,c}$  ... über den Stack gemittelter Phasenwert an Pixelposition  $(r, c)$
- $\varphi_{r,c}^h$  ... atmosphärischer Phasenwert in Layer  $h$  des Pixelstacks an Position  $(r, c)$
- $\phi_{r,c}^h$  ... um den Mittelwert  $\psi_{r,c}$  zentrierter, atmosphärischer Phasenwert in Layer  $h$  des Pixelstacks an Position  $(r, c)$ .

Mit den Phasenwerten, die sich aus Gleichung (4.17) ergeben, kann die empirische Varianz des Phasenmittelwerts  $\psi_{r,c}$  über folgende Gleichung berechnet werden:

$$\sigma_{r,c}^2 = \frac{\sum_{h=1}^N (\phi_{r,c}^h - \psi_{r,c})^2}{N - 1}, \quad (4.18)$$

$N$  ... Anzahl der Layer im Stack.



# 5. Anwendung des Verfahrens nach SCHÄFER (2012) auf die gegebenen DInSAR-Szenen

Das in Kapitel 4 vorgestellte Verfahren zur Erzeugung von atmosphärischen Phasenbildern aus einem Stapel von DInSAR-Szenen wurde in einer MATLAB-Routine umgesetzt und auf die gegebenen differentiellen Interferogramme angewendet. Im folgenden Kapitel sollen nun die Ergebnisse präsentiert und diskutiert werden. Als erstes wird das Resultat aus Algorithmus 3 vorgestellt. Dieser Algorithmus ermöglicht es ein Kohärenzbild zu generieren, was SCHÄFER (2012) als ein nützliches Nebenprodukt bezeichnet. Es ist jedoch ein wichtiger Bestandteil dieser Routine, da es bei der Berechnung der Pseudobeobachtungen und ihrer Varianzen benötigt wird. Des Weiteren soll dargestellt werden, in wie weit die Wahl des Referenzphasenwertes, auf den die Phasen der einzelnen Aufnahmen im Stack bezogen werden, einen Einfluss auf die Qualität der resultierenden Phasenbilder hat. Zur Validierung der Ergebnisse werden die in Kapitel 2 erwähnten differentiellen Interferogramme aus der ERS-Tandem-Mission mithilfe der erzeugten, atmosphärischen Phasenbilder der Aufnahmezeitpunkte rekonstruiert. Abschließend soll ein weiteres „Nebenprodukt“ des Verfahrens nach SCHÄFER (2012) vorgestellt werden, dass es ermöglicht Deformationsgebiete zu lokalisieren. Dies geschieht, indem die geschriebene Routine auf einen Stack angewendet wird, der aus den berechneten, atmosphärischen Phasenbildern zusammengesetzt ist.

## 5.1 Erzeugung des Kohärenzbildes

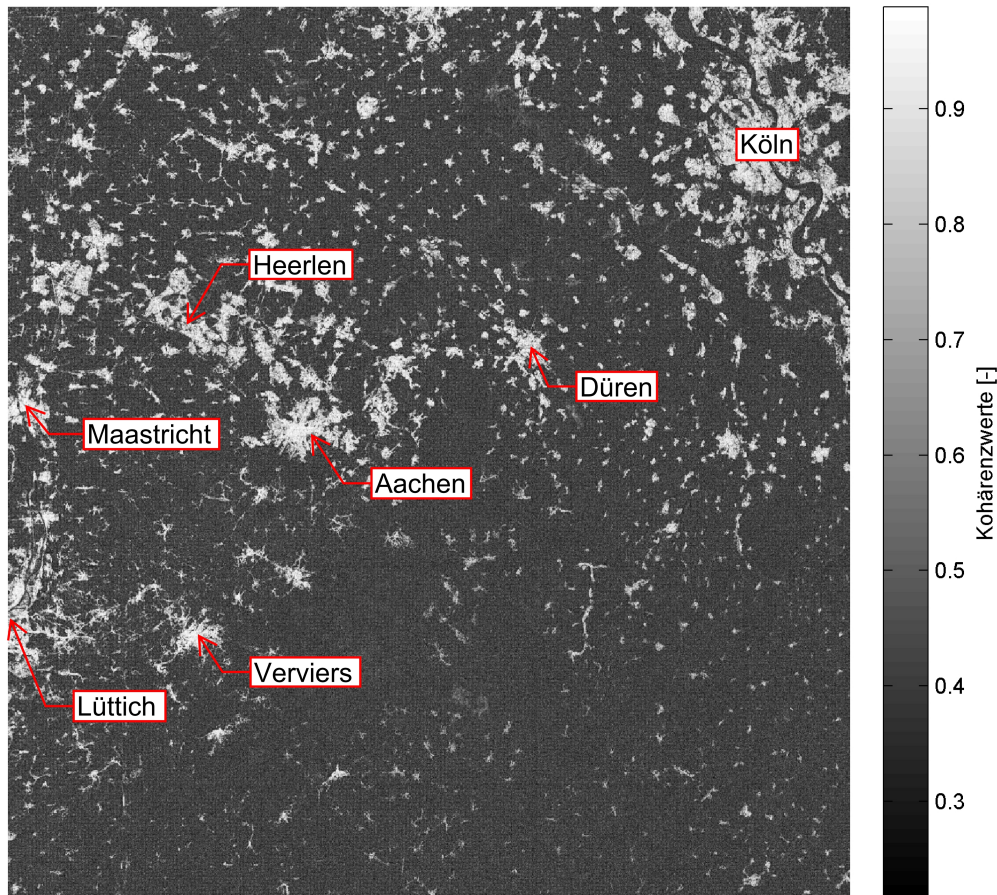
Als Grundlage für die Berechnung der atmosphärischen Phasenbilder wird ein Kohärenzbild benötigt, das für jeden Pixel einen Wert für die Langzeitstabilität der Phase enthält. Bei der Berechnung der Pseudobeobachtungen sowie deren Varianzen für den Ausgleich der Kacheln (vgl. Kap. 4.1.1) werden nur Pixel mit einem hohen Kohärenzwert herangezogen. In einem Vorverarbeitungsschritt vor der Berechnung der eigentlichen Phasenbildern wird also unter Verwendung des Verfahrens in Kapitel 4.1.2 aus allen 113 differentiellen Interferogrammen ein Kohärenzbild erzeugt.

Da alle Szenen auf das Gitter der Aufnahme vom 25.08.1998 ko-registriert wurden, befinden sich am Rand einige Bereiche, für die keine Phasenwerte vorliegen und die daher mit einem „Dummywert“ besetzt sind. Um zu verhindern, dass bei der Unterteilung des Stacks Bildkacheln entstehen, die lediglich aus diesen Platzhaltern zusammengesetzt sind, werden die Aufnahmen vorab um diesen Randbereich reduziert.

Bei der Unterteilung des Stacks wurde eine Kachelgröße von 5 x 5 Pixel gewählt, was bei einer räumlichen Auflösung von 80 x 80 m<sup>2</sup> pro Bildelement einer Größe von 400 x 400 m<sup>2</sup> entspricht und somit in dem von SCHÄFER (2012, S. 67) vorgeschlagenen Bereich liegt. Abbildung 5.1 zeigt das Kohärenzbild für die gegebenen differentiellen Interferogramme.

Die Abbildung zeigt, dass vor allem Gitterzellen in Siedlungsgebieten einen eine hohe pixelbasierte Kohärenz aufweisen. Dieses Resultat ist in soweit zu erwarten gewesen, da gerade künstlich geschaffene Objekte (wie z.B. Häuser oder Straßen) gute Rückstreuer sind und somit langzeitstabil sind. Im Nordosten ist das Stadtgebiet von Köln und der Rhein als dunkles Band (entspricht niedriger Kohärenz) zu erkennen. Auch andere Städte wie beispielsweise Aachen oder Düren lassen sich aufgrund der hohen Kohärenz klar identifizieren. Die großen Flächen mit niedrigen Kohärenzwerten zeigen jedoch die landwirtschaftliche Ausprägung

der Region. Gerade im Süden in Richtung Eifel, sind wenige Stellen mit stabilen Rückstreuern zu finden. Dies zeigt sich in den meisten differentiellen Interferogrammen, denn diese sind geprägt durch einen hohen Anteil an dekorrelierten Bereichen.



**Abbildung 5.1:** Bild der pixelbasierten Kohärenz für die gegebenen SAR-Interferogramme

Abbildung 5.2 zeigt den Großteil des Aufnahmegebietes und soll zur Orientierung dienen. Wie oben erwähnt, lassen sich die Städte Köln, Aachen und Düren deutlich den hellen Flächen im Kohärenzbild zuordnen, aber es sind auch einige niederländische (Heerlen und Maastricht) und belgische Städte (Verviers und Teile von Lüttich) erkennbar. Außerdem sind auch die drei großen Tagebaue zu sehen, die das Gebiet prägen. Im Süden der Tagebau Hambach und Inden (von Ost nach West) und im Norden der Aufnahme der Tagebau Garzweiler. Ansonsten spiegelt das Luftbild den hohen Anteil an vegetativen Flächen wider, seien es nun Agrar- oder Forstflächen, welche zur Dekorrelation der Interferogramme und somit zu den niedrigen Kohärenzen beitragen.



Abbildung 5.2: Luftbild von Teilen des Aufnahmegebietes

## 5.2 Einfluss verschiedener Ansätze bei der zeitlichen Mittelbildung

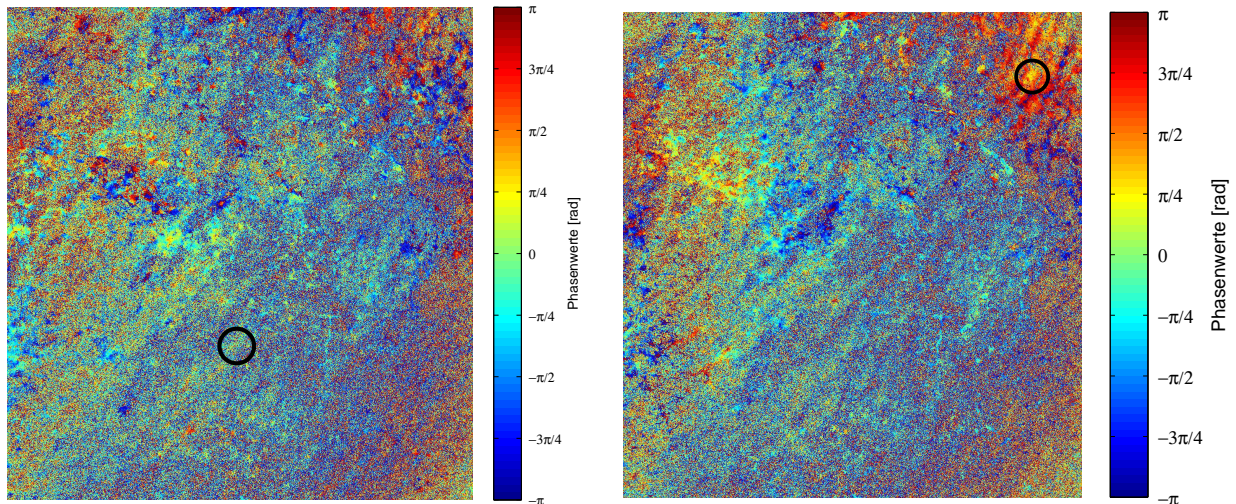
Wie in Kapitel 4.1 dargelegt, werden die atmosphärischen Phasenbilder durch eine Mittelbildung über einen Stack mit spezieller Struktur erzeugt. Dieses Verfahren setzt allerdings voraus, dass alle Aufnahmen auf den gleichen Phasenwert referenziert sind. SCHÄFER (2012, S. 59f) stellt einige Möglichkeiten zur Festlegung des Referenzphasenwertes vor und nennt deren Nachteile.

Es besteht einerseits die Möglichkeit einen Referenzpixel zu wählen, andererseits kann auch eine Referenzfläche definiert und deren Mittelwert als Referenz verwendet werden. Bei der Wahl des Referenzpixels ist dessen Phasenstabilität von Bedeutung; ist diese nicht gegeben, wirkt sich das negativ auf das berechnete Phasenbild aus. Des Weiteren soll nach SCHÄFER (2012) sich mit zunehmender Entfernung zu diesem Pixel das Rauschen erhöhen. Auch bei der Festsetzung einer Referenzfläche tritt dieser entfernungsabhängige Effekt auf, wobei auch die Größe der Fläche das Ergebnis beeinflusst. SCHÄFER (2012) empfiehlt eine Größe von  $4 \times 4 \text{ km}^2$  bis  $10 \times 10 \text{ km}^2$  für die Referenzfläche. Um dem entfernungsabhängigen Rauschen entgegenzuwirken, wird der Stack in überlappenden Kacheln unterteilt (vgl. auch Kap. 4.1).

Zur Validierung dieser Aussagen wird beispielhaft für den Aufnahmezeitpunkt der ERS-Szene vom 04.01.1996 das korrespondierende atmosphärische Phasenbild mit verschiedenen Möglichkeiten der Referenzfestlegung erzeugt. Für den Test wird zum einen unter Zuhilfenahme des Kohärenzbildes aus Kapitel 4.1.2 das Bildelement mit dem niedrigsten Kohärenzwert gewählt, zum anderen wird ein als phasenstabil anzunehmendes Pixel mit hohem Kohärenzwert aus dem Stadtgebiet von Köln verwendet. Die beiden resultierenden Phasenbilder 5.3a und 5.3b sollen den Einfluss der Phasenstabilität des Referenzpixels sowie der Entfernung von der Referenz visualisieren.

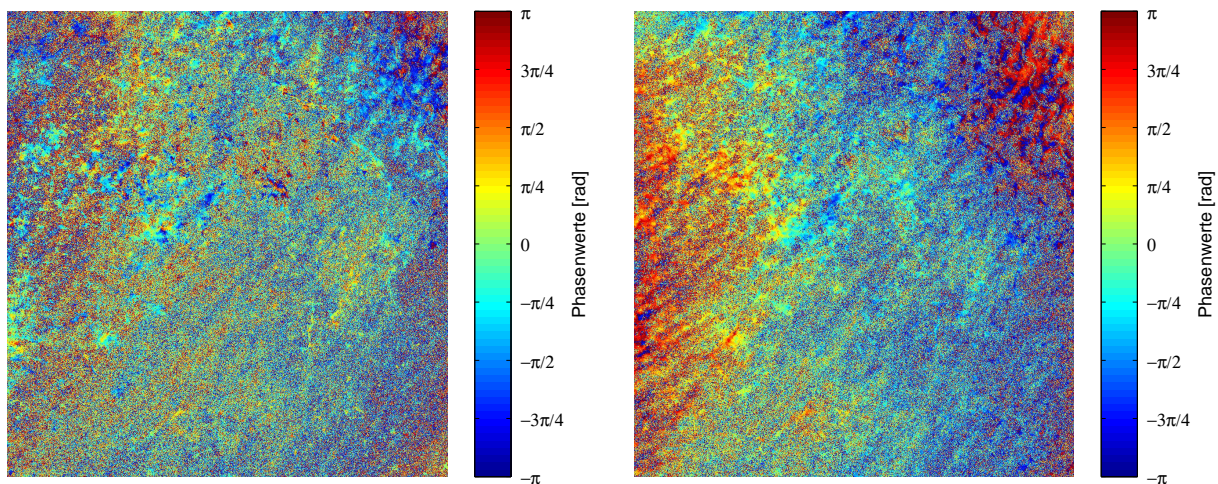
Zur Überprüfung der Aussagen bezüglich der Referenzflächengrößen wird die gesamte Aufnahme als Referenzfläche gewählt, was zu einem Informationsverlust führen müsste, da der resultierende Referenzwert ( $\hat{=}$  Mittel aller Pixelwerte) sich wegen der großen dekorrelierten Bereiche Null annähern müsste. Dadurch sind die Aufnahmen im Stack nach wie vor auf verschieden Phasenwerte bezogen, womit der in Gleichung (4.2)

gezeigte Ansatz der Mittelbildung nicht mehr gültig ist. Als weiteres Beispiel für den Einfluss der Größe der Referenzfläche wird das in Kapitel 4 vorgestellte Verfahren nach SCHÄFER (2012) mit Unterteilung der Aufnahmen in sich überlappende Bildkacheln mit anschließendem Ausgleich angewendet. Die Ergebnisse dieser beiden Ansätze sind in den Abbildungen 5.3c und 5.3d dargestellt.



(a) Phasenbild bei Wahl eines Referenzpixels mit niedriger Kohärenz

(b) Phasenbild bei Wahl eines Referenzpixels mit hoher Kohärenz im Stadtgebiet von Köln



(c) Phasenbild bei Wahl der ganzen Aufnahme als Referenzfläche

(d) Phasenbild bei Verwendung des Verfahrens nach SCHÄFER (2012) und Unterteilung in überlappende Bildkacheln mit anschließendem Ausgleich

**Abbildung 5.3:** Atmosphärische Phasenbilder der SAR-Szene vom 01.04.1996 bei Verwendung eines Referenzpixels (a) und (b) bzw. einer Referenzfläche (c) und (d). Der Mittelpunkt des schwarzen Kreis markiert die Lage des gewählten Pixels.

Durch die unterschiedliche Referenzierung bei der Erzeugung der vier Phasenbilder weisen die Phasenwerte eines Bildes im Bezug auf die anderen Bilder eine Phasenverschiebung innerhalb des mehrdeutigen Wertebereichs auf. Dies kann dazu führen, dass sich sogar identische Bilder optisch unterscheiden. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde dieser Phasenunterschied zwischen den Ergebnissen entfernt. Alle Phasenwerte sollen auf das ausgeglichene Phasenbild 5.3d bezogen werden. Hierfür wurde im ersten Schritt ein Pixel mit hoher Kohärenz aus dem Stadtgebiet von Köln gewählt. Anschließend wurde für die Korrektur eines Bildes die Differenz zwischen den Phasenwerten des gewählten Pixels im eigenen und im ausgeglichenen Phasenbild 5.3d bestimmt. Mit dieser Phasendifferenz wurden alle Phasenwerte in der Aufnahme verbessert.

Beim Vergleich der vier resultierenden Phasenbilder fällt als erstes auf, dass Abbildung 5.3d die meisten zusammenhängenden Bereiche aufweist und auch atmosphärische Strukturen am feinsten aufgelöst sind. Dies entspricht den Erwartungen, die an das Verfahren gestellt werden. Durch die Unterteilung in Bildkacheln wird sowohl das Entfernungsproblem als auch der negative Effekt von zu großen Referenzflächen umgangen. Deshalb soll die Güte der anderen Phasenbilder im Bezug auf dieses Ergebnis bewertet werden.

Abbildung 5.3b besitzt die größte Ähnlichkeit zu Abbildung 5.3d, was ein zu erwartendes Ergebnis ist. Einerseits wurde ein Referenzpixel mit langzeitstabilen Phasenwerten gewählt, sodass es vor allem in der Umgebung dieses Pixels zu Übereinstimmungen kommen muss, zum anderen steigt jedoch mit zunehmender Entfernung zu diesem Pixel das Rauschen, was besonders am linken Bildrand gut zu erkennen ist.

Das schlechteste Ergebnis liefert die Vorgehensweise, die für die Erstellung des Phasenbilds 5.3a gewählt wurde. Bei dieser Abbildung überlagern sich zwei Effekte, das entfernungsabhängige Ansteigen des Rauschens und der Einfluss der Phaseninstabilität des gewählten Referenzpixels. Die Zunahme des Rauschens lässt sich besonders gut am Stadtgebiet von Köln in der linken, oberen Ecke detektieren, welches in den anderen Abbildungen als zusammenhängende Fläche dargestellt wird, in diesem jedoch von kleineren dekorrelierten Gebieten unterbrochen wird. Der Effekt, der durch die niedrige Kohärenz des Referenzpixels hervorgerufen wird, lässt sich im Vergleich mit Abbildung 5.3d feststellen, da die Ähnlichkeiten sehr gering sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Referenzpixel im dekorrelierten Bereich liegt und somit einen zufälligen Phasenwert hat, was zu einer Verletzung der Annahme führt, dass sich die fremden Atmosphärenanteile bei der Mittelbildung über den Stack zu Null ergeben. Somit ist anzunehmen, dass noch atmosphärische Phasenanteile von anderen Aufnahmezeitpunkten im Bild enthalten sind.

Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch in Abbildung 5.3c erkennen, was die Annahme von oben bezüglich der Auswirkungen der Referenzflächengröße unterstreicht.

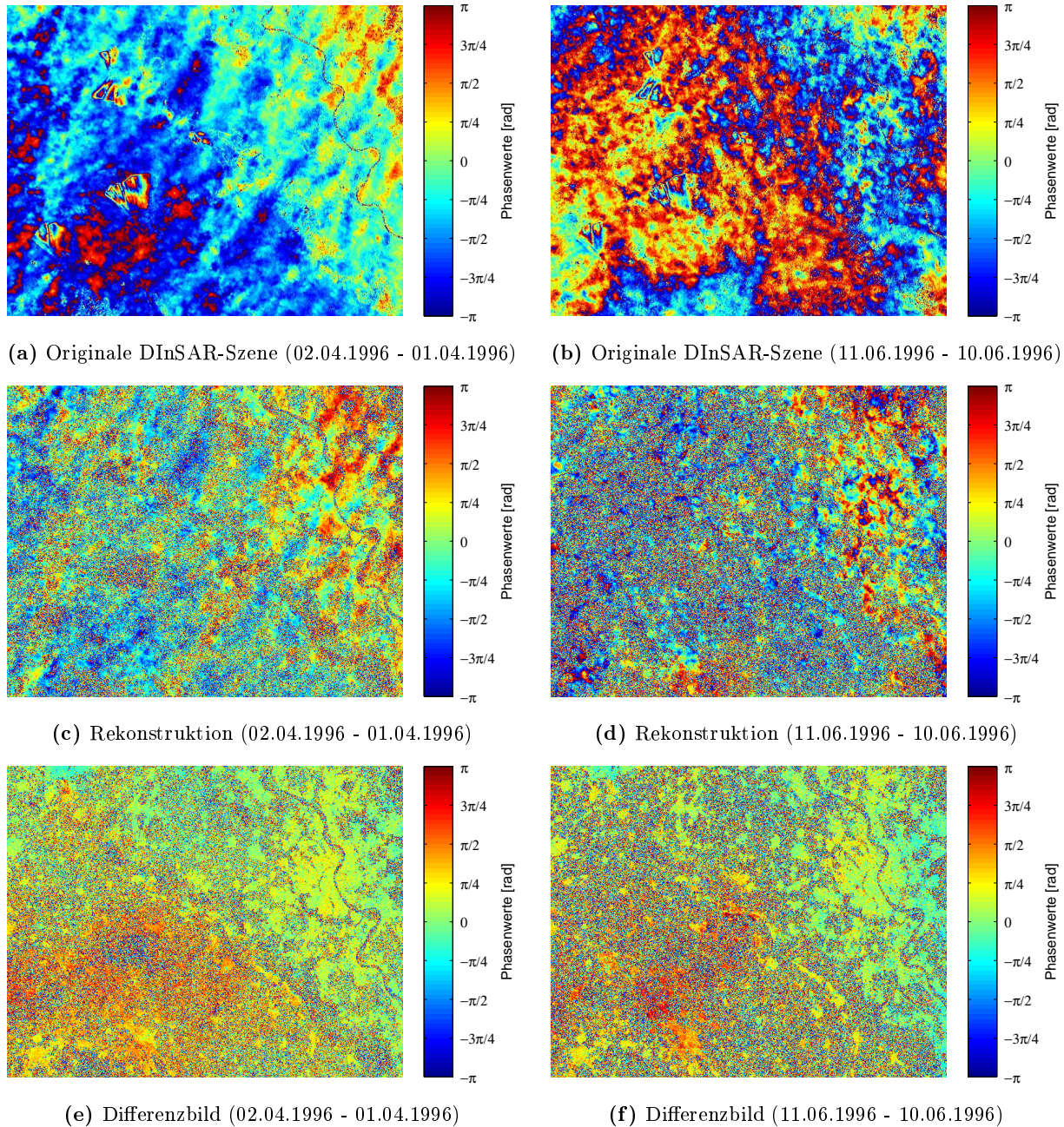
Abschließend lässt sich festhalten, dass die Aussagen von SCHÄFER (2012) durch die hier vorgestellten Ergebnisse bestätigt werden können. Sowohl die Zunahme des Rauschens bei größer werdender Entfernung von der Referenz, als auch der Einfluss der Phasenstabilität und der Größe der Referenzfläche zeichnen sich deutlich in den oben präsentierten Ergebnissen ab.

## 5.3 Rekonstruktion von differentiellen Interferogrammen aus den atmosphärischen Phasenbildern

In Kapitel 2 wurde bei der Beschreibung der gegebenen Daten bereits auf die Tandem-Missionen der ERS-Satelliten hingewiesen. In diesem Kapitel sollen nun die zwei differentiellen Interferogramme, die aus Aufnahmen der Tandem-Mission berechnet wurden, mit den atmosphärischen Phasenbildern rekonstruiert werden. Die Wahl dieser Szenen ist durch zwei Tatsachen begründet. Durch den geringen zeitlichen Abstand von 24 Stunden zwischen den Aufnahmen kann angenommen werden, dass keine Deformationen vorliegen und das Interferogramm primär die Überlagerung der atmosphärischen Zustände der beiden Aufnahmezeitpunkte enthält. Ausnahmen bilden die Tagebaue Hambach, Inden und Garzweiler, die in den Interferogrammen deutlich zu erkennen sind. An diesen Stellen zeigen sich Höhenfehler durch das digitale Geländemodell in Form von Fringes. Außerdem liegen für die vier Aufnahmezeitpunkte eine größere Anzahl von differentiellen Interferogrammen vor, nämlich je zehn für den 02.04. und 11.06.1996 sowie für den 01.04. und 10.06.1996 jeweils neun.

Für die Erzeugung der atmosphärischen Phasenbilder wurden die differentiellen Interferogramme auf einen Bereich zugeschnitten, der den Raum Köln und die oben genannten Tagebaue enthält. Diese Maßnahme soll die Orientierung erleichtern und vor allem die großen Bereiche mit dekorrelierten Phasenwerten in der Eifel

entfernen. Bei der Berechnung der Phasenbilder wurde die Größe der sich überlappenden Kacheln auf  $50 \times 50$  Pixel festgelegt, was einer räumlichen Auflösung von  $4 \times 4 \text{ km}^2$  entspricht.



**Abbildung 5.4:** Rekonstruktion von differentiellen Interferogrammen aus der ERS-Tandem-Mission.

Zur Rekonstruktion des differentiellen Interferogramms werden die beiden atmosphärischen Phasenbilder entsprechend der durch die DInSAR-Szene vorgegebene Richtung voneinander subtrahiert. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird zusätzlich ein Differenzbild der Rekonstruktion und des originalen Interferogramms erzeugt. Dafür muss jedoch in einem Vorverarbeitungsschritt der Offset zwischen den Phasenwerten entfernt werden. Zu diesem Zweck wird der Pixel mit dem höchsten Wert im Kohärenzbild gesucht, dessen Phasenwert im originalen und im rekonstruierten Interferogramm werden voneinander subtrahiert und diese Differenz wird auf alle Phasenwert des Differenzbilds addiert.

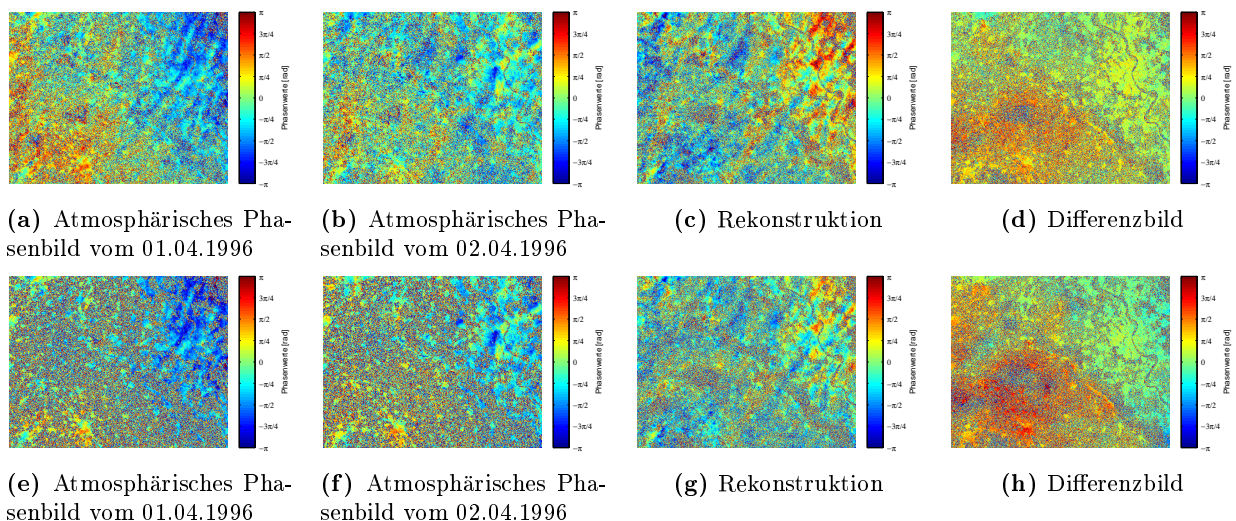
In Abbildung 5.4 sind die zwei originalen Interferogramme aus der ERS-Tandem-Mission nebeneinander dargestellt. Darunter sind die zugehörigen Rekonstruktionen sowie die Differenzbilder abgebildet. Es fällt auf,

dass die Rekonstruktionen im Gegensatz zu den originären DInSAR-Szenen einen viel höheren Rauschanteil besitzen. Die Qualität der ursprünglichen Interferogramme wird nicht erreicht, da diese aus Aufnahmen erzeugt wurden, die für Repeat-Pass-Interferometrie kaum idealer sein könnten, da sie eine sehr kleine räumliche und zeitliche Basislinie aufweisen. Bei der Berechnung der atmosphärischen Phasenbilder für die Rekonstruktion werden Interferogramme verwendet, die ebenfalls einen größeren Rauschanteil besitzen, was sich somit auch in den Endergebnissen niederschlägt.

Dennoch lässt sich festhalten, dass sich viele Strukturen, die im Original zu sehen sind, auch in der Rekonstruktion zu finden sind. Gerade im Stadtgebiet von Köln lassen sich aufgrund der großen kohärenten Fläche viele Ähnlichkeiten ausmachen. Dies spiegelt sich auch in den Differenzbildern wieder, die für das Stadtgebiet vorwiegend Phasenwerte im Bereich von Null aufweisen. Abweichungen in den Differenzbildern sind vor allem in den Bereichen um die Tagebaue zu detektieren, was darin begründet sein könnte, dass die Deformationsgebiete nicht ausmaskiert und somit die Berechnung der atmosphärischen Phasenbilder in diesen Bereichen verfälscht wurde.

In Abbildung 5.5 soll dieser Effekt noch genauer verdeutlicht werden. Dargestellt sind die Differenzbilder zwischen dem rekonstruierten und dem originalen differentiellen Interferogramm aus den ERS-Szenen vom 01. und 02.04.1996. Allerdings wurde bei der Erstellung der atmosphärischen Phasenbilder in der oberen und unteren Bildreihe unterschiedlich vorgegangen. Bei der oberen Reihe wurde das originäre Interferogramm in den Bildstapel zur Berechnung eingefügt, bei der unteren Reihe wurde dies unterlassen. Da diese DInSAR-Szene aufgrund ihrer kurzen zeitlichen Basislinie keine langzeitigen Deformationssignale durch die Tagebaue enthält, wird das mittlere Deformationssignal, das durch die anderen Interferogramme in den atmosphärischen Phasenbildern vorhanden ist, folglich abgeschwächt. Somit ist das Deformationssignal, das sich mit der atmosphärischen Phasenverschiebung überlagert, in der Rekonstruktion stärker und demnach auch im Differenzbild.

Ein weiterer Effekt den die Bildreihe 5.5 deutlich macht, ist der Einfluss eines guten Interferogramms mit hoher Kohärenz, der sich durch ein wesentlich geringeres Rauschen niederschlägt. Die atmosphärischen Phasenbilder und auch die Rekonstruktion weisen im Stadtbereich von Köln hohe Ähnlichkeiten auf, in Richtung Südwesten nimmt das Rauschen in der unteren Bildreihe stark zu, während auf den oberen Abbildungen ein größerer Anteil von zusammenhängenden Flächen erhalten bleibt.

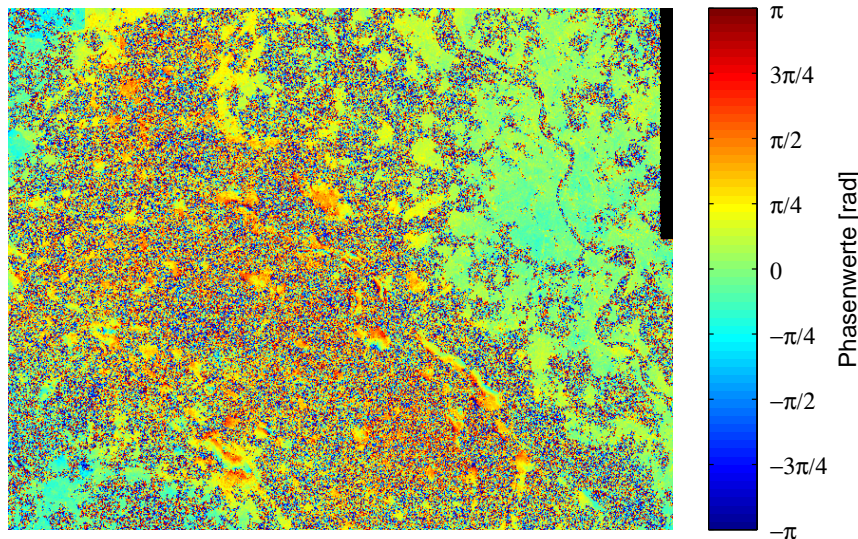


**Abbildung 5.5:** Atmosphärische Phasenbilder der Aufnahmezeitpunkt vom 01. und 02.04.1996. Rekonstruktion des zugehörigen differentiellen Interferogramms und Differenzbild zum original Interferogramm. Bei der oberen Bildreihe war die original DInSAR-Szene im Stapel zur Berechnung der Phasenbilder enthalten, bei der unteren Bildreihe nicht.

## 5.4 Lokalisierung von Deformationsgebieten

SCHÄFER (2012, S. 69ff) stellt ein weiteres „Nebenprodukt“ seines Verfahrens vor. Wird das Verfahren, welches zur Ermittlung der atmosphärischen Phasenbilder verwendet wird, auf einen Stack angewendet, der aus ebendiesen Phasenbildern in zeitlich sortierter Reihenfolge zusammengesetzt ist, so ergibt sich eine Abbildung, die das mittlere zeitliche Deformationssignal  $\varphi_{defo}$  (vgl. Kap. 2.1) enthält. Die atmosphärischen Phasenbilder verfügen neben dem Signal der atmosphärischen Phasenverschiebung  $\varphi_{atmo}$  immer auch über einen Anteil der langzeitigen (linearen) Deformationen. Da diese Deformationsprozesse systematisch sind und keinen zufälligen Charakter aufweisen, mitteln sich diese nicht heraus. Werden die atmosphärischen Ergebnisse nun wiederum gemittelt, fällt der atmosphärische Phasenanteil heraus, da dieser für jeden Aufnahmezeitpunkt als unkorreliert angenommen werden kann und somit verbleibt nur noch das Deformationssignal (SCHÄFER 2012, S. 69).

Das Ergebnis ist jedoch nur zum Auffinden von Deformationsgebieten mit geringen Höhenänderungsraten zu verwenden, da höhere Raten zu Phasenmehrdeutigkeiten führen, die den Mittelwert einen zufälligen Charakter verleihen (SCHÄFER 2012, S. 69).



**Abbildung 5.6:** Ermittlung von Deformationsgebieten aus den atmosphärischen Phasenbildern vom 09.05.1992 bis 11.06.1996

Die beschriebene Vorgehensweise wurde auf einen Stapel mit atmosphärischen Phasenbildern angewendet, der die Aufnahmezeitpunkte vom 09.05.1992 bis zum 11.06.1996 enthält und damit eine Zeitspanne von vier Jahren umfasst. Eine größere Zeitspanne führt zu weniger eindeutigen Ergebnissen, was mit der Empfehlung von SCHÄFER (2012, S. 57) korrespondiert, den Datenstapel auf 4-5 Jahre Zeitdauer zu beschränken. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.6 dargestellt und zeigt den gleichen Ausschnitt wie die Bilderreihe in Abb. 5.4. Der Braunkohletagebau in der niederrheinischen Bucht macht eine Grundwassersenkung erforderlich und der damit verbundene, weiträumige Grundwasserentzug führt zu Bodensenkungen in dieser Region. Die äußere Ausdehnung des Senkungsgebietes ist in Abbildung 5.6 an den Fringes der Phasenwerte deutlich zu erkennen. Das Kölner Stadtgebiet ist jedoch nicht vom Senkungsprozess betroffen. Dies zeigt nochmals auf, warum die Differenzbilder in Abbildung 5.3 im Bereich der Tagebaue Abweichungen vom erwarteten Wert Null aufweisen. Durch die Deformationsprozesse enthalten die für die Rekonstruktion verwendeten Phasenbilder neben dem atmosphärischen Signal auch einen Deformationsanteil. Diese sind somit auch in der Rekonstruktionen enthalten, allerdings nicht in den originalen, differentiellen Interferogrammen, da die verwendeten SAR-Szenen in einem zeitlichen Abstand von 24 Stunden aufgenommen wurden.



## 6. Vergleich mit in situ Wetterdaten

Zur Validierung der atmosphärischen Phasenbilder, die mit dem in Kapitel 4 erläuterten Verfahren nach SCHÄFER (2012) erzeugt und in Kapitel 5 vorgestellt wurden, sollen in situ Wetterdaten herangezogen werden. Hierfür sind allerdings einige Anforderungen an die Vergleichsdaten zu stellen. Diese sollten zum einen flächendeckend für das Aufnahmegebiet und zum anderen auch möglichst exakt zum Aufnahmezeitpunkt der SAR-Szenen vorliegen, die jeweils zwischen 10:29 Uhr und 10:30 Uhr erstellt wurden (vgl. Abb. 2.1). Optische Daten von meteorologischen Satelliten erfüllen diese Kriterien. Das Alter der vorliegenden ERS-Szenen, die zwischen 1992 und 2000 aufgenommen wurden, beschränkt jedoch die Auswahl der möglichen Satelliten, die Vergleichsdaten liefern können. Die Meteosat Satelliten der ersten Generation (engl. *Meteosat First Generation*, MFG) erfüllen diese Kriterien am besten, da sie im Halben-Stunden-Rhythmus Bilder aufnehmen. Im folgenden Kapitel werden MFG-Satellitenbilder für den Vergleich herangezogen, weshalb die Aufnahmeparameter der MFG-Satelliten und die resultierenden Produkte an dieser Stelle kurz vorgestellt werden.

### 6.1 Die Meteosat-Missionen der ersten Generation und ihre Produkte

Die MFG-Satelliten (Meteosat-2 bis Meteosat-7) waren geostationäre Satelliten, die zwischen 1981 und 1997 gestartet wurden und in einer Höhe 35756 km über dem Äquator am Greenwich Meridian stationiert waren. Meteosat-7 ist noch aktiv, wurde jedoch mit dem Start der zweiten Generation von Meteosat im Jahr 2006 auf 57,5° östlicher Länge versetzt, um Bilder im Bereich des indischen Ozeans aufzunehmen (EOPORTAL 2013).

Der Hauptsensor dieser Satelliten ist der MVIRI (*Meteosat Visible and Infrared Imager*) ein Radiometer mit drei Spektralkanälen, das simultan Aufnahmen im sichtbaren und thermalen Infrarot-Bereich sowie innerhalb des Wasserdampf-Absorptionsband erzeugen kann. Die Kanäle sind wie folgt festgelegt (EOPORTAL 2013):

- 0,5 - 0,9  $\mu\text{m}$ : Kanal des sichtbaren Spektrums (VIS)
- 5,7 - 7,1  $\mu\text{m}$ : Wasserdampf-Absorptionskanal (WV)
- 10,5 - 12,5  $\mu\text{m}$ : thermischer Infrarotkanal (TIR)

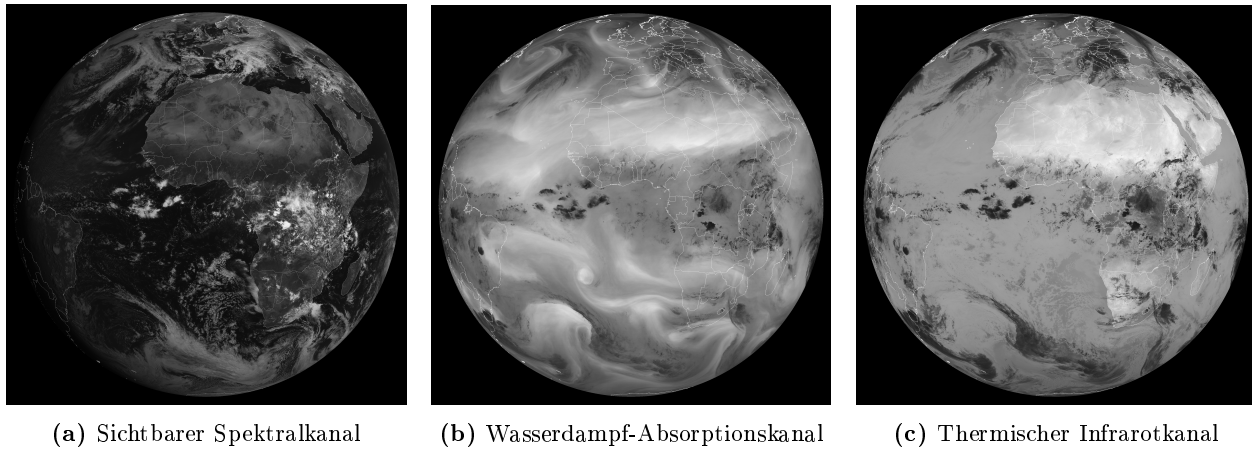
Die VIS-Aufnahmen werden mit zwei Radiometern nur tagsüber akquiriert und besitzen eine räumliche Auflösung von 2,5 km x 2,5 km im Nadir. Dagegen werden die Wasserdampf- und Infrarot-Bilder in einer Radiometerkombination mit allen drei Kanälen erzeugt und haben eine räumliche Auflösung von 5 km x 5 km im Nadir (HANSSEN 1998, S. 34).

Die WV-Bilder von Meteosat geben Aufschluss über den integrierten Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre, wohingegen mit dem Infrarotbild die Temperatur von Wolken, Land und Ozeanen bestimmt werden können. Die Aufnahme im sichtbaren Spektrum kann zur Ermittlung von Wolkentypen und des Bedeckungsgrads verwendet werden (HANSSEN 1998, S. 33).

Da der Satellit über dem Äquator positioniert ist, nimmt die Auflösung aufgrund der Erdkrümmung entlang der Meridiane ab. Der Skalierungsfaktor ist  $1/\cos(\varphi)$ , wobei  $\varphi$  der geographischen Breite entspricht (HANSSEN 1998, S. 34). Daraus resultiert für den Bereich der Niederrheinischen Bucht eine Auflösung von

2,5 km x 3,9 km für die VIS-Bilder und 5 km x 7,9 km für die TIR- sowie die WV-Aufnahmen.

Die Abbildung 6.1 zeigt beispielhaft die Bilder der drei Kanäle für den Aufnahmezeitpunkt am 02.04.1996. Die Aufnahmen wurden um 10:30 Uhr erstellt und sind damit nur wenige Sekunden nach der SAR-Szene entstanden. Somit kann angenommen werden, dass die dargestellten atmosphärischen Zustände denen während des Aufnahmevorgangs der SAR-Szene entsprechen.



**Abbildung 6.1:** Meteosat-Aufnahmen der drei Spektralkanäle vom 02.04.1996, 10:30 Uhr. Dargestellt ist der gesamte Bereich, der von Meteosat erfasst wird.

## 6.2 Vergleich von Meteosat-Aufnahmen mit den atmosphärischen Phasenbildern

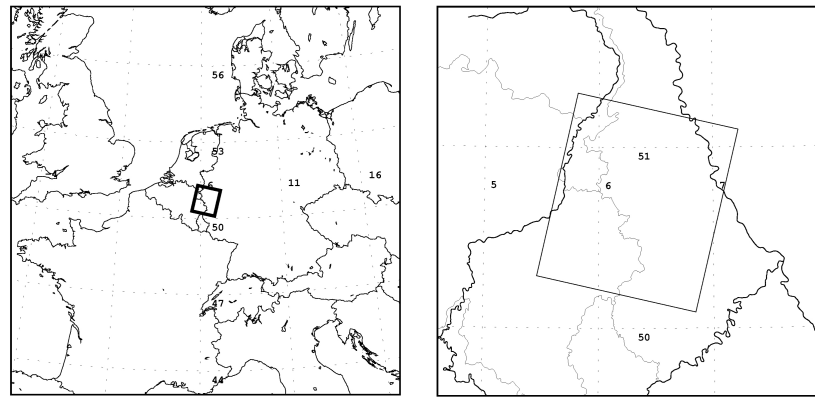
Nach der Vorstellung der Satellitenprodukte, die als in situ Wetterdaten genutzt werden, sollen an dieser Stelle zunächst die Vorgehensweise für den Vergleich und einige Einschränkungen erläutert werden.

Es werden die Aufnahmen aus dem sichtbaren Spektrum und die des Wasserdampf-Absorptionskanals verwendet, um Vergleiche von Strukturen in den atmosphärischen Phasenbildern mit der Wolkenbedeckung durchzuführen und um Wasserdampfgradienten auszumachen. Aufgrund der schlechteren räumlichen Auflösung der Meteosat-Aufnahmen (vgl. Abschnitt 6.1) im Vergleich zu den Phasenbildern (80 m x 80 m) ist allerdings nur ein qualitativer Vergleich möglich. Kleinere atmosphärische Strukturen, die eventuell auf den Bildern der atmosphärischen Phasenverschiebung dargestellt sind, können nicht aufgelöst werden, jedoch kann eine tendenzielle Aussage darüber getroffen werden, ob die Strukturen Ähnlichkeiten aufweisen.

Ein weiterer Aspekt, der den Vergleich erschwert, ist die durch die Aufnahmegeometrie bedingte Verzerrung der Meteosat-Aufnahmen, die nicht korrigiert wurde. In Abbildung 6.2 ist die groß- und kleinräumige Lage der ERS-Aufnahmen durch den schwarzen Kasten verzerrungsfrei dargestellt. Vergleicht man diesen beispielsweise mit dem roten Kasten in Abbildung 6.3a und orientiert sich dabei an den dargestellten Ländergrenzen, ist zu erkennen, dass sie den gleichen Bereich umschließen.

Für den Vergleich werden wie in Kapitel 5.2 Phasenbilder verwendet, die den gesamten Bereich der ERS-Szenen durchgeführt, da ein Eindruck von der großräumigen atmosphärischen Strukturen gewonnen werden soll.

Im Folgenden soll nun für mehrere Aufnahmezeitpunkte der Vergleich der atmosphärischen Phasenbilder mit den in situ Wetterdaten angestellt werden, dazu wird ein Satz von Bildern (vgl. Abb. 6.3 bis 6.6) verwendet, der immer gleich angeordnet ist. Oben-links befindet sich eine Aufnahme des sichtbaren Spektrums (a), auf der Deutschland mit Teilen seiner angrenzenden Staaten dargestellt ist. Dieses Bild soll einen großräumigen



(a) Darstellung der großräumigen Lage der ERS-Aufnahme

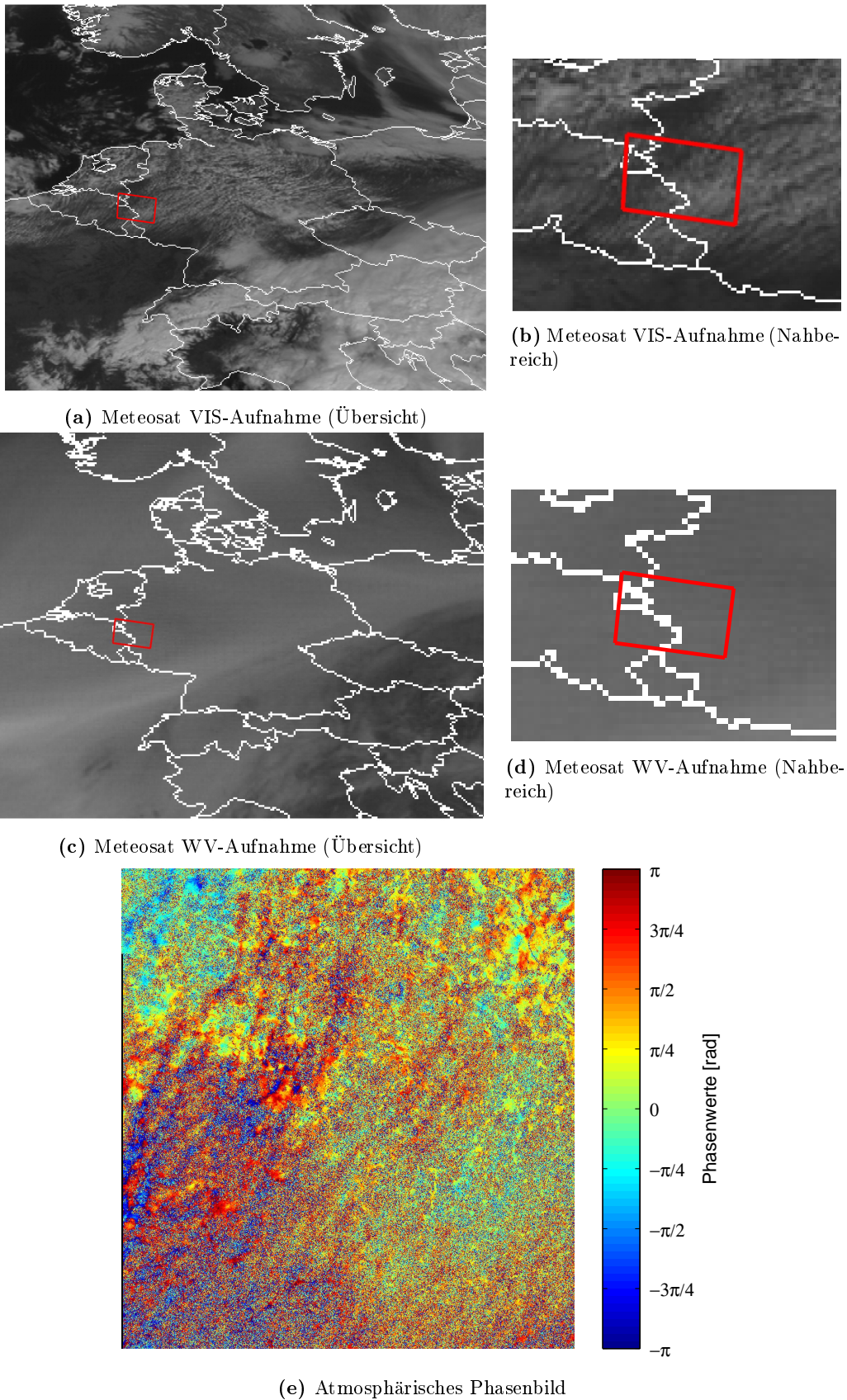
(b) Darstellung der kleinräumigen Lage der ERS-Aufnahme

**Abbildung 6.2:** Lage und Orientierung der ERS-Aufnahmen (schwarzer Kasten), die zur Berechnung der Interferogramme verwendet wurden

Eindruck von der Bewölkung geben. Daneben ist ein vergrößerter Ausschnitt im Bereich der ERS-Szenen zu sehen (b), welcher der Interpretation von Strukturen durch Bewölkung dienen soll. Darunter sind analog zwei Aufnahmen des Wasserdampfkanales positioniert, links die Übersicht (c) und rechts die Vergrößerung (d). Unterhalb dieser Bilder ist das zugehörige Ergebnis mit den atmosphärischen Phasenverschiebungen dargestellt (e). Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel 5 werden für den Vergleich nicht die SAR-Szenen aus der ERS-Tandem-Mission verwendet, abgesehen von der Aufnahme vom 02.04.1996. Für die nicht verwendeten Tandem-Szenen ist ein optischer Vergleich mit den Meteosat-Bildern nicht möglich. Stattdessen werden Aufnahmezeitpunkte herangezogen, die einen Zusammenhang zwischen den Phasenbildern und den Meteosat-Daten erkennen lassen.

Abbildung 6.3 zeigt einen solchen Bildsatz für die ERS-Szene vom 02.04.1996. Zunächst sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die Bilder 6.3c und 6.3d eine relativ homogene Verteilung des Wasserdampfs innerhalb des Aufnahmegebietes aufweisen. Aufgrund dessen ist kein Wasserdampf-Gradient ermittelbar und somit kann auch kein linearer Trend im Phasenbild der Wasserdampfverteilung zugeordnet werden, sodass in diesem Fall kein Beitrag zum Vergleich geliefert werden kann. Betrachtet man jedoch Abbildung 6.3a, zeichnet sich über Deutschland ein Teppich von streifenförmigen Wolken ab, der somit eine markante Struktur aufweist, die für einen Vergleich einen guten Ansatzpunkt liefert. Auch auf der Vergrößerung sind diese Strukturen ausreichend aufgelöst, weshalb diese den lokalen Phasenänderungen in Abbildung 6.3e zugeordnet werden können. Werden die Aufnahmen eingehender analysiert, so ist zu erkennen, dass der dunkelblaue Bereich in der südwestlichen Ecke des Phasenbilds stark mit der lockeren Bewölkung (dunklerer Bereich) an der entsprechenden Stelle in Abb. 6.3b korreliert. Aufgrund der dünner werdenden Bewölkung nimmt die Laufzeitverzögerung durch den sinkenden Wassergehalt in diesen ab, was die Änderung der Phasenwerte an jenen Stellen begründet. Wird der Verlauf der Wolkendecke außerhalb der nordwestlichen Ecke in das Gebiet hinein verfolgt, so ist durch eine optische Interpolation an den Pixeln, die durch die Ländergrenze verdeckt sind, zu erkennen, dass der Bewölkungsgrad dort wieder zunimmt. Dies führt zu der Annahme, dass die Änderungen der Phasenwerte an korrespondierender Stelle in Bild 6.3e durch die Änderung der Bewölkung hervorgerufen wird. Bei Betrachtung der grundlegenden Struktur des abgebildeten Wolkengebildes sind die streifenförmigen Fragmente auch im Phasenbild wiederzufinden. Zusammenfassend ist für diesen Bildsatz festzustellen, dass die Strukturen im atmosphärischen Phasenbild mit der Wolkenbedeckung zum Aufnahmezeitpunkt große Ähnlichkeiten aufweisen und somit das Interferogramm 6.3e den atmosphärischen Zustand zum Zeitpunkt der Aufnahme widerspiegelt.

Beim Bildsatz 6.4 vom 20.03.1993 verhält es sich genau entgegengesetzt. Hier ist auf den Aufnahmen 6.4a und



**Abbildung 6.3:** Meteosat-Aufnahmen des sichtbaren Spektralbereichs und des Wasserdampf-Absorptionskanals vom 02.04.1996, 10:30 Uhr mit dem zugehörigen atmosphärischen Phasenbild. Der roten Kasten entspricht dem Aufnahmegebiet der ERS-Szene.

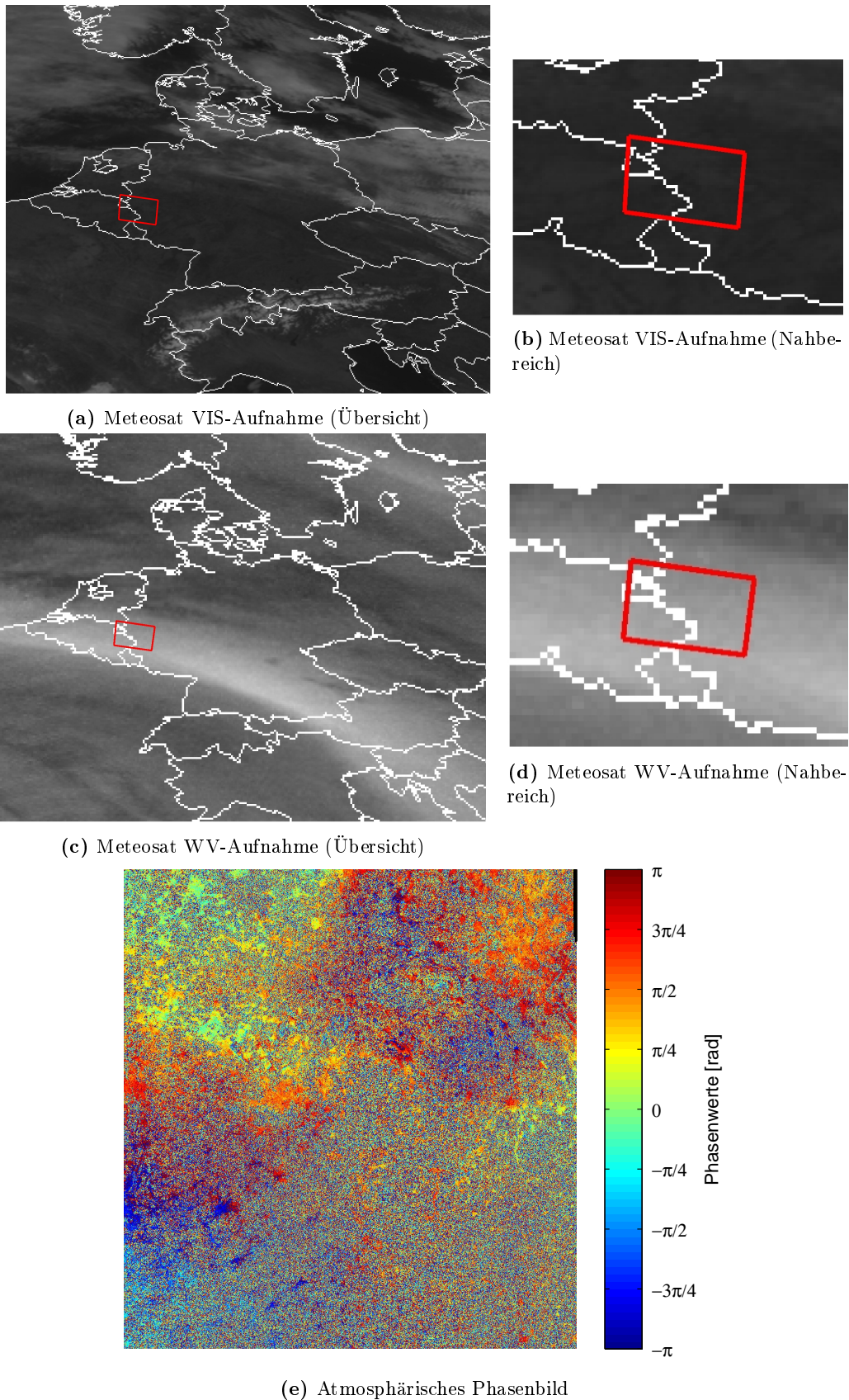
6.4b keine Bewölkung auszumachen, wodurch kein Vergleich auf Basis von markanten Strukturen möglich ist. Die Wasserdampfaufnahmen (Abb. 6.4c und 6.4d) deuten einen von Südwesten nach Nordosten verlaufenden Wasserdampfgradienten an. Unter Berücksichtigung der Umgebung (außerhalb des roten Kastens) ist dieser jedoch sehr viel deutlicher herausgestellt. Wie oben bereits ausgeführt, sollte eine solcher Gradient als linearer Trend im atmosphärischen Phasenbild zu beobachten sein. Hier zeichnet sich dieser Trend durch eine lineare Änderung der Farbwerte von Südwesten nach Nordosten ab. Aus Aufnahme 6.4c lässt sich ableiten, dass der Wasserdampfgehalt in der nordwestlichen Ecke der Aufnahme etwas niedriger ist, was sich in den niedrigeren Phasenwerten niederschlägt. Durch die geringe Auflösung des Wasserdampfkanals und dem hohen Rauschanteil im Phasenbild ist der Zusammenhang zwischen Atmosphäre und den Phasenverschiebungen nicht so prägnant wie im vorherigen Bildsatz 6.3. Allerdings lässt sich auch hier ein Zusammenhang zwischen den atmosphärischen Begebenheiten zum Aufnahmezeitpunkt und dem korrespondierenden Phasenbild ableiten.

Die folgenden Datensätze weisen ein hohes Rauschverhältnis auf, was die auswertbare Fläche für einen Vergleich stark reduziert. Dadurch ist eine Verknüpfung der Phasenwerte mit den atmosphärischen Aufnahmen nur bedingt möglich. Der anzustrebende Vergleich führt auch hier über die höher aufgelösten Bilder des sichtbaren Spektrums und die darauf abgebildeten Wolkenstrukturen.

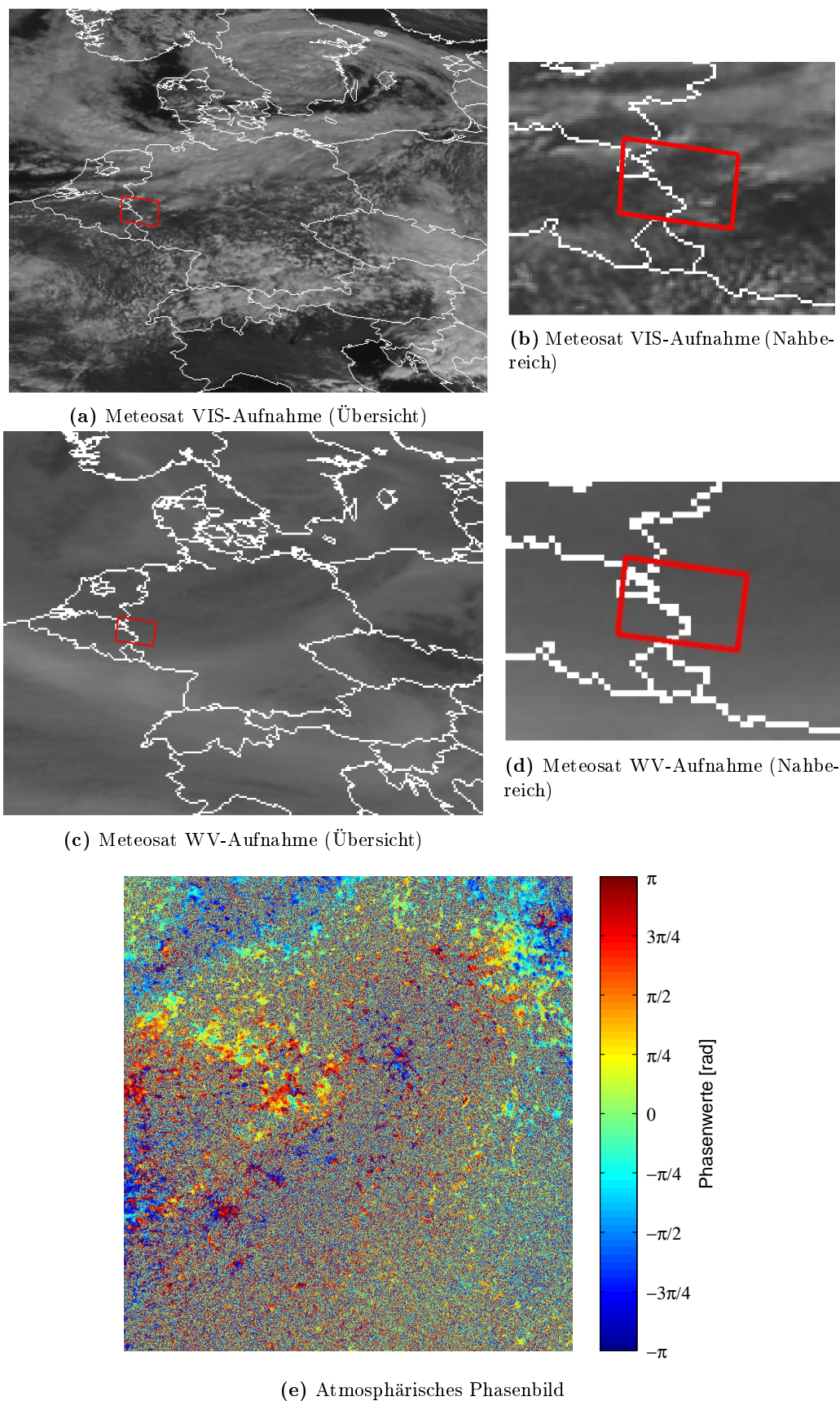
Das Wolkenfeld in Abbildung 6.5b ist in der nordöstlichen Ecke des roten Kastens und auch im nordwestlichen Bereich etwas dichter als im zentralen Gebiet der Aufnahme. Dies korrespondiert mit den niedrigen Phasenwerten in Bild 6.5e. Im Zentrum und in Richtung Südwesten wird die Wolkendecke lockerer, was zu Phasenänderungen in positiver Richtung führt. Dargestellt ist dieser Wechsel durch den Verlauf der Farbkodierung von den blauen Bereichen hin zu roten Farbwerten, die am Ende des Zyklus' wieder an blau anschließen. Die Form der weniger dichten Wolkendecke deutet sich im nördlichen Bereich des Phasenbild in Form eines Bogens von ähnlichen Farbwerten an.

Beim Vergleich des Wolkenfelds in Abbildung 6.6b mit dem Phasenbild 6.6e lassen sich an Stellen, an denen sich der Bewölkungsgrad stark ändert, an korrespondierender Stelle Phasenänderungen erkennen. Die Bewölkung ist durch kleinere Wolkenhaufen geprägt, was auf Stratocumulus oder Altocumulus hindeutet, die zu lokalen Phasenänderungen führen, wie sie in in im Phasenbild zu erkennen sind.

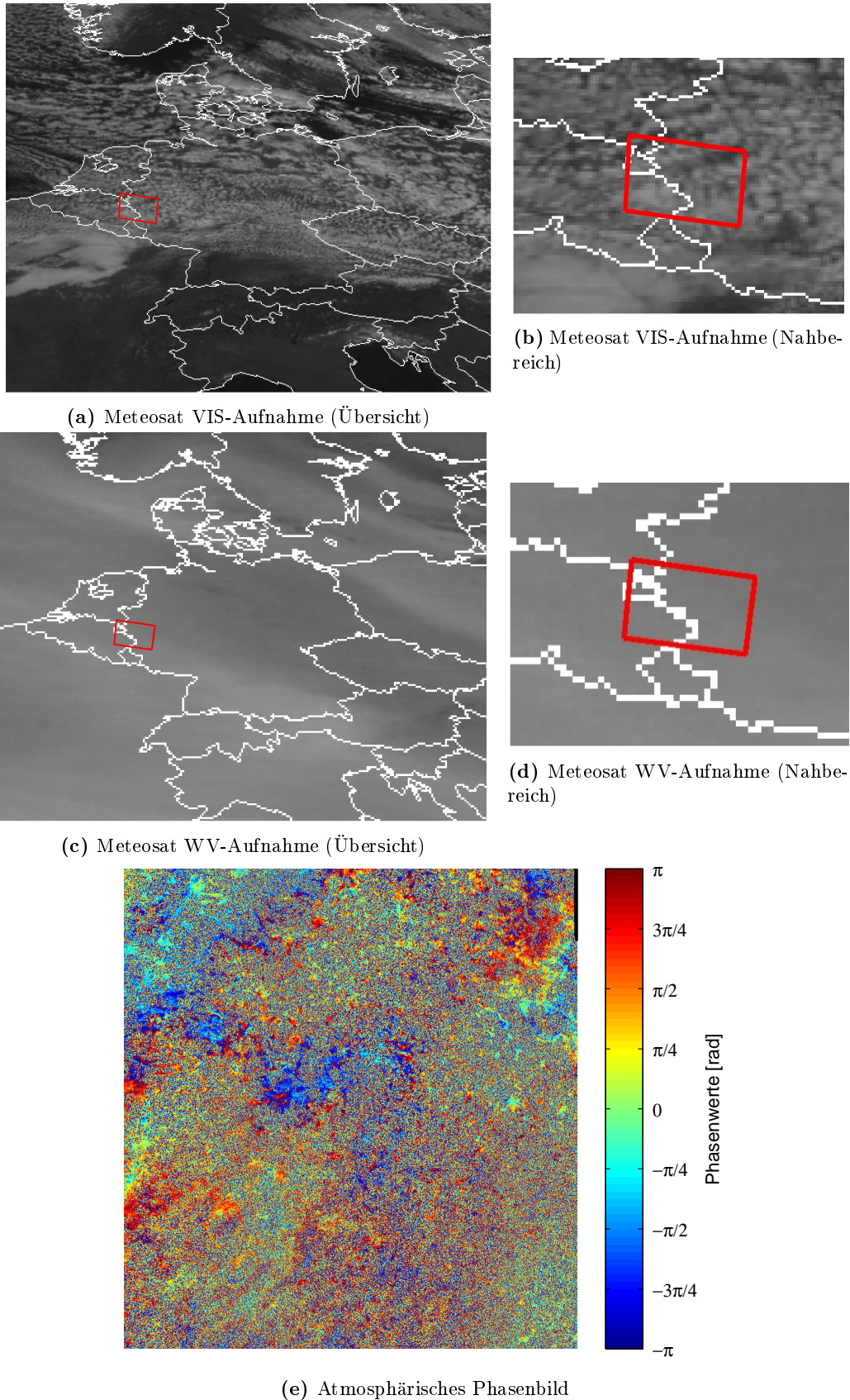
Abschließend kann gesagt werden, dass der Vergleich durch die geringe Auflösung der Meteosat-Daten und dem hohen Rauschanteil der atmosphärischen Phasenbilder, sehr erschwert wird, da nur wenige Bereiche vorhanden sind, die zu einem Vergleich herangezogen werden können. Eine Ausnahme stellt der Bildsatz 6.3 dar, bei dem eine Übereinstimmung deutlicher zu sehen ist, als in den anderen Datensätzen. Dennoch können Zusammenhänge zwischen den Phasenbildern und den in situ Wetterdaten hergestellt werden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die mit dem Verfahren nach SCHÄFER (2012) erzeugten Ergebnisse die Phasenverschiebungen wiedergeben, die durch die Atmosphäre zum Aufnahmezeitpunkt der ERS-Szenen bedingt sind.



**Abbildung 6.4:** Meteosat-Aufnahmen des sichtbaren Spektralbereichs und des Wasserdampf-Absorptionskanals vom 20.03.1993, 10:30 Uhr mit dem zugehörigen atmosphärischen Phasenbild. Der roten Kasten entspricht dem Aufnahmegebiet der ERS-Szene.



**Abbildung 6.5:** Meteosat-Aufnahmen des sichtbaren Spektralbereichs und des Wasserdampf-Absorptionskanals vom 04.09.1995, 10:30 Uhr mit dem zugehörigen atmosphärischen Phasenbild. Der roten Kasten entspricht dem Aufnahmegebiet der ERS-Szene.



**Abbildung 6.6:** Meteosat-Aufnahmen des sichtbaren Spektralbereichs und des Wasserdampf-Absorptionskanals vom 09.09.1997, 10:30 Uhr mit dem zugehörigen atmosphärischen Phasenbild. Der roten Kasten entspricht dem Aufnahmegebiet der ERS-Szene.



# 7. Schlussbemerkungen

## 7.1 Fazit

Die Ermittlung des atmosphärischen Phasenanteils in interferometrischen SAR-Daten ist durch das hier vorgestellte Stacking-Verfahren von SCHÄFER (2012) für die vorliegenden Daten möglich. Das Verfahren besitzt den großen Vorteil, dass es nicht auf externe Daten angewiesen ist. Gerade die Eigenschaften der externen Daten schränken andere Verfahren zur Bestimmung bzw. Reduzierung des atmosphärischen Phasenanteils stark ein. So führt bei den meisten Verfahren die weitaus niedrigere, räumliche Auflösung der Daten dazu, dass nur grobe Trends aus den Interferogrammen entfernt werden können. Oftmals gibt es ein Abstand zwischen dem Zeitpunkt, zu dem die Daten verfügbar sind, und dem Aufnahmezeitpunkt einer ERS-Szene. In diesem Zeitraum kann sich die Atmosphäre unter Umständen stark ändern, was die Zuverlässigkeit der Verfahren einschränkt (vgl. Kap. 3). Da das Verfahren von SCHÄFER (2012) den atmosphärischen Phasenanteil mit den Interferogrammen selbst bestimmt, hat das Ergebnis die gleiche räumliche Auflösung und liegt exakt für den Aufnahmezeitpunkt vor. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Phasenmehrdeutigkeiten nicht gelöst werden müssen, wodurch ein Genauigkeitsverlust durch die Phasenabwicklung nicht gegeben ist (vgl. Kap. 4).

Da das Verfahren auf der Mittelbildung eines Stacks von Interferogrammen, deren Phasen mehrdeutig sind und in einem Bereich von  $-\pi, \dots, \pi$  liegen, müssen zwei grundlegende Dinge gegeben sein: Zum einen ein Verfahren zur Mittelbildung, das mit den Mehrdeutigkeiten umgehen kann, und die Referenzierung aller Interferogramme auf einen Phasenwert. Ersteres ist mit dem von SCHÄFER (2012) entwickelten zeitlichen Mittel (vgl. Kap. 4.2.1) leicht umzusetzen; der zweite Punkt ist durch verschiedene Vorgehensweisen lösbar, die zu Ergebnissen mit unterschiedlicher Genauigkeit führen (vgl. Kap. 5.2). Die Unterteilung des Bildstapels in rechteckige Kacheln, die sich zur Hälfte in Höhe und Breite überlappen, hat sich als beste Methode für die Referenzierung herausgestellt. Sie erfordert jedoch einen Ausgleich, nachdem der atmosphärische Phasenanteil in den Kachelstacks bestimmt wurde (vgl. Kap. 4.1). Werden zur Berechnung der Pseudobeobachtungen und ihrer Varianzen nur solche Pixel verwendet, die eine langzeitstabiles Rückstreuverhalten aufweisen, lässt sich auch an dieser Stelle die Genauigkeit steigern. Für die Wahl dieser Pixel kann ein Kohärenzbild verwendet werden (vgl. Kap. 4.1.2).

Zur Validierung der Ergebnisse, welche die implementierte Umsetzung des Verfahrens von SCHÄFER (2012) für die gegebenen DInSAR-Bilder liefert, wurden zwei Wege gewählt. Zum einen wurde versucht aus den berechneten, atmosphärischen Phasenbildern die differentiellen Interferogramme zu rekonstruieren und zum anderen wurde ein Vergleich mit in situ Wetterdaten durchgeführt. Bei der Rekonstruktion zeigt sich einerseits, dass das Rauschen in den Rekonstruktionen in der Regel höher ist als im Original, andererseits führt die fehlende Maskierung der Deformationsgebiete zu Abweichungen in diesen Bereichen. In Regionen, in denen die Dichte und Anzahl von phasenstabilen Gitterzellen höher sind und in denen es keine Deformationen gibt (z.B. dem Stadtgebiet von Köln), stimmen die rekonstruierten und originären Interferogramme besser überein. Das Differenzbild von Rekonstruktion und gegebenen DInSAR-Bild weist an diesen Stellen Phasenwerte nahe Null auf (vgl. Kap. 5.3).

Für den Vergleich mit in situ Wetterdaten wurden optische Daten des meteorologischen Satelliten Meteosat der Organisation EUMETSAT verwendet. Diese weisen im Vergleich zu den differentiellen SAR-Interferogrammen zwar eine relativ geringe räumliche Auflösung auf, liegen im Gegensatz zu anderen Wetterdaten allerdings flächenhaft vor. Von Vorteil ist außerdem, dass die Aufnahmezeitpunkte auf wenige Sekunden mit denen der SAR-Szenen übereinstimmen und somit auch mit den atmosphärischen Phasenbildern. Dies erhöht die Vergleichbarkeit, da angenommen werden kann, dass die abgebildeten, atmosphärischen Begebenheiten mit denen während der Aufnahme übereinstimmen. Es konnten Übereinstimmungen der Phasenbilder

sowohl mit der Bewölkung als auch mit der Wasserdampfverteilung festgestellt werden (vgl. Kap. 6). Allerdings ist dieser ausschließlich optische Vergleich rein subjektiv. Für eine bessere unabhängige Kontrolle wäre ein quantitativer Vergleich vorzuziehen gewesen, welcher durch das Fehlen von geeigneten Daten nicht durchführbar war.

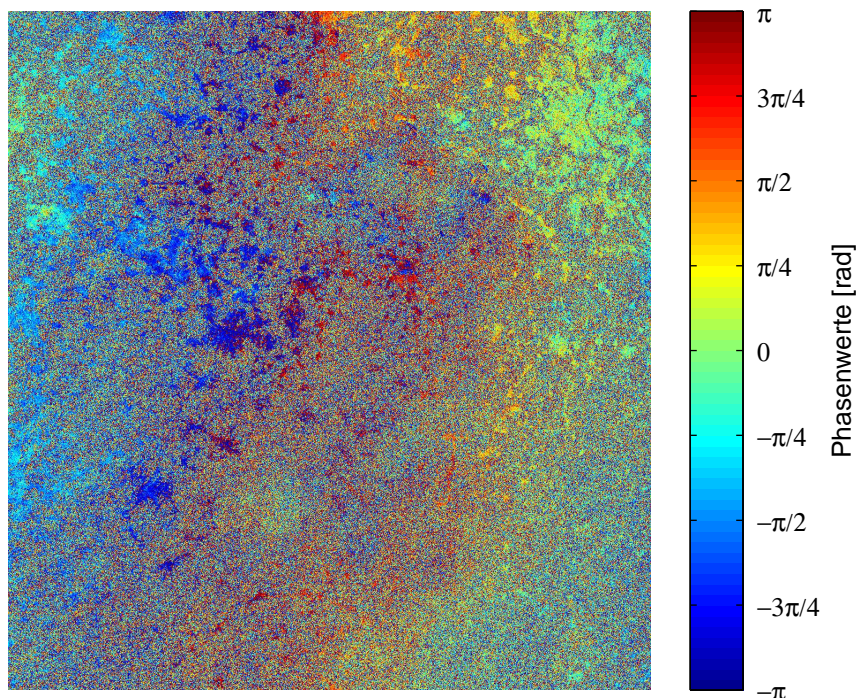
## 7.2 Ausblick

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, weist das Verfahren in Deformationsgebieten Abweichungen auf. Für die Verbesserung der Ergebnisse muss die beschriebene Methode insoweit verfeinert werden, dass Deformationsgebiete ausmaskiert werden können. Des Weiteren sollten noch weitere Untersuchungen bezüglich der Referenzierung der Interferogramme im Stack angestellt werden. So ist es vorstellbar das Kohärenzbild auch für die Berechnung der Referenzwerte zu verwenden.

Zur weiteren Überprüfung der Ergebnisse sollte ein zweites unabhängiges Verfahren zur Ermittlung der atmosphärischen Phasenverschiebungen umgesetzt werden. Sollte dieses die hier gewonnen Ergebnisse bestätigen, ist es denkbar, die Resultate beider Methoden miteinander zu verknüpfen und somit eine Verbesserung zu erzielen.

Unabhängig davon müssen die erstellten atmosphärischen Phasenbilder in der Weise aufgearbeitet werden, dass sie zur Korrektur der SAR-Szenen oder der Interferogramme verwendet werden können. SCHÄFER (2012, S. 73) erläutert eine mögliche Vorgehensweise zur Reduzierung der atmosphärischen Anteile in den SLC- (*Single-Look-Complex*-)Daten.

Einige der Differenzbilder weisen Phasenwerte auf die deutlich von Null abweichen, diese Abweichungen treten in der Regel als linearer Trend auf, wie in Abbildung 7.1 zu erkennen ist. Der Trend in den Differenzphasen verläuft in diesem Fall von Osten nach Westen. Die Herkunft dieser Abweichungen ist noch näher zu untersuchen.



**Abbildung 7.1:** Differenzbild des originalen und rekonstruierten Interferogramms der SAR-Szenen vom 04.09.1995 und 01.04.1996. Die Differenzphasen weisen einen linearen Trend von Ost nach West auf.

# A. Bezeichnungen

## Allgemeines

$I_{T-t_i}$	Differentielles Interferogramm mit den Aufnahmezeitpunkten der Slaveszene $T$ und der Masterszene $t_i$
$N$	Anzahl der differentiellen Interferogramme im Stack
$\varphi$	Phasenwinkel eines Interferogramms im Wertebereich $W_\varphi$
$\psi$	Mittlerer Phasenwinkel nach SCHÄFER (2012)
$W_\varphi$	Wertebereich der interferometrischen Phasenwinkel von $-\pi, \dots, \pi$
$\phi$	Um den Phasenmittelwert $\psi$ verteilte Phasenwinkel im Wertebereich $W_\phi$
$W_\phi$	Wertebereich der Phasenwinkel von $\psi - \pi, \dots, \psi + \pi$
$W_{\varsigma_P}$	Wertebereich der Phasenähnlichkeit von $0, \dots, 1$
$\varsigma_P$	Phasenähnlichkeit im Wertebereich $W_{\varsigma_P}$
#	Anzahl

## Zufallszahlen

$\mathcal{L}$	Zufallsvektor der Beobachtungen
$\Sigma\{\mathcal{L}\}$	Kovarianzmatrix der Beobachtungen

## Matrizen und Vektoren

$x, \alpha$	Skalar
$\mathbf{x}$	Parametervektor
$\tilde{\mathbf{x}}$	ausgeglichener Parametervektor
$\ell$	Beobachtungsvektor
$\mathbf{A}$	Designmatrix
$\mathbf{F}_{[b \times u]}$	Matrix der Dimension $b \times u$

## B. Abkürzungen

ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar (Radarsensor an Bord des Umwelt-Satelliten Envisat)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (Satellitengestützter, multispektraler Fernerkundungssensor der NOAA)
DHM	Digitales Höhenmodell
DInSAR	Differentielle SAR Interferometrie
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (siehe EZMW)
Envisat	Environmental Satellite (Umweltsatellit der ESA)
ERS-1/ERS-2	European Remote Sensing Satellite 1 und 2 (Fernerkundungssatellit der ESA mit SAR-Sensor)
ESA	European Space Agency (Europäische Weltraumbehörde)
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (Europäische Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten mit Sitz in Darmstadt)
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (engl. ECMWF)
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem (engl. Global Navigation Satellite System)
GPS	Globales Positionierungssystem (engl. Global Positioning System)
InSAR	SAR Interferometrie
LOS	Line-of-Sight (Blickrichtung des Sensors)
MERIS	Medium Range Imaging Spectrometer (Bildgebendes Spektrometer mit mittlerer Auflösung an Bord des Umweltsatelliten Envisat)
METEOSAT	Meteorological satellite (Wettersatellit, betrieben von EUMETSAT)
MFG	METEOSAT First Generation (erste Generation von METEOSAT)
MVIRI	Meteosat Visible and Infrared Imager (3-Band Radiometer an Bord der MFG-Satelliten)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Wetter- und Ozeanografiebehörde der Vereinigten Staaten)
pel	Pixel
PSI	Permanent Scatterer Interferometrie (SAR-Interferometrie mit langzeitstabilen Streuern)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar mit synthetischer Apertur)
TID	Traveling Ionospheric Disturbances (Wandernde Ionosphärische Störungen)

## C. Funktionen

Im Folgenden sind die Funktionen beschrieben, welche für die Algorithmen benötigt werden, die in Kapitel 4.1 vorgestellt wurden.

Die Funktion MITTEL\_NACH\_SCHÄFER setzt für ein dreidimensionales Array das in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Verfahren zur Mittelbildung nach SCHÄFER (2012) um. Vor der pixelweisen Mittelbildung entlang der dritten Dimension wird jede Matrix im Stapel um ihren Mittelwert reduziert (vgl. Kap. 4.1):

**Syntax:**  $\mathbf{M} = \text{MITTEL\_NACH\_SCHÄFER}(\mathbf{A})$

---

**Funktion I** Mittelbildung eines Stacks nach SCHÄFER (2012)

---

**Input:**

$\mathbf{A}_{[n \times m \times h]}$  ... Dreidimensionales Array von Phasenwerten

**Output:**

$\mathbf{M}_{[n \times m]}$  ... Matrix mit den Phasenmittelwerten

```

1: function MITTEL_NACH_SCHÄFER(A)
2:     h = size(A, 3); ▷ Höhe des Stacks
3:     // Reduktion der Matrizen im Stapel um ihren Phasenmittelwert
4:     for i = 1 : h do
5:         phasenmittel = MITTEL_MATRIX(A(:, :, i));
6:         A(:, :, i) = A(:, :, i) - phasenmittel;
7:     end for

8:     // Berechnung der zu den Phasenwerten korrespondierenden kartesischen Koordinaten
9:     // und eintragsweise Mittelbildung entlang der dritten Dimension
10:    X̄ = mean(cos(A), 3);
11:    Ȳ = mean(sin(A), 3);
12:    return M = atan2(Ȳ, X̄);
13: end function

```

---

Die Funktion VARIANZ\_NACH\_SCHÄFER berechnet die Varianz der nach Funktion I bestimmten Mittelwerte:

**Syntax:**  $\mathbf{V} = \text{VARIANZ\_NACH\_SCHÄFER}(\mathbf{A}, \mathbf{M})$

---

**Funktion II** Varianz der mittleren Phasenwerte nach SCHÄFER (2012)

---

**Input:**

$\mathbf{A}_{[n \times m \times h]}$  ... Dreidimensionales Array von Phasenwerten

$\mathbf{M}_{[n \times m]}$  ... Matrix mit den Phasenmittelwerten

**Output:**

$\mathbf{V}_{[n \times m]}$  ... Matrix mit den Varianzen der Phasenmittelwerte

```

1: function VARIANZ_NACH_SCHÄFER(A,M)
2:     h = size(A, 3); ▷ Höhe des Stacks
3:     // Reduktion des Stapels A um einen Stapel bestehend aus der Mittelwertmatrix M
4:     A = A - repmat(M, [1, 1, h]);
5:     // Phasenwerte in den Wertebereich  $W_\varphi$  bringen
6:     A(A < -π) = A(A < -π) + 2 * π;
7:     A(A > π) = A(A > π) - 2 * π;
8:     return V = sum(A.^2, 3)/(h - 1);
9: end function

```

---

Die Hilfsfunktion `MITTEL_MATRIX` dient zur Berechnung des Phasenmittelwertes aus den Matrixeinträgen unter Verwendung der Methode nach SCHÄFER (2012):

**Syntax:** `phasenmittel = MITTEL_MATRIX(A)`

---

**Funktion III** Phasenmittelwert aus einer Referenzfläche nach SCHÄFER (2012)

---

**Input:**

$\mathbf{A}_{[n \times m]}$  ... Matrix mit den Phasenwerten

**Output:**

`phasenmittel` ... der Phasenmittelwert

```

1: function MITTEL_MATRIX(A)
2:    $\bar{x} = \text{mean}(\cos(\mathbf{A}(:)));$ 
3:    $\bar{y} = \text{mean}(\sin(\mathbf{A}(:)));$ 
4:   return phasenmittel =  $\text{atan2}(\bar{y}, \bar{x});$ 
5: end function

```

---

Die Funktion `COMPUTE_L` berechnet die Pseudobeobachtungen aus den Überlappungsbereichen der Kacheln, die über einen Übergabeparameter definiert werden. Dabei werden nur Phasenwerte benutzt die einen hohen Kohärenzwert haben:

**Syntax:**  `$\ell = \text{COMPUTE\_L}(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \text{Kohaerenz}, fall)$`

---

**Funktion IV** Berechnung der Pseudobeobachtungen

---

**Input:**

$\mathbf{K1}_{[h \times b]}$  ... Matrix mit Phasenmittelwerten der ersten Kachel

$\mathbf{K2}_{[h \times b]}$  ... Matrix mit Phasenmittelwerten der zweiten Kachel

$\text{Kohaerenz}_{[h \times b]}$  ... Matrix mit Kohärenzwerten, lageidentisch mit der ersten Kachel

`fall` ... Parameter, der die Lage des Überlappungsbereichs festlegt

**Output:**

$\ell$  ... Pseudobeobachtung

```

1: function COMPUTE_L(K1, K2, Kohaerenz, fall)
2:   // Festlegung der Überlappungsbereiche
3:   [ $\mathbf{K1}$ ,  $\mathbf{K2}$ ,  $\text{Kohaerenz}$ ] = GET_OVERLAY_AREA( $\mathbf{K1}$ ,  $\mathbf{K2}$ ,  $\text{Kohaerenz}$ , fall)

4:   // Finden von min. 20 Pixeln, welche die höchsten Kohärenzwerte besitzen
5:   ind = GET_MAX_COHERENCY( $\text{Kohaerenz}$ )

6:   // Pseudobeobachtung berechnen
7:    $\ell = \text{mean}(\mathbf{K1}(\text{ind})) - \text{mean}(\mathbf{K2}(\text{ind}));$ 

8:   // Pseudobeobachtung in den Wertebereich  $W_\varphi$  bringen
9:   if  $\ell < -\pi$  then
10:      $\ell = \ell + 2 * \pi;$ 
11:   else if  $\ell > \pi$  then
12:      $\ell = \ell - 2 * \pi;$ 
13:   end if

14:   return  $\ell;$ 
15: end function

```

---

Die Funktion `COMPUTE_Q_LL` berechnet die Varianz der Pseudobeobachtung, die als Diagonaleintrag in der Kofaktormatrix und damit in das stochastische Modell eingehen:

**Syntax:**  $\sigma_\ell^2 = \text{COMPUTE\_Q\_LL}(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \text{Kohaerenz}, fall)$

---

#### Funktion V Berechnung der Varianz einer Pseudobeobachtung

---

##### Input:

**K1**<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit Varianzen der Phasenmittelwerte der ersten Kachel  
**K2**<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit Varianzen der Phasenmittelwerte der zweiten Kachel  
**Kohaerenz**<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit Kohärenzwerten, lageidentisch mit der ersten Kachel  
*fall* ... Parameter, der die Lage des Überlappungsbereichs festlegt

##### Output:

$\sigma_\ell^2$  ... Varianz der Pseudobeobachtung

```

1: function COMPUTE_Q_LL(K1, K2, Kohaerenz, fall)
2:   // Festlegung der Überlappungsbereiche
3:   [K1, K2, Kohaerenz] = GET_OVERLAY_AREA(K1, K2, Kohaerenz, fall)

4:   // Finden von min. 20 Pixeln, welche die höchsten Kohärenzwerte besitzen
5:   ind = GET_MAX_COHERENCY(Kohaerenz)

6:   // Varianz der Pseudobeobachtung nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz berechnen
7:    $\sigma_1^2 = \text{sum}(\mathbf{K1}(ind)) / (\text{numel}(\mathbf{K1}(ind)))^2;$            ▷ Varianz des Phasenmittelwerts von Kachel 1
8:    $\sigma_2^2 = \text{sum}(\mathbf{K2}(ind)) / (\text{numel}(\mathbf{K2}(ind)))^2;$            ▷ Varianz des Phasenmittelwerts von Kachel 2
9:    $\sigma_\ell^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$                                  ▷ Varianz der Differenz der Phasenmittelwerte

10:  return  $\sigma_\ell^2$ ;
11: end function

```

---

Die folgende Hilfsfunktion `GET_OVERLAY_AREA` gibt die Teilmatrizen zweier Kacheln zurück, die im Überlappungsbereich liegen. Außerdem werden auch die Kohärenzwerte in diesem Bereich ausgeschnitten. Diese Submatrizen werden zur Berechnung der Pseudobeobachtungen und ihrer Varianz benötigt:

**Syntax:** `[K1, K2, Kohaerenz] = GET_OVERLAY_AREA(K1, K2, Kohaerenz, fall)`

---

#### Funktion VI Überlappungsbereich zweier Kacheln (Teil 1)

---

##### Input:

**K1**<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit den Phasenmittelwerten oder Varianzen der ersten Kachel  
**K2**<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit den Phasenmittelwerten oder Varianzen der zweiten Kachel  
**Kohaerenz**<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit Kohärenzwerten, lageidentisch mit der ersten Kachel  
*fall* ... Parameter, der die Lage des Überlappungsbereichs festlegt

##### Output:

**K1** ... Teilmatrix von **K1** im Überlappungsbereich  
**K2** ... Teilmatrix von **K2** im Überlappungsbereich  
**Kohaerenz** ... Teilmatrix von **Kohaerenz** im Überlappungsbereich

```

1: function GET_OVERLAY_AREA(K1, K2, Kohaerenz, fall)
2:   [h, b] = size(K1);           ▷ Dimensionen der übergebenen Matrizen
3:   // Festlegung der Überlappungsbereiche
4:   if fall == 1 then           ▷ Überlappung mit linker Kachel
5:     K1 = K1(:, 1 : b/2);
6:     K2 = K2(:, b/2 + 1 : end);
7:     Kohaerenz = Kohaerenz(:, 1 : b/2);           ▷ Fortsetzung auf nächster Seite!

```

---

---

**Funktion VII** Überlappungsbereich zweier Kacheln (Teil 2)

---

```

8:   else if fall == 2 then                                     ▷ Überlappung mit oberer Kachel
9:       K1 = K1(1 : h/2, :);
10:      K2 = K2(h/2 + 1 : end, :);
11:      Kohaerenz = Kohaerenz(1 : h/2, :);
12:   else if fall == 3 then                                     ▷ Überlappung mit oberer, rechten Kachel
13:       K1 = K1(1 : h/2, b/2 + 1 : end);
14:       K2 = K2(h/2 + 1 : end, 1 : b/2);
15:       Kohaerenz = Kohaerenz(1 : h/2, b/2 + 1 : end);
16:   else if fall == 4 then                                     ▷ Überlappung mit oberer, linken Kachel
17:       K1 = K1(1 : h/2, 1 : b/2);
18:       K1 = K2(h/2 + 1 : end, b/2 + 1 : end);
19:       Kohaerenz = Kohaerenz(1 : h/2, 1 : b/2);
20:   end if
21:   return Ueberlappungsbereiche[K1, K2, Kohaerenz];
22: end function

```

---

Da für die Berechnung der Pseudobeobachtungen sowie ihrer Varianzen nur Pixel mit hoher Kohärenz herangezogen werden, liefert die Funktion `GET_MAX_COHERENCY` die Indizes Pixel mit den höchsten Kohärenzwerten. Dabei soll das Subset aus einer festzulegenden Mindestanzahl von Pixeln bestehen. Wird keine Anzahl übergeben, so werden mindestens 20 Pixel gesucht:

**Syntax:**     `ind = GET_MAX_COHERENCY(Kohaerenz, p)`

---

**Funktion VIII** Finden der Pixel mit den höchsten Kohärenzwerten

---

**Input:**

**Kohaerenz**<sub>[*h*×*b*]</sub> ... Matrix mit Kohärenzwerten  
*p* ... (optional) # der Pixel, aus denen das Subset bestehen soll (Default: *p*=20)

**Output:**

**ind** ... Vektor mit den Indizes der Pixel mit den größten Kohärenzwerten

```

1: function GET_MAX_COHERENCY(Kohaerenz, p)
2:   // Finden von min. p Pixeln, welche die höchsten Kohärenzwerte besitzen
3:   wenn kein Input für p, dann setze p = 20
4:   k = 1;
5:   ind = [];
6:   while length(ind) < p do
7:       ind = find(Kohaerenz > k*max(Kohaerenz(:)));
8:       k = k - 0,01;
9:   end while
10:  return Indizes ind;
11: end function

```

---



Die Funktion `FILL_LINE_OF_A` besetzt die übergebene Zeile der Designmatrix entsprechend dem funktionalen Modell mit den Einträgen 1 und -1. Die korrekten Spaltennummern können aus den Indizes der Kacheln, für die die Pseudobeobachtung berechnet werden soll, und der maximalen Anzahl der Kacheln pro Zeile ermittelt werden:

**Syntax:** `zeile = FILL_LINE_OF_A(zeile, index_K1, index_K2, c_max)`

---

**Funktion IX** Zeile der Designmatrix mit partiellen Ableitungen besetzen

---

**Input:**

`zeile`<sub>[1×m]</sub> ... Zeile m der Designmatrix  
`index_K1`<sub>[1×2]</sub> ... Zeilen- und Spaltenindex der ersten Kachel  
`index_K2`<sub>[1×2]</sub> ... Zeilen- und Spaltenindex der zweiten Kachel  
`c_max` ... Maximale Anzahl der Kacheln pro Zeile

**Output:**

`zeile`<sub>[1×m]</sub> ... Besetzte Zeile der Designmatrix

```

1: function FILL_LINE_OF_A(zeile, index_K1, index_K2, c_max)
2:   // Da unter Zwang ausgeglichen werden soll, wird der Mittelwert der Kachel(1,1) auf Null gesetzt,
3:   // daher darf in diesem Fall keine -1 gesetzt werden
4:   if index_K2(1) ≠ 1 or index_K2(2) ≠ 1 then
5:     // Berechnung des Spaltenindex für den Eintrag -1
6:     minus = c_max * (index_K2(1) - 1) + index_K2(2) - 1;
7:     zeile(minus) = -1;
8:   end if
9:   // Berechnung des Spaltenindex für den Eintrag +1
10:  plus = c_max * (index_K1(1) - 1) + index_K1(2) - 1;
11:  zeile(plus) = +1;
12:  return zeile;
13: end function

```

---

Der Ausgleich in Kapitel 4.1.1 liefert die Phasenreferenzwerte der gemittelten Kacheln. Mit diesen Referenzwerte können alle Phasenwerte der zugehörigen Kachel korrigiert werden, sodass diese in den Überlappungsbereichen wieder zusammenpassen und zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden können. Die Funktion `APPLY_XS` führt die Korrektur für die übergebene Kachel durch:

**Syntax:** `M = APPLY_XS(M, x̃)`

---

**Funktion X** Korrektur der Phasenwerte einer Kachel mit dem ausgeglichenen Referenzphasenwert

---

**Input:**

`M`<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit Phasenmittelwerten  
`x̃` ... ausgeglichener Phasenreferenzwert für die Korrektur

**Output:**

`M`<sub>[h×b]</sub> ... Matrix mit korrigierten Phasenmittelwerten

```

1: function APPLY_XS(M, x̃)
2:   M = M - x̃;
3:   M(M < -π) = M(M < -π) + 2π;
4:   M(M > π) = M(M > π) - 2π;
5:   return M;
6: end function

```

---

Für die Berechnung der pixelbasierten Kohärenz muss aus einem Stapeln mit den Interferogrammen ein Phasenähnlichkeitsbild berechnet werden, wobei bei jedem Interferogramm der Zeitpunkt  $T$  als Slave- oder Masterszene verwendet wurde. Diese Aufgabe setzt die Funktion `COMPUTE_PHASE_SIMILARITY_IMAGE` um. Dafür wird das von SCHÄFER (2012) vorgestellte Verfahren zur Ermittlung der Phasenähnlichkeit genutzt:

**Syntax:**  $\mathbf{I} = \text{COMPUTE\_PHASE\_SIMILARITY\_IMAGE}(\mathbf{S})$

---

**Funktion XI** Berechnung des Phasenähnlichkeitsbild nach SCHÄFER (2012) (Teil 1)

---

**Input:**

$\mathbf{S}_{[h \times b \times n]}$  ... Bildstapel mit  $n$  Interferogrammen, wobei der Zeitpunkt  $T$  als Slave oder Master verwendet wurde

**Output:**

$\mathbf{I}_{[h \times b]}$  ... Phasenähnlichkeitsbild

```

1: function COMPUTE_PHASE_SIMILARITY_IMAGE(S)
2:   // Kachelbildung
3:    $r = \#$  der Kacheln pro Zeile;
4:    $c = \#$  der Kacheln pro Spalte;
5:   unterteile  $\mathbf{S}$  in  $r \times c$  Kacheln;
6:   for  $i = 1 : r$  do
7:     for  $j = 1 : c$  do
8:        $n = \text{size}(\text{Kachel}(i, j, :), 3)$ ; ▷ Höhe des Kachelstacks
9:       // Reduktion der Matrizen im Stapel um ihren Phasenmittelwert
10:      for  $k = 1 : n$  do
11:         $\text{phasenmittel} = \text{MITTEL\_MATRIX}(\mathbf{S}(:, :, i))$ ;
12:         $\mathbf{S}(:, :, i) = \mathbf{S}(:, :, i) - \text{phasenmittel}$ ;
13:      end for
14:       $\bar{\mathbf{X}} = \text{mean}(\cos(\mathbf{S}), 3)$ ;
15:       $\bar{\mathbf{Y}} = \text{mean}(\sin(\mathbf{S}), 3)$ ;
16:      // Phasenähnlichkeit über die Norm der mittleren Koordinaten
17:       $\text{Sim}(i, j) = \text{sqrt}(\bar{\mathbf{X}}.^2 + \bar{\mathbf{Y}}.^2)$ ;
18:    end for
19:  end for
20:  Setze die Kacheln  $\text{Sim}(i, j)$  zum Phasenähnlichkeitsbild  $\mathbf{I}$  zusammen;
21:  return  $\mathbf{I}$ ;
22: end function

```

---

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Produktinformationen der ERS-Szene vom 02.04.1996 . . . . .	5
2.2	Luftbild von Teilen des Aufnahmegebiets . . . . .	6
3.1	Prinzipiskizze des SNELLIUS'sche Brechungsgesetz . . . . .	8
3.2	Einfluss der Radarfrequenz auf die Brechzahl der Ionosphäre in Abhängigkeit der Elektronendichte (aus SCHÄFER 2012, S. 31). . . . .	10
4.1	Ablaufschema der Bestimmung eines atmosphärischen Phasenbild nach dem Verfahren von SCHÄFER (2012) . . . . .	15
4.2	Unterteilung in Kacheln mit Überlappungsbereichen . . . . .	18
4.3	Pseudobeobachtungen zwischen Phasenreferenzwerten . . . . .	22
4.4	Mittelwertbildung zweier Phasenwerte . . . . .	25
5.1	Bild der pixelbasierten Kohärenz für die gegebenen SAR-Interferogramme . . . . .	30
5.2	Luftbild von Teilen des Aufnahmegebietes . . . . .	31
5.3	Atmosphärische Phasenbilder der SAR-Szene vom 01.04.1996 bei Verwendung eines Referenzpixels oder einer Referenzfläche . . . . .	32
5.4	Rekonstruktion von differentiellen Interferogrammen aus der ERS-Tandem-Mission . . . . .	34
5.5	Atmosphärische Phasenbilder mit und ohne Verwendung der Tandem-Mission-Aufnahmen . . . . .	35
5.6	Ermittlung von Deformationsgebieten aus den atmosphärischen Phasenbildern vom 09.05.1992 bis 11.06.1996 . . . . .	36
6.1	Meteosat-Aufnahmen der drei Spektralkanäle vom 02.04.1996, 10:30 Uhr . . . . .	38
6.2	Lage und Orientierung der ERS-Aufnahmen (schwarzer Kasten), die zur Berechnung der Interferogramme verwendet wurden . . . . .	39
6.3	Meteosat-Aufnahmen und atmosphärisches Phasenbild vom 02.04.1996 . . . . .	40
6.4	Meteosat-Aufnahmen und atmosphärisches Phasenbild vom 20.03.1993 . . . . .	42
6.5	Meteosat-Aufnahmen und atmosphärisches Phasenbild vom 04.09.1995 . . . . .	43
6.6	Meteosat-Aufnahmen und atmosphärisches Phasenbild vom 09.09.1997 . . . . .	44
7.1	Differenzbild des originalen und rekonstruierten Interferogramms der SAR-Szenen vom 04.09.1995 und 01.04.1996. Die Differenzphasen weisen einen linearen Trend von Ost nach West auf. . . . .	46

# Tabellenverzeichnis

3.1	Aufbau der Erdatmosphäre (aus BAUER 2011, S. 101) . . . . .	7
-----	---	---

---

# Algorithmenverzeichnis

1	Erzeugung eines atmosphärischen Phasenbilds für den Zeitpunkt T nach SCHÄFER (2012): Teil 1	19
2	Erzeugung eines atmosphärischen Phasenbilds für den Zeitpunkt T nach SCHÄFER (2012): Teil 2	20
3	Erzeugung der pixelbasierten Kohärenz . . . . .	24
I	Mittelbildung eines Stacks nach SCHÄFER (2012) . . . . .	iii
II	Varianz der mittleren Phasenwerte nach SCHÄFER (2012) . . . . .	iii
III	Phasenmittelwert aus einer Referenzfläche nach SCHÄFER (2012) . . . . .	iv
IV	Berechnung der Pseudobeobachtungen . . . . .	iv
V	Berechnung der Varianz einer Pseudobeobachtung . . . . .	v
VI	Überlappungsbereich zweier Kacheln (Teil 1) . . . . .	v
VII	Überlappungsbereich zweier Kacheln (Teil 2) . . . . .	vi
VIII	Finden der Pixel mit den höchsten Kohärenzwerten . . . . .	vi
IX	Zeile der Designmatrix mit partiellen Ableitungen besetzten . . . . .	vii
X	Korrektur der Phasenwerte einer Kachel mit dem ausgeglichenen Referenzphasenwert . . . . .	vii
XI	Berechnung des Phasenähnlichkeitsbild nach SCHÄFER (2012) (Teil 1) . . . . .	viii

# Literatur

- BAUER, M. (2011) *Vermessung und Ortung mit Satelliten. Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme (6. Auflage)*. Wichmann Verlag, Berlin.
- DING, X.-L., Z.-W. LI, J.-J. ZHU, G.-C. FENG und J.-P. LONG (2008) Atmospheric Effects on InSAR Measurements and Their Mitigation. *In: Sensors*, 8(9):S. 5426–5448.
- EOPORTAL (2013) eoPortal Directory. *online unter <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/meteosat-first-generation>, letzter Zugriff am 13.08.2013*.
- ESA (2013) ESA - Online. *online unter [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/ERS-2](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/ERS-2), letzter Zugriff am 13.08.2013*.
- HALSIG, S. (2012) *Integrierte Modellierung von InSAR- und Nivellementmessungen zur Detektion großräumiger Deformationen der Erdoberfläche*. Masterarbeit. Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn, Bonn.
- HANSEN, R. (1998) *Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry*. Delft University Press, Delft.
- HESELBARTH, A. (2009) GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). *In: Zeitschrift für Vermessungswesen, Herausgeber: Deutscher Verein für Vermessungswesen (DVM) e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Nr. 5:S. 278–286.
- JOECKEL, R., M. STÖBER und W. HUEP (2008) *Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung – und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren (5. Auflage)*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LEIJEN, F. und R. F. HANSEN (2004) Interferometric Radar Meteorology: Resolving the acquisition ambiguity. *In: Proceedings of CEOS SAR Workshop, 27.-28.05.2004, Ulm*.
- NIEMEIER, W. (2008) *Ausgleichsrechnung. Statistische Auswertemethoden (2. Auflage)*. Walter de Gruyter, Berlin.
- SCHÄFER, M. (2012) *Atmosphäre als Phasenbestandteil der differentiellen Radarinterferometrie und ihr Einfluss auf die Messung von Höhenänderungen*. Dissertation. Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal, Clausthal.
- SCHÄFER, M. und W. HANNEMANN (2010) Atmospheric phase shift identification for individual dates based on multi-reference DInSAR or PSI data. *In: Proceedings of ESA Living Planet Symposium 2010, 28.06.-02.07.2010, Bergen*, ESA Special Publication 686.
- SOERGEL, U. (2006) Stand der Technik und Trends der Radarfernerkundung: Festschrift 125 Jahre Geodäsie und Geoinformatik. *In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover*, Nr. 263:S. 295–302.
- WADGE, G., P. W. WEBLEY und N. F. STEVENS (2004) Correcting InSAR Data for Tropospheric Path Effects over Volcanoes using Dynamic Atmospheric Models. *In: Proceedings of FRINGE 2003 Workshop, 01.-05.12.2003, Frascati*, ESA Special Publication 550.

---

WALTER, D., J. HOFFMANN, N. ADAM und B. KAMPES (2004) Radarfernerkundung zur Erfassung bergbaubedingter Senkungen. *In: 5. Geokinematischer Tag*, Nr. 2:S. 228–239.