

Institut für Geodäsie und Geoinformation

Professur für Theoretische Geodäsie

Integrierte Modellierung
von InSAR- und Nivellementmessungen
zur Detektion großräumiger
Deformationen der Erdoberfläche

Masterarbeit

im Masterstudiengang Geodäsie und Geoinformation
an der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität
zu Bonn

vorgelegt am 27. September 2012 von

Sebastian Halsig

aus Bonn

Bonn 2012



Zum Druck freigegebene Version.

19. Dezember 2012

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

Zweiter Prüfer: Dipl.-Ing. L. Roese-Koerner

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, 27. September 2012

Sebastian Halsig

Zusammenfassung

Deformationen der Erdoberfläche sind ein weltweit auftretendes Phänomen. Alleine im Bundesland Nordrhein-Westfalen nehmen derartige Deformationen eine Ausdehnung von etwa einem Drittel der gesamten Landesfläche an. Die Ursachen von Erdoberflächenbewegungen sind vielseitig und können von geologisch-tektonischen Bedingungen bis hin zu Erscheinungen anthropogener Natur reichen. In Nordrhein-Westfalen treten überwiegend in den Bergbauregionen massive Höhenänderungen auf. Eine dieser Bergbauregionen befindet sich im südlichen Teil der Niederrheinischen Bucht und umfasst das Städtedreieck Aachen - Mönchengladbach - Bonn in der Nähe von Köln. In diesem Gebiet können durch sogenannte Sumpfungsprozesse überwiegend kontinuierliche Bodenbewegungen beobachtet werden. Unter Sumpfung wird die notwendige Absenkung des Grundwassers durch die Grubenwasserhaltung, einem kontinuierlichen Pumpvorgang, für den Abbau von Braunkohle verstanden. Nach der Einstellung eines Tagebaus wird dieser Vorgang aus finanziellen Gründen häufig eingestellt und der Grubenstollen geflutet. Da durch den Wiederanstieg des Grundwassers bis an die Erdoberfläche reichende Hebungserscheinungen auftreten, ist auch nach der Braunkohleförderung eine stetige Kontrolle der Geländehöhen notwendig.

In der Landesvermessung kommt deren Überwachung im Rahmen der hoheitlichen Daseinsfürsorge eine bedeutende Rolle zu. Dazu werden von der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasis NRW zur regelmäßigen Kontrolle großräumige, möglichst flächendeckende, langfristig angelegte und in engen Zeitabständen wiederholt angemessene Nivellementnetze, sogenannte Leitnivellements, herangezogen, um Höhenänderungen zwischen den Messepochen zu erfassen.

Um den Messaufwand zu minimieren und gleichzeitig die Genauigkeit der Nivellementnetze zu steigern, wird hier auf der Grundlage dieser Beobachtungsdaten ein Gesamtausgleich aller Messepochen mit einer datenadaptiven Parameterwahl vorgeschlagen. Die Basis dessen bildet die Identifikation von unbewegten Punkten im Netz, wodurch die Redundanz in der Ausgleichung und somit die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht werden kann. Zur Festlegung von unbewegten Punkten können a priori Kenntnisse dienen oder auch objektive statistische Verfahren herangezogen werden. In dieser Arbeit wurde dazu ein Detektionsverfahren auf der Basis von Hypothesentests verwendet, welches eine Identifikation unbewegter Punkte gewährleistet und eine datenadaptive Parameterwahl ermöglicht.

Auch wenn das Nivellement eine sehr präzise geodätische Anwendung zur Überwachung von Deformationen darstellt, ist es gleichzeitig ein kostspieliges und zeitaufwändiges Verfahren. Des Weiteren ist eine Datenauswertung ausschließlich entlang der linienhaften Nivellementzüge möglich. Der Forderung nach immer engmaschigeren Nivellementnetzen zur Annäherung an eine flächendeckende Informationsquelle stehen rückläufige finanzielle und personelle Ressourcen des Landes Nordrhein-Westfalen sowie der beteiligten Kommunen, Verbände und Bergbaubetreiber entgegen, sodass in den vergangenen Jahren Ansätze zur Kombination von Nivellementbeobachtungen mit anderen geodätischen Anwendungen wie GPS oder Methoden der Radarfernerkundung und Interferometrie vorgeschlagen wurden. Die Vorteile radarinterferometrischer Methoden sind die fehlende Notwendigkeit von physikalischer Präsenz am Beobachtungsort sowie eine hohe räumliche und zeitliche Datendichte.

In dieser Arbeit werden unterschiedliche Radarsysteme vorgestellt und der Fokus auf das Radar mit synthetischer Apertur (engl. Synthetic Aperture Radar, kurz SAR) gelegt, bei welchem die Bewegung der Trägerplattform insofern zur Verbesserung der räumlichen Auflösung genutzt wird, dass die kurze physikalische (reale) Antenne synthetisch verlängert wird. Die Grundlage eines Radarsystems ist das sogenannte Echo-Prinzip. Über eine Antenne erfolgt sowohl das Aussenden elektromagnetischer Wellen in Form von Impulsen, als auch der Empfang des je nach Materialeigenschaft der Erdoberfläche teilweise reflektierten Signals. Das SAR-Messprinzip ermöglicht die Registrierung von Phasen- und Amplitudeninformation. Mit Hilfe der Phaseninformation können Höheninformationen eines Gebietes gewonnen werden. Dazu ist jedoch im Allgemeinen die Verwendung der SAR-Interferometrie (engl. Interferometric SAR, kurz InSAR) notwendig. Diese basiert dabei auf einer Phasendifferenzmessung, d.h. einer Auswertung der Signalphase von (mindestens) zwei komplexwertigen SAR-Bildern. Eine Phasendifferenzmessung erfolgt auf der Grundlage der unterschiedlichen Signallaufzeit zwischen zwei räumlich getrennten Radarsensoren und der beleuchteten Erdoberfläche. Eine grundlegende Voraussetzung ist eine feste (kohärente) Phasenbeziehung beider SAR-Signale, die durch eine kurze Distanz zwischen beiden SAR-Sensoren (die sogenannte Basislinie) erreicht werden kann.

Neben der Prozessierung von Geländemodellen im Rahmen der InSAR-Technik ermöglicht die differentielle SAR-Interferometrie (engl. Differential InSAR, kurz D-InSAR) aus der Phasendifferenz zweier interferometrischer Phasen die Erfassung von Deformationen an der Erdoberfläche. Aufgrund von zeitlichen und geometrischen Dekorrelationseffekten sowie atmosphärischer Laufzeitverzögerung wird die Qualität und Genauigkeit der Ergebnisse erheblich beeinträchtigt. In den vergangenen Jahren wurde dazu die Permanent Scatterer Interferometrie (engl. Permanent-Scatterer-Interferometry, kurz PSI) entwickelt, welche die Hauptfehlerquellen der konventionellen InSAR-Methode umgeht. Dazu werden ausschließlich zeitlich kohärente Pixel, die sogenannten „Permanent Scatterer“ (PS) in einem Bildstapel von mindestens 30 differentiellen Interferogrammen betrachtet. PS-Punkte zeichnen sich insbesondere durch langfristig stabile Rückstreuungseigenschaften sowie ein außerordentlich gutes Signal-Rausch-Verhältnis aus und werden zur Generierung eines Netzes herangezogen, auf dessen Basis Geländebewegungen detektiert werden können.

Zur Verifizierung der interferometrischen Produkte werden diese mit den Ergebnissen aus Analysen der klassischen Landesvermessung anhand eines Testgebietes in der Niederrheinischen Bucht gegenübergestellt. Dazu wurden von der Europäischen Weltraumorganisation (engl.: European Space Agency, kurz ESA) sowie der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW Daten zur Verfügung gestellt. Daneben erfolgt die Beschreibung eines potentiellen Ansatzes zur integrierten Modellierung von Nivellement- und InSAR-Beobachtungsdaten. Erste Ergebnisse dieser Anwendungen, insbesondere die absoluten Deformationen der Permanent Scatterer für den Zeitraum 1992 - 2000, sowie Zeitreihen einzelner Permanent Scatterer in ausgewählten interessanten Gebieten, können bereits präsentiert werden.

Summary

Subaerial deformation is a worldwide phenomena. In North Rhine Westphalia alone, about one third of the lands area is covered by ground motion. These deformations are caused by geologic and tectonic conditions or by anthropogenic determinants. In North Rhine Westphalia subaerial hight changes predominantly occur in the mining areas. One of these mining regions is the southern part of the „Niederheinische Bucht“ including the tri-city-area Aachen - Mönchengladbach - Bonn near Cologne. There one can observe subsidence, showing up in a continous matter, due to underground mining caused by the extraction of mineral resources and accordingly the so called sump-dewatering, i.e. the ground-water-level is lowered during the opencast work. When the open-cast mine will have been flooded following the cessation of coal extraction, a monitoring of the terrain hight is still essential, because a rerise of the underground mine water induce liftigs on the earth's surface.

In national geodetic surveying the monitoring of these subaerial deformations within the framework of the sovereign public services is of great importance. Therefore large-scale, as comprehensive as possible and long-term levelling campaigns are measured and monitored repeatedly in short time intervals by the District Government of Cologne, Department 7 - GEOBasis NRW to capture height changes between the epochs. To minimize measurement costs and to simultaneously improve the accuracy of the levelling networks, I propose a joint adjustment of all epochs with data-adaptive choice of parameters, based on these observations. The foundation to increase the redundancy within the adjustment and thus the reliability of the results is given by an identification of unmoved points within the network. Unmoved points may be identified either by using prior information or by means of objective statistical methods. In this thesis a detection procedure for identifying stable points is used which is based on hypothesis testing and which allows for a data-adaptive choice of parameters within the joint adjustment of the epochs.

Even though levelling is a very precise technique for geodetic deformation monitoring, it has the drawbacks of being fairly expensive and time-consuming. Furthermore, the data is distributed along lines. Therefore, it would be of great interest to combine these measurements with data from the fields of radar remote sensing and interferometry as those permit a laminar admittance with a high spatial resolution. Further advantages of radar remote sensing are the high spatial and temporal density of the data and the fact, that it is not necessary to physically access the deformation area.

In this thesis different radar systems are presented, placing the focus on synthetic aperture radar (SAR). The synthetic aperture concept is employed to increase the geometric resolution by synthetic extension of the real antenna. The radar system is based on the echo-principle: electromagnetic waves are sent and received as impulses after backscattering from the earth's surface, depending on the material properties. Both magnitude and phase of the signal are measured by the synthetic aperture radar sensor. The phase is used to derive information on terrain heights. In general this requires the use of interferometric SAR (InSAR) which exploits the phase differences of (at least) two complex-valued SAR images acquired from different orbit positions. One essential prerequisite of InSAR is a fixed phased relationship between both SAR images, that means, the distance between the orbital positions of the radar (so called baseline) has to be small.

Besides the InSAR phase processing procedure, differential SAR interferometry (D-InSAR) may be

used for surface deformation monitoring by involving interferometric phase comparison of complex-valued SAR images acquired at different times. Temporal and geometrical decorrelation as well as atmospheric disturbances strongly affect quality and accuracy of the results. However, the permanent scatterer interferometry (PSI) offers a practical way to reduce these main errors in conventional InSAR processing methods. This is achieved by the analysis of the interferometric phase information of individual time-coherent (stable) pixels (so called permanent scatterers) in a stack of (at least) 30 differential interferograms with one single master scene. These scatterers can be used as some sort of a network to monitor terrain deformation.

Both levelling and InSAR data are considered for the detection of subaerial deformation by processing real data from the District Government of Cologne, Department 7 - GEOBasis NRW and the European Space Agency (ESA) in the „Niederheinische Bucht“, Germany. Besides, a prospective approach for the integrated modelling of levelling and InSAR based on a spatial-temporal modelling of the subsidence is presented. First results, in particular absolute vertical surface deformation of the permanent scatterers between 1992 and 2000 as well as time series of some individual permanent scatterers in selected and interesting areas, could be presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit	2
1.3	Gliederung der Arbeit	3
2	Geologische und hydrologische Grundlagen	5
2.1	Auftretende Bewegungsformen	5
2.2	Ursachen von Bewegungen der Erdoberfläche	6
2.3	Geologie, Hydrologie und Tektonik im Arbeitsgebiet	7
3	Klassische Landesvermessung	11
3.1	Deformationsanalyse	11
3.2	Grundprinzip des Nivellements	12
3.3	Historische Entwicklung und aktueller Stand der Leitnivellements in Nordrhein-Westfalen	14
3.3.1	Das Leitnivellement „Ruhrgebiet“	15
3.3.2	Das Feinnivellement „Linker Niederrhein“	16
3.3.3	Das Leitnivellement „Rheinbraun“	16
3.3.4	Das Leitnivellement „Aachen-Erkelenzer-Revier“	17
3.3.5	Das Leitnivellement „Ibbenbüren“	17
3.3.6	Das Wiederholungsnivellement „Erzbergbau Meggen“	18
3.4	Auswertung der Leitnivellements	18

4	Theoretische Grundlagen der Radar-Fernerkundung	20
4.1	Die Satellitenmissionen ERS-1 und -2	20
4.2	Das Prinzip der Radar-Technik	22
4.2.1	Aktive Mikrowellensysteme	23
4.2.2	Radar mit synthetischer Apertur	26
4.3	Das SAR-Signal	28
4.3.1	Kennzeichen von SAR-Aufnahmen	28
4.3.2	Eigenschaften des SAR-Signals	33
4.4	SAR-Interferometrie	36
4.4.1	Messprinzip der SAR-Interferometrie	36
4.4.2	Eigenschaften des InSAR-Signals	42
4.5	Differentielle SAR-Interferometrie	44
4.6	Permanent Scatterer Interferometry	45
5	Integrierte Modellierung klassischer Landesvermessung und satellitengestützter Anwendungen	47
5.1	Interferometrischer Prozessierungsablauf	47
5.1.1	Erstellung des interferometrischen digitalen Geländemodells	48
5.1.2	Erfassung von Oberflächenbewegungen	65
5.1.3	Permanent Scatterer Interferometry zur Ableitung von Bewegungen der Erdoberfläche	67
5.1.4	STUN-Algorithmus als Adaptierung des ursprünglichen PSI-Verfahrens	75
5.1.5	Vergleich zwischen konventioneller D-InSAR-Technik und PS-Interferometrie	78
5.2	Parameterschätzung absoluter Höhen aus Nivellementbeobachtungen	79
5.2.1	Gesamtausgleich von Höhennetzen mit stabilen Punkten	79
5.2.2	Detektionsverfahren zur Identifizierung stabiler Punkte	80
5.3	Integrierte Modellierung von (D-)InSAR und Nivellementdaten	84
5.3.1	Modellierung von Bodenbewegungen	84
5.3.2	Beobachtungsgleichungen	85
5.3.3	Funktionales und stochastisches Modell	87

6	Anwendung und Analyse im Untersuchungsgebiet	89
6.1	Datengrundlage	89
6.2	Datenauswertung und Ergebnisdiskussion	91
6.2.1	(D-)InSAR-Auswertung	91
6.2.2	PSI-Auswertung	95
7	Zusammenfassung	104
7.1	Fazit	104
7.2	Ausblick	105
8	Danksagung	106
A	Bezeichnungen	i
B	Abkürzungen	vi
C	Remote Sensing Package Graz (RSG)	vii
C.1	Anwendung der RSG-Software	vii
C.1.1	InSAR-Phase-Processing	vii
C.1.2	InSAR DEM Generation	x
C.1.3	Differential Interferometry	xi
C.1.4	Permanent Scatterer	xiv
	Verzeichnisse	xviii
	Abbildungsverzeichnis	xviii
	Tabellenverzeichnis	xx
	Literatur	xxi

1. Einleitung

1.1 Motivation

Weltweit treten in vielen Regionen Bewegungen der Erdoberfläche auf. Alleine im Bundesland Nordrhein-Westfalen erstreckt sich die Reichweite derartiger Deformationen auf etwa ein Drittel der gesamten Landesfläche (BOJE et al. 2008, S. 9). Der Ursprung dieser Erdoberflächenbewegungen kann natürlicher, d.h. geologisch-tektonischer Natur sein oder in anthropogenen Einflussfaktoren liegen. Die schwerwiegendsten menschlichen Eingriffe entstehen durch die Förderung und Gewinnung von Rohstoffen, wie Öl, Gas oder Kohle, jedoch sind auch Talsperren und Grundwassergewinnungsanlagen sowie Erosionseinflüsse, insbesondere durch eine intensive landwirtschaftliche Nutzung, nicht zu vernachlässigen (KREMERS 1990, S. 10).

In Nordrhein-Westfalen treten überwiegend in den Bergbauregionen massive Änderungen in Lage, Höhe und Schwere auf. Um großräumige Bodenbewegungen detektieren zu können und ein rechtzeitiges Eingreifen in Gebieten mit möglichem Gefahrenpotential zu gewährleisten, ist eine stetige Überwachung dieser Gebiete notwendig. In der Geodäsie werden dazu klassischerweise terrestrische Nivellementmessungen oder photogrammetrische Befliegungen durchgeführt. Insbesondere werden von der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasis NRW zur regelmäßigen Kontrolle großräumige und langfristig angelegte Wiederholungsnivellements herangezogen, um Höhenänderungen zwischen den Messepochen zu erfassen. Die periodischen Messungen werden als sogenannte Leitnivelements bezeichnet und werden möglichst flächendeckend und in zuvor definierten engen Zeiträumen durchgeführt (SCHULER et al. 2010, S. 59).

Seit den neunziger Jahren wurden diese klassischen Beobachtungsverfahren durch satellitengestützte, radarinterferometrische Messungen erweitert. Das konventionelle Radar wurde ursprünglich als Ortungsverfahren entwickelt und dient der Lokalisierung eines Objektes inklusive seiner Entfernung und Geschwindigkeit. Durch eine kontinuierliche technische Weiterentwicklung konnte durch Verfahren wie das Radar mit synthetischer Apertur (engl.: Synthetic Aperture Radar, kurz: SAR) die Realisierung einer flächenhaften Gebietserfassung ermöglicht werden, die eine potentielle Ergänzung zu den linienhaften Nivellementzügen darstellt (HEIN 1998, S. 1).

Die grundlegenden Prinzipien des Synthetic Aperture Radars wurden erstmals im Jahr 1953 als Patentschrift unter dem Titel „Pulsed Doppler Radar and Means“ von Carl A. Wiley veröffentlicht (KALKUHL 2009, S. 13). Im Jahr 1978 startete die NASA mit der Satellitenmission SEASAT den ersten Erderkundungssatelliten nach dem Prinzip der synthetischen Apertur. Mit dem Start der baugleichen European Remote Sensing Satelliten ERS-1 im Jahr 1991 und ERS-2 im Jahr 1995 folgten die ersten europäischen Satelliten mit SAR-Sensor (siehe ESA 2012). In den letzten Jahren gewann das SAR-Prinzip, nicht nur durch die stetige Weiterentwicklung und den Start diverser Satellitenmissionen, wie dem hochauflösenden Erdbeobachtungssatelliten TerraSAR-X, weiter an Bedeutung und eröffnete neue Anwendungen in zahlreichen geowissenschaftlichen Disziplinen. Neben der graphischen Kartierung und Visualisierung eines Gebietes reicht das Anwendungsspektrum über Landnutzungsklassifikation und Landnutzungsänderungsdetektion, insbesondere für Anwendungen der Land- und Forstwirtschaft, bis zum Einsatz von SAR-Aufnahmen für geologische Aspekte wie

beispielsweise die Bestimmung der Bodenfeuchte in einem Gebiet. Daneben werden SAR-Bilder in der Ozeanographie, Glaziologie und Klimaforschung zur Ableitung von Meeresströmungen und -tiefen, sowie zur Analyse von Eis- und Gletscherverhalten herangezogen. Des Weiteren kann im Zusammenhang mit dem Katastrophenmanagement eine Kartierung von Überflutungsflächen oder Gebäudeschäden sowie im Bereich des Umwelt- und Naturschutzes die Detektion von Schadstoffen wie einem Ölteppich auf der Meeresoberfläche erfolgen (vgl. HEIN 1998, S. 2-4 und SCHWÄBISCH 1995, S. 11).

Das Prinzip der flugzeugbasierten SAR-Interferometrie zur Ableitung topographischer Information der Erdoberfläche konnte erstmals in GRAHAM (1974) aufgezeigt werden. Die Eignung der InSAR-Methode auch für satellitengestützte Anwendungen konnte erstmalig in GABRIEL und GOLDSTEIN (1988) demonstriert werden.

In den vergangenen Jahren konnte sich mit der differentiellen SAR-Interferometrie (engl.: Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, kurz D-InSAR) eine neue Disziplin entwickeln, welche auf Basis einer interferometrischen Auswertung zweier komplexwertiger SAR-Aufnahmen eine Höheninformation liefert. Die ersten Anwendungen in diesem Bereich gehen auf das Ende der achtziger und den Anfang der neunziger Jahre zurück. Der Erdbeobachtungssatellit SEASAT lieferte Aufnahmen, mit denen im Jahr 1989 erstmals Bewegungen von bewässerten Feldern ermittelt werden konnten (GABRIEL et al. 1989). Die Anwendungen und Produkte der differentiellen SAR-Interferometrie sind vielseitig und decken Fachbereiche der Seismologie und Erdbebenforschung (z.B. MASSONNET et al. 1993, BARBIERI et al. 1999), der Vulkanologie (z.B. LANARI et al. 1998, AMELUNG et al. 2000, FROGER et al. 2001, STEVENS und WADGE 2004) und der Glaziologie (z.B. GOLDSTEIN et al. 1992, MEYER 2004, LESCARMONTIER et al. 2012) ab. Daneben wurde das Verfahren auch an Anwendungen zur Analyse von Hangrutschungen (z.B. FRUNEAU und SARTI 2000) und durch anthropogene Einflussfaktoren hervorgerufene Deformationen, wie Gasförderung (z.B. ODIJK 2005), Grundwasserveränderungen oder Kohleabbau (z.B. WRIGHT und STOW 1999, SPECKELS et al. 2001, SPECKELS 2012, KIRCHER 2004) demonstriert.

Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass das Potential der interferometrischen SAR-Prozessierung durch Dekorrelationsprozesse und atmosphärische Störsignale begrenzt ist. Die Einschränkungen sollen mit der sogenannten Permanent Scatterer Interferometry (kurz: PSI oder PS-InSAR), einem relativ neuen methodischen Ansatz des klassischen D-InSAR-Verfahrens, umgangen werden (FERRETTI et al. 2000A, FERRETTI et al. 2000B, FERRETTI et al. 2001). Das Potential dieser Technik konnte bereits für die Überwachung von Erdoberflächenbewegungen demonstriert werden (vgl. KIRCHER 2004, KAMPES 2006, SHANKER AGRAM 2010, NG et al. 2011).

1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit

In den letzten Jahren stieg die Zahl der Beobachtungsverfahren zur Detektion von Deformationen der Erdoberfläche neben dem terrestrischen Nivellement in der klassischen Landesvermessung stetig an. Insbesondere gewann der Fachbereich der Radarfernerkundung schnell an Bedeutung, da ausgehend von Satelliten nahezu tageszeiten- und wetterunabhängig Aufnahmen realisiert werden konnten.

In den letzten Jahren wurden Untersuchungen zur Kopplung der beiden komplementären Beobachtungsverfahren (D-)InSAR und terrestrisches Nivellement durchgeführt (z.B. KIRCHER 2004, ODIJK 2005). Auf diese Weise sollen die linienhaften Nivellementzüge durch eine satellitengestützte flächenhafte Erfassung des Gebietes erweitert werden.

In dieser Masterarbeit soll der aktuelle Forschungsstand zur Kombination von Daten aus terrestrischen Nivellementmessungen und satellitengestützten D-InSAR-Beobachtungen zur großräumigen Erfassung von vertikalen Deformation der Erdoberfläche erarbeitet und dargestellt werden. Dazu werden zunächst beide Verfahren vorgestellt und insbesondere die unterschiedlichen Ansätze und Erweiterungen der klassischen D-InSAR-Methode differenziert. Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll auf der methodischen Komponente liegen und sowohl die Darstellung der Prozessierungskette zur Gewinnung von Deformationsinformationen aus D-InSAR-Beobachtungen, als auch die Untersuchung der Möglichkeiten zur Kombination mit geodätischem Nivellement umfassen. Neben der theoretischen Darstellung sollen zudem die aus beiden Verfahren extrahierbaren Informationen anhand eines vorgegebenen Testgebiets in der Niederrheinischen Bucht verifiziert werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Zunächst werden in Kapitel 2 die im Zusammenhang mit Deformationen der Erdoberfläche benötigten allgemeinen Grundlagen der Geologie, Hydrologie und Tektonik dargelegt. Dabei sollen insbesondere auftretende Bewegungsformen differenziert und potentielle Ursachen von Bodenbewegungen analysiert werden. Auch die geologischen, hydrologischen und tektonischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet in der Niederrheinischen Bucht werden untersucht. Eine Beschreibung der auf diesen Bodenbewegungen basierenden Deformationsanalyse zur Detektion bewegter Punkte erfolgt in Kapitel 3. Da dabei insbesondere vertikale Bodenbewegungen betrachtet werden, erfolgt eine Beschreibung der im Rahmen der klassischen Landesvermessung durchgeführten Leitnivellements sowie deren historische Entwicklung. Das messtechnische Grundprinzip dieser Leitnivellements, das geometrische Nivellement, soll dabei ebenfalls kurz erläutert werden. Da dem amtlichen Vermessungswesen neben der Erfassung, Überwachung und Bereitstellung der Daten auch die stetige Anpassung seiner Aufgabenfelder an den Fortschritt von Wissenschaft und Technik obliegt, dies gleichzeitig jedoch durch rückläufige finanzielle und personelle Ressourcen der zuständigen Behörden behindert wird, wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Möglichkeiten zur Kombination von klassischen Verfahren mit satellitengestützten Methoden untersucht. Dabei sollen in dieser Arbeit Strategien aus der Radarfernerkundung, insbesondere die differentielle SAR-Interferometrie, im Vordergrund stehen. In Kapitel 4 werden dazu zunächst die theoretischen Grundlagen der Radarfernerkundung vorgestellt. Dies umfasst im Wesentlichen das Prinzip der Radar-Technik, die Notwendigkeit von Radarsystemen mit synthetischer Apertur sowie die Charakterisierung des daraus entstehenden SAR-Signals. Anschließend erfolgt eine Einführung in die (SAR-) Interferometrie zur Generierung von digitalen Geländemodellen aus gegebenen Radaraufnahmen sowie die Verwendung von differentieller Interferometrie zur Erfassung von Bodenbewegungen. Zuletzt wird mit der sogenannten

Permanent Scatterer Interferometrie eine spezielle Methode der D-InSAR-Technik vorgestellt. Diese führt zu einer Reduktion der Hauptfehlerquellen der konventionellen D-InSAR-Technik. Die Prozessierungskette dieser Verfahren sowie der Ablauf der klassischen Verfahren aus der Landesvermessung werden in Kapitel 5 dargelegt. Daneben wird zudem ein potentieller Ansatz zur integrierten Modellierung beider Beobachtungsverfahren erläutert. Zur Verifizierung der interferometrischen Produkte erfolgt anhand eines Testgebietes in der Niederrheinischen Bucht eine Gegenüberstellung der aus der InSAR-Prozessierung resultierenden Ergebnisse mit denen aus der klassischen Geodäsie. Dazu wurden von der Europäischen Weltraumorganisation (engl.: European Space Agency, kurz ESA) sowie der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW Daten zur Verfügung gestellt. Eine Ergebnisdiskussion sowie eine Analyse zur Verknüpfung der beiden unterschiedlichen Verfahren erfolgt in Kapitel 6.2. Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf weitere potentielle Untersuchungen der Verfahren.

2. Geologische und hydrologische Grundlagen

In vielen Regionen der Erde treten Deformationen an der Erdoberfläche auf. Sowohl die Art der Bewegung, bei der überwiegend Rutschungen und Senkungen unterschieden werden, als auch die Deformationsursache, bei welcher natürliche und anthropogene Einflussfaktoren voneinander getrennt werden, sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

2.1 Auftretende Bewegungsformen

Bei einem Rutschungsprozess kann eine Deformation der Erdoberfläche nach Prozess- und Materialtyp unterschieden werden. Neben der Art und Geschwindigkeit der Bewegung zählen dazu auch die Zusammensetzung der Boden- und Gesteinsschichten und die unterschiedlichen Auslösemechanismen, wie beispielsweise Erdbeben, Niederschlag oder Einflussfaktoren anthropogener Natur. Nach GLADE und DIKAU (2001, S. 42) sind Rutschungsprozesse allgemein formuliert die aus gravitativ wirkenden Kräften resultierende Verlagerung von Fels- bzw. Lockergestein in fallender, kippender, gleitender, fließender, driftender oder komplexer Art. Während der eher bei Bergstürzen auftretende Typ Fallen eine schnelle der Gravitation zu Grunde liegende freie Bewegung definiert, handelt es sich bei der Kippung um eine vorwärts gerichtete Rotation von Gestein. Zu den meist kontinuierlich und langsam verlaufenden Rutschungstypen zählen das Gleiten, eine translational oder rotational stattfindende Gleitbewegung entlang einer Scherfläche, oder das Driften, welches durch eine Auseinanderbewegung von Gestein oder das Einsinken einer Gesteinsmasse in eine weichere tiefere Gesteinsschicht definiert ist. Eine Deformation kann jedoch auch immer in komplexer Art, d.h. als eine Zusammensetzung mehrerer Typen auftreten. Aufgrund der unterschiedlichen Dynamik der Erdoberflächenbewegung ist auch das Gefahrenpotential nach entsprechenden Prozess- und Materialtypen differenziert einzustufen.

Während Rutschungsprozesse in der Regel lokale Ausmaße haben, können bei Senkungen durchaus weiträumige Ausdehnungen auftreten. Senkungsprozesse an der Erdoberfläche resultieren aus der Kompaktion von Sedimenten. Darunter können beispielsweise die Erhöhung des lithostatischen Drucks aufgrund von Sedimentzufuhr, Entwässerungsprozessen durch Verdunstung und Abfluss sowie anthropogenen Einflussfaktoren in Zusammenhang mit der Förderung von bestimmten Rohstoffen verstanden werden (KIRCHER 2004, S. 2).

Auch bei Senkungsprozessen ist die Bodendynamik differenziert zu betrachten. Während bei Senkungsprozessen aufgrund von tektonischen Erscheinungen oder als Folge der Grundwasserabsenkung zur Förderung von Braunkohle langsame jährliche Bewegungsgeschwindigkeiten im Millimeterbereich auftreten, können im Zusammenhang mit Steinkohletagebauten diskontinuierliche Deformationen in einer Größenordnung im Dezimeter- oder sogar Meterbereich erreicht werden. In den Steinkohletagebauten Nordrhein-Westfalens konnten innerhalb von einigen Jahren maximale Senkungen von 10 bis 20 Metern an der Erdoberfläche nachgewiesen werden (vgl. BOJE et al.

2008, HAUPT 1999). Die auf dem Grundwasserentzug basierenden Deformationen im Rheinischen Braunkohle-Revier hingegen erreichen seit 1955 in der Summe eine Senkung von 4 Metern im Senkungsschwerpunkt. Die horizontale Bewegung erfuhr im gleichen Zeitraum nur eine Veränderung von wenigen Dezimetern (vgl. BOJE et al. 2008, HAUPT 1999, RATHSMANN 1986, SCHÄFER 1999 und BAGLIKOW 2003).

2.2 Ursachen von Bewegungen der Erdoberfläche

Neben den Bewegungsformen können auch die Ursachen von Bodenbewegungen differenziert werden. Demnach werden zunächst durch natürliche Prozesse hervorgerufene Phänomene von den Deformationen getrennt, die ausschließlich durch menschliche Eingriffe hervorgerufen werden.

Den Deformationen auf der Grundlage natürlicher Vorgänge wird im Allgemeinen ein geologisch-tektonischer Charakter zugeordnet. Die Bewegungen an der Erdoberfläche können einerseits aus Bewegungsvorgängen im geologischen Untergrund (z.B. Schollenbewegungen) oder aus Inhomogenitäten und Verwerfungen im Deckgebirge (z.B. Grabeneinbrüche) andererseits resultieren (KREMERS 1990, S. 9). Nicht selten können tektonische Bewegungen im Untergrund zu Erdbeben führen. Eine Deformation geologisch-tektonischer Natur kann sowohl eine weiträumige Ausdehnung vorweisen, als auch lokal begrenzt sein.

Die räumliche Ausdehnung der durch anthropogene Einflussfaktoren hervorgerufenen Erdoberflächendeformationen hingegen lässt sich aufgrund von natürlichen Gesetzmäßigkeiten (wie z.B. dem Fließvorgang von Grundwasser) im Allgemeinen nicht ausschließlich auf das jeweils beeinflusste Gebiet beschränken. Vielmehr entsteht um das tatsächlich vom Menschen beeinflusste Gebiet eine Fläche von erheblicher Reichweite. Die deutlichsten anthropogenen Eingriffe in die Natur entstehen durch die Förderung und Gewinnung von Rohstoffen, wie Öl, Gas oder Kohle (KREMERS 1990, S. 10).

Beispielsweise entsteht durch den untertägigen Abbau von Steinkohle im Erdinneren ein Hohlraum, der sich in den nachfolgenden Jahren durch die von den oberen Erdschichten wirkende Kraft sukzessive verringert und mit anderen Erdschichten aufgefüllt wird. Dieser Prozess wird bis an die Erdoberfläche fortgesetzt, wodurch diese einem Senkungstrog ausgesetzt ist. Der Senkungsprozess erfolgt dabei in Abhängigkeit der Lagerstätte (Teufe), d.h. der Tiefe gegenüber einem definierten Referenzpunkt auf der Oberfläche, der Dicke der Flöze (Flözmächtigkeit) und dem gewählten Abbaufahren (BOJE et al. 2008, S. 33). Die Deformationen können dabei in diskontinuierlicher Art auftreten und die Bodendynamik ist im Allgemeinen bei Bewegungsgeschwindigkeiten von mehreren Dezimetern als hoch einzustufen (KIRCHER 2004, S. 2).

Die Dynamik von Erdoberflächenbewegungen aufgrund von Braunkohletagebauten verläuft hingegen zeitlich sehr langsam ab. Zur Gewinnung von Braunkohle ist eine Grundwasserabsenkung, die sogenannte Sumpfung, zwingend erforderlich. Der weiträumige Grundwasserentzug führt neben ökologischen Schäden und wasserwirtschaftlichen Beeinträchtigungen auch zu Bodenabsenkungen (KLOSTERMANN et al. 1998, S. 559).

Neben den Bergbaugebieten können auch Talsperren und Grundwassergewinnungsanlagen sowie Erosionseinflüsse, insbesondere durch eine intensive landwirtschaftliche Nutzung, eine Deformation

der Erdoberfläche bedingen (KREMERS 1990, S. 10).

Im Folgenden soll das Untersuchungsgebiet in der Niederrheinischen Bucht unter Berücksichtigung der beschriebenen Differenzierung der Bodenbewegungen bezüglich Geologie, Hydrologie und Tektonik vorgestellt werden.

2.3 Geologie, Hydrologie und Tektonik im Arbeitsgebiet

Das Arbeitsgebiet liegt im Städtedreieck Aachen - Bonn - Mönchengladbach und befindet sich damit im südlichen Gebiet der Niederrheinischen Bucht. Die Eingrenzungen der Niederrheinischen Bucht werden durch den Kreis Viersen im Norden und den Kreis Euskirchen in der Eifel im Süden festgesetzt. Ausgehend vom Rheinischen Schiefergebirge im Bergischen Land dehnt sich die Niederrheinische Bucht von Osten ausgehend nach Westen und Norden trichterförmig aus und erstreckt sich im Westen bis in die Niederlande (KLOSTERMANN et al. 1998, S. 558).

Innerhalb dieses Gebietes befindet sich eines der größten Braunkohlevorkommen Europas. Im gesamten Gebiet sind etwa 55 Mrd. t Braunkohle als geologische Vorräte nachweisbar, von denen etwa 35 Mrd. t wirtschaftlich gewinnbare Vorräte darstellen. Im Rheinland ergeben sich durch die Braunkohlelagerstätten in den Tagebauten Garzweiler, Hambach und Inden drei Abbauswerpunkte (RWE POWER AG 2011, S. 10-13). Derzeit liegt die Braunkohleförderung der gesamten Bundesrepublik Deutschland bei etwa 169.4 Mio. t. Davon werden etwa 90.7 Mio. t alleine durch die RWE Power AG abgebaut. Etwa 90 % der geförderten Braunkohle werden in tagebaunahen Kraftwerken verstromt oder zur Erzeugung von Fernwärme verwendet. Bundesweit decken die Kraftwerke auf der Basis von Braunkohle nahezu ein Viertel der deutschen Stromversorgung. Alleine in Nordrhein-Westfalen werden etwa 40 % des gesamten Stroms aus Braunkohle gewonnen (KLOSTERMANN et al. 1998, S. 558 und RWE POWER AG 2011, S. 6).

Die Niederrheinische Bucht entwickelte sich in ihrer derzeitigen Ausprägung als beckenförmiges Senkungsgebiet vor etwa 30 - 35 Mio. Jahren durch das gebietsweise Einsinken im Rheinischen Schiefergebirge (SCHÄFER 2004, S. 1). Die Grundlage dieses Beckens ist durch feste Gesteinsmassen aus dem Paläozoikum gegeben. Darüber befinden sich tertiäre Lockersedimente mit einer Mächtigkeit von etwa 1000 Metern. In diese Lockersedimente, die eine Wechsellagerung von Ton, Sand und Kies vorweisen, sind auch die Braunkohlelagerstätten des Rheinlandes eingebettet (RATHSMANN 1986, S. 82 und SCHÄFER 2004, S. 1). Die Braunkohleflöze haben sich durch Luftabschluss und Kompaktion eines riesigen Torfmoors durch eine Überdeckung von Sand und Ton zur Zeit des Oligozäns und Miozäns gebildet (KLOSTERMANN et al. 1998, S. 559).

Durch tektonische Einwirkungen wurde die Niederrheinische Bucht in unabhängige Schollen geteilt (siehe Abbildung 2.1). Die einzelnen Hauptschollen Kölner-, Erft-, Rur- und Venloer Scholle sind durch überwiegend NW-SO-streichende, teilweise auch durch W-O-verlaufende Verwerfungen begrenzt. An diesen Störungszonen mit senkrechten Verwurfsbeträgen von mehreren Hundert Metern existiert eine Vielzahl von weiteren Verwerfungen, welche zu einer weiteren Aufgliederung der Hauptschollen führt (SCHÄFER 1999, S. 150 und RATHSMANN 1986, S. 82).

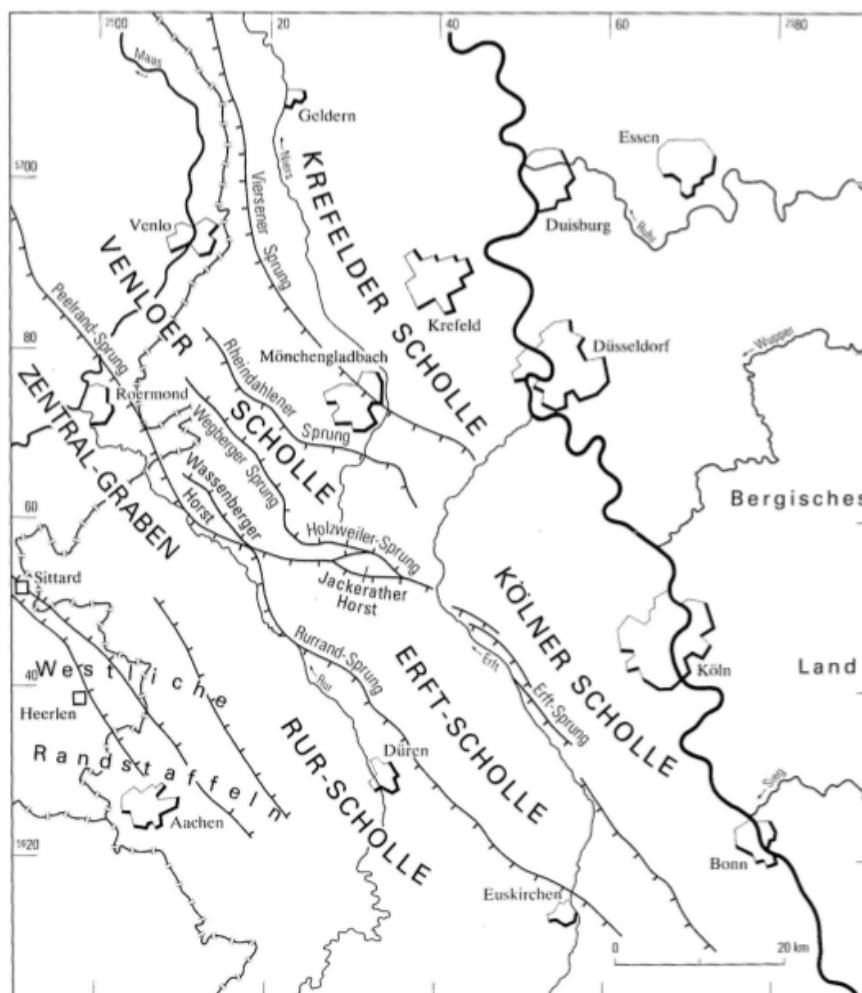


Abbildung 2.1: Tektonische Übersicht der Niederrheinischen Bucht (aus KLOSTERMANN et al. 1998, S. 12)

Auch in der Gegenwart ist die Niederrheinische Bucht in tektonischer Hinsicht aktiv. Sie zählt deutschlandweit zu den Gebieten mit den häufigsten Erdbeben. Beispielfhaft seien hier das Beben von Heerlen am 20. Dezember 1981 mit einer Magnitude von 4.4 auf der Richter-Skala und das Beben von Roermond am 13. April 1992 mit einer Stärke von 5.9 erwähnt (KLOSTERMANN et al. 1998, S. 563).

Von Natur aus sind die Lockersedimente des Tertiärs mit Grundwasser gefüllt. Diese beinhalten Tonhorizonte in weiträumiger Ausdehnung, die wie die abgelagerten Braunkohlevorkommen weitestgehend wasserstauend sind und das Grundwasservorkommen in eine Vielzahl übereinandergeordneter Grundwasserhorizonte gliedern. Mit Ausnahme des obersten, freien Grundwasserpegels sind alle Grundwasserstockwerke artesisch gespannt, d.h. es wirkt ein erheblicher Druck auf die ober- und unterhalb gelagerten Schicht aus wasserleitenden Materialien wie Kies und Sand (SCHÄFER 1999, S. 150 und RATHSMANN 1986, S. 82).

Zur sicheren Förderung des Braunkohlevorkommens ist die Stabilisierung der Tagebauten und Böschungen stets zu gewährleisten. Dazu ist in den Gebirgsschichten eine Absenkung des Grundwassers notwendig, die zu Absenkungstrichtern von erheblicher Reichweite in der Umgebung der Braunkohleabbaugebiete führen. Eine ausschließliche Begrenzung auf die tatsächliche Abbaufäche ist aus

hydrologischen Gründen nicht möglich. Der als Sumpfung bezeichnete Vorgang wird durch den Zusammenschluss aus sogenannten Brunnengalerien, bestehend aus einzelnen reihenförmig angeordneten und leistungsstarken Filterbrunnen, an den Tagebaurändern realisiert. Häufig müssen für diesen Vorgang bis zu fünf Grundwasserhorizonte entwässert werden, da davon ausgegangen werden kann, dass sich bis zu drei Grundwasserstockwerke oberhalb des Braunkohleflözes befinden und jeweils ein weiteres zwischen und unterhalb des tiefsten abzubauenen Flözes (SCHÄFER 1999, S. 150 und RATHSMANN 1986, S. 82).

Sofern keine Bewegungen an der Erdoberfläche nachweisbar sind, befinden sich die Schichten des geologischen Gebirges physikalisch betrachtet im Gleichgewicht, d.h. Lasten, Stützkräfte und Drücke werden ausgeglichen. Diese Balance wird durch die Absenkung und Entspannung des Grundwassers unterbrochen (RATHSMANN 1986, S. 82). Die Folge ist eine Änderung der Spannungsverhältnisse in den Gesteinsschichten, die aufgrund von Konsolidationssetzungen zu Bodensetzungen an der Erdoberfläche führt. Unter Konsolidation wird das zeitlich verzögerte Zusammendrücken der Bodenschichten und der zeitverzögerte Abbau des Porenwasserüberdrucks verstanden (SCHÄFER 2004, S. 3). Eine Grundwasserabsenkung führt zu einem Auftriebsverlust und demnach zu einer Steigerung der Belastung der unteren Gebirgsschichten. Durch die Grundwasserentspannung erfolgt zum anderen ein Rückgang des natürlichen Porenwasserüberdrucks, wodurch sich die Porenräume verdichten können. Diese Porenräume wären ohne den Entspannungsprozess stets wassergefüllt und somit nicht kompressibel. Beide Vorgänge führen im Sinne einer Kornumlagerung zu Verdichtungen und folglich zu Setzungsprozessen der Erdschichten (RATHSMANN 1986, S. 82). Das Setzungsverhalten ist dabei abhängig von der Kompressibilität der einzelnen Lockergesteine. Kies und Sand geben aufgrund ihrer relativ großen Porenräume Wasser schnell ab, sodass das Setzungspotential als sehr gering einzustufen ist, während der Wasserabfluss in tonigen Schichten aufgrund des kleinen Porenvolumens sehr langsam verläuft und das Setzungsverhalten als kontinuierlicher Prozess betrachtet werden kann (SCHÄFER 1999, S. 150).

In der Niederrheinischen Bucht verlaufen die Senkungsbewegungen an der Erdoberfläche zeitlich langsam und kontinuierlich ab. Aufgrund einer gleichmäßigen Grundwasserabsenkung parabelförmiger Natur entstehen durch die Bodensenkungen ebenfalls weiträumige Senkungsmulden. Dadurch treten im Allgemeinen keine schadensrelevanten Auswirkungen auf baulichen Anlagen auf. In Bereichen mit geologischen Besonderheiten wie tektonischen Verwerfungen oder Flussniedergebieten mit Überschwemmungsboden (Auelehm) kann es jedoch auch zu unregelmäßigen Setzungen kommen, die wiederum zu Bergschäden führen können (SCHÄFER 2004, S. 3-7).

Die Braunkohleförderung verursacht eine Vielzahl von Veränderungen mit weitreichenden Auswirkungen. Aus der Absenkung des Grundwasserspiegels kann neben der bereits diskutierten Absenkung der Erdoberfläche sowohl eine Änderung der ursprünglichen Grundwasserfließrichtung als auch eine Umgestaltung der Einzugsgebiete von Grundwassernutzern resultieren. Diese Modifikationen führen folglich zu Diskussionen unterschiedlicher Fachbereiche auf ökologischer, ökonomischer und politischer Ebene (KIRCHER 2004, S. 3). Um Erkenntnisse über das Verhalten der Erdoberfläche während des Braunkohleabbaus sowie dessen Folgeerscheinungen gewinnen zu können, ist die Beobachtung und Überwachung der betroffenen Gebiete unabdingbar.

Zur Erfassung der Grundwasserveränderungen wurde ein Netz von Pegelbeobachtungen einge-

richtet. Die Detektion von Deformationen der Erdoberfläche erfolgt klassischerweise durch periodische Wiederholungsnivellements. Das Prinzip der sogenannten Deformationsanalyse im Rahmen der klassischen Landesvermessung wird in Kapitel 3 ausführlich vorgestellt.

3. Klassische Landesvermessung

3.1 Deformationsanalyse

Deformationen an der Erdoberfläche sind ein nicht selten auftretendes, vielmehr fast beständiges und unaufhörliches Naturphänomen. Alleine in Nordrhein-Westfalen sind nahezu ein Drittel der Landesfläche von Boden- bzw. Bergsenkungen oder tektonischen Bewegungen betroffen (BOJE et al. 2008, S. 9). Damit erfährt die Erdoberfläche dieses Landes andauernde Veränderungen in einem Ausmaß, wie es deutschlandweit in keinem anderen Bundesland vorkommt. Dies erfordert unumgänglich sowohl die Feststellung als auch eine regelmäßige Kontrolle dieser Bodenbewegungen. Die Zielrichtung einer sogenannten Deformationsanalyse ist nach KREMERS (1990, S. 10) im Allgemeinen vielseitig. Deformationsanalysen in der objektbezogenen Ingenieurgeodäsie dienen als Frühwarnsysteme zur rechtzeitigen Gefahrenerkennung und zur entsprechenden Anordnung von Maßnahmen zur Abwehr dieser Sicherheitsrisiken. In der Landesvermessung besteht das primäre Ziel in der Erfassung und Überwachung der Festpunktfelder, um Stabilitätsaussagen treffen zu können und anhand dieser Informationen bestimmte Festpunkte als Anschlußpunkte für Folgevermessungen unterschiedlicher Anwender auszuzeichnen. Dazu werden in der Regel geodätische Netze angelegt, die in fest vorgegebenen zeitlichen Abständen wiederholt gemessen werden.

In der Landesvermessung werden seit mehreren Jahrzehnten spezielle periodische Höhenmessungen, die sogenannten Leitnivellements, durchgeführt, um die Überwachung von Erdoberflächenbewegungen zu gewährleisten (vgl. HAUPT 1999 oder BOJE et al. 2008). Die Leitnivellements im Landesgebiet unterliegen nach § 8 des Gesetzes über die Landesvermessung und das Liegenschaftskataster (Vermessungs- und Katastergesetz - VermKatG NRW) den Aufgaben der Landesvermessung. Demnach ist die Landesvermessung aufgerufen, Festpunktfelder für die Lage- und Höhenkomponente sowie die Schwere einzurichten und diese dem Anwender in Form von Geobasisdaten zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren sind diese Festpunktfelder nach der Spezifizierung in § 4 Abs. (3) in der zugehörigen Verordnung zur Durchführung des Gesetzes über die Landesvermessung und das Liegenschaftskataster (DVOzVermKatG NRW) stets aktuell zu halten.

Daneben sollen aus den punktbezogenen Deformationen in den Festpunktfeldern flächendeckend Aussagen über das Bewegungsverhalten ganzer Gebiete an der Erdoberfläche abgeleitet werden. Nach der Analyse dieser Deformationen und einer mathematischen Erfassung des Bewegungsverhaltens kann gegebenenfalls anschließend eine Prognose über die zukünftige Bewegung realisiert werden. Zur flächenhaften Modellierung könnten hierzu Methoden aus der Geostatistik, insbesondere deterministische und stochastische Approximationsverfahren, verwendet werden. Deformationsanalytische Untersuchungen könnten nach KREMERS (1990, S. 10) zudem zur Beweissicherung und Gutachtenerstellung im Zusammenhang mit Entschädigungsfragen bei Bergbauschäden sowie Fragestellung des Umweltschutzes und der Wasserwirtschaft verwendet werden. In Folge von Höhenvariationen könnten ökologisch wertvolle Feuchtgebiete austrocknen und umgekehrt Trockenlandschaften versumpfen. Auch die Fließrichtung von Gewässern kann durch eine Höhenänderung an der Erdoberfläche beeinflusst werden.

Die traditionellen Wirkungsfelder der Grundlagenvermessung im Bereich der Landesvermessung können folglich um Anwendungen der Deformationsanalyse erweitert werden. Dies fordert jedoch zwingend eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachbereiche Geodäsie, Geologie, Hydrologie und Wasserwirtschaft.

Da in dieser Arbeit insbesondere vertikale Bodenbewegungen betrachtet werden, beziehen sich die Begriffe Deformation und Bodenbewegung im Folgenden auf die Höhenkomponente. Das aus messtechnischer Sicht verwendete Verfahren zur Höhenerfassung ist das geometrische Nivellement, dessen Grundprinzip im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden soll.

3.2 Grundprinzip des Nivellements

In der Geodäsie wird mit dem geometrischen Nivellement ein klassisches Verfahren zur Bestimmung von Höhenunterschieden zwischen zwei Punkten bezeichnet. Das dabei zugrundeliegende Prinzip basiert, ausgehend von einem Nivellierinstrument, auf der horizontalen Anzielung von senkrecht aufgestellten Nivellierlatten auf dem gesuchten Aufsetzpunkt (siehe Abbildung 3.1). Aufgrund der Anordnung der Aufsetzpunkte werden diese entsprechend der Betrachtung des Beobachters am Instrument als Vorblick (v_i) und Rückblick (r_i) bezeichnet. Nach der Ablesung des horizontalen Zielstrahls an den Latten folgt der Höhenunterschied Δh zwischen den Punkten aus den Differenzen aus Vor- und Rückblick:

$$\Delta h_i = r_i - v_i. \quad (3.1)$$

Da diese Höhenmessung jedoch nur einen relativen Charakter besitzt, erfolgt zur Bestimmung einer absoluten Information der Anschluss an einen sogenannten Höhenfestpunkt mit bekannter Höhe. Dazu wurde Deutschland, ausgehend von dem sogenannten Normalhöhenpunkt, dem per Konvention festgelegten Null- oder Referenzpunkt an der Berliner Sternwarte, mit einem Netz von Nivellementpunkten (NivP) überdeckt (WITTE und SCHMIDT 2006, S. 15f.). In ihrer Gesamtheit bilden die Nivellementpunkte das sogenannte Nivellementpunktfeld, welches im Rahmen der hoheitlichen Daseinsvorsorge von der jeweiligen Landesvermessung stets aktuell gehalten werden muss und als einheitliches Höhensystem als Bezugshorizont für die Höhenmessung dient (FRÖHLICH und MÜLLER 1986, S. 1).

Ausgehend von einem höhenmäßig bekannten Anfangspunkt H_A kann folglich die Höhe H_E zu einem beliebigen Endpunkt nach

$$H_E = H_A + \Delta H = H_A + \sum_{i=1}^I \Delta h_i \quad (3.2)$$

durch die Aneinanderreihung einzelner Höhenbestimmungen zu einem sogenannten Nivellementzug bestimmt werden (siehe Abbildung 3.1). Zur Kontrolle der Höhenmessung sollte der Abschlusspunkt idealerweise ebenfalls höhenmäßig bekannt sein, da auf diese Weise der sogenannte Höhen-

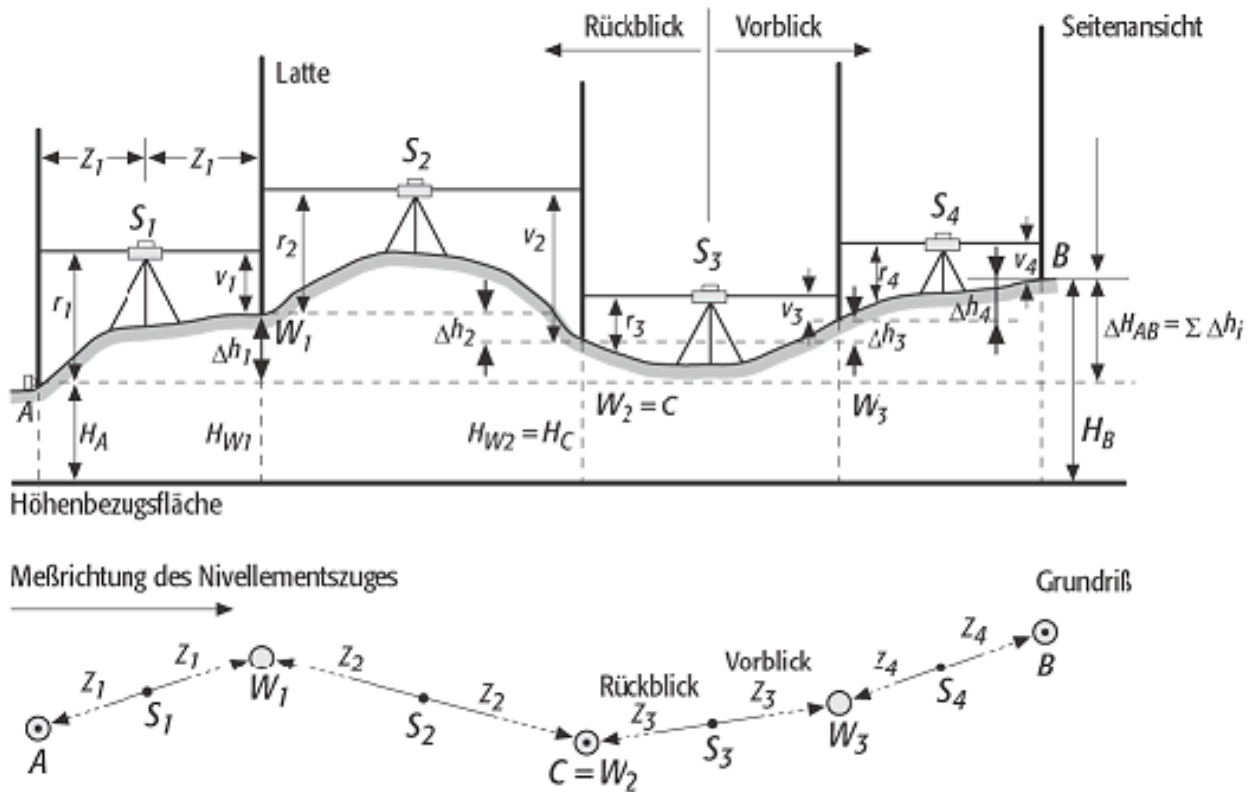


Abbildung 3.1: Grundprinzip des geometrischen Nivellements (aus GEODZ 2012)

abschlusswiderspruch bestimmt werden kann. Dies ist die Abweichung der Summe aller Höhenunterschiede von der gegebenen Höhendifferenz der höhenmäßig bekannten Anfangs- und Endpunkte,

$$w = (H_E - H_A) - \sum_{i=1}^I \Delta h_i. \quad (3.3)$$

Durch die Aneinanderreihung einzelner Beobachtungen pflanzen sich jedoch auch entstehende Messabweichungen fort. Je nach geforderter Genauigkeit σ_{niv} werden diverse Forderung an die Messung gestellt. Zur Genauigkeitsklassifizierung werden einfache technische Baunivellements ($\sigma_{niv} \leq 6$ mm), Ingenieurnivellements zur Durchführung von Festpunktnivellements ($\sigma_{niv} \leq 2$ mm) sowie Feinnivellements für amtliche Nivellementnetze und Überwachungsaufgaben ($\sigma_{niv} \leq 0,5$ mm) unterschieden (WITTE und SCHMIDT 2006, S. 267). Die Genauigkeitsangabe beschreibt die Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement, d.h. einem im Hin- und Rückweg über eine Strecke von 1 km gemessenen Höhenunterschied (WITTE und SCHMIDT 2006, S. 281).

Da die im Rahmen einer Deformationsanalyse eingesetzten Leitnivellements (siehe Kapitel 3.1) als Fein- oder Präzisionsnivellement durchgeführt werden, sollen im Folgenden spezielle Maßnahmen zur Reduzierung von systematischen Abweichungen und groben Fehlern aufgezeigt werden.

Zunächst ist in diesem Zusammenhang nach WITTE und SCHMIDT (2006, S. 286-288) auf die Messung mit gleichen Zielweiten (max. 30 m), die Einhaltung der Messreihenfolge „Rückblick r_1 , Vorblick v_1 , Vorblick v_2 , Rückblick r_2 “ zur Kontrolle der somit zweimal gemessenen Höhenunterschiede sowie die Wahl der Latten- und Instrumentenstandorte auf festem Untergrund und eine Messung in Hin- und Rückweg zu achten. Um die sogenannte Horizontschräge, d.h. eine gewisse

Schiefstellung der Zielachse gegenüber der Horizontalen, zu berücksichtigen, muss der Beobachter beim Einspielen der Dosenlibelle eine Ausrichtung des Fernrohrobjektivs immer zur selben Latte und somit abwechselnd zum Vor- bzw. Rückblick streng einhalten („Verfahren rote Hose“). Des Weiteren sollte bei der Anzielung von höhenmäßig bekannten Punkten stets die gleiche Latte verwendet werden. Auch die auftretenden meteorologischen Bedingungen während des Messvorgangs sollten nicht unbeachtet bleiben.

Daraus wird bereits ersichtlich, dass das geometrische Nivellement grundsätzlich ein personell und finanziell aufwendiges Verfahren darstellt. Dennoch wird aus der historischen Entwicklung der Leitnivellements, insbesondere in Bergbaugebieten, die Notwendigkeit von periodischen Kontroll- und Überwachungsmessungen deutlich. Dieser geschichtliche Ablauf soll im Folgenden kurz dargelegt werden.

3.3 Historische Entwicklung und aktueller Stand der Leitnivellements in Nordrhein-Westfalen

Zur Erfassung und Überwachung von Bodenbewegungen auf der Erdoberfläche werden spezielle periodische Nivellementmessungen durchgeführt. Diese Wiederholungsnivellements in den Bergbaugebieten Nordrhein-Westfalens werden als Leitnivellements bezeichnet. Eine Ausführung erfolgt als Präzisionsnivellement nach den messtechnischen Anforderungen des Nivellementnetzes 1. Ordnung. Die Ausdehnung der Leitnivellementnetze verläuft jedoch über die Nivellementlinien aller 3 Ordnungen des amtlichen Höhenfestpunktfeldes und über Linien, die aus markscheiderischen Gründen erforderlich sind (vgl. VPERL 1996, NIVP-ERL 2003 und LOBA UND LVERMA 1999). Obwohl die Grundidee des Leitnivellements die wiederholte Beobachtung eines identischen Netzes ist, muss in der Praxis davon ausgegangen werden, dass ein solches Nivellementnetz, beispielsweise aufgrund einer mit der Zeit notwendig gewordenen geographischen Verlagerung des Bergbaugebietes oder einer bestimmten Rate von zerstörten Punkten, stets geringfügigen Veränderungen unterliegt. Demnach ist sowohl ein Zeitplan, als auch ein Netzentwurf zu erarbeiten. Dies liegt im Verantwortungsbereich der Oberen Bergbaubehörde (Abteilung 8 Bergbau und Energie in NRW bei der Bezirksregierung Arnsberg) und der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW (BOJE et al. 2008, S. 34).

Die großen Bergbaugebiete in Nordrhein-Westfalen umfassen das Ruhrgebiet, die Rheinische Bucht, den linken Niederrhein und das Ibbenbürener Revier. Die Leitnivellements Nordrhein-Westfalens betreffen etwa 22 % der gesamten Landesfläche (FRÖHLICH und MÜLLER 1986, S. 2). Dabei wird überwiegend im Ruhrgebiet und am Linken Niederrhein um Kamp-Lintfort, jedoch auch in den in ihrer räumlichen Ausdehnung kleineren Gebieten, wie dem Ibbenbürener Bergbaurevier, unter Tage Steinkohle abgebaut. Im Aachener und Erkelenzer Revier wurde der Steinkohleabbau in der Mitte der neunziger Jahre zwar eingestellt, jedoch muss das Leitnivellement aufgrund des sich ändernden Wasservorkommens weiterhin überwacht werden. In der linksniederrheinischen Bucht erfolgt die Förderung von Braunkohle im Tagebau. Daneben gibt es in ihrem Einflussgebiet begrenzte Bergbaugebiete, wie die bis 1992 ausgeführte untertägige Gewinnung von Erz in Meggen im Sauerland

oder den Salzabbau in Borth am Niederrhein (BOJE et al. 2008, S. 34). In Abbildung 3.2 sind die Leitnivellementgebiete Nordrhein-Westfalens dargestellt.

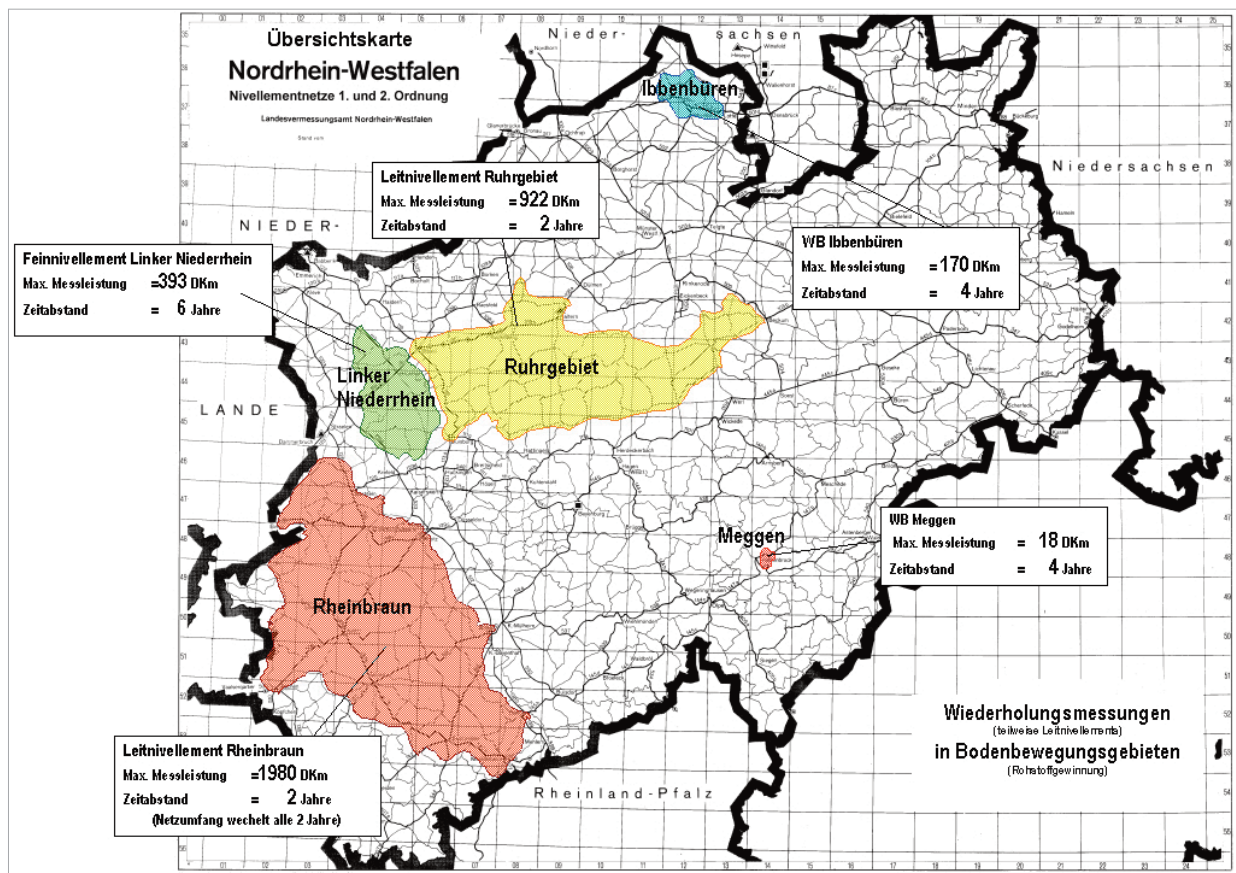


Abbildung 3.2: Die aktuellen Leitnivellements in Nordrhein-Westfalen (aus BOJE et al. 2008, S. 34)

Im Folgenden werden die einzelnen Bergbaugebiete „Ruhrgebiet“, „Rheinbraun“, „Linker Niederrhein“, „Aachen-Erkelenzer-Revier“ und „Erzbergbau Meggen“ mit ihrer historischen Entwicklung vorgestellt.

3.3.1 Das Leitnivellement „Ruhrgebiet“

Aufgrund der raschen Entwicklung im Zusammenhang der Industrialisierung im Ruhrgebiet konnte die Kohlegewinnung drastisch gesteigert werden. Zahlreiche technische Entdeckungen wie die Erfindung der Dampfmaschine und ein zusätzlicher Ausbau des Verkehrsnetzes, insbesondere für Schiffs- und Eisenbahnverkehr, führten zu einem wirtschaftlichen Aufschwung und einer großen Umgestaltung des Ruhrgebietes um die Jahrhundertwende (HAUPT 1999, S. 184). In dieser Phase schaffte der Oberbergamtsmarkscheider Bimler mit dem „Grundnivellement 1899“ (HAUPT 1999, S. 184) die Voraussetzung für die heutigen Leitnivellements. Die Besonderheit dieses zwei Jahre später zur ersten Wiederholungs- und Verdichtungsmessung herangezogenen Nivellementnetzes war der übergeordnete Durchführungsbereich und der Anschluss an Punkte der Landesaufnahme. Zuvor wurden

Nivellementnetze von diversen Stellen, wie beispielsweise den Bergbaubehörden, kommunalen Behörden oder Entwässerungsgenossenschaften für den Eigengebrauch verwendet, sodass diese auf die notwendigsten Höhenmessungen beschränkt waren und auf einen Anschluss an Punkte der Landesaufnahme weitestgehend verzichteten (HAUPT 1999, S. 188).

Seit 1948 wird das Leitnivellement „Ruhrgebiet“ im Zweijahres-Turnus durchgeführt, wobei sich das Landesvermessungsamt bis 1969 auf die Nivellementbeobachtungen der Umringschleife beschränkte, da aufgrund von ausreichender Beteiligung anderer Stellen kein Bedarf bestand. Erst mit dem Rückgang des Bergbaus war das Landesvermessungsamt dazu gezwungen, die fehlenden Leistungen zu kompensieren und sich an den Beobachtungen im Inneren des Gebietes zu beteiligen (HAUPT 1999, S. 192).

Die aktuelle Dimension des Leitnivellements „Ruhrgebiet“ ist durch das Netz zwischen den Städten Duisburg, Wesel und Ahlen gegeben. Insgesamt umfasst das Nivellementnetz 795 Doppelkilometer Nivellement mit 1370 Messpunkten (Stand 2006, BOJE et al. 2008, S. 35). Da in Untertagegebieten hohe Senkungsbeträge im Meterbereich erwartet werden können, erfolgten die Beobachtungen innerhalb von nur 8 Wochen, im senkungsaktiven Kernbereich sogar innerhalb von nur 2 Wochen (BOJE et al. 2008, S. 35).

Aus heutiger Sicht kann dem Leitnivellement im Ruhrgebiet eine Vorbildfunktion für andere Bergbaugebiete zugeordnet werden.

3.3.2 Das Feinnivellement „Linker Niederrhein“

Unter dem Namen „Feinnivellement“ führte der „Verein zur Aufstellung eines Entwässerungsplanes für das linksniederrheinische Gebiet“, der Vorläufer der heutigen „Linksniederrheinischen Entwässerungsgenossenschaft (LINEG)“ seit 1908 ein privat initiiertes Wiederholungsnivellement durch. Das Landesoberbergamt (LOBA) und das Landesvermessungsamt (LVerMA) beteiligten sich erst ab 1950 an dieser Initiative (HAUPT 1999, S. 192). Seit 1984 wird das Feinnivellement mit einer periodischen Wiederholung von 6 Jahren beobachtet. Die Organisation und Planung sowie die Durchführung des inneren Netzes 2. und 3. Ordnung unterliegen der LINEG, während der Zuständigkeitsbereich des Landesvermessungsamtes die Vermessung der Umringschleife und die Berechnungen umfasst (HAUPT 1999, S. 192).

Das Gebiet wird durch die Städte Duisburg, Xanten und Krefeld begrenzt und umfasst etwa 735 Kilometer Doppelnivellement und 1308 Nivellementpunkte (Stand 2006, BOJE et al. 2008, S. 37).

3.3.3 Das Leitnivellement „Rheinbraun“

Die Notwendigkeit der Durchführung eines Leitnivellements ergab sich für das Gebiet der rheinischen Bucht erst zu Beginn der fünfziger Jahre, da das Einflussgebiet aufgrund der Nähe des Gebietes der Rheinbraun AG sowie des Steinkohlegebietes im Raum Aachen-Eschweiler durch örtliche Nivellementnetze ausreichend überwacht war (HAUPT 1999, S. 193 und FRÖHLICH und MÜLLER 1986, S. 7). Das erste unter der Bezeichnung „Leitnivellement“ gemessene Nivellementnetz erfolgte 1949 durch das Bonner Oberbergamt. Erst seit 1957 obliegt die Durchführung des Leitnivellement dem

Landesvermessungamt in Zusammenarbeit mit dem Landesoberbergamt (HAUPT 1999, S. 193 und BOJE et al. 2008, S. 35). Da die Bodenbewegungen in Braunkohletagebauten als sehr langsam und überwiegend kontinuierlich einzustufen sind, ist eine Wiederholungszeitspanne von 5 Jahren ausreichend. Das Leitnivellement „Rheinbraun“ bedeckt die Niederrheinische Bucht zwischen Aachen, Bonn und Mönchengladbach und umfasste im Jahr 2005 2177 Doppelkilometer Nivellement mit 4307 Punkten (BOJE et al. 2008, S. 36).

Die stillgelegten Steinkohlegebiete im Raum um Aachen und Erkelenz wurden bis zu einem Beschluss im Jahr 2006 über die Durchführung eines neuen Leitnivellements „Aachen-Erkelenzer-Revier“ ebenfalls durch das Leitnivellement „Rheinbraun“ abgedeckt.

Das Leitnivellement „Rheinbraun“ deckt ebenfalls das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ab und dient als Datengrundlage für die Anwendungsfragen in Kapitel 6.

3.3.4 Das Leitnivellement „Aachen-Erkelenzer-Revier“

Der Tagebau im Aachener Revier wurde im Jahr 1992 beendet, die Einstellung des Kohleabbaus im Erkelenzer Revier folgte 5 Jahre später. Während der untertägigen Steinkohlegewinnung ist ein kontinuierlicher Pumpvorgang zur Entnahme des den Grubenbauen zulaufenden Grundwassers zwingend erforderlich. Dieser Vorgang wird auch als Grubenwasserhaltung bezeichnet. Nach der Einstellung eines Tagebaus wird aus finanziellen Gründen häufig auf die Fortsetzung dieser Wasserhaltung verzichtet (BAGLIKOW 2003, S. 1). Die Abbauphase des Steinkohlebergbaus und die Beendigung der Grubenwasserhaltung in den Jahren 1993/1994 sowie 1998 führte auch in den Bergbaurevieren Aachen und Erkelenz zu einer Flutung der Grubenstollen. Mit dem Wiederanstieg des Grundwassers sind bis an die Erdoberfläche reichende Hebungserscheinungen verbunden.

Dies führte im Raum Wassenberg und Hückelhoven zu schadensrelevanten Auswirkungen auf die baulichen Anlagen, sodass eine Fortführung einer periodischen Überwachung der Bodenbewegungen in diesem Gebiet dringend erforderlich ist (BOJE et al. 2008, S. 37, BAGLIKOW 2003, S. 1 und BAGLIKOW 2011, S. 12-15). Dazu wurde im Jahr 2006 ein neues Leitnivellement „Aachen-Erkelenzer-Revier“ begründet, welches ab 2007 in einem Vierjahres-Turnus zwischen den Messungen für das Leitnivellement „Rheinbraun“ durchgeführt wird. Das Nivellementnetz umfasst 282 Doppelkilometer Nivellement und 511 Nivellementpunkte (Stand 2007, BOJE et al. 2008, S. 37).

3.3.5 Das Leitnivellement „Ibbenbüren“

Das Ibbenbürener Revier befindet sich nordöstlich von Ibbenbüren im Tecklenburger Land und umfasst ein relativ kleines Gebiet mit einer Ausdehnung von 10 x 15 km². Das im Jahr 1991 erstmals vom Landesoberbergamt und Landesvermessungamt durchgeführte Leitnivellement „Ibbenbüren“ erfolgt mit einer Wiederholungszeitspanne von 4 Jahren. Das Nivellementnetz umfasst 142 Doppelkilometer Nivellement und etwa 200 Nivellementpunkte (Stand 2007, aus BOJE et al. 2008, S. 36).

3.3.6 Das Wiederholungsnivellement „Erzbergbau Meggen“

Die Metallerzgrube Meggen bei Lennestadt im Sauerland wurde im Jahr 1992 eingestellt. Nach der Einstellung der Grubenwasserhaltung erfolgte wenige Jahre später die Flutung des Grubenstollens. Wie auch im Aachen-Erkelenzer Revier führte dieser Vorgang zu Bodenbewegungen in Form von Hebungen an der Erdoberfläche, sodass auch hier auf eine Fortsetzung der periodischen Überwachung nicht verzichtet werden kann. Das Nivellementnetz in dem kleinen Gebiet umfasst lediglich 16 Doppelkilometer Nivellement und wird im Vierjahres-Turnus durchgeführt (Stand 2007, aus BOJE et al. 2008, S. 38).

3.4 Auswertung der Leitnivellements

Seit 1978 unterliegen die Messung und die Auswertung aller Leitnivellements der Zuständigkeit der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW (ehemaliges Landesvermessungsamt, LVerMA). Der Grundsatz dessen ist durch die „Richtlinien für die Ausführung des Leitnivellements im Bezirk des Landesoberbergamts Nordrhein-Westfalen“ (LOBA UND LVERMA 1999) gegeben. Diese regeln unter anderem den Aufbau und die Vorbereitung des Leitnivellementnetzes sowie die Durchführung und Auswertung der Messung und geben zulässige Abweichungen vor (BOJE et al. 2008, S. 39). Nachdem die Messauswertung früher nach dem in der Geodäsie üblichen hierarchischen Prinzip „vom Großen ins Kleine“ erfolgte, wurde die Strategie durch eine Gesamtausgleichung aller Beobachtungen ersetzt. Diese umfasst eine Diagnoseausgleichung, welche zur Aufdeckung von groben Fehlern und zur Ermittlung der inneren sowie äußeren Netzgenauigkeit mit zunehmendem Beobachtungsmaterial erneut durchgeführt wird, sowie eine endgültige Ausgleichung nach der Elimination aller Fehler, der Vervollständigung der Daten und der Auswahl geeigneter Anschlußpunkte (BOJE et al. 2008, S. 39). Die Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW nutzt zur Umsetzung das Ausgleichungsprogramm LINIV (vgl. FRÖHLICH und MÜLLER 1986, LINDSTROT 1982, GEOBASIS.NRW 2010).

Die in dieser Arbeit herangezogenen Leitnivellement-Daten umfassen jeweils eine Punkt- und eine Streckendatei. Während die Punktdatei im Wesentlichen eine Punktkennzeichnung der einzelnen Punkte, Informationen über die Lage (Gauß-Krüger-Format), die Höhe (Deutsches Hauptdreiecksnetz, DHHN) und die Schwere, sowie eine Beschreibung zur Lokalisierung der einzelnen Punkte enthält, umfasst die Streckendatei die eigentlichen Beobachtungen, insbesondere die Höhenunterschiede und die Strecke zwischen zwei Nivellementpunkten.

Auf der Grundlage dieser Nivellementbeobachtungen kann beispielsweise, wie in HALSIG (2010) dargelegt, die Identifikation von Punktidentitäten aus allen Messepochen durchgeführt werden. Unter dem Begriff Punktidentitäten sollen im Folgenden Punkte verstanden werden, die Mehrfachmessungen unterzogen werden und in diesen Wiederholungszeiträumen stabil und von Deformationen unbeeinflusst sind. Zur Identifikation der identischen Punkte wird ein in HALSIG (2010, S. 17-26)

vorgestelltes, auf Hypothesentests basierendes, Detektionsverfahren verwendet, welches anschließend einen Gesamtausgleich aller Epochen mit datenadaptiver Parameterwahl ermöglicht. Damit soll der Messaufwand minimiert und gleichzeitig die Genauigkeit der Nivellementnetze gesteigert werden. Durch die Identifikation von unbewegten Punkten im Netz kann zudem die Redundanz in der Ausgleichung gesteigert und somit die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht werden (vgl. HALSIG et al. 2012). Eine ausführlichere Darlegung dieses Detektionsverfahrens ist in Kapitel 5 gegeben.

Neben der Erfassung, Überwachung und Bereitstellung der Daten der Landesvermessung obliegt dem amtlichen Vermessungswesen nach VERMKATG NRW 2005 § 1, Abs. (1) auch die Anpassung dieser Aufgabenerfüllung an den Fortschritt von Wissenschaft und Technik. Die Zielrichtung für die Zukunft ist die Forderung nach immer engmaschigeren Nivellementnetzen, um flächendeckend Höhenänderungen zur Verfügung stellen zu können. Allerdings stehen dieser Idealvorstellung rückläufige finanzielle und personelle Ressourcen des Landes Nordrhein-Westfalen sowie der beteiligten Kommunen, Verbände und Bergbaubetreiber entgegen (RIECKEN et al. 2011, S. 2). Um den Anforderungen des VERMKATG NRW 2005 dennoch gerecht zu werden, wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Ansätze diskutiert. In RIECKEN et al. (2011) wird beispielsweise auch für das Präzisionsnivellement die Nutzung von „Einfachmessungen“ anstelle der üblicherweise durchgeführten Strategie einer Messung über Hin- und Rückweg vorgeschlagen. Dies hat zur Folge, dass systematische Einflüsse nicht mehr verhindert werden, und aus den Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung keine statistischen Fehlermaße zur Qualitätssicherung und Messungsbeurteilung abgeleitet werden können. Daneben ist auch mit einem Genauigkeitsverlust zu rechnen, der jedoch durch eine optimierte Netzkonfiguration und eine Verkürzung der Messzeiten ausgeglichen werden soll.

Daneben gibt es zahlreiche Ansätze zur Kombination der Nivellementmessungen aus der klassischen Landesvermessung mit anderen geodätischen Verfahren. In erster Linie wurden dazu satellitengestützte GPS-Messungen mit den terrestrischen Messungen der Landesvermessung kombiniert (vgl. GÖRRES und CAMPBELL 1998, GÖRRES et al. 2006, BÜRGMANN et al. 2006, BOCK et al. 2012). Durch den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt der letzten Jahre gewann jedoch auch der Fachbereich der Radarfernerkundung zunehmend an Bedeutung, so dass insbesondere durch dessen geodätische Anwendungen, wie die Erstellung von digitalen Geländemodellen sowie der Erfassung von Bewegungen der Erdoberfläche, eine Kombination dieses Ansatzes mit den Anwendungsreichen der Landesvermessung realistisch erscheint (vgl. COLESANTI et al. 2001, KIRCHER 2004, ODIJK 2005).

In dieser Arbeit sollen dementsprechend Grundlagen, Voraussetzungen und Strategien für eine integrierte Modellierung von Nivellementmessungen und Daten aus der Radarfernerkundung erarbeitet werden. Das grundlegende Prinzip der Radarfernerkundung soll dazu zunächst in Kapitel 4 dargelegt werden.

4. Theoretische Grundlagen der Radar-Fernerkundung

Neben den in Kapitel 3 beschriebenen klassischen Verfahren in der Landesvermessung können Deformationen der Erdoberfläche auch ausgehend von Satellitenmissionen beobachtet werden. In der Radarfernerkundung können, basierend auf solchen Satellitendaten, prinzipiell Bodenbewegungen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich festgestellt werden (vgl. CROSETTO et al. 2009, S. 1). Das zugrunde liegende Prinzip ist das Radar („Radio Detection and Ranging“, zu deutsch meist „Funkmessverfahren“). Dieses wurde im zweiten Weltkrieg ursprünglich als elektronisches Ortungsverfahren mit dem Ziel eingesetzt, ein Objekt aufzuspüren und seine Entfernung und Geschwindigkeit zu messen (HEIN 1998, S. 1). Aufgrund der technischen Weiterentwicklung erfolgte die Möglichkeit einer flächenhaften Darstellung eines Gebietes. Im Folgenden bezeichnet der Begriff „Radar“ in dieser Arbeit bildgebende Seitensicht-Radarsysteme (engl. side looking radar), die von einer Trägerplattform, in der Regel einem Flugzeug oder Satelliten, Bildaufnahmen der Erdoberfläche machen.

Dieses Kapitel umfasst neben einer kurzen Darstellung der Satellitenmissionen ERS-1 und -2 (vgl. Kapitel 4.1), deren Aufnahmen in dieser Arbeit als Datengrundlage herangezogen werden, die Beschreibung von Konzept und Charakteristik des Radarprinzips (vgl. Kapitel 4.2). Die unterschiedlichen Radarsysteme werden vorgestellt: ausgehend vom konventionellen Radar mit realer Apertur (Real Aperture Radar, kurz: RAR, vgl. Kapitel 4.2.1) werden die Prinzipien der Radars mit synthetischer Apertur (Synthetic Aperture Radar, kurz: SAR, vgl. Kapitel 4.2.2) aufgezeigt. Durch die Anwendung von Interferometrie (SAR-Interferometrie, kurz: InSAR, vgl. Kapitel 4.4) können auf der Basis einer Auswertung der Signalphase zweier komplexwertiger SAR-Bilder Höhenmodelle für ein Gebiet erzeugt werden. Bei der differentiellen SAR-Interferometrie (kurz D-InSAR, vgl. Kapitel 4.5) wird die aus Bewegungen an der Erdoberfläche radial zum Sensor resultierende Differenzphase gesucht. Dazu muss zuvor der Phasenanteil der Topographie eliminiert werden. Um die auftretenden Beschränkungen, insbesondere die zeitlichen sowie geometrischen Dekorrelationsprozesse und die atmosphärische Laufzeitverzögerung, zu umgehen, wird zuletzt mit der Permanent-Scatterer-Interferometry (kurz: PSI, vgl. Kapitel 4.6) eine Modifikation der konventionellen D-InSAR-Methode vorgestellt.

4.1 Die Satellitenmissionen ERS-1 und -2

Die Aufnahme der in dieser Arbeit herangezogenen Daten erfolgte durch die European Remote Sensing-Satellitenmissionen (ERS-1 und -2) im Rahmen des gleichnamigen Programms der europäischen Weltraumorganisation (ESA). Im Folgenden soll eine kurze historische Entwicklung, eine Formulierung der Zielsetzung sowie eine Beschreibung der Orbit- und Systemparameter dieser Mission gegeben werden.

Die Satellitenmission ERS-1 startete im Jahr 1991 und wurde primär zur Erörterung ozeanischer

Fragestellungen, wie Beobachtungen der Polarmeere und des Eises, eingesetzt, konnte jedoch auch für terrestrische Anwendungsgebiete eingesetzt werden (KIRCHER 2004, S. 24 und KNABE 2004, S. 31). Um die unterschiedlichen wissenschaftlichen Anwendungsbereiche abzudecken, wurde die Gesamtmission in bestimmte Missionsphasen eingeteilt (GUTJAHR 2002, S. 15). Im Jahr 1995 startete die im Vergleich zur ERS-1 nahezu baugleiche Satellitenmission ERS-2 als Nachfolger des mit einer voraussichtlichen Lebensdauer von 3 Jahren konzipierten ERS-1-Satelliten. Da sich die Betriebsdauer des Satelliten ERS-1 jedoch störungsfrei verlängerte, konnten beide ERS-Satelliten in den Jahren 1995-1997 und 1998-2000 im Rahmen einer sogenannten Tandem-Mission gleichzeitig zur Datenaufnahme herangezogen werden. Bei der Tandem-Mission erfolgte eine spezielle Konfiguration beider Satellitenbahnen auf die Weise, dass die Aufnahmestreifen beider Satelliten in einem Zeitintervall von 24 Stunden nahezu übereinander liegen (GUTJAHR 2002, S. 16 und KNABE 2004, S. 31). Aufgrund der geringfügigen Änderungen an der Erdoberfläche ist auch die räumliche Kohärenz beider Bilder gewährleistet, so dass diese Konfiguration insbesondere zur Erstellung von interferometrischen Produkten im Rahmen der Radar-Interferometrie von wesentlicher Bedeutung ist.

Beide ERS-Satelliten wurden in eine sonnensynchrone und mit einer Inklination von $i = 8,5^\circ$ fast polare Umlaufbahn gebracht. Die Orbitparameter sind in Tabelle 4.1 dargelegt.

Tabelle 4.1: Orbitparameter der ERS-Satelliten (aus ESA 2012)

Bahnhöhe	782-785 km
Bahnneigung	98.52°
Umlaufzeit	100 min.
Repetitionrate	35 Tage

Die beiden Satelliten sind mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren, wie einem passiven Mikrowellen- und thermischen Infrarot-Radiometer (Along Track Scanning Radiometer ATSR) oder dem Active-Microwave-Instrument (AMI) ausgerüstet. Zur Positionsbestimmung sind die ERS-Satelliten mit Satellite Laser Ranging (kurz: SLR), Laser Retro Reflector (kurz: LRR) sowie Precise Range and Range Rate Equipment (kurz: PRARE) ausgestattet (vgl. ESA 2012).

Die hier verwendeten SLC-Aufnahmen stammen aus dem sogenannten Active-Microwave-Instrument (kurz: AMI) im Image-Betriebsmodus (engl.: image mode oder imaging mode). Grundsätzlich erlaubt das AMI drei unterschiedliche Betriebsmodi (Image-, Wind- und Wave-Mode), die an dieser Stelle jedoch nicht weiter differenziert werden sollen.

Das AMI arbeitet nach KNABE (2004, S. 32) grundsätzlich im C-Band mit einer Wellenlänge von $\lambda = 5,6$ cm (Frequenz $f = 5,3$ GHz) in der VV-Polarisation (siehe 4.3.1.2). Die Systemparameter des ERS-AMI sind in Tabelle 4.2 dargelegt.

Räumliche Auflösung	$30 \times 30 \text{ m}^2$
Streifenbreite (swath width)	100 km
Mittlerer Einfallswinkel	23°

Tabelle 4.2: Systemparameter des ERS-AMI (aus ESA 2012)

Weiterführende allgemeine Information zu den ERS-Satellitenmissionen können ESA (2012) entnommen werden¹.

4.2 Das Prinzip der Radar-Technik

Allgemein kann Radar als eine Methode verstanden werden, mit der aus reflektierten oder automatisch zurückgesendeten elektromagnetischen Wellen im Mikrowellenbereich Informationen über entfernte Objekte gewonnen werden können (RIECHMANN 2009, S. 15). Dabei wird unterschieden zwischen Primärradar, d.h. Radaranlagen, die ausschließlich nach dem Radar-Prinzip arbeiten und bei denen am Zielobjekt nur eine passive Reflexion stattfindet und Sekundärradar, welches mit aktiven Zielobjekten fungiert, die zu einer Antwort veranlasst werden.

Des Weiteren werden aktive und passive Fernerkundungsverfahren unterschieden. Während passive Systeme die von der jeweiligen Geländeoberfläche emittierte Strahlung im Mikrowellenbereich messen, senden aktive Systeme unmittelbar vom Aufnahmesystem erzeugte Mikrowellen zur Geländeoberfläche aus und erfassen die reflektierte Strahlung (GUTJAHR 2002, S. 23). Im Folgenden werden in dieser Arbeit ausschließlich aktive Mikrowellensysteme behandelt.

Im Gegensatz zu optischen Systemen resultiert aus der Verwendung des Spektrums der Mikrowellenstrahlung (Wellenlänge: 1-100 cm) eine tageszeitunabhängige sowie eine nahezu wetterunabhängige Datenerfassung, da Mikrowellen Wolken, Dunst und Rauch durchdringen. Lediglich Wassertropfen können zu Abschwächungen der Mikrowellen führen. Das Verfahren ermöglicht somit eine stabile und kontinuierliche Datenerfassung. Daraus lassen sich auf der Basis von Zeitreihenanalysen wiederum Rückschlüsse auf die Veränderungen bestimmter Parameter auf der Erdoberfläche ziehen (KNABE 2004, S. 22). Ein weiterer Vorteil ist die bedeutend größere Eindringtiefe der Mikrowellen gegenüber optischer Strahlung in die Geländeoberfläche. Daraus können in Abhängigkeit von Wellenlänge und Einfallswinkel der Strahlung sowie bestimmten Eigenschaften der Geländeoberfläche Informationen über die Oberfläche in einer Schicht von einigen Millimetern bis in den Meterbereich gewonnen werden (GUTJAHR 2002, S. 23). Zudem beeinflussen die elektrischen Materialeigenschaften der Erdoberfläche die Ausbreitung der Mikrowellen und damit Emission und Reflexion. Diese Eigenschaften können über die sogenannte Dielektrizitätskonstante beschrieben werden und liefern z.B. Informationen über den Wassergehalt der Oberfläche.

Die Grundlage des Radarsystems ist das sogenannte Echo-Prinzip. Über eine Sendeantenne erfolgt das Aussenden elektromagnetischer Wellen in Form von Impulsen. Das Signal wird am Zielobjekt je nach Materialeigenschaft teilweise reflektiert. In der Antenne wird dann wiederum ein Teil der reflektierten Wellen als Signal registriert und Amplitude, Phase, Polarisation und Laufzeit werden bestimmt. Auf der Grundlage dieser Rückstreuechos können somit Informationen über die Beschaffenheit der Erdoberfläche gewonnen werden. Da das Signal beim Auftreffen auf das Zielobjekt mit komplexen Streu- und Absorptionsprozessen des Signals verbunden ist, kann durch die Amplitudenmessung ein Rückschluss über die Art und den Zustand der Rückstreuer getroffen werden. Die

¹ <https://earth.esa.int/ers>

Phasenmessung ermöglicht außerdem Aussagen über die Lage eines Rückstreuers im dreidimensionalen Raum, wodurch eine Beschreibung der Topographie ermöglicht wird (KNABE 2004, S. 22). Eine Voraussetzung dazu ist die Verwendung von SAR-Interferometrie (InSAR, vgl. Kapitel 4.6).

4.2.1 Aktive Mikrowellensysteme

Unter dem Begriff „Radar“ werden in dieser Arbeit sogenannte bildgebende Seitensicht-Radarsysteme (engl. side looking radar) verstanden, deren Bezeichnung aus der geometrischen Anordnung des Sensors auf einem Flugkörper resultiert. Diese ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

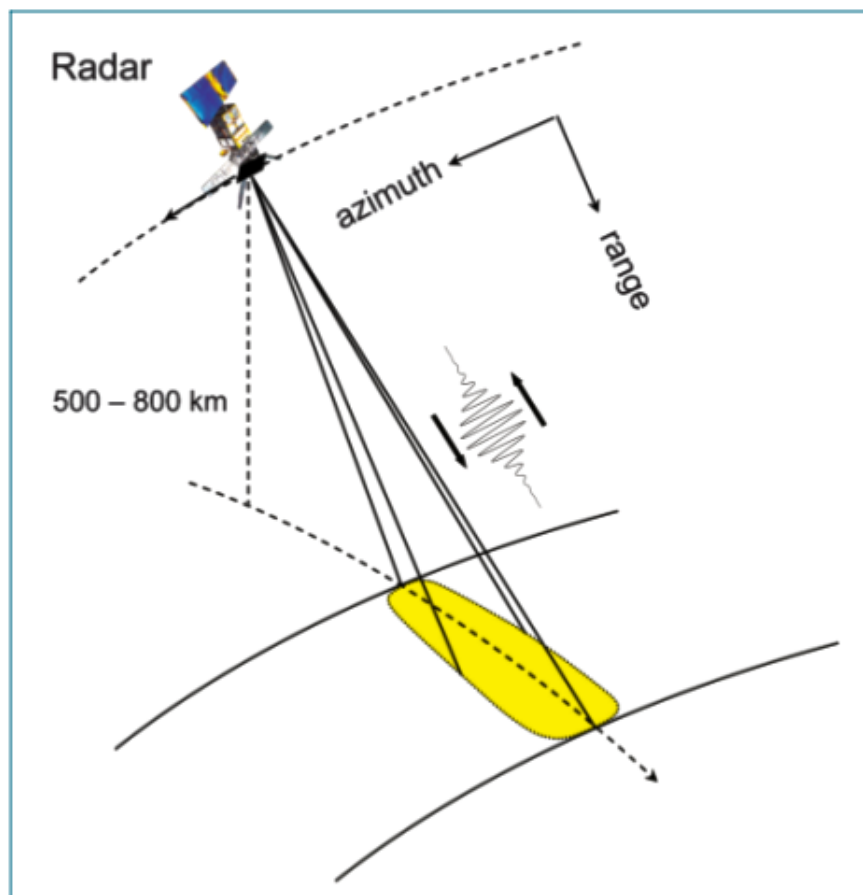


Abbildung 4.1: Abbildungsgeometrie von Seitensicht-Radarsystemen (aus BAMLER et al. 2008, S. 243)

Das Radarsystem wird von einem Flugzeug oder einem Satelliten getragen und bewegt sich auf einer entsprechenden Flugbahn. Eine am Träger befestigte Antenne erzeugt und sendet eine Folge von kurzen Mikrowellenimpulsen mit einer bestimmten Frequenz (engl. pulse repetition frequency, kurz: PRF) $f = \frac{1}{\tau}$, worin τ die Dauer eines Mikrowellenimpulses bezeichnet (GUTJAHR 2002, S. 24). Das Senden erfolgt meist senkrecht zur Flugrichtung und die Neigung ist so eingestellt, dass sich die elektromagnetischen Wellen in einem sehr schmalen, aber langen Raumwinkel ausbreiten (RIECHMANN 2009, S. 15). Das Rückstreusignal kann mit der gleichen Antenne empfangen werden, d.h. eine Antenne ist gleichzeitig Sender und Empfänger. Die Leistung des reflektierten Signals hängt von Sensordesign und den Streueigenschaften des beleuchteten Objektes ab (siehe Kapitel 4.3.1.2).

Durch die vorgestellte Abbildungsgeometrie werden einzelne Geländestreifen (engl. antenna footprint) erfasst, die den Bereich abdecken, der durch einen einzelnen Impuls getroffen wird. Aus der systematischen Wiederholung der Abtastung in Flugrichtung resultiert dann ein zusammengesetzter Streifen (auch Schwad, engl. swath) der Erdoberfläche schräg zur Flugrichtung (GUTJAHR 2002, S. 24, HEIN 2004, S. 93f., siehe auch Abbildung 4.2).

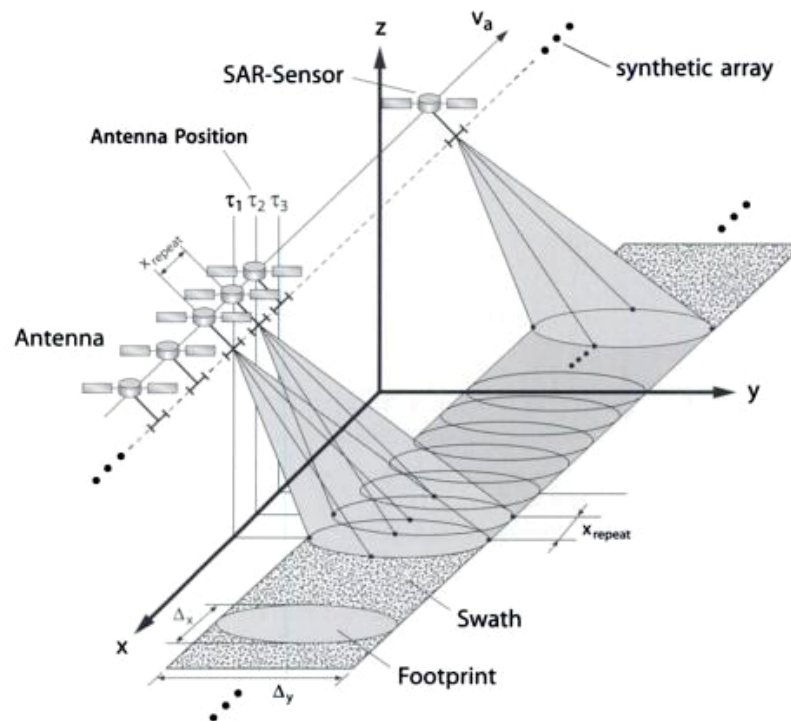


Abbildung 4.2: Seitensicht-Radar: footprint und swath (aus HEIN 2004, S. 93f)

Zur Entstehung eines mit einem Radarsystem aufgenommenen zweidimensionalen Bildes sind zwei unterschiedliche Aufnahmemechanismen notwendig. Zum einen erfolgt eine senkrecht zur Flugrichtung (engl. across track) ausgelegte Abtastung der Erdoberfläche, zum anderen bewegt sich der Abtaststreifen (antenna footprint) in Flugrichtung (along track) auf der Erdoberfläche (siehe Abbildung 4.2). Da die Geschwindigkeiten beider Ereignisse in einer Größenordnung von mehreren Zehnerpotenzen voneinander abweichen, erfolgt die Rechtfertigung einer Annahme der Unabhängigkeit (GUTJAHR 2002, S. 24). Dementsprechend kann sich auch die Bildauflösung für beide Koordinatenrichtungen unterscheiden (CONG 2007, S. 4). Nach HEIN (1998, S. 96) definiert die geometrische Auflösung die Fähigkeit eines Sensors, zwei benachbarte Objekte separat zu detektieren, d.h. das Auflösungsvermögen legt den minimalen Abstand fest, den zwei Objekte aufweisen dürfen, um noch räumlich voneinander getrennt werden zu können. Dazu müssen sich ihre Laufzeiten t_i um mindestens die Laufzeit der Pulsdauer unterscheiden, d.h. $|t_2 - t_1| > \tau$. Jeder Sensor, der die Abbildung eines Terrains ermöglicht, führt grundsätzlich zu einer Forderung nach einem möglichst hohen geometrischen Auflösungsvermögen.

Im Bereich der abbildenden Radarsysteme werden grundsätzlich zwei unterschiedliche Sensortypen unterschieden:

- das Radar mit realer Apertur (engl. Real Aperture Radar, kurz RAR) sowie
- das Radar mit synthetischer Apertur (engl. Synthetic Aperture Radar, kurz SAR).

Die Bezeichnung „Apertur“ definiert die zur Ausstrahlungsrichtung eines Radarsystems senkrechte Fläche, durch welche der Hauptteil der elektromagnetischen Strahlung tritt und kennzeichnet das Auflösungsvermögen eines Radarsystems in Azimutrichtung.

Im Folgenden soll das Prinzip beider Radarsysteme dargelegt und insbesondere hinsichtlich des geometrischen Auflösungsvermögens für Zeilen- und Spaltenrichtung analysiert werden. Die Zeilenrichtung ist dabei im Allgemeinen orthogonal zur Flugbahn des Sensors (auch Range-Auflösung) und die Spaltenrichtung parallel zur Flugrichtung (auch Azimuth-Auflösung) definiert (GUTJAHR 2002, S. 24). Während das Auflösungsvermögen in Range-Richtung für beide Sensortypen identisch ist, wird die Auflösung in Azimuth-Richtung für beide Systeme gesondert betrachtet.

Auflösung in Range-Richtung

Die Range-Auflösung in Schrägentfernung (engl. slant range) $\delta_{sr}^{RAR/SAR}$ kann nach NEZAM (2009, S. 7) als

$$\delta_{sr}^{RAR/SAR} = \frac{c\tau}{2} \quad (4.1)$$

formuliert werden, wobei c die Lichtgeschwindigkeit sowie τ die Dauer eines Mikrowellenimpulses beschreibt und der Faktor 2 aus der Berücksichtigung des zweifachen Durchlaufens des Signals zwischen Sensor und Objekt folgt. Wird diese Auflösung über den Nadir- oder Öffnungswinkel Θ auf den Boden projiziert (engl. ground range), ergibt sich die Auflösung in Bodengeometrie zu

$$\delta_{gr}^{RAR/SAR} \approx \frac{c\tau}{2 \sin \Theta} \approx \frac{c}{2B \sin \Theta}, \quad (4.2)$$

wobei berücksichtigt wurde, dass die Pulsdauer näherungsweise indirekt proportional zur Bandbreite B ist (SÖRGEL 2006, S. 2). Bei einer großen Entfernung und flacher Blickrichtung nähern sich $\delta_{sr}^{RAR/SAR}$ und $\delta_{gr}^{RAR/SAR}$ asymptotisch an. Gleichung 4.2 verdeutlicht die Notwendigkeit der Schrägsichtmethode, da die Auflösung in Bodengeometrie bei steiler werdender Blickrichtung abnimmt und im Grenzfall ($\Theta = 0$) unendlich groß werden würde. Eine Verbesserung des Auflösungsvermögens wird demnach nur von τ bzw. B beeinflusst und ist prinzipiell unabhängig von der Entfernung R zwischen Sensor und Zielobjekt.

Eine Verkürzung der Pulsdauer ist in der Praxis jedoch problematisch, da einerseits die zu sendende Energie ansteigen würde und andererseits eine getrennte Identifizierung des reflektierten Signals nicht möglich ist (GUTJAHR 2002, S. 25).

Auflösung in Azimuth-Richtung

Die Auflösung in Azimuth-Richtung δ_a^{RAR} entspricht beim Radar mit realer Apertur (RAR) der Breite des Antennenabdrucks auf der Erdoberfläche (SÖRGEL 2006, S. 3). Dieser ist wiederum von

dem Öffnungswinkel θ abhängig, unter dem die elektromagnetische Welle die SAR-Sendeantenne verlässt (siehe Abbildung 4.3, links). Nach einer einfachen Kosinusbeziehung kann nun über diesen Winkel und die Flughöhe über der Erdoberfläche die Entfernung zum beleuchteten Objekt R bestimmt werden:

$$R = \frac{H}{\cos(\theta)}. \quad (4.3)$$

Um eine Auflösung zweier Objekte auf der Erdoberfläche zu gewährleisten, müssen diese mindestens um die Breite der vom Impuls getroffenen Fläche auseinander liegen. Es gilt

$$\delta_a^{RAR} = R\Theta^{RAR} = \frac{\lambda}{D}R = \frac{\lambda}{D} \frac{H}{\cos\theta}, \quad (4.4)$$

worin λ die Wellenlänge des Signals, D die Antennenlänge und Θ^{RAR} den Öffnungswinkel beschreiben (RIECHMANN 2009, S. 22).

Damit wird deutlich, dass die Auflösung bei festem Öffnungswinkel θ durch eine kürzere Wellenlänge, eine kürzere Entfernung zur Erdoberfläche und einer zunehmenden Antennengröße verbessert werden kann. Eine Verkleinerung der Wellenlänge bedeutet gleichzeitig eine Vergrößerung der Frequenz, die wiederum einen Anstieg der Atmosphärendämpfung zur Folge hat. Es ist sofort ersichtlich, dass bei optischen Sensoren, bei denen D dem Linsendurchmesser entsprechen würde, eine deutlich höhere Winkelauflösung erreicht werden würde, da hier eine um einige Größenordnungen kleinere Wellenlänge verwendet würde. Gleichzeitig geht dabei jedoch der Vorteil einer wetter- und tageszeitenunabhängigen Aufnahmebedingung verloren. Bei Satellitenmessungen ist zudem die Entfernung zum Objekt vorgegeben. Im Umkehrschluß ist das Verfahren des Radars mit realer Apertur aufgrund der hohen Flughöhen für Satelliten eher ungeeignet. Auch eine physikalische Ausdehnung der Antennengröße ist technisch durch die jeweiligen Flugkörper begrenzt. Durch das SAR-Prinzip kann jedoch durch eine künstliche Verlängerung der Antennenlänge eine Verbesserung der Azimutaufklärung erreicht werden.

4.2.2 Radar mit synthetischer Apertur

In Kapitel 4.2.1 wurde das für hochauflösende abbildende Systeme ungeeignete Auflösungsvermögen in Azimuth-Richtung dargelegt. Eine Verbesserung dieser könnte zwar grundsätzlich durch die Ausdehnung der Antennenlänge realisiert werden, jedoch ist dies aufgrund der begrenzten Trägerplattform physikalisch nicht umzusetzen. Dieser beschränkende Faktor wird durch das Radar mit synthetischer Apertur umgangen, indem die Bewegung der Trägerplattform insofern ausgenutzt wird, dass die kurze physikalische (reale) Antenne synthetisch verlängert wird (KNABE 2004, S. 27).

Abbildung 4.3 zeigt das SAR-Aufnahmeprinzip durch eine wiederholte Erfassung der Geländeoberfläche. Die Flugrichtung der Trägerplattform sei hier durch den Geschwindigkeitsvektor \mathbf{v} gegeben. An der Position $k - 1$ erfolgt die erste Aufnahme eines beliebigen Objektes. Nach der Bewegung in Flugrichtung erfolgt von den Sensorpositionen k und $k + 1$ jeweils eine weitere Aufnahme dieses Objektes. Während des gesamten Zeitraums befindet sich das Objekt innerhalb der jeweiligen

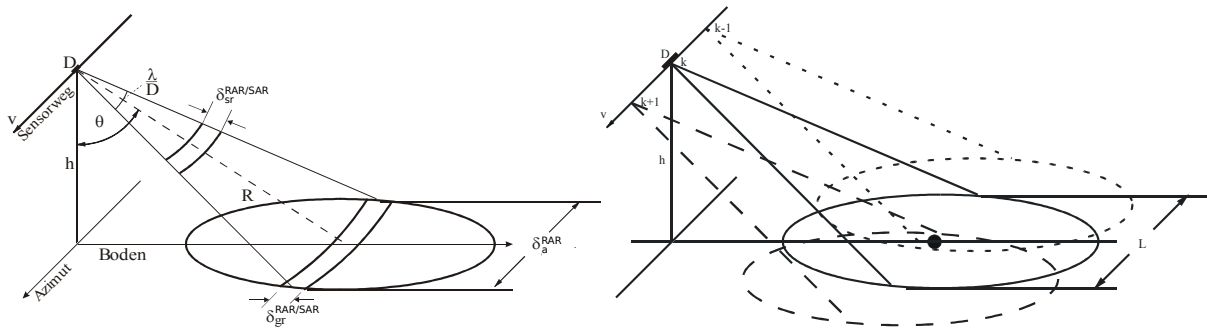


Abbildung 4.3: Aufnahmeprinzip für Radar mit realer Apertur (links) und für Radar mit synthetischer Apertur durch die wiederholte Erfassung entlang des Flugweges (rechts) (aus SÖRGEL 2006, S. 2)

Antennenkeule. Der Abstand L , der als die sogenannte synthetische Apertur bezeichnet wird, resultiert folglich aus der Länge des Sensorweges, innerhalb der sich das Objekt in der Antennenkeule befindet. Es werden dadurch mehrere Aufnahmen eines Bereiches der Erdoberfläche erhalten, die auf komplexe Weise miteinander korreliert werden müssen (RIECHMANN 2009, S. 22). Eine Grundvoraussetzung dafür ist die Registrierung von Amplitude und Phase des Echosignals. Nur auf diese Weise ist das Wellenfeld vollständig beschrieben. Nach GUTJAHR (2002, S. 28) wird bei der Verwendung von SAR die Eigenschaft ausgenutzt, dass Mikrowellen als kohärente Strahlung erzeugt werden können, d.h. die Signalphase über längere Entfernungen und Zeiträume konstant bleibt. Die Synthetisierung der Sensorantenne basiert dabei auf der Dopplerverschiebung des Sendesignals aufgrund der Relativbewegung zwischen dem Radaraufnahmesystem und der beleuchteten Oberfläche (SÖRGEL 2006, S. 3). Der Doppler-Effekt beschreibt nach THONFELD (2007, S. 5-6) die Frequenzveränderung einer Welle als Funktion der relativen Geschwindigkeit zwischen Sende- und Empfangseinheit. Nimmt folglich die Entfernung zwischen SAR-Sensor und Objekt ab, d.h. nähert sich umgekehrt die Trägerplattform der beleuchteten Oberfläche an, erfolgt auf dieser Grundlage eine Verschiebung des reflektierten Signals in Richtung höherer Frequenzen. Umgekehrt resultiert aus einem zunehmenden Signalweg entsprechend eine Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen. An dem Punkt der minimalen Entfernung existiert keine Frequenzverschiebung (KALKUHL 2009, S. 16f.). Da die SAR-Signalwellen im Allgemeinen in einem sehr schmalen, aber langen Raumwinkel ausgestrahlt werden, werden einzelne Objekte auf der Erdoberfläche mehrfach erfasst und sind entsprechend mehrfach an den emittierten Signalen beteiligt. Auf der Basis einer speziellen Datenverarbeitung können einzelne Objekte jedoch separat auf einer Aufnahme mit synthetischer, langer Antenne aufgelöst werden (THONFELD 2007, S. 5f. und RANEY 1998, S. 48f.).

Unter Betrachtung von Abbildung 4.3 ist ersichtlich, dass die synthetische Antenne L der Azimutauf Auflösung eines RAR-Systems entspricht

$$L = \delta_a^{RAR} = \frac{\lambda}{D} R. \quad (4.5)$$

Die Winkelauflösung Θ^{SAR} ist verglichen mit einem Radarsystem mit realer Antenne (Gleichung 4.4) um einen Faktor 2 besser (GUTJAHR 2002, S. 28 und NEZAM 2009, S. 9):

$$\Theta^{SAR} = \frac{\lambda}{2L}. \quad (4.6)$$

Das Auflösungsvermögen in Azimutrichtung für ein Radarsystem mit synthetischer Aperture ergibt sich demnach zu

$$\delta_a^{SAR} = R\Theta^{SAR} = \frac{R\lambda}{2L} = \frac{D}{2} \quad (4.7)$$

und ist unabhängig von der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung und der Entfernung zwischen Sensor und Zielobjekt. Es resultiert also lediglich eine Abhängigkeit von der Länge der physikalischen (realen) Antennenlänge D . Alle Objekte auf der Erdoberfläche können demnach bis zu einer Größenordnung der halben Antennenlänge aufgelöst werden. Eine ausführliche Herleitung des hier aufgezeigten Formelapparates ist unter anderem in KLAUSING und HOLPP (2000) zu finden. Während sich die Auflösung eines RAR-Systems in Azimutrichtung mit zunehmender Antennenlänge D verbessert, ist bei SAR-Anwendungen folglich eine kleine Antenne D erstrebenswert (CONG 2007, S. 6-7). Die Auflösung in Flugrichtung ist bei SAR-Sensoren zudem unabhängig von der Entfernungskomponente, während eine zunehmende Entfernung bei RAR-Sensoren zu einer Abnahme des Auflösungsvermögens führt.

4.3 Das SAR-Signal

4.3.1 Kennzeichen von SAR-Aufnahmen

Die Voraussetzung zur Interpretation des Gegenstandes von SAR-Bildern ist die Kenntnis der Eigenart und Charakteristik dieser Radaraufnahmen. Diese soll im Folgenden mit einer Unterteilung in geometrische und radiometrische Eigenschaften der SAR-Aufnahmen dargestellt werden.

4.3.1.1 Geometrische Eigenschaften

Im Gegensatz zu optischen Satellitenbildern treten bei SAR-Aufnahmen häufig geometrische Effekte auf. Diese zur Reduktion der Bildqualität führenden Effekte werden allgemein durch das prinzipbedingte Aufnahmeverfahren der SAR-Schrägsicht verursacht und treten vermehrt bei bewegtem oder reliefiertem Gelände sowie in Stadtregionen auf. Der Aufbau eines SAR-Bildes erfolgt aus der Laufzeit der Wellenfronten, d.h. der Radarimpuls durchläuft nahe gelegene Gebiete schneller als weiter entfernte Flächen. Dadurch resultieren nach KNABE (2004, S. 31) und NEZAM (2009, S. 10f.) unterschiedliche Formen der geometrischen Verzerrung in der sogenannten Entfernungsebene (engl.: slant-range-distance) gegenüber der Bodengeometrie (engl.: ground-range-distance), die im Folgenden erläutert werden.

- **Hangverkürzung (Foreshorting)**: Dieser Effekt bezeichnet in der Slant-Range-Darstellung eine verkürzte Abbildung der dem Radarsensor zugeneigten Geländeformen mit einer Hangneigung α kleiner dem lokalen Beleuchtungswinkel Φ_{local} . Er wird dadurch verursacht, dass die zeitliche Differenz zwischen den Reflexionssignalen von Fußpunkt und Kuppe eines Objektes kürzer als ihr Horizontalabstand in der Realität ist.
- **Umkehrung (Layover)**: Wird bei einer Hangneigung α größer dem lokalen Beleuchtungswinkel Φ_{local} die Bergkuppe vor dem Bergfuß von der Radarwelle erfasst, kommt es aufgrund der unerwünschten Überlagerung der Signale zu einem Umklappeffekt.
- **Abschattung (Radar shadow oder Shadowing)**: Die dem Radarsensor abgewandten Geländeformen können nicht mehr angestrahlt werden, wenn ihr lokaler Neigungswinkel kleiner als die Hangneigung ist. Von Flächen innerhalb dieses Radarschattens gibt es keine Rückstreuung.

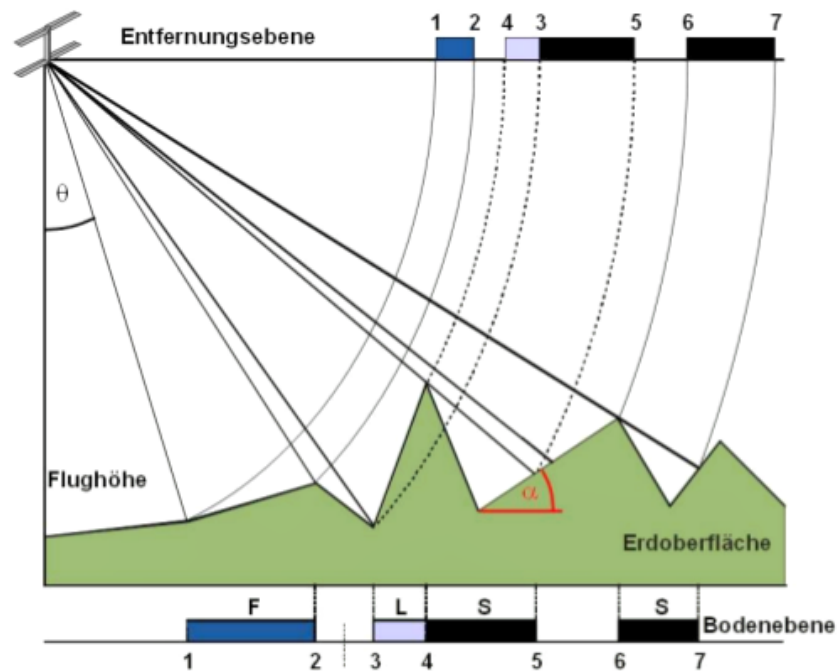


Abbildung 4.4: Unterschiedliche Formen der geometrischen Verzerrung aufgrund der aufnahmebedingten Schrägsicht bei SAR-Aufnahmen (aus SÖRGEL 2006, S. 3)

Die Effekte der geometrischen Verzerrung sind nach SÖRGEL 2006 in Abbildung 4.4 dargelegt. In der Bodenebene sind mit den Punktbezeichnungen 1 bis 7 die Fußpunkte und Spitzen der Reliefobjekte mit den realen Abständen gekennzeichnet. Die gleichen Punkte sind in der Entfernungs-ebene in der Form eingezeichnet, die auch der Darstellung in der SAR-Aufnahme entspricht.

Durch eine Transformation dieser Punkte in die Ground-Range-Geometrie können im Rahmen eines Georeferenzierungsprozesses, bei dem die flächenhafte Rückstreuinformation auf ein Ellipsoid oder digitales Geländemodell entzerrt wird, die Einflüsse durch Foreshortening und Layover weitestgehend kompensiert werden. Als eine Folge des ausbleibenden Rückstreusignals kann die Auswirkung des Shadowing-Effektes hingegen nicht eliminiert werden. Stattdessen erfolgt eine

Ausmaskierung dieser Flächen (KNABE 2004, S. 31).

Jeder dieser Effekte hat auch eine Auswirkung radiometrischer Natur. Während die Effekte Foreshortening und Layover durch den Überlagerungsprozess der Signale in der Radiometrie eine Aufhellung der betroffenen Fläche im Bild zur Folge hat, erscheinen Gebiete im Radarschatten aufgrund des fehlenden Rückstreuechos radiometrisch betrachtet als eine dunkle Fläche im Bild (NEZAM 2009, S. 10f.).

4.3.1.2 Radiometrische Eigenschaften

Die Leistung des Signalechos kann als eine Funktion von Sensordesign und den Streueigenschaften des Zielobjektes formuliert und für einen einzelnen Streuer in einem monostatischen System, d.h. in einem System mit gleicher Sende- und Empfangsantenne, mathematisch über die sogenannte Radargleichung ausgedrückt werden (KNABE 2004, S. 22f.):

$$P_r = \frac{P_t A_{eff}^2}{4\pi\lambda^2 r^4} \sigma, \quad (4.8)$$

mit

P_r	empfangene Leistung [W],
P_t	gesendete Leistung [W],
A_{eff}	effektive Antennenfläche [m^2],
λ	Wellenlänge [m],
r	Range-Entfernung [m],
σ	Rückstreukoeffizient [m^2].

Diese Gleichung charakterisiert den physikalischen Zusammenhang zwischen der gesendeten und empfangenen Leistung als eine Funktion der systemspezifischen Parameter des Radars inklusive des Ausbreitungsverhaltens des elektromagnetischen Signals einerseits und den objektspezifischen Gegebenheiten des beleuchteten Objektes andererseits (NEZAM 2009, S. 11f. und HEIN 1998, S. 13-17). Die Parameter beider Gruppen führen zu einer entscheidenden Beeinflussung des Verhaltens des Rückstreuechos, jedoch sind nur die systembedingten Größen im Rahmen der Kalibrierung und Prozessierung einkalkulierbar. Im Folgenden sollen die einzelnen Einflussfaktoren dargestellt werden.

Systemspezifische Parameter

Im Zusammenhang der systembedingten Parameter werden hier insbesondere die Wellenlänge und die Polarisationssebene des elektromagnetischen Signals vorgestellt.

- **Wellenlänge λ und Frequenz f :** Die Wellenlänge hat eine unmittelbare Auswirkung auf die Signaldämpfung sowie auf die Eindringtiefe einer elektromagnetischen Welle in ein Medium wie Boden oder Vegetation (THONFELD 2007, S. 8). Dabei wird ausgenutzt, dass die

Eindringtiefe mit zunehmender Wellenlänge wächst und folglich auch im Vergleich zu einem kurzwelligeren Signal zu einem anderen Informationsgehalt führt. Durch ihre Verknüpfung mit der Oberflächenrauigkeit beeinflusst die Wellenlänge außerdem auch die effektive Rauigkeit (KNABE 2004, S. 23f.). Beide Faktoren führen zur Beeinflussung des Rückstreuverhaltens.

- **Polarisation pp :** Polarimetrische Radarsysteme erlauben die Ausstrahlung und den Empfang von Mikrowellen in unterschiedlichen Polarisationssebenen. Auf diese Weise kann die elektromagnetische Welle als Gleichpolarisation (HH, VV) oder Kreuzpolarisation (HV, VH) gesendet und emittiert werden. Die Bezeichnungen „H“ und „V“ beschreiben eine horizontale bzw. vertikale Polarisation und die Reihenfolge zweier hintereinander aufgeführten Kodierungen bezeichnet im Allgemeinen die Polarisationssebene von Sende- und Empfangssignal. Die Verwendung verschiedener Polarisationssebenen ermöglicht eine Steigerung des Informationsgehalts über die Ausrichtung und die Form der Streuelemente (KNABE 2004, S. 23f.).

Objektspezifische Parameter

Die im Folgenden vorgestellten objektspezifischen Parameter werden in der Radargleichung durch den Rückstreukoeffizienten σ ausgedrückt. Dieser wird bei einer vorgegebenen Wellenlänge von den dielektrischen Eigenschaften, welche die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit einem Material beschreiben, sowie den Rückstreumechanismen in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit und Beschaffenheit des Materials eines beleuchteten Objektes beeinflusst. Diese Faktoren werden nachfolgend dargelegt.

- **Dielektrizitätskonstante ϵ_D :** Die dielektrischen Eigenschaften werden durch die sogenannte Dielektrizitätskonstante ϵ_D gekennzeichnet und legen über das Verhältnis von Absorption zu Reflexion die Stärke des emittierten Echosignals fest. Sie werden überwiegend durch den Wassergehalt eines Mediums beeinflusst (KNABE 2004, S. 24).
- **Streugeometrie:** Die Streugeometrie definiert die Richtungsverteilung des Rückstreuverhaltens einer Objektoberfläche. Zur Charakterisierung eines Flächenstreuers wird hierzu der Radarrückstreukoeffizient in Abhängigkeit einer Einheitsfläche als Differentialgleichung formuliert

$$\sigma_{area} = \frac{d\sigma}{dF}. \quad (4.9)$$

In der Praxis wird häufig anstatt des Differentialquotienten die durch die für ein bestimmtes Radarsystem vorgegebene Auflösungszelle (Pixel) verwendet, d.h.

$$\sigma_{area} = \frac{d\sigma}{\delta_{gr}\delta_a}, \quad (4.10)$$

worin δ_{gr} und δ_a die Pixelabmessungen in Range- und Azimuth-Richtung bezeichnen. Diese Formulierung unterliegt der Annahme, dass sich der Radarrückstreuerschnitt innerhalb der Fläche nicht signifikant verändert (NEZAM 2009, S. 11f.).

- **Streumechanismen:** Eine Streuung tritt im Allgemeinen immer an der Grenzfläche zweier Medien auf. In Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften eines Objektes können unterschiedliche Rückstrahleffekte entstehen (siehe Abbildung 4.5). Diese Objektmerkmale werden von ihrem Material, ihrem physikalischen Zustand, der Oberflächenrauigkeit, dem Beleuchtungswinkel und der Beobachtungsrichtung beeinflusst (ALBERTZ 2001, S. 17). Es wird von einer rauen Oberfläche gesprochen, wenn die Höhenvariation auf der Erdoberfläche σ_h größer oder gleich der Dimension der Wellenlänge λ ist ($\sigma_h \geq \lambda$). Die Rauigkeit einer Oberfläche ist maßgebend für die sogenannte Oberflächenstreuung, die wiederum in weitere Streueffekte gegliedert werden kann.

Während an glatten Oberflächen ($\sigma_h \ll \lambda$) nach dem Reflexionsgesetz über die Konformität von Eintritts- und Austrittswinkel eine spiegelnde Reflexion erfolgt und folglich kaum Rückstrahlung ins Radarsystem gelangt, folgt bei rauen Oberflächen ($\sigma_h \gg \lambda$) eine diffuse Rückstreuung, von der ein bestimmter Anteil der Welle zum Sensor emittiert wird (NEZAM 2009, S. 13-14). Ein Spezialfall der Oberflächenstreuung sind sogenannte Corner-Reflektoren mit einem Rückstrahleffekt (engl.: double-bounce-effect). Dabei sind bestimmte Objekte, wie beispielsweise Hauswände oder metallische Objekte so zueinander angeordnet, dass hintereinander mehrere spiegelnde Reflexionen stattfinden und das Signal in Richtung des Radarsystems reflektiert wird. Es resultiert ein hohes Signalecho im Radarbild.

Neben den Oberflächenstreuungen kann auch Volumenstreuung auftreten, wenn die elektromagnetische Welle vor einem Streuprozess an der Oberfläche eines Mediums in die Oberflächenschicht eindringt und mit darunter befindlichen Elementen interagiert. Häufig tritt dieser Vorgang bei inhomogenen Strukturen, wie Vegetation auf (NEZAM 2009, S. 13f. und THONFELD 2007, S. 8f.). In der Natur erfolgt das Streuverhalten meist als eine Mischung der beschriebenen Reflexionsarten mit einer ungleich starken Reflexion in alle Richtungen (ALBERTZ 2001, S. 18).

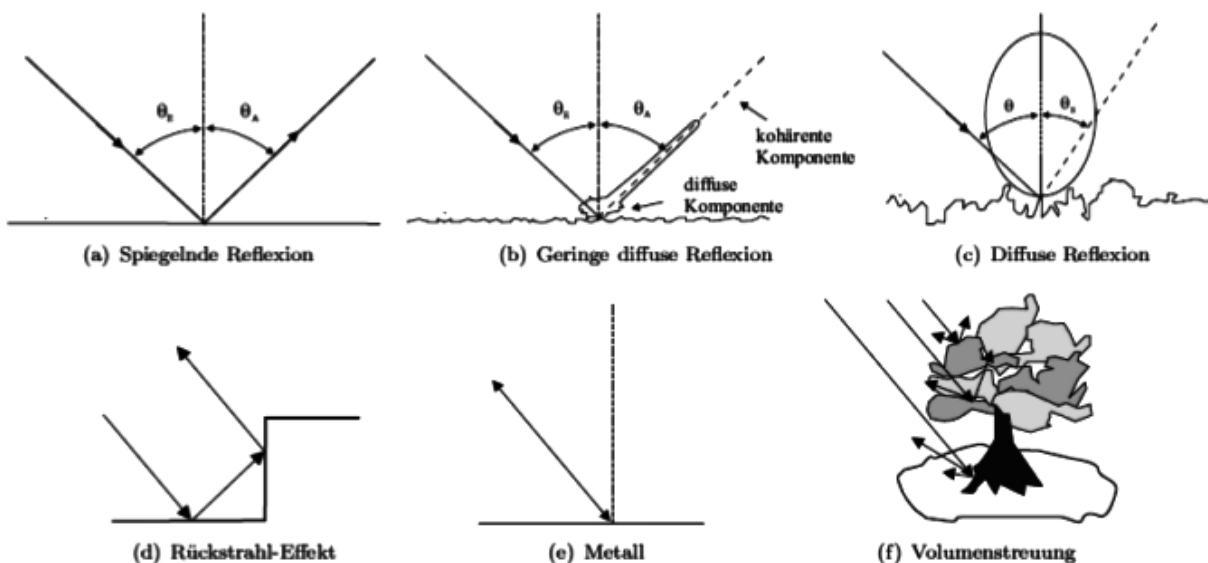


Abbildung 4.5: Rückstreumechanismen: Volumen- und Oberflächenstreuung (aus NEZAM 2009, S. 14)

4.3.2 Eigenschaften des SAR-Signals

Die fundamentale Information der kohärenten elektromagnetischen Strahlung des SAR-Signals kann durch dessen Phasen- und Amplitudendarstellung gewonnen werden. Während die Signalphase ϕ den entscheidenden Informationsträger der interferometrischen Datenprozessierung repräsentiert, ist die Amplituden- oder Intensitätsinformation A signifikant mit den Streueigenschaften eines Objektes an der Erdoberfläche verknüpft (KNABE 2004, S. 27). Aus Gründen der Datenprozessierung im Rahmen der SAR-Interferometrie werden SAR-Daten im Allgemeinen in einer komplexen Darstellungsform mit einem Real- und einem Imaginärteil gehandhabt (engl.: single-look-complex-data), d.h.

$$u = \operatorname{Re}(u) + i \operatorname{Im}(u), \quad (4.11)$$

worin i die imaginäre Einheit beschreibt und u das Gesamtergebnis des an einer unbestimmten Menge von Streuelementen innerhalb einer Auflösungszelle stattfindenden Rückstreuereignisses definiert (GUTJAHR 2002, S. 36). Dies kann wie folgt formuliert werden:

$$u = A e^{i\phi}. \quad (4.12)$$

Eine Modellierung dessen kann als kohärente Addition der komplexen emittierten Einzelsignale erfolgen. Abbildung 4.6 zeigt diesen Sachverhalt als Vektordarstellung in komplexer Ebene. Eine komplexe Zahl kann in zwei Dimensionen mit einer X-Komponente im Realteil und einer Y-Komponente im Imaginärteil dargestellt werden.

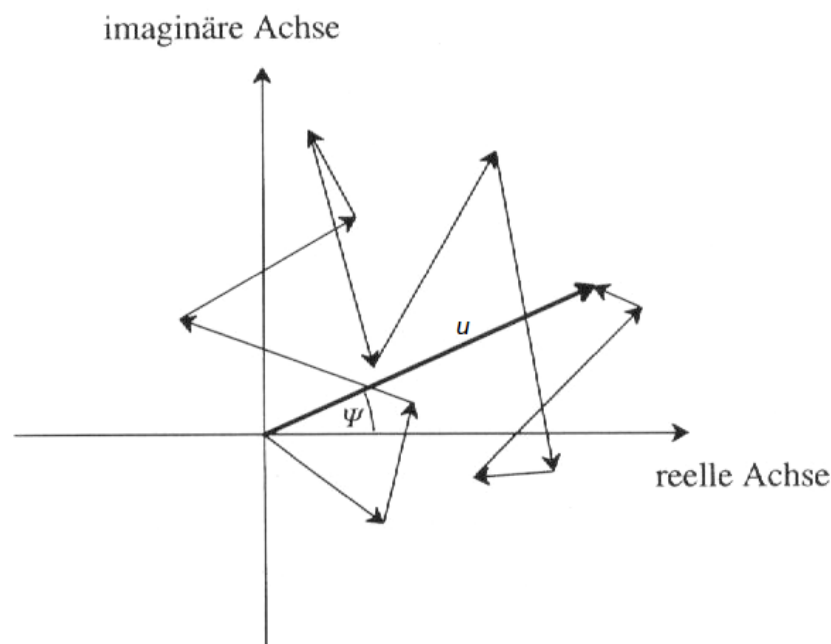


Abbildung 4.6: Das Rückstreuerecho u einer Auflösungszelle als die vektorielle Summe der Echos u_i einzelner Streuelemente (modifiziert nach SCHWÄBISCH 1995, S. 21)

Im Folgenden sollen Amplituden- und Phaseninformation und der in diesem Zusammenhang entstehende Speckle-Effekt erläutert werden.

4.3.2.1 Amplitude

Die Amplituden- oder Intensitätsinformation A kann durch den Betrag des Gesamtergebnisses aller Rückstreuereprozesse (siehe Abbildung 4.6) repräsentiert und mathematisch als

$$A = \sqrt{\text{Im}(u)^2 + \text{Re}(u)^2} \quad (4.13)$$

formuliert werden (GUTJAHR 2002, S. 36f.). Nach SCHWÄBISCH (1995, S. 22) kann der Erwartungswert der Amplitude als proportional zum Radarrückstreuoeffizienten σ in der Radargleichung (siehe Gleichung 4.8) betrachtet werden.

Abbildung 4.7 zeigt eine Amplitudenaufnahme für ein Gebiet der Niederrheinischen Bucht, bei der bereits ein Multilook-Verfahren (vgl. Kapitel 5.1.1.6) angewandt wurde.

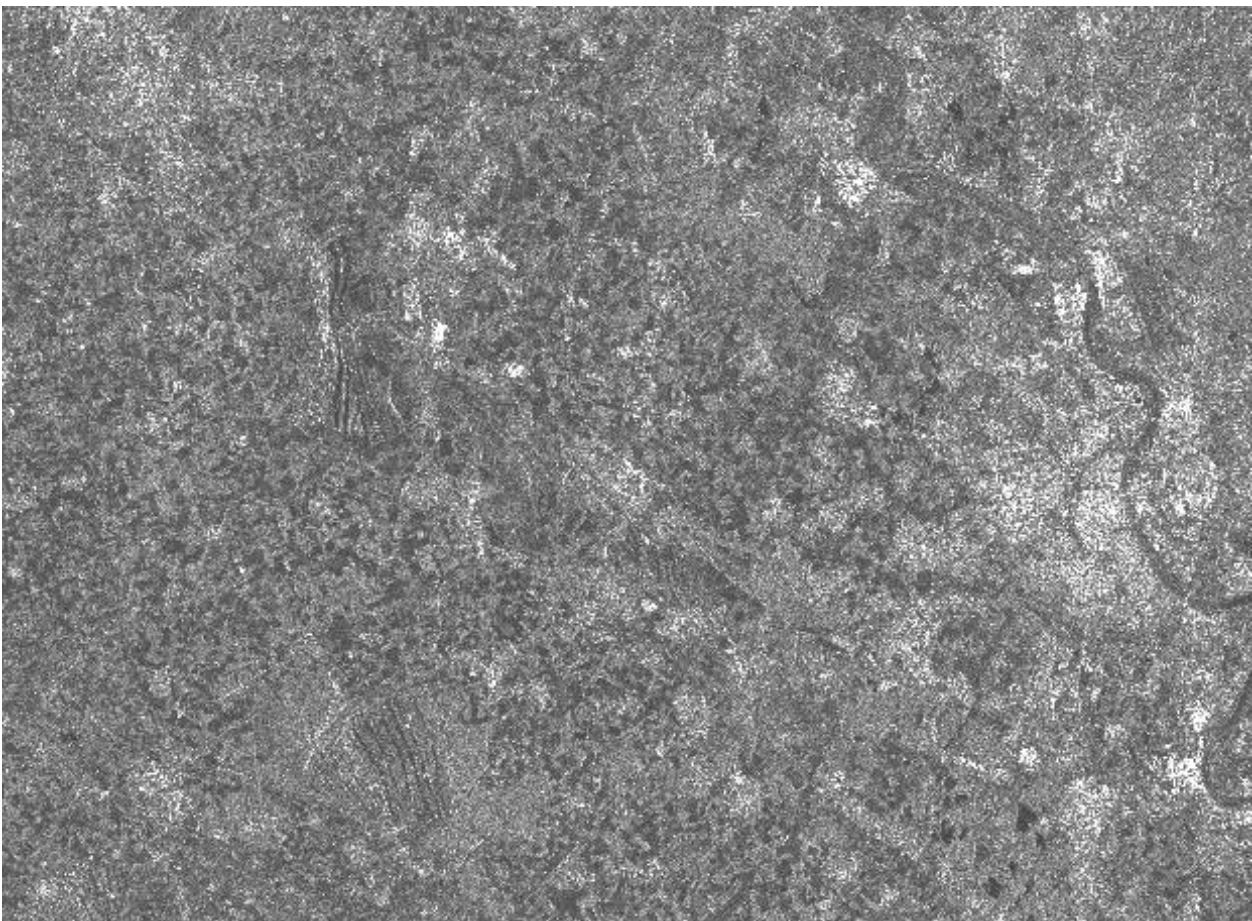


Abbildung 4.7: Amplitudenbild aus dem Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht nach Anwendung eines 5x1-Multilook-Verfahrens

4.3.2.2 Phase

Die Phase ϕ des kohärenten SAR-Signals kann mathematisch nach

$$\phi = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(u)}{\operatorname{Re}(u)}\right) \quad (4.14)$$

bestimmt werden (GUTJAHR 2002, S. 36f.). Diese Formulierung folgt aus der Winkelmessung von u in der komplexen Ebene (siehe Abbildung 4.6). Die Phasenbestimmung ist unabhängig von Rückstreuenecho und Streumechanismen und unterliegt lediglich dem Entfernungseinfluss zwischen Radarsystem und beleuchtetem Objekt. Von besonderer Bedeutung ist der Wertebereich der Signalphase im Intervall $[-\pi, \pi]$, da dieser zu einer hochgradigen Ambiguität der Phasenwerte führt.

4.3.2.3 Der Speckle-Effekt

Da die Weglängen zwischen Radarsensor und einem Objekt auf der Erdoberfläche aufgrund der zufällig über eine Auflösungszelle verteilten Rückstreuenelemente auch bei homogenen Flächen unterschiedlich sind, variieren auch die individuellen Phasen der emittierten Signale. Die Kopplung der empfangenen Signale führt zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzerscheinungen, aus denen wiederum eine Überlagerung oder Auslöschung der Signale resultiert (KNABE 2004, S. 27f., NEZAM 2009, S. 16 und THONFELD 2007, S. 6). Daraus folgt die Induktion des sogenannten Speckle-Effektes (GOODMAN 1976, BRUNIQUET und LOPES 1997), der die körnigen Bildstrukturen auch bei homogenen Flächen als eine Charakteristik von SAR-Aufnahmen bezeichnet.

Nach NEZAM (2009, S. 16) würden aufgrund der kohärenten Addition der Signale in der Theorie aus den gleichen Bedingungen auch die gleichen Interferenzen folgen. Dies ist in der Praxis aufgrund der sich ändernden und nicht bestimmaren Anordnung der Elemente innerhalb der Auflösungszelle sowie der nicht exakt rekonstruierbaren Sensorposition nicht der Fall. Der Speckle-Effekt kann demnach nur durch eine Modellierung mit statistischen Mitteln ausgedrückt werden. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit und kann weiterführender Literatur (z.B. NEZAM 2009, S. 18-35) entnommen werden.

Aufgrund seines beeinträchtigen Charakters und der Minderung der radiometrischen Auflösung gibt es einige Verfahren zur Reduktion von Speckle-Erscheinungen. Dazu werden im Allgemeinen Speckle-Filterverfahren verwendet, die in der räumlichen oder zeitlichen Domäne stattfinden und entweder während oder nach der Prozessierung Anwendung finden (THONFELD 2007, S. 6f.). Eine Variante ist die Multi-Look-Prozessierung in der räumlichen Domäne (engl.: Spatial Domain Multi-Looking), bei der eine Vielzahl statistisch unabhängiger Radaraufnahmen (Looks) der selben Szene berechnet und gemittelt werden (MEYER 2004, S. 23). Jede dieser Aufnahmen besitzt ein eigenes Specklemuster und die (inkohärente) Addition unterschiedlicher Looks führt zu einer Glättung der Radaraufnahme (MEYER 2004, S. 23). Die Anzahl der Looks beeinflusst insofern die Bodenauflösung, als dass die Varianz und folglich auch der Speckle-Effekt mit zunehmender Anzahl verwendeter Einzelbilder kleiner wird (THONFELD 2007, S. 6f.). Die Reduktion von Speckle-Erscheinungen geht jedoch aufgrund der resultierenden Glättung der Signalamplituden immer mit einem Verlust der räumlichen Auflösung

der Radaraufnahme einher. Demnach ist das Ziel jedes Filterverfahrens die Kompromissfindung zwischen Reduktion des Speckle-Effektes und gleichzeitiger Erhaltung des Auflösungsvermögens (XIAO et al. 2003, S. 2452).

Die beschriebene Multilook-Prozessierung in der klassischen SAR-Datenverarbeitung ist dabei von der gleichnamigen Filtertechnik zur Rauschunterdrückung von Interferogrammen (siehe Kapitel 5.1.1.6) zu unterscheiden.

Zusätzlich können nach der Bildgenerierung weitere Filtertechniken angewandt werden, welche durch die Berücksichtigung der lokalen Statistik die Auflösungszelle über ihr Verhältnis zur Umgebung verändern (KNABE 2004, S. 29). Derartige Filter werden auch als adaptive Filtertechniken bezeichnet (vgl. LEE 1980, LOPES et al. 1993, KUAN et al. 1985). Daneben existieren alternativ auch Verfahren auf der Basis von Wavelets (vgl. DONG et al. 1997, FUKUDA und HIROSAWA 1998). In den letzten Jahren wurden außerdem Filterverfahren in der zeitlichen Domäne (BRUNIQUEL und LOPES 1997) entwickelt, welche eine Verbesserung der radiometrischen Auflösung ohne eine gleichzeitige Beeinträchtigung des räumlichen Auflösungsvermögens ermöglichen (THONFELD 2007, S. 7f.).

4.4 SAR-Interferometrie

Durch das Prinzip des interferometrischen Radars mit synthetischer Apertur (engl.: *interferometric synthetic aperture radar*, kurz InSAR), auch als SAR-Interferometrie bezeichnet, können aus zwei quer zur Flugrichtung aufgenommenen SAR-Aufnahmen Höheninformationen der Erdoberfläche gewonnen werden. Die InSAR-Technik basiert dabei auf einer Phasendifferenzmessung, d.h. einer Auswertung der Signalphase von mindestens zwei SAR-Bildern. Eine Phasendifferenzmessung erfolgt auf der Grundlage der unterschiedlichen Signallaufzeit zwischen zwei räumlich getrennten Radarsensoren und der beleuchteten Erdoberfläche. Eine Voraussetzung für die Anwendung der InSAR-Technik ist die Tatsache, dass diese Phasendifferenz proportional zum Weglängenunterschied ist.

Im Folgenden werden das Messprinzip der SAR-Interferometrie und dessen Voraussetzungen sowie die Eigenschaften des InSAR-Signals dargelegt.

4.4.1 Messprinzip der SAR-Interferometrie

Die Antennen der Radarsysteme können für die InSAR-Technik grundsätzlich von unterschiedlichen Trägerplattformen transportiert werden. Die häufigsten Anwendungen werden von einem Flugzeug oder Satelliten ausgehend durchgeführt, wobei unterschiedliche Aufnahmekonstellationen differenziert werden. Die sogenannte Track-Interferometrie trifft dabei eine Aussage über die Anordnung der Radarsensoren zueinander sowie zur Flugrichtung und unterscheidet Across- und Along-Track-Interferometrie. Während die Across-Track-Interferometrie auf einer Anordnung der durch den Antennenabstand definierten effektiven Basislinie senkrecht zur Flugrichtung fußt und auf der Grundlage des Weglängenunterschiedes zur Erfassung von Geländehöhen verwendet wird, umfasst die Along-Track-Interferometrie eine Anordnung der Basislinie parallel zur Flugrichtung und dient der Bestimmung von Objektbewegungen (RIECHMANN 2009, S. 25f.).

Daneben werden mit der Single-Pass- und Repeat-Pass-Interferometrie die Aufnahmekonstellationen der sogenannten Pass-Interferometrie differenziert (GUTJAHR 2002, S. 34). Bei der Single-Pass-Interferometrie werden an einer Trägerplattform zwei örtlich getrennte Radarantennen angebracht, von der eine das Radarsignal aussendet und beide Antennen das zurückgestreute Signal registrieren. Diese Technik findet überwiegend bei Flugzeug-Missionen Anwendung, wurde jedoch darüber hinaus auch bei der Shuttle Radar Topographic Mission (kurz SRTM, vgl. WERNER 2001, RABUS et al. 2003, FARR et al. 2007) verwendet. Die Repeat- oder auch Dual-Pass-Interferometrie wird realisiert, indem ein Gebiet von zwei auf leicht zueinander versetzten Flugbahnen befindlichen Radarantennen überflogen wird. Alternativ kann auch eine einzelne Antenne auf einer Trägerplattform verwendet werden, wenn diese das Gebiet entsprechend der Bezeichnung Repeat-Pass in mehrmaliger Wiederholung überfliegt. Im Gegensatz zur Single-Pass-Anordnung treten hier aufgrund des zeitlichen Abstands der Signalerfassung für die Phasemessung zeitliche Dekorrelationsprozesse (in Abhängigkeit der zeitlichen Basislinie, engl.: temporal baseline) auf. Eine ausführliche Beschreibung dieser Prozesse erfolgt in Kapitel 4.4.1.1.

Da im Rahmen von Satellitenmissionen meist Repeat-Pass-Interferometrie verwendet wird, wird im Folgenden entsprechend von dieser Anordnung ausgegangen.

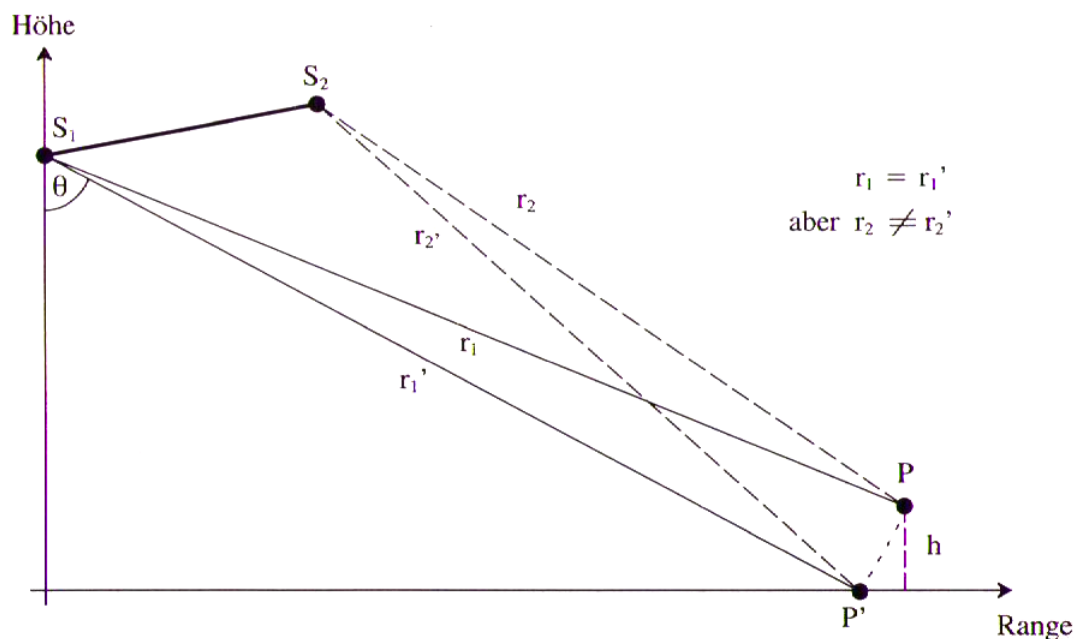


Abbildung 4.8: Aufnahmeprinzip eines InSAR-Systems: Da $r_2 \neq r_2'$ gilt, können P und P' voneinander unterschieden werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 13)

Abbildung 4.8 zeigt die Aufnahmegeometrie für ein InSAR-System unter Verwendung der Repeat-Pass-Interferometrie. Die beiden SAR-Sensorpositionen S_1 und S_2 sind um eine räumliche Distanz B_{eff} , die sogenannte effektive Basislinie, voneinander getrennt. Bei einer Realisierung eines SAR-Systems mit zu großen Basislinien treten aufgrund der unterschiedlichen Blickwinkel auch Veränderungen des Rückstreuoeffizienten desselben Objektes auf, die zu Bilddekorrelationsprozessen führen können. Dekorrelation der Aufnahmen führen im Allgemeinen auch immer zu Abweichungen in der Entfernungsmessung und beeinflussen folglich auch die Phasendifferenz (KIRCHER 2004, S. 26). Das

bei zunehmender Basislinie auftretende Stadium einer vollständigen Dekorrelation wird als kritische Basislinie (siehe Kapitel 4.4.1.1) bezeichnet.

Die unterschiedliche Position der Aufnahmesysteme S_1 und S_2 führt im Allgemeinen auch zu unterschiedlichen Distanzen r_1 und r_2 zwischen SAR-Sensor und Objekt, sodass eine eindeutige Erfassung des beleuchteten Objektes im dreidimensionalen Raum möglich ist (siehe Abbildung 4.8).

Die Verwendung nur eines SAR-Sensors, wie beim konventionellen SAR-Aufnahmeprinzip, hingegen würde zu Mehrdeutigkeiten bei der dreidimensionalen Erfassung des Zielobjektes führen, da die zwei Punkte P und P' wegen ihrer gleichen Range-Entfernung nicht voneinander unterschieden werden können (siehe Abbildung 4.9).

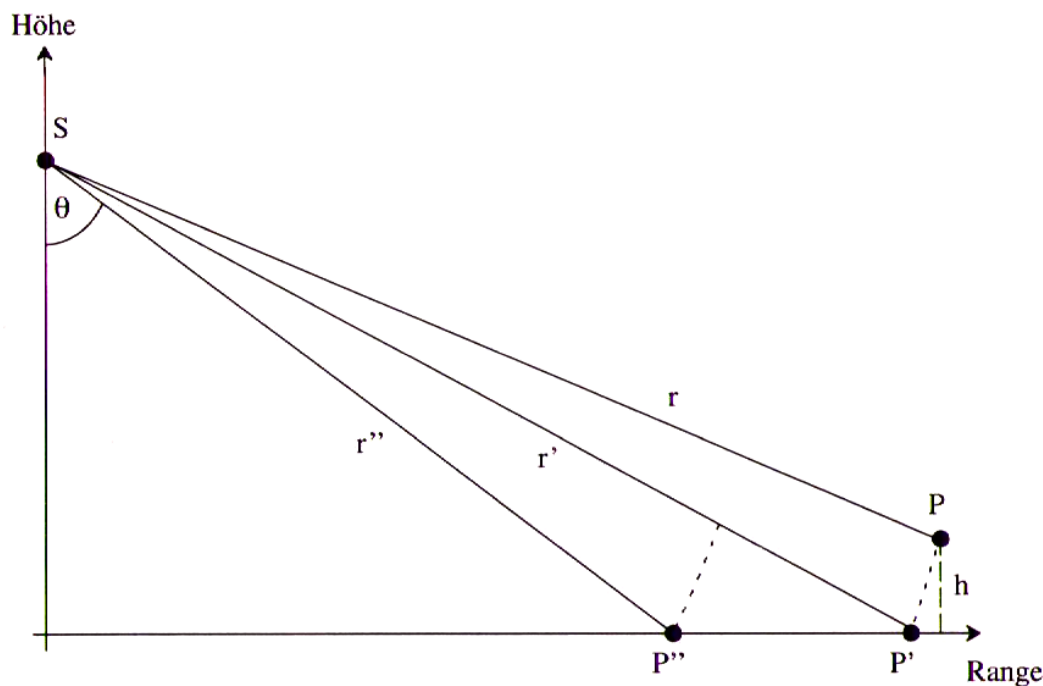


Abbildung 4.9: Aufnahmeprinzip eines konventionellen SAR-Systems: P und P' können aufgrund ihrer gleichen Entfernung zum Sensor nicht voneinander unterschieden werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 13)

Das Messprinzip der Interferometrie basiert auf einer Phasendifferenzmessung der monochromatischen elektromagnetischen Mikrowellen, die mit einer Genauigkeit im Bereich eines Bruchteils der herangezogenen Wellenlänge λ die Bestimmung der Weglängendifferenz in Range-Richtung gewährleistet (KNABE 2004, S. 34). Eine Weglängenmessung auf der Grundlage der Laufzeitdifferenzen zwischen den Signalechos würde zu einer deutlich schlechteren Genauigkeit führen.

Werden die Phasen ϕ_1 und ϕ_2 bei gegebener Wellenlänge λ entsprechend ihres proportionalen Verhaltens zur zurückgelegten doppelten Weglänge $2r$ nach

$$\phi_1 = \frac{2\pi 2r_1}{\lambda} + \phi_0 \quad (4.15)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi 2r_2}{\lambda} + \phi_0 \quad (4.16)$$

definiert, kann die Phasendifferenz beider Signalphasen als die sogenannte Phasengleichung

$$\delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) = \frac{4\pi}{\lambda}\delta r \quad (4.17)$$

formuliert werden (GUTJAHR 2002, S. 34, HEIN 1998, S. 189f.).

Mit Hilfe der ermittelten Phasendifferenz $\delta\phi$ und der interferometrischen Aufnahmegeometrie kann die Höhe des Objektes auf der Erdoberfläche bestimmt werden. Eine grundlegende Voraussetzung dessen ist die Existenz einer festen Phasenbeziehung beider SAR-Signale. Die Eigenschaften des Zielobjektes und die Aufnahmebedingungen dürfen sich nicht signifikant verändert haben, d.h. die Anteile in ϕ_0 in Gleichung 4.16 müssen gleich sein. ϕ_0 beschreibt den Phasenanteil des Signals, der von den spezifischen physikalischen Rückstreuungseigenschaften der beleuchteten Auflösungszelle abhängt sowie den die unterschiedlichen Störeffekte des Signals zusammenfassenden Anteil (SCHWÄBISCH 1995, S. 14). Unter diesen Bedingungen werden die beiden SAR-Signale auch als kohärent bezeichnet.

4.4.1.1 Kohärenz

Die Kohärenz γ definiert ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen zeitlich separat gemessenen (SAR-) Signalen eines Gebietes (KNABE 2004, S. 35). Eine SAR-Beobachtung kann im Allgemeinen bei Vernachlässigung eines thermischen Empfängerrauschens als ein deterministischer Prozess interpretiert werden, sodass eine identische Aufnahmekonstellation jeweils zu dem gleichen Ergebnis führen muss (GUTJAHR 2002, S. 39). Die SAR-Signale weisen in diesem Fall eine feste Phasenbeziehung auf und sind zueinander vollständig kohärent.

Die Entstehung von Kohärenz erfolgt auf der Grundlage einer identischen Verteilung der Einzelstreuer zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten der Signale und der damit verbundenen Erzeugung gleicher Objektphasen (KNABE 2004, S. 35f.). Mathematisch kann die Kohärenz γ zweier SAR-Signale nach GUTJAHR (2002, S. 39) zu

$$\gamma = \frac{\mathbf{E}\{u_1 u_2^*\}}{\sqrt{\mathbf{E}\{|u_1|^2\} \mathbf{E}\{|u_2|^2\}}} \quad (4.18)$$

formuliert werden und entspricht somit der Definition der Korrelation. Darin beschreibt u_1 das Signal des ersten Bildes und u_2^* das komplex konjugierte Signal der zweiten Aufnahme.

In der Realität ist die Annahme einer vollständigen Kohärenz aufgrund von diversen Störeffekten nicht gegeben. Diese Störeinflüsse führen wiederum zu unterschiedlichen Dekorrelationsprozessen. Der Begriff Dekorrelation entspringt aus der Konformität zur Definition der Korrelation, da der Betrag der Kohärenz $|\gamma|$ analog zur Korrelation im Intervall $[0, 1]$ gegeben ist und die Dekorrelation entsprechend durch $(1 - |\gamma|)$ festgelegt werden kann. Die unterschiedlichen Dekorrelationseffekte werden im nächsten Abschnitt dargelegt und gegliedert.

In Abbildung 4.10 ist das Kohärenzbild für eine Anwendung in der Niederrheinischen Bucht nach Anwendung des Multilook-Verfahrens (vgl. Kapitel 5.1.1.6) dargestellt. Je heller ein Pixel im Bild, desto höher ist der Grad der Kohärenz an dieser Stelle. Die sichtbaren Kohärenzunterschiede sind die Folge von diversen Dekorrelationseffekten (GUTJAHR 2002, S. 39f.). Bestimmte Flächen, insbe-

sondere Wasserflächen, Waldgebiete und von geometrischen Effekten betroffene Objekte, erscheinen im Kohärenzbild als vollkommen dekorreliert. Aus diesem Grund kann die Kohärenzmessung als ein empfindliches Instrument zur Klassifikation der Erdoberfläche interpretiert werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 23).

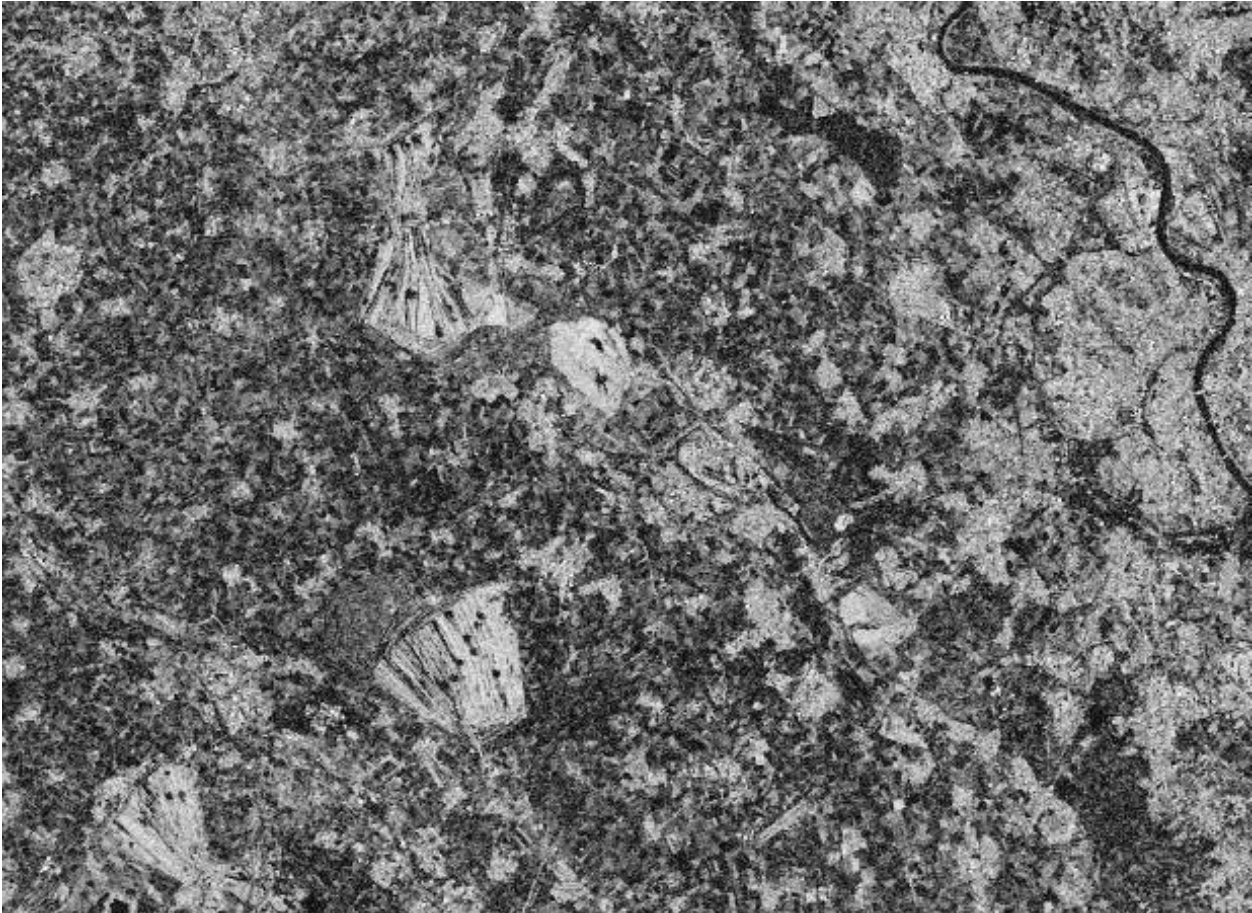


Abbildung 4.10: Kohärenzbild aus dem Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht nach Anwendung eines 5x1-Multilook-Verfahrens. Je heller ein Pixel im Bild, desto höher ist der Grad der Kohärenz an dieser Stelle.

Dekorrelationseffekte

Dekorrelationseffekte werden auf der Basis von Störeffekten induziert. Sie verhindern vollständig kohärente SAR-Signale und legen den Grad der Kohärenz fest. Der gesamte Kohärenzfaktor setzt sich nach SCHWÄBISCH (1995, S. 23) aus den nachfolgenden einzelnen Anteilen multiplikativ zusammen:

$$\gamma_{ges} = \gamma_{SNR} \cdot \gamma_{atmo} \cdot \gamma_{proc} \cdot \gamma_{scene} \cdot \gamma_{baseline} \quad (4.19)$$

Grundlegend werden aufnahmesystembedingte (geometrische) und temporale (zeitliche) Dekorrelationseffekte differenziert.

Der Dekorrelationsanteil in Abhängigkeit des Aufnahmesystems wird durch thermisches Rauschen im Radarsystem verursacht. Dieser ist im Allgemeinen vom Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio, kurz SNR) abhängig. Ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis führt zu einem wachsenden dekorrelierenden Einfluss, da der Informationsgehalt der Signalphase aufgrund eines schwächeren Signalechos abnimmt (KNABE 2004, S. 36f.). Mathematisch kann dies wie folgt formuliert werden:

$$\gamma_{SNR} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}}. \quad (4.20)$$

Auf detaillierte statistische Untersuchungen zur interferometrischen Phase wird in dieser Arbeit verzichtet. Für eine theoretische Analyse dieser Phasenstatistik, insbesondere die Betrachtung des komplexen Korrelationskoeffizienten als Maß für die Qualität der interferometrischen Phase sowie eine Herleitung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der interferometrischen Phase und der Phasenvarianz sei auf weiterführende Literatur (z.B. BAMLER und HARTL 1998, S. 16-26) verwiesen. Neben thermischem Rauschen können geometrische Dekorrelationsprozesse auch aus einer veränderten Aufnahmegeometrie resultieren. Im Gegensatz zu dem nahezu vernachlässigbar geringen Anteil aufgrund einer durch unterschiedliche Orbitpositionen verursachte Veränderung des Sensorblickwinkels und der damit verbundenen Phasenabweichung wird dem Einfluss $\gamma_{baseline}$ der effektiven Basislinie zwischen den SAR-Sensoren der entscheidende Störeinfluss zugeordnet. In diesem Zusammenhang kann eine maximale Länge der Basislinie abgeschätzt werden, für welche die SAR-Signale als inkohärent, d.h. vollständig räumlich dekorreliert angenommen werden müssen. Diese Entfernung wird auch als kritische Basislinie bezeichnet und konnte für die SAR-Satellitenmissionen ERS-1 und -2 zu einer maximal zulässigen Distanz von etwa 1100 m ermittelt werden (vgl. KNABE 2004, S. 36-37, SCHWÄBISCH 1995, S. 30f). Der Dekorrelationsprozess in Abhängigkeit der effektiven Basislinie stellt somit einen entscheidenden beschränkenden Faktor der SAR-Interferometrie dar (KIRCHER 2004, S. 30). Daneben entstehen noch weitere Fehlerquellen γ_{proc} bei der Datenakquisition, -prozessierung und -weiterverarbeitung.

Neben den aufnahmesystembedingte Dekorrelationseffekten existieren ebenfalls zeitliche Dekorrelationsprozesse, die aus der hohen Wechselhaftigkeit von Reflexionsbedingungen der Erdoberfläche hervorgehen. Auf diese Weise führen überwiegend eine veränderte Vegetation, Niederschlag oder Landnutzungs- und Bauarbeiten zu variierenden Streugeometrien (KIRCHER 2004, S. 30, KNABE 2004, S. 39f.). Derartige Effekte werden häufig auch als Szenendekorrelation γ_{scene} bezeichnet. Daneben wird die Kohärenz auch durch die Veränderung der dielektrischen Eigenschaften γ_{atmo} , insbesondere verursacht durch einen nicht gleichbleibenden Wassergehalt in den Bodenschichten und an der Erdoberfläche, sowie durch atmosphärische Konditionen beeinflusst. Obwohl das Verfahren des Radars mit synthetischer Aperture prinzipiell nahezu ungebunden an die Tageszeit und die Wetterlage ist, liegt hier eine Abhängigkeit vom jeweiligen Atmosphärenwassergehalt vor (KIRCHER 2004, S. 30). Variationen dessen führen zur Beeinflussung des Transmissionsgrads von Radarwellen (KNABE 2004, S. 39).

Während der aufnahmesystembedingte Dekorrelationsanteil im Datenmaterial umfassend korrigiert werden kann, ist eine Abschätzung der temporalen Dekorrelationseffekte im Allgemeinen nicht möglich.

Schätzung der Kohärenz

Das Problem bei der Berechnung der Kohärenz liegt darin, dass die aus den beschriebenen Einflussfaktoren der aufnahmesystembedingten und temporalen Dekorrelationsanteilen zusammengesetzte Gesamtkohärenz aus den Daten nicht unmittelbar messbar ist und daher geschätzt werden muss. Als Schätzparameter hat sich der komplexe Korrelationskoeffizient $\hat{\gamma}$ etabliert, der wie folgt definiert ist:

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{n=1}^N u_1 u_2^*}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |u_1|^2 \sum_{n=1}^N |u_2|^2}}. \quad (4.21)$$

Der Betrag des komplexen Korrelationskoeffizienten $\hat{\gamma}$ ergibt den Schätzwert der Kohärenz und seine Phase das arithmetische Mittel der interferometrischen Phase (GUTJAHR 2002, S. 39f.). Die Genauigkeit des Schätzwertes ist entscheidend von der Anzahl der zur Mittelung herangezogenen Pixel abhängig. Aus diesem Grund erfolgt häufig eine Mittelung der Kohärenz über mehrere Auflösungszellen (KNABE 2004, S. 42).

4.4.2 Eigenschaften des InSAR-Signals

Analog zur Charakteristik des SAR-Signals sollen im Folgenden auch die Eigenschaften des interferometrischen Signals dargelegt werden.

4.4.2.1 Interferometrische Phase

In Kapitel 4.3.2 wurden mit der Amplitude und der Phase die grundlegenden Eigenschaften des SAR-Signals vorgestellt. Aus den komplexwertigen Einzelsignalen u_i unterschiedlicher SAR-Aufnahmen kann durch eine pixelweise, komplexe Multiplikation das interferometrische Signal I , auch Interferogramm genannt, berechnet werden, d.h.

$$I = u_1 \cdot u_2^*. \quad (4.22)$$

Darin bezeichnet u_1 das Signal des ersten Bildes und u_2^* das komplex konjugierte Signal der zweiten Aufnahme. Die maßgebende Kenngröße der SAR-Interferometrie ist die Phase des Interferogramms $\bar{\Phi}$, welche als sogenannte interferometrische Phase bezeichnet wird und durch

$$\begin{aligned} \bar{\Phi} &= \arctan \left(\frac{\operatorname{Im}(u_1 \cdot u_2^*)}{\operatorname{Re}(u_1 \cdot u_2^*)} \right) \\ &= \arctan \left(\frac{\operatorname{Im}(I)}{\operatorname{Re}(I)} \right) \end{aligned} \quad (4.23)$$

gegeben ist. Entsprechend der Phasen ϕ_i ist auch die interferometrische Phase $\bar{\Phi}$ nur im Wertebereich $[-\pi, \pi]$ definiert. Daraus lässt sich eine hochgradige Mehrdeutigkeit (Ambiguität) erkennen. Abbildung 4.11 zeigt ein Interferogramm mit seiner charakteristischen Streifenstruktur für das Testgebiet in der Niederrheinischen Bucht nach der Anwendung des Multilook-Verfahrens (vgl. Kapitel 5.1.1.6). Die einzelnen Streifen (engl.: fringe) geben darin den gesamten Wertebereich der Phase wieder und demonstrieren sofort die Phasenmehrdeutigkeit. Diese muss im Rahmen der Prozessierung von InSAR-Daten aufgelöst werden (vgl. Kapitel 5.1.1.7).

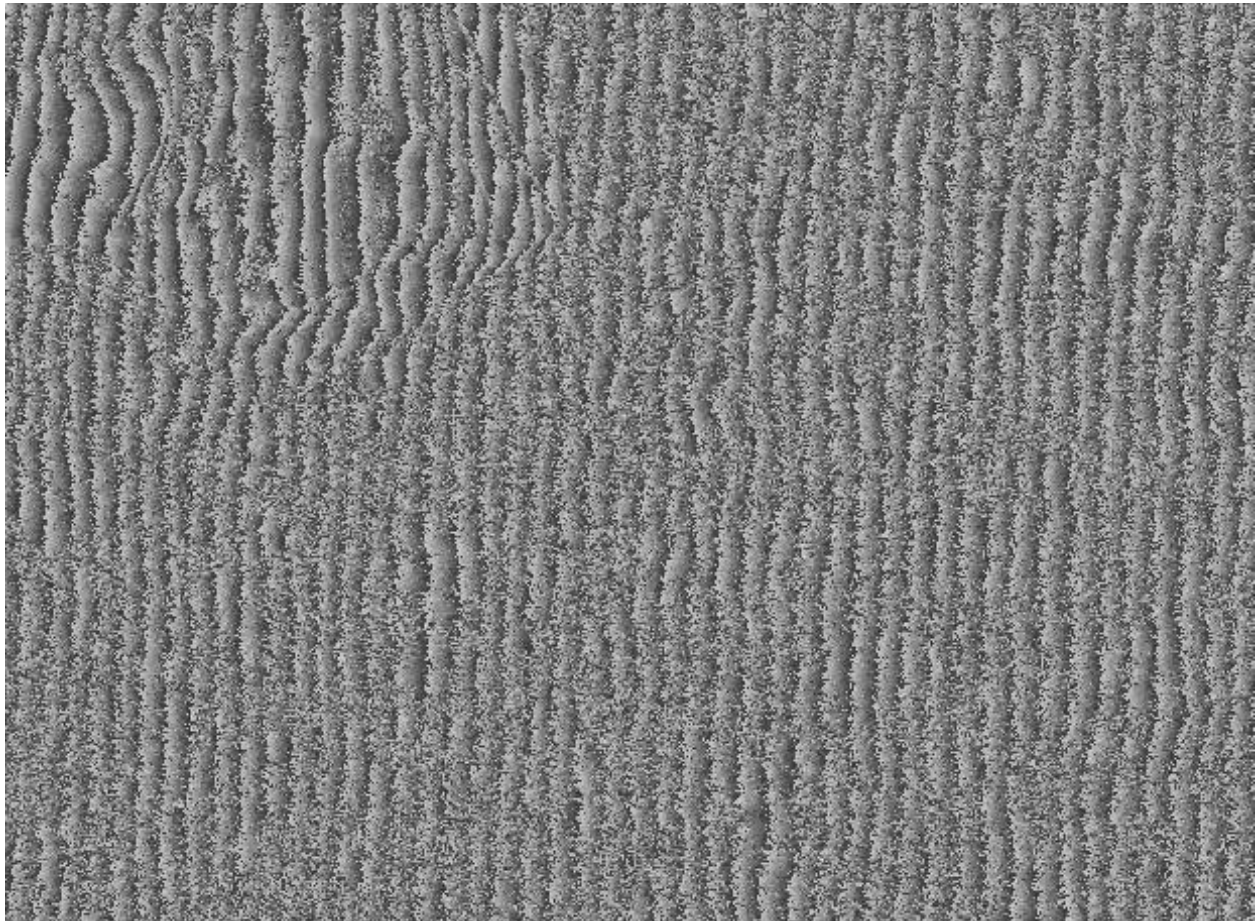


Abbildung 4.11: Interferogramm aus dem Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht nach Anwendung eines 5x1-Multilook-Verfahrens. Die einzelnen Streifen geben darin den gesamten Wertebereich der Phase wieder und demonstrieren sofort die Phasenmehrdeutigkeit.

4.4.2.2 Das Residuum

In Kapitel 4.4.1.1 wurde der komplexe Korrelationskoeffizient $\hat{\gamma}$ (vgl. Gleichung 4.21) als Qualitätskriterium für die Phasenwerte vorgestellt. Alternativ könnte dazu durch die Betrachtung des Residuums auch eine direkte Untersuchung der interferometrischen Phase $\bar{\Phi}$ mit gleicher Zielsetzung erfolgen. Das Residuum kann als eine Phaseninkonsistenz definiert werden, welche sich bei

der Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten (Phase Unwrapping, vgl. Kapitel 5.1.1.7) zu globalen Phasen- und folglich auch zu Höhenfehlern ausweiten kann (GOLDSTEIN et al. 1988, S. 713). Die Anzahl der in einem Interferogramm auftretenden Residuen kann als ein Maß für die Güte der interferometrischen Phase interpretiert werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 27). Dieser Sachverhalt soll im Rahmen des Phase Unwrappings in Kapitel 5.1.1.7 erneut aufgegriffen werden.

4.4.2.3 Phasenanteile

In Kapitel 4.4.2.1 wurde die interferometrische Phase (siehe Gleichung 4.23) eingeführt. Diese setzt sich nach RIECHMANN (2009, S. 29) additiv aus unterschiedlichen Anteilen zusammen:

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_{topo} + \bar{\Phi}_{defo} + \bar{\Phi}_{flatearth} + \bar{\Phi}_{atmo} + \bar{\Phi}_{noise}. \quad (4.24)$$

Im Rahmen der InSAR-Prozessierung definiert der Anteil der topographischen Phase $\bar{\Phi}_{topo}$ den entscheidenden Parameter zur Ermittlung von Höheninformation und der anschließenden Generierung von digitalen Geländemodellen. Um diese Zielgröße zu erhalten, wird zunächst der Deformationsanteil $\bar{\Phi}_{defo}$ betrachtet, der aus der potentiellen Objekt- oder Flächenbewegungen an der Erdoberfläche in Blickrichtung des Radarsensors resultiert. Dieser Einflussfaktor kann jedoch nicht aus dem Interferogramm eliminiert werden und motiviert das Verfahren der differentiellen SAR-Interferometrie (D-InSAR), welches in Kapitel 4.5 analysiert werden soll. Daneben ist in der interferometrischen Phase auch ein auf der spezifischen interferometrischen Aufnahmegeometrie basierender Anteil enthalten. Der sogenannte Phasenanteil der „flachen Erde“ (engl. flatearth) $\bar{\Phi}_{flatearth}$ resultiert aus unterschiedlichen Entfernungsdifferenzen für unterschiedliche Schrägentfernungen. Er kann über die Information der Aufnahmegeometrie berechnet sowie anschließend aus dem Interferogramm entfernt werden und wird in Kapitel 5.1.1.5 ausführlich dargelegt. Auch die Phasenanteile des Signalrauschens $\bar{\Phi}_{noise}$, insbesondere aufgrund sich ändernder Bedingungen während den Aufnahmezeitpunkten, sowie der Atmosphäre $\bar{\Phi}_{atmo}$ müssen aus der interferometrischen Phase subtrahiert werden. Wie in Kapitel 4.4.1.1 dargelegt, führt die Atmosphäre aufgrund ihrer Abhängigkeit vom Wassergehalt zu einem Dekorrelationseffekt und in diesem Zusammenhang zu einer Reduktion des Kohärenzgrades der SAR-Signale. Sowohl der Phasenanteil der Atmosphäre, als auch das Phasenrauschen können durch den Übergang auf eine Analyse von Bildstapeln im Zusammenhang der Permanent Scatterer Interferometry (siehe Kapitel 4.6 und 5.1.3) weitestgehend kompensiert werden.

4.5 Differentielle SAR-Interferometrie

Das Ziel der differentiellen SAR-Interferometrie (D-InSAR) ist die Erfassung und Überwachung von Deformationen an der Erdoberfläche aus der Phasendifferenz zweier interferometrischer Phasen (Phasenanteile der interferometrischen Phase, vgl. Gleichung 4.24). Von besonderem Interesse ist dabei folglich genau der Phasenanteil $\bar{\Phi}_{defo}$, der durch Bewegungen der abgebildeten Oberfläche radial zum Sensor verursacht wird. Um diesen Anteil zu separieren und somit ein differentielles Interferogramm zu erzeugen, muss der in der InSAR-Methode gesuchte Phasenanteil der Topographie

eliminiert werden. Die Bezeichnung „differentielle Interferometrie“ deutet dabei bereits eine doppelte Differenzbildung an. Im Allgemeinen werden dazu zwei unterschiedliche Methoden angewendet. Die erste Strategie basiert auf der Verwendung zweier SAR-Aufnahmen, aus denen nach der bereits beschriebenen Vorgehensweise ein Interferogramm erzeugt wird. Die topographische Phase kann dann mit Hilfe eines externen Digitalen Geländemodells (DEM) subtrahiert werden. Dieses kann beispielsweise aus der Shuttle Radar Topographie Mission (SRTM) gewonnen werden (WERNER 2001, RABUS et al. 2003, FARR et al. 2007). Liegt kein externes DEM vor, kann unter Verwendung dreier SAR-Bildern aus einem Bildpaar (z.B. SAR-Aufnahmen 1 und 2) ein InSAR-DEM und aus einem zweiten Bildpaar (z.B. SAR-Aufnahmen 2 und 3) ein Interferogramm generiert werden. Das differentielle Interferogramm resultiert anschließend aus der Subtraktion von erzeugtem Interferogramm und Höhenmodell (SÖRGEL 2006, S. 7, RIECHMANN 2009, S. 30).

Die D-InSAR-Methode ermöglicht im Allgemeinen die Detektion von Erdoberflächenbewegungen im Millimeterbereich (COLESANTI et al. 2001, S. 1), allerdings wird sie durch die aufnahmesystembedingte und temporale Dekorrelation (siehe Kapitel 4.4.1.1) sowie atmosphärische Einflüsse stark begrenzt. Die Atmosphäre führt insbesondere zu Beeinträchtigungen bezüglich der Trennung der Phasenanteile von Atmosphäre und Deformation (KIRCHER 2004, S. 34f.). Der dabei dominante Effekt ist durch die turbulente Wasserdampfverteilung in der unteren Troposphäre bedingt (BAMLER et al. 2008, S. 246). Dieser Einfluss ist im Rahmen der differentiellen InSAR-Interferometrie keineswegs zu vernachlässigen und führte in der Vergangenheit zu zahlreichen Untersuchungen und Analysen (siehe z.B. ZEBKER et al. 1997 oder LI et al. 2002).

Diese Hauptfehlerquellen der konventionellen Prozessierungsmethode können mit der sogenannten Permanent Scatterer Interferometry reduziert werden (KAMPES 2006, S. 5).

4.6 Permanent Scatterer Interferometry

Die Permanent Scatterer Interferometry (kurz PSI oder PS-InSAR), auch als Permanent Scatterer Technik (kurz PS-Technik) bekannt, wurde Ende der Neunziger Jahre von Alessandro Ferretti, Claudio Prati und Fabio Rocca am Polytechnikum Mailand (ital.: Politecnico di Milano, kurz POLIMI) entwickelt. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Erweiterungen und Modifikationen dieses Ansatzes vorgeschlagen (z.B. BERARDINO et al. 2002, MORA et al. 2003, COLESANTI et al. 2003, HOOPER et al. 2004, LANARI et al. 2004, ADAM et al. 2004, KAMPES 2006 oder SHANKER AGRAM 2010).

Der Begriff „Permanent Scatterer Interferometry“ wird als ein übergeordneter Begriff für diverse unterschiedliche Techniken und Methoden verwendet. Im Folgenden bezeichnet dieser Terminus jedoch die urheberrechtlich geschützte und patentierte Methode aus FERRETTI et al. (2000A), FERRETTI et al. (2000B) und FERRETTI et al. (2001).

Wie in den Kapiteln 4.4 und 4.5 beschrieben, kann die beobachtete Phase in einem Pixel eines Interferogramms mit der Differenz der Distanz eines Bodenpunktes zum Radarsensor zum Erfassungszeitraum in Zusammenhang gebracht werden. Diese Differenz ist wiederum abhängig von der Deformation an der Erdoberfläche, der Topographie und der atmosphärischen Verzögerung. In einem Interferogramm sind alle Einflussfaktoren als Phasenanteil enthalten. In vielen Untersuchungen wird

angenommen, dass die interessierende Komponente, bei der D-InSAR-Technik also der Phasenanteil der Deformation, im Phasendifferenzsignal dominant ist und einzelne andere Komponenten je nach Anwendung und Verfahren unabhängig geschätzt und berücksichtigt werden können. In der Realität treffen die Annahmen des idealisierten Falls im Allgemeinen aufgrund von (zeitlichen und geometrischen) Dekorrelationseffekten und atmosphärischen Einflüssen nicht zu. Die Folge ist die Reduktion des Kohärenzgrades und ein zunehmend komplizierter werdender Prozess des Phase-Unwrappings (vgl. Kapitel 5.1.1.7).

Das Ziel der Permanent Scatterer Technik ist die Umgehung der Hauptbeschränkungen der Repeat-Pass SAR-Interferometrie, welche insbesondere die geometrische und temporale Dekorrelation sowie die atmosphärische Laufzeitverzögerung umfassen (vgl. KAMPES 2006, S. 5). Daraus resultiert gleichzeitig ein wesentlicher Vorteil dieser Technik gegenüber der konventionellen D-InSAR-Methode. Dazu werden ausschließlich kohärente Pixel, die sogenannten „Permanent Scatterer“ (PS) betrachtet. Diese zeichnen sich insbesondere durch langfristig stabile Rückstreuungseigenschaften sowie ein außerordentlich gutes Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio, kurz SNR) aus. Da diese punktuellen Rückstreuer weniger von geometrischer Dekorrelation beeinflusst sind, wird die PSI-Methode im Gegensatz zur konventionellen D-InSAR-Anwendung nicht durch eine zunehmende effektive Basislinie beeinträchtigt. Als eine Konsequenz dessen erlaubt die Permanent Scatterer Methode den Gebrauch aller aufgenommenen Daten, d.h. zur Erstellung von differentiellen Interferogrammen werden ganze Bildstapel mit einer nach bestimmten Kriterien ausgewählten Master-Szene (vgl. Kapitel 5.1.1.1) herangezogen (KAMPES 2006, S. 5).

Als ein weiterer Vorteil der PSI-Technik gegenüber der D-InSAR-Methode können aus einer geeigneten Datenmodellierung und einem entsprechenden Analyseverfahren diverse interferometrische Produkte erhalten werden. Das Hauptresultat einer PSI-Analyse ist eine Abbildung der durchschnittlichen Bewegungsrate an der Erdoberfläche über den gesamten Betrachtungszeitraum sowie die Deformationszeitreihen für jeden einzelnen Permanent Scatterer Punkt (CROSETTO et al. 2009, S. 1).

Die im Rahmen der Permanent Scatterer Interferometry verwendete Prozessierungsstrategie und eine detaillierte Beschreibung der einzelnen notwendigen Methoden werden in Kapitel 5.1.3 dargelegt und analysiert.

5. Integrierte Modellierung klassischer Landesvermessung und satellitengestützter Anwendungen

Zur Verifizierung der interferometrischen Produkte, insbesondere der generierten InSAR-Geländemodelle (InSAR-DEM) und der Erfassung von Bewegungen der Erdoberfläche über die differentielle Interferometrie, werden diese mit den Ergebnissen aus Analysen der klassischen Landesvermessung verglichen und beurteilt. Nur auf diese Weise kann im Rahmen einer späteren Anwendung eine integrierte Modellierung von InSAR-Daten und Nivellementbeobachtungen erfolgen. Im Folgenden werden dazu zunächst die Entwicklung und der Ablauf beider Verfahren vorgestellt. Anschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Verifizierung anhand eines Testgebietes in der Niederrheinischen Bucht. Dazu wurden von der Europäischen Weltraumorganisation (engl.: European Space Agency, kurz ESA) sowie der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW Daten zur Verfügung gestellt.

5.1 Interferometrischer Prozessierungsablauf

Im Folgenden soll der Prozessierungsablauf der interferometrischen Datenverarbeitung erläutert werden. Abbildung 5.1 zeigt die Prozessierungskette zur InSAR-basierten Erzeugung digitaler Geländemodelle.

Die Datengrundlage ist für alle Anwendungen durch SAR-Aufnahmen im sogenannten Single-look-complex-Format (kurz SLC-Format) gegeben. Zur Realisierung und Implementierung diente das Softwarepaket Remote Sensing Package Graz (kurz RSG, siehe auch RSG 2012) des Institutes für Informations- und Kommunikationstechnologien (DIGITAL) der Forschungsgesellschaft mbH Joanneum Research in Graz, Österreich¹. Weiterführende Informationen zur RSG-Software, insbesondere zur Umsetzung der im Folgenden vorgestellten Prozessierungsschritte auf der Grundlage der in dieser Arbeit verwendeten ERS-1- und -2 Daten sind in Anhang C aufgeführt.

¹Remote Sensing Software Graz, Version 7.11 (Built 2012.04.18), Joanneum Research, Graz-Austria

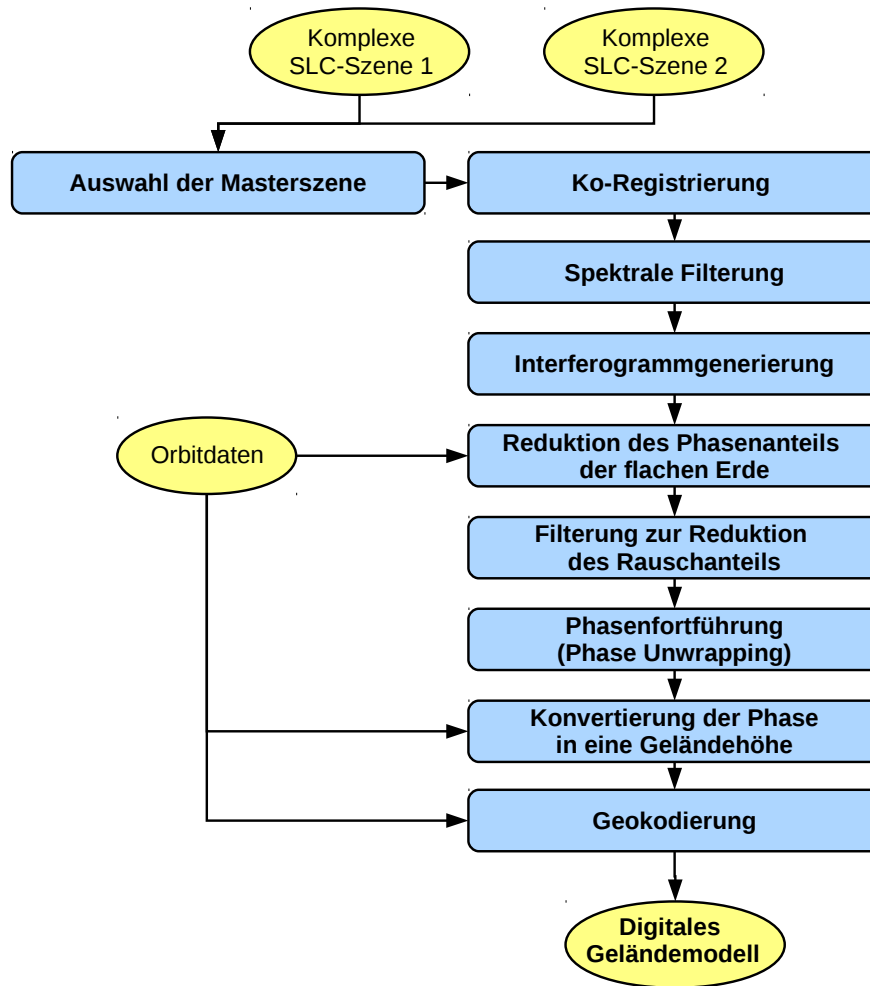


Abbildung 5.1: Ablaufschema der InSAR-Prozessierung

5.1.1 Erstellung des interferometrischen digitalen Geländemodells

Im Folgenden sollen die Methoden der einzelnen, in Abbildung 5.1 dargestellten Ablaufschritte erläutert werden.

5.1.1.1 Auswahl von „Master“- und „Slave“-Szene

Bevor die nachfolgenden Prozessierungsschritte durchgeführt werden können, ist die Auswahl einer sogenannten Master-Szene erforderlich. Diese bleibt in ihrer Bildgeometrie während der gesamten Prozessierungsdauer unverändert. Die verbleibende Aufnahme eines Datenpaares (D-InSAR), bzw. die übrigen Bilder eines Datenstapels (PSI) werden als Slave-Szenen bezeichnet.

Die Auswahl der Master-Szene erfolgt nach strengen Kriterien, zu denen im Wesentlichen die effektive, zeitliche und die Doppler-Basislinie zählen. Während die effektive Basislinie die geometrische Entfernung der Repeat-SAR-Sensoren definiert, beschreibt die zeitliche Basislinie die Differenz der Aufnahmezeitpunkte mehrerer Slave-Szenen zu einer Master-Szene. Die Doppler-Basislinie kann als

die Differenz der sogenannten Doppler-centroid-frequency zur Referenzszene verstanden werden. Des Weiteren können auch die während des Aufnahmezeitpunktes vorherrschende Jahreszeit und die zu erwartenden Atmosphäreneinflüsse weitere Kriterien zur Auswahl der Masterszene darstellen (KIRCHER 2004, S. 36f).

Die zulässige Dimension der Basislinien ist jeweils von dem zur Prozessierung herangezogenen Datenmaterial sowie dem verwendeten Sensortyp abhängig und kann nicht allgemein festgelegt werden.

5.1.1.2 Ko-Registrierung

In der Repeat-Pass-Interferometrie ist die Bildgeometrie von SAR-Datenpaaren aufgrund der abweichenden Orbits und den daraus resultierenden unterschiedlichen Aufnahmepositionen der SAR-Radarsysteme im Allgemeinen nicht identisch, d.h. ein Bodenpunkt besitzt nicht in allen Aufnahmen dieselben Bildkoordinaten. Aus diesem Grund müssen beide Aufnahmen ko-registriert werden, d.h. sie müssen aufeinander angepasst werden, sodass ein möglichst hoher Kohärenzgrad der Datensätze gewährleistet werden kann (SCHWÄBISCH 1995, S. 28).

Zunächst werden dazu meist in bestimmten lokalen Bildbereichen Kreuz-Korrelationsanalysen durchgeführt, um sogenannte Verknüpfungs- oder Passpunkte (engl.: tie-points) aus den Amplitudenbildern von SAR-Datenpaaren zu bestimmen. Dieser Schritt wird häufig als grobe Verschiebung bezeichnet, da die Bildgeometrie des Slave-Bildes auf die Bildgeometrie des während der gesamten Prozessierungskette unveränderten Master-Bildes angepasst wird (GUTJAHR 2002, S. 46-48). Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderung an die Ko-Registrierung erfolgt nach der Ermittlung der groben Verschiebung im Rahmen der sogenannten Feinreferenzierung eine subpixelgenaue Anpassung der Bildpaare (KNABE 2004, S. 35). Als Gütekriterium der Anpassung dient der maximale Korrelationskoeffizient (Gleichung 4.21), der den Grad der Kohärenz zwischen beiden SAR-Signalen beschreibt (vgl. Kapitel 4.4.1.1). Für die Transformationsvorschrift hat sich bei der Anwendung von ERS-1 und -2 Daten eine affine Transformation etabliert. Nach der Transformation sind die Koordinatenpositionen im Allgemeinen nicht mehr ganzzahlig, sodass ein Resampling-Vorgang, d.h. eine Umschichtung der Bildelemente auf ein neues regelmäßiges Raster, notwendig wird (GUTJAHR 2002, S. 46-48).

5.1.1.3 Spektrale Verschiebung und Filterung

Unterschiedliche SLC-Szenen enthalten im Allgemeinen auch bei einer gleichen geometrischen Abdeckung des Gebietes nach der Durchführung der Ko-Registrierung verschiedene Informationen über das abgebildete Gebiet. Mögliche Ursachen können unterschiedliche Blickwinkel sein, unter denen die SLC-Bilder aufgenommen wurden, sowie in Range-Richtung eine von Null verschiedene Basislinie und unterschiedliche Antennen-Verkippungswinkel (engl. squint angle) gegenüber der Normalen der Flugbahn in Azimut-Richtung (SCHWÄBISCH 1995, S. 31). Der Squint-Winkel gibt den Verkippungswinkel der Hauptantennenstrahlrichtung von einer optimalen Ausrichtung auf das Zielobjekt an. Demnach wäre die SAR-Antenne bei einem Verkippungswinkel von 0 Grad ideal auf das Zielobjekt ausgerichtet. Werden zwei SLC-Szenen nun überlagert, entsteht durch die nicht in beiden

Aufnahmen vorhandenen Frequenzen ein unerwünschter, zusätzlicher Rauschanteil (KIRCHER 2004, S. 32). Das Datenpaar muss somit auf das gemeinsame Frequenzband reduziert werden. Dieser Effekt kann durch eine geeignete Bandpassfilterung in Range und Azimuth erreicht werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 32). Für eine ausführliche Darstellung von Verfahren zur Durchführung dieser Filterung sei auf weiterführende Literatur verwiesen (z.B. SCHWÄBISCH 1995, PRATI und ROCCA 1994).

5.1.1.4 Berechnung der interferometrischen Phase

Das Interferogramm I kann aus den komplexwertigen Einzelsignalen u_i unterschiedlicher SAR-Aufnahmen durch eine pixelweise, komplexe Multiplikation bestimmt werden (siehe Gleichung 4.22). Daraus lässt sich nach Gleichung (4.23) die hochgradig mehrdeutige interferometrische Phase $\bar{\Phi}$ berechnen. Eine detaillierte Beschreibung zur interferometrischen Phasenprozessierung wurde bereits in Kapitel 4.4.2.1 gegeben.

5.1.1.5 Reduktion des Phasenanteils der flachen Erde

Entsprechend Gleichung (4.24) ist in der interferometrischen Phase auch ein auf der spezifischen interferometrischen Aufnahmegeometrie basierender Anteil enthalten. Der sogenannte Phasenanteil der „flachen Erde“ (engl. flatearth) $\bar{\Phi}_{flatearth}$ resultiert nach SCHWÄBISCH (1995, S. 39) aus unterschiedlichen Entfernungsdifferenzen Δr für verschiedene Schrägentfernungen. Die Aufnahmegeometrie in Bezug auf eine topographisch „flache Erde“ ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

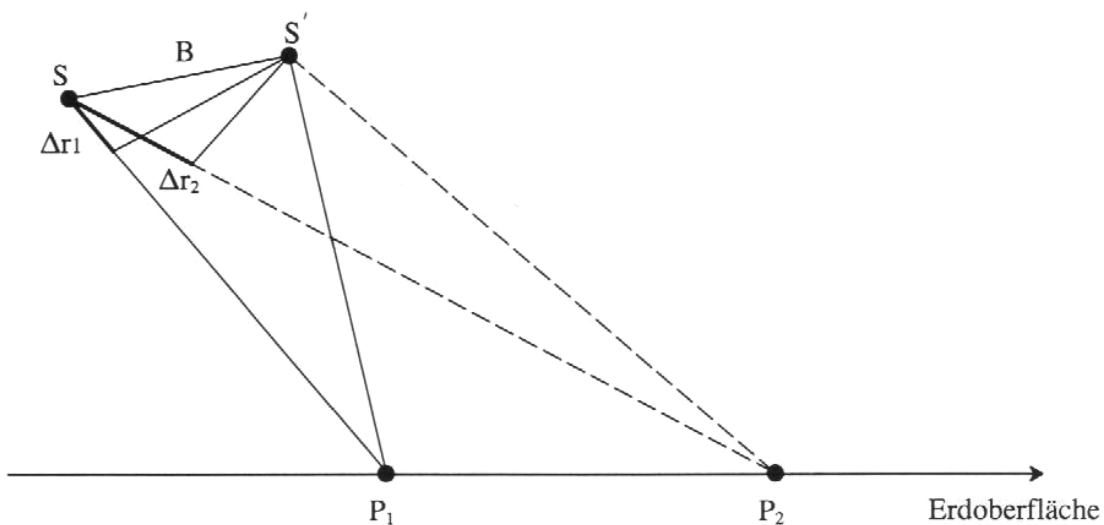


Abbildung 5.2: Unterschied in der Weglängendifferenz für Punkte gleicher Höhe in Nah- und Fern-Range als eine Folge der Schrägsicht-Aufnahmegeometrie (SCHWÄBISCH 1995, S. 40).

Abbildung 5.3 zeigt den daraus resultierenden Phasenverlauf unter der Annahme, dass zwischen Phase und Entfernung eine näherungsweise lineare Beziehung besteht. Für die Abbildung einer ebenerdigen („flachen“) Oberfläche wird im Interferogramm folglich eine Abfolge von parallelen Streifen konstanter Phasenwerte in Azimutrichtung erwartet (GUTJAHR 2002, S. 50, KIRCHER 2004, S.

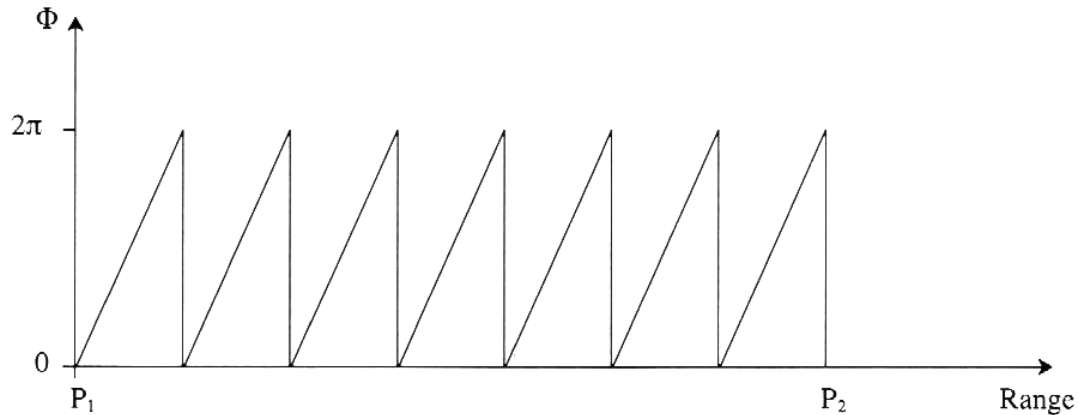


Abbildung 5.3: Das dem Sachverhalt in Abbildung 5.2 entsprechende Phasenmuster für eine topographisch flache Erde. Schematische Darstellungsform (SCHWÄBISCH 1995, S. 40).

33). Nach GUTJAHR (2002, S. 50) wird dieses Muster durch unterschiedliche Geländehöhen auf der Erdoberfläche sowie überwiegend durch variierende Satellitenbahnen verursachte Abweichungen in der Aufnahmegeometrie modifiziert. Die leicht divergierenden Satellitenbahnverläufe führen zu einer Fringe-Frequenz in Azimutrichtung, die auch als Azimut-Fringes bezeichnet wird (SCHWÄBISCH 1995, S. 40). Prinzipiell ist eine Korrektur der interferometrischen Phase um den Phasenanteil der flachen Erde nicht zwingend notwendig, jedoch erfolgt durch die Elimination dieses Anteils eine Reduktion der Anzahl der Fringes. Somit ist eine entscheidende Begünstigung bei der sogenannten Phasenabwicklung, d.h. der Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten (engl.: phase unwrapping, vgl. Kapitel 5.1.1.7) gewährleistet, da der Phasengradient nach SCHWÄBISCH (1995, S. 40) mit geringer werdender Fringe-Frequenz kleiner und das Aufspüren von Phaseninkonsistenzen dementsprechend vereinfacht wird (vgl. Kapitel 5.1.1.7).

Ein weiterer sich aus der Elimination des geometrisch bedingten Phasenanteils ergebender Vorteil ist in Abbildung 5.4 ersichtlich: der Fringe-Verlauf im korrigierten Interferogramm korreliert bereits mit der tatsächlichen Topographie des Geländes (GUTJAHR 2002, S. 50).

Grundsätzlich wird in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Elimination des Phasenanteils der flachen Erde vorgeschlagen (vgl. GABRIEL und GOLDSTEIN 1988, LI und GOLDSTEIN 1990, PRATI und ROCCA 1990, PRATI und ROCCA 1993, SMALL et al. 1993, SCHWÄBISCH 1995). Ein solches Korrektur-Verfahren setzt die Kenntnis der dem Fringe-Verlauf zugehörigen Frequenz (Fringe-Frequenz) sowie der räumlichen Lage der Sensoren voraus. Die Ausdehnung der Basislinie entscheidet über die Frequenz, während die Sensorpositionen unmittelbar Einfluss auf die Ausrichtung des Fringemusters nehmen (MOLL 2007, S. 39). Aus diesem Grund wird neben einer Reduktion der Anzahl der Fringes eine genaue Modellierung der Basislinie angestrebt. Während ersteres im Allgemeinen in allen Methoden gewährleistet wird, resultieren aus den unterschiedlichen Verfahren gravierende Genauigkeitsunterschiede (SCHWÄBISCH 1995, S. 41). Die Verwendung von Corner-Reflektoren (vgl. PRATI und ROCCA 1993) führt zur höchsten Genauigkeit, jedoch ist deren Verfügbarkeit im Allgemeinen nicht gegeben. Auch die Verwendung von Paßpunkten führt zu hohen Genauigkeiten, jedoch sind externe Höhenangaben im Interferogramm notwendig (vgl. SMALL et al. 1993). Daneben wird beispielsweise in LI und GOLDSTEIN (1990) die Subtraktion einer konstanten

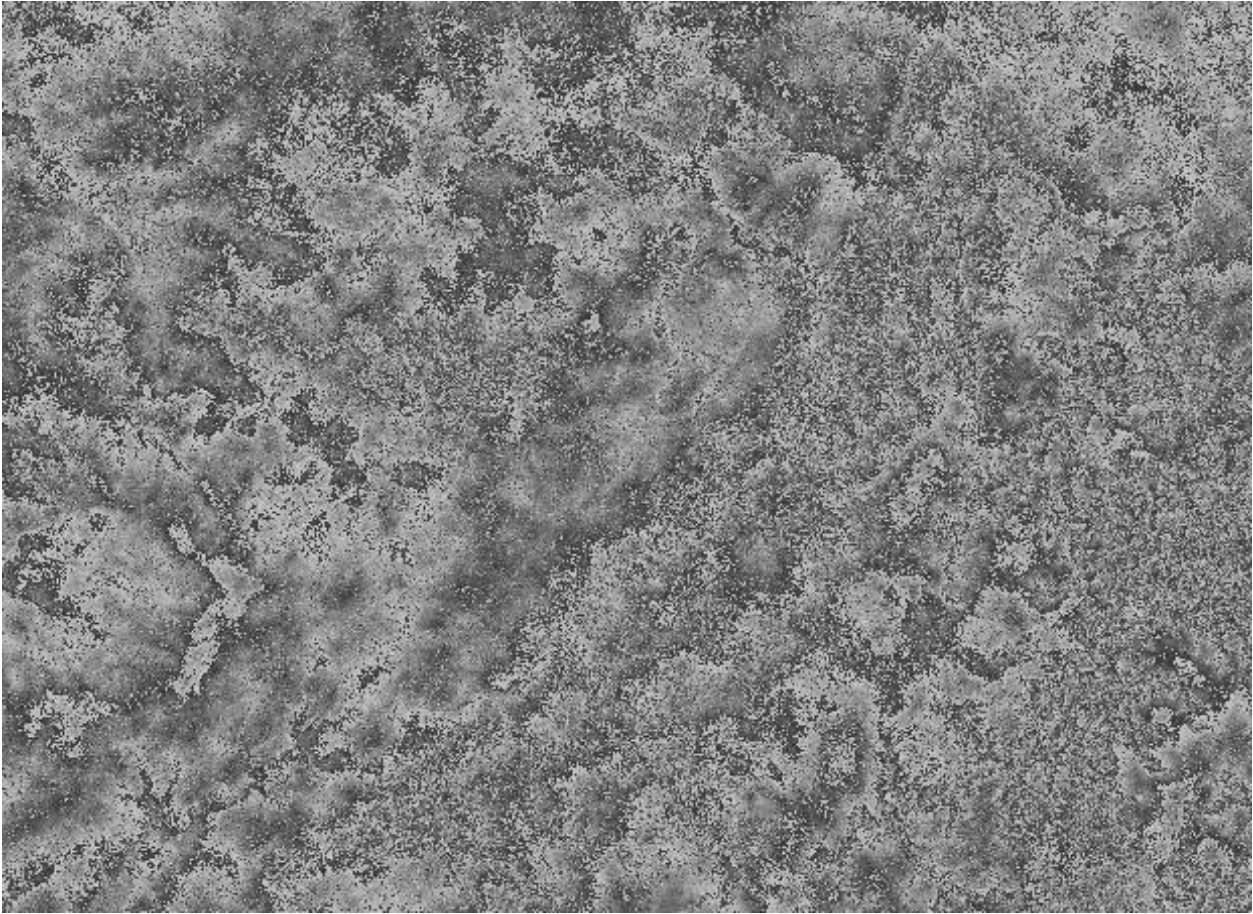


Abbildung 5.4: Fringe-Bild aus dem Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht nach Filterung um den Phasenanteil der flachen Erde und Anwendung eines 5x1-Multilook-Verfahrens

Fringe-Rate vorgeschlagen. Anstelle der Verwendung eines konstanten Anteils könnte nach GUTJAHR (2002, S. 52) mit Hilfe der Analyse des Spektrums einer Fast-Fourier-Transformation (kurz: FFT) die dominante Fringe-Frequenz in Range- und Azimutrichtung bestimmt werden. Diese wird im Rahmen einer Filterung im Komplexen vom vorliegenden Interferogramm subtrahiert. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass die dominanten Frequenzen die Phase der flachen Erde in Range- und Azimutrichtung bestimmen (GUTJAHR 2002, S. 52). Ein Nachteil dieser Methode, insbesondere für die spätere Georeferenzierung des Höhenmodells, ist der fehlende Bezug zur Erdoberfläche.

Nach GUTJAHR (2002, S. 52) ist demnach auch ein geometrischer Ansatz denkbar, der jedoch auf der Kenntnis der Orbitdaten für Master- und Slave-Szene basiert. Der sogenannte Preliminar-Orbit, der im Allgemeinen standardmäßig als Orbit-Vektor zu den jeweiligen SLC-Aufnahmen mitgeliefert wird, genügt häufig nicht den geforderten Genauigkeitsanforderungen, sodass vielmehr auf präzise Orbits (engl.: Precise-Orbit) im Rahmen von Nachbereitungsmaßnahmen (engl.: post-processing) zurückgegriffen wird (GUTJAHR 2002, S. 52). Diese werden beispielsweise von der Technischen Universität Delft (Institute for Earth-Oriented Space research, kurz: DEOS) zur Verfügung gestellt (vgl. SCHARROO et al. 1998). Der geometrische Ansatz basiert auf der Berechnung des Phasenanteils der flachen Erde an einer Auswahl von gleichmäßig über die Szene verteilten Gitterpunkten. Die pixelweise Berechnung dieser Phase wird häufig über ein quadratisches Polynom realisiert und kann anschließend vom Interferogramm subtrahiert werden. Als eine vereinfachende Annahme wird die

Erde im Rahmen der verwendeten Geolokalisierungsprozedur als Ellipsoid angenommen (GUTJAHR 2002, S. 52).

Sowohl der geometrische Ansatz, als auch die Methode auf der Basis einer Fast-Fourier-Transformation sind im Softwarepaket RSG implementiert.

5.1.1.6 Filterung zur Reduktion des Rauschanteils

Im Allgemeinen enthält die interferometrische Phase einen durch diverse Dekorrelationseffekte resultierenden Rauschanteil (siehe Kapitel 4.4.1.1). Aus diesem Grund ist in der Regel die Anwendung einer Filtertechnik auf das Interferogramm erforderlich, da die weiteren Prozessierungsschritte die Notwendigkeit möglichst rauscharmer Signale bedingen. Insbesondere würden sich lokale Phasenfehler beim Phase Unwrapping zu globalen Höhenfehlern fortpflanzen (SCHWÄBISCH 1995, S. 46). Idealerweise sollte sich der Filterungsprozess an der jeweiligen Signalcharakteristik orientieren. Diese ist nach der Reduktion des Phasenteils der flachen Erde durch lokale, topographieabhängige Phasenvariationen geprägt. Der Phasengradient ist gleichbedeutend mit der lokalen Fringe-Frequenz. Seine Größe ergibt sich in Abhängigkeit des Neigungsgrades des Geländes und dem Betrag der effektiven Basislinie, während seine Richtung ausschließlich von den topographischen Gegebenheiten abhängt (SCHWÄBISCH 1995, S. 46).

Die Folge der komplexen Interaktion dieser Parameter ist ein vielseitiges Signal, dessen Frequenzinhalt sowohl zwischen unterschiedlichen Aufnahmen, als auch innerhalb einer Aufnahme sehr stark variieren kann. Eine geeignete Filtertechnik muss folglich eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, insbesondere eine effektive Rauschunterdrückung im Signal sowie eine gleichzeitige Garantie zur Erhaltung der vielfältigen Strukturen im Interferogramm (SCHWÄBISCH 1995, S. 46).

Eine geeignete Filtertechnik zur Minderung diverser Rauscheffekte in den Interferogrammen ist die in GOLDSTEIN et al. (1988) vorgestellte Multilook-Bildung (MEYER 2004, S. 23). Das Verfahren findet im Zusammenhang der Berechnung der interferometrischen Phase (siehe Gleichung 4.23) Anwendung, indem eine Mittelung über eine Anzahl von $N \times M$ benachbarter Werte erfolgt. Mathematisch formuliert gilt nach GUTJAHR (2002, S. 49):

$$\bar{\phi} = \arctan \left(\frac{\text{Im}(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_1^{(n,m)} u_2^{*(n,m)})}{\text{Re}(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_1^{(n,m)} u_2^{*(n,m)})} \right). \quad (5.1)$$

Die Dimension $N \times M$ ist idealerweise so zu wählen, dass eine neue Pixelausdehnung entsprechend einer quadratischen Ground-range-Darstellung resultiert. Da das Auflösungsvermögen von SLC-Daten der Satellitenmission ERS-1 und -2 in ground-range- 20 Meter und in azimuth-Richtung 4 Meter beträgt, empfiehlt sich hier zur Realisierung dieses Effektes beispielsweise ein Filterungsfenster von 1×5 oder 2×10 (GUTJAHR 2002, S. 49).

Diese Mittelung entspricht nach SCHWÄBISCH (1995, S. 47) einer Tiefpassfilterung unter Verwendung eines Filters mit einer Übertragungsfunktion in Form einer zwei-dimensionalen, um Null zentrierten sinc-Funktion (siehe Abbildung 5.5).

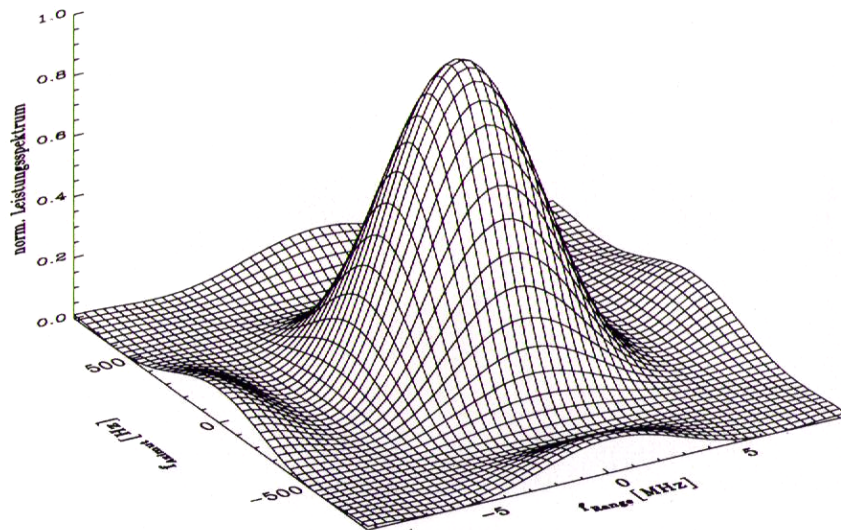


Abbildung 5.5: Übertragungsfunktion des Multilook-Filters für den Fall gleicher Looks in Range und Azimut: $N = M = 3$ (SCHWÄBISCH 1995, S. 47)

Die Multilook-Bildung gewährleistet zwar die Reduktion des Rauschanteils im Interferogramm, kann jedoch nicht die durch die lokale Fringe-Frequenz gekennzeichneten regionalen Verhältnisse im Interferogramm berücksichtigen. Insbesondere bei großen effektiven Basislinien und reliefierter Topographie führt dies aufgrund der höher werdenden Fringe-Frequenz zur Unterdrückung der vielfältigen Strukturen im Interferogramm. Dies lässt sich damit begründen, dass die Übertragungsfunktion nicht um den Peak des lokalen Interferogrammspektrums zentriert ist. Folglich würden bei der Phasenabwicklung ähnliche globale Fehler auftreten wie bei Signalen mit einem zu hohen Rauschanteil (SCHWÄBISCH 1995, S. 49).

Neben der Multilook-Bildung wurde eine Vielzahl von weiteren Filtertechniken entwickelt. Beispielsweise schlägt SCHWÄBISCH (1995, S. 49-52) ein adaptives Filterverfahren mit einer Anpassung der Filterwirkung auf lokale Strukturen im Interferogramm vor. Die Richtung der Filterwirkung soll dabei insofern auf der Basis des Phasengradienten erfolgen, dass die stärkste Filterwirkung senkrecht zum Gradienten erfolgt. Zur Realisierung wird dazu ein gerichteter zweidimensionaler gaußförmiger Tiefpassfilter verwendet (siehe Abbildung 5.6).

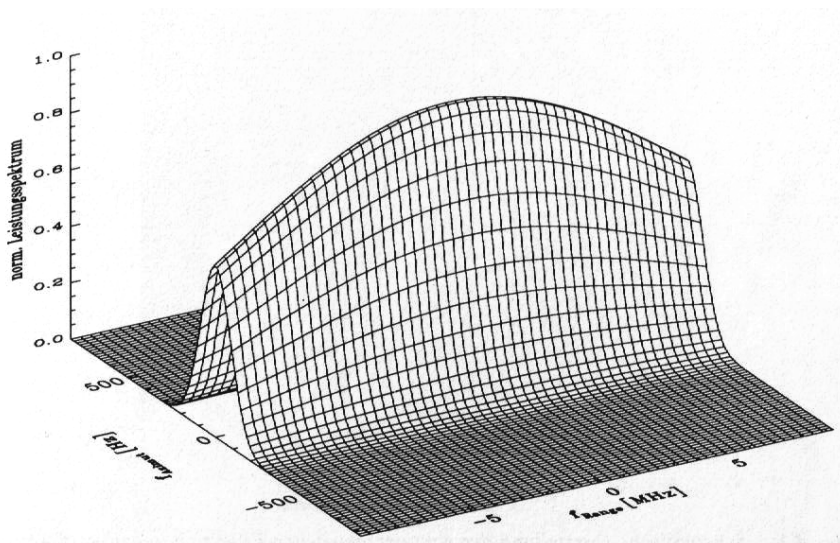


Abbildung 5.6: Übertragungsfunktion des gerichteten zweidimensionalen gaußförmiger Tiefpassfilter (SCHWÄBISCH 1995, S. 49)

Daneben können beispielsweise auch spektrale Filtertechniken auf der Basis einer Fast-Fourier-Transformation verwendet werden (vgl. GOLDSTEIN und WERNER 1998). Eine allgemein gültige Festlegung eines idealen Verfahrens ist trotz diverser empirischer Analysen (vgl. GUTJAHR 2002, S. 55-58, SCHWÄBISCH 1995, S. 52-54) aufgrund der bereits diskutierten Komplexität dieses Problems nicht möglich.

5.1.1.7 Phasenfortführung (Phase-Unwrapping)

In Kapitel 4.4 wurde bereits diskutiert, dass die interferometrische Phase $\bar{\Phi}$ auf einen Wertebereich $[-\pi, \pi]$ beschränkt ist und somit insofern eine hochgradige Phasenmehrdeutigkeit resultiert, dass gleiche Phasenwerte verschiedenen absoluten Phasenunterschieden entsprechen können. Diese Ambiguitäten treten im Interferogramm als eine charakteristische Streifenstruktur auf, wobei einzelne Streifen den 2π Phasenzyklus wiedergeben (vgl. Abbildung 4.11). Sie resultieren daraus, dass Höhendifferenzen auf der beleuchteten Erdoberfläche größer der Mehrdeutigkeitshöhe nicht mehr eindeutig wiedergegeben werden können. Die Mehrdeutigkeitshöhe definiert dabei den Höhenunterschied, der für eine bestimmte Aufnahmekonstellation eine Phasendifferenz von 2π erzeugt (MEYER 2004, S. 24).

Die Rekonstruktion der absoluten Phaseninformation bedingt die Notwendigkeit der sogenannten Phasenfortführung (auch Phasenabwicklung, engl.: phase unwrapping), die eine Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten impliziert. Nur auf diese Weise kann die topographische Information aus den Daten extrahiert werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 55).

Mathematisch kann das Problem der Phasenabwicklung nach GUTJAHR (2002, S. 59) und CONG (2007, S. 13f.) als Inversion der Gleichung

$$\bar{\Phi} = \mathcal{W}\{\bar{\Phi}_{unw}\} \quad (5.2)$$

formuliert werden. Darin bezeichnet $\bar{\Phi}$ die beobachtete mehrdeutige Phase, $\bar{\Phi}_{unw}$ die absolute Phase, die sich durch die Addition eines zunächst unbekanntes Vielfachen k von 2π ergibt,

$$\bar{\Phi}_{unw} = \bar{\Phi} + 2\pi k, \quad (5.3)$$

und $\mathcal{W}\{\cdot\}$ den sogenannten Wrapping-Operator,

$$\mathcal{W}\{\bar{\Phi}\} = \text{mod}(\bar{\Phi} + \pi, 2\pi) - \pi. \quad (5.4)$$

Dieser bildet die gesuchten absoluten Phasenwerte $\bar{\Phi}_{unw}$ in die beobachtete Phase $\bar{\Phi}$ ab (SCHWÄBISCH 1995, S. 55). Die in dieser Definition auftretende Addition und Subtraktion von π gewährleistet dabei, dass die erzeugten Werte wieder im Intervall $[-\pi, \pi]$ liegen.

Nach dem Einsetzen von (5.3) in (5.2) folgt

$$\mathcal{W}\{\bar{\Phi}_{unw}\} = \bar{\Phi}_{unw} - 2\pi k. \quad (5.5)$$

Werden nun mit dem Differenz-Operator $\mathcal{D}\{\cdot\}$ die Phasendifferenzen von räumlich benachbarten Phasenwerten $\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}$ und $\bar{\Phi}_{unw}^{(j)}$ gebildet, resultiert

$$\mathcal{D}\{\mathcal{W}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}\}\} = \mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}\} - 2\pi\mathcal{D}\{k^{(i)}\}, \quad (5.6)$$

und nach erneuter Anwendung des Wrapping-Operators folgt

$$\mathcal{W}\{\mathcal{D}\{\mathcal{W}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}\}\}\} = \mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}\} - 2\pi(\mathcal{D}\{k^{(i)} + k'\}). \quad (5.7)$$

Wie bereits diskutiert, erzeugt der Wrapping-Operator nur Werte im Intervall $[-\pi, \pi]$. Unter der Annahme einer hinreichenden Abtastung des Signals, gleichbedeutend mit der Bedingung

$$-\pi \leq \mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}\} \leq \pi, \quad (5.8)$$

wird der Term $2\pi(\mathcal{D}\{k^{(i)} + k'\})$ zu Null, da keine Werte ausserhalb des Intervalls $[-\pi, \pi]$ vorliegen. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich aus Gleichung (5.7)

$$\mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}\} = \mathcal{W}\{\mathcal{D}\{\mathcal{W}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i)}\}\}\} = \mathcal{W}\{\bar{\Phi}^{(i)} - \bar{\Phi}^{(i-1)}\} \quad (5.9)$$

bzw. nach mehrmaliger Anwendung

$$\bar{\Phi}_{unw}^{(I)} = \bar{\Phi}_{unw}^{(0)} + \sum_{i=1}^I \mathcal{W}\{\bar{\Phi}^{(i)} - \bar{\Phi}^{(i-1)}\}. \quad (5.10)$$

Da der Wrapping-Operator keine Werte ausserhalb des Intervalls $[-\pi, \pi]$ zulässt, ist Gleichung (5.10) äquivalent zu einer Integration der Phasendifferenzen mit der Forderung, den absoluten Phasenwert an den Phasensprüngen $\Delta\bar{\Phi} > \pi$ um den Betrag 2π zu korrigieren (SCHWÄBISCH 1995, S. 55f.). Das Phase Unwrapping-Problem kann also durch Integration gelöst werden.

Im Allgemeinen basieren alle Phase Unwrapping Verfahren auf dem Ansatz, die Phasenänderungen zwischen benachbarten Pixeln, die Gradienten, zu bestimmen, diese zu integrieren und die erforderlichen ganzzahligen Zyklen an entsprechender Stelle einzufügen (MOLL 2007, S. 42). Unter strenger Betrachtung der Problemstellung kann diese nicht vollständig gelöst werden, da die absolute Phase notwendigerweise Informationen enthält, die in der entsprechenden mehrdeutigen abgewickelten Phase nicht enthalten sind (CHEN 2001, S. 8). Aus diesem Grund sind im Allgemeinen bei der Auflösung der Mehrdeutigkeiten stets zusätzliche Annahmen erforderlich. Grundlegend ist besonders die Annahme, dass sich das Phasenfeld langsam genug ändert, sodass benachbarte Phasenwerte keine größeren Differenzen aufweisen als einen halben Zyklus (MOLL 2007, S. 42). Die Zulässigkeit dieser Annahmen unterliegt der Abhängigkeit des jeweiligen Datensatzes und ist ebenso zu kontrollieren, wie das tatsächliche Ergebnis der Phasenabwicklung (MEYER 2004, S. 24, EINEDER et al. 1999, S. 5).

Im Allgemeinen tritt im Rahmen des Phase Unwrapping-Prozesses jedoch das Problem auf, dass die Bedingung (5.8) aufgrund von Phasenrauschen nicht an jeder Stelle garantiert ist und Phasendifferenzen größer als ein halber Zyklus auftreten. Sie wird in der Realität durch Phasenrauschen, Unterabtastungs-Phänomene wie dem Alias-Effekt (engl.: aliasing) sowie durch geometrische Effekte der SAR-Aufnahme (siehe Kapitel 4.3.1) oder die Inkohärenz des Datenmaterials (siehe Kapitel 4.4.1.1) beeinträchtigt (MEYER 2004, S. 24, GUTJAHR 2002, S. 59).

Die Unterabtastung des Signals führt nach SCHWÄBISCH (1995, S. 56) aufgrund der Fehlerfortpflanzung bei der Integration zu groben Fehlern. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5.7 für den eindimensionalen Fall dargestellt.

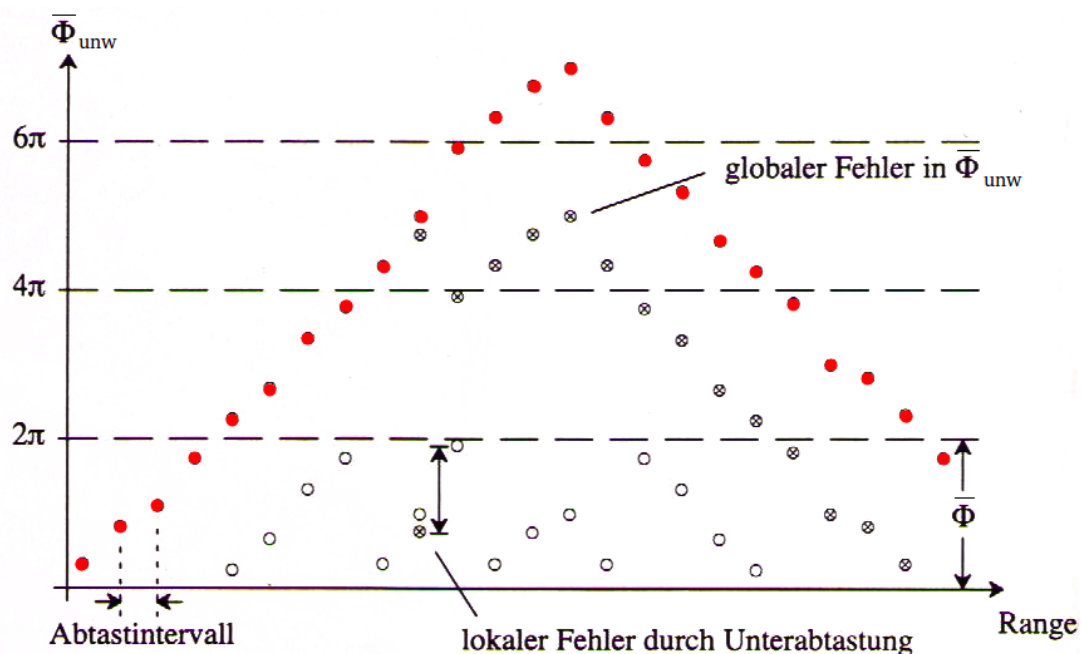


Abbildung 5.7: Fehlerfortpflanzung bei der Integration für den Fall einer Unterabtastung: die weiß gekennzeichneten Werte der interferometrischen Phase $\bar{\Phi}$ liegen im Intervall $[-\pi, \pi]$. Die absoluten Phasenwerte ($\bar{\Phi}_{unw}$) sind in rot dargestellt. Durch die Unterabtastung des Signals entstehen lokale Fehler. Diese pflanzen sich global in $\bar{\Phi}_{unw}$ fort. Eine Darstellung dieses Sachverhaltes ist durch die Phasensprünge in Form von markierten Werten gegeben (modifiziert, nach SCHWÄBISCH 1995, S. 56).

Darin ist eine relative interferometrische Phase im Intervall $[-\pi, \pi]$ gegeben, die in Richtung der Range-Achse um ihre Mehrdeutigkeiten aufgelöst werden soll. Liegt nun aufgrund einer Unterabtastung ein lokaler Fehler in $\bar{\Phi}$ in der Größenordnung vor, dass bei der Integration der Schwellwert $\Delta\bar{\Phi} > \pi$ erreicht würde, resultiert daraus ein Fehler in $\bar{\Phi}_{unw}$, der sich auf globaler Ebene fortpflanzt (SCHWÄBISCH 1995, S. 55). Dies bedingt die notwendige, bereits beschriebene, Korrektur um den Betrag 2π an den jeweiligen Phasensprüngen $\Delta\bar{\Phi} > \pi$. Dazu ist jedoch zunächst die Lokalisierung dieser Phaseninkonsistenzen notwendig.

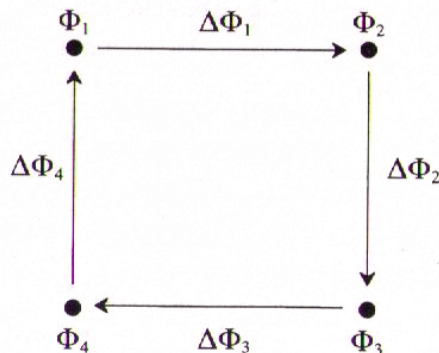


Abbildung 5.8: Prinzip der Bildung von Phasendifferenzen für vier benachbarte Pixel in diskreter Darstellungsform (SCHWÄBISCH 1995, S. 57)

Eine Umsetzung dessen basiert auf der Bildung von Phasendifferenzen für vier benachbarte Pixel (siehe Abbildung 5.8) und der nachfolgenden Schwellwertentscheidung für jede Kombination dieser Phasendifferenzen:

$$\begin{cases} \text{addiere } 2\pi, & \text{wenn } \Delta\bar{\Phi}_i \leq -\pi \\ \text{subtrahiere } 2\pi, & \text{wenn } \Delta\bar{\Phi}_i \geq \pi. \end{cases} \quad (5.11)$$

Es wird genau dann von einer Phaseninkonsistenz gesprochen, wenn die Aufsummierung aller Phasendifferenzen einen Wert ungleich Null ergibt (SCHWÄBISCH 1995, S. 56). Diese wird häufig auch als Residuum bezeichnet (siehe Kapitel 4.4.2.2). Analog dazu könnte nach SCHWÄBISCH (1995, S. 57) in kontinuierlicher Schreibweise die Bedingung formuliert werden, dass das Ringintegral über die Phasengradienten ungleich Null ist,

$$\oint \nabla\bar{\Phi} ds \neq 0. \quad (5.12)$$

Das Vorzeichen dieses Ringintegrals definiert die sogenannte Ladung q (auch Polarität) des Residuums

$$q = \begin{cases} -1, & \text{wenn } \oint \nabla\bar{\Phi} ds < 0 \\ 0, & \text{wenn } \oint \nabla\bar{\Phi} ds = 0 \\ 1, & \text{wenn } \oint \nabla\bar{\Phi} ds > 0. \end{cases} \quad (5.13)$$

Diese ist insofern von Bedeutung, dass nach der Potentialtheorie eine Abhängigkeit des Integrationsergebnisses vom Integrationsweg existiert, die nur bei der Integration über ein Residuenpaar mit entgegengesetzter Ladung umgangen werden kann (GUTJAHR 2002, S. 43). Die Lokalisierung einer Phaseninkonsistenz kann folglich nur durch zwei miteinander korrespondierende Residuen erfolgen. Das wesentliche zu lösende Problem liegt also in der Suche dieser zusammengehörigen Residuenpaare (SCHWÄBISCH 1995, S. 57).

In den letzten Jahren wurden verschiedene Phasenabwicklungsverfahren mit unterschiedlichen Lösungsstrategien (vgl. GOLDSTEIN et al. 1988, GHIGLIA und ROMERO 1994, PRITT und SHIPMAN 1994, CONSTANTINI 1998, AHUJA et al. 1991, BERTSEKAS und TSENG 1988) entwickelt, jedoch konnte bisher keine vollkommen anerkannte und zuverlässige Methode gefunden werden.

Grundsätzlich werden Path-Following- und Minimum-Norm-Ansätze unterschieden. Während es sich bei Path-Following-Verfahren um einen lokalen Ansatz handelt, bei dem zunächst Residuen detektiert und Barrieren festgelegt werden und eine Integration unter Berücksichtigung dieser Barrieren durchgeführt wird, basieren Minimum-Norm-Verfahren auf der Suche einer möglichst optimalen Lösung über das gesamte (globale) Feld (MOLL 2007, S. 44). Im Folgenden werden die wesentlichen, im Rahmen von InSAR-Fragestellungen angewandten Methoden dargelegt.

Path-Following-Verfahren

Das von GOLDSTEIN und WERNER (1998) eingeführte und auf einem Path-Following-Ansatz basierende Residuen-Verfahren stellt das am weitesten verbreitete Phase-Unwrapping-Verfahren dar. Die Idee dieser Methode liegt in der Lokalisierung der Residuen und die Kombination von entgegengesetzt geladenen Residuenpaaren durch entsprechende Verbindungslinien (engl.: branch cuts). Es wird häufig auch von einem Entladungsvorgang der Phasenresiduen gesprochen. Bei einer richtigen Verbindung der Residuen kann gewährleistet werden, dass kein globaler Fehler auftritt. Das Problem dieses Verfahrens liegt jedoch in der Auffindung der entsprechenden zusammengehörigen Verbindungslinien. Zusätzlich wird diese Suche dadurch erschwert, dass für die Entstehung eines Residuums mit dem Signalauschen und einer prinzipiellen Unterabtastung in stark reliefierten Gebieten zwei unterschiedliche physikalische Ursachen annehmbar sind. Während die durch Rauschen verursachte korrespondierende Residuenpaare nah beieinander liegen, können Residuen in Bereichen starker Geländeneigungen weit voneinander entfernt sein (SCHWÄBISCH 1995, S. 58). In GOLDSTEIN und WERNER (1998) wird zur Detektion korrespondierender Residuenpaare eine Minimierung der Gesamtlänge der Verbindungslinien vorgeschlagen, bei der genau dann Verkettungen zugelassen sind, wenn ein gleichgeladenes vor einem entgegengesetzt geladenen Residuum gefunden wird. Alternativ wird in PRATI et al. (1990) versucht, die korrespondierenden Residuenpaare auf der Grundlage von Amplitudeninformation der SAR-Szenen zu finden. In SCHWÄBISCH (1995) wird eine Erweiterung des von GOLDSTEIN und WERNER (1998) eingeführten Verfahrens vorgestellt, die darauf basiert, dass ein Residuum grundsätzlich immer mit einem aus der gleichen Ursache entstandenen Partner verbunden werden wird. Da Residuen in Bereichen starker Geländeneigungen örtlich ausgedehnt auftreten können und eine Detektion folglich nur schwer realisierbar ist, werden entsprechende Bereiche, insbesondere Layover-Bereiche (siehe Kapitel 4.3.1), ausmaskiert, um grundsätzlich falsche Verbindungslinien zu reduzieren. Die aufgrund von Rauscheffekten resultierenden Residuenpaare

können anschließend nach dem Prinzip der Minimierung der Verbindungslinie detektiert werden. In einem ersten Schritt werden also bestimmte Bildbereiche einer Maskierung unterzogen. Eine Lokalisierung dieser Bereiche kann durch die Kombination von Amplituden- und Kohärenzinformationen über Schwellwertoperatoren erfolgen, da sie sich gleichzeitig durch hohe Grau- und niedrige Kohärenzwerte auszeichnen (SCHWÄBISCH 1995, S. 61). In den maskierten Gebieten werden anschließend die Residuen detektiert und die Verbindungslinien in der Form konstruiert, dass jeweils nur zwei entgegengesetzt geladene Residuen miteinander verbunden werden, jedes Residuum mit seinem nächsten Nachbarn entladen wird und die Verbindungslinien in Form einer Gerade gebildet werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 61). Von einem beliebigen, nicht maskierten Punkt erfolgt abschließend der Integrationsvorgang mit der Umgehung der Verbindungslinien. Durch eine geeignete Interpolation können den maskierten Gebieten wieder Phasenwerte zugewiesen werden. Um eine Begrenzung des Interpolationsfehlers zu gewährleisten, ist dieser Vorgang jedoch nur für kleinere Gebiete sinnvoll.

Minimum-Norm-Verfahren

Die gängigsten Minimum-Norm-Verfahren sind der (gewichtete) Kleinste-Quadrate-Ausgleich (engl. (Weighted) Least-Squares) und die Minimum Cost Network Flow-Methode. Bei beiden Verfahren wird eine Lösung gesucht, die eine möglichst kleine Abweichung zwischen den Gradienten der beobachteten Phase und den Gradienten des absoluten Feldes über das gesamte Phasenfeld gewährleistet (MOLL 2007, S. 44).

Das Kleinste-Quadrate-Verfahren wurde bereits in FRIED (1977) und HUDGIN (1977) im Bereich der Optik angewandt. Darin konnte eine Lösung für das Problem formuliert werden, aus den Phasendifferenzen eines zweidimensionalen Phasenfeldes der Dimension $N \times M$ die absolute Phase im Least-Squares Sinne zu rekonstruieren (SCHWÄBISCH 1995, S. 59). Das Phasenfeld $\bar{\Phi}_{unw}^{(i,j+1)}$, welches den nachfolgenden Ausdruck minimiert, ist die Kleinste-Quadrate-Lösung (SCHWÄBISCH 1995, S. 59):

$$\text{Minimiere } \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} \left(\bar{\Phi}_{unw}^{(i+1,j)} - \bar{\Phi}_{unw}^{(i,j) - \mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i,j)}\}} \right)^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} \left(\bar{\Phi}_{unw}^{(i,j+1)} - \bar{\Phi}_{unw}^{(i,j) - \mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(j,i)}\}} \right)^2. \quad (5.14)$$

Darin beschreiben $\mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(i,j)}\}$ bzw. $\mathcal{D}\{\bar{\Phi}_{unw}^{(j,i)}\}$ den zweidimensionalen Differenzoperator (vgl. eindimensionalen Differenzoperator in Gleichung 5.9). Das Problem ist wegen $N \times M$ gesuchten Phasenwerten zu $N(M-1) + M(N-1)$ Phasendifferenzen überbestimmt und kann im Least-Squares-Sinne gelöst werden.

Um Gebiete mit zuverlässiger und unzuverlässiger Phaseninformation entsprechend zu berücksichtigen, kann im Rahmen einer gewichteten Kleinste-Quadrate-Ausgleichung eine Gewichtung dieser Phasenwerte erfolgen. Für die Lösung dieses Problems schlagen GHIGLIA und ROMERO (1994) auf der Basis einer schnellen diskreten Kosinus- oder Fouriertransformation beispielsweise ein iteratives Verfahren auf der Basis der Methode der konjugierten Gradienten mit Vorbedingungen (vgl. SCHUH 2003, S. 77-90) vor. Dadurch ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine Konvergenz

des Iterationsvorgangs gewährleistet (SCHWÄBISCH 1995, S. 64). Für eine detaillierte Beschreibung dieser Methode sei auf weiterführende Literatur verwiesen (z.B. SCHWÄBISCH 1995, GHIGLIA und ROMERO 1994, PRITT und SHIPMAN 1994).

Einen alternativen Phase-Unwrapping-Ansatz stellt die Minimum Cost Network Flow-Methode dar. Diese nutzt nach GUTJAHR (2002, S. 60) aus, dass die diskreten Ableitungen der absoluten Phase mit einem Fehler in Form eines ganzzahligen Vielfachen von 2π geschätzt werden. Das Phase-Unwrapping-Problem wird somit als globales Minimierungsproblem mit ganzzahligen Variablen betrachtet, bei dem die gewichteten Differenzen zwischen beobachteter und absoluter Phase unter der Bedingung minimiert werden, dass sich beide Werte an den diskreten Punkten nur um ein ganzzahliges Vielfaches von 2π unterscheiden dürfen. Es wurden effiziente Strategien zur Lösung solcher Minimierungsprobleme entwickelt, welche die netzwerkartige Struktur der zweidimensionalen Phasenabwicklung ausnutzen und von ihrer Problemstellung dem Auffinden des minimalen Kostenflusses in einem Netzwerk entsprechen (GUTJAHR 2002, S. 60). Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens kann beispielsweise in CONSTANTINI (1998), AHUJA et al. (1991) oder BERTSEKAS und TSENG (1988) gefunden werden.

5.1.1.8 Erstellung des Digitalen Geländemodells

Zur Erstellung eines digitalen Geländemodells (engl.: digital elevation model, kurz DEM) ist nach dem Prozess der Phasenabwicklung eine Konvertierung der absoluten Phase in eine Geländehöhe erforderlich. Dabei ist insbesondere die nicht-lineare Abbildungsgeometrie aufgrund der systembedingten InSAR-Aufnahmebedingungen zu berücksichtigen (GUTJAHR 2002, S. 111). Zur Georeferenzierung des resultierenden digitalen Geländemodells wird zusätzlich noch eine Kopplung der Höheninformation mit der Lage-Komponente vorausgesetzt. Es empfiehlt sich, die gewonnenen dreidimensionalen Bildelemente abschließend in ein regelmäßiges Raster zu überführen. Im Folgenden sollen diese Prozessierungsschritte genauer dargelegt werden.

Konvertierung der interferometrischen Phase in eine Geländehöhe

Nach der Anwendung eines Phasenabwicklungsverfahrens erfolgt die Ermittlung einer Geländehöhe aus der interferometrischen Phase. Dazu ist im Allgemeinen, wie auch bei anderen Verfahren der Höhenbestimmung, ein Bezug zu einer Referenz notwendig. Diese wird durch das lokal bestanschließende Ellipsoid realisiert. Es wird folglich ein geometrisches Höhensystem verwendet. Geometrische Höhen beziehen sich auf eine rein geometrisch definierte Bezugsfläche, die trotz der Unabhängigkeit des Systems vom Schwerefeld die Äquipotentialflächen des Schwerefeldes approximieren. Die Koordinaten eines Punktes der Erdoberfläche werden dabei als geographische Koordinaten in Form von Breite, Länge und Höhe bzgl. eines den Erdkörper approximierenden Ellipsoids, dargestellt. Höhen werden entlang von geradlinigen Ellipsoidloten auf eine definierte Bezugsfläche gemessen, weshalb sie auch „ellipsoidische Höhen“ genannt werden (vgl. HOFMANN-WELLENHOF und MORITZ 2005). Im Folgenden bezeichnet der Terminus der Geländehöhe jeweils eine ellipsoidische Höhe.

Da die interferometrische Aufnahmegeometrie im Allgemeinen genau bekannt ist, kann der funktionale Zusammenhang zwischen der absoluten interferometrischen Phase $\overline{\Phi}_{unw}$ und der Geländehöhe h in der für SAR-Radarsysteme spezifischen Slant-Range-Geometrie der Master-Szene theoretisch abgeleitet werden (SCHWÄBISCH 1995, S. 70).

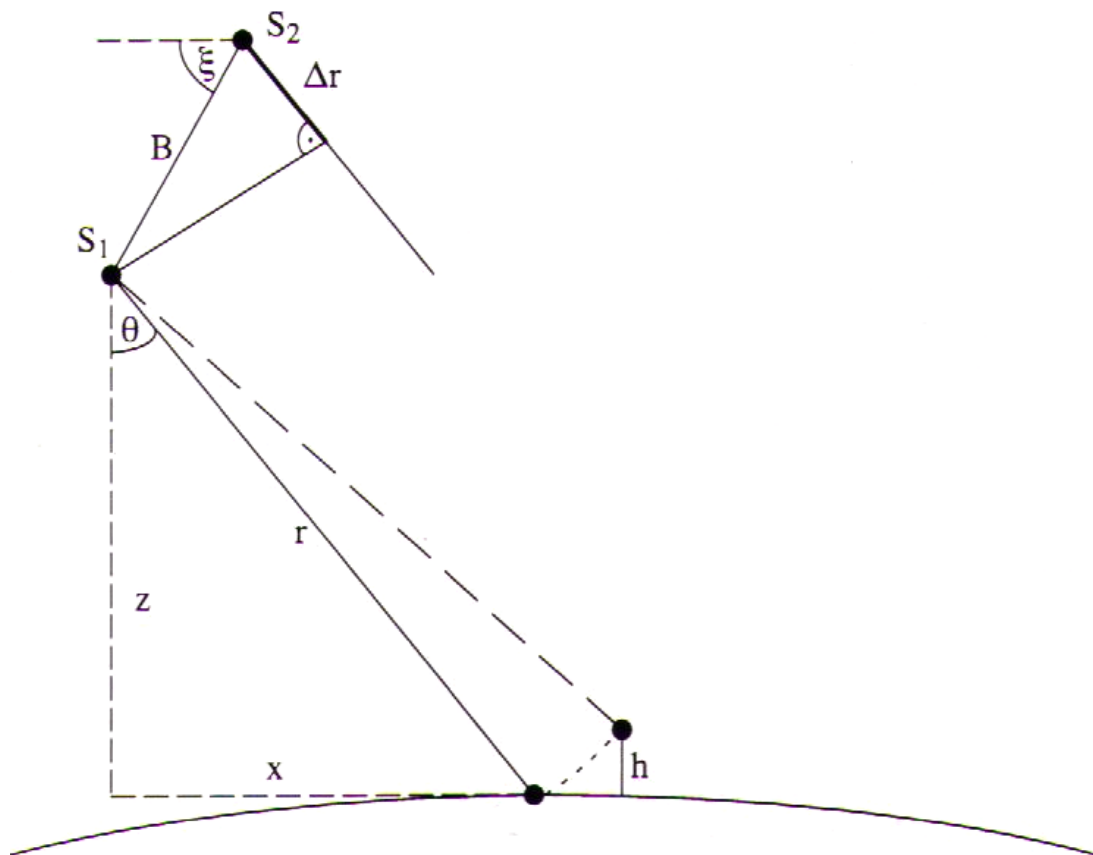


Abbildung 5.9: Aufnahmeprinzip eines InSAR-Systems mit der vereinfachenden Annahme paralleler Blickrichtungen (SCHWÄBISCH 1995, S. 71)

Abbildung 5.9 zeigt das interferometrische Aufnahmeprinzip mit der vereinfachten Annahme paralleler Blickrichtungen, von der nach SCHWÄBISCH (1995, S. 70) aufgrund des Größenverhältnisses $B_{eff} \ll r$ zwischen der Basislinie B_{eff} und der Schrägentfernung r ausgegangen werden kann. Aus Abbildung 5.9 folgt die Beziehung

$$\Delta r = B_{eff} \sin(\psi - \theta). \quad (5.15)$$

Darin können die Basislinie B_{eff} und der Basislinienwinkel ψ aufgrund der gegebenen Basislinienkonfiguration als Konstanten betrachtet werden. Der Winkel θ variiert für ein Pixel mit einer Schrägentfernung r hingegen je nach Geländehöhe h . Es gilt

$$\cos \theta(h) = \frac{z - h}{r} = \cos\left(\theta_0 - \frac{h}{r}\right) \quad \text{mit } \theta_0 = \theta(h = 0). \quad (5.16)$$

Nach Einsetzen von (5.16) in (5.15) folgt über eine Reihenentwicklung nach Taylor um $h = 0$ bei Abbruch nach dem quadratischen Term

$$\Delta r(h) = B_{eff} \sin(\psi - \theta_0) + \frac{B_{eff} \cos(\psi - \theta_0)}{r \sin(\theta_0)} h + \frac{B_{eff} \cos(\psi)}{2r^2 \sin^3(\theta_0)} h^2. \quad (5.17)$$

Analog zu Gleichung (4.17) in Kapitel 4.4.1 kann die Entfernungsdifferenz Δr durch die absolute interferometrische Phase $\bar{\Phi}_{unw}$ ersetzt werden, sodass für den funktionalen Zusammenhang zwischen Höhen- und Phaseninformation gilt

$$\bar{\Phi}_{unw}(h) = \frac{4\pi B_{eff}}{\lambda} \left(\sin(\psi - \theta_0) + \frac{\cos(\psi - \theta_0)}{r \sin(\theta_0)} h + \frac{\cos(\psi)}{2r^2 \sin^3(\theta_0)} h^2 \right). \quad (5.18)$$

Geokodierung des digitalen Geländemodells

Nach der Konvertierung der absoluten interferometrischen Phase in eine Geländehöhe liegt bereits ein digitales Geländemodell in der für SAR-Radarsysteme spezifischen Slant-Range-Geometrie der Master-Szene vor. Um dieses jedoch unter Verwendung anderweitig erstellter digitaler Höhenmodelle validieren zu können, ist eine Referenzierung auf die Erdoberfläche, auch als Geokodierung bezeichnet, notwendig (siehe Abbildung 5.1).

Als eine Grundvoraussetzung der Geokodierung muss die genaue Position jedes Bildpixels im Raum bekannt sein. Ein solches Pixel kann nach SCHWÄBISCH (1995, S. 42) durch eine Range-Zeit τ_s und eine Null-Doppler-Azimut-Zeit t_s in einem Range-Azimut-Zeitkoordinatensystem charakterisiert werden. Während die Range-Zeitkoordinate τ_s die Laufzeit des Signals angibt und in direktem Zusammenhang mit der Schräg Entfernung r steht, entspricht die Azimut-Zeitkoordinate der Aufnahmezeit des jeweiligen Pixels und legt somit die Aufnahmezeit S fest. Mit der zusätzlich vorliegenden Höhenkomponente ist insofern eine dreidimensionale Positionsbestimmung P des Bildpunktes auf dem Ellipsoid möglich. Abbildung 5.10 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Die Ermittlung der Aufnahmezeit S erfordert die a priori Kenntnis der Bahnverläufe, deren Genauigkeit eine zentrale Rolle spielt. Der standardmäßig als Orbit-Vektor zu den jeweiligen SLC-Aufnahmen mitgelieferte Preliminar-Orbit genügt häufig nicht den geforderten Genauigkeitsanforderungen, sodass vielmehr auf präzise Orbits (engl.: Precise-Orbit) im Rahmen von Nachbereitungsmaßnahmen (engl.: post-processing) zurückgegriffen wird. Diese Orbit-Vektoren werden zur weiteren Prozessierung zunächst durch eine dreidimensionale Helmert-Transformation (vgl. WITTE und SCHMIDT 2006, S. 201-205) in ein lokales Koordinatensystem mit Bezug zu dem bestanschließenden Ellipsoid überführt. Zur Bestimmung der kartesischen Koordinaten der Bildpunkte über das digitale Geländemodell im Range-Azimut-Zeitkoordinatensystem und den lokalen Orbit-Vektoren wird eine spezielle, in SCHWÄBISCH (1995) vorgestellte, Geolokalisierungsprozedur verwendet. Dieses Verfahren umfasst eine explizite Betrachtung jedes Bildpixels. Die Ermittlung der Koordinaten erfolgt ausgehend von den Zeitkoordinaten τ_s und t_s durch das Aufblähen des Ellipsoids um den jeweiligen Höhenwert h des Pixels und ein nachfolgendes Aufsuchen des Schnittpunktes des Range-Kreisbogens mit dem Ellipsoid (SCHWÄBISCH 1995, S. 82). Anschließend erfolgt über eine inverse Helmert-Projektion eine Umrechnung der kartesischen in geographische Koordinaten des lokalen

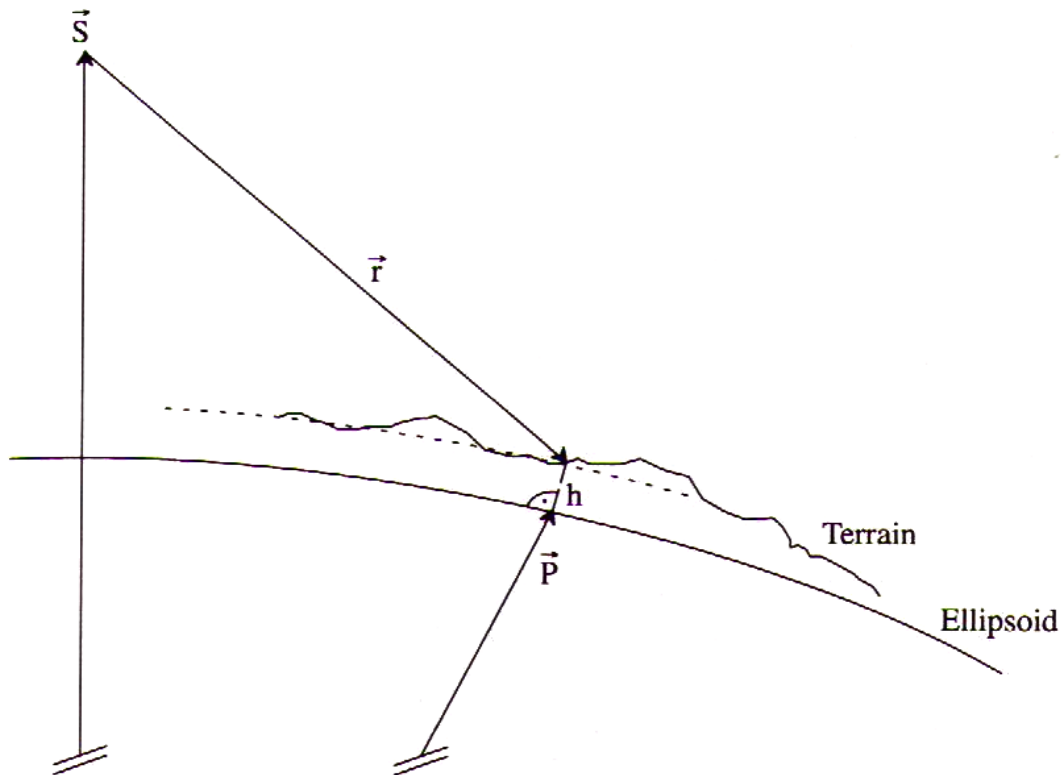


Abbildung 5.10: Geokodierung von digitalen Geländemodellen (SCHWÄBISCH 1995, S. 81)

Ellipsoids. Zuletzt erfolgt eine weitere Transformation dieser Koordinaten in eine lokale Kartenprojektion. In Deutschland wird dazu im Allgemeinen eine Transvers-Mercator-Projektion verwendet, die auf einer gaußschen konformen Abbildung des Ellipsoids auf die Ebene beruht. Typische Systeme sind das Gauß-Krüger-System (kurz: GK, vgl. WITTE und SCHMIDT 2006, S. 26-29) sowie das Universal-Transverse-Mercator-System (kurz: UTM, vgl. WITTE und SCHMIDT 2006, S. 29-31), welche sich hinsichtlich des Abbildungsmaßstabes und des Koordinatenursprungs unterscheiden (SCHWÄBISCH 1995, S. 84). Auf die Beschreibung der einzelnen Transformationsvorschriften zwischen unterschiedlichen Systemen soll in dieser Arbeit verzichtet werden.

Interpolation zur Überführung der 3D-Koordinaten in ein regelmäßiges Raster

Nach der Konvertierung der interferometrischen Phase in dreidimensionale Bodenkoordinaten mit einer Ost-, Nord- und Höhenkomponente können die erhaltenen in einem kartesischen System oder einer bestimmten Kartenprojektion vorliegenden Punkte als eine Form eines digitalen Geländemodells interpretiert werden. Jedoch erfolgt insbesondere zur Reduzierung des benötigten Speicherplatzes eine Überführung dieser Punkte in ein regelmäßiges Raster. Eine Realisierung erfolgt beispielsweise durch eine lineare Interpolation in Form eines sogenannten Nearest-Neighbour-Verfahrens oder durch eine bilineare Methode im Rahmen einer flächenhaften Interpolation. In beiden Ansätzen können im Allgemeinen fehlerhafte Bereiche ohne Höheninformation auftreten (GUTJAHR 2002, S. 119f.). Alternativ wurde für InSAR-Systeme ein Verfahren auf der Basis einer Delaunay-Triangulation (vgl. SHEWCHUK 1997) adaptiert (SCHWÄBISCH 1995, S. 86).

5.1.2 Erfassung von Oberflächenbewegungen

Das Ziel der differentiellen SAR-Interferometrie (D-InSAR) ist die Erfassung von Bodenbewegungen auf der Erdoberfläche aus der Phasendifferenz zweier interferometrischer Phasen. Ein Ablaufschema zur Umsetzung dieser Zielsetzungen ist in Abbildung 5.11 gegeben.

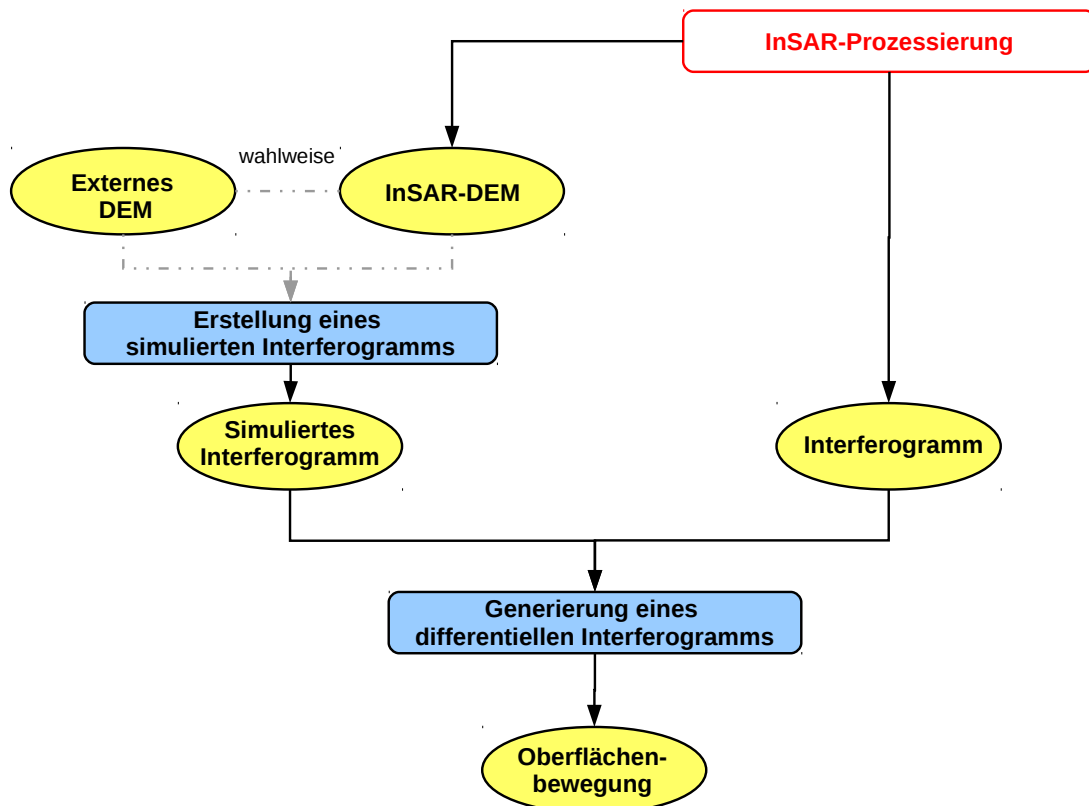


Abbildung 5.11: Ablaufschema der D-InSAR-Prozessierung

In Kapitel 4.4.2.3 wurde aufgezeigt, dass sich diese Phasendifferenz aus diversen unterschiedlichen Phasenanteilen zusammensetzt (siehe Gleichung 4.24). Der darin enthaltene Phasenanteil der flachen Erde wurde bereits in Kapitel 5.1.1.5 berücksichtigt. Unter der Annahme, dass der Einfluss der atmosphärischen Laufzeitverzögerung sowie der Phasenanteil des Signalrauschens vernachlässigbar oder bereits kompensiert sind, beschränkt sich die interferometrische Phasendifferenz auf einen Bewegungsanteil $\bar{\Phi}_{defo}$ und einen Anteil der Topographie $\bar{\Phi}_{topo}$, d.h.

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_{topo} + \bar{\Phi}_{defo}. \quad (5.19)$$

Die differentielle SAR-Interferometrie ermöglicht auf der Grundlage der Bereinigung des Interferogramms von seiner topographischen Komponente die Erfassung von Bodenbewegungen. Im Allgemeinen sind zur Isolierung des gewünschten Beitrages aufgrund der Oberflächenbewegung in Abhängigkeit von der Datengrundlage, d.h. im Bezug auf die verwendeten SAR-Aufnahmen, sowie den

spezifischen Eigenschaften des Aufnahmegebietes, unterschiedliche Verfahren anzuwenden.

Die erste Strategie wird aufgrund der Erfordernis zweier SAR-Aufnahmen als sogenannte 2-Pass-Methode bezeichnet und benötigt zudem ein externes digitales Geländemodell (DEM), beispielsweise aus der Shuttle Radar Topographie Mission (SRTM). Aus den beiden SAR-Bildern wird nach dem in Kapitel 5.1 beschriebenen interferometrischen Prozessierungsablauf ein Interferogramm berechnet, welches die Phasenanteile der Deformation und Topographie enthält. Außerdem wird aus dem digitalen Geländemodell (DEM) ein synthetisches Interferogramm generiert und der Phasenanteil der Topographie $\bar{\Phi}_{topo}^{sim}$ simuliert (MEYER 2004, S. 26). Dazu muss das Höhenmodell zuvor in die Aufnahmegeometrie des Interferogramms und damit insbesondere in die der gewählten Master-Szene überführt werden (MOLL 2007, S. 47). Nach der Subtraktion der simulierten Topographie-Phase in Gleichung 5.19 folgt nach Umformung,

$$\underbrace{\bar{\Phi}_{topo} - \bar{\Phi}_{topo}^{sim}}_{\epsilon_{\bar{\Phi}_{topo}}} + \bar{\Phi}_{defo} = \bar{\Phi} - \bar{\Phi}_{topo}^{sim} \quad (5.20)$$

$$\bar{\Phi}_{defo} + \epsilon_{\bar{\Phi}_{topo}} = \bar{\Phi} - \bar{\Phi}_{topo}^{sim}, \quad (5.21)$$

die Bewegungskomponente $\bar{\Phi}_{defo}$ der interferometrischen Phase inklusive eines verbleibenden Restfehlers $\epsilon_{\bar{\Phi}_{topo}}$ (MEYER 2004, S. 26).

Liegt kein externes digitales Geländemodell vor, kann unter Verwendung dreier SAR-Bildern aus einem Bildpaar (z.B. SAR-Aufnahmen 1 und 2) ein InSAR-DEM (Topographie-Paar) mit vernachlässigbaren Bewegungseinflüssen und aus einem zweiten Bildpaar (z.B. SAR-Aufnahmen 2 und 3) ein Interferogramm (Deformations-Paar) mit enthaltener Bewegungskomponente generiert werden (MEYER 2004, S. 26, SÖRCEL 2006, S. 7, RIECHMANN 2009, S. 30). Dieses Verfahren wird analog zur 2-Pass-Methode aufgrund der Notwendigkeit dreier SAR-Aufnahmen entsprechend 3-Pass-Methode genannt.

Um ein Topographie-Paar mit vernachlässigbaren Bewegungseinflüssen zu erhalten, werden SAR-Aufnahmen derartig kombiniert, dass das resultierende Interferogramm eine ausreichende Sensitivität gegenüber der Geländetopographie sowie einen hohen Kohärenzgrad aufweist (MEYER 2004, S. 26). Diese Kombination ist im Allgemeinen nicht immer möglich, so dass in speziellen Fällen sogar eine 4-Pass-Methode mit 4 unterschiedlichen SAR-Aufnahmen notwendig wird.

Die vorausgesetzten Annahmen der Vernachlässigung des Phasenanteils der Atmosphäre ist in der Realität nicht gegeben und erschwert die Erfassung von Oberflächenbewegungen mit Hilfe der differentiellen SAR-Interferometrie (D-InSAR). Wie bereits in Kapitel 4.5 diskutiert, ist der Einfluss der atmosphärischen Laufzeitverzögerung keineswegs zu vernachlässigen und führt vielmehr zur Beeinträchtigung bei der Trennung der Phasenanteile aufgrund der Bewegung und Topographie. Eine Abhilfe kann durch die Verwendung der Permanent Scatterer Interferometry (auch Persistent Scatterer Interferometry, kurz PSI) als eine Modifikation der konventionellen D-InSAR-Prozessierung geschaffen werden.

5.1.3 Permanent Scatterer Interferometry zur Ableitung von Bewegungen der Erdoberfläche

In Kapitel 4.6 wurde die Permanent Scatterer Interferometry (kurz PSI) vorgestellt, welche eine praktische Anwendung zur Reduzierung der Hauptfehlerquellen der konventionellen D-InSAR-Prozessierungsmethode, insbesondere der geometrischen und temporalen Dekorrelation sowie der atmosphärischen Laufzeitverzögerung, umfasst. Die Prozessierungskette der Permanent Scatterer Interferometry ist in Abbildung 5.12 schematisch dargestellt.

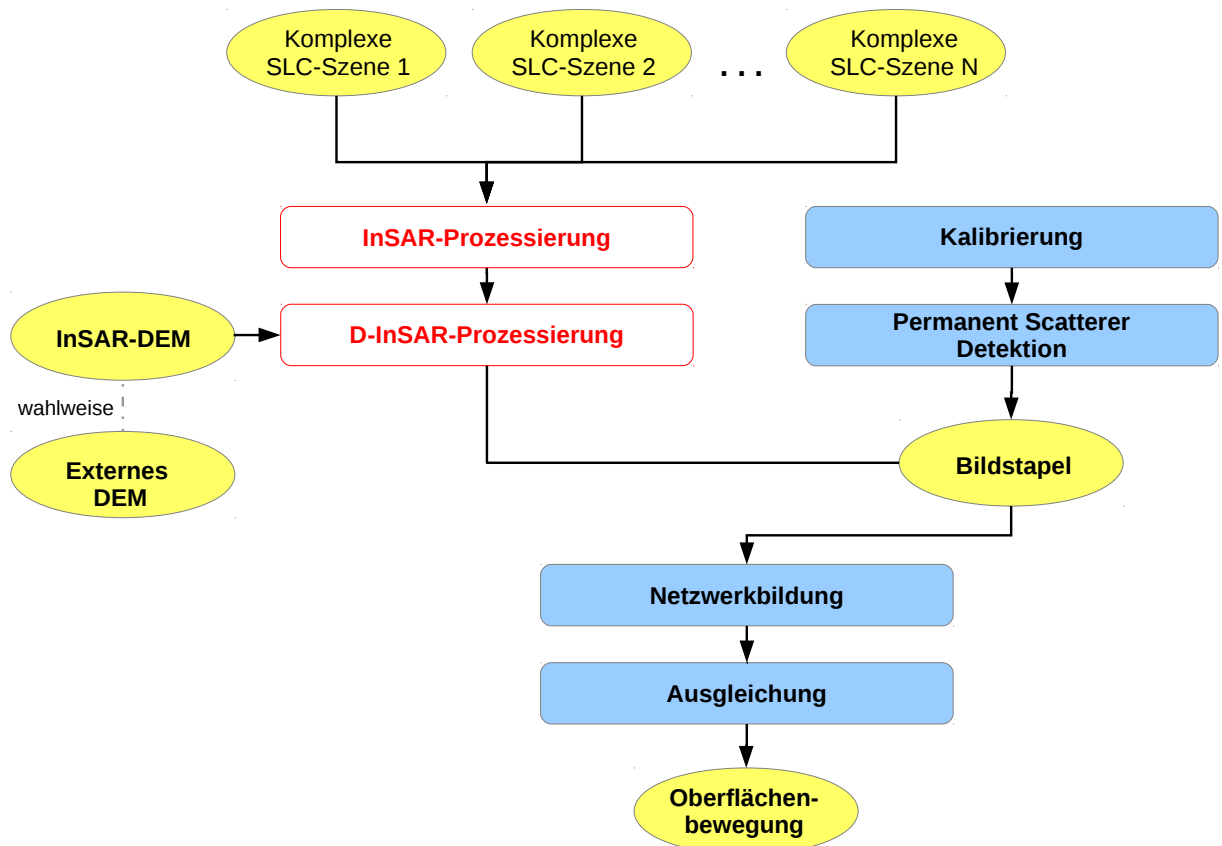


Abbildung 5.12: Ablaufschema der PSI-Prozessierung

Die Technik lässt sich nach FERRETTI et al. (2000A, S. 2202) grundsätzlich in die nachfolgenden wesentlichen Prozessierungsschritte gliedern:

- Berechnung der Interferogramme (InSAR-Prozessierung),
- Erstellen eines digitalen Geländemodells und der differentiellen Interferogramme (D-InSAR-Prozessierung),
- Vorläufige Parameterschätzung auf der Basis eines Netzwerkes, bestehend aus den Pixeln mit dem wahrscheinlich höchsten Grad der Kohärenz (Permanent Scatterer, kurz PS),
- Verfeinerung des vorläufigen Schätzvorgangs.

5.1.3.1 Berechnung der Interferogramme

Die Erstellung der Interferogramme erfolgt in Analogie zu der konventionellen Radarinterferometrie (siehe Kapitel 5.1.1). Diese umfasst die Auswahl einer geeigneten Master-Szene in Abhängigkeit der effektiven, zeitlichen und Doppler-Basislinie (siehe Kapitel 5.1.1.1), die Ko-Registrierung mehrerer Slave-Szenen zu einer Overall-Master-Szene (siehe Kapitel 5.1.1.2), eine spektrale Filterung zur Reduzierung aller SAR-Aufnahmen auf das gemeinsame Frequenzspektrum (siehe Kapitel 5.1.1.3) sowie die tatsächliche Interferogrammgenerierung in Zusammenhang mit der Anwendung einer Filtertechnik zur Rauschunterdrückung (siehe Kapitel 5.1.1.4 und Kapitel 5.1.1.6).

5.1.3.2 Digitale Geländemodelle und differentielle Interferogramme

Zur Erstellung der differentiellen Interferogramme werden ebenfalls analog zur konventionellen D-InSAR-Methode die zuvor erstellten Interferogramme um den Phasenanteil der Topographie reduziert. Diese kann entweder über ein externes digitales Geländemodell (DEM) oder die Generierung eines solchen Referenzhöhenmodells aus einer Untermenge der verwendeten SAR-Aufnahmen simuliert werden (siehe Kapitel 5.1.2).

5.1.3.3 Vorläufige Parameterschätzung mit Permanent Scatterer Kandidaten

Das Ziel der vorläufigen Schätzung ist die Bestimmung des Phasenanteils der Atmosphäre auf einem groben Satz ausgewählter Pixel, der sogenannten Permanent Scatterer Kandidaten (engl.: Permanent Scatterer Candidates, kurz PSC).

Die Identifikation dieser Pixel basiert nach BAMLER et al. (2008, S. 248) auf einer pixelweisen Auswertung von Zeitreihen der Amplituden. Dieser Ansatz unterliegt der Annahme, dass eine stabile Sequenz von Amplitudenwerten zu einem sinkenden Beeinflussungsgrad von geometrischer und zeitlicher Dekorrelation führt. Solche amplitudenstabilen Punkte entsprechen genau dem Anforderungsprofil der Permanent Scatterer Kandidaten. Daneben sollten diese in mindestens einer festgelegten Anzahl von Szenen des Bildstapels vorkommen (KIRCHER 2004, S. 38). Eine Realisierung der PSC-Identifikation erfolgt auf der Grundlage ko-registrierter und kalibrierter Szenen durch den Amplituden-Dispersionsindex D_a , welcher Informationen über die Fluktuation der Amplitude eines Punktstreuers über die Zeit liefert (BAMLER et al. 2008, S. 248). Dieser kann nach FERRETTI et al. (2001, S. 11f.) in Zusammenhang mit der Standardabweichung der Phase σ_Φ gebracht werden und mathematisch wie folgt definiert werden:

$$\sigma_\Phi = \frac{\sigma_a}{\mu_a} = D_a, \quad (5.22)$$

worin σ_a die Standardabweichung und μ_a den temporären Mittelwert der Amplitude beschreiben. Es konnte empirisch gezeigt werden, dass diese Beziehung für $\sigma_\Phi < 0.25$ rad stabil ist (KAMPES 2006, S. 11). Eine direkte Analyse der Phase ist hingegen aufgrund unbekannter Phaseneinflüsse nicht möglich (KAMPES 2006, S. 10). Eine ausführliche Herleitung dieses Zusammenhangs kann FERRETTI et al. (2001, S. 12) entnommen werden. Um μ_a und σ_a schätzen zu können, ist, wie

bereits angedeutet, eine Kalibrierung der SLC-Szenen notwendig, da diese mit unterschiedlichen SAR-Sensoren und -Prozessierungssystemen aufgenommen wurden. Das Ziel des Kalibrierungsvorgangs ist die Korrektur der Beobachtungen um diverse Sensoreffekte, sodass bei der Auswahl der PSC ausschließlich physikalische Eigenschaften der Rückstreuer herangezogen werden (KIRCHER 2004, S. 38). Als Permanent Scatterer Kandidaten werden nach FERRETTI et al. (2001, S. 12) nun die Pixel ausgewählt, deren Amplituden-Dispersionsindex unterhalb eines festgelegten Schwellwertes, im Allgemeinen in der Größenordnung von 0.25, liegt (siehe Abbildung 5.13, links). Alternativ kann

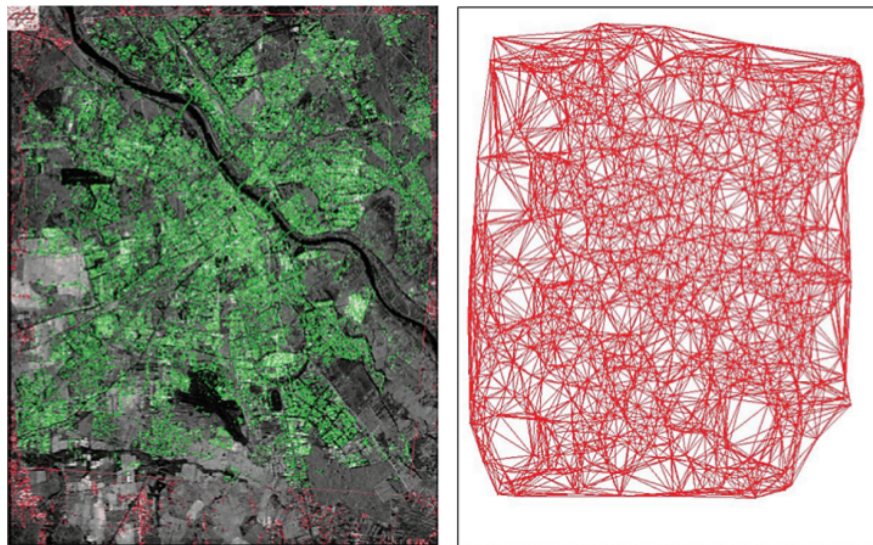


Abbildung 5.13: Identifizierte Permanent Scatterer Kandidaten (links), Verbindung zwischen Permanent Scatterer Kandidaten (aus BAMLER et al. 2008, S. 248)

nach ADAM et al. (2004) anstelle der Betrachtung des Dispersionsindex der Amplitude ein Schwellwertverfahren basierend auf dem Signal-zu-Hintergrund Verhältnis (engl.: Signal-to-Clutter Ratio, kurz: SCR) verwendet werden. Die Beziehung zwischen der Standardabweichung der Phase σ_Φ und dem Signal-zu-Hintergrund Verhältnis kann nach ADAM et al. (2004, S. 3) wie folgt angegeben werden:

$$\sigma_\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\text{SCR}}}. \quad (5.23)$$

Der Vorteil dieser Strategie liegt in der nicht notwendigen Kalibrierung der Amplitudendaten (KAMPES 2006, S. 50f.) und in der Detektion der Permanent Scatterer selbst bei geringer Reflektivität, sofern das Störsignal in der Umgebung gering genug ist (BAMLER et al. 2008, S. 248).

Im nachfolgenden Prozessierungsschritt sollen die Topographie und die Bewegung eines Objektes auf der Erdoberfläche geschätzt werden. Dazu werden die einzelnen gefundenen PS-Kandidaten zu einem Referenznetz (siehe Abbildung 5.13, rechts) verknüpft, wobei die maximal zulässige Distanz zwischen zwei Punkten zuvor festgelegt wird. Nach COLESANTI et al. (2003, S. 1698f.) kann eine solche Entfernung etwa 2 km betragen. Zwischen diesen Punkten werden anschließend die Topographie und die Bewegungsunterschiede ermittelt (BAMLER et al. 2008, S. 248). Dadurch entsteht ein Netz von Phasengradienten (VAN LEIJEN und HANSEN 2004, S. 3).

In Kapitel 4.4.2.3 wurde die Zusammensetzung der interferometrischen Phase aus diversen Anteilen

beschrieben (siehe Gleichung 4.24). Demnach kann die differentielle interferometrische Phase $\bar{\Phi}$ für einen detektierten PS-Punkt in einem Interferogramm nach der Kompensation eines Referenzgeländemodells im Rahmen der PSI-Prozessierung (siehe Kapitel 5.1.2) wie folgt formuliert werden:

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_{topo} + \bar{\Phi}_{defo} + \bar{\Phi}_{orbit} + \bar{\Phi}_{atmo} + \bar{\Phi}_{scat} + \bar{\Phi}_{noise}. \quad (5.24)$$

Die im Rahmen der D-InSAR-Prozessierung zur Vereinfachung vorausgesetzte Annahme der Vernachlässigung des Phasenanteils der Atmosphäre $\bar{\Phi}_{atmo}$ ist in der Realität nicht gegeben, sodass diese ebenso wie der Phasenanteil des Signalrauschens $\bar{\Phi}_{noise}$ berücksichtigt werden muss (siehe Kapitel 5.1.2).

Zwischen den einzelnen Permanent Scatterer Kandidaten sollen nun die Topographie- und Bewegungsunterschiede ermittelt werden. Nach BAMLER et al. (2008, S. 248) wird dabei grundsätzlich ausgenutzt, dass der Phasenanteil der Topographie $\bar{\Phi}_{topo}$ proportional zur geometrischen Basislinie B_{eff} der Interferogramme ist, während die Bewegungskomponente $\bar{\Phi}_{defo}$ unabhängig von der geometrischen Basislinie ist und vielmehr nur von der Differenz der Zeitpunkte (zeitliche Basislinie B_{temp}) der interferometrischen Aufnahmen abhängt. Mathematisch kann dies durch die Definition der einzelnen Phaseanteile formuliert werden, d.h.

$$\bar{\Phi}_{topo} = \beta_x \Delta h_x, \quad (5.25)$$

worin β_x den Höhe-zu-Phase-Umrechnungsfaktor an einem Punkt x und Δh_x die Punkthöhe relativ zu einer Referenzoberfläche (engl.: DEM-error) beschreiben, bzw.

$$\bar{\Phi}_{defo} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{temp} \nu(x), \quad (5.26)$$

worin λ die Wellenlänge, B_{temp} die zeitliche Basislinie und $\nu(x)$ die Bewegungs- oder Geschwindigkeitsrate an einem Punkt x definieren (KAMPES 2006, S. 9, FERRETTI et al. 1999, S. 1). Der Phasenanteil $\bar{\Phi}_{orbit}$ umfasst die Komponente der flachen Erde (siehe Kapitel 5.1.1.5) sowie ein Restsignal auf der Grundlage von Orbitabweichungen und kann vorab eliminiert werden. Das Signal aufgrund von Änderungen der Rückstreucharakteristik auf der Erdoberfläche zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten ist in $\bar{\Phi}_{scat}$ enthalten. Da im Rahmen der PSI ausschließlich Punkte mit einem langfristig stabilen Phasenverhalten verwendet werden, ist dieser Anteil zu vernachlässigen (VAN LEIJEN und HANSEN 2004, S. 2). Die differentielle interferometrische Phase in Gleichung (5.24) kann folglich umgeschrieben werden zu

$$\bar{\Phi} = \beta_x \Delta h_x - \frac{4\pi}{\lambda} B_{temp} \nu(x) + \bar{\Phi}_{atmo} + \bar{\Phi}_{noise}. \quad (5.27)$$

Die Deformationsrate $\nu(x)$ und der relative Höhenunterschied Δh_x sind darin die gesuchten Größen. Die Parameterschätzung aus beobachteten Phasen ist dabei jedoch aufgrund der Phasenmehrdeutigkeiten ein nicht-lineares Inversionsproblem und kann nicht durch eine direkte Inversion, sondern nur mit iterativen Verfahren gelöst werden (KAMPES 2006, S. 11). Dazu wird in FERRETTI et al.

(2000A, S. 2205) und FERRETTI et al. (2001, S. 13) eine 2D-Periodogramm-Technik verwendet, um die sogenannte gemeinsame Phasenkohärenz

$$\gamma_{x,y} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp(je_{x,y}) \quad (5.28)$$

zu maximieren. Darin bezeichnet $e_{x,y}$ die Differenz zwischen der modellierten und der beobachteten Phase zwischen zwei benachbarten Punkten x und y in einem Interferogramm. Im Allgemeinen wird dazu nach KAMPES (2006, S. 12) ein lineares Bewegungsmodell angesetzt, z.B.

$$e_{x,y} = \bar{\Phi}_{x,y} - \left(\beta_x \Delta h_x - \frac{4\pi}{\lambda} B_{temp} \nu(x) \right). \quad (5.29)$$

Je nach Anwendung sind dazu auch komplexe Bewegungsmodelle denkbar, allerdings steigt der für die Periodogramm-Technik benötigte Rechenaufwand proportional mit den zu schätzenden Parametern an (VAN LEIJEN und HANSSEN 2004, S. 3). Eine mathematische Formulierung zur Schätzung der Phasenkomponenten unter Verwendung einer iterativen Vorgehensweise kann Anhang A in FERRETTI et al. (2001) entnommen werden.

Die verbleibenden Phasenkomponenten, insbesondere das Restsignal der Atmosphäre, die nicht-linearen Bewegungsanteile sowie das Signalrauschen, werden als residuelles Signal (auch residuelle Phase) oder Restphase bezeichnet und können durch die Anwendung von sequentiellen Filtertechniken (siehe Abbildung 5.14) getrennt werden. Dazu müssen nach KIRCHER (2004, S. 42f.) folgende

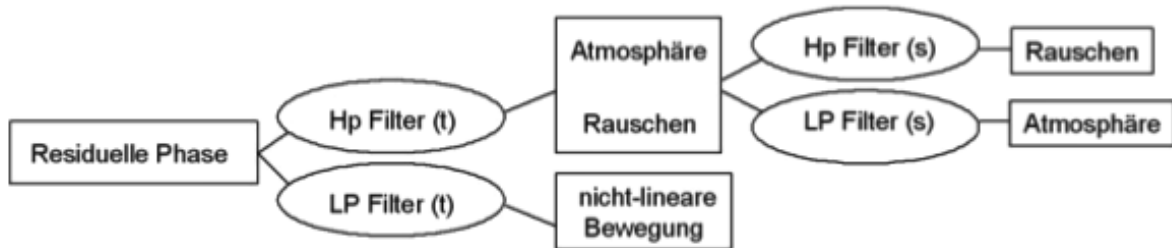


Abbildung 5.14: Sequentielle Filtertechniken zur Trennung der Signalanteile der residuellen Phase (KIRCHER 2004, S. 43)

Annahmen erfüllt sein:

- die Atmosphäre ist zeitlich unkorreliert, jedoch räumlich korreliert,
- die nicht-lineare Bewegung ist zeitlich korreliert,
- das Signalrauschen ist sowohl zeitlich, als auch räumlich unkorreliert.

Sind diese Annahmen erfüllt, kann auf zeitlicher Ebene ein Tiefpassfilter (engl.: low pass filter, kurz: LP-Filter) zur Trennung der nicht-linearen Bewegungsanteile und ein Hochpassfilter (engl.: high pass filter, kurz: HP-Filter) zur Abspaltung des Rausch- und Atmosphärensignals verwendet werden. Aufgrund der Annahme einer räumlichen Korrelation des Atmosphärensignals kann anschließend auf

räumlicher Ebene ein Tiefpassfilter zur Bestimmung des Phasenanteils der Restatmosphäre sowie ein Hochpassfilter zur Berücksichtigung des Rauschanteils verwendet werden (KIRCHER 2004, S. 42f., KAMPES 2006, S. 13f.).

Nach der Schätzung der relativen Höhenunterschiede und der Deformationsrate erfolgt die Auflösung der Phasemehrdeutigkeiten. Da alle Komponenten der residuellen Phase im Allgemeinen klein sind, insbesondere $|e_{x,y}| < \pi$ gilt, ist nach VAN LEIJEN und HANSEN (2004, S. 3) eine direkte Phasenabwicklung über die Integration der Gradienten, d.h. entlang der Verbindungslinien im Referenznetz möglich (vgl. Phase Unwrapping für (D-)InSAR in Kapitel 5.1.1.7). Die Phasenabwicklung ist jedoch nur möglich, sofern das Bewegungsmodell eine gute Approximation an die wahren Begebenheiten darstellt und die Phasenanteile der Atmosphäre und des Signalrauschens klein sind. Da das Atmosphärensignal mit zunehmender Entfernung steigt, bekräftigt dies die Notwendigkeit der ausschließlichen Betrachtung der Phasendifferenzen benachbarter Punkte. Es ist offensichtlich, dass sich Fehler im Schätzvorgang zwischen zwei Punkten auf weitere Punkte auswirken (KAMPES 2006, S. 45-47).

Alternativ zu der ursprünglichen PSI verwenden modernere Adaptierungen dieser Technik (z.B. ADAM et al. 2004, KAMPES und HANSEN 2004, KAMPES 2006) eine simultane Schätzung der einzelnen Phasenanteile (BAMLER et al. 2008, S. 248). Dazu erfolgt zunächst die Formulierung eines funktionalen und stochastischen Modells. Während das funktionale Modell die durch Topographie und Deformationen induzierten Phasenkomponenten umfasst, werden Elemente aufgrund von Ungenauigkeiten in der Kenntnis von Sensorpositionen, Atmosphärensignal und anderen Einflussfaktoren dem stochastischen Modell zugeordnet (KAMPES 2006, S. 24f.).

Wie bereits erläutert, liegt im Rahmen der Parameterschätzung ein nicht-lineares Inversionsproblem vor. Die ursprünglich angewendete direkte Suche im Lösungsraum durch eine 2D-Periodogramm-Technik hat dabei den Nachteil, dass die Beobachtungen als deterministisch und gleich gewichtet betrachtet werden und keine Qualitätsaussage bezüglich der Parameter möglich ist. Aus diesem Grund wurde in neueren Entwicklungen der ursprünglichen PS-Interferometrie als eine alternative Methode die Verwendung eines Integer-Least-Squares Schätzers (kurz: ILS-Schätzer) vorgeschlagen (z.B. KAMPES 2006, S. 31-36). Dazu wurde mit der sogenannten Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment-Methode (kurz: LAMBDA-Methode) ein Verfahren gewählt, welches ursprünglich für Fragestellungen im Rahmen des globalen Navigationssatellitensystems (engl.: Global Navigation Satellite System, kurz: GNSS) entwickelt und erfolgreich angewendet wurde (vgl. TEUNISSEN 1995, TEUNISSEN et al. 1995).

Ausgangspunkt ist nach DE JONGE und TIBERIUS (1996, S. 11) das (linearisierte) System der Beobachtungsgleichungen:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{a} + \mathbf{B}\mathbf{b}. \quad (5.30)$$

Darin bezeichnet

- \mathbf{l} den Beobachtungsvektor,
- \mathbf{a} den Vektor mit den integer-wertigen unbekanntenen Mehrdeutigkeiten,

- \mathbf{b} den Vektor mit den realwertigen unbekanntem interessierenden Parametern,
- \mathbf{A} und \mathbf{B} die Designmatrizen,
- \mathbf{v} die Verbesserungen.

Entsprechend dem Prinzip der Kleinsten-Quadrate (Least-Squares) erfolgt die Parameterschätzung über die Lösung des Minimierungsproblems

$$\min \|\mathbf{l} - \mathbf{A}\mathbf{a} - \mathbf{B}\mathbf{b}\|_{\Sigma\{\mathcal{L}\}}^2, \quad \mathbf{a} \in \mathcal{Z}^{m_1}, \mathbf{b} \in \mathcal{R}^{m_2} \quad (5.31)$$

worin $\Sigma\{\mathcal{L}\}$ die Kovarianzmatrix der Beobachtungen bezeichnet (DE JONGE und TIBERIUS 1996, S. 12). Dieses Minimierungsproblem wird aufgrund der Integer-Bedingung $\mathbf{a} \in \mathcal{Z}^{m_1}$ als Integer Least-Squares-Problem bezeichnet (TEUNISSEN 1993, S. 4). Im Folgenden wird die Lösung des Integer-Least-Squares-Problems als fixed-Lösung $\check{\mathbf{a}}$ bzw. $\check{\mathbf{b}}$ und die Lösung des entsprechenden unrestringierten Least-Squares-Problems als float-Lösung $\hat{\mathbf{a}}$ bzw. $\hat{\mathbf{b}}$ bezeichnet. Zunächst wird das unrestringierte Least-Squares-Problem auf der Basis des Minimierungsproblems in Gleichung (5.31) mit $\mathbf{a} \in \mathcal{R}^{m_1}$ gelöst, sodass realwertige Schätzungen $\hat{\mathbf{a}}$ bzw. $\hat{\mathbf{b}}$ und zugehörige Kovarianzmatrizen $\Sigma\{\hat{\mathbf{A}}\}$ bzw. $\Sigma\{\hat{\mathbf{B}}\}$ für die Parametervektoren \mathbf{a} bzw. \mathbf{b} erhalten werden (TEUNISSEN et al. 1995, S. 2). Anschließend erfolgt nach TEUNISSEN (1995, S. 66) mit Hilfe einer Transformation \mathbf{Z} eine Reparametrisierung des Mehrdeutigkeitsvektors sowie dessen realwertigem Least-Squares-Schätzer und der entsprechenden Kovarianzmatrix:

$$\mathbf{z} = \mathbf{Z}^T \mathbf{a}, \quad \hat{\mathbf{z}} = \mathbf{Z}^T \hat{\mathbf{a}}, \quad \Sigma\{\hat{\mathbf{Z}}\} = \mathbf{Z}^T \Sigma\{\hat{\mathbf{A}}\} \mathbf{Z}. \quad (5.32)$$

Die Transformationsmatrix \mathbf{Z} ist dabei so zu wählen, dass alle Least-Squares-Mehrdeutigkeiten vollständig dekorreliert werden (vgl. TEUNISSEN et al. 1995, S. 5f.). Nach dieser Transformation müssen die fixed-Lösungen $\check{\mathbf{z}}$ bestimmt werden, die aus der Lösung von

$$\min (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z})^T \Sigma\{\hat{\mathbf{Z}}\}^{-1} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z}) \quad (5.33)$$

folgen (TEUNISSEN et al. 1995, S. 6). Dazu wird nach TEUNISSEN (1995, S. 66) ein sequentieller bedingter Least-Squares-Ausgleich genutzt. Der Suchraum der transformierten Mehrdeutigkeiten kann durch folgende Ungleichung beschrieben werden,

$$\frac{\sum_{i=1}^n (z_{i|I} - \hat{z}_i)^2}{\sigma_{z_{i|I}}} \leq \chi^2, \quad (5.34)$$

worin $z_{i|I}$ die Least-Squares-Schätzung der i -ten Mehrdeutigkeit in Abhängigkeit von den ersten $(i - 1)$ Mehrdeutigkeiten und $\sigma_{z_{i|I}}$ die zugehörige Standardabweichung bezeichnen. χ^2 ist eine geeignete positive Konstante, die sicherstellt, dass der Suchraum definitiv die gesuchte Integer-Least-Squares-Mehrdeutigkeit enthält.

Der zu \check{z} korrespondierende Integer-Least-Squares-Vektor der originalen Mehrdeutigkeiten \check{a} kann anschließend durch die Lösung von

$$\check{z} = A\check{a} \quad (5.35)$$

erhalten werden. Der Vektor mit den übrigen, reelwertigen Parametern \check{b} kann nach

$$\check{b} = \hat{b} - \Sigma\{\hat{\mathcal{B}}\hat{\mathcal{Z}}\}\Sigma\{\hat{\mathcal{Z}}\}^{-1}(\hat{z} - \check{z}) \quad (5.36)$$

bestimmt werden (TEUNISSEN et al. 1995, S. 6).

Zur Adaptierung der LAMBDA-Methode auf Anwendungen der SAR-Interferometrie kann die beobachtete Phase $\bar{\Phi}$ in Gleichung (5.24) unter Berücksichtigung der Phasenabwicklung zu

$$\bar{\Phi}_{unw} = \bar{\Phi} + 2\pi a \quad (5.37)$$

umformuliert werden. Darin beschreibt der Term a die unbekannte Integer-Phasenmehrdeutigkeit, d.h. die unbekannte Anzahl von ganzen Phasenzyklen. Auch wenn die Vorgehensweise zunächst analog zur GNSS-Anwendung erscheint, treten hier jedoch die nachfolgend aufgeführten Probleme auf:

- Die Problemstellung in der Radarinterferometrie ist unterbestimmt, da neben den interessierenden Parametern für jede Beobachtung eine unbekannte Mehrdeutigkeit zu schätzen ist.
- Die Anzahl der Aufnahmen und somit auch die Anzahl der zu schätzenden Punkte ist in der Radarinterferometrie deutlich höher als bei GNSS-Anwendungen, sodass die Anzahl der Mehrdeutigkeitslösungen ebenfalls steigt.

Um die Anwendung dennoch zu ermöglichen, wird nach KAMPES (2006, S. 34f.) weitere Information in Form von Pseudobeobachtungen eingeführt.

Der wesentliche Vorteil dieser alternativen Strategie liegt in der effektiven Schätzung zusätzlicher Parameter, wie beispielsweise nicht-linearer Deformationsanteile (VAN LEIJEN und HANSEN 2004, S. 3). Außerdem kann eine Qualitätsaussage in Form von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerten für die Zielgrößen getroffen werden (BAMLER et al. 2008, S. 248). Diese kann wiederum für nachfolgende statistische Analysen herangezogen werden und ermöglicht zudem die Verknüpfung und den Vergleich mit anderen geodätischen Beobachtungstechniken.

5.1.3.4 Verfeinerung des vorläufigen Schätzvorgangs

Nach der Schätzung des Phasenanteils der Atmosphäre an den PSC-Punkten erfolgt eine Interpolation dieses Atmosphärensignals (engl.: atmospheric phase screen, kurz APS) auf die ursprüngliche Auflösung der differentiellen Interferogramme. Alternativ könnte dieser Resampling-Vorgang zur Interpolation der residuellen Phase auf der Grundlage einer Kriging-Interpolation (vgl. ISAACS

und SRIVASTAVA 1989) in Kombination mit der zuvor durchgeführten räumlichen Tiefpassfilterung durchgeführt werden (FERRETTI et al. 2001, S. 13 und COLESANTI et al. 2003, S. 1696). Diese APS werden anschließend von den differentiellen Interferogrammen subtrahiert und weitere Permanent-Scatterer-Kandidaten werden gesucht. Das Verfahren wird auf der Grundlage einer pixelweisen Anwendung (engl.: pixel-by-pixel base) und nicht mehr ausschließlich zwischen zwei benachbarten PS-Punkten erneut durchgeführt. Das Resultat ist ein Bewegungsfeld der Erdoberfläche (KAMPES 2006, S. 13f., FERRETTI et al. 1999, S. 1).

Da sich die Schätzwerte auf die Blickrichtung des Sensors (engl.: Line of Sight, kurz: LOS) beziehen und für ERS-Sensoren einen mittleren Einfallswinkel von $\theta = 23^\circ$ zur Erdoberfläche aufweisen, müssen diese in vertikale Deformationsraten ν_v konvertiert werden, um mit den Ergebnissen von anderen Höhenmessungen verglichen werden zu können. Die vertikalen Deformationsraten ν_v können nach KIRCHER (2004, S. 43f.) mit der Umrechnungsvorschrift

$$\nu_v = \frac{\bar{\Phi}\lambda}{4\pi \cos(\theta)} \quad (5.38)$$

ermittelt werden. Da die Wellenlänge λ und der Einfallswinkel θ für die jeweiligen SAR-Sensoren bekannt ist, kann eine unmittelbare Konvertierung durchgeführt werden.

5.1.4 STUN-Algorithmus als Adaptierung des ursprünglichen PSI-Verfahrens

In Kapitel 5.1.3.3 wurde die ursprüngliche PS-Interferometrie nach FERRETTI et al. (2000A), FERRETTI et al. (2000B) und FERRETTI et al. (2001) dargelegt. Auch die unterschiedlichen Adaptierungen und Erweiterungen zur Anwendung geodätischer Techniken mit dem Ziel, die Qualität der Zielparameter zu verbessern, wurden beschrieben. Eine dieser Techniken ist der in KAMPES (2006) entwickelte und vorgestellte Spatio-Temporal Unwrapping Network Algorithmus (kurz: STUN Algorithmus). Analog zur ursprünglichen PS-Technik werden auch in diesem Algorithmus zunächst punktweise kohärente Rückstreuer (Permanent-Scatterer) gesucht. Dazu wird entweder der Dispersionsindex der Amplitude oder ein Schwellwertverfahren bezüglich des Signal-Hintergrund-Verhältnisses (engl.: Thresholding on the Signal-to-Clutter Ratio) verwendet (siehe Kapitel 5.1.3.3). Im Rahmen der vorläufigen Parameterschätzung der ursprünglichen Permanent-Scatterer-Technik werden alle Pixel unterhalb eines Schwellwertes verwendet, während im STUN-Algorithmus ein Referenznetz aus ausschließlich langfristig kohärenten Punkten gebildet werden soll, welche idealerweise gleichmäßig über das interessierende Gebiet verteilt sind. Nach KAMPES (2006, S. 55-56) wird dazu ein Gitter über das Interferogramm gelegt und in jeder entstehenden Zelle wird der Punkt mit dem kleinsten Dispersionsindex bzw. dem kleinsten Signal-zu-Hintergrund-Verhältnis ausgewählt. Um die gewünschte Punktdichte der Permanent Scatterer zu gewährleisten, wird ein zweites feineres Gitter mit halber Zellenlänge auf den gefundenen Punkt gelegt und das Verfahren analog fortgesetzt, bis eine minimale Distanz zwischen den Punkten entsteht. Um einen Kompromiss zwischen der Einschränkung des Atmosphärensignals und der auftretenden Datenmenge zu finden, wird diese Mindestdistanz in einer Größenordnung von etwa 500 m festgesetzt (KAMPES 2006, S. 56). Um anschließend zwischen den Paaren der PS-Punkte eine Parameterschätzung durchführen zu können, muss jeder Punkt zunächst mit seinen N Nachbarn verbunden werden. Um eine gleichmäßige Ver-

teilung der Verbindungen (engl.: arc) in jede Richtung zu garantieren, erfolgt nacheinander jeweils quadrantenweise eine Verbindung zu dem nächstliegenden Punkt. Die Verbindungslinien dürfen eine festgesetzte maximale Distanz (nach KAMPES 2006, S. 56 etwa 2400 m) nicht überschreiten und werden bei einer möglichen mehrfachen Verbindung wieder eliminiert. Unter Verwendung einer Integer-Least-Squares-Methode (siehe Kapitel 5.1.3.3) anstelle der 2D-Periodogram-Technik in der originalen PS-Technik können an jeder Verbindungslinie die Punkthöhe relativ zu einer Referenzoberfläche (engl.: DEM-error) und die Bewegungsrate geschätzt werden. Wären diese Schätzungen alle wahr, könnten die gesuchten Parameter an den PS-Punkten unmittelbar über die Integration entlang des gegebenen Pfades erhalten werden. Dies ist in der Realität nicht gegeben, sodass die Verwendung eines redundanten Netzes notwendig ist und für die Parameterschätzung der Punkte eine Least-Squares-Ausgleichung mit den zuvor geschätzten Änderungsparametern durchgeführt wird. Das Gleichungssystem ähnelt dem eines Nivellementnetzes (siehe auch Kapitel 5.2), allerdings muss der Schleifenschlussfehler hier aufgrund der fehlenden tatsächlichen Beobachtungen zwischen den Punkten exakt Null sein. Wäre dies wiederum gegeben, wären die Ergebnisse der Least-Squares-Schätzung an den Punkten und der Integration entlang eines Pfades identisch (KAMPES 2006, S. 58). Im Allgemeinen ist dies in der Realität nicht gegeben, sodass im Rahmen des STUN-Algorithmus die Integrität des Netzes getestet wird. Da keine tatsächlichen Beobachtungen zwischen den Punkten existieren, kann ein Schleifenschlussfehler ungleich Null ausschließlich aus inkohärenten Punkten oder fehlerhaften Schätzungen einzelner Verbindungslinien resultieren. Um entsprechende Ausreißer zu detektieren, wird ein alternativer Hypothesentest angewendet, welcher nach TEUNISSEN (2000) auch als DIA-Prozedur mit den nachfolgenden Schritten bekannt ist:

- **Detection-Step:** Testen der Nullhypothese gegen allgemeine Fehler im funktionalen oder stochastischen Modell (engl.: Overall-Model-Test, kurz OMT),
- **Identification-Step:** Festlegung einer Alternativhypothese bei Verwerfung der Nullhypothese im Detektionsschritt, um die wahrscheinlichste Ursache zu identifizieren,
- **Adaption-Step:** Anpassung und Veränderung bzgl. der identifizierten Ursache im stochastischen bzw. funktionalen Modell.

Diese Strategie wird solange iterativ fortgeführt, bis die Netzintegrität gewährleistet werden kann. Auf eine ausführliche Darlegung der DIA-Prozedur soll in dieser Arbeit verzichtet und auf weiterführende Literatur verwiesen werden (z.B. KAMPES 2006, S. 59-64, TEUNISSEN 2000). Allgemeine Information zur Teststatistik können beispielsweise KOCH (1997, S. 301) entnommen werden. Nach der Schätzung der Änderungsparameter an den Verbindungslinien und der Least-Squares-Ausgleichung zur Parameterschätzung der PS-Punkte im Referenznetz erfolgt nun die Schätzung der übrigen Punkte. Dazu werden diese jeweils mit dem nächstliegenden Punkt im Referenznetz verknüpft, sodass entlang der neuen Verbindungslinie ein erneuter Schätzvorgang analog zur beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt werden kann. Die Parameter der Referenzpunkte werden hierbei als deterministisch angesehen. Als eine Folge der Verdichtung sind die neu entstehenden Distanzen im Vergleich zu den Entfernungen im Referenznetz kürzer, sodass der Phasenanteil der Atmosphäre im Allgemeinen einen geringen Einfluss hat. Gleichzeitig nimmt jedoch das Signalrauschen zu, da im Referenznetz ausschließlich PS-Punkte mit dem geringsten Dispersionsindex oder

Signal-zu-Hintergrund-Verhältnis verwendet wurden.

Während in der originalen PS-Interferometrie eine weitere Hinzunahme von Punkten nach der Subtraktion eines geschätzten und interpolierten Atmosphärensignals (APS, vgl. Kapitel 5.1.3.3) durchgeführt und die Punkte mit einer gemeinsamen Kohärenz (engl.: ensemble coherence) über einem Schwellwert als die Zielparameter des Verfahrens angesehen werden, erfolgt im STUN-Algorithmus eine explizite Lösung der Mehrdeutigkeiten (Phase Unwrapping) auf der Basis einer anhand des geschätzten a posteriori Varianzfaktors ausgewählten Menge von zuverlässigen Punkten. Als Phasenabwicklungsalgorithmus wird ein Minimal Cost Flow-Verfahren (kurz: MCF) verwendet (vgl. EINEDER und HOLZNER 1999, Kapitel 5.1.1.7). Abschließend erfolgt eine Schlussausgleichung unter Verwendung der um ihre Mehrdeutigkeit korrigierten Daten (KAMPES 2006, S. 66-69). Dazu sind mehrere Strategien denkbar, von denen im Folgenden beispielhaft einige aufgeführt werden:

- Erneute Least-Squares-Ausgleichung mit gleichem Bewegungsmodell und gleicher Kovarianzmatrix,
- Verwendung eines komplexen Bewegungsmodells (z.B. ein exponentielles Bewegungsmodell mit geophysikalisch interpretierbaren Parametern),
- Anwendung eines Hypothesentests zur Detektion stabiler Punkte (mit einer Nullhypothese über die Annahme nicht auftretender Deformationen),
- Verwendung von a priori Information (z.B. detektierte stabile (zeitlich unbewegte) Punkte).

5.1.5 Vergleich zwischen konventioneller D-InSAR-Technik und PS-Interferometrie

In Tabelle 5.1 sind die Charakteristika der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Verfahren der konventionellen differentiellen InSAR-Technik (D-InSAR) und der Permanent-Scatterer-Interferometrie (PSI) und deren Unterschiede nach FERRETTI et al. (2000A, S. 2210) komprimiert dargelegt.

Tabelle 5.1: Vergleich der konventionellen D-InSAR-Methode mit der PS-Interferometrie (aus FERRETTI et al. 2000A, S. 2207).

	D-InSAR	PSI
Basislinie	Für differentielle Interferometrie erfolgt eine Beschränkung auf die Auswahl von SAR-Aufnahmen mit kleiner Basislinie	Unabhängig von der effektiven Basislinie können alle SAR-Szenen verwendet werden
Atmosphärische Artefakte	Signifikante Einschränkung durch atmosphärische Artefakte bei kleinen räumlich glatten Oberflächendeformationen	Elimination atmosphärischer Artefakte mit geringer räumlicher Frequenz
Kohärenz	Identifikation einzelner kohärenter Pixel nicht möglich	Identifikation einzelner kohärenter Pixel möglich (erforderlich bei großen zeitlichen und geometrischen Basislinien, da nur punktuelle Rückstreuer nutzbare Phaseninformationen enthalten)
DEM	Erforderliche DEM-Genauigkeit ist umgekehrt proportional zur Basislinie des zur Detektion von Bewegungen verwendeten Interferogramms	Geringere DEM-Genauigkeit ausreichend, da genaue Bestimmung Höhe für jeden PS durchgeführt wird
Mindestanzahl SAR-Aufnahmen	≥ 2	> 30

5.2 Parameterschätzung absoluter Höhen aus Nivellementbeobachtungen

Neben den Verfahren der Radarfernerkundung werden zur Gewinnung von Höheninformationen auch Verfahren der klassischen Landesvermessung angewendet, in der die Überwachung von Festpunktfeldern im Rahmen der hoheitlichen Daseinsfürsorge von Bedeutung ist. Als Datengrundlage zur Erfassung von Höhenänderungen zwischen einzelnen diskreten Zeitintervallen (Epochen) dienen die als Leitnivellement bezeichneten periodischen Wiederholungsmessungen (siehe Kapitel 3). Auf der Grundlage dieser Daten erfolgt im Rahmen einer Ausgleichung die Schätzung der absoluten Höhenparameter.

5.2.1 Gesamtausgleich von Höhennetzen mit stabilen Punkten

Zur Schätzung von absoluten Geländehöhen wird ein Gesamtausgleich aller verfügbaren Epochen bei einer datenadaptiven Parameterwahl vorgeschlagen. Die Parameterfestlegung erfolgt dabei auf der Basis einer Identifikation von unbewegten („stabilen“) Punkten im Netz. Punkte, die Mehrfachmessungen unterzogen werden und in diesen Wiederholungszeiträumen stabil und von Deformationen unbeeinflusst sind, werden als stabil betrachtet. Derartige Punkte werden im Folgenden auch als Punktidentitäten bezeichnet und fungieren im Gesamtausgleich als Inputparameter in Form einer Vorinformation. Auf der Grundlage einer Punktidentitätsaussage soll die Realisierung des bestmöglichen Festpunktnetzes über alle Punkte und unter der Verwendung aller Epochen gewonnen werden. Als Beurteilungskriterien dienen dabei die Redundanz, die Netzkontrollierbarkeit sowie die Genauigkeit für Beobachtungen und Parameter.

Diese Idee wurde in HALSIG et al. (2012) mit dem Ziel, das Problem der geringen Anzahl von Freiheitsgraden in Höhennetzen zu verbessern, analysiert und realisiert.

Das verwendete Prinzip fußt auf der Schätzung einer für bewegte und stabile Punkte unterschiedlichen Anzahl von Parametern, d.h. anschaulich formuliert wird für einen sich im gesamten Zeitraum nicht signifikant bewegten Punkt ein Parameter angesetzt und ein weiterer zeitabhängiger Parameter für jede Epoche, in der eine Punktbeobachtung stattgefunden hat. Dazu ist sowohl im gesamten Betrachtungszeitraum, als auch in ausgewählten kleineren Zeiträumen bis zu einzelnen Folgeepochenvergleichen eine Information über unbewegte Punkte notwendig. Diese sind auf der Grundlage eines in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Detektionsverfahrens für jede Kombination in Form von Punktidentitätslisten gegeben. Zur sinnvollen und übersichtlichen Verwaltung dieser Information werden sogenannte Stabilitätsgruppen angelegt, welche die unbewegten Punkte in Abhängigkeit der Anzahl der Epochen, in denen die jeweiligen Punkte beobachtet wurden, und zeitlichen Aktualität vom „Großen ins Kleine“ sortieren. D.h. eine erste Gruppe würde die im gesamten Betrachtungszeitraum enthaltenen Punktidentitäten enthalten und die folgenden Gruppen die Menge der stabilen Punkte aus nach bestimmten Kriterien ausgewählten unterschiedlichen Zeitintervallen, sofern diese Punkte nicht bereits in einer Menge der vorherigen Gruppen enthalten sind. Eine fiktive Zusammenführung aller Stabilitätsgruppen legt die zu schätzenden Parameter inklusive ihrer Reihenfolge in der Designmatrix unmittelbar fest. Als Ausgleichungsmodell wird das allgemeine Gauß-Markov-Modell

(KOCH 1997, S. 166) verwendet. Nach der Aufstellung und Lösung des Normalgleichungssystems resultieren die absoluten Punkthöhen in Form der ausgeglichenen Parameter. Der Ablauf ist in Abbildung 5.15 schematisch dargestellt.

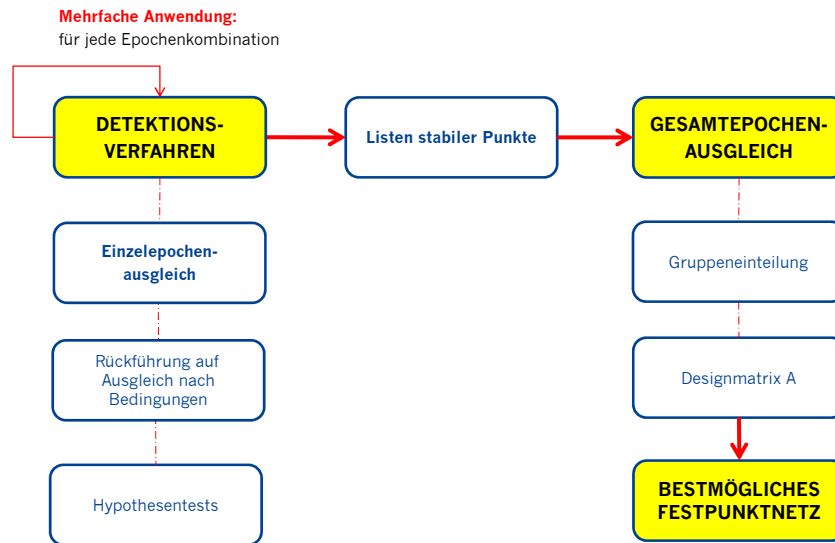


Abbildung 5.15: Ablauf der Gesamtepochenausgleichung unter Verwendung der Punktidentitäten (HALSIG et al. 2012, S. 8)

Der Gesamtausgleich wurde in HALSIG et al. (2012) entsprechend der vorgestellten Entwicklung anhand von Echtdateen der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW aus dem Leitnivelement „Ruhrgebiet“ verifiziert. Als Folge des Prinzips konnte zunächst aufgrund der resultierenden Parameterreduzierung die Anzahl der Freiheitsgrade verbessert werden und Abhilfe gegenüber der im Allgemeinen geringen Überbestimmung in Höhennetzen geschaffen werden. Daneben konnte gezeigt werden, dass die Erfassung und Interpretation von Punktidentitäten sowohl die Genauigkeit als auch die Kontrollierbarkeit im Netz, insbesondere aufgrund der hier analysierten Redundanzanteile, verbessert. Für weitere Details und Rahmenbedingungen zu der hier summarisch aufgezeigten Vorgehensweise sei auf HALSIG et al. (2012) verwiesen.

5.2.2 Detektionsverfahren zur Identifizierung stabiler Punkte

Zur Definition von Punktidentitäten können a priori Kenntnisse verwendet oder auch objektive statistische Verfahren im Rahmen einer Deformationsanalyse herangezogen werden. Zur Identifikation von Bewegungen einzelner Punkte impliziert eine solche deformationsanalytische Untersuchung die Überprüfung, ob geodätische Netze unter Berücksichtigung stochastischer Eigenschaften kongruent sind. Die daraus resultierenden Tests werden auch Kongruenztest (NIEMEIER 1979) genannt und bestehen im Allgemeinen aus zwei Teststufen. Im globalen Kongruenztest erfolgt eine Untersuchung der vorliegenden Epochen auf signifikante Punktverschiebungen. Die Datumsfestlegung erfolgt hierbei im Allgemeinen in Form einer Teilspurminimierung mit einer Lagerung auf allen in mehreren Epochen wiederholt angemessenen Punkten. In einer zweiten Teststufe werden signifikant bewegte

Punkte durch ein sogenanntes Top-Down-Design lokalisiert. Eine Realisierung kann beispielsweise nach der Methode der maximalen Klaffungsanteile (z.B. DUPRAZ et al. 1979, PELZER 1974) erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein in HALSIG (2010) entwickeltes Detektionsverfahren verwendet, welches eine problembezogene Adaptierung dieser Strategien beinhaltet und der Identifikation von unbewegten Punkten dient. Die wesentlichen Differenzierungsmerkmale liegen in einer unterschiedlichen Datumsdefinition, der Verwendung eines Bottom-Up-Verfahrens, bei dem aus einer konsolidierten Ausgangsbasis jeweils neue Kandidaten für stabile Punkte ermittelt und getestet werden, sowie eine Überprüfung auf potentielle Verschiebungen für Punktgruppen anstelle von Einzelkandidaten. Dadurch soll insbesondere bei flächenmäßig weiträumigen Netzen und entsprechend wachsenden Datenmengen eine rechentechnisch effiziente Gestaltung erfolgen.

Das Detektionsverfahren ist in zwei Auswertephasen gegliedert, wobei die erste Phase die Ausgleichung und die zweite Phase eine auf statistischen Tests basierende Deformationsanalyse beinhaltet. Für die Ausgleichung wird ein zweistufiges Gauß-Markov-Modell mit Restriktionen (KOCH 1997, S. 184) angesetzt. Diesbezüglich erfolgt in erster Stufe eine freie Ausgleichung der Einzelepochen mit eindeutiger Lagerung, um die Netzkonfiguration zu erhalten. Das in diesem Zusammenhang ange-setzte Modell ist als einfaches Gauß-Markov-Modell nach KOCH (1997, S. 166) wie folgt definiert:

$$\Delta \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}, \quad \Sigma\{\mathcal{L}\} = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1}. \quad (5.39)$$

Darin enthalten sind der verkürzte Beobachtungsvektor $\Delta \mathbf{l}$ mit der entsprechenden stochastischen Information in Form der Kovarianzmatrix der Beobachtungen $\Sigma\{\mathcal{L}\}$ bzw. der Gewichtsmatrix \mathbf{P} sowie die Verbesserungen \mathbf{v} und die Parameterzuschläge $\Delta \mathbf{x}$ zu gegebenen Näherungswerten \mathbf{x}_0 . Die Designmatrix \mathbf{A} beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen Parametern und Beobachtungen, welcher sich allgemein als die Differenz zwischen zwei Punkthöhen formulieren lässt. Um neben der Netzkonfiguration auch absolute Informationen über die Punkthöhen in einem globalen Referenzrahmen zu erhalten, ist eine Datumsfestlegung erforderlich. Zur Lösung dieser Lagerungsproblematik wird eine freie Ausgleichung mit eindeutiger Lagerung vorgeschlagen. Der auftretende Rangdefekt wird dann durch zusätzliche Bedingungen mit der Anforderung, dass die Parameterzuschläge des Datums punktes in jeder Epoche zu Null geschätzt werden, gelöst. Nach der Aufstellung und Lösung des Normalgleichungssystems mit der Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} , dem Normalgliedvektor \mathbf{n} und den geschätzten Parameterzuschlägen $\widehat{\Delta \mathbf{x}}$ der ersten Stufe

$$\underbrace{\mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\} \mathbf{A}}_{\mathbf{N}} \widehat{\Delta \mathbf{x}} = \underbrace{\mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\} \Delta \mathbf{l}}_{\mathbf{n}}, \quad (5.40)$$

$$\mathbf{N} \widehat{\Delta \mathbf{x}} = \mathbf{n} \quad (5.41)$$

können die ausgeglichenen Parameter erster Stufe $\widehat{\mathbf{x}}$ unter Verwendung von Näherungswerten einer Referenzepoche nach

$$\widehat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \widehat{\Delta \mathbf{x}} \quad (5.42)$$

bestimmt werden. Anschließend können der Verbesserungsvektor \mathbf{v} sowie aus der Verbesserungsquadratsumme der Varianzfaktor der ersten Stufe s_1^2 bestimmt werden,

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad (5.43)$$

$$s_1^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - m + b}, \quad (5.44)$$

worin n die Anzahl der Beobachtungen, m die Parameteranzahl und b die Anzahl der Datumsrestriktionen festlegt.

In der zweiten Ausgleichungsstufe erfolgt eine Rückführung auf einen Ausgleich nach Bedingungen. Dazu werden strenge Anforderungen an die Parameter in Form sogenannter Restriktionen gestellt, die auf der Basis von Hypothesentests in der zweiten Auswertephase überprüft werden. Das zugehörige Ausgleichungsmodell kann nach Erweiterung zusätzlicher Bedingungsgleichungen zu

$$\Delta \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (5.45)$$

$$\mathbf{C}^T \Delta \mathbf{x} = \mathbf{c} \quad (5.46)$$

mit der Minimierungsaufgabe $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \dots \textit{Minimum}$ formuliert werden, wobei in \mathbf{C} und \mathbf{c} die Restriktionsgleichungen festgelegt werden. Darin werden die Annahmen getroffen, dass die untersuchten Punkte keiner Bewegung unterzogen wurden. Des Weiteren wird in der dargelegten Matrix-Vektor-Darstellung die Lagerungsproblematik berücksichtigt. In Form einer weiteren Restriktion erfolgt die Auftransformation auf alle im Hypothesentest als identisch angenommenen Punkte. Diese Datumsfestlegung ist äquivalent zu der Aussage, dass der Mittelwert aller als identisch angenommenen Punkte festgesetzt wird und die Referenzepoche auf das Mittel der anderen Epochen gelagert wird. Die ausgeglichenen Parameterzuschläge $\widehat{\Delta \mathbf{x}}$ der ersten Stufe gehen als Beobachtungen der zweiten Stufe ein. Aus den Parameterzuschlägen \mathbf{r} der zweiten Stufe

$$\mathbf{r} = -\Sigma\{\widehat{\mathcal{X}}\} \mathbf{C} (\mathbf{C}^T \Sigma\{\widehat{\mathcal{X}}\} \mathbf{C})^{-1} (\mathbf{C}^T \widehat{\mathbf{x}} - \mathbf{c}) \quad (5.47)$$

resultieren analog zur ersten Stufe die ausgeglichenen Parameter der zweiten Stufe,

$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}} = \widehat{\Delta \mathbf{x}} + \mathbf{r}. \quad (5.48)$$

Der Varianzfaktor der zweiten Stufe s_2^2 ergibt sich dann aus

$$s_2^2 = \frac{1}{\sigma_0^2} \frac{\mathbf{r}^T \Sigma\{\widehat{\mathcal{X}}\}^{-1} \mathbf{r}}{p}, \quad (5.49)$$

wobei p die Anzahl der verwendeten Restriktionsgleichungen beschreibt.

In der zweiten Auswertephase erfolgt auf der Basis sogenannter Hypothesentests (KOCH 1997, S. 301) die tatsächliche Deformationsanalyse. Mit der Zielformulierung der Identifikation unbewegter Punkte wird in der Nullhypothese H_0 die Bedingung angenommen, dass sich ausgewählte Punkte nicht signifikant bewegt haben, d.h.

$$H_0 : \mathbf{C}^T \Delta \mathbf{x} = \mathbf{c}, \quad H_A : \mathbf{C}^T \Delta \mathbf{x} \neq \mathbf{c}. \quad (5.50)$$

Die Alternativhypothese H_A impliziert den entgegengesetzten Fall einer Bewegung ausgewählter Punkte. Die Testgröße \mathcal{T} berechnet sich nach NIEMEIER (2008, S. 192-195) aus dem Quotient der empirischen Varianzfaktoren beider Stufen und unterliegt der Fisher-Verteilung mit entsprechend vorliegenden Freiheitsgraden

$$\mathcal{T} = \frac{S_2^2}{S_1^2} \sim \mathcal{F}_{p, n-m+b}. \quad (5.51)$$

Getestet wird die Realisierung t der Testgröße \mathcal{T} gegen das Quantil der Fisher-Verteilung nach Festlegung eines Wahrscheinlichkeitsniveaus $1 - \alpha$:

$$t > k_{1-\alpha}^{\mathcal{F}_{p, n-m+b}}. \quad (5.52)$$

Liegt der empirische Wert der Testgröße unterhalb des Quantilwertes, so kann die Nullhypothese H_0 nicht widerlegt werden. Andernfalls wird sie verworfen und die Alternativhypothese H_A wird angenommen.

Das Testergebnis liefert bisher lediglich eine Aussage darüber, ob ein Höhennetz in seiner Gesamtheit stabil im Sinne einer nicht signifikanten Erdoberflächenbewegung ist. Da jedoch insbesondere eine lokale Information von wesentlicher Bedeutung ist, ist die Entwicklung eines Algorithmus notwendig, der die Phasen Ausgleichung und Hypothesentest nach ausgewählten Kriterien und Verwendung jeweils ausgesuchter Punkte oder Punktgruppen mehrfach durchläuft. Folglich kann dadurch eine Lokalisierung der Deformation sichergestellt werden. Die Anforderungen an den Algorithmus sind neben einer im Bezug auf die Rechenzeit effektiven Implementierung insbesondere durch eine Garantie einer möglichst optimalen Ergebnisqualität im Sinne der Vermeidung potentieller Fehldentifikationen festgelegt. Dazu wurden in HALSIG (2010, S. 23-26) unterschiedliche Variationen eines Ausgangsalgorithmus entwickelt. Der in Abbildung 5.16 schematisch dargestellte Algorithmus wurde in das Detektionsverfahren eingegliedert. Ausgehend von einer Punktgruppe mit festgelegter Punktanzahl d wird ein Hypothesentest durchgeführt. Solange dieser nicht widerlegt werden kann, werden jeweils weitere Punktgruppen mit d Punkten hinzugenommen und ein erneuter Test durchgeführt. Sobald die Nullhypothese abgelehnt wird, werden einzelne bewegte Punkte nach strengen Kriterien entfernt. Dieser Vorgang wird solange fortgesetzt, bis die Nullhypothese nicht mehr widerlegt werden kann. Der Algorithmus bricht ab, sobald alle Punkte durchlaufen worden sind. Die Punktmenge, deren Nullhypothese nach dem Durchlaufen aller Punkte nicht widerlegt werden kann, beinhaltet die identischen Punkte.

An Hand von Echtdateen der GEOBasis NRW im Ruhrgebiet wurde in HALSIG (2010, S. 27-37) die Robustheit des vorgeschlagenen Verfahrens untersucht und seine Eignung auch für große Datenmengen aufgezeigt.

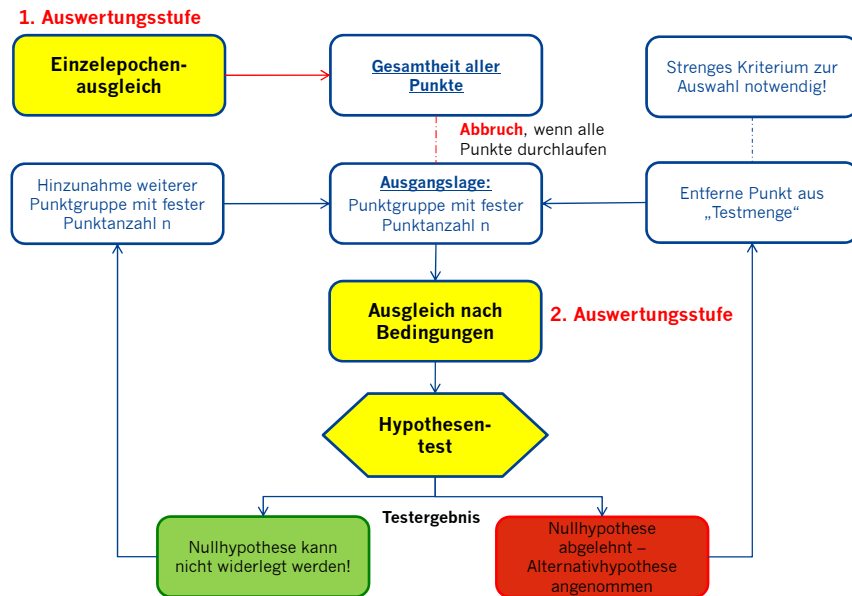


Abbildung 5.16: Algorithmus zur Punktauswahl im Detektionsverfahren (HALSIG et al. 2012, S. 6)

5.3 Integrierte Modellierung von (D-)InSAR und Nivellementdaten

Im Folgenden soll ein potentieller Ansatz für eine integrierte Modellierung von klassischen Nivellementbeobachtungen und Daten der SAR-Interferometrie analysiert werden. Während das geodätische Nivellement eine sehr präzise Methode der geodätischen Überwachung darstellt, gleichzeitig jedoch mit sehr hohen Kosten und intensivem Zeitaufwand verbunden ist, liefert die (D-)InSAR-Technik neben vergleichsweise geringen Kosten zusätzlich eine hohe räumliche Auflösung. Auch wenn mit (D-)InSAR prinzipiell eine Erfassung von Bodenbewegungen im Millimeterbereich möglich ist, wird diese Genauigkeit häufig durch Dekorrelationseffekte oder atmosphärische Laufzeitverzögerungen beschränkt. Neben der Anwendung der PS-Interferometrie, welche im Allgemeinen eine Mindestanzahl von 30 SLC-SAR-Aufnahmen voraussetzt, könnte alternativ eine integrierte Modellierung von Nivellement- und (D-)InSAR-Beobachtungen mit dem Ziel erfolgen, eine Genauigkeitssteigerung zu erreichen und die Nachteile der jeweiligen Verfahren zu kompensieren.

5.3.1 Modellierung von Bodenbewegungen

In ODIJK (2005) wurde bereits eine derartige Verknüpfung für die Überwachung von Absenkungen aufgrund von Erdgasförderungen simuliert. Im Folgenden soll eine vereinfachende Modifikation dieses Ansatzes vorgestellt werden.

Dazu kann die Geländehöhe $H_{i,t}$ eines beliebigen Punktes i als

$$H_{i,t} = H_{i,t_0} + u_{i,t-t_0} + \xi_{i,t} \quad (5.53)$$

dargestellt werden, worin H_{i,t_0} die Referenzhöhe zum Anfangszeitpunkt des Deformationsprozesses t_0 , $u_{i,t-t_0}$ die Punktbe-
 wegung aufgrund von erwarteten Ereignissen wie anthropogenen Maßnahmen

im Tagebau inklusive des Sumpfungsvorgangs und $\xi_{i,t}$ sonstige Punktbewegungen aufgrund von lokalen Einflüssen wie beispielsweise Grundwasservariationen bezeichnen. $\xi_{i,t}$ kann dabei als ein stochastischer Prozess angesehen werden, um das zeitliche Verhalten lokaler Punktinstabilitäten zu beschreiben. $u_{i,t-t_0}$ kann in einen deterministischen Trend $z_{i,t-t_0}$ und ein stochastisches Signal $\zeta_{i,t-t_0}$ aufgesplittet werden:

$$u_{i,t-t_0} = z_{i,t-t_0} + \zeta_{i,t-t_0}. \quad (5.54)$$

Während $\zeta_{i,t-t_0}$ als Modellrauschen interpretiert und beispielsweise als stochastischer Prozess auf zeitlicher und räumlicher Ebene modelliert werden kann, ist für $z_{i,t-t_0}$ ein Modell anzusetzen, welches die tatsächlichen Bedingungen approximiert. Dies ist notwendig, da mit den vorliegenden Beobachtungsverfahren keine identischen Punkte beobachtet werden können. Dazu wird eine Modifikation der in ODIJK (2005, S. 31) vorgeschlagenen Vorgehensweise verwendet. In diesem Ansatz wird eine Senkungsmulde S modelliert, deren Zentrum ausgehend von einer Ausgangszeit $t_{0,S}$ eine Bewegung mit unbekannter, konstanter Senkungsgeschwindigkeit v_S durchläuft. Eine derartige Senkungsmulde soll die wahren Gegebenheiten im jeweiligen Untersuchungsgebiet bestmöglichst approximieren (vgl. Kapitel 2.3). Es wird angenommen, dass die Senkungsgeschwindigkeit mit steigender Entfernung zum Zentrum exponentiell abfällt. Mathematisch gilt also

$$z_{i,t-t_0} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } t \leq t_{0,S} \\ v_S \left(t - t_{0,S} \exp\left\{-\frac{1}{2}r_{i,S}^2\right\} \right), & \text{wenn } t > t_{0,S}. \end{cases} \quad (5.55)$$

$r_{i,S}^2$ beschreibt darin den standardisierten Radius vom Zentrum der Senkungsmulde zu einem Punkt i . Im Folgenden soll die vereinfachende Annahme getroffen werden, dass jede Senkungsmulde horizontal kreisförmig interpretiert werden kann, sodass

$$r_{i,S}^2 = \left(\frac{x_i - x_{z,S}}{r_S} \right)^2 + \left(\frac{y_i - y_{z,S}}{r_S} \right)^2 \quad (5.56)$$

gilt. Darin bezeichnen $x_{z,S}$ und $y_{z,S}$ die Zentrumskoordinaten der Senkungsmulde, x_i und y_i die horizontalen Koordinaten von Punkt i und r_S den Radius des angenommenen Kreises.

5.3.2 Beobachtungsgleichungen

Nach der Modellierung von Deformationen werden im Folgenden die Beobachtungsgleichungen für Nivellement und InSAR-Daten vorgestellt.

Werden Beobachtungsdaten des klassischen geodätischen Nivellements herangezogen, kann die Höhendifferenz $\delta h_{ij,t}$ zwischen zwei Punkten i und j einer Messepoche t mathematisch als

$$\delta h_{ij,t} = H_{i,t} - H_{j,t} + \epsilon_{ij,t} \quad (5.57)$$

formuliert werden, worin $H_{i,t}$ bzw. $H_{j,t}$ die Punkthöhen von i bzw. j und $\epsilon_{ij,t}$ die zufälligen Messabweichungen bezeichnen. Nach Einsetzen von (5.53) und (5.54) in Gleichung (5.57) folgt

$$\delta h_{ij,t} = -H_{i,t_0} + H_{j,t_0} - z_{i,t_0} + z_{j,t_0} \underbrace{-\zeta_{i,t-t_0} + \zeta_{j,t-t_0} - \xi_{i,t} + \xi_{j,t} + \epsilon_{ij,t}}_{e_{ij,t}}, \quad (5.58)$$

worin alle stochastischen Größen zu einem zufälligen Fehlerterm $e_{ij,t}$ zusammengefasst werden. Da der Erwartungswert aller stochastischen Einzelgrößen gleich Null ist, ist auch der Erwartungswert von $e_{ij,t}$ gleich Null.

Die Beobachtungsgleichungen der satellitengestützten Beobachtungsdaten können nahezu analog hergeleitet werden. Im Folgenden soll hierzu jedoch die vereinfachende Annahme getroffen werden, dass sich alle Epochen auf einen Referenzpunkt Υ beziehen. Dann kann der Höhenunterschied $\delta\eta_{i,t_k t_l}$ für einen Punkt i zwischen den Epochen t_k und t_l geschrieben werden als

$$\delta\eta_{i,t_k t_l} = -h_{i,t_k}^{\Upsilon} + h_{i,t_l}^{\Upsilon} + \epsilon_{i,t_k t_l}. \quad (5.59)$$

Darin bezeichnen h_{i,t_k}^{Υ} und h_{i,t_l}^{Υ} die Höhen von Punkt i in der Messepoche t_k und t_l und $\epsilon_{i,t_k t_l}$ die zufälligen Messabweichungen. Wegen

$$h_{i,t_k}^{\Upsilon} = h_{i,t_k} - h_{\Upsilon,t_k}, \quad (5.60)$$

$$h_{i,t_l}^{\Upsilon} = h_{i,t_l} - h_{\Upsilon,t_l} \quad (5.61)$$

folgt dann

$$\delta\eta_{i,t_k t_l} = -h_{i,t_k} + h_{i,t_l} + h_{\Upsilon,t_k} - h_{\Upsilon,t_l} + \epsilon_{i,t_k t_l}. \quad (5.62)$$

Aufgrund der Schwerefeldabhängigkeit des geometrischen Nivellements beziehen sich die resultierenden Höhen auf ein physikalisch definiertes, orthometrisches Höhensystem, dessen Höhe als der gemessene Abstand eines Punktes an der Oberfläche zum sogenannten Geoid, einer Äquipotentialfläche in der Höhe des mittleren Meeresspiegels, entlang der Lotlinie beschrieben werden kann. Die aus InSAR-Daten herangezogenen Höhen beziehen sich hingegen auf eine geometrisch definierte Bezugsfläche, die trotz ihrer Unabhängigkeit vom Schwerefeld die Äquipotentialfläche des Schwerefelds approximiert. Die Höhen werden entlang von geradlinigen Ellipsoidloten auf ein definiertes Referenzellipsoid gemessen. Sie werden daher auch als ellipsoidische Höhen bezeichnet. Zwischen der orthometrischen Höhe $H_{i,t}$ und der ellipsoidischen Höhe $h_{i,t}$ gilt folgender Zusammenhang:

$$h_{i,t} = H_{i,t} + N_{i,t}, \quad (5.63)$$

worin $N_{i,t}$ die sogenannte Geoidhöhe beschreibt (vgl. HOFMANN-WELLENHOF und MORITZ 2005). Um im Folgenden die Höhen beider Systeme kombinieren zu können, erfolgt eine Anpassung der Ellipsoidhöhen in (5.62) an die in (5.57) verwendeten orthometrischen Höhen:

$$\delta\eta_{i,t_k t_l} = -H_{i,t_k} + H_{i,t_l} - N_{i,t_k} + N_{i,t_l} + h_{\Upsilon,t_k} - h_{\Upsilon,t_l} + \epsilon_{i,t_k t_l}. \quad (5.64)$$

Da die Geoidhöhen jedoch als zeitlich konstant angesehen werden können, d.h. $N_{i,t_k} = N_{i,t_l}$, können die Beobachtungsgleichungen zu

$$\delta\eta_{i,t_k t_l} = -H_{i,t_k} + H_{i,t_l} + h_{\Upsilon,t_k} - h_{\Upsilon,t_l} + \epsilon_{i,t_k t_l} \quad (5.65)$$

reduziert werden. Analog zu den Beobachtungsgleichungen der Nivellementdaten folgt nach Einsetzen von (5.53) und (5.54) in Gleichung (5.65):

$$\delta\eta_{i,t_k t_l} = -z_{i,t_k-t_0} + z_{i,t_l-t_0} + h_{\Upsilon,t_k} - h_{\Upsilon,t_l} \underbrace{-\zeta_{i,t_k-t_0} + \zeta_{i,t_l-t_0} - \xi_{i,t_k} + \xi_{i,t_l}}_{\epsilon_{i,t_k t_l}} + \epsilon_{i,t_k t_l}. \quad (5.66)$$

5.3.3 Funktionales und stochastisches Modell

Um eine Schätzung der Deformation durchführen zu können, müssen die Beobachtungsgleichungen mit dem Bewegungsmodell der Senkungsmulde in Verbindung gebracht werden. Dies geschieht durch Einsetzen von Gleichung (5.55) in Gleichung (5.58) (für Nivellement-Beobachtungsgleichungen),

$$\begin{aligned} \delta h_{ij,t} &= -H_{i,t_0} + H_{j,t_0} \\ &+ \begin{cases} 0, & \text{wenn } t \leq t_{0,S} \\ v_S \left(t - t_{0,S} \exp\{-\frac{1}{2}r_{j,S}^2\} \right) - v_S \left(t - t_{0,S} \exp\{-\frac{1}{2}r_{i,S}^2\} \right), & \text{wenn } t > t_{0,S} \end{cases} \\ &+ e_{ij,t} \end{aligned} \quad (5.67)$$

bzw. in Gleichung (5.66) (für (D-)InSAR-Beobachtungsgleichungen),

$$\begin{aligned} \delta\eta_{i,t_k t_l} &= h_{\Upsilon,t_k} - h_{\Upsilon,t_l} \\ &+ \begin{cases} 0, & \text{wenn } t \leq t_{0,S} \\ v_S \left(t_l - t_{0,S} \exp\{-\frac{1}{2}r_{i,S}^2\} \right) - v_S \left(t_k - t_{0,S} \exp\{-\frac{1}{2}r_{i,S}^2\} \right), & \text{wenn } t > t_{0,S} \end{cases} \\ &+ e_{ij,t}, \end{aligned} \quad (5.68)$$

worin für $r_{i,S}^2$ der in Gleichung (5.56) aufgeführte Zusammenhang gilt. Nach Linearisierung und kurzer Umformung können die (linearisierten) Beobachtungsgleichungen als Gauß-Markov-Modell (vgl. KOCH 1997, S. 166) wie folgt formuliert werden:

$$E\left\{ \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\delta h \\ \Delta\delta\eta \end{bmatrix}}_{\Delta l} \right\} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{U} \overline{\mathbf{A}} \\ \mathbf{V} \overline{\mathbf{A}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \Delta \mathbf{x}. \quad (5.69)$$

Darin bezeichnen Δl den verkürzten Beobachtungsvektor, $\Delta \mathbf{x}$ die Parameterzuschläge zu bekannten Näherungswerten und \mathbf{A} die Designmatrix. Die darin enthaltene Teilmatrix $\overline{\mathbf{A}}$ enthält die Linearisierung von $\delta h_{ij,t}$ und $\delta\eta_{i,t_k t_l}$. Wie aus Gleichung (5.56) ersichtlich, ist dazu die Kenntnis der horizontalen Lagekoordinaten aller beteiligten Nivellement- und (D-)InSAR-Punkten notwendig. Die Matrizen \mathbf{U} und \mathbf{V} können als Differenzierungsoperatoren interpretiert werden, d.h. sie le-

gen die Differenzbildung zur Erhaltung eines Höhenunterschieds zwischen zwei Punkten fest. Ihre Einträge bestehen ausschließlich aus ± 1 und 0. Der Vektor der Parameterzuschläge $\Delta \mathbf{x}$ enthält mit den Zentrumskoordinaten $(x_{z,S}, y_{z,S})$ und einem Kreisradius r_S drei räumliche Parameter für Bestimmung der Absenkungsmulde in der Ebene sowie zwei zeitliche Parameter, bestehend aus dem Anfangszeitpunkt $t_{0,S}$ der Bewegung und der Deformationsgeschwindigkeit v_S im Zentrum der Absenkungsmulde. Die Kleinste-Quadrate Lösung der Parameterzuschläge $\widetilde{\Delta \mathbf{x}}$ ist inklusive seiner Kovarianzmatrix $\Sigma\{\widetilde{\mathbf{x}}\}$ gegeben durch

$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \Delta \mathbf{l} \quad (5.70)$$

$$\Sigma\{\widetilde{\mathbf{x}}\} = (\mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \mathbf{A})^{-1}, \quad (5.71)$$

worin $\Sigma\{\mathcal{L}\}$ die stochastischen Eigenschaften der Nivellement- und (D-)InSAR-Daten im stochastischen Modell beschreibt. Dieses enthält sowohl einen Anteil aus Messrauschen, als auch einen Anteil, welcher Punktrauschen und das Bewegungssignal beinhaltet. Die ausgeglichenen Parameter $\widetilde{\mathbf{x}}$ folgen aus der Addition der Parameterzuschläge $\widetilde{\Delta \mathbf{x}}$ und der bekannten Näherungswerte \mathbf{x}_0 :

$$\widetilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \widetilde{\Delta \mathbf{x}}. \quad (5.72)$$

Mit Hilfe dieser Deformationsparameter kann nun der Trend für einen beliebigen Punkt einer beliebigen Epoche durch das Einsetzen der geschätzten Parameter in Gleichung (5.55) erhalten werden. Zur Bestimmung des gesamten Bewegungsanteils muss nach Gleichung (5.54) zusätzlich das Signal berechnet werden. Für einen beliebigen Punkt P einer Epoche t_p ist dieses nach ODIJK (2005, S. 36) durch folgende Kleinste-Quadrate Lösung gegeben:

$$\widetilde{\zeta}_{P,t_n-t_0} = \mathbf{q}^t \begin{bmatrix} \mathbf{U}^T & \mathbf{V}^T \end{bmatrix} \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \mathbf{v}, \quad (5.73)$$

worin \mathbf{q}^t einen Vektor zur Betrachtung der Kovarianzen zwischen dem Signal von Punkt P zur Epoche t_p und dem Signal der beobachteten Punkte und Epochen bezeichnet sowie \mathbf{v} den Verbesserungsvektor aus der Kleinsten-Quadrate-Lösung in (5.71) definiert:

$$\mathbf{v} = \underbrace{\mathbf{A} (\mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma\{\mathcal{L}\}^{-1} \Delta \mathbf{l}}_{\widetilde{\Delta \mathbf{l}}} - \Delta \mathbf{l}. \quad (5.74)$$

Sind Trend und Signal gelöst, kann die Kleinste-Quadrate Lösung für die gesamte Bewegung als

$$\widetilde{\mathbf{u}}_{P,t-t_0} = \widetilde{\mathbf{z}}_{P,t-t_0} + \widetilde{\zeta}_{P,t-t_0} \quad (5.75)$$

formuliert werden (vgl. Gleichung 5.54).

6. Anwendung und Analyse im Untersuchungsgebiet

Zur Verifizierung der in den vorausgegangenen Kapiteln beschriebenen interferometrischen Produkte werden diese mit den Ergebnissen aus Analysen der klassischen Landesvermessung verglichen und beurteilt. Dies ermöglicht im Rahmen einer späteren Anwendung eine integrierte Modellierung von (D-)InSAR-Daten und Nivellementbeobachtungen. Zur Datenauswertung und -analyse erfolgt anhand eines Untersuchungsgebietes in der Niederrheinischen Bucht.

6.1 Datengrundlage

Für den interferometrischen Prozessablauf im Rahmen der Methoden aus der Radarfernerkundung wurden von der Europäischen Weltraumorganisation (engl.: European Space Agency, kurz ESA) 44 SAR-Bilder im Single-look-complex-Format (kurz SLC-Format) zur Verfügung gestellt. Diese decken das Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht weitestgehend ab. Die Aufnahme dieser Daten erfolgte durch die European Remote Sensing-Satellitenmissionen (ERS-1 und -2) im Rahmen des gleichnamigen Programms der europäischen Weltraumorganisation (ESA). Eine Auflistung der hier verwendeten ERS-SAR-Aufnahmen ist der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

Neben den Verfahren der Radarfernerkundung werden zur Höhenbestimmung auch die Verfahren der klassischen Landesvermessung angewendet. Diese dienen unter anderem der Validierung der Ergebnisse aus der Radar-Interferometrie. Als Datengrundlage werden die in regelmäßigen Abständen wiederholt gemessenen Leitnivellements verwendet. Dazu wurden von der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 - GEOBasisNRW Daten für das Leitnivellement „Rheinbraun“ der Jahre 1993, 1997 und 2001 zur Verfügung gestellt. Diese umfassen auf räumlicher Ebene die Gebietsausdehnung der SAR-Aufnahmen und überdecken gleichzeitig das verwendete Zeitintervall.

Tabelle 6.1: Verwendete SAR-Aufnahmen der ERS-Satelliten im SLC-Format. Für die Small Baseline PSI nach BERARDINO et al. (2002) werden im Folgenden die grün markierten SAR-Aufnahmen herangezogen.

Datum	SAR-Sensor	geom. Basislinie [m]	temp. Basislinie [d]
Master-Szene:			
25.08.1998	ERS-2	0	0
Slave-Szenen:			
09.05.1992	ERS-1	93,05	-2299
18.07.1992	ERS-1	-274,28	-2229
26.09.1992	ERS-1	-80,79	-2159
31.10.1992	ERS-1	1012,85	-2124
05.12.1992	ERS-1	479,28	-2089
09.01.1993	ERS-1	-313,62	-2054
20.03.1993	ERS-1	548,63	-1984
29.05.1993	ERS-1	-349,11	-1914
11.09.1993	ERS-1	699,74	-1803
20.11.1993	ERS-1	996,55	-1739
22.05.1995	ERS-1	81,16	-1191
26.06.1995	ERS-1	-578,67	-1156
04.09.1995	ERS-1	-134,07	-1086
13.11.1995	ERS-1	427,49	-1016
01.04.1996	ERS-1	-248,22	-876
10.06.1996	ERS-1	-242,04	-806
31.05.1999	ERS-1	898,61	279
31.01.2000	ERS-1	-5,12	524
14.11.1995	ERS-2	-702,59	-1015
27.02.1996	ERS-2	871,47	-910
02.04.1996	ERS-2	-336,27	-875
11.06.1996	ERS-2	-340,29	-805
03.12.1996	ERS-2	-373,8	-630
18.03.1997	ERS-2	66,73	-525
27.05.1997	ERS-2	36,74	-455
01.07.1997	ERS-2	-203,91	-420
09.09.1997	ERS-2	575,01	-350
18.11.1997	ERS-2	437,58	-280
03.03.1998	ERS-2	-585,12	-175
12.05.1998	ERS-2	756,64	-105
21.07.1998	ERS-2	-491,89	-35
03.11.1998	ERS-2	963,81	70
08.12.1998	ERS-2	-549,53	105
12.01.1999	ERS-2	-481,21	140
23.03.1999	ERS-2	-60,36	210
10.08.1999	ERS-2	1064,92	350
19.10.1999	ERS-2	-288,67	420
01.02.2000	ERS-2	155,99	525
16.05.2000	ERS-2	922,31	630
03.10.2000	ERS-2	-75,73	770
12.12.2000	ERS-2	-32,67	840
16.01.2001	ERS-2	262,75	875
20.02.2001	ERS-2	1649,93	910
01.05.2001	ERS-2	3198,14	980
10.07.2001	ERS-2	780,52	1050
23.10.2001	ERS-2	1115,82	1186

6.2 Datenauswertung und Ergebnisdiskussion

6.2.1 (D-)InSAR-Auswertung

Entsprechend dem in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Prozessierungsablauf konnte zunächst aus zwei SAR-SLC-Aufnahmen einer Tandem-Mission der ERS-Satelliten ein InSAR-basiertes digitales Geländemodell (DEM) generiert werden. Eine Tandem-Mission führt aufgrund einer speziellen Konfiguration beider Satellitenbahnen insofern zu vorteilhaften Bedingungen, dass die Aufnahmestreifen beider Satelliten in einem Zeitintervall von 24 Stunden nahezu übereinander liegen (vgl. Kapitel 4.1). Als Datengrundlage wurden die Aufnahmen vom 10.06.1996 (ERS-1) und 11.06.1996 (ERS-2) herangezogen, wobei letztere die Masterszene definiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

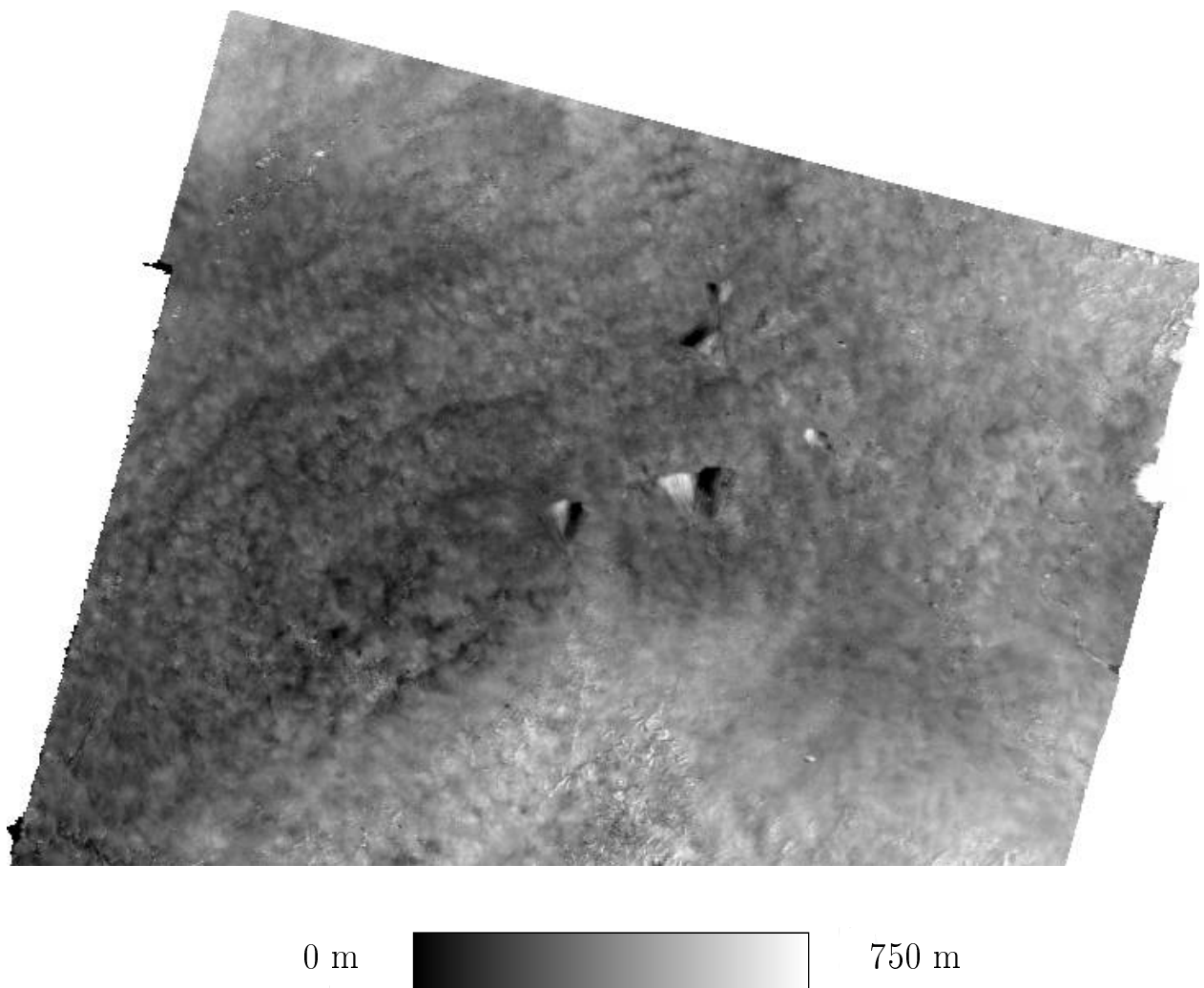


Abbildung 6.1: InSAR-basiertes digitales Geländemodell aus einer ERS-Tandemmission

Darin sind insbesondere in zentraler Lage die Tagebaue Hambach, Inden und Garzweiler ersichtlich. Abbildung 6.2 zeigt im Vergleich die geschätzten absoluten Höhen der Nivellementlinien des Leitnivellements „Rheinbraun“ im Jahr 1997.

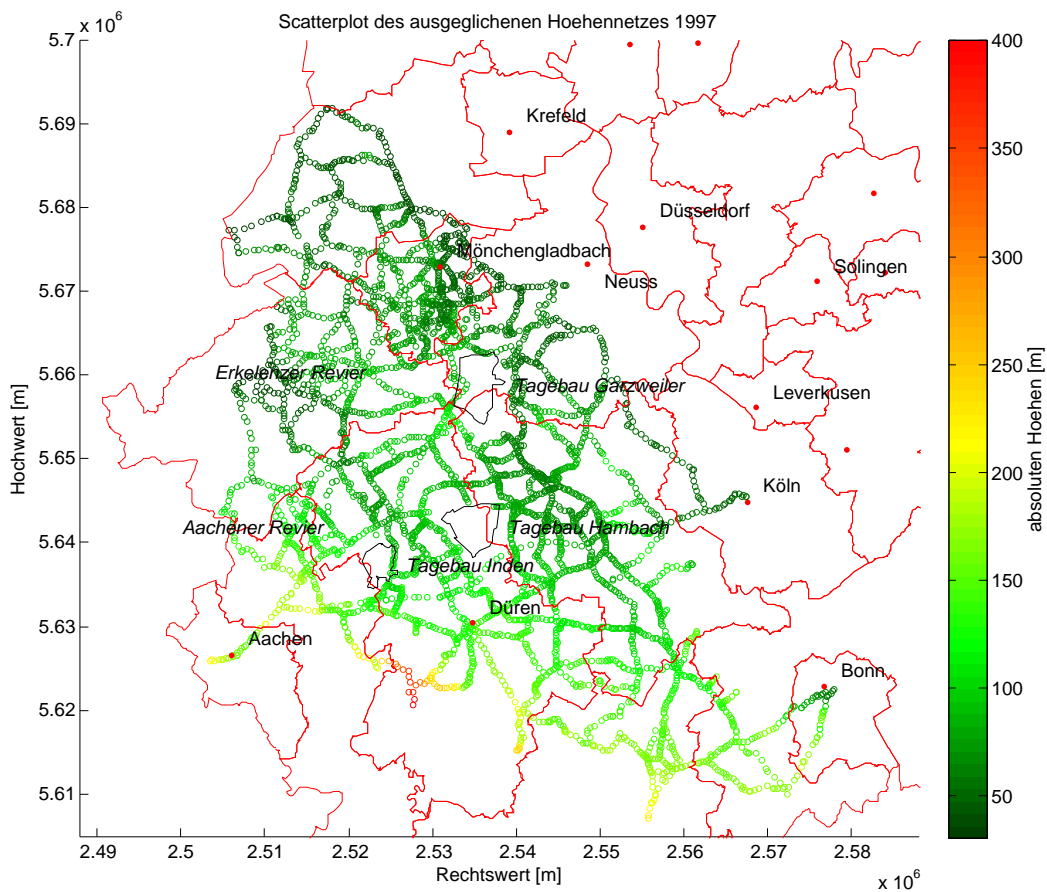


Abbildung 6.2: Darstellung der absoluten Höhen entlang der Nivellementlinien für die Epoche 1997

Da ein Vergleich auf der Grundlage absoluter Höhen schwierig ist, wurde auf der Basis dieser Daten anschließend im Rahmen der D-InSAR-Prozessierung (vgl. Kapitel 5.1.2) ein Bewegungsfeld ermittelt. Da lediglich zwei SAR-Aufnahmen verwendet werden, ist im Rahmen der 2-Pass-Methode zusätzlich ein externes digitales Geländemodell notwendig. Dieses wurde aus der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) aufbereitet. Das Resultat des Bewegungsfeldes ist in Abbildung 6.3 dargelegt. In zentraler Lage sind wiederum die Tagebaue Hambach, Inden und Garzweiler ersichtlich.

Aus Abbildung 6.3 wird deutlich, dass für die Zeitspanne von 24 Stunden (10.06.1996 - 11.06.1996) Bewegungen im Zentimeterbereich resultieren. Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit Analysen basierend auf Daten der Landesvermessung fallen Unterschiede enormer Größenordnung auf. Für die aus den Nivellementbeobachtungen der Epochen 1997 und 2001 berechneten Höhendifferenzen (vgl. Abbildung 6.4) resultieren in einem Zeitintervall von 4 Jahren Bewegungen in der Größenordnung, die bei der D-InSAR-Technik innerhalb eines Tages erwartet werden. Eine potentielle Ursache dieser Differenzen folgt aus der Tatsache, dass in den D-InSAR-Daten neben dem gesuchten Phasenanteil der Deformation zusätzliche Phasenanteile, verursacht durch Fehler in den verwendeten Geländemodellen, Orbitfehler sowie Atmosphäreneinflüsse und Signalrauschen, enthalten sind.

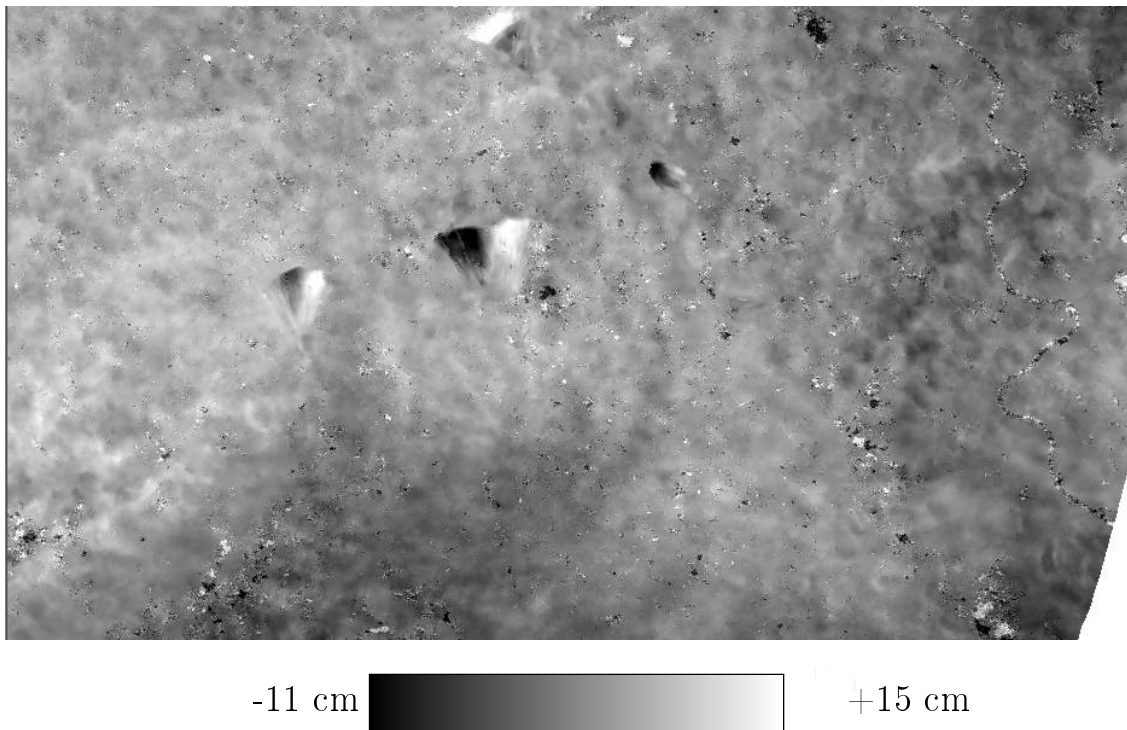


Abbildung 6.3: D-InSAR-Bewegungsfeld aus einer ERS-Tandemmission

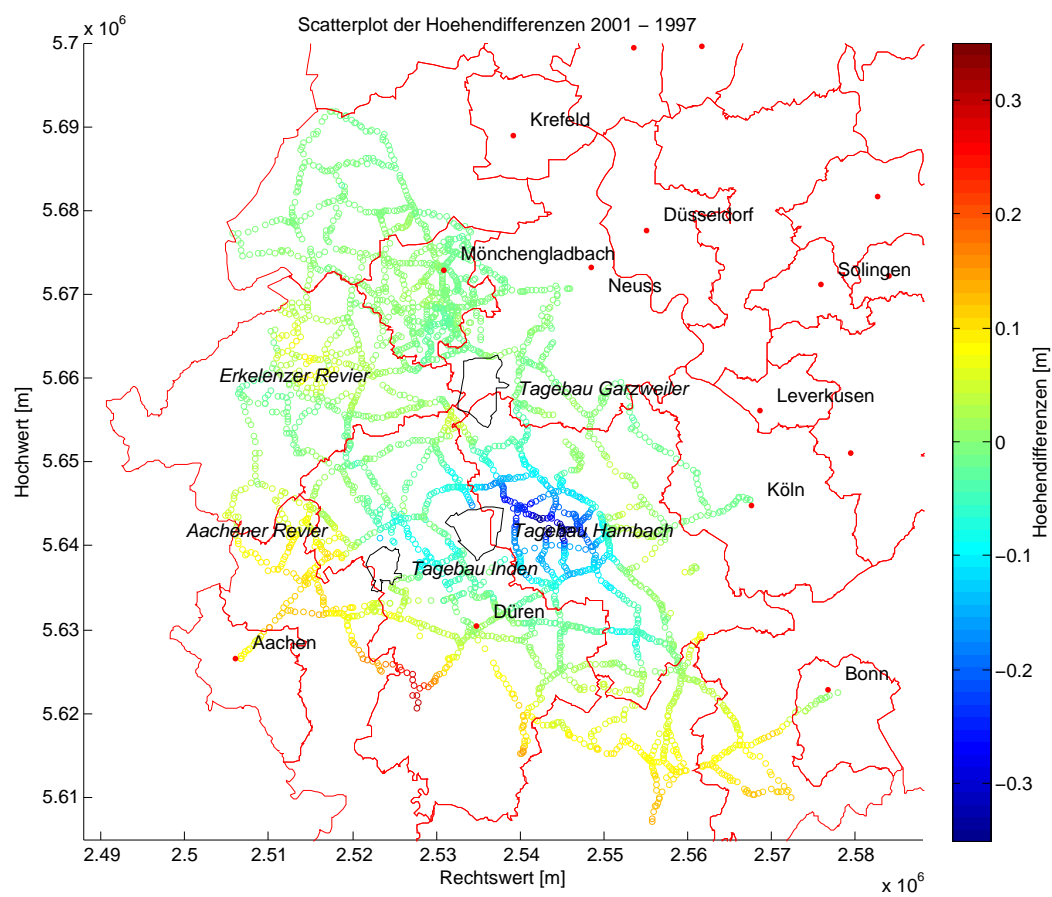


Abbildung 6.4: Darstellung der Höhendifferenzen der Leitnivellement-Epochen 1997 und 2001

Nach KIRCHER (2004, S. 31) führen die verschiedenen Phasenanteile zu unterschiedlichen Effekten in den Interferogrammen. Abbildung 6.5 zeigt den Einfluss von Orbitfehlern, Atmosphären-bedingten Effekten und Signalrauschen auf das Interferogramm. Während Orbitfehlern im Interferogramm zu linearen Phasenrampen führen, weisen Einflussfaktoren der Atmosphäre ein über eine lokale Ausprägung hinauslaufendes Muster auf. Der Rauscheinfluss wirkt sich als statistischer Fehler aus und die gesuchten Bewegungen sind schließlich anhand auftretender Fringes zu erkennen. Da diese Effekte im Allgemeinen als eine Überlagerung auftreten, ist eine Separierung und somit auch eine Zuordnung einzelner Effekte zu den jeweiligen Phasenanteilen sehr schwierig.

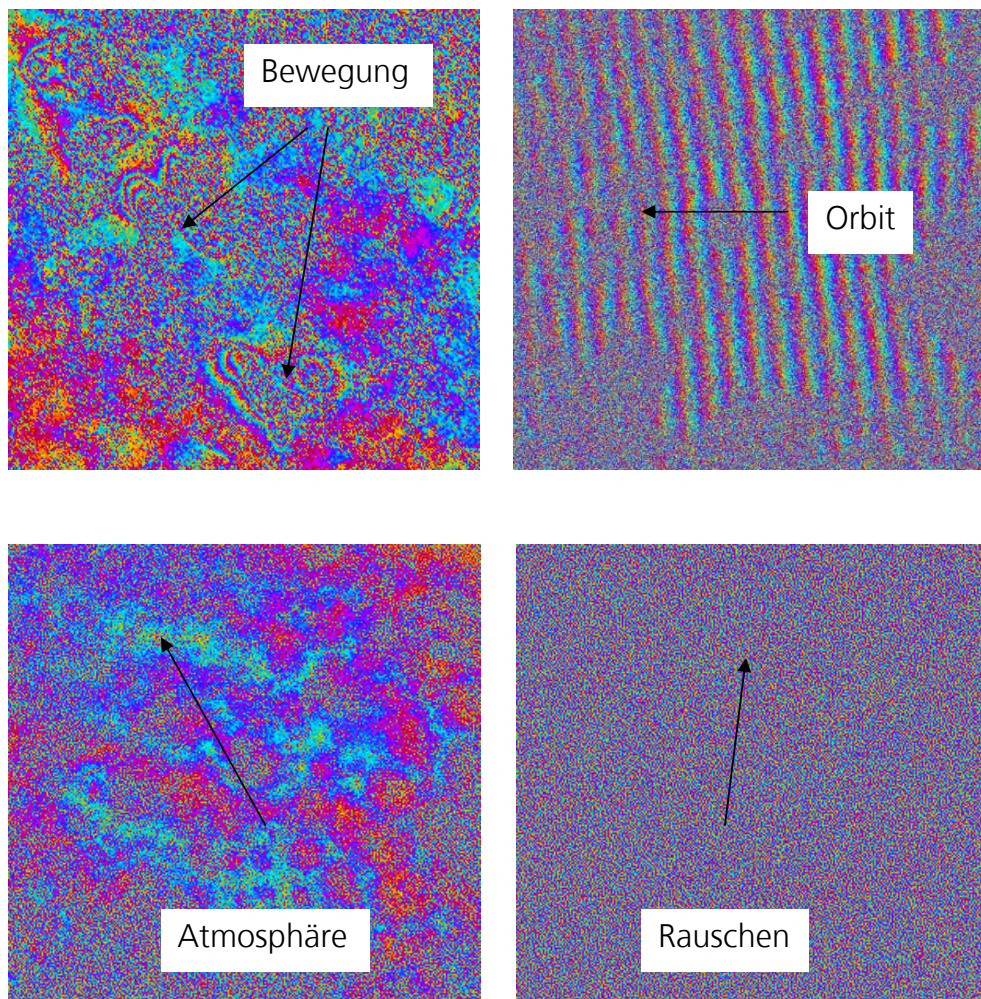


Abbildung 6.5: Einflüsse und Auswirkungen auf die interferometrische Phase bei (D-)InSAR-Prozessierung (aus KIRCHER 2004, S. 31)

In Kapitel 5.3 wurde eine vereinfachende Modifikation eines in ODIJK (2005) entwickelten Ansatzes vorgestellt, um eine Verknüpfung von klassischen Nivellementbeobachtungen und Daten der SAR-Interferometrie zu ermöglichen. Diese integrierte Modellierung soll zu einer Genauigkeitssteigerung und der Kompensation der Nachteile der jeweiligen Verfahren führen. Während das geodätische Nivellement eine sehr präzise, aber gleichzeitig auch kostenintensive und zeitaufwändige Methode darstellt, kann die (konventionelle) InSAR-Technik als ein Verfahren mit hoher räumlicher Auflösung und hoher Punktdichte bei vergleichsweise niedrigen Kosten verstanden werden. In

ODIJK (2005) wurden verschiedene Simulationen zur Analyse beider Beobachtungsverfahren sowie einer anschließenden Kombination beider Methoden durchgeführt. Diese sollen die Anwendungsmöglichkeiten für das Monitoring von Bodensenkungen, verursacht durch Gasförderung, herausstellen. Da die grundlegenden Gegebenheiten und Voraussetzungen auf das in dieser Arbeit vorliegende Problem der Detektion von Deformationen der Erdoberfläche aufgrund von Bergbau und Sumpfungprozessen nahezu identisch sind, werde die Ergebnisse dieser Simulationen für eine Beurteilung herangezogen. Die Quintessenz dieser Simulationsergebnisse ist die Erkenntnis, dass die (konventionelle) InSAR-Technik zwar ein vielversprechendes Potential aufweist, jedoch zum derzeitigen Stand aufgrund auftretender Bereiche mit sehr niedriger Kohärenz im Bild und der atmosphärischen Laufzeitverzögerung keine vollständig adäquate Alternative zum klassischen Nivellement darstellt (ODIJK 2005, S. 40-41).

Um eine geeignete Analyse der ERS-1 und -2-Daten im Vergleich mit der Datenauswertung auf der Grundlage der Nivellementbeobachtungen zu realisieren, erfolgt im Folgenden die Anwendung der Permanent Scatterer Interferometry (PSI), welche zur Reduzierung der beschriebenen Hauptbeschränkungen der (D-)InSAR-Technik führt.

6.2.2 PSI-Auswertung

Nach der Anwendung der konventionellen InSAR- und D-InSAR-Prozessierung zur Erhalten der klassischen interferometrischen Produkte erfolgt die Detektion der Permanent Scatterer (vgl. Kapitel 5.1.3). Die Realisierung der PS-Identifikation erfolgt dabei auf der Grundlage des Amplituden-Dispersionsindex D_a (vgl. Kapitel 5.1.3.3). Dabei werden die Pixel als Permanent Scatterer herangezogen, deren Amplituden-Dispersionsindex unterhalb eines bestimmten Schwellwertes liegt. Dieser wurde für die hier durchgeführte Anwendung auf 0.40 festgelegt. Abbildung 6.6 zeigt die detektierten Permanent Scatterer im gesamten Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht, Abbildung 6.7 einen Ausschnitt dieses Gebietes im Umkreis des Hambacher Tagebaus (in zentraler Lage) und des Kölner Stadtgebietes (in östlicher Lage).

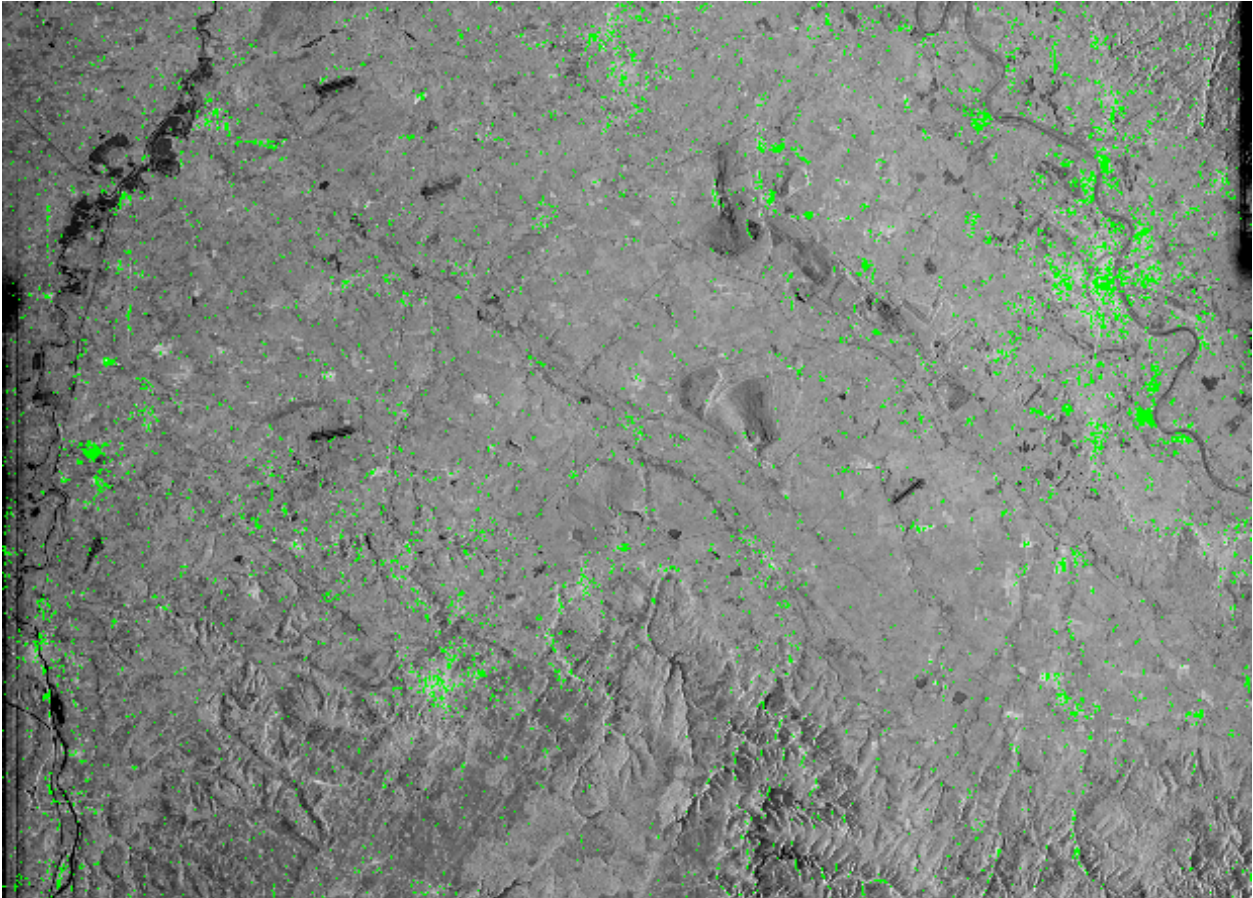


Abbildung 6.6: Verteilung der Permanent Scatterer im gesamten Untersuchungsgebiet

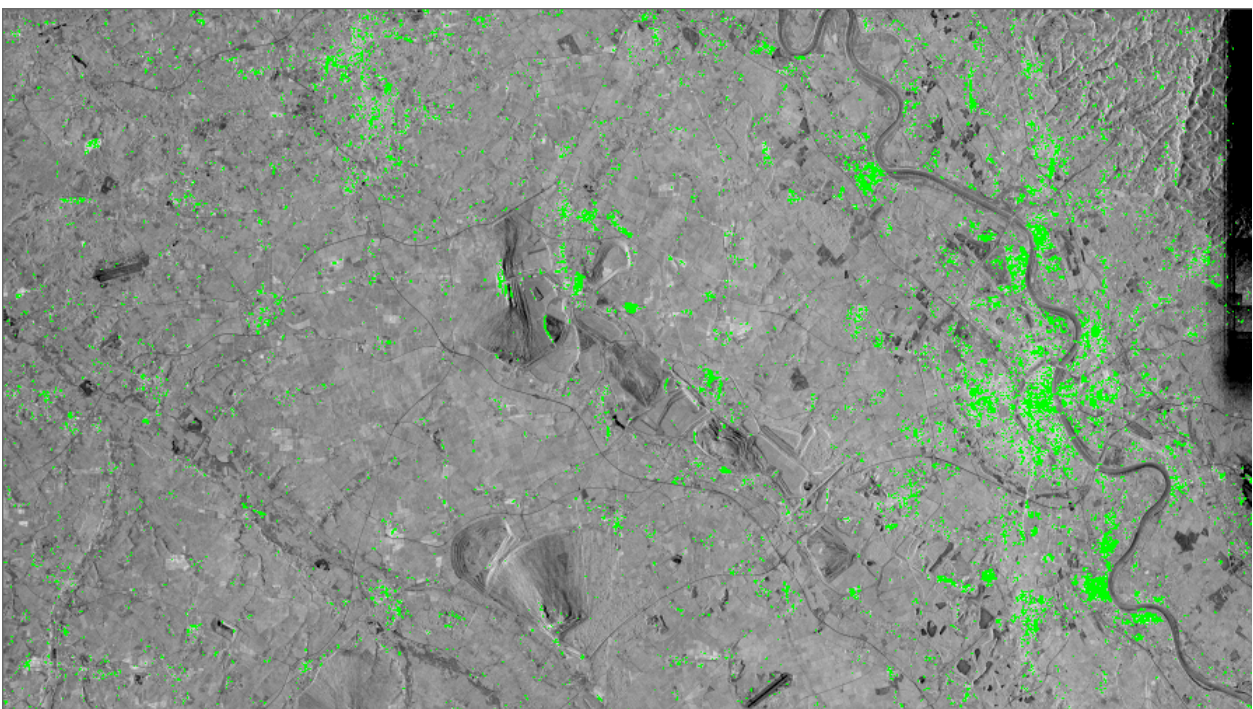


Abbildung 6.7: Verteilung der Permanent Scatterer im Umkreis des Hambacher Tagebaus (in zentraler Lage) und des Kölner Stadtgebiet (in östlicher Lage)

Im Folgenden wird Abbildung 6.7 um die Darstellung der Nivellementlinien erweitert (siehe Abbildung 6.8) und zudem der gleiche Sachverhalt für ein Gebiet im Umgebungsgebiet des Tagebaus Garzweiler dargelegt (siehe Abbildung 6.9). Diese verdeutlichen, dass die detektierten Permanent Scatterer in vielen Regionen entlang der Nivellementlinien verlaufen und diese Punkte insbesondere für eine Analyse der einzelnen Punktbewegungen herangezogen werden könnten. Dieser Gedanke soll später erneut aufgegriffen werden.

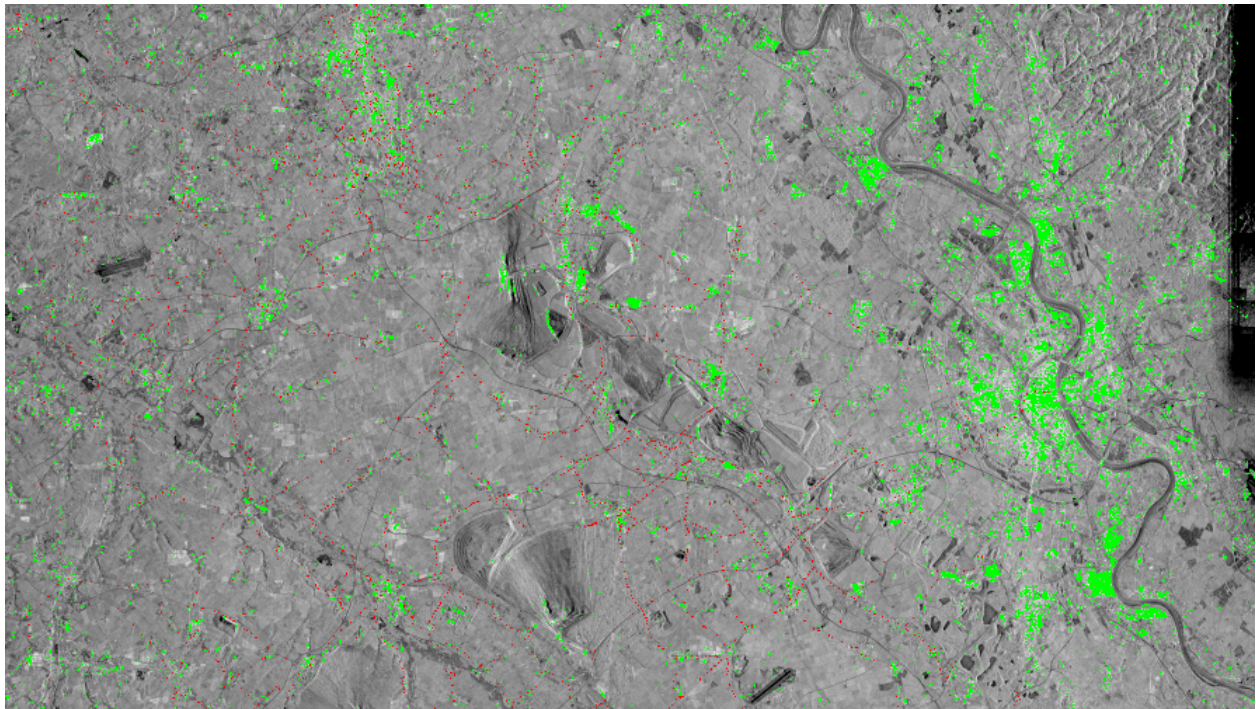


Abbildung 6.8: Verteilung der Permanent Scatterer (grün) und Darstellung der Nivellementlinien (rot) im Umkreis des Hambacher Tagebaus (in zentraler Lage) und des Kölner Stadtgebiet (in östlicher Lage)

Prinzipiell ermöglicht das in ODIJK (2005) entwickelte Verfahren auch den Umgang mit der Permanent Scatterer Interferometry, jedoch wurden diesbezüglich bisher noch keine Simulationen berechnet. Zwar kann aufgrund der bereits beschriebenen Vorteile der PS-Technik im Vergleich zur konventionellen InSAR-Methode eine vielversprechende Steigerung des Potentials erwartet werden, jedoch sind insbesondere Gebiete mit einer zu geringen Anzahl und räumlichen Dichte von Permanent Scatterern insofern kritisch zu bewerten, dass zumindest in diesen Regionen die Anwendung von geometrischem Nivellement sinnvoll erscheint. Die geringe PS-Punktdichte wird auch bei der Betrachtung von Abbildung 6.6 deutlich.

Die Hauptursache für eine zu geringe Punktdichte liegt im Rahmen der PS-Detektion auf der Basis des Amplituden-Dispersionsindex in der Annahme, dass eine stabile Sequenz von Amplitudenwerten zu einem sinkenden Beeinflussungsgrad von geometrischer und zeitlicher Dekorrelation führt und dass, im Umkehrschluss, diese Dekorrelationsprozesse unmittelbar Einfluss auf die Anzahl und Verteilung der Permanent Scatterer nehmen (vgl. Kapitel 5.1.3.3). Um dennoch eine höhere Punktdichte zu gewährleisten, sind grundsätzlich mehrere Ansätze möglich. Beispielsweise könnten zusätzlich zeitlich kohärente Pixel verwendet werden, die nicht zwangsweise in allen Szenen vorhanden sind und dementsprechend nur für eine Untermenge aller vorliegenden Aufnahmen als Permanent Scatterer

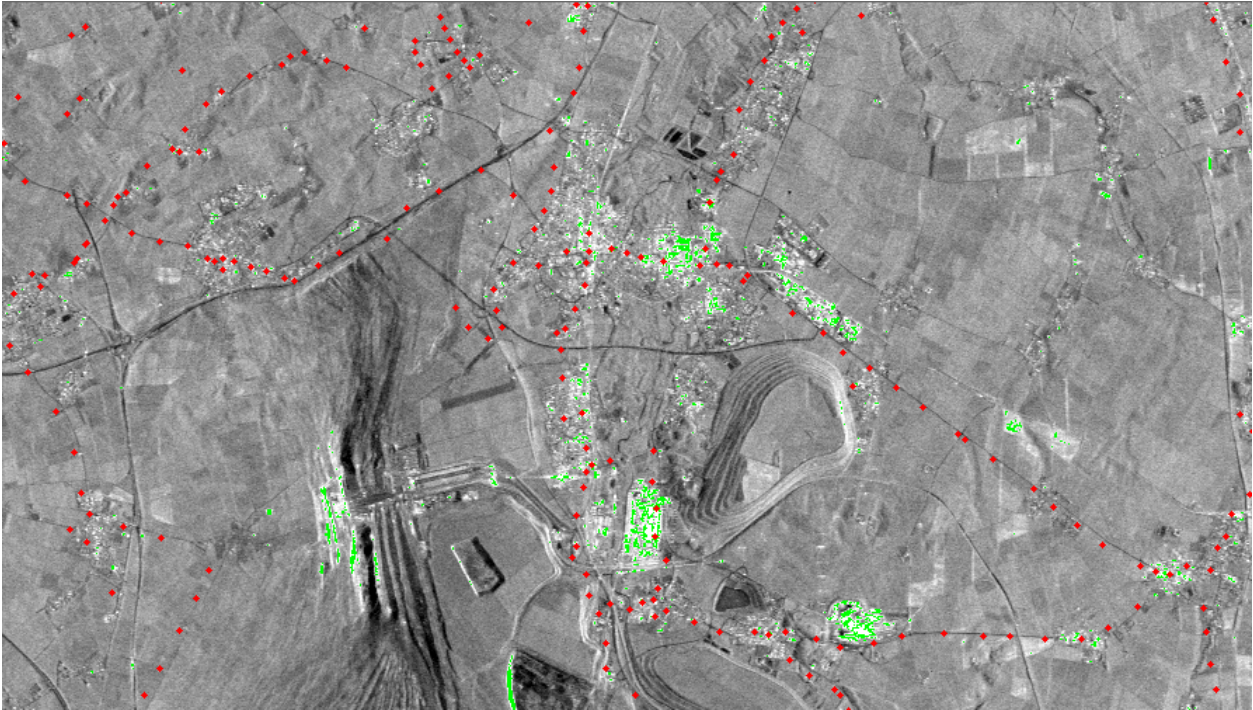


Abbildung 6.9: Verteilung der Permanent Scatterer (grün) und Darstellung der Nivellementlinien (rot) im Umgebungsgebiet von Tagebau Garzweiler

interpretiert werden könnten. In BERARDINO et al. (2002) wird ein Ansatz vorgeschlagen, welcher für die Kombination von differentiellen Interferogrammen (Bildstapeln) nur Datenpaare zulässt, die durch eine kurze effektive Basislinie charakterisiert werden können. Auf diese Weise werden Einflüsse der geometrischen Dekorrelation begrenzt, sodass der Grad der Kohärenz ansteigt (BERARDINO et al. 2002, S. 2375). Derzeit konnte allerdings aufgrund der schwierigen Kompromisfindung noch keine vollkommen anerkannte Methode entwickelt werden.

In dieser Arbeit soll eine PS-Detektion auf der Basis der in BERARDINO et al. (2002) entwickelten Small-Baseline-PSI erfolgen. Dabei wurde eine räumliche Auflösung mit einer Pixelausdehnung von $80 \times 80m$ am Boden verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.10 für das gesamte Untersuchungsgebiet und in Abbildung 6.11 analog zu Abbildung 6.7 für einen Bildausschnitt in der Region des Hambacher Tagebaus und des Kölner Stadtgebietes dargestellt. Dazu wurde zunächst eine Masterszene (25.08.1998) definiert (vgl. Kapitel 5.1.1.1), welche der Festlegung bei der Verwendung der konventionellen PS-Interferometrie mit allen Szenen entspricht. Insgesamt wurde ein Datenstapel aus 9 differentiellen Interferogrammen mit einer in Bezug auf die Masterszene effektiven Basislinie kleiner 130 Meter verwendet. Die verwendeten Szenen sind in Tabelle 6.1 farblich gekennzeichnet. Die Detektion der Permanent Scatterer basiert dabei nicht auf einem Schwellwertverfahren bezüglich des Dispersionsindex der Amplitude, sondern ist unmittelbar abhängig von der Kohärenz. Alle Pixel, deren Kohärenz oberhalb eines Schwellwertes von 0.40 liegen, werden entsprechend als Permanent Scatterer interpretiert.

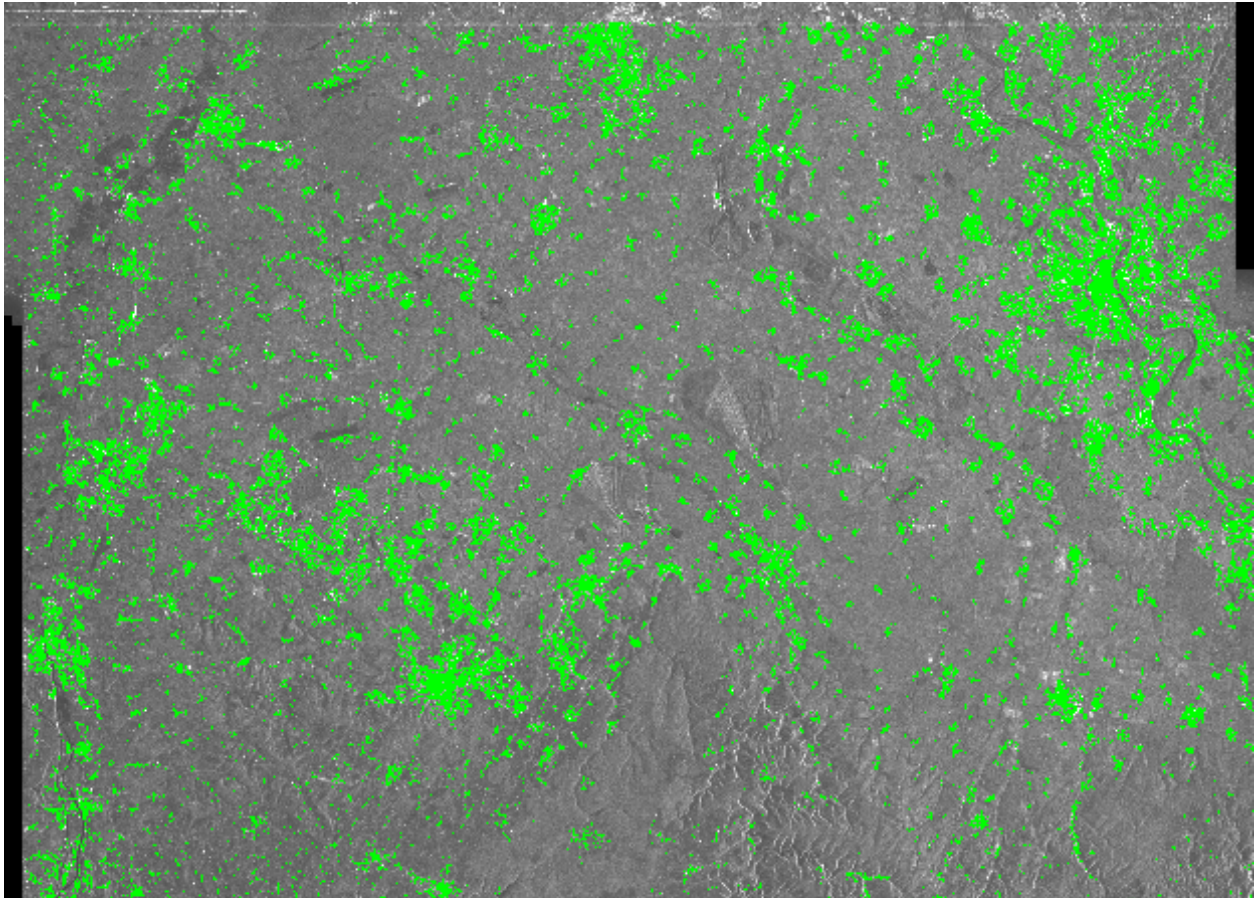


Abbildung 6.10: Verteilung der Permanent Scatterer im gesamten Untersuchungsgebiet bei Small Baseline PSI

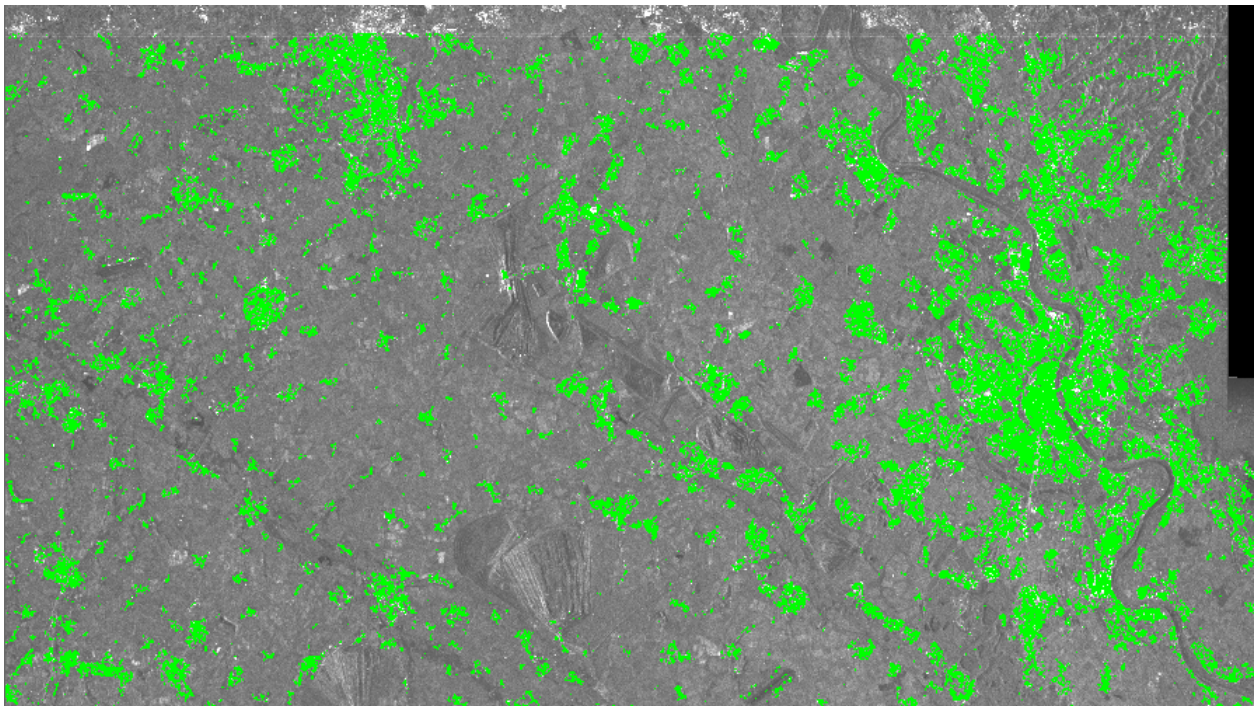
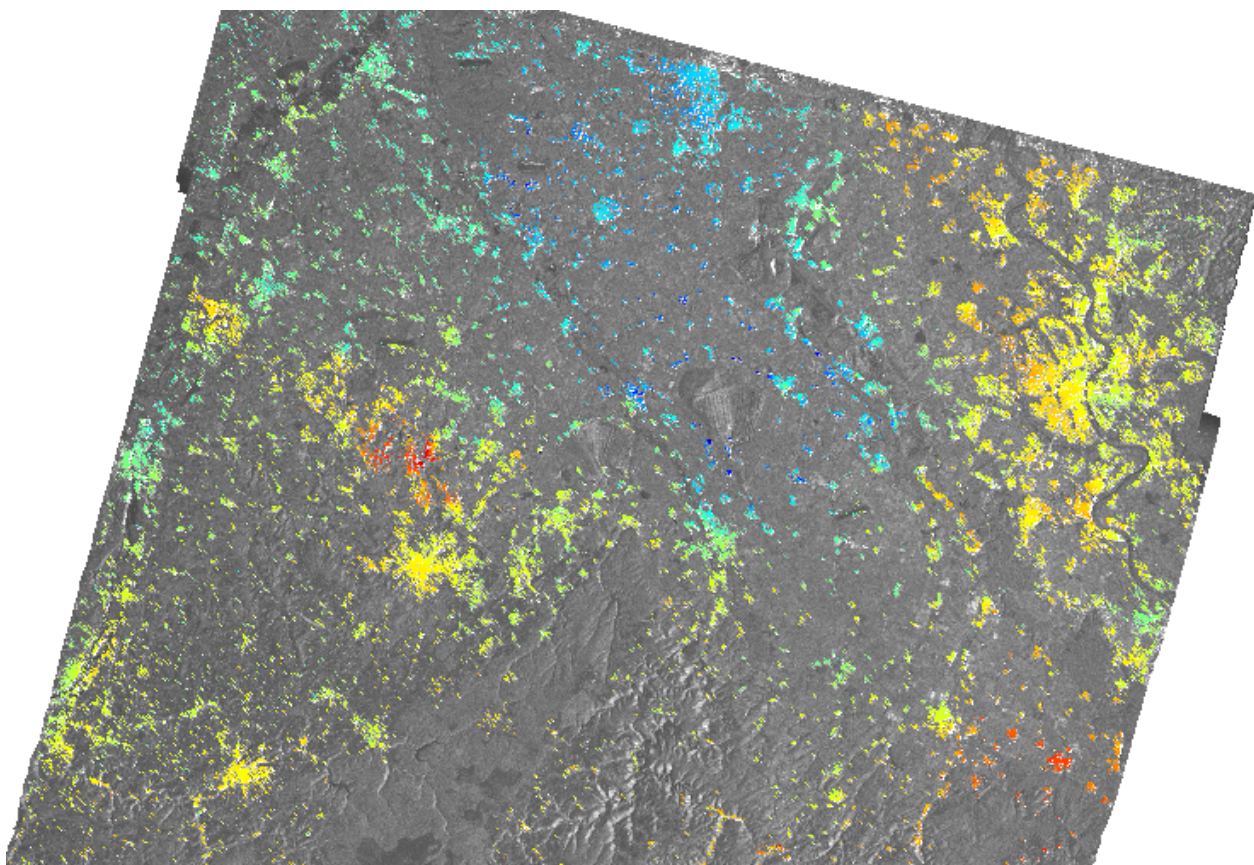


Abbildung 6.11: Verteilung der Permanent Scatterer im Umkreis des Hambacher Tagebaus (in zentraler Lage) und des Kölner Stadtgebiet (in östlicher Lage) bei Small Baseline PSI

Für diesen Datenstapel wurden die Bewegungen für die Permanent-Scatterer ermittelt. Das Ergebnis für das gesamte Untersuchungsgebiet ist Abbildung 6.12 zu entnehmen. Abbildung 6.13 zeigt die Punktdeformation im Umkreis des Hambacher Tagebaus (in zentraler Lage) und das Kölner Stadtgebiet (in östlicher Lage). Die Bewegungen in der Regionen um Mönchengladbach (in nördlicher Lage) und Erkelenz (in zentraler Lage) sind in Abbildung 6.14 dargelegt. Im gesamten Gebiet konnten Senkungen in maximaler Ausdehnung von etwa 23 cm (siehe Aachener Raum in westlicher Ausdehnung) und Hebungen in einer Größenordnung von 12 cm (siehe Tagebau Hambach in zentraler Lage) ausgemacht werden. Diese entsprechen in erster Näherung den Ergebnissen aus den Nivellementbeobachtungen (vgl. Abbildung 6.4). Um eine Genauigkeitsabschätzung und folglich anhand der Nivellement-Daten eine Verifikation dieser Ergebnisse zu ermöglichen, ist zunächst die Filterung des Phasenanteils der Atmosphäre notwendig, welche bislang noch nicht durchgeführt werden konnte. Erst auf dieser Basis können außerdem flächendeckende Informationen über die Permanent Scatterer gewonnen werden.



-23 cm



+12 cm

Abbildung 6.12: Deformationen an den Permanent Scatterern für das gesamte Untersuchungsgebiet

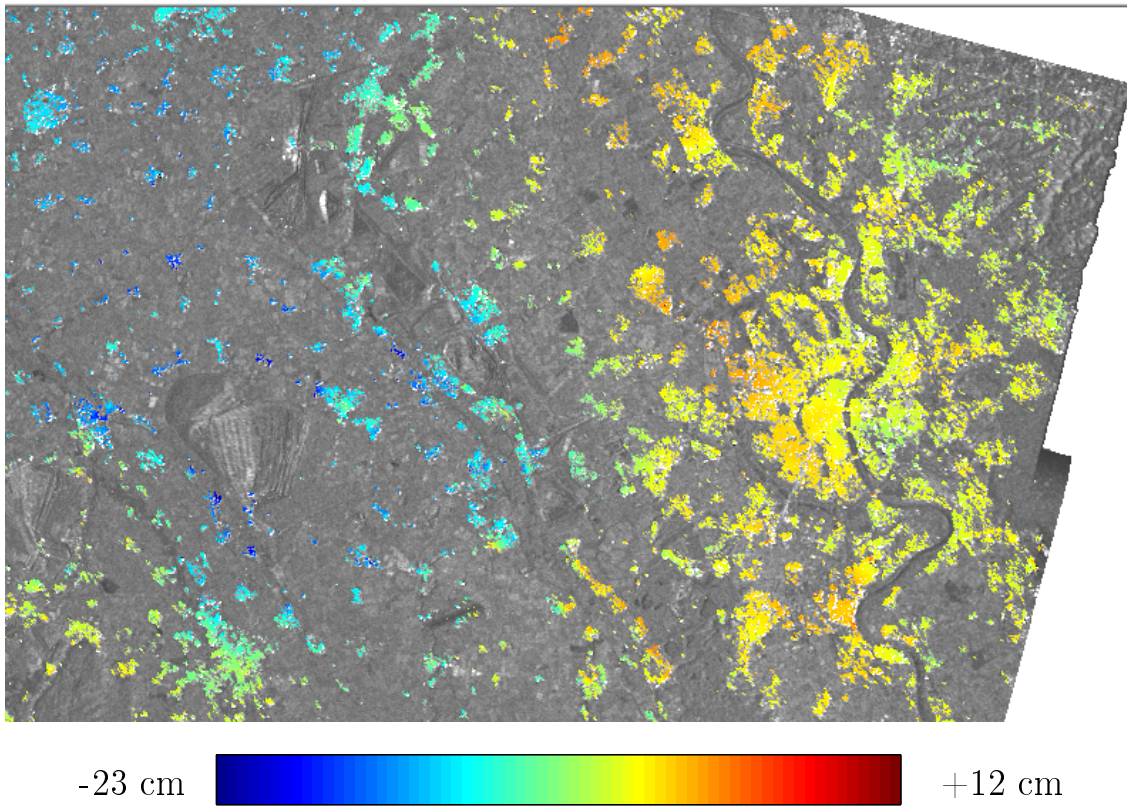


Abbildung 6.13: Deformationen an den Permanent Scatterern für ein Gebiet in der Nähe des Kölner Stadtgebiets

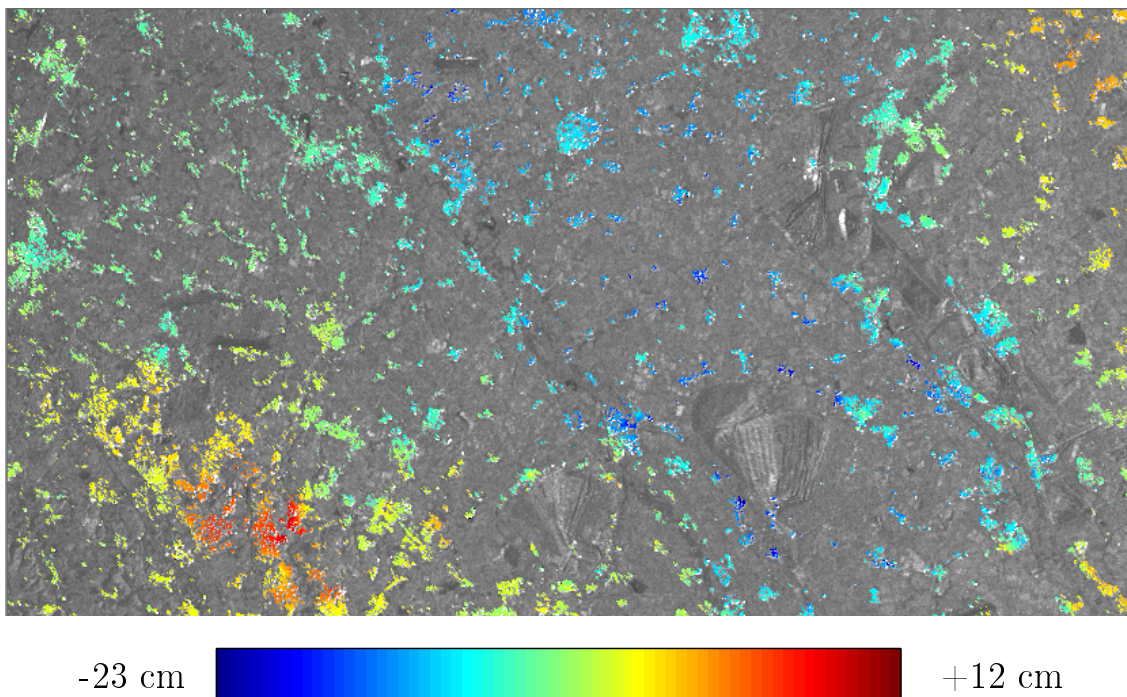


Abbildung 6.14: Deformationen an den Permanent Scatterern für ein Gebiet in der Umgebung von Mönchengladbach und Erkelenz

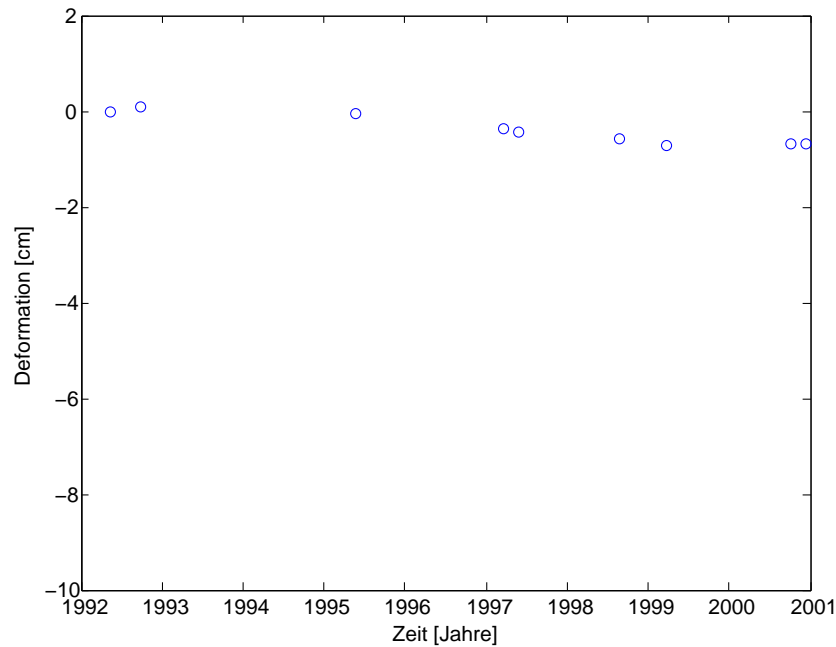


Abbildung 6.15: Bewegung eines einzelnen Permanent Scatterer in der Nähe des Kölner Stadtgebietes

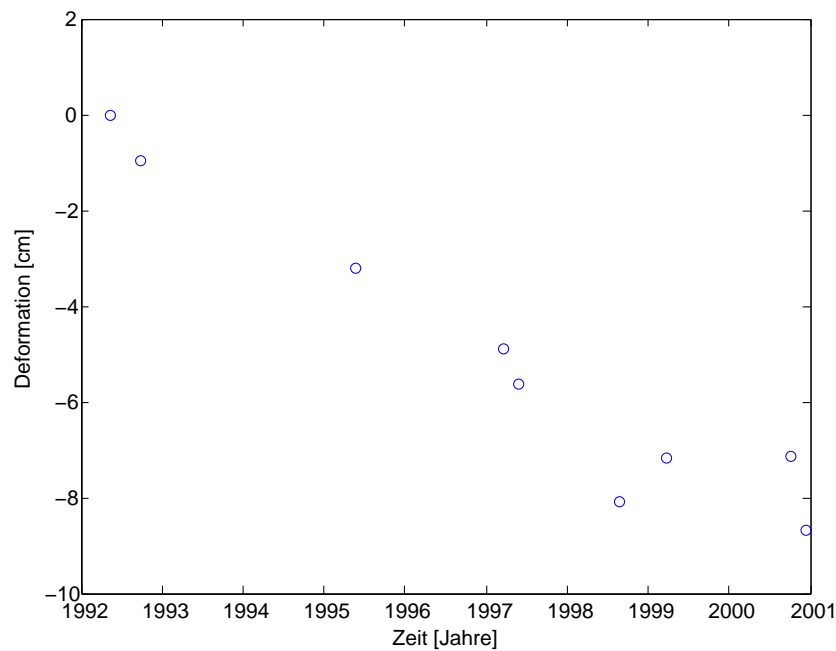


Abbildung 6.16: Bewegung eines einzelnen Permanent Scatterer in der Nähe von Elsdorf (nordöstlich vom Tagebau Hambach)

Wie bereits erwähnt, können aus den Prozessierungsergebnissen der Permanent Scatterer Interferometry Deformationszeitreihen für jeden einzelnen Permanent Scatterer Punkt abgeleitet werden. Beispielhaft sollen derartige Punktbewegungen für einen Permanent Scatterer in der Nähe des Köl-

ner Stadtgebietes (vgl. Abbildung 6.15) und einen Permanent Scatterer in der nordöstlich des Tagebaus Hambach gelegenen Region um Elsdorf (vgl. Abbildung 6.16) aufgezeigt werden.

Dieser allgemeine Verlauf scheint den in Abbildung 6.4 dargelegten Bodenbewegungen der jeweiligen Region zu entsprechen. Während der Permanent Scatterer im Kölner Stadtgebiet stabil bleibt, konnte für den Permanent Scatterer in der Nähe des Tagebaus Hambach wie erwartet eine Senkung registriert werden. Für diejenigen Nivellementpunkte, die von allen verwendeten SAR-Szenen geometrisch abgedeckt werden und die mit einem Permanent Scatterer im gleichen Pixel liegen, könnten theoretisch die Differenzen beider Beobachtungsverfahren für identischen Zeitraum gebildet werden. Im Allgemeinen ist ein direkter Punktvergleich mit allen Nivellementpunkt jedoch an dieser Stelle nicht möglich, da die im Rahmen der InSAR- und Nivellementauswertung verwendeten Punkte identisch sein müssten. Nach der Berechnung der vollständig flächenhaften InSAR-Information wäre ein derartiger Vergleich realisierbar. Auch die Verwendung eines Bewegungsmodells für die InSAR-Beobachtungen wäre, wie in Kapitel 5.3 und ODIJK (2005) dargestellt, ein potentieller Ansatz.

7. Zusammenfassung

7.1 Fazit

In dieser Arbeit wurden zur Detektion von großräumigen Deformationen der Erdoberfläche, welche sowohl durch geologisch-tektonische, als auch durch anthropogene Einflussfaktoren entstehen können, mit dem geodätischen Nivellement im Rahmen der klassischen Landesvermessung und den satellitengestützten, radarinterferometrischen Methoden zwei unterschiedliche Beobachtungsverfahren analysiert. Zu diesem Zweck wurden in den Kapiteln 3 und 4 zunächst die Notwendigkeit und Entwicklung der Leitnivellements sowie die Grundlagen der Radarfernerkundung und Interferometrie dargestellt. Während das geodätische Nivellement eine sehr präzise, aber gleichzeitig auch kostenintensive und zeitaufwändige Methode darstellt, kann die Anwendung der SAR-Interferometrie als ein Verfahren mit hoher räumlicher Auflösung und hoher Punktdichte bei vergleichsweise niedrigen Kosten verstanden werden. Da InSAR außerdem eine flächenhafte Erfassung des Gebietes ermöglicht und folglich eine potentiell gute Ergänzung zu den linienhaften Nivellementzügen darstellt, wurden in den vergangenen Jahren bereits Untersuchungen zur Kopplung von InSAR- und Nivellement-Beobachtungen durchgeführt. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 5 neben der methodischen Darstellung des InSAR-Prozessierungsablaufs auch eine Untersuchung der Möglichkeiten für eine potentielle Kombination beider Beobachtungsverfahren gegeben. Des Weiteren wurden die bei der Erzeugung der interferometrischen Produkte auftretenden Hauptbeschränkungen der konventionellen (D-)InSAR-Technik, insbesondere geometrische und zeitliche Dekorrelation sowie atmosphärische Laufzeitverzögerung, erläutert. Zur Reduktion dieser Anteile wurden die Permanent Scatterer Interferometry sowie mögliche Adaptierungen und Modifikationen dieser ursprünglichen Technik vorgestellt und analysiert.

Neben der theoretischen Darstellung wurden in Kapitel 6 die aus InSAR- und Nivellementbeobachtungen extrahierbaren Informationen anhand eines vorgegebenen Untersuchungsgebiets in der Niederrheinischen Bucht untersucht. Dazu wurden sowohl die konventionellen (D-)InSAR-Verfahren zur Generierung eines digitalen Geländemodells sowie eines Bewegungsfeldes, als auch die Permanent Scatterer Methode herangezogen. Während die interferometrische Phase bei der (D-)InSAR-Prozessierung neben dem gesuchten Bewegungsanteil zusätzliche Phasenanteile, verursacht durch Fehler in den verwendeten Geländemodellen, Orbitfehler sowie durch Atmosphäreneinflüsse und Signalrauschen, enthält und derartige Ergebnisse für einen Vergleich mit Nivellementdaten ungeeignet sind, konnte das Potential der Permanent Scatterer Interferometry, insbesondere einer auf differentiellen Interferogrammen mit kurzer Basislinie basierenden Adaptierung, bereits demonstriert werden. Sowohl die Deformation einzelner Permanent Scatterer, als auch die Zeitreihen einzelner dieser Punkte konnte bereits dargelegt werden. Während beispielsweise ein ausgewählter Permanent Scatterer im Kölner Stadtgebiet stabil geblieben ist, konnte bei einem weiteren Permanent Scatterer in der Nähe des Tagebaus Hambach wie erwartet eine Senkung registriert werden. Eine weiterführende Analyse der Kombination von InSAR- und Nivellementbeobachtungen konnte bislang aufgrund einer noch fehlenden Filterung des Phasenanteils der Atmosphäre, sowie der sehr geringen Messanord-

nung von 9 Interferogrammen nicht erfolgen und soll Gegenstand weiterführender Untersuchungen und Anwendungen sein.

7.2 Ausblick

Ausgehend von der in Kapitel 6 dargestellten Nivellement- und InSAR-Datenprozessierung sowie einer potentiellen Kombination beider Beobachtungsverfahren ergeben sich eine Reihe von Möglichkeiten für weiterführende Analysen und Modifikationen. Diese umfassen zunächst die vollständige Generierung des Bildstapels auf der Basis aller zur Verfügung stehenden differentiellen Interferogramme mit kurzer Basislinie. Dies führt zu einer Erhöhung der Anzahl von InSAR-Epochen und gleichzeitig zu einer Verbesserung der räumlichen Abdeckung. Beides führt wiederum zu einer Genauigkeitssteigerung im Rahmen der Filterung des Phasenanteils der Atmosphäre, welche bislang noch nicht separiert werden konnte. Auch die derzeitige räumliche Bodenauflösung mit einer Pixelausdehnung von $80 \times 80m$ sollte verbessert werden.

Alternativ könnte auch der in Kapitel 5.3 beschriebene Ansatz zur integrierten Modellierung von (D-)InSAR- und Nivellement-Daten für eine Anwendung der Permanent Scatterer Interferometry analysiert werden.

Basierend auf diesen weiterführenden Analysen sollte anhand der ausgeglichenen Nivellementbeobachtungen eine erneute Verifikation der (D-)InSAR Ergebnisse erfolgen. Diese sollte zudem die Analyse der Bewegungsprofile einzelner Nivellementpunkte und Permanent Scatterer umfassen.

8. Danksagung

Zunächst möchte ich mich sehr herzlich für die Unterstützung von Prof. Dr. techn. Wolf-Dieter Schuh und die Möglichkeit bedanken, diese Arbeit an der Professur für Theoretische Geodäsie am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn anzufertigen.

Ich danke allen Mitarbeitern dieser Abteilung, die mir bei der Fertigstellung meiner Arbeit geholfen haben. Mein besonderer Dank geht an Dipl.-Ing. Lutz Roese-Koerner für seine Hilfsbereitschaft und die freundliche und engagierte Betreuung.

Insbesondere möchte ich mich bei DI Dr. Karlheinz Gutjahr für eine gute Betreuung und fachliche Unterstützung bei der Datenprozessierung auf der Basis der in dieser Arbeit verwendeten RSG-Software und die freundliche Aufnahme am Institut für Informations- und Kommunikationstechnologien der Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH im Rahmen mehrmaliger Aufenthalte in Graz ganz herzlich bedanken.

Ein herzlicher Dank gebührt der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 (GEOBasis NRW), namentlich Dr.-Ing. Jens Riecken, Dr.-Ing. Bernd Krickel und Frau Karin Landsberg, für die Bereitstellung der Datensätze im Rahmen des Leitnivelements „Rheinbraun“ der Jahre 1993, 1997 und 2001, sowie eines Orthophotos in der Gebietsausdehnung der Niederrheinischen Bucht.

Des Weiteren danke ich der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) für die Bereitstellung der in dieser Arbeit verwendeten ERS-1 und -2-Aufnahmen im Single-look-complex-Format.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei M.Sc. Jan Stefanski für Bearbeitung meiner Orthophotos und bei B.Sc. Malwin Eichborn für die Bereitstellung von Shape-Files für die visuelle Darstellung in Matlab bedanken.

Weiterhin möchte ich meiner Familie, meinen Freunden und meiner Freundin Miriam für die Geduld und Unterstützung während der Anfertigung meiner Masterarbeit herzlich danken.

A. Bezeichnungen

Allgemeines

$\tilde{\mathbf{x}}$	Optimaler Schätzwert für die Parameter \mathbf{x}
q^*	Konjugiert komplexe Zahl
\mathbf{A}^{-1}	Inverse der Matrix \mathbf{A}
$\text{Re}(u)$	Realteil von u
$\text{Im}(u)$	Imaginärteil von u

Zufallszahlen

\mathcal{A}	Zufallsvektoren
$E\{\mathcal{A}\}$,	Erwartungswert eines Zufallsvektors
$\Sigma\{\mathcal{A}\}$	Kovarianzmatrix eines Zufallsvektors

Operatoren

$\mathcal{W}\{.\}$	Wrapping-Operator
$\mathcal{D}\{.\}$	Differenz-Operator

Matrizen und Vektoren

x, α	Skalar
\mathbf{a}	Vektor
\mathbf{A}	Matrix

Liste der verwendeten Variablen

r_i	Rückblick von Standpunkt i
v_i	Vorblick von Standpunkt i
Δh_i	Beobachteter Höhenunterschied aus Nivellementmessung
H_A	Höhenmäßig bekannter Anfangspunkt
H_E	Höhenmäßig bekannter Endpunkt
w	Höhenabschlusswiderspruch
σ_{niv}	Herstellerangabe zur Genauigkeitsklassifikation von Nivellements
λ	Wellenlänge
f	Pulse repetition frequency (PRF)
τ	Dauer eines Mikrowellenimpulses
c	Lichtgeschwindigkeit
Θ	Öffnungswinkel

v	Geschwindigkeit
t_i	Laufzeiten
B	Bandbreite
$\delta_{sr}^{RAR/SAR}$	Auflösevermögen eines Radar-Systems in Schrägentfernung (slant-range)
$\delta_{gr}^{RAR/SAR}$	Auflösevermögen eines Radar-Systems in Bodengeometrie (ground-range)
δ_a^{RAR}	Auflösevermögen eines RAR-Systems in Azimutrichtung
δ_a^{SAR}	Auflösevermögen eines SAR-Systems in Azimutrichtung
R	Entfernung zum beleuchteten Objekt
H	Flughöhe über der Erdoberfläche
D	Antennenlänge
L	Synthetische Apertur
α	Hangneigung
Φ_{local}	Lokaler Beleuchtungswinkel
P_r	Empfangene Leistung
P_t	Gesendete Leistung
A_{eff}	Effektive Antennenlänge
r	Range-Entfernung
σ	Rückstreukoeffizient
pp	Polarisation (HH oder VV)
ϵ_D	Dielektrizitätskonstante
σ_{area}	Flächenstreuer
dF	Einheitsfläche
δ_{gr}	Pixelabmessung in Range-Richtung
δ_a	Pixelabmessung in Azimuth-Richtung
σ_h	Höhenvariation auf der Erdoberfläche
u	Gesamtergebnis des Rückstreuprozesses
i	Imaginäre Einheit
A	Amplitude
Φ	Phase
S_i	SAR-Sensorpositionen
r_1, r_2	Distanzen zwischen Sensor und Objekt
P, P'	Beliebige Punkte
$\delta\Phi$	Phasendifferenz
Φ_0	Zufällige Anteile der Phase
γ	Kohärenz
$ \gamma $	Betrag der Kohärenz
$(1 - \gamma)$	Dekorrelation
γ_{ges}	Gesamter Kohärenzfaktor
γ_{SNR}	Kohärenzanteil aufgrund von thermischem Rauschen
γ_{atmo}	Kohärenzanteil aufgrund von atmosphärischen Einflüssen
γ_{proc}	Kohärenzanteil aufgrund von Fehlern in Datenaquisition, -prozessierung und -weiterverarbeitung

γ_{szene}	Kohärenzanteil der Szenendekorrelation
$\gamma_{baseline}$	Kohärenzanteil aufgrund der effektiven Basislinie
u_i	(Gesamt-) Signal der SAR-Aufnahme i
u_j^*	Komplex konjugiertes (Gesamt-) Signal der SAR-Aufnahme j
I	Interferogramm
$\bar{\Phi}$	Interferometrische Phase
$\bar{\Phi}_{defo}$	Phasenanteil der Deformation
$\bar{\Phi}_{topo}$	Phasenanteil der Topographie
$\bar{\Phi}_{noise}$	Phasenanteil des Signalrauschens
$\bar{\Phi}_{flatearth}$	Phasenanteil der flachen Erde
$\bar{\Phi}_{unw}$	Absolute interferometrische Phase (unwrapped interferometric phase)
k	Unbekannte Vielfache von 2π
$\Delta\bar{\Phi}$	Phasensprung
$\nabla\bar{\Phi}$	Phasengradient
q	Ladung (Polarität)
ψ	Basislinienwinkel
h	Geländehöhe
t_s	Null-Doppler-Azimut-Zeit
τ_s	Range-Zeit
$\bar{\Phi}_{topo}^{sim}$	Simulierter Phasenanteil der Topographie
$\epsilon_{\bar{\Phi}_{topo}}$	Restfehler bei D-InSAR-Methode
σ_{Φ}	Standardabweichung der Phase
D_a	Amplituden-Dispersionsindex
σ_a	Standardabweichung der Amplitude
ν_a	Mittelwert der Amplitude
SCR	Signal-to-Clutter-Ratio
$\bar{\Phi}_{scatt}$	Phasenanteil aufgrund von Änderungen der Rückstreuecharakteristik
$\bar{\Phi}_{orbit}$	Phasenanteil aufgrund von Orbitabweichungen (inkl. Anteil der flachen Erde)
B_{eff}	Effektive Basislinie
B_{temp}	Zeitliche Basislinie
β_x	Höhe-zu-Phase-Umrechnungsfaktor an einem Punkt x
Δh_x	die Punkthöhe relativ zu einer Referenzoberfläche (engl.: DEM-error)
$\nu(x)$	Bewegungs- oder Geschwindigkeitsrate an einem Punkt x
$\gamma_{x,y}$	Gemeinsame Phasenkohärenz (engl.: ensemble coherence)
$e_{x,y}$	Differenz zwischen modellierter und beobachteter Phase zwischen zwei benachbarten Punkten x und y in einem Interferogramm
l	Beobachtungsvektor
A	Designmatrix
B	Designmatrix
v	Verbesserungsvektor
a	Unbekannte Phasenmehrdeutigkeit (Integer)
b	Unbekannte realwertige interessierende Parameter

$\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}$	Float-Lösung
$\check{\mathbf{a}}, \check{\mathbf{b}}$	Fixed-Lösung
\mathbf{Z}	Transformation zur Reparametrisierung
z	Transformierte unbekannte Phasenmehrdeutigkeit (Integer)
\hat{z}	Transformierte Fixed-Lösung
χ^2	Positive Konstante
ν_v	Vertikale Deformationsrate
$\Delta \mathbf{l}$	Verkürzter Beobachtungsvektor
$\Delta \mathbf{x}$	Verkürzter Parametervektor
$\Sigma\{\mathcal{L}\}$	Kovarianzmatrix der Beobachtungen
\mathbf{P}	Gewichtsmatrix
\mathbf{x}_0	Näherungswerte für die Parameter
\mathbf{N}	Normalgleichungsmatrix
\mathbf{n}	Normalgliedvektor
$\widehat{\Delta \mathbf{x}}$	Geschätzte Parameterzuschläge (erste Stufe)
$\hat{\mathbf{x}}$	Geschätzter Parametervektor (erste Stufe)
s_1^2	Varianzfaktor (erste Stufe)
n	Anzahl der Beobachtungen
m	Anzahl der Parameter
b	Anzahl der Datumsrestriktionen
\mathbf{C}	Matrix zur Festlegung der Restriktionsgleichungen
\mathbf{c}	Vektor zur Festlegung der Restriktionsgleichungen
\mathbf{r}	Parameterzuschläge (zweite Stufe)
$\Sigma\{\hat{\mathbf{x}}\}$	Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Parameter
$\widehat{\Delta \mathbf{x}}$	Geschätzte Parameterzuschläge (zweite Stufe)
p	Anzahl der Restriktionsgleichungen
H_0	Nullhypothese
H_A	Alternativhypothese
\mathcal{T}	Testgröße (Zufallsvariable)
t	Testgröße (Realisierung)
\mathcal{S}_i^2	Varianzfaktoren der i -ten Stufe (Zufallsvariable)
\mathcal{F}	Fischer-Verteilung
α	Irrtumswahrscheinlichkeit
$(1 - \alpha)$	Signifikanzniveau
$k_{1-\alpha}^{\mathcal{F}_{p,n-m+b}}$	Quantil zur Fischerverteilung
d	Punktzahl pro Punktgruppe
$H_{i,t}$	Geländehöhe eines Punkte i der Epoche t
$u_{i,t-t_0}$	Punktbeziehung von erwarteten Ereignissen
$\xi_{i,t}$	sonstige Punktbeziehungen
$z_{i,t-t_0}$	Modell zur Approximation der Bewegung
$\zeta_{i,t-t_0}$	Modellrauschen
S	Senkungsmulde

v_S	Konstante Senkungsgeschwindigkeit
$t_{0,S}$	Ausgangszeitpunkt der Bewegung in der Senkungsmulde
$r_{i,S}^2$	Standardisierter Radius
$x_{z,S}, y_{z,S}$	Zentrumskoordinaten der Senkungsmulde
x_i, y_i	Horizontalen Koordinaten von Punkt i
r_S	Kreisradius
$\delta h_{ij,t}$	Höhendifferenz zwischen zwei Punkten i und j
$H_{i,t}$ bzw. $H_{j,t}$	Punkthöhen von i bzw. j
$\epsilon_{ij,t}$	Zufälligen Messabweichungen
$e_{ij,t}$	Zusammengefasster zufälliger Fehlerterm (Niv.)
$\delta \eta_{i,t_k t_l}$	Höhenunterschied für Punkt i zwischen Epochen t_k und t_l
h_{i,t_k}^Υ bzw. h_{i,t_l}^Υ	Höhen von Punkt i in Messepoche t_k und t_l
$\epsilon_{i,t_k t_l}$	Zusammengefasster zufälliger Fehlerterm (InSAR)
Υ	Referenzpunkt
$H_{i,t}$	Orthometrische Höhe
$h_{i,t}$	Ellipsoidische Höhe
$N_{i,t}$	Geoidhöhe
$\bar{\mathbf{A}}$	Teilmatrix mit Linearisierungen
\mathbf{U} bzw. \mathbf{V}	Differenzierungsoperatoren
q^t	Vektor zur Betrachtung von gemeinsamen Kovarianzen

B. Abkürzungen

AMI	Active-Microwave-Instrument
APS	Atmospheric Phase Screen
D-InSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (Differential SAR-Interferometry)
DEM	Digital Elevation Model
DEOS	Delft Institute for Earth-Oriented Space research
ESA	European Space Agency
FFT	Fast-Fourier-Transformation
GK	Gauß-Krüger-Koordinatensystem
GMM	Gauß-Markov-Modell
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ILS	Integer-Least-Squares
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR-Interferometry)
LAMBDA	Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
LINEG	Linksniederrheinische Entwässerungsgenossenschaft
LOBA	Landesoberbergamt
LOS	Line-of-Sight (Blickrichtung des Sensors)
LRR	Laser Retro Reflector
LVermA	Landesvermessungsamt
MCF	Minimal Cost Flow-Verfahren
OMT	Overall-Model-Test
PRARE	Precise Range and Range Rate Equipment
PRF	Pulse Repitition Frequency
PS	Permanent Scatterer
PSC	Permanent Scatterer Candidates
PSI	Permanent Scatterer Interferometry
RADAR	Radio Detection and Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RSG	Remote Sensing Package Graz
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCR	Signal-to-Clutter-Ratio
SLC	Single-look-complex-Format
SLR	Satellite Laser Ranging
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
STUN	Spatial Temporal Unwrapping Network-Algorithmus
UTM	Universal-Transverse-Mercator-System

C. Remote Sensing Package Graz (RSG)

C.1 Anwendung der RSG-Software

Im Folgenden soll ein Ablaufschema inklusive der zur Implementierung notwendigen Methoden für die (D-)InSAR-Prozessierung unter Verwendung des Softwarepakets Remote Sensing Package Graz (RSG) des Institutes für Informations- und Kommunikationstechnologien (DIGITAL) der Forschungsgesellschaft mbH Joanneum Research in Graz, Österreich, Version 7.11 (Built 2012.04.18) dargelegt werden. Die hier angegebenen Parameter beziehen sich auf die in dieser Arbeit durchgeführte Prozessierung auf der Basis von Daten der ERS-Satelliten (ERS-1 und ERS-2). Diese sind bei der Verwendung anderer Datengrundlagen entsprechend anzupassen.

Die RSG-Software wurde auf dem Numerikserver *Jerry* der Professur für Theoretische Geodäsie am Institut für Geodäsie und Geoinformation installiert und kann mit dem Befehl

- `/opt/joanneum_research/rsg/exe/RSGMENU`

gestartet werden. Für die Anwendung des IMPACT Image Viewers, Version 1.10.5 (Built 2012.04.16) sind hier folgende Umgebungsvariablen (Spracheinstellungen für lokalen Benutzer) zu setzen:

- `export LANG = en_US,`
- `export XLIB_SKIP_ARGB_VALUES = 1.`

Der IMPACT Image Viewers kann über **Viewer** gestartet werden. Jedes Interferogramm wird nach dem Öffnen mit unterschiedlichen Kanälen angegeben, wobei Kanal 1 die Amplitude und Kanal 2 die Phase beinhaltet.

C.1.1 InSAR-Phase-Processing

C.1.1.1 Data Preparation

Image model	Name für jeweiliges „image model“ festlegen, i.d.R. Sensortyp + Aufnahmedatum (z.B. <i>ERS1_19960610</i>)
Read SLC-Image (SATREAD)	Einlesen der Bilddaten <i>Input:</i> Quelldatei für den Datenimport der Originaldaten (.slf- oder .lea-Datei) <i>Output:</i> Sensormodell (Parameter (.PAR)- und Orbit (.ORB)-File) und ImageRaster (.rsx-Datei), z.B. <i>ERS1_19960610.rsx</i>

SAR Utilities and Tools:

Calculate Precise Orbit (GETORB)	<i>Input:</i> Sensormodell (.PAR-Datei) Name of ODR-directory, <i>Output:</i> neues Orbitfile (.ORB-Datei, z.B. <i>ERS1_19960610_odr.ORB</i>)
Multilook SLC-Image (MULTILOOK)	Anwendung eines Multilook-Verfahrens mit $n \times m$ look, <i>Option:</i> Number of looks in azimuth/range: 5×1 (ERS) <i>Input:</i> ImageRaster-Datei <i>Output:</i> multilooked ImageRaster-Datei, z.B. <i>ERS1_19960610_5look.rsx</i>
Baseline Estimation (BASELINE)	Schätzung der Basislinie <i>Input:</i> Sensormodell (.PAR-Datei) für Master- und Slave-Szene <i>Output:</i> Ausgabedatei mit Basislinien-Information (ascii-Format)
InSAR Model Management (INSAR)	Auswahl von Overall-Master-Szene (z.B. <i>ERS2_19960611</i>) und Slave-Szene (z.B. <i>ERS1_19960610</i>) <i>Input:</i> Sensormodell (.PAR-Datei) für Master- und Slave-Szene <i>Output:</i> INSAR-Model-File (.IMD-Datei), z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610.IMD</i>

C.1.1.2 Image Registration

INSAR model	Name folgt aus InSAR Model Management (.IMD-Datei)
Complex Correlation (CCOR)	Komplexe Korrelation zur Ko-Registrierung <i>Input:</i> INSAR-Model-File und ImageRaster-Datei für Master- und Slave- Szene <i>Output:</i> Tie-Point-File (.PNT-Datei), enthält Ergebnisse aus Punkt-Matching, z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610.PNT</i> <i>Option:</i> Correlation criterium: coherence; Correlation Point Intervall: 100,100; Mean hight [m] Reference Window: 51,51; Search Window: 15, 15
Setup Polynomial (TPA)	Tie Point Block Adjustement <i>Input:</i> Tie-Point-File (.PNT-Datei), <i>Output:</i> editiertes Tie-Point-File
Plot Residuals of TPs (PLOT)	Visuelle Darstellung der Residuen der Tie-Points
Subset of Master	Optionale Extraktion eines Teilbereiches eines

(SUBSET)	Bildes oder Rasters
Image Registration (POLR)	<p>Ko-Registrierung: Resampling der Slave-Szenen auf die Master-Szene</p> <p><i>Input:</i> Tie-Point-File (.PNT-Datei) und ImageRaster-Dateien (.rsx) für Master- und zu resampelnde Slave-Szene</p> <p><i>Option:</i> resampling: 6-point-cubic</p> <p><i>Output:</i> ImageRaster-Datei (.rsx) nach Resampling-Vorgang, z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610.rsx</i></p>

C.1.1.3 INSAR Processing

Flat Terrain Phase (TERF)	<p>Berechnung des Phasenanteils der flachen Erde (wahlweise über einen geometrischer Ansatz oder FFT)</p> <p><i>Input:</i> INSAR-Model-File (.IMD-Datei), ImageRaster-Dateien (.rsx) für Master- und zu resampelnde Slave-Szene</p> <p><i>Output:</i> editiertes INSAR-Model-File (mit Parametern des Phase der flachen Erde)</p>
INSAR Products (INSPROD)	<p>Erstellung der interferometrischen Produkte</p> <p><i>Input:</i> INSAR-Model-File (.IMD-Datei), ImageRaster-Dateien (.rsx) für Master- und ko-registrierte Slave-Szene</p> <p><i>Output:</i> Original complex interferogram (z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx.rsx</i>)</p> <p>Flattened complex interferogram (z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx.rsx</i>),</p> <p>Coefficient of variation (texture) of amplitude of interferogram (z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610_cov.rsx</i>) und</p> <p>Coherence of interferogram (z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610_coh.rsx</i>)</p> <p><i>Option:</i> coherence size in azimuth/range: 20-4; number of looks in azimuth/range: 5-1</p>
Interferogram filtering (CLXFLT)	<p>Filterprozess zur Rauschunterdrückung vor der Phasenabwicklung</p> <p>(wahlweise: Spectral filter - Goldstein and Werner, Spectral filter - Barin et al., Spectral filter - Li et al. oder Directional Gauss filter)</p>

Input: zu filterndes Interferogramm und Kohärenzbild (.rsx-Dateiformat)
Output: Gefiltertes Interferogramm (.rsx-Dateiformat), z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx_sm.rsx*
Option: Filter-Window-Size: 16×16 ;
 Step Size: 1; Scaling-Factor: 0.90

Phase Unwrapping
(UNWRAP)

Phasenabwicklung (wahlweise:
 Branch Cut and Branch Cut - Goldstein,
 Weighted least squares, Minimum Cost Network Flow oder
Statistical Cost Network Flow)
Input: zu Interferogramm und Kohärenzbild (.rsx-Dateiformat)
Output: Interferogramm nach Phase-Unwrapping (.rsx-Dateiformat), z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx_sm_unw.rsx*
Option: Statistical Cost Mode:
 Topography (für D-INSAR: Deformation)

C.1.2 InSAR DEM Generation

C.1.2.1 INSAR Modelling

INSAR Model

Auswahl eines INSAR-Model-File (.IMD-Datei), z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610.IMD*

Ground-Control-Point
(GCP) File

GCP-File festlegen (.PNT-Datei), z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_GCP.PNT*

Control Point Measurement
(PNTM)

Input: Point-File (.PNT-Datei), z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_GCP.PNT*,
 Input coordinates file (.cl-Datei), z.B. *ERS1_19960610.cl*
 Reference coordinates file (.enh-Datei), z.B. *reference.enh*
 Input raster file (beliebiges Interferogramm), z.B. *ERS2_19960610_5look.rsx*
 Reference raster file (Orthophoto, hier: *dop_mosaic_5m_utm32.rsx*)
 Image-Model-File (.IMD-Datei), z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610.IMD*
 Phase raster (INSAR): absolute Phase, z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx_sm_unw.rsx*
 Use DEM raster file: externes DEM oder aufbereitetes SRTM, z.B. *srtm_v4_utm32_20m.rsx*

Start Point Measurement: Passpunkte aus DEM/Orthophoto und Interferogramm auswählen

Output: editiertes Input raster file und reference raster file (mit Passpunkten)

Parameter Adjustment
(GPA)

Select adjustment parameters: gewünschte Parameter auswählen (hier ohne Orbit-Parameter)

Define adjustment options:

Optionen „remove point“ und „return point“ auswählen

Run adjustment: Starte Ausgleichung

Show 2D residuals: Betrachtung der 2D Residuen (hier: max. Abweichung von 5 Pixeln zulässig, ggf.)

Start Point Measurement wiederholen bzw. verbessern)

C.1.2.2 Raster-based DEM Generation

Calculate Ground Coordinates
(PH2H)

Berechnung absoluter Höhenkoordinaten aus der absoluten Phase

Input: Phase-raster (.rsx-Dateiformat), z.B.

ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx_sm_unw.rsx

Output: ImageRaster-Datei mit absoluten

Höheninformation (.rsx-Datei), z.B.

ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx_sm_unw_enh.rsx

Options: Output map projection,

z.B. *UTM_Zone32_North*

DEM-tools:

DEM-Raster-Interpolation
(RAIN)

Input: ImageRaster-Datei mit

absoluten Höheninformation (.rsx-Datei), z.B.

ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx_sm_unw_enh.rsx

(3 Channel)

Output: tatsächliches

Höhenmodell (.rsx-Datei), z.B.

ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx_sm_unw_dem.rsx

C.1.3 Differential Interferometry

C.1.3.1 DEM based Methods

Simulate Interferogram
(SIMP)

Simuliere Interferogramm

Input: INSAR-Model-File (.IMD-Datei),

z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610.IMD*

Reference raster: ImageRaster (.rsx-Datei),

z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx.rsx*

Reference-DEM: ImageRaster (.rsx-Datei),

z.B. *srtm_v4_utm32_20m.rsx*

Output: ImageRaster (.rsx) der folgenden Auswahl:

Absolute simulated phase

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx_aph.rsx*),

Unwrapped simulated phase

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx_uph.rsx*),

Wrapped simulated phase

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx_wph.rsx*),

Look angle and slope angle

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx_ang.rsx*),

Height information

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx_hgt.rsx*),

Flat terrain phase

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx_fph.rsx*)

Wrapped and Simulated
(CLXSIM)

Berechnung eines differentiellen Interferogramms

Input: ImageRaster (.rsx) des komplexen
(wahren) Interferogramms

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx.rsx*) und des
simulierten Interferogramms

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx_aph.rsx*)

Output: ImageRaster (.rsx) des
differentiellen Interferogramms

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph.rsx*)

Interferogram filtering
(CLXFLT)

Filterprozess zur Rauschunterdrückung vor
der Phasenabwicklung

(wahlweise: **Spectral filter - Goldstein and Werner**,
Spectral filter - Barin et al., Spectral filter - Li et al.
oder Directional Gauss filter)

Input: zu filterndes Interferogramm

(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph.rsx*) und
Kohärenzbild (.rsx-Dateiformat)

Output: Gefiltertes Interferogramm (.rsx-Dateiformat),

z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph_sm.rsx*

Option: Filter-Window-Size: 16×16 ;

Step Size: 1; Scaling-Factor: 0.90

Phase Unwrapping
(UNWRAP)

Phasenabwicklung (wahlweise:
Branch Cut and Branch Cut - Goldstein,
Weighted least squares, Minimum Cost Network Flow oder
Statistical Cost Network Flow)

Input: zu Interferogramm und
Kohärenzbild (.rsx-Dateiformat),
z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph_sm.rsx*

Output: Interferogramm nach
Phase-Unwrapping (.rsx-Dateiformat),
z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph_sm_unw.rsx*

Option: Statistical Cost Mode:
Deformation

C.1.3.2 Convert D-InSAR-Phase in cm/d

Calculate Ground Coordinates
(DISMAP)

Konvertierung der (unwrapped) D-InSAR-Phase
in eine metrische Einheit (cm)

Input: INSAR-Model-File (.IMD),
z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610.IMD*

ImageRaster (.rsx) des differentiellen Interferogramms,
(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph_sm_unw.rsx*),
ImageRaster (.rsx) der Winkel (Look angle and slope angle)
(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocr_ang.rsx*)

Output: ImageRaster (.rsx) mit Bewegungsinformation

Options: Decompose: horizontal/vertical
Offset (aus differentiellen Interferogramm wählen)

Rectification and Mosaicing Tools:

DEM based Geocoding
(GEO)

Input: ImageRaster (.rsx) des
differentiellen Interferogramms, z.B.
ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph_sm_unw.rsx,
Reference-DEM: ImageRaster (.rsx-Datei),
z.B. *srtm_v4_utm32_20m.rsx*

Options: Output map projection, z.B. *UTM_Zone32_North*,
Resampling method: cubic

Output: Geokodiertes differentielles
Interferogramm, z.B.
ERS2_19960611_ERS1_19960610_dph_sm_unw_ort.rsx

C.1.4 Permanent Scatterer

C.1.4.1 Importieren

Image model Name für jeweiliges „image model“ festlegen,
i.d.R. Sensortyp + Aufnahmedatum (z.B. *ERS1_19960610*)

Read SLC-Image Einlesen der Bilddaten
(SATREAD)
Input: Quelldatei für den Datenimport der Originaldaten
(.slf- oder .lea-Datei)
Output: Sensormodell
(Parameter (.PAR)- und Orbit (.ORB)-File)
und ImageRaster (.rsx-Datei), z.B. *ERS1_19960610.rsx*

SAR Utilities and Tools:

Calculate Precise Orbit *Input:* Sensormodell
(GETORB) (.PAR-Datei) Name of ODR-directory,
Output: neues Orbitfile
(.ORB-Datei, z.B. *ERS1_19960610_odr.ORB*)

C.1.4.2 Suche nach Overall-Master-Szene

Suche nach Overall-Master-Szene Räumliche Basislinie für alle Kombinationen berechnen:
Baseline Estimation (BASELINE)
Input: Sensormodell (.PAR-Datei) für Master- und Slave-Szene
Output: Ausgabedatei mit Basislinien-Information (ascii-Format)
Zeitliche Basislinie für alle Kombinationen
berechnen (Aufnahmezeitpunkt)
Doppler-Basislinie: aus mitgeliefertem
EPS-file der Originaldaten

C.1.4.3 Klassisches InSAR (für Overall-Master)

InSAR Model Management Auswahl von Overall-Master-Szene (z.B. *ERS2_19960611*)
(INSAR) und Slave-Szene (z.B. *ERS1_19960610*)
Input: Sensormodell (.PAR-Datei)
für Master- und Slave-Szene
Output: INSAR-Model-File (.IMD-Datei),
z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610.IMD*

Complex Correlation (CCOR)	Komplexe Korrelation zur Ko-Registrierung <i>Input:</i> INSAR-Model-File und ImageRaster-Datei für Master- und Slave- Szene <i>Output:</i> Tie-Point-File (.PNT-Datei), enthält Ergebnisse aus Punkt-Matching, z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610.PNT</i> <i>Option:</i> Correlation criterium: coherence; Correlation Point Intervall: 100,100; Mean hight [m] Reference Window: 51,51; Search Window: 15, 15
Setup Polynominal (TPA)	Tie Point Block Adjustement <i>Input:</i> Tie-Point-File (.PNT-Datei), <i>Output:</i> editiertes Tie-Point-File
Plot Residuals of TPs (PLOT)	Visuelle Darstellung der Residuen der Tie-Points
Image Registration (POLR)	Ko-Registrierung: Resampling der Slave-Szenen auf die Master-Szene <i>Input:</i> Tie-Point-File (.PNT-Datei) und ImageRaster-Dateien (.rsx) für Master- und zu resampelnde Slave-Szene <i>Option:</i> resampling: 6-point-cubic <i>Output:</i> ImageRaster-Datei (.rsx) nach Resampling-Vorgang, z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610.rsx</i>
Flat Terrain Phase (TERF)	Berechnung des Phasenanteils der flachen Erde (wahlweise über einen geometrischer Ansatz oder FFT) <i>Input:</i> INSAR-Model-File (.IMD-Datei), ImageRaster-Dateien (.rsx) für Master- und zu resampelnde Slave-Szene <i>Output:</i> editiertes INSAR-Model-File (mit Parametern des Phasenanteils der flachen Erde)
INSAR Products (INSPROD)	Erstellung der interferometrischen Produkte <i>Input:</i> INSAR-Model-File (.IMD-Datei), ImageRaster-Dateien (.rsx) für Master- und ko-registrierte Slave-Szene <i>Output:</i> Original complex interferogram (z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610_ocx.rsx</i>) Flattened complex interferogram (z.B. <i>ERS2_19960611_ERS1_19960610_fcx.rsx</i>),

Coefficient of variation (texture) of amplitude of interferogram
(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_cov.rsx*) und
Coherence of interferogram
(z.B. *ERS2_19960611_ERS1_19960610_coh.rsx*)
Option: coherence size in azimuth/range: 20-4;
number of looks in azimuth/range: 5-1

C.1.4.4 Permanent-Scatterer-Detektion

Radiometric Correction (RADCOR)	Radiometrische Korrektur der SAR-Amplitudenbilder (für Overall-Master und alle ko-registrierten Slave-Szenen) <i>Input</i> : Image-Model-File (.PAR-Datei), Radiometrisch zu korrigierendes ImageRaster (.rsx) (Auswahl, auch mehrere möglich: Beta Nought-Korrektur , Sigma Nought-Korrektur, Gamma-Nought-Korrektur) <i>Output</i> : Je nach Auswahl bis zu drei ImageRaster (.rsx) <i>Option</i> : save as dB
Multilook SLC-Image (MULTILOOK)	Anwendung eines Multilook-Verfahrens mit $n \times m$ look, <i>Option</i> : Number of looks in azimuth/range: 5×1 (ERS-1 und -2) <i>Input</i> : Radiometrisch korrigiertes ImageRaster (.rsx) <i>Output</i> : multilooked ImageRaster-Datei
Subset of Master (SUBSET)	Optionale Extraktion eines Teilbereiches eines Bildes oder Rasters
Permanent Scatterer Detection (PSD)	Auswahl der Permanent Scatterer <i>Input</i> : Eingabe-Verzeichnis, <i>Option</i> : Threshold amplitude dispersion index: 0.25, <i>Output</i> : ImageRaster (.rsx)-Datei
Utilities:	
Generate Stack of Raster (STACK)	Berechnung des Bildstapels <i>Input</i> : Eingabe-Verzeichnis, <i>Option</i> : Band: 0 (all), Additional statistical layer: alle auswählen <i>Output</i> : Stack

Die Anwendung der Permanent Scatterer Interferometry wurde in dieser Arbeit auf der Grundlage von BERARDINO et al. (2002) durchgeführt (vgl. Kapitel 6.2), die noch nicht vollständig in der verwendeten RSG-Version implementiert ist. Dadurch können in der Prozessierungsabfolge geringfügige Abweichungen auftreten. Die geometrische Ausgleichung erfolgt wieder über die Methoden PNTM und GTA. Einzelne (teilweise hier noch nicht aufgeführte) Prozessierungsschritte wurden in Matlab implementiert.

Weiterführende Information zu den einzelnen Methode sind unter

- `/opt/joanneum_research/rsg/help/cldhelp/`

zu finden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Tektonische Übersicht der Niederrheinischen Bucht	8
3.1	Grundprinzip des geometrischen Nivellement	13
3.2	Die aktuellen Leitnivellements in Nordrhein-Westfalen	15
4.1	Abbildungsgeometrie von Seitensicht-Radarsystemen	23
4.2	Seitensicht-Radar: footprint und swath	24
4.3	Aufnahmeprinzip für Radar mit realer Apertur (links) und für Radar mit synthetischer Apertur durch die wiederholte Erfassung entlang des Flugweges (rechts)	27
4.10	Kohärenzbild aus dem Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht nach Anwendung eines 5x1-Multilook-Verfahrens.	40
4.11	Interferogramm aus dem Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht nach Anwendung eines 5x1-Multilook-Verfahrens.	43
5.14	Sequentielle Filtertechniken zur Trennung der Signalanteile der residuellen Phase	71
5.15	Ablauf der Gesamtepochenausgleichung unter Verwendung der Punktidentitäten	80
5.16	Algorithmus zur Punktauswahl im Detektionsverfahren	84
6.1	InSAR-basiertes digitales Geländemodell aus einer ERS-Tandemmission	91
6.2	Darstellung der absoluten Höhen entlang der Nivellementlinien für die Epoche 1997	92
6.3	D-InSAR-Bewegungsfeld aus einer ERS-Tandemmission	93
6.4	Darstellung der Höhendifferenzen der Leitnivellement-Epochen 1997 und 2001	93
6.5	Einflüsse und Auswirkungen auf die interferometrische Phase bei (D-)InSAR-Prozessierung	94
6.6	Verteilung der Permanent Scatterer im gesamten Untersuchungsgebiet	96
6.7	Verteilung der Permanent Scatterer im Umkreis des Hambacher Tagebaus und des Kölner Stadtgebiet	96
6.8	Verteilung der Permanent Scatterer (grün) und Darstellung der Nivellementzüge (rot) im Umkreis des Hambacher Tagebaus (in zentraler Lage) und des Kölner Stadtgebiet (in östlicher Lage)	97

6.9	Verteilung der Permanent Scatterer (grün) und Darstellung der Nivellementzüge (rot) im Umgebungsgebiet von Tagebau Garzweiler	98
6.10	Verteilung der Permanent Scatterer im gesamten Untersuchungsgebiet bei Small Baseline PSI	99
6.11	Verteilung der Permanent Scatterer im Umkreis des Hambacher Tagebaus (in zentraler Lage) und des Kölner Stadtgebiet (in östlicher Lage) bei Small Baseline PSI . . .	99
6.12	Deformationen an den Permanent Scatterern für das gesamte Untersuchungsgebiet .	100
6.13	Deformationen an den Permanent Scatterern für ein Gebiet in der Nähe des Kölner Stadtgebiets	101
6.14	Deformationen an den Permanent Scatterern für ein Gebiet in der Umgebung von Mönchengladbach und Erkelenz	101
6.15	Bewegung eines einzelnen Permanent Scatterer in der Nähe des Kölner Stadtgebietes	102
6.16	Bewegung eines einzelnen Permanent Scatterer in der Nähe von Elsdorf (nordöstlich von Tagebau Hambach)	102

Tabellenverzeichnis

4.1	Orbitparameter der ERS-Satelliten	21
4.2	Systemparameter des ERS-AMI	21
5.1	Vergleich der konventionellen D-InSAR-Methode mit der PS-Interferometrie	78
6.1	Verwendete SAR-Aufnahmen der ERS-Satelliten im SLC-Format	90

Literatur

- ADAM, N., B. KAMPES und M. EINEDER (2004) Development of a Scientific Permanent Scatterer System: Modifications for Mixed ERS/ENVISAT Time Series. *Proceedings of ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria*.
- AHUJA, R. K., T. L. MAGNANTI und J. B. ORLIN (1991) Some Recent Advances in Network Flows. *SIAM Review*, Vol. 31, No. 2:175–219.
- ALBERTZ, J. (2001) *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- AMELUNG, F., S. JONSSON, H. ZEBKER und P. SEGALL (2000) Widespread uplift and trapdoor faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, 407 (6807):993–996.
- BAGLIKOW, V. (2003) Bergschäden nach Beendigung der Grubenwasserhaltung im tiefen Bergbau. *Sonderdruck aus Markscheidewesen*, 110:45–49.
- BAGLIKOW, V. (2011) Schadensrelevante Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs - Erkenntnisse aus dem Erkelenzer Steinkohlenrevier. *Sonderdruck aus Markscheidewesen*, 118:9–16.
- BAMLER, R. und P. HARTL (1998) Synthetic aperture radar interferometry. *In: Inverse Problems* 14, 1–54.
- BAMLER, R., N. ADAM, S. HINZ und M. EINEDER (2008) SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 7:243–252.
- BARBIERI, M., J. LICHTENEGGER und G. CALABRESI (1999) The Izmit Earthquake: A Quick Post-Seismic Analysis with Satellite Observations. *ESA Bulletin*, 100:107–110.
- BERARDINO, P., G. FORNARO, R. LANARI und E. SANSOSTI (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11):2375–2383.
- BERTSEKAS, D. P. und P. TSENG (1988) Relaxations methods for minimum cost ordinary and generalized network flow problems. *Operations Research Society of America*, Vol. 36:93–114.
- BOCK, Y., S. WDOWINSKI, A. FERRETTI, F. NOVALI und A. FUMAGALLI (2012) Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems. Research Letter*, Q03023, doi:10.1029/2011GC003976:1–13.
- BOJE, R., W. GSTIRNER, D. SCHULER und M. SPATA (2008) Leitnivellements in Bodenbewegungsgebieten des Bergbaus - eine langjährige Kernaufgabe der Landesvermessung in Nordrhein-Westfalen. *Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV NRW)*, 3:33–42.

- BRUNIQUEL, J. und A. LOPES (1997) Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No. 3:603–627.
- BÜRGMANN, R., G. HILLEY, A. FERRETTI und F. NOVALI (2006) Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. *Geological Society of America*, Vol. 34, No. 3:221–224.
- CHEN, C.W. (2001) *Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry*. Dissertation, Stanford University, USA.
- COLESANTI, C., A. FERRETTI, C. PRATI und F. ROCCA (2001) Comparing GPS, Optical Leveling and Permanent Scatterers. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 9-13 July 2001*, 2622–2624.
- COLESANTI, C., A. FERRETTI, F. NOVALI, C. PRATI und F. ROCCA (2003) SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41 No. 7:1685–1701.
- CONG, X. Y. (2007) Untersuchung von durch unterirdische Kernexplosionen verursachten Bodenabsenkungen mittels differentieller SAR-Interferometrie. Diplomarbeit, Leibniz Universität Hannover.
- CONSTANTINI, M. (1998) A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, Vol. 36, No. 3:813 – 821.
- CROSETTO, M., O. MONSERRAT, A. JUNGNER und B. CRIPPA (2009) Persistent Scatterer Interferometry: Potential and Limits. *ISPRS Hannover Workshop 2009*.
- DE JONGE, P. und C. TIBERIUS (1996) The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. *LGR-Series. Publications of the Delft Geodetic Computing Centre*, 12:1–59.
- DONG, Y., B. FORSTER und C. TICEHURST (1997) Radar backscatter analysis for urban environments. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No. 6:1351–1364.
- DUPRAZ, H., W. NIEMEIER und H. PELZER (1979) Analyse von Deformationsmessungen durch Klaffungszurlegung. *Schriftreihe Vermessungswesen HSBw München*, 4.
- DVOZVERMKATG NRW (2006) Verordnung zur Durchführung des Gesetzes über die Landesvermessung und das Liegenschaftskataster (DVOzVermKatG NRW), online unter <http://recht.nrw.de/>, letzter Zugriff am 20.06.2012.
- EINER, M. und J. HOLZNER (1999) Phase unwrapping of low coherence differential interferograms. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 28. June - 2 July 1999*, 1–4.
- EINER, M., B. SCHÄTTLER, M. HUBIG, W. KNÖPFLE, N. ADAM und H. BREIT (1999) Operational Processing Large Areas of Interferometric SAR Data. *Second International Workshop on ERS SAR Interferometry, FRINGE'99, Liege, Belgium*, 1–6.

- ESA (2012) ESA - Earthnet Online. *online unter <https://earth.esa.int>, letzter Zugriff am 16.07.2012.*
- FARR, T. G., P. A. ROSEN, E. CARO, R. CRIPPEN, R. DUREN, S. HENSLEY, M. KOBRICK, M. PALLER, E. RODRIGUEZ, L. ROTH, D. SEAL, S. SHAFFER, J. SHIMADA, J. UMLAND, M. WERNER, M. OSKIN, D. BURBANK und D. ALSDORF (2007) The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004:1–33.
- FERRETTI, A., C. PRATI und F. ROCCA (1999) Permanent scatterers in SAR interferometry. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 28. June - 2 July 1999*, 1–3.
- FERRETTI, A., C. PRATI und F. ROCCA (2000A) Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (5):2202–2212.
- FERRETTI, A., C. PRATI und F. ROCCA (2000B) Process for radar measurements of the movements of city areas and landsliding zones. *International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT)*.
- FERRETTI, A., C. PRATI und F. ROCCA (2001) Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1:8–20.
- FRIED, D. L. (1977) Least-Squares Fitting a Wave-Front Distortion Estimate to an Array of Phase-Difference Measurements. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 67:370–375.
- FROGER, J.-L., O. MERLE und P. BRIOLE (2001) Active spreading and regional extension at Mount Etna imaged by SAR interferometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 187:245–258.
- FRÖHLICH, H. und G. MÜLLER (1986) Leitnivellements und regionale Deformationsanalyse in Nordrhein-Westfalen. *Vermessungswesen und Raumordnung (VR)*, 48. Jahrgang, Heft 1+2:1–19.
- FRUNEAU, B. und F. SARTI (2000) Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 24:3981–3984.
- FUKUDA, S. und H. HIROSAWA (1998) Suppression of speckle in synthetic aperture radar images using wavelet. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 3:507–519.
- GABRIEL, A. K. und R. M. GOLDSTEIN (1988) Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, No. 5:857–872.
- GABRIEL, A. K., R. M. GOLDSTEIN und H. A. ZEBKER (1989) Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94:9183–9191.

- GEOBASIS.NRW (2010) Programmpaket HÖHE, Auswertung von Feinnivellements. *Bezirksregierung Köln, online unter www.geobasis.nrw.de (letzter Zugriff am 06.09.2012)*.
- GEOZ (2012) Geo Data Zone. Das Lexikon der Erde, online unter www.geodz.com, letzter Zugriff am 10.08.2012.
- GHIGLIA, D. C. und L. A. ROMERO (1994) Robust Two-Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping that Uses Fast Transforms and Iterative Methods. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. A 11:107–117.
- GLADE, T. und R. DIKAU (2001) Gravitative Massenbewegung - vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 145 (6):42–55.
- GOLDSTEIN, R. M. und C. WERNER (1998) Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 21:4035–4038.
- GOLDSTEIN, R. M., H. ZEBKER und C. WERNER (1988) Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, Vol. 23, No. 4:713–720.
- GOLDSTEIN, R. M., H. ENGELHARDT, B. KAMB und R. M. FROLICH (1992) Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream. *SCIENCE*, 262:1526–1530.
- GOODMAN, J. W. (1976) Some fundamental properties of speckle. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 66, No. 11:1145–1150.
- GÖRRES, B. und J. CAMPBELL (1998) Bestimmung vertikaler Punktbewegungen mit GPS. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, 123 (7):222–230.
- GÖRRES, B., B. SAGER und J. CAMPBELL (2006) Geodätische Bestimmung von Bodenbewegungen im Bereich des Erftsprungsystems. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, 16–24.
- GRAHAM, L. (1974) Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, No. 6:763–768.
- GUTJAHR, K. (2002) *INSAR-Blockausgleich*. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Digitale Bildverarbeitung der Forschungsgesellschaft Joanneum Research.
- HALSIG, S. (2010) Identifikation von identen Punkten in Höhennetzen aus mehreren Epochen. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation (Bachelorarbeit).
- HALSIG, S., A. ERNST und W.-D. SCHUH (2012) Ausgleichung von Höhennetzen aus mehreren Epochen unter Berücksichtigung von Bodenbewegungen (eingereicht).
- HAUPT, P. (1999) 100 Jahre Leitnivellement - Die periodischen Wiederholungsnivellements in den Bergbaugebieten Nordrhein-Westfalens. *Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV NRW)*, 3:184–201.

- HEIN, A. (1998) *Verarbeitung von SAR-Daten unter besonderer Berücksichtigung interferometrischer Anwendungen*. Dissertation, Universität Gesamthochschule Siegen, Institut für Nachrichtenverarbeitung.
- HEIN, A. (2004) *Processing of SAR Data. Fundamentals, Signal Processing, Interferometry*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- HOFMANN-WELLENHOF, B. und H. MORITZ (2005) *Physical Geodesy*. Springer Verlag, Wien.
- HOOPER, A., H. ZEBKER, P. SEGALL und B. KAMPES (2004) A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31:1–5.
- HUDGIN, R. H. (1977) Wave-Front Reconstruction for Compensated Images. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 67:393–399.
- ISAAKS, E. H. und R. M. SRIVASTAVA (1989) *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press.
- KALKUHL, M. (2009) *Modulare Simulation komplexer SAR-Szenarien: Signalgenerierung, Positionsschätzung und Missionsplanung*. Dissertation, Universität Siegen.
- KAMPES, B. und R. HANSEN (2004) Ambiguity Resolution for Permanent Scatterer Interferometry. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 42:2446–2453.
- KAMPES, B. M. (2006) *Radar Interferometry. Persistent Scatter Technique*. Springer, Dordrecht, Niederlande.
- KIRCHER, M. (2004) *Analyse flächenhafter Senkungserscheinungen in sedimentären Gebieten mit den neuen Techniken der Radarfernerkundung - am Beispiel der Niederrheinischen Bucht*. Dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- KLAUSING, H. und W. HOLPP (2000) *Radar mit realer und synthetischer Apertur. Konzeption und Realisierung*. Oldenbourg Verlag.
- KLOSTERMANN, J., J. KREMERS und R. RÖDER (1998) Rezente tektonische Bewegung in der Niederrheinischen Bucht. *Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., Krefeld*, 37:557–571.
- KNABE, S. (2004) *Erfassung der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Bodenfeuchtemustern in semiariden Gebieten mittels ERS-1/2 InSAR Zeitreihen*. Dissertation, Technischen Universität Wien, Fakultät für Mathematik und Geoinformation.
- KOCH, K. R. (1997) *Parameterschätzung und Hypothesentests*. Dümmler, Bonn, 3. Ausgabe.
- KREMERS, J. (1990) Deformationsanalyse der Erdoberfläche beim Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. *Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV NRW)*, 23:9–31.

- KUAN, D. T., A. A. SAWCHUK, T.C. STRAND und P. CHAVEL (1985) Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 7, No. 2:165–177.
- LANARI, R., P. LUNDGREN und E. SANSOSTI (1998) Dynamic deformation of Etna volcano observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 10:1541–1544.
- LANARI, R., O. MORA, M. MANUNTA, J. J. MALLORQUI, P. BERARDINO und E. SANSOSTI (2004) A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 42 (7):1377–1386.
- LEE, J.-S. (1980) Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 2, No. 2:165–168.
- LESCARMONTIER, L., B. LEGRESY, R. COLEMAN, F. PEROSANZ, C. MAYET und L. TESTUT (2012) Vibrations of Mertz Glacier ice tongue, East Antarctica. *Journal of Glaciology*, Vol. 58, No. 210:665–676.
- LI, F. K. und R. M. GOLDSTEIN (1990) Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 1:99–97.
- LI, Z. W., X. L. DING, G. X. LIU, Y. Q. CHEN, Z. L. LI und J. J. ZHU (2002) Study of Atmospheric Effects on Satellite Synthetic Aperture Radar (SAR) Measurements in Tropical Regions. *FIG XXII International Congress Washington, D.C. USA*, 1–9.
- LINDSTROT, W. (1982) Automatisierte Erfassung von Nivellementdaten im Gelände und ihre Auswertung mit dem Programmsystem LINIV. *Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungsdienst des Landes Nordrhein-Westfalen*, 15:223–234.
- LOBA UND LVERMA (1999) Richtlinien für die Ausführung von Leitnivellements im Bezirk des Landesoberbergamts Nordrhein-Westfalen, Stand 2.12.1999, online unter <http://esb.bezregarnsberg.nrw.de/>, letzter Zugriff am 21.06.2012. *Herausgeber: Landesoberbergamt (LOBA) und Landesvermessungsamt (LVerma) NRW*.
- LOPES, A., E. NEZRY, R. TOUZI und H. LAUR (1993) Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 9:1735–1758.
- MASSONNET, D., M. ROSSI, C. CARMONA, D. C. FREDERIC ADRAGNA, G. PELTZER, K. FEIGL und T. RABAUTE (1993) The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364:138–142.
- MEYER, F. J. (2004) *Simultane Schätzung von Topographie und Dynamik polarer Gletscher aus multi-temporalen SAR Interferogrammen*. Dissertation, Technische Universität München.
- MOLL, A. (2007) *Radarinterferometrische Untersuchungen mit ERS-1/2 auf der antarktischen Halbinsel*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

- MORA, O., J. J. MALLORQUI und A. BROQUETAS (2003) Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10):2243–2253.
- NEZAM, S. (2009) Automatische Verifikation und Fortführung von ATKIS-Daten mit Hilfe von Radardaten. Diplomarbeit, Leibniz Universität Hannover.
- NG, A. H.-M., L. GE, X. LI und K. ZHANG (2011) Monitoring ground deformation in Beijing, China with persistent scatterer SAR interferometry. *Springer-Verlag*.
- NIEMEIER, W. (1979) Zur Kongruenz mehrfach beobachteter geodätischer Netze. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, 88.
- NIEMEIER, W. (2008) *Ausgleichsrechnung. Statistische Auswertemethoden (2. Auflage)*. Walter de Gruyter, Berlin, Germany.
- NIVP-ERL. (2003) Das Nivellementpunktfeld in Nordrhein-Westfalen, RdErl. d. Innenministeriums v. 29.6.1993 - III C 3 - 4412, i.d.F. v. 16.01.2002 - 36.3 - 4412 und v. 02.06.2003 - 36.3 - 4412. *Herausgeber: Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen*.
- ODIJK, D. (2005) Integrating Leveling and InSAR Networks for the Monitoring of Subsidence Due to Gas Extraction. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, 130 (1):30–41.
- PELZER, H. (1974) Neuere Ergebnisse bei der statistischen Analyse von Deformationsmessungen. *Archive of the 14th International Congress for Surveyors, Washington*.
- PRATI, C. und A. ROCCA, F. MONTIGUARNIERI (1993) SAR Interferometry Experiments with ERS-1. *Proceedings of 1st ERS-1 Symposium, Cannes, ESA-SP 359:211–218*.
- PRATI, C. und F. ROCCA (1990) Limits to the Resolution of Elevation Maps from Stereo SAR Images. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, No. 12:2215–2235.
- PRATI, C. und F. ROCCA (1994) Use of the spectral shift in SAR interferometry. *Proceedings of 2nd ERS-1 Symposium - Hamburg, Oktober 1993*, 691–696.
- PRATI, C., M. GIANI und N. LEURATTI (1990) Sar interferometry: A 2-D Phase Unwrapping Technique Based on Phase and Absolute Values Informations. *Proceedings of IGARSS*, 2043–2046.
- PRITT, M. D. und J. S. SHIPMAN (1994) Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFTs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3):706–708.
- RABUS, B., M. EINEDER, A. ROTH und R. BAMLER (2003) The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57:241–261.
- RANEY, R. K. (1998) *Radar fundamentals: Technical perspective*. Henderson, F. M. and Lewis, A. J.: Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing 2. New York: John Wiley & Sons, 9-130.

- RATHSMANN, W. (1986) Bodenbewegung als Folge von Grundwasserabsenkung im rheinischen Braunkohlenrevier. *Braunkohle*, 38:82–86.
- RIECHMANN, B. (2009) Anwendung der differentiellen SAR-Interferometrie auf Nukleartestgebiete zur Verifikation des Comprehensive-Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). Diplomarbeit, Universität Hamburg.
- RIECKEN, J., R. BOJE, H.-D. SCHULER und W. SCHÄFER (2011) Die Nutzung von Einfachmessungen für Präzisionsnivelements in Gebieten mit Bodenbewegungen in Nordrhein-Westfalen. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, 1:2–8.
- RSG (2012) RSG - the Remote Sensing software package Graz, online unter <http://dib.joanneum.at/rsg>, letzter Zugriff am 26.07.2012.
- RWE POWER AG (2011) Braunkohle - Mit Energie vorweggehen. RWE Power im Rheinischen Braunkohlerevier. online unter www.rwe.com/rwepower, letzter Zugriff am 12.07.2012, 1–19.
- SCHÄFER, W. (1999) Bodenbewegungen und Bergschadensregulierung im Rheinischen Braunkohlenrevier. *Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen*, Heft 18:150–159.
- SCHÄFER, W. (2004) Bodenbewegungen infolge Sumpfung des rheinischen Braunkohlebergbaus. In: H. Kratzsch, *Bergschadenkunde*, S. 874–880.
- SCHARROO, R., P. VISSER und N. PEACOCK (1998) ERS orbit determination and gravity field model tailoring: recent developments. *Journal of Geophysical Research*, 103:8113–8127.
- SCHUH, W. D. (2003) Numerische Verfahren zur geodätischen Optimierung.
- SCHULER, H. D., H. D. GÜTH und J. RIECKEN (2010) Arbeiten im Projekt DHHN 2006-2011 in Nordrhein-Westfalen. *Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen (NÖV NRW)*, 1:S. 57 – 64.
- SCHWÄBISCH, M. (1995) *Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle*. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Abteilung Operative Planung. Dissertation, DLR-Forschungsbericht 95-15.
- SHANKER AGRAM, P. (2010) Persistent scatterer interferometry in natural terrain. *Dissertation, Stanford University*.
- SHEWCHUK, J. R. (1997) *Delaunay Refinement Mesh Generation*. Dissertation, Carnegie Mellon University Pittsburgh.
- SMALL, D., C. WERNER und D. NÜESCH (1993) Baseline Modelling for ERS-1 SAR Interferometry. *Proceedings of IGARSS, Tokyo*, 1204–1206.
- SÖRGEL, U. (2006) Stand der Technik und Trends der Radarfernerkundung : Festschrift 125 Jahre Geodäsie und Geoinformatik. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover*, 263:295–302.

- SPECKELS, V. (2012) Untersuchung operationeller Aufnahmesysteme zur großflächigen Erfassung von Digitalen Geländemodellen und topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG). *DGPF*.
- SPECKELS, V., U. WEGMÜLLER, T. STROZZI, J. MUSIEDLAK und H.-CH. WICHLACZ (2001) Detection and observation of underground coal mining-induced surface deformation with differential SAR interferometry. *Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7: High Resolution Mapping From Space*.
- STEVENS, N. F. und G. WADGE (2004) Towards Operational Repeat-Pass SAR Interferometry at Active Volcanoes. *Natural Hazards*, 33:47–76.
- TEUNISSEN, P. J. G. (1993) Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities. *Section IV Theory and Methodology, IAG General meeting, Beijing, China*.
- TEUNISSEN, P. J. G. (1995) The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. *Journal of Geodesy*, 70:65–82.
- TEUNISSEN, P. J. G. (2000) *Testing theory: an introduction*. Delft University Press.
- TEUNISSEN, P. J. G., P. J. DE JONGE und C. C. J. M. TIBERIUS (1995) The Lambda-method for fast GPS surveying. *International Symposium GPS Technology Applications, Bucharest, Romania*.
- THONFELD, F. (2007) Erfassung und Charakterisierung städtischer Strukturen am Beispiel Erfurts mittels hoch auflösender optischer und SAR-Daten. Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- VAN LEIJEN, F. und R. HANSEN (2004) Deformation monitoring using radar interferometric time series: a review of methodologies. 1–7.
- VERMKG NRW (2005) Gesetz über die Landesvermessung und das Liegenschaftskataster (Vermessungs- und Katastergesetz - VermKatG NRW), online unter <https://recht.nrw.de/>, letzter Zugriff am 20.06.2012.
- VPERL. (1996) Die Bestimmung von Vermessungspunkten der Landesvermessung in Nordrhein-Westfalen (Vermessungspunkterlaß), RdErl. d. IM vom 12.01.1996 - III - C4 - 7136. *Herausgeber: Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen*.
- WERNER, M. (2001) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Mission Overview. *Frequenz - Journal of Telecommunications*, Vol. 55:75–79.
- WITTE, B. und H. SCHMIDT (2006) *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WRIGHT, P. und R. STOW (1999) Detecting mining subsidence from space. *International Journal of Remote Sensing*, 20:6:1183–1188.

- XIAO, J., J. LI und A. MOODY (2003) A detail-preserving and flexible adaptive filter for speckle suppression in SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 12:2451–2465.
- ZEBKER, H. A., P. A. ROSEN und S. HENSLEY (1997) Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B4:7547–7563.